

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

BAZALT CAM-SERAMİKLERİNİN EROZİF AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Muhammet ÖZTÜRK

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şenol YILMAZ

Haziran 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

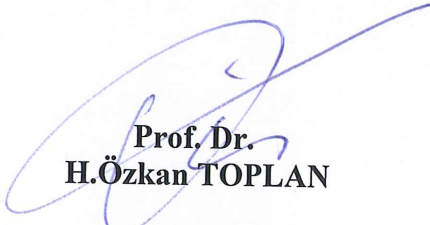
**BAZALT CAM-SERAMİKLERİNİN EROZİF AŞINMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

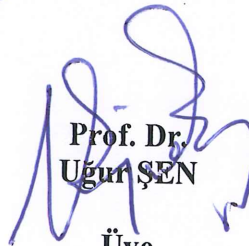
Muhammet ÖZTÜRK

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

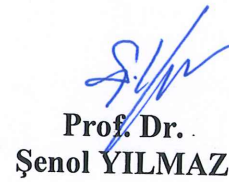
Bu tez 27 / 06 / 2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
H.Özkan TOPLAN

Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Uğur ŞEN

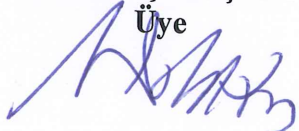
Üye


Prof. Dr.
Şenol YILMAZ

Üye

Doç. Dr.
Mehmet ÇALIŞKAN

Üye



Doç. Dr.
Sinan FİDAN

Üye



BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Muhammet ÖZTÜRK
21.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde olduğu gibi, doktora eğitimimde de değerli fikir ve tecrübeleri ile beni aydınlatan, ayrıca üzerimden manevi desteğini eksik etmeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Şenol YILMAZ'a katkılarından dolayı çok teşekkür ederim. Ayrıca Prof. Dr. Uğur ŞEN'e, Doç.Dr. Ediz ERCENK'e ve Dr. Öğr. Üyesi Günhan BAYRAK'a fikir ve tecrübelerini benimle paylaşarak benden desteklerini esirgemedikleri için teşekkürü bir borç bilirim.

Deneyisel çalışmalarım esnasında her türlü imkânlarından yararlandığım Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, başta Bölüm Başkanı sayın Prof. Dr. Cuma BİNDAL olmak üzere tüm bölüm öğretim üyelerine ve araştırma görevlilerine teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmaların bir kısmında, Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi laboratuvarından yararlanılmıştır. Bu imkân ve olanakları bize sunan sayın Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e ve Doç. Dr. Sinan FİDAN'a teşekkür ederim. Doktora çalışmalarım boyunca tez izleme jürisinde görev alarak teknik birikim ve tecrübeleri ile katkı sağlayan sayın Prof. Dr. Hüseyin Özkan TOPLAN'a ve Doç. Dr. Mehmet ÇALIŞKAN'a teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan maddi ve manevi destekleriyle katkı sağlayan anneme, babama ve kardeşlerime, yanımda hissettiğim arkadaşlarıma ve en önemlisi doktora eğitimim boyunca her zaman desteğini hissettiren, yanımda olan ve bana güvenen sevgili eşim Gülşah KOCAK ÖZTÜRK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xviii
ÖZET	xx
SUMMARY	xxi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ VE AMAÇ	1
BÖLÜM 2.	
VOLKANİK KAYAÇLAR	5
2.1. Giriş	5
2.2. Kayaçlar	8
2.2.1. Magmatik (volkanik) kayaçları	10
2.2.2. Metamorfik (başkalaşım) kayaçları	13
2.2.3. Tortul (sedimental) kayaçlar	15
2.3. Bazalt	16
BÖLÜM 3.	
CAM VE CAM-SERAMİKLER	21
3.1. Camlar	21
3.1.1. Camların tarihçesi	21
3.1.2. Camların tanımı	25

3.1.3. Camların yapıları	28
3.1.4. Cam çeşitleri	32
3.1.4.1. Oksit camlar	32
3.1.4.2. Oksit olmayan camlar	34
3.1.4.3. Organik camlar	34
3.1.4.4. Metalik camlar.....	35
3.1.5. Cam üretimi	37
3.2. Cam-Seramikler	41
3.2.1. Cam-seramiklerin tanımı	41
3.2.2. Cam-seramiklerin tarihçesi	42
3.2.3. Camlarda faz dönüşümleri	43
3.2.3.1. Kristalizasyon	43
3.2.3.2. Faz ayrışması	50
3.2.4. Cam seramik üretimi	51
3.2.4.1. Klasik cam-seramik üretimi	51
3.2.4.2. Toz yöntemleri ile cam-seramik üretimi	56
3.2.4.3. Sol-jel yöntemi ile cam-seramik üretimi	57
3.2.5. Cam-seramik sistemleri	58
3.2.5.1. $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ cam-seramik sistemi (MAS)	58
3.2.5.2. $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$ cam-seramik sistemi (LAS)	59
3.2.5.3. $Li_2O-ZnO-SiO_2$ cam-seramik sistemi	61
3.2.5.4. $Li_2O-MgO-SiO_2$ cam-seramik sistemi	62
3.2.5.5. $BaO-Al_2O_3-SiO_2$ cam-seramik sistemi	63
3.2.5.6. $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ cam-seramik sistemi (CAS)	63
3.2.6. Doğal kayalardan üretilen cam-seramikler	64
3.2.7. Atıklardan üretilen cam-seramikler	66
3.2.7.1. Termik santral ucucu külleri ile üretilen cam-seramikler	67
3.2.7.2. Yüksek fırın cürufaları ile üretilen cam-seramikler .	68
3.2.8. Cam-seramiklerin özellikleri	68
3.2.9. Cam-seramiklerin kullanım alanları	70

BÖLÜM 4.

AŞINMA VE KATI PARTİKÜL EROZYONU	74
4.1. Giriş	74
4.2. Aşınma Mekanizmaları	76
4.2.1. Adhezif aşınma	76
4.2.2. Abrezif aşınma	78
4.2.3. Korozyon aşınması	80
4.2.4. Yorulma aşınması	82
4.2.5. Eroziyon aşınma	83
4.3. Katı partikül erozyonu	86
4.3.1. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı	90
4.3.2. Aşındırıcı partiküllerin hızı.....	92
4.3.3. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debisi	94
4.3.4. Aşındırıcı partiküllerin özellikleri	94
4.3.5. Aşınan (hedef) malzemenin özellikleri	96
4.4. Seramiklerde ve cam-seramiklerde aşınma	96

BÖLÜM 5.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	101
5.1. Giriş	101
5.2. Malzemeler	102
5.2.1. Hedef malzeme	102
5.2.2. Aşındırıcı malzemeler	104
5.2.2.1. Sodyum feldspat	104
5.2.2.2. Garnet	106
5.2.2.3. Silisyum karbür (SiC)	107
5.3. Deney Programı Ve Yöntem	109
5.3.1. Eroziyon aşınma deneyleri	110
5.3.1.1. Katı partikül eroziyon aşınma test ünitesi	111
5.3.1.2. Katı partikül eroziyon aşınma deneyleri	112
5.4. Deneylerde Kullanılan Cihazlar	114
5.4.1. Taramalı elektron mikroskopu (SEM)	114

5.4.2. Optik profilometre	116
5.4.3. Aşınma yüzeylerinin makro görüntülenmesi	117

BÖLÜM 6.

DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME.....	118
6.1. Giriş	118
6.2. Aşındırıcı Partiküllerin Taramalı Electron Mikroskobu (SEM)	
Analizleri	119
6.2.1. Sodyum feldspat aşındırıcı partiküllerin SEM analizleri	119
6.2.2. Garnet aşındırıcı partiküllerin SEM analizleri.....	121
6.2.3. Silisyum karbür aşındırıcı partiküllerin SEM analizleri.....	122
6.3. Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debilerinin Hesabı	123
6.3.1. Sodyum feldspat aşındırıcı partiküllerin kütlesel debileri....	124
6.3.2. Garnet aşındırıcı aşındırıcı partiküllerin kütlesel debileri ...	125
6.3.3. Silisyum karbür aşındırıcı partiküllerin kütlesel debileri	126
6.4. Eroziyon Aşınma Oranları.....	127
6.4.1. Aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranlarına etkisi	129
6.4.2. Partikül püskürtme basıncının erozyon oranlarına etkisi	136
6.4.3. Partikül çarpma açısının erozyon oranlarına etkisi	141
6.4.4. Erozyon oranlarının kontur diyagramları.....	151
6.5. Bazalt Cam-Seramiklerinin Aşınma Yüzey Analizleri	156
6.5.1. Aşındırılan bazalt cam-seramiklerinin optik profilometre	
görüntüleri	157
6.5.1.1. Sodyum feldspat aşındırıcı partikülleri ile oluşan	
aşınma yüzeyleri	157
6.5.1.2. Garnet aşındırıcı partikülleri ile oluşan aşınma	
yüzeyleri	162
6.5.1.3. Silisyum karbür aşındırıcı partikülleri ile oluşan	
aşınma yüzeyleri	166
6.5.2. Aşındırılan bazalt cam-seramiklerinin makro görüntüleri	171
6.5.2.1. Sodyum feldspat ile aşındırılan yüzeyler.....	171
6.5.2.2. Garnet ile aşındırılan yüzeyler	173

6.5.2.3. Silisyum karbür ile aşındırılan yüzeyler	175
---	-----

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	178
---------------------------	-----

7.1. Sonuçlar	178
---------------------	-----

7.2. Öneriler.....	184
--------------------	-----

KAYNAKLAR	186
-----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ	198
----------------	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Δm_s	: Numunenin kütle kaybı
ΔG_a	: Aktivasyon serbest enerjisi
$2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	: Forsterit
$2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$	: Kordiyerit
$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	: Mullit
3D	: Üç boyutlu
A	: Cam için sabit bir değer
ASTM	: Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
B	: 10^{41} - $10^{42} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ arasında değişen bir sabit sayı
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	: Anortit
CAS	: $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ sistemi
E	: Erozyon oranı
E_c	: Vizkoz akış aktivasyon enerjisi
EDX	: Enerji dağılımlı X-ray
H_a	: Aşındırıcı partikülün sertliği
HfF_4	: Hafniyum Florür
H_s	: Yüzey sertliği
HV	: Sertlik
HVOF	: Yüksek hızlı oksijen yakıtlı
k	: Deneysel bir sabit
$\text{KA1Sİ}_3\text{O}_8$	: Ortoklaz
k_B	: Boltzman sabiti
LAS	: $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ sistemi
$\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	: β -ökriptit
$\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$	: β -spodümen
m	: Aşınan malzemenin kütlesi

M.Ö.	: Milattan önce
M.S.	: Milattan sonra
MAS	: MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ sistemi
m_e	: Aşındırıcı kütlesi
MgO.SiO ₂	: Spinel
n	: Malzemenin ve partiküllerin karakteristik özellikleri
NaAlSi ₃ O ₈	: Albit
Na-Feldspat	: Sodyum feldspat
ø	: Sıvılarda akıcılık
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
R	: Gaz sabitesi
r	: Çekirdek yarıçapı
r^*	: Kritik çekirdek yarıçapı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
S _{k-a}	: Kristal alt tabaka
SrO	: Stronsiyum oksit
S _{s-k}	: Sıvı-kristal ara yüzey enerjileri
T	: Sıcaklık (K)
t	: İşlemin devam etme süresi
TAS	: Toplam alkali-Silisyumoksit
T _g	: Cam geçiş sıcaklığı
T _m	: Ergime sıcaklığı
v	: Aşındırıcı partikül hız değeri
V _d	: Demetin hacmi
V _m ,	: Kristal fazın molar hacmi,
XRD	: X -ışını difraksiyonunda
yy	: Yüz yıl
ZAS	: ZrO ₂ -Al ₂ O ₃ -SiO ₂ sistemi
ΔG^*	: Çekirdeklenmenin olması için aşılması gerek enerji
ΔG_v	: Serbest enerji (sıvı-katı faz dönüşümü esnasında)
σ_{k-a}	: Kristal-alt tabaka ve arasındaki ara yüzey enerjileri
σ_{s-a}	: Sıvı-alt tabaka

σ_{s-k} : Sıvı-kristal
 η : Viskozite



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Dünyanın kesiti	5
Şekil 2.2.	Dünya üzerinde yer alan aktif volkanlar	6
Şekil 2.3.	Volkanizma ve lav akıntılarına örnek resimler	7
Şekil 2.4.	Kayaç döngüsü	9
Şekil 2.5.	Kayaç türleri ve özellikleri	10
Şekil 2.6.	Dış püskürük ve iç püskürük kayaçlar	11
Şekil 2.7.	Volkanik kayaçlar için toplam alkali-SiO ₂ (TAS) diyagramı (songliao havzasından Q: kuvars, Ol: olivin) ve Oksitlerin miktarına göre volkanik kayaçların isimlendirilmesi	12
Şekil 2.8.	Dış püskürük (yüzey) kayaçları	12
Şekil 2.9.	İç püskürük (derinlik) kayaçları	13
Şekil 2.10.	Metamorfizmaya uğrayan kayaç örnekleri	14
Şekil 2.11.	Metamorfik kayaçlar	15
Şekil 2.12.	Bazalt kayaçları	17
Şekil 2.13.	(a) Hirtstein üzerindeki bazalt tabakaları (Erzgebirge-Almanya), (b) Romanya'nın doğusunda Detunata Kalesi bazalt kayaları (Bucium-Romanya)	20
Şekil 3.1.	Doğal obsidyen	22
Şekil 3.2.	Venedik camı (El yapımı)	23
Şekil 3.3.	Cam şekillendirme aletleri	24
Şekil 3.4.	1960'lı yıllarda Float (yüzdürme) yöntemiyle cam üretimi	25
Şekil 3.5.	Camlaşma özelliği gösteren malzemelerde sıcaklık-hacim değişimi ..	27
Şekil 3.6.	SiO ₄ ⁻⁴ tetrahedrallerinden oluşmuş beş farklı silikat yapısı	29
Şekil 3.7.	(a) kristal, (b) Amorf yapılar	29
Şekil 3.8.	XRD paternleri, (a) kristalin malzemeler, (b) amorf malzemeler	30

Şekil 3.9. Sodyum-silikat camlarını oluşturan iyonların (Si^{4+} , O^{2-} ve Na^{+}) şematik gösterimi.....	31
Şekil 3.10. Organik camların bazı kullanım alanları	35
Şekil 3.11. Metalik camlardan üretilen spor malzemeleri	36
Şekil 3.12. Cam üretim işlem basamakları şematik ifadesi	37
Şekil 3.13. Cam ergitme aşamaları	39
Şekil 3.14. Sıcaklığa bağlı olarak camın vizkozitesi	40
Şekil 3.15. Camlarda faz dönüşümleri	43
Şekil 3.16. Yüzey kristalizasyonunun, a) başlangıcı, b) ilerlemesi, c) tamamlanması	44
Şekil 3.17. Hacim kristalizasyonu, a) çekirdek oluşumu b) çekirdeğin büyümesi, c) cam-seramik mikroyapısı	44
Şekil 3.18. Çekirdeğin büyümesi ile serbest enerjideki değişim	45
Şekil 3.19. Aşırı soğuma (ΔT) ile çekirdeklenme arasındaki ilişki	47
Şekil 3.20. Kristal demetin (katı alt tabaka üzerinde) oluşumu.....	49
Şekil 3.21. Cam-seramiğin ($\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$) genel ısıtma işlem diyagramı	52
Şekil 3.22. Cam-seramiğin kristalizasyonu, a) çekirdeklenme ve kristal büyümesine sıcaklığın etkisi, b) iki aşamalı ısıtma işlem	54
Şekil 3.23. Tek aşamalı ısıtma işlem ile cam-seramiğin kristalizasyonu, a) çekirdeklenme ve kristal büyüme hızı eğrilerinin sıcaklığa bağımlılığı ve üst üste çakışması b) tek aşamalı ısıtma işlem	55
Şekil 3.24. Toz yöntemi ile cam-seramik üretimi şematik görüntüsü, a) kompakt cam (toz halinde), b) yoğunlaşma ve kristalizasyonun başlaması, c) cam-seramik	56
Şekil 3.25. $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ sisteminde, a) Cam oluşum bölgesi (% mol), b) üçlü denge diyagramı	59
Şekil 3.26. LAS siminde negatif termal genleşmenin olduğu alan	60
Şekil 3.27. $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ sistemin, a) cam oluşumuna uygun bölgesi, b) üçlü denge diyagramı	61
Şekil 3.28. Cam oluşum bölgesi ($\text{Li}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2$ sisteminde)	62
Şekil 3.29. Cam oluşum bölgesi ($\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{SiO}_2$ sisteminde (% mol))	62
Şekil 3.30. Cam oluşum bölgesi ($\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ sisteminde)	63

Şekil 3.31. Faz diyagramı (CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂)	64
Şekil 3.32. Bazalt cam-seramikler	66
Şekil 3.33. Cam-seramikler, a) savunma sanayinde kullanılan füze başlığı, b) mutfak eşyaları	71
Şekil 3.34. Ergitilmiş bazalt cam-seramiklerinin bazı uygulamaları	72
Şekil 4.1. Aşınma eğrileri	74
Şekil 4.2. Aşınmanın temas tipleri ve anahtar kelimeleri	75
Şekil 4.3. Tribosistemim şematik ifadesi	76
Şekil 4.4. Adhezif aşınma, a) kaymadan önce yüzeylerin birbirine teması ile yapışma, b) yapışmadan kaynaklanan plastik deformasyon ile malzeme kaybı	77
Şekil 4.5. Adhezyon mekanizması ile malzeme transferi	77
Şekil 4.6. Abrezif aşınmanın a) iki elemanlı, b) üç elemanlı şematik gösterim ..	78
Şekil 4.7. Abrezif aşınma direnci-sertlik (iki elemanlı aşınma) ilişkisi	79
Şekil 4.8. Abrezif aşınma mekanizmalar	79
Şekil 4.9. Korozyif aşınmanın şematik ifadesi	80
Şekil 4.10. Yüzeyde meydana gelen çatlak oluşumları ve ilerlemesi	82
Şekil 4.11. Erozyon aşınması	84
Şekil 4.12. Erozyon aşınmasını etkileyen parametreler	85
Şekil 4.13. Erozyon mekanizmalarının şematik gösterimi	85
Şekil 4.14. Katı partikül erozyonu deney düzeneğinin şematik gösterimi	87
Şekil 4.15. Katı partikül erozyonu mekanizması	88
Şekil 4.16. Katı partikül erozyonuna maruz kalmış a) türbin bıçakları, b) buhar kazan borusu ve c) Enerji hatlarında rüzgar yönüne bağlı olarak aşındırıcı partiküllerin çarpma açısının değişimi	89
Şekil 4.17. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler	90
Şekil 4.18. Sünnek ve gevrek malzemelerin partikül çarpma açısı-aşınma hızı ilişkisi	91
Şekil 4.19. Gevrek/sünnek malzemelerde partikül erozyonu karakteristikleri	92
Şekil 4.20. Çarpma hızına ve açısı bağlı olarak erozyon mekanizmaları a) abrazif etki, düşük çarpma açısında, b) yüksek açı düşük hızda yorulma, c) yüksek açı orta hızda gevrek kırılma ya da plastik	

deformasyon, d) yüzeyde meydana gelen erime (yüksek hızda), e) erozyonun ikincil etkileri, f) kristal latisindeki atomsal erozyon	93
Şekil 4.21. Normal yük altında bir katı parçacık ile yüzey arasındaki temasın gösterimi, a) $H_a > 1,2 H_s$ parçacık yüzeyi girintili olur, b) $H_a < 1,2 H_s$ keskin köşeler körleşir plastik akış meydana gelir	95
Şekil 4.22. Cam-seramik bünyedeki yorulma aşınması izlerinin SEM yapıları ...	99
Şekil 5.1. Bazalt cam-seramiğin (a) Ticari ürün boyutu, (b) deney numunesi boyutu ön ve arka yüzünün makro görüntüleri	102
Şekil 5.2. Deneylerde kullanılan bazalt cam-seramik numunelerin boyutları ...	103
Şekil 5.3. Deneysel çalışma işlem basamakları	109
Şekil 5.4. Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan erozif aşınma test ünitesi	111
Şekil 5.5. Püskürtme kabini içerisindeki ayarlanabilir numune fikstürü ve püskürtme nozulu.....	112
Şekil 5.6. Numune fikstürü içerisinde, numune-nozul mesafesi 20 mm ve 90° açı ile sabitlenmiş numune	113
Şekil 5.7. Taramalı elektron mikroskobunun yapısı	115
Şekil 5.8. Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan SEM cihazı	116
Şekil 5.9. Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi laboratuvarında bulunan optik profilometre	117
Şekil 6.1. Aşındırma partiküllerinin SEM analiz şeması	119
Şekil 6.2. Öğütülmüş sodyum feldspat (ESF 501 SG) aşındırıcı partiküllerinin SEM görüntüleri	120
Şekil 6.3. Flote sodyum feldspat (ESF 501 GG) aşındırıcı partiküllerinin SEM görüntüleri	120
Şekil 6.4. Garnet C (30-60 mesh) aşındırıcı partiküllerinin SEM görüntüleri	121
Şekil 6.5. Garnet E (120 mesh) aşındırıcı partiküllerinin büyütmelerdeki SEM görüntüleri	122
Şekil 6.6. SiC F 36 (425-600 μm) aşındırıcı partiküllerinin SEM görüntüleri	123
Şekil 6.7. SiC F 180 (53-90 μm) aşındırıcı partiküllerinin SEM görüntüleri	123

Şekil 6.8. Öğütülmüş Na-feldspat (ESF 501 SG, -63 μm) ve flote Na-feldspat (ESF 501 GG, -300 μm) partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağı olarak değışimi	125
Şekil 6.9. Garnet C (30-60 mesh 200-600 μm), garnet E (120 mesh 180-250 μm) partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağı olarak değışimi.....	126
Şekil 6.10. SiC F 36 ve SiC F 180 partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağı olarak değışimi	127
Şekil 6.11. Na-feldspat flote (ESF 501 GG) -300 μm ve Na-Feldspat öğütülmüş (ESF 501 SG) -63 μm aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin tane boyutuna göre erozyon oranları	130
Şekil 6.12. Garnet C (30-60 mesh) 200-600 μm , garnet E (120 mesh) 180-250 μm aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin tane boyutuna göre erozyon oranları	132
Şekil 6.13. SiC F 36 (425-600 μm) ve SiC F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin tane boyutuna göre erozyon oranları	134
Şekil 6.14. Na-Feldspat öğütülmüş (ESF 501 SG) -63 μm ve Na-feldspat flote (ESF 501 GG) -300 μm aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin püskürtme basıncına göre erozyon oranları	136
Şekil 6.15. Garnet E (120 mesh) 180-250 μm ve garnet C (30-60 mesh) 200-600 μm aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin püskürtme basıncına göre erozyon oranları	138
Şekil 6.16. SiC F 180 (53-90 μm) ve SiC F 36 (425-600 μm) aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin püskürtme basıncına göre erozyon oranları	140
Şekil 6.17. Na-Feldspat öğütülmüş (ESF 501 SG) -63 ve Na-feldspat flote (ESF 501 GG) -300 μm aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin partikül çarpma açısına göre erozyon oranları	143

Şekil 6.18. Garnet E (120 mesh) 180-250 µm ve garnet C (30-60 mesh) 200-600 µm, aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin partikül çarpma açısına göre erozyon oranları	146
Şekil 6.19. SiC F 180 (53-90 µm) ve SiC F 36 (425-600 µm) aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin partikül çarpma açısına göre erozyon oranları	149
Şekil 6.20. (a) Na-feldspat ESF 501 SG, (-63 µm) ve (b) Na-Feldspat ESF 501 GG, (-300 µm) aşındırıcı partikülleri ile elde edilen erozyon oranlarının kontur diyagramları	152
Şekil 6.21. (a) Garnet E (120 mesh, 180-250 µm) ve (b) garnet C (30-60 mesh, 180-600 µm) aşındırıcı partikülleri ile elde edilen erozyon oranlarının kontur diyagramları	153
Şekil 6.22. (a) SiC F 180 (53-90 µm) ve (b) SiC F 36 (425-600 µm) aşındırıcı partikülleri ile elde edilen erozyon oranlarının kontur diyagramları ...	154
Şekil 6.23. Na-Feldspat ESF 501 SG -63 µm aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	158
Şekil 6.24. Na-Feldspat ESF 501 SG -63 µm aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ve 60° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	158
Şekil 6.25. Na-Feldspat ESF 501 SG -63 µm aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ve 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	159
Şekil 6.26. Na-Feldspat ESF 501 SG -63 µm aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	160
Şekil 6.27. Na-Feldspat ESF 501 SG -63 µm aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 60° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilemetre görüntüleri	161

Şekil 6.28. Na-Feldspat ESF 501 SG -63 μm aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	161
Şekil 6.29. Garnet E 120 mesh (180-250 μm) aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	163
Şekil 6.30. Garnet E 120 mesh (180-250 μm) aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ve 60° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	163
Şekil 6.31. Garnet E 120 mesh (180-250 μm) aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ve 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	164
Şekil 6.32. Garnet E 120 mesh (180-250 μm) aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	165
Şekil 6.33. Garnet E 120 mesh (180-250 μm) aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 60° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	165
Şekil 6.34. Garnet E 120 mesh (180-250 μm) aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	166
Şekil 6.35. SiC F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar püskürtme basıncı ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	167
Şekil 6.36. SiC F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar püskürtme basıncı ve 60° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	167

Şekil 6.37. SiC F 180 (53-90 µm) aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar püskürtme basıncı ve 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri	168
Şekil 6.38. SiC F 180 (53-90 µm) aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilemetre görüntüleri	169
Şekil 6.39. SiC F 180 (53-90 µm) aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 60° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilemetre görüntüleri	169
Şekil 6.40. SiC F 180 (53-90 µm) aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilemetre görüntüleri	170
Şekil 6.41. Bazalt cam-seramiklerinin Na-Feldspat ESF 501 SG -63µm aşındırıcı partikülleri ile (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşındırılmış yüzeylerinin optik görüntüleri .	172
Şekil 6.42. Bazalt cam-seramiklerinin Na-Feldspat ESF 501 GG -300 µm aşındırıcı partikülleri ile (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşındırılmış yüzeylerinin optik görüntüleri .	172
Şekil 6.43. Bazalt cam-seramiklerinin garnet E 120 mesh 180-250 µm aşındırıcı partikülleri ile (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşındırılmış yüzeylerinin optik görüntüleri	174
Şekil 6.44. Bazalt cam-seramiklerinin garnet C 30-60 mesh 200-600 µm aşındırıcı partikülleri ile (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşındırılmış yüzeylerinin optik görüntüleri .	174
Şekil 6.45. Bazalt cam-seramiklerinin SiC F 180 53-90 µm aşındırıcı partikülleri ile (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşındırılmış yüzeylerinin optik görüntüleri	175
Şekil 6.46. Bazalt cam-seramiklerinin SiC F 36 425-600 µm aşındırıcı partikülleri ile (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşındırılmış yüzeylerinin optik görüntüleri	176

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Alkali, olivin ve toleitik bazaltlarının kimyasal bileşimleri	18
Tablo 2.2. Batı Karadeniz ve Trakya Bölgesi bazaltlarına ait kimyasal bileşimler	19
Tablo 3.1. Obsidyen, Mısır camı (M.Ö. 1500), İtalya camı (M.Ö 9000) ve Cam şişe, kimyasal bileşimleri	23
Tablo 3.2. M.S. camcılığın gelişmesindeki aşamalar	25
Tablo 3.3. Bazı element ve bileşiklerin erime sıcaklıklarındaki viskozite değerleri	28
Tablo 3.4. Cam yapılarında yer alan oksitler	31
Tablo 3.5. Ülkemizdeki bazı bazaltların kimyasal bileşimleri	65
Tablo 3.6. Bazı mühendislik malzemeleri ile cam-seramiklerin bazı fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması	69
Tablo 3.7. Cam-seramiklerin, bazı seramik ve metallerle eğme mukavemetlerinin karşılaştırılması	70
Tablo 3.8. Cam-seramiklerin, bazı cam ve seramiklerle elastik modüllerinin karşılaştırılması	70
Tablo 4.1. Korozyon çeşitleri	81
Tablo 4.2. Aşınma uygulamalarında kullanılan ticari seramik malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri	98
Tablo.5.1. Ticari bazalt cam-seramiğin bileşimi ve fiziksel özellikleri	103
Tablo 5.2. Na-Feldspat (Albit)'ın fiziksel özellikleri	105
Tablo 5.3. Öğütülmüş (ESF 501 SG) ve flote (ESF 501 GG) Na-feldspat mineralinin kimyasal bileşimi	105
Tablo 5.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan garnet minerallerinin fiziksel özellikleri	106

Tablo 5.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan garnet mineralinin kimyasal özellikleri ve minerolojik yapısı	107
Tablo 5.6. Silisyum karbürün (α -SiC ve β -SiC) özellikleri	108
Tablo 5.7. Katı partikül erozif aşınma deneylerinde kullanılan parametreler	110
Tablo 6.1. Na-feldspat (ESF 501 SG) -63 μ m ve flote Na-feldspat (ESF 501 GG) -300 μ m partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağı olarak değışimi	124
Tablo 6.2. Garnet C (30-60 mesh 200-600 μ m), garnet E (120 mesh 180-250 μ m) partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağı olarak değışimi	125
Tablo 6.3. SiC F 36 ve SiC F 180 partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağı olarak değışimi	126
Tablo 6.4. Na-feldspat flote (ESF 501 GG) -300 μ m ve Na-Feldspat öğütölmüş (ESF 501 SG) -63 μ m aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin erozyon oran verileri	128
Tablo 6.5. Garnet C (30-60 mesh) 200-600 μ m, garnet E (120 mesh) 180-250 μ m aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin erozyon oran verileri	128
Tablo 6.6. SiC F 36 (425-600 μ m) ve SiC F 180 (53-90 μ m) aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin erozyon oran verileri	128

ÖZET

Anahtar kelimeler: Cam-seramikler, bazalt, aşınma, katı partikül erozyonu.

Bu çalışmada, ticari olarak üretilen bazalt esaslı cam-seramiklerinin erozif aşınma davranışları incelenmiştir. Plakalar halinde (200 x 200 x 30 mm ölçülerinde) temin edilen bazalt cam-seramikleri seramik kesiciler yardımı ile kesilerek laboratuvar ölçekli (50 x 50 x 12 mm ölçülerine) test numunesi boyutlarına indirilmiştir. Sodyum feldspat, garnet ve silisyum karbür tozları iki farklı tane boyutunda seçilerek aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Katı partikül erozyon test düzeneğinde, aşındırma partikülü olarak kullanılan sodyum feldspat, garnet ve silisyum karbürün, 1,5 – 3 ve 4 bar basınçlarda 30 saniye püskürtülerek kütleli debileri hesaplanmıştır ve bu veriler erozyon oranı hesaplarında kullanılmıştır. Test numuneleri, katı partikül erozyon test düzeneğinde, 7,8 mm çapındaki nozul ile ayarlanabilir numune fikstürü arasında 20 mm mesafe olacak şekilde ayarlanmıştır. İlk ağırlıkları belirlenen numuneler numune fikstürü üzerine sabitlenmiştir. Numune fikstürü, 30° - 45° - 60° - 75° - 90° açılarında ayarlanmış ve aşındırma partikülleri 1,5 – 3 – 4 bar basınçlarında 20 saniye püskürtülerek katı partikül erozyon aşınmasına maruz bırakılmıştır. Aşındırma sonrası ağırlıkları belirlenmiştir. İlk ve son ağırlıkları belirlenen bazalt cam-seramik numuneleri üzerindeki ağırlık farkı hesaplanmış ve aşındırma partiküllerinin kütleli debi verileri erozyon oranı formülü ile erozyon oranları hesaplanmıştır.

Test edilmiş numuneler üzerinde, makro görüntüleri alınmış ve optik profilometre yardımı ile aşındırma yüzeyleri hakkında bilgi edinilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda sonuçlar irdelenmiş ve bazalt cam-seramiklerinin aşındırıcı partiküllere karşı katı partikül erozyonu değerlendirilmiştir.

Deneyisel çalışmalar sonucunda en fazla aşınmanın SiC partikülleri olduğu görülmüştür. Bazalt cam-seramikleri üzerinde sodyum feldspat partiküllerinde büyük tane boyutunun etkili olduğu görülürken, garnet ve silisyum karbür aşındırma partiküllerinde küçük tane boyutlarının daha fazla aşındırıcı etkisi olduğu göze çarpmaktadır. Partikül püskürtme basıncının artmasıyla birlikte aşınma da artmıştır. 60° partikül çarpma açılarında yapılan testlerde aşınmanın genel olarak daha yüksek olduğu görülmektedir.

INVESTIGATION OF EROZIVE WEAR PROPERTIES OF BASALT GLASS-CERAMICS

SUMMARY

Keywords: Glass-ceramics, basalt, wear, solid particle erosion.

In this study, erosive wear behaviors of commercially produced basalt glass-ceramics were investigated. Basalt glass-ceramics supplied in the form of plates (200 x 200 x 30 mm) were cut by ceramic cutters and prepared as laboratory scale (50 x 50 x 12 mm) test sample dimensions. Sodium feldspar, garnet and silicon carbide powders were selected as two different grain sizes and the erosion tests were carried out.

In the solid particle erosion testing setup, mass flow rates of abrasion particles; sodium feldspar, garnet and silicon carbide were determined by erosion tests for 30 seconds at 1,5 - 3 and 4 bar pressures and these data were used in erosion rate calculations. The test specimens were adjusted to a distance of 20 mm between the nozzle having 7.8 mm diameter and the adjustable sample in the solid particle erosion test setup. The samples whose initial weights were determined were fixed on the sample fixture. The sample fixture was adjusted at 30° - 45° - 60° - 75° - 90° and the abrasive particles were subjected to solid particle erosion wear by spraying at 1.5 - 3 - 4 bar for 20 seconds, after the wear, sample weights were determined. The weight difference of the basalt glass-ceramic samples was calculated and the erosion rates were calculated by the formula.

Macro images of the sample were taken and the data about eroded surfaces were obtained from the optical profilometer after the tests. According to the obtained data, the results were examined and solid particle erosion properties of basalt glass-ceramics against abrasive particles were evaluated.

As a result of experimental studies, it was observed that the most abrasive particle was SiC. While it is seen that large grain size is effective in sodium feldspar particles on basalt glass-ceramics, it is observed that small grain sizes have a more erosive effect on garnet and silicon carbide particles. The wear effects increased with increasing particle pressure and generally, wear is more effective in tests performed at 60 ° impact angles.

BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ

İnsanların hayatlarını kolaylaştıran ve hızla ilerleyen teknolojilerin gelişimi, elektronik alandaki gelişmeler kadar, malzeme biliminin gelişmesine de bağlı olduğu ve uygun malzemelerin üretilebilirliği ile ilişkilidir. Bir malzemenin ilerlemesi, teknolojinin aşamalı olarak gelişmesini beraberinde getirmektedir. Malzeme bilimi, malzemelerin yapıları ile o malzemenin özelliklerini ortaya çıkartılması ile ilgilidir [1,2]. Teknolojinin bütün alanlarında yeni malzemelerin üretilmesi, üretilmiş bir malzemenin sahip olduğu özelliklerin iyileştirmesi ve geliştirilmesi üzerinde birçok çalışmanın yapılmasını zorunlu kılmaktadır [2]. Mühendislik malzemeleri, çalışma esnasında aşındırıcı ortamlarda zararlı dış etkilere maruz kalmaktadır [3]. Sürtünme ve aşınmaya sebep olan malzeme kayıplarını minimum seviyelere indirmek için çözüm üretmek, kaynakları optimum seviyede kullanmaya yönelik çalışan, mühendislik bilimi ve teknoloji alanı olarak tanımlanan triboloji, önemli bir konumu ile yaşamın içindedir. Günümüz teknolojisinde triboloji, bilimde, teknikte ve ekonomide etkisini göstermektedir [4,5]. Triboloji biliminde, malzeme performansında etkili parametreler, kimyasal dayanım, yorulma dayanımı, mukavemet, kırılma tokluğu, yoğunluk, aşınma direnci, sertlik, ısı iletkenlik, termal şok dayanımı ve ısı 1 genleşmedir [6].

Birden fazla mineral topluluklarının bir araya gelmesi ya da çok miktarda bir mineralin birikmesiyle oluşan katı birikimleri kayaç olarak ifade edilir ve oluşumları esnasında doğal ortamı yansıtır [7,8]. Kayaçların sınıflandırılması, kimyasal bileşenlerine, mineral yapılarına, içerisindeki bileşenlerin oluşumuna neden olan etkilere göre olmaktadır. Bu sınıflandırma, magmatik kayaçlar, başkalaşım ve tortul kayaçları olmak üzere üç çeşittir [7]. Bazaltlar, dünya genelinde en önemli kayaçlardır ve yer kabuğunun 2,5 milyon km²'den fazla yüzeyini kaplamaktadırlar. Bazalt, granit gibi birden fazla mineralin bir araya gelmesi ile

oluşabileceği gibi, mermer, kuvarsit gibi tek bir mineralden de kayalar oluşabilmektedir. Bazalt kayaları, yüksek çekme mukavemetine sahiptir, serttir ve kimyasal dirençleri yüksektir ve bu nedenle aşınmaya karşı etkili cam-seramiklerin üretiminde kullanılmaktadır [8-10]. Bazaltların oluşumu, akıcı ve bazaltik lavların bir volkan bacasından, çatlaklardan, ya da yarıklardan yeryüzüne çıkarak soğuması ve soğuma yüzeyine dik olarak beş ve altı kenarlı sütunlar şeklinde katılaşması şeklindedir. Bazalt lavlarının oluşum sıcaklıkları 1100-1200 °C civarlarındadır [8,9,11]. Bazalt, koyu gri-siyah arasında renklere sahiptir ve ince tanelidir. Dünyada oldukça fazla bulunmasından dolayı ucuzdur ve temin edilmesi kolaydır [11,12].

Cam mikro yapılarının gerekli faz dönüşümlerinin sağlanması ile Amerika Birleşik Devletleri'nde (A.B.D) faaliyet gösteren Corning Glass Works tarafından, ışığa karşı duyarlı camların üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda cam-seramikler elde edilmiştir ve 1957'de S.D. Stokey ile Pyroceram adıyla fırın soğutma malzemesi olarak ticari olarak satışa sunulmuştur [13,14]. Polikristalin malzeme olan cam-seramikler, özel bileşimlerde hazırlanan camların, kontrollü bir şekilde kristalize edilerek üretilen kristalli malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Kristalizasyon, fazların çekirdeklenerek büyümesi ve dikkatli bir şekilde ısı işlem olmak üzere iki aşamada gerçekleşir [10,14-16]. Saf oksitler ile üretilen cam-seramiklerin yanında, camlaşma kabiliyeti olan bir takım hammaddeler ile veya atık diye tabir edilen, yüksek fırın cürufu, uçucu küller, çimento üretiminde açığa çıkan bazı atıklar ile de elde edilebilir [10]. Bazalt, % 40-55 oranında SiO_2 ve % 10-20 oranında Al_2O_3 içerir. Silika miktarı yüksek olduğu için cam-seramik yapımında kullanılabilir [12].

Aşınma, malzemelerin temas eden yüzeylerinde mekanik bir etki ve bağlı hareket ile ortaya çıkan yüzey hasarı ve malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır [4,10,17,18]. Temasta bulunan yüzeyler hareket ettiklerinde aşınma ve oluşan malzeme kaybı yüzeylerde hasara neden olacaktır [19]. Aşınma miktarı, malzemenin cinsine, temasta bulunan yüzeylerin biçimine, ortamın kimyasal etkilerine ve sürtünme koşullarına bağlıdır [20]. Malzemelerde meydana gelen aşınmayı tamamen önlemek imkânsızdır. Aşınmanın bilinmesi ve tedbir alınması veya en aza indirilmesi için gerekli önlemlerin alınması malzeme kayıplarını azaltmaktadır [19]. Aşınma prensipte,

mekanik ve oksidasyon-korozyon gibi kimyasal aşınma olmak üzere ikiye ayrılır [18]. Malzemelerde meydana gelen aşınma, makine parçalarında, malzeme, enerji, zaman kayıplarına sebep olmakta ve ülke ekonomisini ciddi boyutlarda etkilemektedir. Bu konu üzerine büyük araştırmalar yapılmaktadır [20,21]. Aşınma esnasındaki malzeme kayıplarını, en aza indirmek için, aşınma mekanizmalarını ve aşınma çeşitlerini çok iyi bilinmesi gerekmektedir [21]. Seramiklerde aşınma çoğunlukla bünyedeki tanelerin mekanik veya kimyasal etkiler ile bünyeden uzaklaşması şeklindedir. Bazı seramiklerde bu durum bir taneden ya da yüzeyden mikropartiküllerin koparak ayrılması ile olmaktadır [22]. Laboratuvar ortamında yapılan araştırmalar, seramiklerin tribolojik davranışları, aşınma mekanizmasının iki malzemenin temas şartlarına bağlılığını göstermektedir. Aşınma başlangıcı seramiklerde, mikro seviyede malzemelerin kendisine ait olan eşik yük miktarının üzerine çıkılması sonucunda kırılmalar ve kopmalar şeklinde olmaktadır. Seramik malzemelerin kullanılan yerleri, genellikle basınç, sıcaklık, nem gibi faktörlerin etkili olduğu koşullarda ve metal ve metal alaşımlarının kullanılmaya elverişli olmadığı yerlerdir [23].

Mühendislik malzemeleri, çalışma esnasında aşındırıcı ortamında zararlı birçok dış etkenlere maruz kalmaktadır. Katı partiküllerin, yoğun çalışma şartlarında, değişik açılarda ve farklı hızlarda tekrar ederek malzemeye çarpması ile bir aşınma meydana gelmektedir [3]. Gaz akımı veya sıvı tarafından, farklı geometrilerde, değişik yapılarda ve boyutlarda taneler, malzemelerin katı yüzeylerinde temasta bulunarak devamlı bir darbe etkisi yapar ve hasar oluşturur. Oluşan bu hasar erozyon aşınması olarak tanımlanır [17,24]. Uzay aracı bileşenleri atomik oksijen erozyonuna örnek olurken, inşaat mühendisliği ve havacılık uygulamalarında yağmurdan kaynaklı erozyona örnek teşkil etmektedir [24]. Erozyondaki ağırlık kaybı, etki açısının bir fonksiyonu olarak ölçüldüğünde, sünek ve kırılğan malzemelerin tepkisinde çarpıcı bir fark olduğu iyi bilinmektedir [25]. Gevrek malzemelerde etkili olan aşınma mekanizması deformasyon aşınmasıdır. Bu da aşındırıcı parçacıkların malzemeye yüzeyine dik çarpmasına bağlıdır [18].

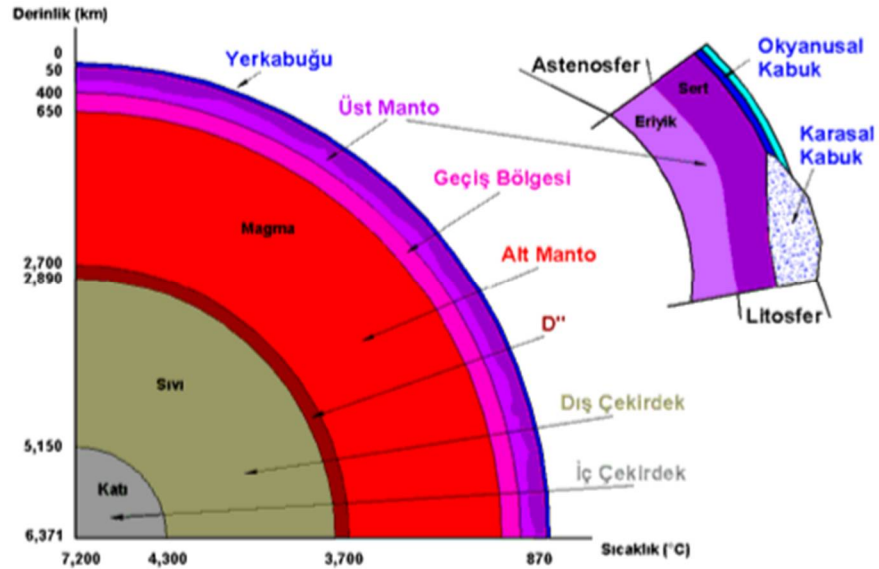
Birçok mühendislik sisteminde, katı partikül erozyonunun etkileri, bileşenlerin aşınması, yüzey bozulması, yüzey pürüzlülüğü ve yapının işlevsel ömründe azalma gibi sorunlar oluşturmaktadır [26]. Katı partikül erozyonunda, operasyon parametreleri, aşınan malzemenin özellikleri, aşındırıcı partiküllerin özellikleri ve çevresel deney şartları olmak üzere dört ana faktör etkilidir [3,25,27].

Doktora tez çalışmasının amacı, bazalt cam-seramik malzemelerin erozif aşınma özelliklerinin incelenmesidir. Bu çalışmada, ticari ürün olarak temin edilen bazalt cam-seramikler sodyum feldspat, garnet ve silisyum karbür aşındırma partikülleri ile katı partikül erozyonuna maruz bırakılmıştır. Deney parametreleri, 1,5 – 3 – 4 bar partikül püskürtme basınçları, 30 – 45 – 60 – 75 – 90° partikül çarpma açılarında ve numune-nozul arasındaki mesafe 20 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Eroziyon aşınma test cihazı 7,8 mm çapında nozula sahiptir. Aşındırıcı partiküller bazalt cam-seramiklerin yüzeyine 20 saniye süre ile püskürtülmüştür. Eroziyon aşınma testleri sonucunda bazalt cam-seramiklerin kütle kaybından erozyon oranları hesaplanmış, tane boyut dağılımının, partikül püskürtme basıncının ve partikül çarpma açısının etkileri araştırılmıştır. Ayrıca bazalt cam-seramiklerinin aşınma yüzeyleri optik profilometre ve makro görüntüleme yardımıyla incelenerek aşınma topografyası hakkında bilgi edinilmiştir. Tez çalışması ile laboratuvar ortamında eroziyon aşınma şartları simüle edilerek bazalt cam-seramiklerinin eroziyon aşınma özellikleri belirlenmiştir.

BÖLÜM 2. VOLKANİK KAYAÇLAR

2.1. Giriş

Dünya, güneşe en yakın olan kayalık gezegenler arasında en yoğun, en büyük ve güneş sistemi içerisinde güneşe üçüncü yakın olan gezegendir. Dünya, % 77,6'sı azot (N), % 20,7'sini oksijen (O), % 1,7'sini karbondioksit (CO₂) argon (Ar), neon (Ne), ozon (O₃) gibi gazları bulunduran atmosferle çevrilidir. Çekirdek, litosfer ve manto olmak üzere üç katman dünya küresini oluşturmaktadır. Şekil 2.1.'de Dünya'nın kesiti görülmektedir [28].

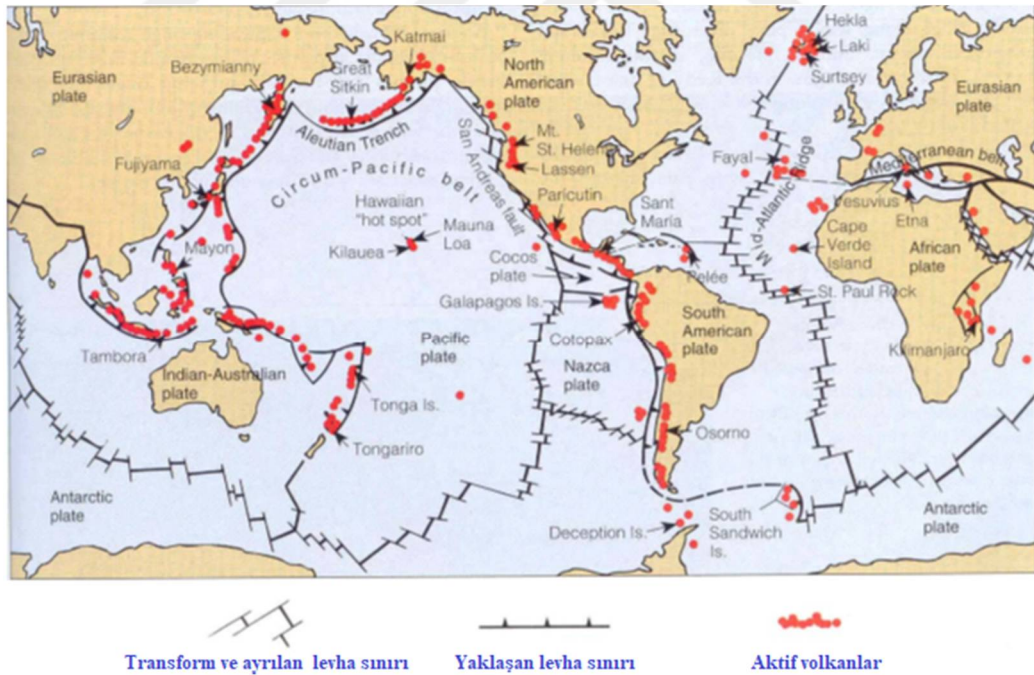


Şekil 2.1. Dünyanın kesiti [28].

Magmanın yeryüzüne yayıldığı ya da yerkabuğuna yakın bölgelerdeki volkanik kanal boyunca yerleştiği faaliyetine volkanizma adı verilir [29,30]. Volkanizma magmanın yer kabuğunun en üst kısımlarına sızması ile meydana gelen tüm jeolojik olayları ve yeryüzüne çıkan gazların ve lavların çıkışını ifade eder. Eğer bir volkan kısa bir süre

önce patlama faaliyeti gösterdiyse aktif volkan olarak adlandırılır ve şu anda Dünya çapında 500 ila 600 civarında volkan aktif olarak kabul edilmektedir [29].

Dünyadaki aktif volkanların % 60'ın üzerinde Pasifik Okyanusu etrafındaki Pasifik kuşağındadır (Circum-Pacific belt). Tüm volkanların % 20'ye yakını Akdeniz volkan kuşağında bulunmaktadır (Mediterranean belt). Etna, Stromboli, ve Vezüv volkanları bu kuşak üzerinde yer alır. Geri kalan % 20'lik kısımdaki aktif volkanların büyük bir kısmı okyanus kenarlarında ya da okyanus sırtlarında yer almaktadırlar. Bunlardan Atlantik Ortası sırtı en uzun olarak bilinen denizaltı volkanıdır (Mid-Atlantic ridge). Kalkan volkanları deniz seviyesinin üzerinde oluşan volkanlardır. Buna örnek izlanda'da oluşan volkanlar verilebilir. Bazalt ise, mafik (bazaltik) bileşimli lavların hızlı soğumasıyla meydana gelen volkanik kayalardır. Bahsedilen volkanların dışında Hawaii adasında aktif olarak iki volkan mafik lavların soğuması ile oluşmaktadır. Bu volkanlar, bazaltik bileşimdedirler. Şekil 2.2.'de dünyada bulunan aktif volkanlar belirtilmektedir [30].

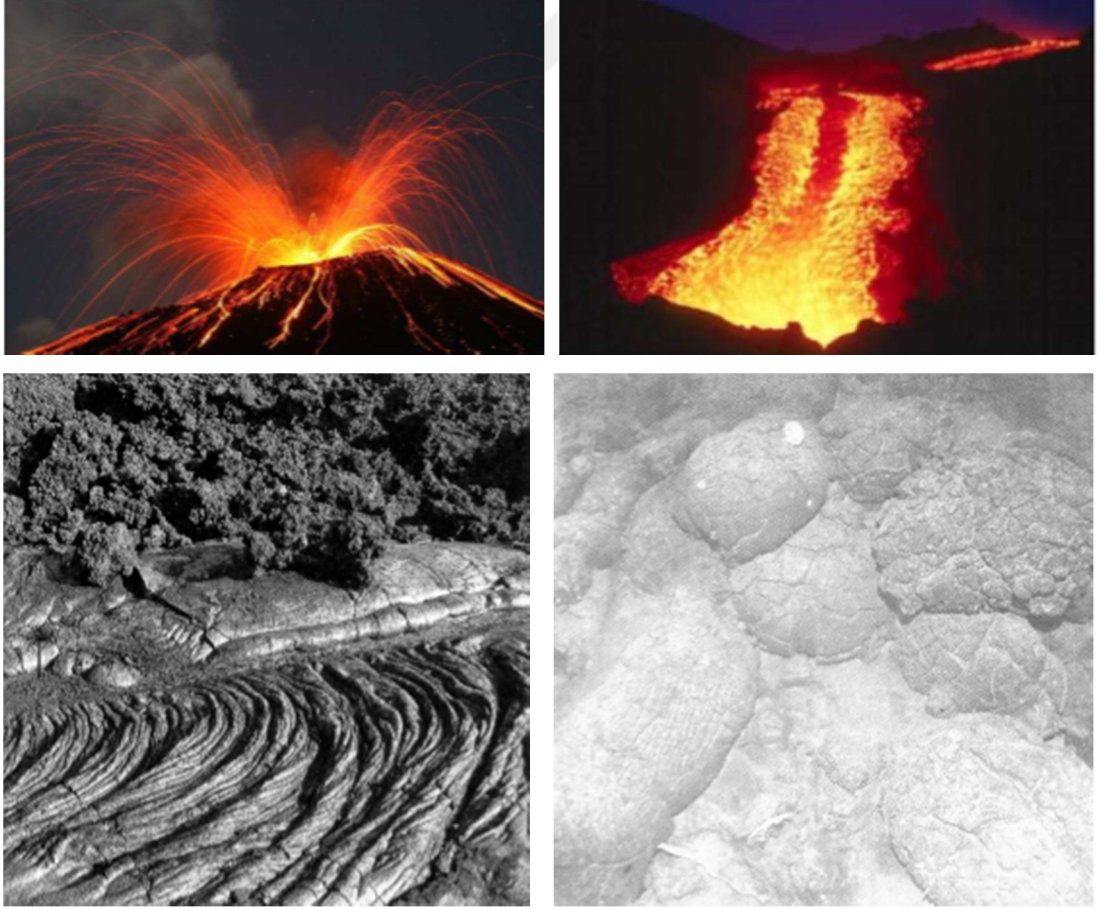


Şekil 2.2. Dünya üzerinde yer alan aktif volkanlar [30].

Volkanlardan, lav akıntıları, volkanik gazlar ve piroklastik malzeme oluşmaktadır [30].

Volkanik gazların büyük bir çoğunluğu su buharı (%50-80 civarında) iken, azot, karbondioksit, kükürt dioksit, sülfür gazları da bulunmaktadır. Ayrıca hidrojen, klor, karbon monoksit gazları da çok az miktarda volkandan çıkan gazlar arasındadır. Bu gazlar toprak içerisinde çözünerek uzaklaşır [9,30,31]. Magmadan gazların ayrılması, volkanik faaliyetlerde çok önemlidir. Magma içerisinde yüksek basınç etkisi ile çözülmüş gazlar, basıncın azalması ile magmadan ayrılıp genleşmeye başlar. Ancak viskozitesi yüksek olan asidik magmalarda genleşme engellenir ve bu da gaz basıncında artışa neden olmaktadır. Gaz basıncı yeterli seviyeye ulaştığında patlamaya sebebiyet verir ve volkan külü türer. Düşük viskoziteli magmalar ise sakin püskürme olur [30].

Lav akıntılarının geometrisi, topoğrafyaya ve lavın viskozitesi ile farklılıklar gösterebilir. Viskozitesi fazla olan lavların akıntısı ile keskin sınırlara sahip lob şeklinde görülürken, akıcı olan lavlar, geniş ve ince yayılım şeklindedir [30]. Örnek resimler Şekil 2.3.'de verilmektedir [30,31].



Şekil 2.3. Volkanizma ve lav akıntılarına örnek resimler [30,31].

Piroklastik malzeme, tefra volkandan atılan değişik tane boyutunda ki (lavın dışında) malzemelere denir. 2,0 mm den küçük tane boyutunda ise kül, 2-64 mm tane boyut dağılımındaki lapilli ve daha büyük olanlarına ise blok ya da volkan bombası adı verilir. Volkan bombaları, havaya püskürtülen sıvı haldeki lav hareket ederken soğur ve katılaştığını ifade eden elipsoid şeklindeki malzemelerdir. Köşeli kayaç parçaları ya da katılaşmış magma kabuğu ise blok olarak ifade edilir [30].

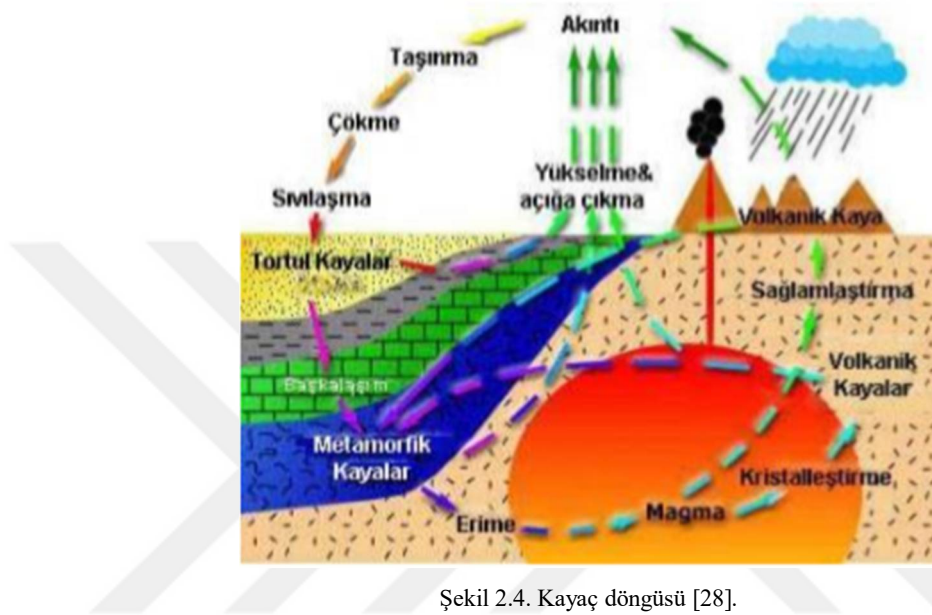
2.2. Kayaçlar

Yüksek ısı ile ısınan ve yoğunluğu az olan magma, daha üst kısımlardaki yoğunluğu fazla ve daha soğuk olan magma ile yer değiştirir. Bu değişim sırasında oluşan hareket konveksiyon akım olarak adlandırılır. Konveksiyonel akımlar sonucunda yerkabuğunda hareketlenmeler olur ve levhalar halindeki kaya parçaları birbirinden ayrılır ve yeni kabuk oluşur. Birbiri ile çarpışma sonucunda levhalar yeni dağların oluşumuna sebep olurken, bazen de çarpışan levhalardan daha az yoğunluğu sahip olanın altına doğru girerek astonesferin (yerkabuğunun hemen altında kalan kısım) içine doğru batır. Bütün bu olaylar sonucunda yeryüzünde volkanlar, dağ ve kara parçaları meydana gelir ve bunlar dünyanın iç güçlerini oluşturur. Deniz, göl ve ırmak hareketleri ile rüzgar ve yağmur gibi atmosferik hareketler oluşur. Bu güçler ise yeryüzünü etkileyen dış güçler olarak tanımlanır. Dünyanın bu iç ve dış etkileri ile kayaçların fiziksel ve kimyasal etkileri belirlenir [28]. Birden fazla mineralin bir araya gelmesi ya da çok miktarda bir mineralin birikmesiyle oluşan katı birikimler kayaç olarak ifade edilir ve oluşumları esnasında doğal ortamı yansıtmaktadırlar [7,8]. Yük altında kayaların davranışları, yapısal özellikler, minorolojik bileşim ve petrografisi ile yakından ilişkilidir. Kayaların yük altındaki davranışlarının farklılık göstermesi mühendislik çalışmalarında önemlidir. Heterojen unsurlar bulunduran damarlı kayalar, davranış farklılıkları gösterebilir [32].

Kayaçlar oluşumlarına göre;

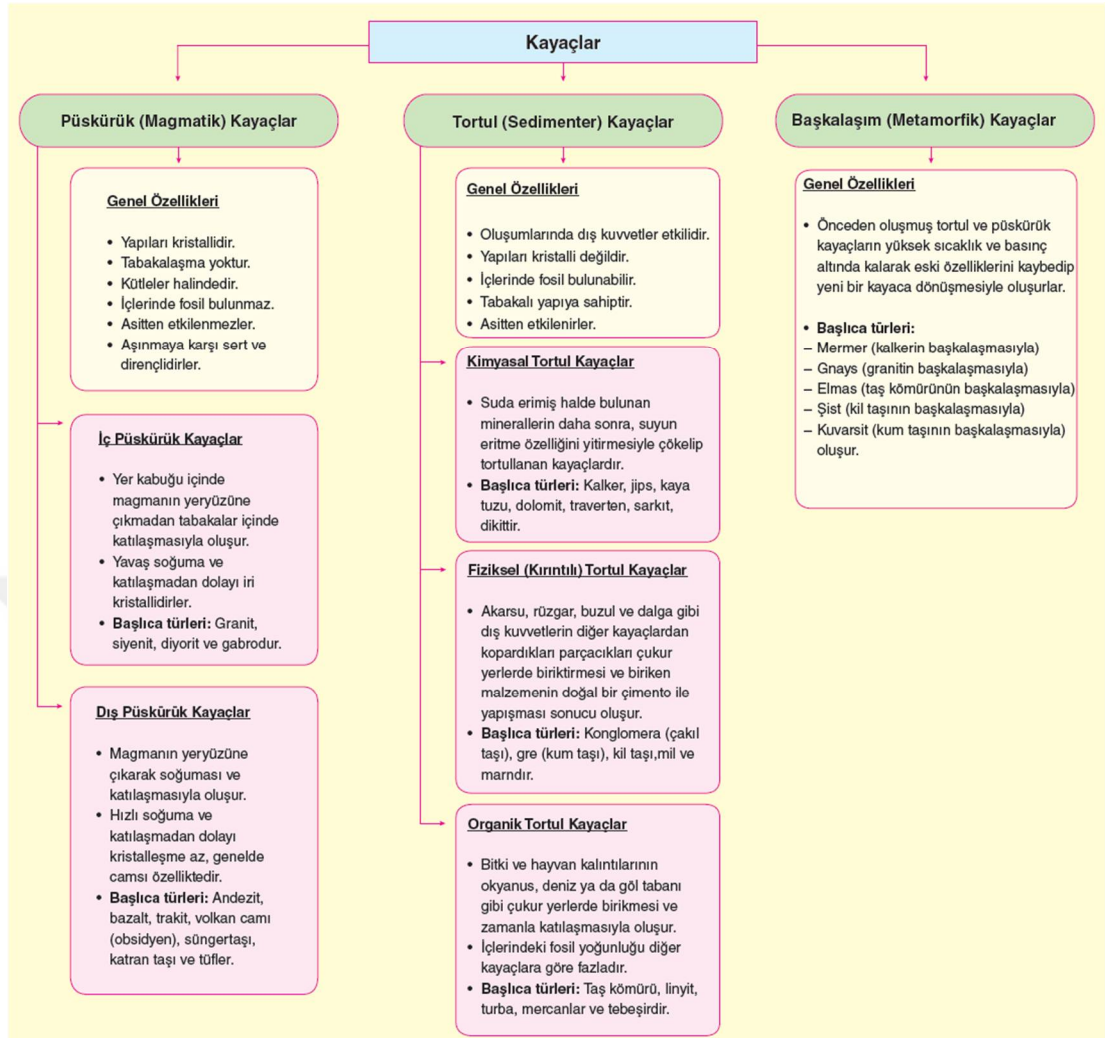
1. Magmatik (volkanik) kayaçlar
2. Metamorfik (başkalaşım) kayaçları
3. Tortul (sedimental) kayaçlar,

olmak üzere üç grupta altında incelenmektedir [8,28,33]. Kayaç türleri çok süreçler içerisinde dünyanın iç ve dış güçlerinin etkisine bağlı olarak sürekli bir döngü halindedirler. Kayaçların oluşumu, dünyanın ilk günlerinden yerkabuğunun şekillenmesi ile kesintisiz bugüne kadar devam eden bir süreçtir. Şekil 2.4.'de kayaçların döngüsü ifade edilmektedir [28].



Şekil 2.4. Kayaç döngüsü [28].

Volkanik kayaçların, oluşum koşulları, gelişim ortamları ve dağılım kuralları bakımından tortul kayalardan çok farklıdır. Örneğin, magmatik kayaçlar yüksek sıcaklık ve yüksek basınlarda oluşurken, tortul (sedimentel) kayaçlar normal şartlar altında oluşurlar. Volkanik kayaçlar yerin altında oluşurken, sedimentel kayaçlar yeryüzüne yakın ya da yeryüzünde oluşurlar [31]. Şekil 2.5.'de kayaç türleri ve özellikleri verilmektedir [33].

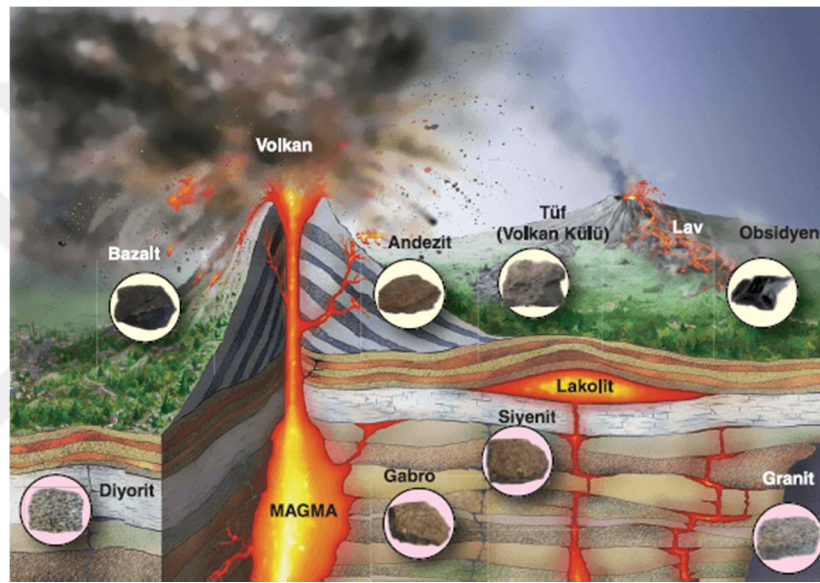


Şekil 2.5. Kayaç türleri ve özellikleri [33].

2.2.1. Magmatik (volkanik) kayaçları

Erimiş magmanın soğumasıyla magmatik (volkanik) kayaçlar oluşur ve yer kabuğunun gerçek kütlelerini oluşturmaktadırlar [8,34]. Magmanın yeryüzüne ulaşp soğuması durumunda ya da yer kabuğunun altında iç kesimlerde soğuması durumunda volkanik kayaçlar oluşur. Magmanın soğumanın yer kabuğunun içerisinde veya dışarısında olması magmatik kayaçların yapısında önemli derecede etkilidir. Soğuma yavaş olursa kayaçlar iri kristalli olur, soğuma hızlı olursa camsı yapılarda veya ince kristalli oluşurlar [33].

Yüzeyde soğuyan erimiş magmatik kayalara ekstürizif ya da volkanik kayaç, yüzeye ulaşmadan derinlerde kristalleşerek oluşan magmatik kayalara intrüzif ya da plütonik kayaç olarak adlandırılır [34]. Bu durum magmatik kayaçları, dış püskürtürük (camsı görünümde (obsidyen, bazalt ve pomza taşı) olan volkanik kayaçlar) ve iç püskürtük (granit, gabro ve diorit) kayaçlar olarak iki şekilde sınıflandırmaktadır. Dış püskürük kayaçları çok hızlı soğudukları için ince taneli bir yapıya sahiptirler ve serttirler [8]. Şekil 2.6.'da dış püskürük ve iç püskürük kayaç türleri görülmektedir [33].

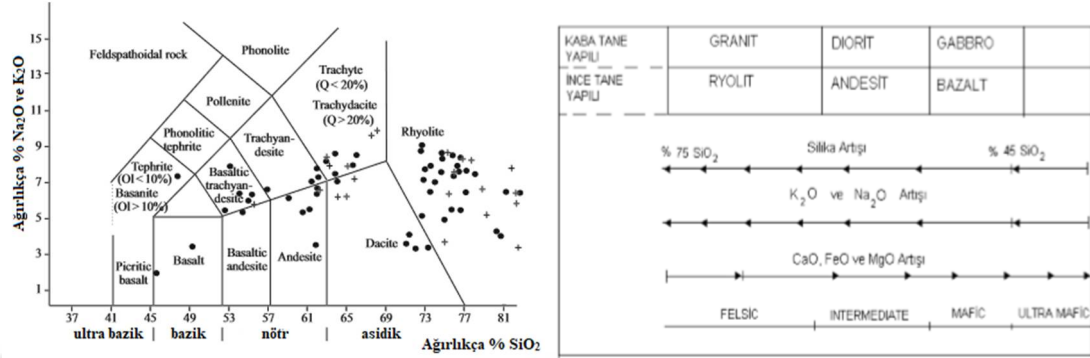


Şekil 2.6. Dış püskürük ve iç püskürük kayaçlar [33].

Magmanın soğuma hızı, silika miktarı ve çözünmüş gaz miktarı magmatik kayaçların oluşumunu biçimlendirir [34]. Volkanik kayaçlar bileşiminde, SiO_2 , MgO , CaO , K_2O Na_2O ve demir oksitler gibi oksitlerin içerdikleri miktarlara göre adlandırılırlar [8].

Silika içeriği, magmatik kayaçların kimyasal bileşiminde oldukça önemlidir. Kabuk kayacında, %50'den (bazaltik) %70'e (granitik) kadar silika içeriği değişim göstermektedir. Diğer elementlerde silika içeriğine göre paralel olarak değişim göstermektedir. Yani silika oranının artması diğer elementlerin (Ca, Mg, Fe) düşük olacağı anlamına gelir. Silika içeriği magma davranışını da etkiler [34].

Yanardağ taşı olarak adlandırılan volkanik kayaların en önemlisi, ince tane yapısına sahip, sert ve gri ya da siyah renge sahip olan bazalt'tır. Piroksen ve Ca- plajyoklaz, az miktarda da amfibol ve olivin içerir [8,34].



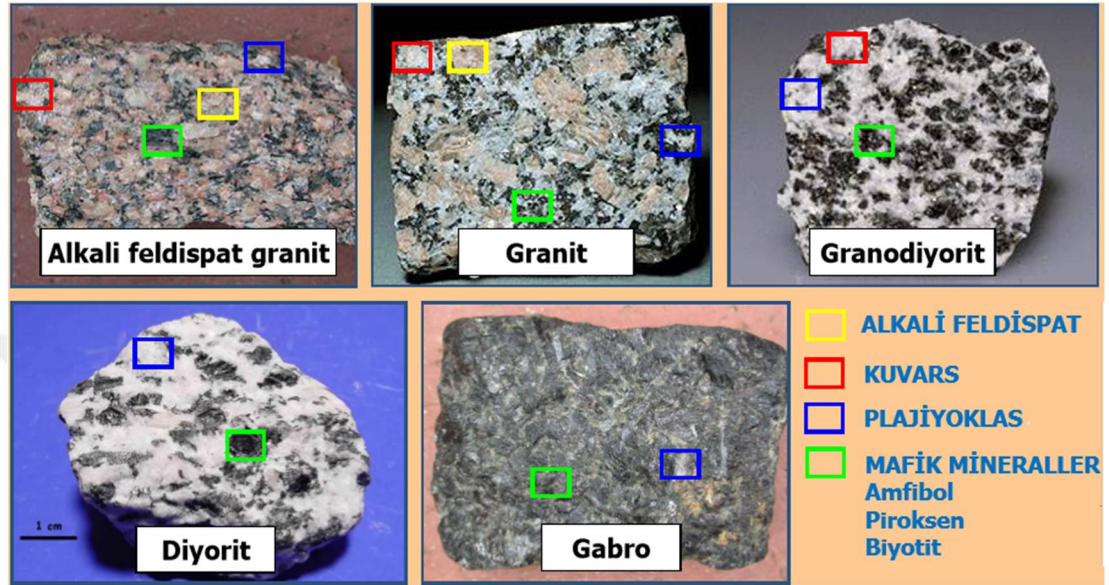
Şekil 2.7. Volkanik kayalar için toplam alkali-SiO₂ (TAS) diyagramı (songliao havzasından Q: kuvars, Ol: olivin) [31] ve Oksitlerin miktarına göre volkanik kayaların isimlendirilmesi [8].

Silika içeriklerine göre, platonik ve volkanik kayaları arasında orta kısımda yer alan “Andesit” ve “Diorit” kayalarının kristalleri volkanik kayalardan büyük ve plutonik kayaların kristallerinden daha küçük boyuttadırlar. Diorit, bazalta göre daha kaba tanelidir. Andezit, grimsi renge sahip, ince tanelidir. Diyorit, granitten renginden daha koyu renge sahiptir ve iri taneli bir kayadır. Gözle görülür boyutta kuvars kristalleri içermemektedir [8,34].



Şekil 2.8. Dış püskürük (yüzey) kayaları [35].

Platonik kayalardan biri olan ‘‘Gatro’’ kayacı mika ve feldspat içermesine rağmen kuvars bulundurmamaktadır. Sağlam bir yapıya sahip olan gatro, bazaltın rengi gibi gri veya siyah renktedir. Bazalt kayacının derinlik eődeėeri ve daha kaba taneli (iri kristalli) hali denilebilmektedir. Plajiolas içermektedir [8,34].



şekil 2.9. İ püőkürük (derinlik) kayaları [35].

Granit, platonik kayalardandır ve magmanın yavaş soğuması sonucunda iri kristal yapısına sahip kaba tane yapısındadır. Magmatik kayalar içerisinde en çok bilinen granit, kuvars, mika ve feldspat mineralleri bulundurur ve iri dokuludur. Granitler dayanıklı ve çok sert olmalarına rağmen bir kısmında bazı nedenlerden dolayı fiziksel parçalanma ve kimyasal çözünmeye uğrarlar. Granit, %50’den daha fazla potasyum feldspat, %25-30 kuvars ve sodyumca (Na) zengin plajiolas içermektedir [8,33,34].

2.2.2. Metamorfik (başkalaşım) kayaları

Metamorfik kayalar, daha önceden meydana gelmiő magmatik ve tortul kayaların çok yüksek basınç ve sıcaklık etkisiyle metamorfizma denilen değişikliğe uğramaları sonucunda ilk őekillerini kaybederek farklı renk ve şekillerde oluşan kayalardır [8,33-35]. Basınç ve sıcaklığın deėiőmesi ile durağan durumda bulunan mineraller, aynı kimyasal bileşimde farklı minerale dönüşürler ve bu olay metamorfizma olarak

adlandırılır. Mermerin, kireç taşlarının değişime uğraması sonucunda oluşması buna örnek verilebilir. Bu tür kayalar mineralleri kristalleşmiş kayalardır [8,35]. Kayaların tane boyutu, metamorfizma derecesinin artmasına bağlı olarak artmaktadır [35].



Şekil 2.10. Metamorfizmaya uğrayan kayaç örnekleri [33].

Metamorfik kayaçları oluşturan minerallerin kristalleri, tercihli olarak yönlenmeleri (sıkışma kuvvetlerinin yönüne dik olarak) sonucunda yeniden kristallenir. Bu yönlenme sonucunda oluşan mineral, kayaca bantlı ve tabakalı doku oluşturur ve buna foliasyon (yapraklanma) adı verilir. Yapraklanma, ana kayacın türüne ve metamorfizma derecesine bağlı olarak değişik türdedirler [34,35]. Metamorfik kayaçlara örnekler Şekil 2.11.'de verilmektedir [35].

Filli, ince tane yapısına sahip klorit ve muskovit kristallerinden oluşur. Şist, kolayca ayrılabilen levhalar ve ince dilim şeklindeki kayalardır ve %50'den fazla levhamsı ve çubuksu mineraller (biyotit, amfibol ve muskovit) içerir. Gnays, granitin metamorfizması sonucunda, çoğunlukla küremsi ve çubuksu minerallerin oluşturduğu metamorfik kayadır. Mermer, ana kayacı dolomit veya kireç olan kayaç iri kristallidir. Kuvarsit, kumtaşının metamorfizması tarafından oluşan sert, beyaz

(demir oksit içeriğine göre pembe veya kırmızı lekeler bulundurabilir, koyu mineral taneleri ise gri renk oluşturabilir) renkte metamorfik kayadır [33,34].



Şekil 2.11. Metamorfik kayalar [35].

2.2.3. Tortul (sedimental) kayalar

Yerkabuğunu % 75'ini kapsayan (alansal olarak) kaplayan tortul kayalar, maddelerin suyun altında birikmesi sonucunda katılaşarak oluşurlar. Mevcut olan kayalardan ayrılan parçalar (örneğin, kumtaşları), rüzgâr ve nehirler gibi doğa olayları ile sürüklenip akarsu, göl ve okyanus diplerinde birikirler. Boşluklu ve gevşek tabakalar halindeki bu birikintiler zaman ile sıkışıp sertleşirler ve tortul kayaları meydana getirirler. İçerisinde enerji kaynakları (doğal gaz ve petrol) bulundurdıkları için önemlidirler [8,33,35]. Bileşen tiplerine göre, tortul (sedimenter) kayalar üç gruba ayrılır [35]. Bunlar;

- Kimyasal tortul kayalar
- Kırıntılı tortul kayalar
- Organik tortul kayalardır [35].

Elektrik enerjinin üretiminde önemli bir kısmının elde edilmesi için yakılan kömür, tortul (sedimenter) bir kayaç türüdür. Ayrıca, kalsit (CaCO_3) minerallerinden oluşan kireçtaşı da sedimenter kayaçlara örnek verilebilir [34].

2.3. Bazalt

Bazalt kelimesi Plinius tarafından bahsedilmiştir ve Georgius Agricola 1546 yılında “De Natura Fossilium” eserinde tekrar fossil olarak bahsedilmiştir. Abraham Gottlob Werner bu terimi 1787’de mineral bileşenlerini tam olarak tanımlayamamakla birlikte kayaç ismi olarak kullanmıştır. Louis Cordier 1816 yılında Augit ve değişik oranlarda olivin içeren Labradorit olarak sınırlandırmaktadır ve 1887 yılında yeniden tanımlamıştır [36]. Bazalt, petrografi biliminde Angricola tarafından Sakson kayaçlarının ifadesinde ilk defa kullanılmıştır. 1925 yılında ise R. A. Daly tarafından bazalt kayacının analizi yapılmıştır. Yüksek dayanıma sahip bazaltlar, Mikeros piramitinde ve Nan madol kentinin yapımında kullanılmıştır. Ağrı dağının ilk dört bin metresi de bazalttan oluşmaktadır [8]. Bazaltın ayrışma çalışmalarının birçoğu Loughnan (1969 yılında) tarafından özetlenmiştir. Duyarlılık seviyesine göre en duyarlı olivin minerali olmak üzere, olivin, piroksen plajiyoklas ve sanidin şeklinde sıralanmaktadırlar [37].

Okyanus tabanının büyük bir kısmını lav dökülmeleri olarak adlandırılan akışkan bazaltlar oluşturur [38]. Bazik bileşime sahip olan bazaltlar, bazaltik lavların volkan bacası, çatlaklardan ve yarıklardan yeryüzüne ulaşarak yayılan magmatik kayaçlardandır. Daha akıcı özelliklerde olan bazaltik lavlar, büyük alanlarda yayılım göstermektedirler [39]. Bazalt kayaçlarını oluşturan bu lavlarının sıcaklıkları 1100-1200°C civarlarındadır. Bazaltik lavların soğuma yüzeyine dik sütunlar şeklinde oluşturmaktadırlar. Dik sütunlar beş ve altı kenarlıdır [9,11,38]. Volkan bacalarından çıkan bazalt lavları bünyesinde bulunan gazlar çıkar ve kayacın içerisinde boşluklar oluşturur ve bunlarda boşluklu bazalt olarak adlandırılır. Çeşitli mineraller bu boşluklara girer [40]. Şekil 2.12.’de bazalt kayaçları görülmektedir [8].



Şekil 2.12. Bazalt kayaçları [8,40].

Doğada çok miktarda bulunan bazalt, yeryüzünün 2,5 milyon km²'den daha fazla alanı teşkil ederler [8,10,40]. Bazaltın yoğunluğu yaklaşık 3 gr/cm³'dür [8]. İnce taneli volkanik bir kayaç olan bazalt gri ile siyah tonları arasında renge sahiptir. Kimyasal bileşimi, Si₂O, Al₂O₃, CaO, FeO ve MgO gibi oksitlerden oluşurken, düşük oranlarda Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, TiO₂, MnO ve P₂O₅ oksitleri de yer almaktadır. Monoklinik piroksen ve plajioklas feldispat iki ana mineralidir [41].

Bazaltlar, 1400 °C veya daha yüksek sıcaklıklarda kolayca eriyebilmektedir. Böylece bazalt kayaçları ergitilerek bazalt cam-seramikleri üretilebilmektedir. Bazalt banyosunda demirin oksidasyon hali bazalt cam-seramiklerinde kristal boyutlarını ve camların çekirdeklenmesini etkileyen en önemli faktördür. Fe₂O₃/FeO oranı 0,5-0,6'dan daha büyük ise oksitleyici şartlar oluşturulur ve ince taneli cam-seramik oluşturulabilir. Ayrıca, bazalt içerisindeki Fe₂O₃ miktarı ağırlıkça %5'den fazla olmalıdır [39,41]. Bu cam-seramiklerdeki ana kristalin faz ve bazen de tek kristal türü monoklinik piroksendir [41].

Bazalt kayaçlarının müllit veya ZAS ($\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) esaslı refrakter fırınlarında 1300-1500 °C sıcaklıklarında eritilip kalıplara dökülmesi ve kristallendirilmesi (ısıtıl işlem ile) ile bazalt cam-seramikler elde edilir. Alkali ortamlardaki kimyasal dayanıklılığı, termal kararlılığı, yüksek mukavemeti, aşınma direnciyle ve ucuz oluşu nedeniyle, bazalt cam-seramik üretiminde kullanılabilecek potansiyel malzemedir. Bazalt cam-seramikleri plaka, boru, pnömatik ve hidrolik sistemlerde (dirsek şeklinde) silolarda, tanklarda ve mikserlerde kullanım alanı bulmaktadır [10].

Alkali, olivin ve toleitik bazaltlar olmak üzere 3 grup altında incelenebilmektedir. Tablo 2.1.'de alkali, olivin ve toleitik bazaltlarının kimyasal bileşimleri verilmiştir [8,39].

Tablo 2.1. Alkali, olivin ve toleitik bazaltlarının kimyasal bileşimleri [39].

Bileşim	Alkali Bazalt	Olivin Bazaltı	Toleit bazaltı
Oksit	Uganda (Afrika)	Kilauea (Hawaii)	Westfield (A.B.D)
SiO_2	44,45	49,43	51,60
Al_2O_3	11,74	12,92	14,10
TiO_2	2,58	2,85	1,00
Fe_2O_3	2,06	3,14	4,40
FeO	8,95	8,34	8,40
MnO	0,16	0,18	0,20
MgO	13,32	9,24	6,40
CaO	10,24	11,02	9,30
Na_2O	2,54	2,22	3,20
K_2O	2,92	0,52	1,20
P_2O_5	0,62	0,26	0,20

İçerdiği Si_2O miktarına ve Na_2O , MnO ve K_2O miktarları birbirlerinden farklılık göstermektedir. Si_2O miktarı, toleit bazaltında en yüksek iken alkali bazaltlarda en düşüktür [8,39].

Ülkemiz de Dünya’ca ünlü bazalt kütlelerine rastlanmaktadır ve zengin bazalt kaynaklarını sahiptir. Boyabat bazaltlarının volkanik yapıları Dünya’da enden olarak rastlanması nedeniyle ülkemiz için önemi büyüktür. Bazı bölgelerinde 15 metrenin

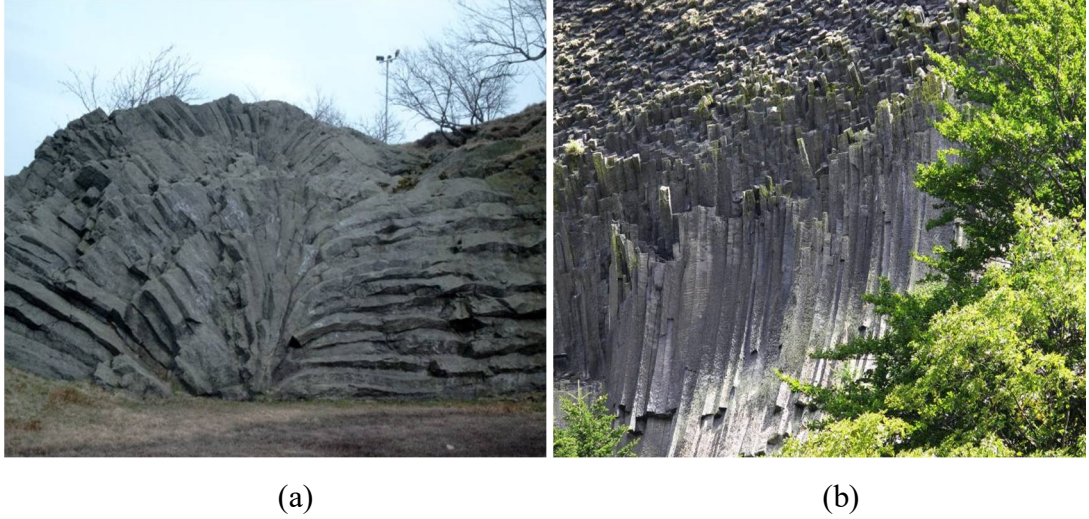
üzerinde dikine gelişmiş sütunlara sahiptir. Ayrıca ülkemizde Diyarbakır, Manisa, Konya, Erciyes, Doğu Anadolu (Nemrut Kayaçları), Trakya Bölgesinde ve Batı Karadeniz Bölgesin’de de bazalt kayaçlarına rastlanmaktadır [8,38-40]. Tablo 2.2.’de ülkemizde Batı Karadeniz ve Trakya Bölgesi bazaltlarına ait kimyasal bileşimler verilmektedir [39].

Tablo 2.2. Batı Karadeniz ve Trakya Bölgesi bazaltlarına ait kimyasal bileşimler [39].

Oksit	Batı Karadeniz Bölgesi Bazaltı	Trakya Bölgesi Bazaltı
SiO ₂	43,00	45,91
Al ₂ O ₃	10,70	12,16
MgO	1,94	12,16
CaO	22,00	9,12
FeO+Fe ₂ O ₃	3,60	10,74
K ₂ O	2,40	1,62
Na ₂ O	1,00	2,63
TiO ₂	0,23	2,93
MnO	0,21	-
H ₂ O	15	2,72

Bazalt, iklim şartlarından ve aşınmadan az etkilenmesinden dolayı tercih edilen doğal taştır. Farklı ölçülerde mimarı yapılarda, cephe ve zemin kaplamalarında, kaldırımlarda, şehir içi yollarda ve bahçe düzenlemelerinde yer bulmaktadır [42]. Bazalt, yoğun ve sert olmasından dolayı basınca karşıda mukavemeti fazla olan bir kayaç olması nedeniyle inşaat taşı, kırma taş ve parke yapımında faydalı ve birçok bölgede kullanılmaktadır [43]. Yüksek kimyasal direncinden dolayı inşaat sanayinde, tesisat malzemesi, yapı ve kaplama malzemesi olarak kullanılır [40]. Gevrek ve gevşek yapıya sahip olan bazalt tüfleri, içerdiği poroz yapıdan dolayı hafif yapı malzemesi olarak kullanılır [43].

Şekil 2.13.’de Almanya Erzgebirge’de bulunan Hirtstein üzerindeki bazalt tabakaları ve Romanya’nın doğusu Bucium’da yer alan Detunata Kalesindeki bazalt kayaları görülmektedir [36].



(a) (b)
Şekil 2.13. (a) Hirtstein üzerindeki bazalt tabakaları (Erzgebirge-Almanya), (b) Romanya'nın doğusunda Detunata Kalesi bazalt kayaları (Bucium-Romanya) [36].

Bazaltların, korozyif kimyasallara (asit gibi) karşı direnci yüksektir. Ayrıca, sağlık açısından sakınca içermemesi, dış etkenlerden etkilenmemesi (inert oluşu), yorulma dayanımının iyi olması ve sert olmaları nedeniyle, cam-seramiklerin üretiminde ve endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır [8-11].

Mekanik ve fiziksel özellikleri göz önünde tutularak kırma bazalt taşı farklı oranlarda beton bileşiminde agrega olarak kullanılmaktadır. Kalkerin yerine raylı yollarda tercih edilmeye başlanmıştır. Yalıtım sistemlerinde de bazalt kullanım alanı bulunmaktadır. Ayrıca, bazalt kayaçlarından yapılan taş yünü, denizde inşa edilen yapılarda ve gemi inşasında duvar ve döşeme yalıtımında da yer almaktadır. Yüksek sıcaklığa karşı mukavemetinden dolayı bacalarda, yangın kapılarında klima ekipmanlarında, tavan izolasyonlarında ve duvar modüllerinde de kullanımı uygundur [42].

BÖLÜM 3. CAM VE CAM-SERAMİKLER

3.1. Camlar

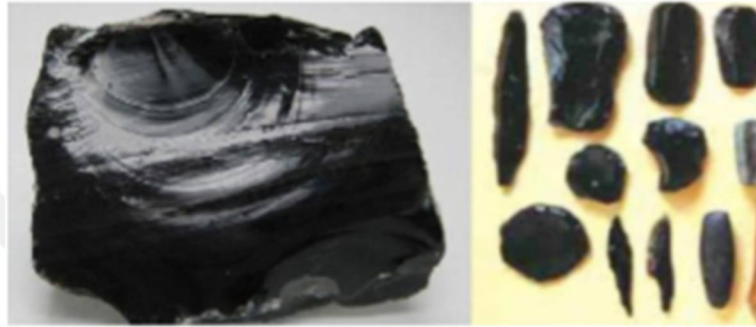
Tarih boyunca cam sanatçıları camı kumun ateşle dansı olarak tanımlamaktadır. Camın, birçok kaynakta rastlantı sonucu bulunduğu yazılmaktadır. Günümüzde birçok alanda kullanım alanı bulan cam, üretilen en eski yapay malzemelerdendir [39]. Cam, aşırı soğumuş sıvının düzensiz yapısını bozmadan koruyarak katılaşması olarak adlandırılır. Camların kristal yapıya sahip olmamaları bu tanımın oluşumundaki etkidir. Geçirdikleri evrim ile birlikte camlara yeni tanımlar verilmiştir. Sıvının, kristallenme olmaksızın bir katılaşması ile elde edilen malzemeler, kristal olmayan katılar gibi tanımlar bunların arasında gelir. American Society For Testing Material (ASTM) tarafından ise bu tanım, rijit koşullar doğrultusunda kristallenme olmaksızın soğutulmuş inorganik (organik olmayan) ergime ürünüdür şeklinde yapılmıştır [8,20].

3.1.1. Camların tarihçesi

Camların tarihçesi ile ilgili en yaygın olanı Elder Pliny adında Romanyalı tarihçi tarafından yansıtılan öyküdür. Pliny'ye göre, İ.Ö. 3000 yıllarında Finikeli denizciler tesadüfen yaktıkları ateşin üzerine kaplarını koymak için taş yerine soda blokları kullandılar. Ertesi gün küllerin arasında saydam, parlak cam kristallerini bulurlar. Gerçek olup olmadığı bilinmemekle beraber bu öykü, cam üretimi için mantığa aykırı değildir. Ancak odun ateşinin cam oluşumunu sağlayacak sıcaklığa ulaşabilmesi tartışma konusu olmuştur [39,44].

İnsanoğlu aslında camın keşfedilmesinden çok daha önceleri camı kendi yararına kullanmaya başlamıştır [39]. Volkanik aktiviteler sonucu yoğun ısı ile ergimiş

obsidyen taşından aletler üretmişlerdir [45]. Yanardağların aniden soğuması sonucunda doğal olarak oluşan volkanik cam olarak tanımlanan bu kayaç türüne obsidyen veya obsiyen denir [46]. Atalarımız obsidyeni ok ucu, balta ve bıçak benzeri aletleri yapmak için kullanmışlardır. İnsanın atom numarasına uygun olan doğal taş olan obsidyen, zengin mineral içeriyle de sağlık merkezlerince tercih edilir [39,46]. Şekil 3.1.'de doğal obsidyen camı görülmektedir [46].



Şekil 3.1. Doğal obsidyen [46].

Cam yapımına, Mısır ve Mezopotamya'da M.Ö. 3000-4000 yıllarında başladığı tahmin edilmektedir. Yapılan arkeolojik kazılarda Mısır'da en eski cam ürün bulunmuştur. Anadolu'da M.Ö 3000 yıllarında camın yapılmış olabileceği belirtilir. Seramiğin gelişmesi ile ilk camın gelişiminin yakından ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Yine Mısır'da M.Ö. 4000 yıllarında sırlı seramiğin üretildiği kabul edilmektedir. Mısır'ın İskenderiye şehri cam yapım merkezi olmuştur ve üfleme tekniği ile cam bu dönemde üretilmiştir. İtalyan atölyelerinde bu teknik daha farklı şekillerle kullanılmıştır. Tarih boyunca Mısır ve Mezopotamya'nın ardından Roma ve Bizans'ta Avrupa, Anadolu ve Orta Asya'da cam üretimi yaygınlaşmıştır. Cam teknolojisinin yavaş gelişmesinden dolayı günlük hayatta kullanılan camın üretilmesi binlerce yıl sonra olmuştur. Üfleyerek şişirme ve biçimlendirme teknikleri ile kase, cam vazo ve kaplar üretilmiştir [8,39,44].

İnsanların ürettiği ilk camlar dekoratif alanlarda kullanılmıştır. Boncuk yapımı Mısır'da yaygınlaşmış ve özellikle Turkuaz mavisisi popüler boncuklar yapılmıştır. 18. Firavunlar döneminden (Mısır'ın en gelişmiş dönemi M.Ö. 1570- 1370) cam eserler günümüze kadar gelmiştir [47]. Haçlılar tarafından 1202 yılında İstanbul'un

işgali üzerine buradaki ustaların Venedik'e gitmelerinin bunda önemli rolü vardır [39]. Şekil 3.2.'de el yapımı Venedik camı görülmektedir [8]. Venedik camcılığı 16.yy'dan sonra Antwerp, Londra, Köln başta olmak üzere tüm Avrupa'ya yayılmıştır [39]. Hatay'da yapılan Tell Açana kazılarında bulunan cam vazo, bilinen en erken parçadır ve İ.Ö. 1595 yıllarına tarihlendirilir [48].



Şekil 3.2. Venedik camı (El yapımı) [8].

Tablo 3.1.'de Obsidyen, Mısır camı (M.Ö. 1500), İtalya camı (M.Ö 9000) ve cam şişe kimyasal bileşimleri verilmiştir[39].

Tablo 3.1. Obsidyen, Mısır camı (M.Ö. 1500), İtalya camı (M.Ö 9000) ve Cam şişe, kimyasal bileşimleri [39].

Cam	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO
Obsidyen	74,6	14,2	1,1	4,0	4,7	0,8	0,08
Mısır camı (M.Ö. 1500)	67,8	3,2	0,9	16,1	2,1	3,8	2,9
İtalya camı (M.Ö9000)	77,8	2,2	0,8	6,4	8,7	2,1	0,7
Cam şişe	67-70	3-4	0-1	13-18	6-7	6-8	0-1

Camın ilk üretimi tahta ve demir parçaları ile şekillendirilip, çukur kalıplarda yapılmıştır. M.Ö. 250 yılında, Mısır ve Suriye'de üfleme çubuğu icat edilmiştir. Roma'da gelişmeye devam eden camcılığın merkezi M.Ö. 15. ve 16. yy.'lar arasında Murano ve Venedik olmuştur. Şekil 3.3.'de cam şekillendirme aletlerine yer verilmiştir [45].



Şekil 3.3. Cam şekillendirme aletleri [45].

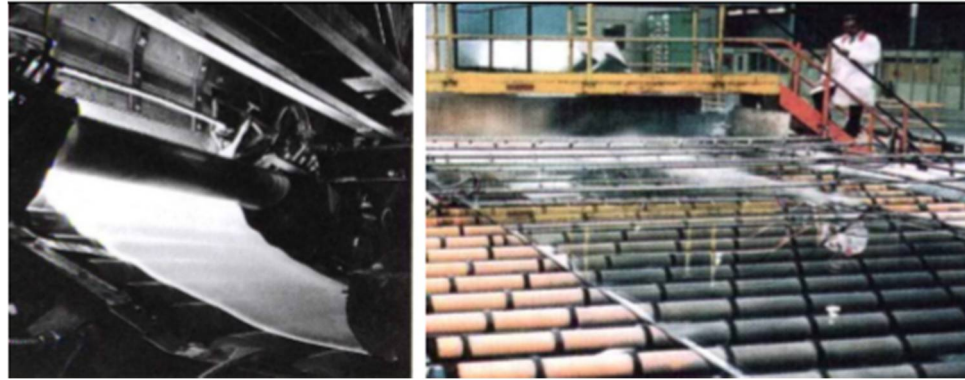
Avrupa'ya yayılmış camcılık ile cam teknolojisi gelişmiş, dekor ve bileşim tekniklerinde gelişmeler de gerçekleşmiştir. Sanayi çağı ile birlikte camların üretimi gelişmiş ve hızlanmıştır. 18.yy'ın sonlarına doğru şişe üretimine ihtiyaç duyulmuş ve ağaç kalıplar ile üretime başlanmıştır. Cam üretiminde ihtiyaç duyulan fırın teknolojisinin gelişimi sonucunda, 1863 yılında Siemens rejeneratif fırını, 1870 yılında Beivs soğutma fırını, 1973 yılında ise tank fırını yine Siemens tarafından geliştirilmiştir [39]. Camcılık Anadolu'da Selçuklular ve Osmanlılar dönemlerinde ve Çeşmi-Bülbüller Beykoz işleri ile gelişim göstermiştir. Beykoz'da Ahmet Fethi Paşa tarafından 1800'lü yıllarda Çini ve Billur Fabrikası ile üretilen camlar renkli, renksiz, opal ve Çeşmi-Bülbüller olarak teknik özellikler bakımından üstün özellikler sergilemiştir [45]. Aşağıda verilen Tablo 3.2.'de M.S. camcılığın gelişmesindeki aşamalar verilmiştir [44].

Türk Camcılığının Cumhuriyet Dönemi'yle gelişmesi Türkiye Şişecam Fabrikaları ile birlikte olmuştur. Şişecam grubu artan teknoloji ile birlikte mutfak eşyası, düz cam, şişe camı ile dünya sıralamasında yerini almıştır [45]. 1960'lı yıllarda keşfedilen yüzdürme olarak da adlandırılan "Float" tekniği cam üretiminde önemli bir keşiftir. Şekil 3.4.'de Float (yüzdürme) yöntemiyle camın 1960'lı yıllarda üretimi görülmektedir [44].

Erimiş kalay üzerinde cam hamuru yüzdürülerek camın kalaydan önce katılaşması sağlanır. Böylece pürüzsüz, kusursuz ve paralel yüzeyli devamındaki işlem basamakları için mükemmel cam yapı oluşturulur [44].

Tablo 3.2. M.S. camcılığın gelişmesindeki aşamalar [44].

M.S.	4	Roma'ya geçişi
M.S.	476	Taşlı pencere camının İstanbul'da yapılması
M.S.	1100	Selçuklular'da gelişmesi
M.S.	1202	Venedik'de başlangıcı
M.S.	1348	Venedik'te ayna yapılması
M.S.	1350	Memluklar tarafından mineli camın yapılması
M.S.	1550	Cam kesme (Elmasla) işleminin bulunması
M.S.	1700	Osmanlılar'da gelişmesi
M.S.	1795	Çeşmi-Bülbül'ün İstanbul'da Çubuklu'da yapılması
M.S.	1874	Kırılmaz camın Fransa'da yapılması
M.S.	1886	İlk üfleme makinesi
M.S.	1899	Paşabahçe'nin eski fabrikasının kurulması
M.S.	1905	Belçika'da Forcault tarafından makine ile pencere camı
M.S.	1926	Lamine emniyet camlarının yapılması
M.S.	1931	Cam iplik (fiber) ve cam tuğla yapılması
M.S.	1934	Paşabahçe'nin yeni fabrikasının kurulması
M.S.	1939	%96 silikatlı camın üretimi
M.S.	1940	Metalize cam eşyanın üretimi
M.S.	1944	Elastiki pencere camı üretimi



Şekil 3.4. 1960'lı yıllarda Float (yüzdürme) yöntemiyle cam üretimi [44].

3.1.2. Camların tanımı

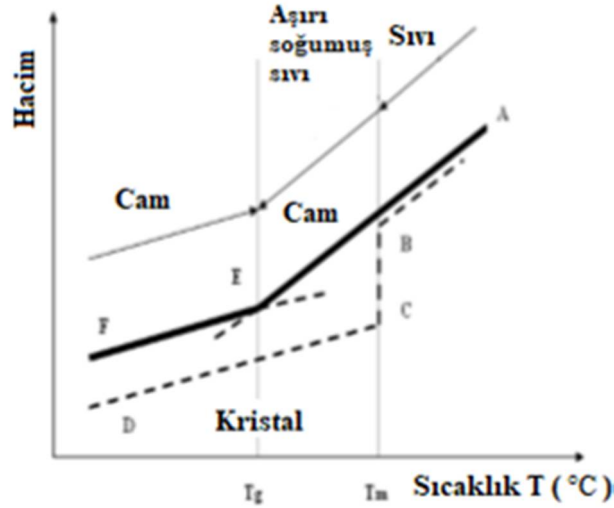
Obsidyen gibi doğal camlar yaşamın ortaya çıkmasından önce Dünya'da var olmuştur. Sentetik oksit camlar yaklaşık 6000 yıl önce keşfedilmiştir ve günümüzde ileri teknoloji uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hayati bir potansiyele sahip olan cam, aslında bugünün modern medeniyetinin gelişmesinde rol sahibidir

[49]. Camlar, gelişen teknolojilerle birlikte farklı tanımlar almıştır. Bunlardan bazıları, kristal yapıda olmayan katılar, farklı kimyasal bileşimlerdeki sıvının aşırı soğutulması sonucunda elde edilen amorf katılar gibi tanımlardır [50]. Amorf yapısını koruyarak cam katılaştır. Hızlı soğuma nedeniyle kristal yapı oluşumunu izin verilmeden amorf yapı oluşur. Bu da cama saydamlık ve sağlamlık özelliğini kazandırır [51]. Yaşamımızın vazgeçilmez malzemeleri arasında olan cam, inorganik erime ürününün kristallenmeye izin vermeden katı haldeki soğutulması olarak da tanımlanmaktadır [52]. Dengede olmayan bir yapı olmakla birlikte, katı olarak davranan kristal olmayan bir yapıdır, ancak sürekli olarak sıvı gibi akma eğilimindedir [49]. İnert, sert ve saydam olmaları en belirgin fiziksel özellikleridir. Oda sıcaklığında cam, elastik katıdır ve kırılma özelliği dezavantajdır [53].

Mekanik enerji veya basınç uygulayarak buhar fazından soğutma ve sol-jel gibi başka yöntemlerle camsı yapının elde edilebileceği, çeşitli organik maddelerin (gliserol gibi) camsı yapıda soğutulması cam olabileceğinin anlaşılması bu tanımın yetersizliğini anlatmaktadır [52]. Reaktif püskürtme, sol-jel, buhar biriktirme metotları ile üretilen camlar, ergime-soğutma yönteminde olduğu gibi genellikle aynı özelliklerde ve kimyasal bileşime sahiptirler [39].

Camlar, inorganik esaslı olabileceği gibi organik esaslı da olabilir, ayrıca metalik camlar da vardır. Polimerik organik bileşikler, gliserol, etilen glikol, polistiren, polietilen ve polikarbonatlar organik camlara örnek olarak gösterilebilir [8,39]. İnorganik camlar Al_2O_3 , SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , Zr_2O_5 , SbO_3 gibi oksitleri, halojenürleri, sülfürleri, karbonatları, nitratları ve Ni-Cr, Fe-Ni, Pb-Si gibi metalik alaşımları içerir. SiO_2 mükemmel cam yapma özelliğine sahiptir ve oksit esaslı camların ana bileşenidir. Camlaşma özelliği çok iyi olan silika, cam üretiminde önemli rol üstlenmektedir, oksit esaslı camlara silikat camları da denilmektedir. Şişe, bardak, pencere camı, tabak, ampul gibi cam eşyalar, cam elyaflar, teknik camlar gibi oksit esaslı cam malzemelerin ana bileşeni daima silikadır [8,39].

Camlar, kesin bir ergime noktası göstermezler. Camlaşma özelliği olan malzemelerin amorf, kristalin ve sıvı haldeki sıcaklık-hacim grafiği Şekil 3.5.'de verilmiştir [39].



Şekil 3.5. Camlaşma özelliği gösteren malzemelerde sıcaklık-hacim değişimi [39].

Camlaşma özelliği gösteren bir malzeme soğutulmaya başlandığında A noktası ile B noktası arası sıvı haldedir ve sıcaklığın azalması ile birlikte hacmi de düşmektedir. C noktasına kadar hacim düşmektedir. Burada B noktasında sıcaklık katılama sıcaklığı (T_m)'dir. B-C aralığında yeterli zaman ve kristallenmeyi sağlayacak çekirdekler varsa kristallenme gerçekleşir. Sıcaklığın düşüşüne bağlı olarak D noktasına kadar hacimde küçülme olur. Fakat soğuma hızı yüksekse kristallenme olmadan aşırı soğuma gerçekleşir, soğuma eğrisi A-E ve E-F doğrultusunda ilerler. Hacim sıcaklık eğrisinde B noktasında ani bir düşüş görülmez. Hacmin azalmasının sebebi, sıcaklık düştükçe atomların sık dizilme eğiliminde olması ve ısı büzülmedir. Katılama T_g sıcaklığına ulaşıldığında biter. T_g , cam geçiş sıcaklığı olarak adlandırıldığı gibi dönüşüm sıcaklığı olarak da isimlendirilir. Aşırı hızla soğutulmuş malzeme kristallenmeye zaman bulamadığından, atomlar düzensiz halde cam yapısını muhafaza ederek serbest hareket yeteneğini kaybederler. T_g noktasında viskozite değerindeki artıştan ($10^{12} - 10^{13}$ poise (poise = $1/10$ Ns/m²)) dolayı katı gibi davranır. Eğimler, A - E ve E - F noktaları arasında farklıdır. Buradaki cam geçiş sıcaklığı (T_g) E noktası olarak adlandırılır. Aşırı soğutulmuş sıvılar T_m ile cam geçiş sıcaklığı (T_g) arasında yer alır ve yarı kararlıdır. Oda sıcaklığındaki camın viskozitesi ise 10^{22} poise'dir [8,39,49,50].

Viskozitenin sürekli değişimi ile cam oluşumu karakterize edilir. Zaman ve sıcaklığa bağlı olarak viskozite değişir. Sıcaklığa bağlı olarak viskozite değişimi;

$$\eta = A \exp \left(\frac{E_c}{RT} \right) \quad (3.1)$$

denklemini ile hesaplanır. Formüldeki;

η : viskozite

A: cam için sabit bir değer

T: sıcaklık (K)

R: gaz sabitesi

E_c : viskoz akış aktivasyon enerjisini, ifade etmektedir [39].

Uygun sıcaklığa kadar ısıtılan inorganik birçok element ve bileşiğin viskoziteleri suyun viskozitesine yakındır. Tablo 3.3.'de bazı elemen ve bileşiklerin erime sıcaklıklarındaki viskozite değerleri verilmektedir. Donma noktalarına kadar soğutulan bu tip sıvıların viskoziteleri artar ve hızlı kristallenmeleri sonucunda katılaşır. Sıvı haldeki ya da ergimiş haldeki bir cam yüksek viskoziteye sahiptir. Yüksek viskozite nedeniyle camın atom ya da molekülleri fazla hareketli değildir. Donma noktasının altındaki sıcaklıklarda soğutulduklarında çok yavaş kristallenir. Kristal yapıya sahip malzemelerdeki gibi tipik bir erime noktasına sahip değildir. Eriyiğin donma noktasının altında bir sıcaklığa kadar kristallenmeden soğuması, kristallenme hızı yavaş ise mümkündür. Viskozite eriyik soğudukça artar [52].

Tablo 3.3. Bazı element ve bileşiklerin erime sıcaklıklarındaki viskozite değerleri [52].

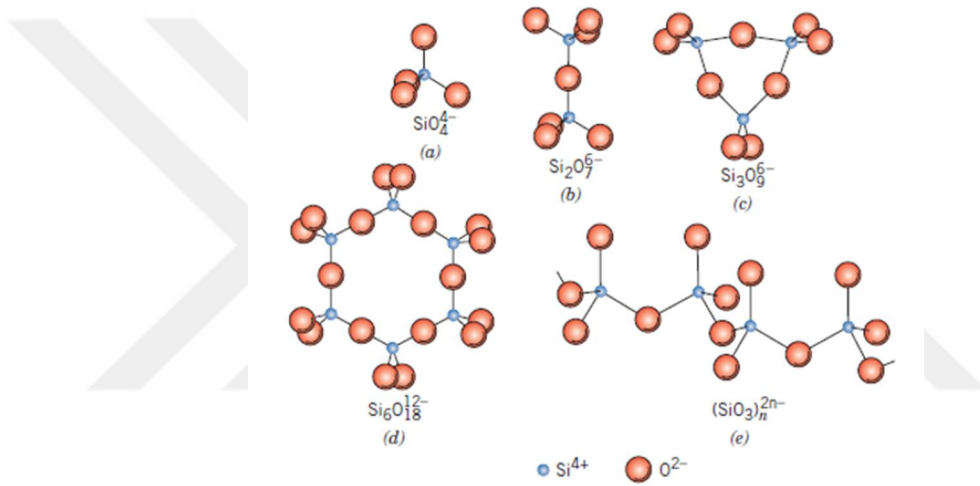
Madde	Su	LiCl	Na	Zn	Fe	As ₂ O ₃	B ₂ O ₃	SiO ₂
Erime Sıcaklığı (°C)	0	613	98	420	1535	309	450	1710
Viskozite (poise)	0,02	0,02	0,01	0,03	0,07	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁷

Sıvı halden soğutma sırasında herhangi bir sıcaklıkta kristalizasyon ve birden fazla faza ayrışma gibi süreksizlik göstermeyen, soğuma ile viskozitesinde artış gösteren atom yapısı düzensiz olan amorf katılara cam adı verilir [39].

3.1.3. Camların yapıları

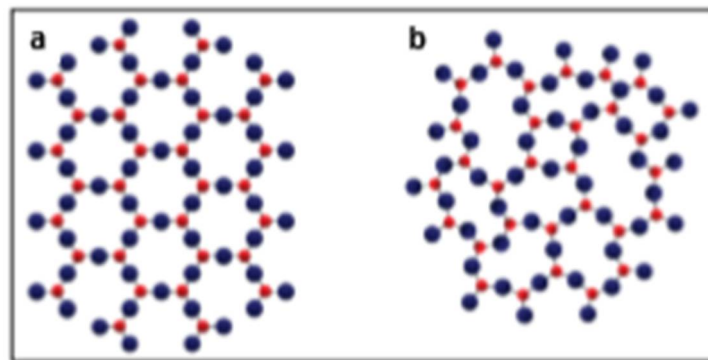
Camların yapılarına bakıldığında atomların dizilimlerinin düzensiz olduğu görülür. Atomlar birbirlerine kovalent, iyonik ve atomik bağlarla bağlanırlar. Birim boyutta camlarda düzen olmasına rağmen, bu düzen değişebilmektedir [54]. Camların

yapıları, amorf yapı bir malzemenin üç boyutlu yerleşimini açıklayan düzensiz şebeke modelidir. Bu modelde camlar, tekrarı ve simetrisi olmayan üç boyutlu şebekeler olarak ifade edilir [39]. Si-O atomları silika camında tetrahedraları oluştururlar. SiO_4 tetrahedraları gelişi güzel sıralanarak şebeke yapısını meydana getirir, ortamın nötrlüğünü sağlamak için camın yapısında alkali iyonları bulunur. Silisyum ile oksijenin koordinasyonu birçok silikatta aynıdır, silisyum atomu dört adet oksijen atomu ile çevrelenir ve köşe oksijen atomları komşu olan tetrahedralarla birleşerek düzgün kristal ağ yapısı oluşur [52,54,55]. Şekil 3.6.'da SiO_4^{-4} tetrahedrallerinden oluşmuş beş farklı silikat yapısı görülmektedir [56].



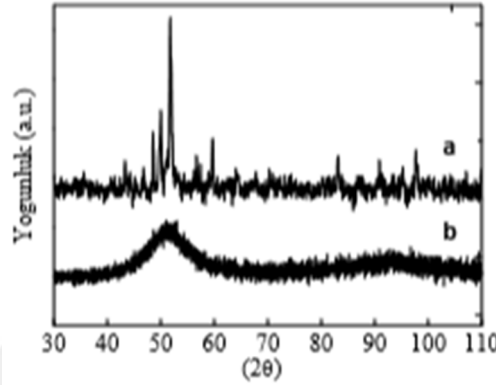
Şekil 3.6. SiO_4^{-4} tetrahedrallerinden oluşmuş beş farklı silikat yapısı [56].

Katı maddeler, kristal yapı (tekrarlanan ve düzenli yapıya sahip), amorf yapı (gelişi güzel dizilim), olmak üzere 2 grupta sınıflandırılırlar. Şekil 3.7.'de kristal ve amorf yapılar görülmektedir [57].



Şekil 3.7. (a) kristal, (b) Amorf yapılar [56].

X-ışını difraksiyonunda (XRD) amorf yapıların keskin belirgin piklerine rastlanmaz. Kristal yapıları malzemelerde X-ışını difraksiyonunda Bragg pikleri görülürken, amorf yapılarda geniş pik izleri görülmektedir. XRD’de her pik periyodikliği nedeni ile uzun mesafeli düzenli kristalin yapısı olduğunu ifade etmektedir. Şekil 3.8.’de kristalin malzemeler (a) ve amorf malzemelerin (b) XRD paternlerinin karşılaştırılması yapılmıştır [57].



Şekil 3.8. XRD paternleri, (a) kristalin malzemeler, (b) amorf malzemeler [56].

Kristalin malzemelerin XRD analizlerinde belirgin ve bağımsız pikler görülürken, amorf yapıya sahip malzemelerde ise geniş ve tek bir pike rastlanır [57].

Cam oluşumu farklı kimyasal sistemlerle olabilir. Bu kimyasal sistemlerden bazıları, oksitler (B_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5 , As_2O_3 , Sb_2O_3 gibi), sülfürler (As_2S_3 , Sb_2S_3 gibi), halojenler (BeF_2 , AlF_3 , $ZnCl_2$ gibi), nitratlar (KNO_3 - $Ca(NO_3)_2$), organik bileşikler, metalik alaşımlardır. Oksit camlar, en önemlileri ve ekonomik olanlarıdır. Önem sırasına göre ise en başta SiO_2 ve sırasıyla B_2O_3 , P_2O_5 ve GeO_2 gelir. Bu oksitler tek başına cam yapma özelliğine sahiptir, fakat başka bileşimdeki oksitler ilave edilerek ekonomik değeri olan çeşitli camlar da yapılabilir [52].

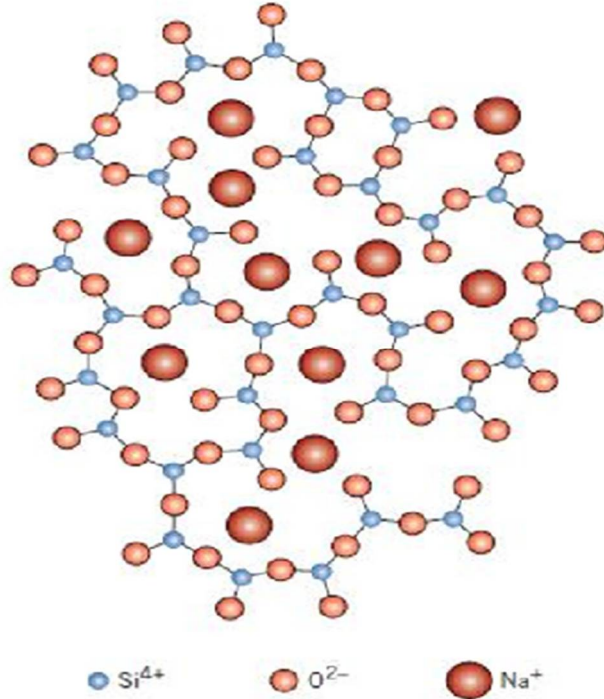
Camın bileşiminde yer alan oksitler, işlevlerine göre “cam yapıcılar”, “şebeke modifiye ediciler” ve “şartlı cam yapıcılar” olmak üzere üç grupta sınıflandırılır. Tablo 3.4.’de cam yapılarında yer alan oksitler verilmiştir [47,52,54,55].

Tablo 3.4. Cam yapılarında yer alan oksitler [47,52,54,55].

Cam Yapıdaki Görevi	Oksitler						
Cam Yapıcılar	B ₂ O ₃	SiO ₂	GeO ₂	P ₂ O ₅	V ₂ O ₅	As ₂ O ₃	
Şebeke modifiye ediciler	MgO	Li ₂ O	BaO	CaO	SrO	Na ₂ O	K ₂ O
Şartlı cam yapıcılar	Al ₂ O ₃	Sb ₂ O ₃	ZrO ₂	TiO ₂	PbO	BeO	ZnO

Şartlı cam yapıcı (aradakiler) oksitler, belirli oranlar da uygun oksit ya da oksitlerle yapı içerisinde bulunursa ağ yapısı oluşturabilirler. Bu oksitler, tek başlarına cam yapısını oluşturamaz. Örneğin Al₂O₃ (alümina), MgO-CaO-Al₂O₃ camında ağ yapısını oluşturur. CaO-Na₂O-Al₂O₃-SiO₂ camın yer alan Al₂O₃ ise ağ yapısını değiştiren oksit konumundadır. Ara oksidin cam yapıdaki rolü, camın kristallenme eğilimini azaltırken ve camın sağlamlığını da artırır [39,55].

Şebeke modifiye edici oksitler, ağ yapısını bozarlar ve daha yoğun dizilim sağlarlar. Bu oksitlerin iyonları, tetrahedraların birleşiminden içeri sızma yaparak ağ yapısını kopartır ve ara yer boşluklarında yer alır. Şekil 3.9.'da sodyum-silikat camında Na₂O'dan gelen Na⁺ iyonları modifiye edici olarak camın ağ yapısında dağılımları verilmiştir [39,56].

Şekil 3.9. Sodyum-silikat camlarını oluşturan iyonların (Si⁴⁺, O²⁻ ve Na⁺) şematik gösterimi [56].

3.1.4. Cam çeşitleri

Cam günlük hayatımızda birçok yerde kullanılan önemli bir malzemedir. Camın sahip olduğu özellikler kullanım yerlerinin de belirlenmesinde etkindir. Teleskoplar, mikroskoplar, gözlükler, fotoğraf makineleri, ışık filtreleri, radyasyondan korunma duvarları, pencere, renkli ve dekoratif cam ürünleri ve aynalar camın ışığı geçirebilme, saydam olma, ışığı emme kırma özelliklerine ihtiyaç gösterir. Cam kapılar ve kurşun geçirmez camlar da ise camın mekanik özellikleri ve sağlamlık önemlidir. Camın termik şoklara dayanıklılığı ise yemek pişirmek için fırında kullanılan cam ürünlerinde önemlidir ve ısıya dayanıklı olması gerekmektedir. Özellikle kavanozlarda, şişe, pencere camlarında, cam elyafı, kimya tesislerinde ve laboratuvar aletlerinde atmosferik şartlara ve kimyasal etkilere maruz kalırlar [58].

Cam malzemelerin özelliklerinde kimyasal bileşimi doğrudan etkilidir. Üretim yöntemleri ve camın bileşimi uygulama alanlarını belirlemektedir. Camlar, oksit, oksit olmayan (sülfat, florür, nitrat ve klorür bağlı camlar) ve metalik camlar olarak genel anlamda üçe ayrılır. Camlar, farklı kimyasal sistemlerle oluşabilirler, oksit camlar, bu sistemlerin içerisinde en ekonomik olarak üretilen camlardır [8,39].

Bi_2O_3 , TeO_2 ve Sb_2O_3 ağır metal oksitler cam yapıcı oksitler sınıfındadır. Bu camlar, optik fiberler, lazer camları, optik elemanlar, optik pencereler gibi optik uygulamalarda kullanım alanı bulmaktadır [59].

3.1.4.1. Oksit camlar

Camın yapısında cam yapıcı oksitler yer almadan oksit camların üretimi yapılamaz. Oksit camlar günümüzde en çok kullanılan ve ekonomik olan cam sınıfındadırlar. En çok kullanım alanı bulan oksit camlar;

- Soda-kireç-silika camı
- Boro-silikat camı
- Alümina-silikat camı
- Kurşun alkali camları olarak adlandırılır [39,58].

Soda-kireç-silika camının temel kimyasal bileşenleri % 72 silisyum dioksit (SiO_2), % 14 sodyum oksit (Na_2O) ve % 11 kalsiyum oksit (CaO) olacak şekildedir. Düz cam, sofraya eşyaları, cam kaplar, ampul gibi bazı elektrik alanında kullanılan camlar ve bazı elyaf camları bu sınıftadır. Bu oranlar kullanım alanına göre değişiklikler gösterebilir. İstenilen farklı özelliklere göre değişik oksit ilaveleri yapılabilir [58].

Camın ergime sıcaklığının yükselmesi camın bileşimindeki silika miktarının artışı ile olur, ayrıca silikanın artması sağlamlığı artır ve genleşmeyi düşürür. Sodyum oksit miktarındaki artış, camın ergime sıcaklığını düşürür, ısı genleşmeyi artırır ve sağlamlığı azaltır. Kalsiyum oksidin artırılması ise camın hızlı sertleşmesine yardımcı olur, kimyasal dayanıklılığını artırır ve işlenebilir özelliğine de etki eder. Kalsiyum oksit, kristallenmeye yol açtığı için miktarının artırılması kontrollü bir şekilde olmalıdır [58].

Boro-silikat camı borcam olarak da adlandırılır. Isıya dayanıklılık özelliği ile bilinir. Düşük genleşme katsayısından dolayı anı sıcaklık değişimine karşı dayanım gösterirler [53]. Kimyasal bileşiminde %81 SiO_2 , %4 Na_2O ve %12 B_2O_3 (B_2O_3) bulunur. Yine bu oranlarda kullanım alanına göre değişiklik olabilir ve başka oksitler ilave edilebilir. Camın yapısındaki bor oksit miktarının artması kimyasal dayanıklılığı artırır. Ayrıca cama boroksit ilavesi genleşmeyi de pozitif anlamda etkilemektedir [58].

Alümina-silikat camında SiO_4 tetrahedrasında çapı Si^{+4} 'e göre daha büyük olan Al^{+3} iyonları Si atomunun yerine geçebilirler. Oluşan yük dengesizliği toprak alkali oksitler ile giderilir ve bu toprak alkali oksitler ısı genleşme katsayısı düşük, kimyasal dayanımı yüksek ve aynı zamanda yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı cam üretimine yardımcı olur. Bu camlara bor oksitte katılabilir. B_2O_3 ilavesi, boro-silikat camlarına kıyasla yüksek sıcaklıklarda dayanımı artırır [8,47].

Kurşun alkali camlarında, %56 SiO_2 , %32 PbO ve %11 K_2O bulunur. Bu oranlar, camın kullanım alanına göre değişiklik gösterebilir ve diğer oksitlerin ilavesi de yapılabilir [58]. Cam bileşimine kurşun oksit katkısı yumuşama noktasını alkalilere

oranla daha çok düşürür, elektrik iletkenliğini ve kırılma indisini azaltır [8]. Yüksek kaliteye sahip sofra eşyasında, yüksek elektrik direnci gereken yerlerde, radyasyondan korunma panolarında kurşunlu camlar kullanılabilir [58].

3.1.4.2. Oksit olmayan camlar

Kalkojen camlar, nitrat-sülfat-hidrojen bağlı camlar ve halojen camlar oksit olmayan camlar grubunda yer alır. Bu camların dezavantajı neme karşı hassasiyet ve kristallenmeye olan yatkınlıklarıdır. Fiber-optik kablo üretiminde bu camlar kullanım alanı bulmaktadır [39].

Halojen camlarda cam $PbBr$, BeF_2 , $KCl-BCl_3$, HfF_4 , $AgBr$, ZrF_4 , $AgCl$, $ZnCl_2$ gibi halojen bileşimleri ile oluşturulabilir. Halojenlerin elementleri, en yüksek elektronegativiteye sahiptir [8].

Kalkojen camların bileşimlerinde S, Se, Te, Ge, Si, As, Sb gibi kalkojen elementler bulunur. Yapıyı oluşturan atomlar arasındaki bağlar ve yapısından dolayı diğer camlardan farklıdır. Kovalent bağ yapılarına sahiptir. Camı oluşturan atomların atom numarasındaki artış ile birlikte camın dielektrik iletkenliğinde düşer. Görünüş itibari ile bağların tiplerinden dolayı metalik özellik kazanır ve yarı iletkenlik (birçoğu) özelliktedir. Zayıf mekanik özelliklere sahip bu camların, optik özellikleri iyidir. Termal algılama sistemlerinde kalkojen camlar kullanılmaktadır [8].

Nitrat-sülfat-hidrojen bağlı camlar KNO_3-CaNO_3 gibi iyonik tuzlardan oluşur. Bu tip camların atomları iyonik karakterdedir [39].

3.1.4.3. Organik camlar

Cam malzemelerin alternatifi olarak ortaya çıkan organik camlar, polimerik malzemelerdir [60]. Organik camlar yada transparan plastikler, C, H, O ve N elementleri tarafından elde edilen polimer bileşiklerinden oluşan sentetik katılardır. Polimer makromolekülleri, monomerler arasında çoklu yoğunlaşma veya poliadişyon

reaksiyonları polimerisasyonu ile elde edilir. Plastikler akışkan hale getirebilir ve basınç ve ısı ile şekil verilebilir [61]. Üretim metotları, kimyasal bileşimleri ve özellikleri inorganik camlardan farklılık gösterirler. Şeffaf olan bazı organik camlar, benzer optik özellik gösterebilirler. Termoplastikler genelde optik uygulamalarında kullanılır [60,61]. Organik camlar, eriyiğin hızlı soğutulması esnasında karbon-karbon zincirleri sayesinde kristalleşme engellenir. Yumuşak görünümlü birbiri içerisine giren bu zincirler kıvrılma dönüşümleri yaparlar. Soğutulan polimerik malzeme kristalleşme ve camlaşma şeklinde iki mekanizmada katılaşabilir. Bazı polimerlerde camlaşma ön planda iken bazı polimerlerde kristalleşme olur [60]. Şekil 3.10.'da organik camların kullanım alanlarına örnek resimler verilmiştir [60].



Şekil 3.10. Organik camların bazı kullanım alanları [60].

Organik camların; akvaryum tankları, implant, gözlük camları, uçak kanopisi, araba ön camları, radar ve televizyon ekranları, optik bilgi depolama sektöründe, teleskop, pencere camları, büro ışıklandırma gereçleri gibi günümüzde uygulama alanları vardır [60].

3.1.4.4. Metalik camlar

Yapılan araştırmalarla bazı metal alaşımlarının camsı yapıda elde edilebileceği, anlaşılmış ve camlarla ilgili en önemli buluşlar arasına girmiştir [39]. Metaller hızlı

bir şekilde soğutulursa kristal yapı oluşturacak zaman bulamayarak rastgele dizilerek katılaşır ve oluşan yapı camsı metal ya da metalik cam olarak adlandırılır [62]. Yüksek derecede iletken, soğuk bir yüzey ile temas ettirilerek sınırlı soğutma hızlarında ince ergimiş bir tabaka üretilebilir [56]. Metalik camlar; amorf yapılı alaşımlar olarak da adlandırılır [63]. Erimiş alaşımların vitrifiye (camlaşma) edilmesiyle hazırlanan metalik camlar, geleneksel metallere kıyasla farklı özellikler sergiler [64]. Yüksek sertlik, mukavemet, aşınma direnci, korozyon direnci gibi özelliklere sahip metalik alaşım ailesidir [63,64]. Metalik camlar, amorf yapıda olduklarından aynı kimyasal bileşimdeki kristal yapılara göre bu avantajlı özelliklere sahiptirler [63].

Boyutsal kısıtlamalar ve gerekli yüksek soğutma hızlarından dolayı metalik camlar 1990'lı yıllara kadar sadece levha ve şerit halinde üretilmiştir. Bu alandaki dönüm noktası, çok bileşenli alaşımların keşfi ile olmuş ve iri hacimli metalik camlar ergitme ve döküm yöntemleri ile üretilebilir hale gelmiştir [56].

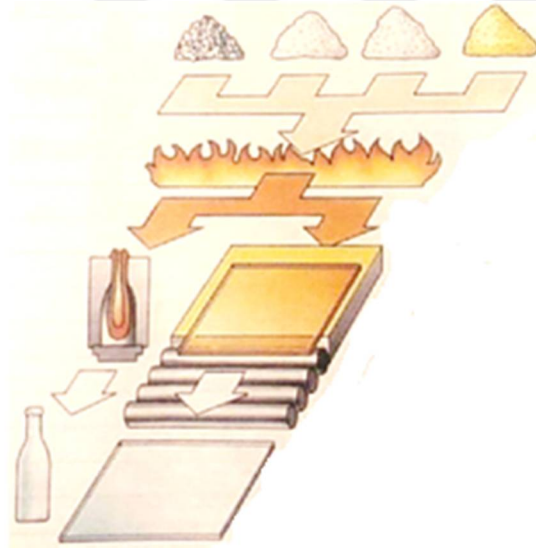
Metalik camlar, sahip oldukları manyetik, elektriksel ve mekanik özellikler ile otomotiv, medikal, askeri, uzay-havacılık alanlarında kullanılmaktadır. Biyo-uyumlu yapılarından dolayı protezlerde, ameliyat aletlerinde kalp ritim ayarı aletlerinde uygulama alanı bulurlar. Ayrıca golf sopası, tenis racketleri ve kayaklar gibi spor malzemelerinin üretiminde de kullanım alanlarına sahiptirler. Şekil 3.11.'de metalik camlardan üretilen spor malzemeleri görülmektedir [62].



Şekil 3.11. Metalik camlardan üretilen spor malzemeleri [62].

3.1.5. Cam üretimi

Sol-jel ve kimyasal buhar çöktürme yöntemleri ile üretilen camlardan önce ergime yöntemi bulk camların üretiminde kullanılan tek yöntem olarak bilinmekteydi. Halen bu yöntem ile camların %99'undan daha fazlası üretilmektedir. Bu teknik, homojen bir şekilde karıştırılarak hazırlanan hammaddelerin ergitilmesi ve bu eriyiğe şekil verilmesi esasına dayanır [65]. Camların üretimi, cam üretiminde belirli oranlarda kullanılacak hammaddelerin hazırlanması, bu hammaddelerin ergitilmesi, eritme sonrası şekillendirilme ve tavlama işlemi olmak üzere dört aşamada gerçekleşir [8,39]. Cam üretim işlem basamakları şematik olarak gösterimi Şekil 3.12.'de verilmiştir [39].



Şekil 3.12. Cam üretim işlem basamakları şematik ifadesi [39].

Hammaddelerin hazırlanması cam üretiminin ilk aşamasıdır. Üretilecek olan cam harmanının reçetesi hazırlanır ve uygun miktarlarda tartımları alınarak birbirleriyle karıştırma işlemi yapılır. Kuvars, feldspat, dolomit, soda, kalker, borik asit ve cam kırığı cam üretiminde yer alan başlıca hammaddeler arasında gelir. Bununla beraber cama renklendirici oksitler gibi yardımcı hammaddelerin ilavesi de yapılabilir. Bu yardımcı hammaddelerin başında, cama yeşilimsi rengi veren bakır ve mavi-kahverengi veren nikel gelmektedir. Ticari olarak üretilen bir camın içerisinde birçok farklı hammadde bulunur.

Hammaddeler, cama sağladıkları faydalara göre;

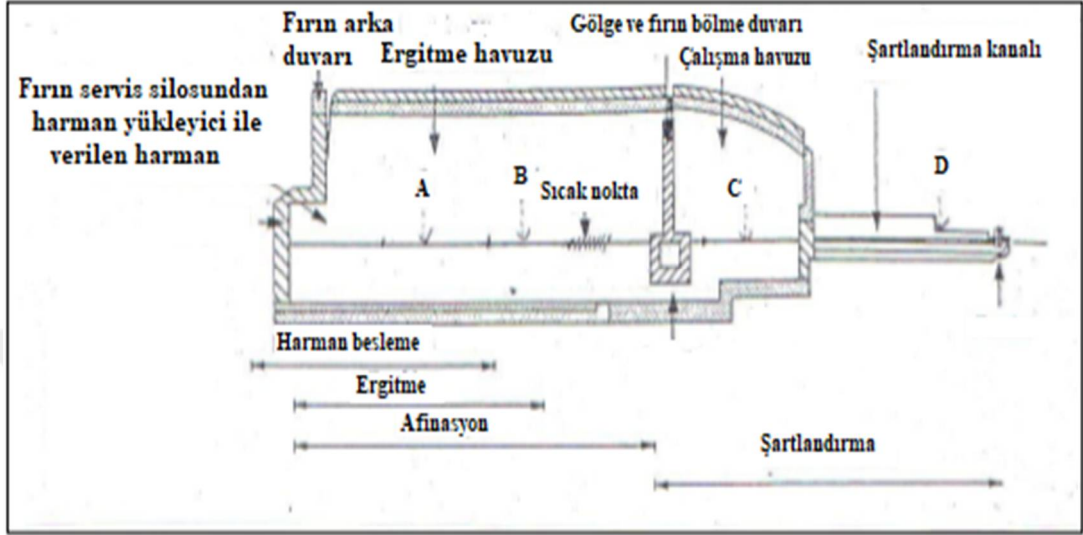
- Afinasyon maddeleri; NaNO_3 , CaSO_4 , As_2O_3 , Na_2SO_4 , CaF_2 NaCl
- Renklendiriciler; Fe, Mn, Co, V, Cu, Cr, Ni gibi elementlerin oksitleri veya tuzları.
- Renksizleştiriciler; CeO_2 , ZnSeO_3 , CoO
- Oksidan maddeler; çeşitli sülfatlar
- Redükleyici maddeler; kükürt, sülfür ve karbon şeklindedir [8].

Yardımcı hammadde oranlarının çok iyi ayarlanması gerekebilir. Az miktarlarda kullanılan yardımcı hammaddeler yüksek etkiler gösterdikleri için hatalı miktarlarda kullanımı cam yapılar üzerinde ciddi sorunlara sebebiyet verebilir. Cam harmanına, ana hammaddeler ve yardımcı hammaddelerin dışında cam kırıkları da eklenebilir. Cam kırıklarının tane iriliği, kimyasal bileşimi ve temizliği dikkat edilecek unsurlar arasındadır. Ergime esnasında sorun teşekkül etmemesi açısından cam kırıkların parçaları 2-2,5 cm aralığında olmalıdır. Camın bileşiminde olan hammaddeler yabancı maddelerden arındırılıp öğütme işlemine tabi tutulmalıdır. Öğütülen hammaddeler camın bileşimine girecekleri miktara göre alınıp eritmek için cam fırınlarına iletilir [8].

Ergitme cam üretiminin ikinci aşamasıdır. Cam hammaddelerin ergitilmesi uzun yıllar boyunca odun ateşi ile ısıtılan fırınlarda yapılmıştır [8]. Bu aşamada istenilen özellikler ve belirlenen miktarlar doğrultusunda hazırlanan toz halindeki kristal hammadde karışımları, ateşe dayanıklı krozeler içerisinde veya refrakter tuğlalarla inşa edilmiş tank fırınlarda yüksek sıcaklıklar neticesinde sıvı hale getirilir [65]. Ergitme veriminin en yüksek olması önemlidir. Bunun için doğru hammaddelerin seçimi yeterli değildir. Kullanılan hammaddelerin tane boyutlarının da doğru olması gerekmektedir [66].

Şekil 3.13.'de fırın içerisinde ergime prosesinin aşamaları görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi ergitme havuzuna kadar olan kısımda harman besleme tamamlanır. Fırının arka duvarında (harmanın beslendiği kısım) ergitme başlar sıcak noktanın

(fırını sıcaklığının en yüksek değerindeki nokta) bulunduğu kısımda hammadde ergitilmiş olur. Fırın arka duvarında başlayan afinasyon sıcak noktadan sonraki kısma kadar devam eder. Afinasyonun bittiği andan itibaren çıkışa kadar şartlandırma devam eder [66].



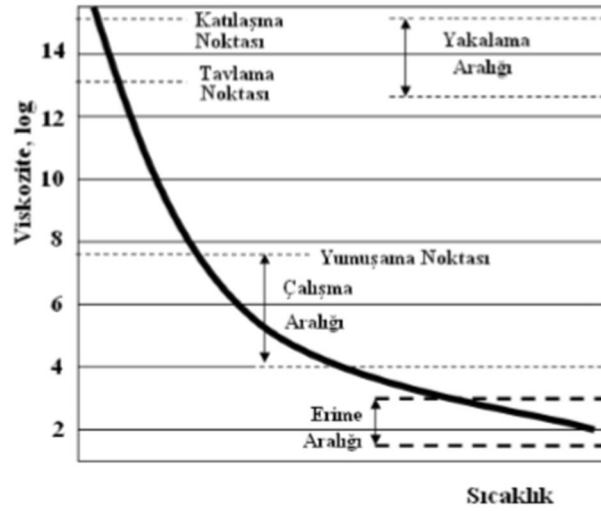
Şekil 3.13. Cam ergitme aşamaları [66].

A bölgesi; bu bölgede az miktarda da olsa ergimemiş harman bulunabilir. Hızlı bir şekilde ergime reaksiyonları devam eder, bu reaksiyonlar sonucunda oluşan gazlar açığa çıkar ve camdan uzaklaşmaya başlar. B bölgesinde çözünmemiş hammaddelerin çözünmesi için ergime işlemi devam eder. C bölgesinde; ergime ve afinasyon işlemi sona ermiştir ve şartlanmaktadır (soğumaktadır), ancak şekillendirme için halen eriyik sıcaktır. D Bölgesi; şartlandırmanın kritik bir hal aldığı noktadır. Sıcaklığın istenildiği gibi olması gerekir [66]. Ergitme, küçük işletmelerde potalar ile yapılırken, büyük ölçeklerdeki üretim için fırınlarda yapılır ve camın kimyasal bileşimine göre 1250- 1600 °C sıcaklıkları arasında değişebilir [65].

Ergimiş cam harmanın şekillendirilmesi viskoziteye bağlıdır. Ergimiş halden katı hale kadar viskozitede değişiklikler olabilir. Viskozite, akmağa karşı gösterilen dirençtir. Viskozitesi düşük olan sıvıların akışları viskozitesi yüksek olana göre daha hızlıdır. Akıcılık σ simgesi ile viskozite η simgesi ile gösterilecek olursa, aralarındaki ilişki denklem 3.2'deki gibidir.

$$\eta = \frac{1}{\phi} \quad (3.2)$$

Viskozite camın ergime sıcaklığında 10^2 poise, soğutulmuş camda ise 10^{22} poise seviyelerindedir. Tavlama sıcaklığında viskozite 10^{14} poise'dir. Şekil 3.14.'de camın viskozitesi sıcaklığın fonksiyonuna göre logaritmik olarak verilmiştir [8].



Şekil 3.14. Sıcaklığa bağlı olarak camın viskozitesi [8].

Camın ergitilmesinde kullanılan fırınlar, pota fırınları, tank fırınları, elektrikli cam fırınları olmak üzere üç grupta incelenir [39].

Şekillendirme; hammaddelerin hazırlanması ve ergime işleminden sonra gelir. Soda-kireç camlarının şekillendirilmesi, yaklaşık 1100 °C sıcaklıklarında yani ergime sıcaklığının altında olur. Bu sıcaklıktaki bal kıvamındaki viskoziteye “çalışma sıcaklığı” adı verilir. Camların şekillendirilmesi, üfleme (en eski şekillendirme yöntemidir ve şişirme olarak da bilinir), çekme (cam tabaka şeklinde çekilir) presleme (iki parçalı kalıp arasında üretim yapılır) dökme-silindirme (buzlu ve levha cam üretiminde kullanılır) ve float (yüzdürme olarak bilinen yöntem düzgün yüzeyli camlar elde edilir) yöntemleri ile yapılır [8,39,65].

Tavlama ile camda üretimden sonra oluşan iç gerilmeler giderilir. Mukavemetini artırmak için ise temperleme yapılır. Tavlama işlemi cam geçiş sıcaklığının üzerinde iç gerilmeler gidene kadar yapılır ve cam tekrar yavaş bir şekilde soğutulur [8,39].

3.2. Cam-Seramikler

3.2.1. Cam-seramiklerin tanımı

Kristallenmeye uygun camların kontrollü olarak kristallendirilmesi ile elde edilen malzemelere cam-seramik malzemeler denir. Kristallenme cam yapısına ilave edilen çekirdeklendiriciler ile ya da kimyasal bileşimleriyle kendiliğinden çekirdek oluşumunu sağlanarak oluşur [39]. Isıl işlem sıcaklık ve süresinin optimize edilerek, çekirdeklendirici ilavesi ile amorf yapılarda üretilen camların mikro yapılarında düzgün ve ince taneli olarak dağılan kristallerin elde edilmesi cam seramik üretimin temel amacıdır [8].

Cam-seramikler, özel bileşimlerde hazırlanan camların, kontrollü bir şekilde farklı yöntemlerle kristalize edilerek üretilen birden fazla kristal fazı içeren inorganik, metal olmayan malzemelerdir. Cam-seramiklerin mekanik özellikleri, çekirdeklenme ilavesi ile oluşturulan kristal boyutları ve morfolojisi, ana camıkinden daha üstün özelliktedir. Lityum silikat cam-seramiklerinde, yüksek kristallenme oranı ve büyük kristal taneleri çatlağın sapmasını ve ilerlemesini engelleyerek birbirine kenetlenmiş mikro yapılar oluşturur [67]. Cam-seramiklerde kristalizasyon, dikkatli ve uygun bir ısıl işlem ile sağlanır. Cam-seramik malzemelerde 1 μm ve daha küçük boyutlu kristaller bu malzemelerin %50'den fazlasını oluşturmaktadır [39].

Pürüzsüz bir yüzey ve sıkı sıkıya bağlı bir mikro kristalin yapıda cam-seramik hazırlanması iyi bir ısıl işlem ile camın kristallenmesine bağlıdır. Bunun için kristal büyümesini ya da kristal oluşumunu sağlayacak (çekirdek oluşumunu sağlayacak) malzemelerin cam bileşimine ilave edilmesi gerekmektedir. Çoğunlukla cam-seramikler saydam değildir, yani opaktır [68]. Kristallenmenin (devitrifikasyon) ana nedeni, esasen bileşenlerin difüzyonu ile kontrol edilen kristal büyümesinin çok yavaş olmasıdır [61]. Düzenli ve istenilen büyüklüklerde kristal oluşumu için 1cm^3 hacim içerisinde 10^{12} - 10^{15} çekirdek oluşumu sağlanmalıdır. Cam hammadde karışımın ergitilmesi ve şekillendirmesi esnasında çekirdeklendirici ilavesi yapılır. En önemli çekirdeklendiriciler TiO_2 , ZrO_2 , Cr_2O_3 , P_2O_5 gibi oksitler ve diğer asil

metaller, platin grubu metalleri ve floritlerdir. Mc Millan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda, metalik fosfatlarında camın kristalizasyonu için uygun olduğu belirlenmiştir. Bu çekirdeklendirici katkılar, kristalizasyonda etkin role sahiptirler. Bu çekirdekler üzerinde kristalin fazları büyümesi ile kristalisasyon esnasında birçok sayıda kristal faz çökmesi olur bu büyüme, çubuk, spiral, levha, lameller şeklinde olabilir [8,39,50].

Cam-seramikler saf oksitlerin yansıra camlaşma özelliği olan yüksek fırın cürufu, uçucu küller ve çimento üretiminde açığa çıkan bazı atıklar ile de elde edilebilir [10].

3.2.2. Cam-seramiklerin tarihçesi

Cam malzemelerin uygun şartlar altında kristallenme yeteneğinin bilinmesine rağmen cam-seramiklerin tarihçesi çok eskilere dayanmaz. 1739 yılında cam yapılarıdaki kristallenme olayını ilk ortaya çıkaran Fransız kimyacı Reamur'dur [10]. Reamur, alçıtaşı ve kum karışımına cam şişeleri gömmüş ve uzun süre yüksek sıcaklıklarda tutarak çok kristalli opak porselene benzer seramiğe dönüştüğünü göstermiştir. Fakat Reamur tarafından çok kristalli seramik malzemelere dönüşen camlar, tam olarak kontrollü kristalisasyon olmadığı için cam-seramik olarak kabul edilmemiştir. Kullandığı teknikler sonucunda elde edilen kristalin cam malzemeler düşük mekanik mukavemete sahipti [8]. Ancak cam-seramik kavramının ve cam-seramik ticaretinin ortaya çıkması ve değer kazanması iki asır sonra gerçekleşmiştir [10].

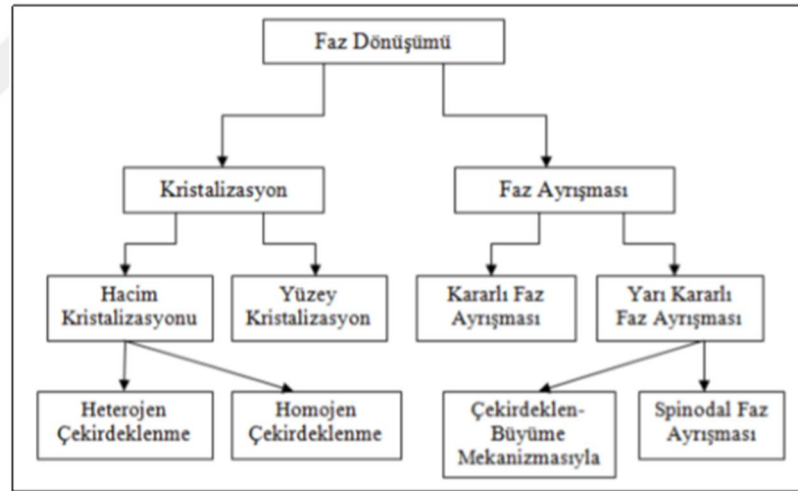
Amerika Birleşik Devletleri'nde (A.B.D) faaliyet gösteren Corning Glass Works tarafından, ışığa karşı duyarlı camların üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda cam mikro yapılarında gerekli faz dönüşümlerinin sağlanması ile cam-seramikler elde edilmiştir. S.D. Stookey, camın ısıtıl işlem sıcaklığından daha fazla sıcaklıklarda ergimeden bekletilmesi ile kristalin opak seramikler üretebildiğini ortaya koymuş ve yeni malzemeler üretmiştir. Bu malzemeler, camdan daha üstün elektrik yalıtkanlığına ve mekanik özelliklere sahiptir. Cam-seramikler, S.D. Stookey tarafından üretilen bu malzemeler ile tarihte yerini almıştır. 1957'de S.D. Stookey ile Pyroceram adıyla fırın soğutma malzemesi olarak ticari ürün şeklinde satışa

sunulmuştur [10,13,14]. Işığa duyarlı camların üretildiği bu ilk çalışmalarda çekirdeklendirici olarak cam bileşiminde gümüş (Ag) kullanılmıştır [69].

Çekirdeklendiri olarak gümüşün kullanıldığı ilk çalışmalar Altın (Au) ve bakır (Cu) gibi çekirdeklendiricilerinde cam seramiklerde kullanılabilmesinin yolunu açmıştır. S.D. Stookey TiO_2 'yi de çekirdeklendirici olarak kullanmıştır. Çekirdeklenme, koloidal partiküllerin (çekirdeklenme etkisi gösteren) cam içerisinde çöktürülmesi şeklindedir [69].

3.2.3. Camlarda faz dönüşümleri

Camlarda, iki türlü cam dönüşümü gerçekleşmektedir. Bunlar kristalizasyon ve faz ayrışmasıdır. Camlarda görülebilecek cam dönüşümleri Şekil 3.15.'de ifade edilmektedir [39,69,70].

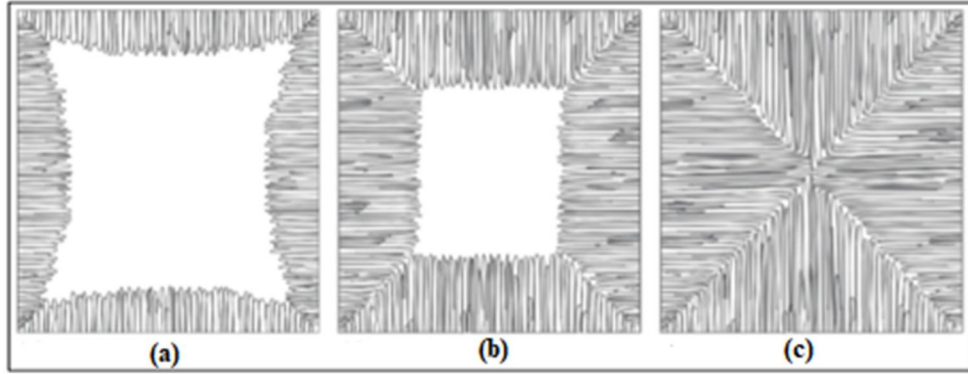


Şekil 3.15. Camlarda faz dönüşümleri [69].

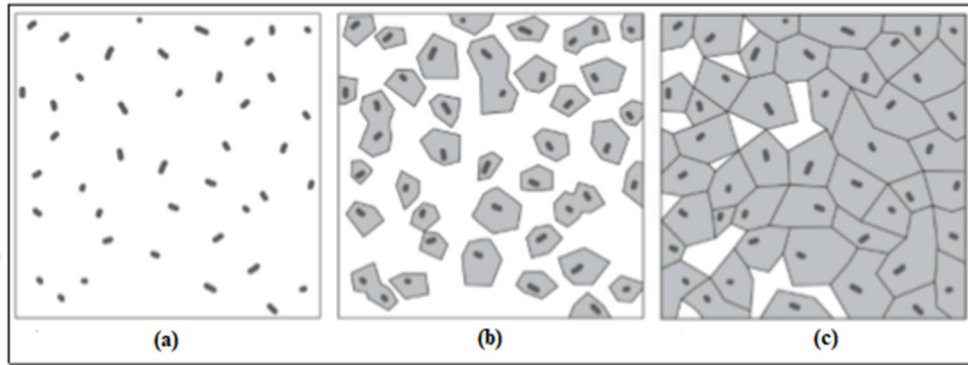
3.2.3.1. Kristalizasyon

Kristalizasyon, düzenli latis kristalleri elde edilmesi prosesi olarak ifade edilebilir. Cam fazından, kristal fazın ya da fazların çekirdeklenerek büyümesi olayına dayanır. Oluşan yeni fazlar, camın başlangıç bileşimleri ile aynı olabileceği gibi farklı bileşimlerde olabilirler. Kristallenme tüm kütlede olabileceği gibi yüzeyde de olabilir. Kristallenme yüzeyde oluyor ise yüzey kristallenmesi adı verilir ve hacimsel

kristallenmeye göre gerçekleşmesi daha kolaydır. Ayrıca cam sistemlerin hemen hemen tümünde görülebilir. Şekil 3.16.'da yüzey kristalizasyonunda kristal fazlar ve Şekil 3.17.'de ise hacim kristallenmesinin aşamaları görülmektedir [10,69,70].



Şekil 3.16. Yüzey kristalizasyonunun a) başlangıcı, b) ilerlemesi, c) tamamlanması [69].

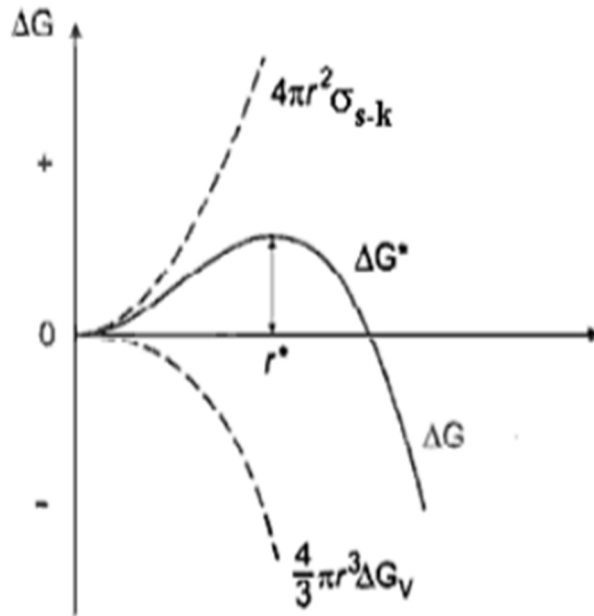


Şekil 3.17. Hacim kristalizasyonu, a) çekirdek oluşumu, b) çekirdeğin büyümesi, c) cam-seramik mikroyapısı [69].

Yüzey kristalizasyonu camın yüzey özellikleri ile alakalıdır. Camların ara yüzeylerinde çekirdekleniyorsa genellikle kristallen bu fazlar ara yüzeye dik doğrultuda büyürler [70]. Kristal büyümesi, çekirdekler ya da en küçük kristal üzerinde malzeme birikmesi ile olur. Bunun için çekirdeklenme ve kristal büyümesi olmak üzere kristalizasyon prosesi iki aşamada gerçekleşir. Kararlı çekirdeğin oluşumu ile oluşan çekirdek büyüyerek kristaller belirli bir boyuta ulaşır, bu kritik boyut sıcaklığa bağlıdır. Çekirdekler kritik boyuta ulaşabilirlerse kararlı olurlar ve kristal büyümesi çekirdekler üzerine yayınmanın gerçekleşmesi ile olur. Kritik boyuttan küçük çekirdekler ise kararsız yapıya sahip olur [10,70].

Çekirdeklenme “heterojen çekirdeklenme” ve “homojen çekirdeklenme” olmak üzere iki farklı şekilde meydana gelir. Eğer çekirdeklenme merkezleri yabancı maddelerin atomları ile oluşuyor ise heterojen çekirdeklenme, camı oluşturan kimyasal bileşenlerinden biri ile oluşuyorsa homojen çekirdeklenme olarak adlandırılır [10,70]. Kristalizasyon süresinin camlarda mümkün olduğunca kısa tutulması tercih edilir. Çekirdeklenme dışarıdan çekirdeklendirici ilave edilerek yani heterojen çekirdeklenme ile daha kısa sürede yapılır. Li_2O , BaO , CaO , ZnO , K_2O ve Na_2O gibi modifiye ediciler de kristalizasyonu kolaylaştırırlar [10].

Homojen çekirdeklenmede, kristal büyümesi kritik boyutun altında ise bunlar embriyon olarak adlandırılır, kararsız olan bu embriyonlar tekrar çözünürler. Oluşan çekirdeği küresel olarak ele aldığımızda embriyonların kararlı olarak büyüyen çekirdeğe dönüştüğü kritik yarıçap değerinde serbest enerji artışı en yüksek değerine ulaşır. Bu andan itibaren büyüyen çekirdekle serbest enerjideki artış miktarında azalma görülür ve serbest enerji düşüşe geçer. Şekil 3.18.’de bu durum ifade edilmektedir [10,39].



Şekil 3.18. Çekirdeğin büyümesi ile serbest enerjideki değişim [10].

Sıcaklığa bağlı olan çekirdeğin kritik boyu katılaşma noktasında sonsuzdur. Sıcaklığın düşüşü ile birlikte azalır. Homojen çekirdeklenmede çekirdeklenmenin

oluşumuyla (r yarıçapında) sıvı-katı faz dönüşümünde meydana gelen serbest enerji değişimi;

$$\Delta G = -\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta Gv + 4\pi r^2 \sigma_{s-k} \quad (3.3)$$

denklemini ile bulunabilir. Bu denklemde, r, çekirdeğin yarıçapı, σ_{s-k} , sıvı-katı ara yüzey enerjisi, ΔGv serbest enerjide (sıvı-katı faz dönüşümü esnasında) meydana gelen değişimdir. Dönüşümler esnasında yeni yüzeylerin oluşması serbest enerjideki artışa sebep olur. Dönüşümler sonucunda hacim düşüşü meydana gelir ve serbest enerjide azalma olur [70]. Çekirdeğin boyutuna (r yarıçapındaki) bağlı olan serbest enerjide değişim meydana gelir. Serbest enerjide düşme meydana getirecek, kritik çekirdek (r^* yarıçapındaki) denklem (3.3)'teki ΔGv 'nin r'ye göre türeviyle sıfıra (0) eşitlenmesi ile bulunabilir [39].

$$\frac{d(\Delta Gv)}{dr} = -\frac{12}{3\pi r^3 \Delta Gv} + 8\pi r \sigma_{s-k} = 0 \quad (3.4)$$

$$r^* = \frac{2\sigma_{s-k}}{\Delta Gv} \quad (3.5)$$

Eğer $r < r^*$ ise emriyonlar kararsız olur ve tekrar çözünürler, $r > r^*$ ise kararlı çekirdeklenme oluşturarak büyürler. Kritik boyutta çekirdekler var olduğunda çekirdeklenmenin olabilmesi için aşılması gereken enerji engeli ΔG^* ile ifade edilirse, bu değer (3.6) denklemi ile hesaplanan kritik boyut değerininin (3.3) denkleminde yerine konulması ile bulunabilir [39].

$$\Delta G^* = -\frac{4}{3} \pi \left(\frac{2\sigma_{s-k}}{\Delta Gv} \right)^3 \Delta Gv + 4\pi \left(\frac{2\sigma_{s-k}}{\Delta Gv} \right)^2 \sigma_{s-k} \quad (3.6)$$

$$\Delta G^* = \frac{16\pi(\sigma_{s-k})^3}{3(\Delta Gv)^2} \quad (3.7)$$

Kristalizasyon işlemin gerçekleşebilmesi için, kritik yarıçaplı (r^* boyutundaki) çekirdeklerin oluşumuyla serbest enerji (ΔG^*) değerinde düşme sağlanmalıdır. Homojen çekirdeklenmenin hızı, kritik boyutlu çekirdeklerin düzensiz gelişi güzel

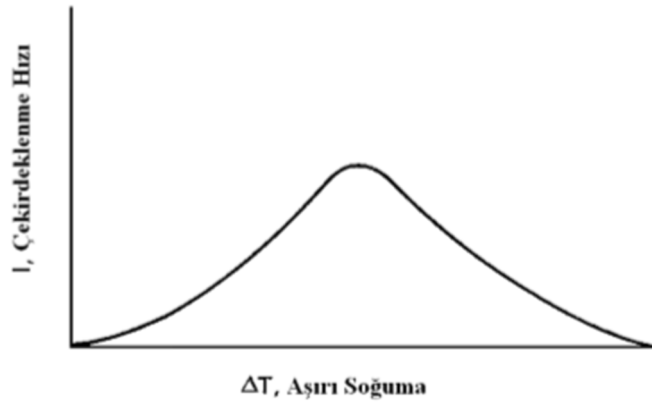
değişim ile oluştukları kabul edilerek belirlenir. Çekirdeklerin oluşmasının ve boyut dağılımlarının düzensiz değişimlerle bağlantısı olduğu varsayılır [10,39].

Difüzyon mekanizması sayesinde çekirdeğin büyümesi gerçekleşir. Birim hacimde meydana gelen çekirdeklenme hızı (eğer matris-çekirdek ara yüzeyindeki sıçrama, aktivasyon serbest enerjisi (ΔG_a) ile kontrol edilirse) [39];

$$I = B \exp[-(\Delta G^* + \Delta G_a) / k_B T] \quad (3.8)$$

denklemini ile ifade edilir. ΔG_a , kinetik engel (çekirdeklenmeye karşı), olarak adlandırılır. Boltzman sabiti, k_B ile gösterilirken, B ise 10^{41} - $10^{42} \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$ arasında değişen bir sabit sayıdır.

Sıcaklık ile çekirdeklenme hızının ilişkisi Şekil 3.19.'da verilmiştir. Denklemin (3.8)'deki exp ifadeleri yardımıyla eğrinin durumu anlaşılabilir. $\exp(-\Delta G^*/k_B T)$ denklemini likidüs sıcaklığında "0" olacak ve ΔT arttıkça aşırı soğuma miktarı artacaktır. Daha fazla aşırı soğumalarda $(-\Delta G_a / k_B T)$ denklemini üstün olur. Maksimumdan geçtikten sonra çekirdeklenme hızı, soğumanın artması ile azalır [10, 39].



Şekil 3.19. Aşırı soğuma (ΔT) ile çekirdeklenme arasındaki ilişki [10].

Kinetik ve termodinamik engellerinin aşılması sonucunda homojen çekirdeklenme ile kristalizasyon gerçekleşebilir. Ergime sıcaklığının altında gerek polimerlerde, gerekse camlarda homojen çekirdeklenmenin sağlanması mümkündür. Fakat endüstriyel koşullarda heterojen çekirdeklenmeye neden olan yabancı partiküller

sistemde her zaman mevcuttur. Homojen çekirdeklenme, camların kristallenmesinde nadir örnekler sergilemektedir. Baryum-silikat camlarında çekirdeklenme ilavesi olmadan cam kristallenebilir. Cam ve amorf polimerlerde çekirdeklenme ve büyüme hızının düşük olmasında, kinetik engel büyük öneme sahiptir. Diğer inorganik malzemelerin, metal ve alaşımların sıvı haldeki viskoziteleri düşüktür ve kolayca kristallenirler. Üç boyutlu şebeke yapısına sahip cam yapıcı sistemlerin akışkanlık özelliği zayıftır. Şebeke yapısını bozan oksitler camların bileşimine girdiklerinde kristalizasyona neden olmaları ya da camlaşma özelliğini düşürmeleri bu şekilde ifade edilir [39].

Faz dönüşümleri genelde kristal hatalarının ve tane sınırlarının bulunduğu bölgeler gibi kendilerinden farklı bileşimde olan ortamlarda gerçekleşen olaydır. Heterojen çekirdeklenme; homojen çekirdeklenmeden fazla görülen bir olaydır. Dönüşümün olduğu ortamlarda, çekirdeklenme merkezi görevi üstlenen maddelerin bulunması ve bu maddelerden dolayı oluşan ara yüzeylerdeki enerjinin kristallenme için gerekli engeli (termodinamik) değiştirmesi buna sebeptir [70].

ΔG_a ve ΔG_v değerleri bu çekirdeklenme türünde değişmeden kalır. İki ara yüzey oluşumu enerji değişimine etki eder. Bu iki ara yüzey,

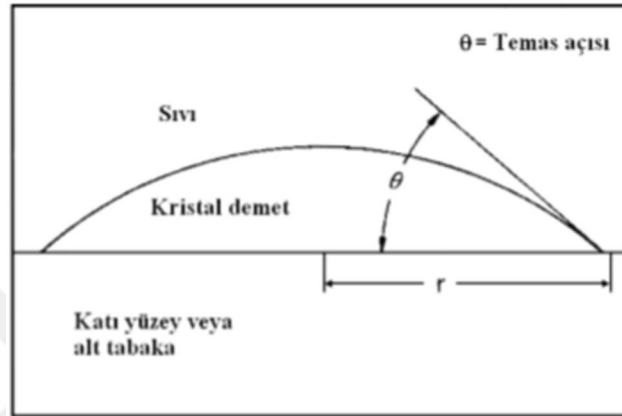
- Sıvı ile heterojen faz arasındaki
- Embriyon ile heterojen faz arasındaki ara yüzeylerdir.

Çekirdeklenmenin daha düşük sıcaklıklarda olması için embriyon ile heterojen faz arasındaki ara yüzey gerilimi düşük olmalıdır. Bu durum damla modeli ile açıklanmaktadır [70].

Yabancı bir katının yüzeyinde heterojen çekirdek oluşur. Sıvı içerisinden dağılan katıdan ya da kabın duvarından gelişebilir. Şekil 3.18.'de temas açısı θ kristal demeti (katı yüzeyinde şekillenen) görülmektedir. Bu kristal demetinin serbest enerjideki değişimi (3.9) denklemi aşağıdaki gibidir [39].

$$\Delta G = \frac{V_d}{V_m} \Delta G_v + S_{s-k} \sigma_{s-k} + S_{k-a} (\sigma_{k-a} - \sigma_{s-a}) \quad (3.9)$$

Denklemden V_m , kristal fazın molar hacmi, V_d : demetin hacmi, S_{k-a} , kristal-alt tabaka ve S_{s-k} , sıvı-kristal ara yüzey enerjileri, σ_{s-k} sıvı-kristal, σ_{s-a} sıvı-alt tabaka ve σ_{k-a} kristal-alt tabaka ve arasındaki ara yüzey enerjileridir.



Şekil 3.20. Kristal demetin (katı alt tabaka üzerinde) oluşumu [39].

Kristal demeti r yarıçaplıdır ve küreseldir. Alt tabakanın düzlem ve üç faz arasında statik denge olduğu kabul edilirse;

$$\sigma_{s-k} = \sigma_{k-a} + \sigma_{s-k} \cos \theta \quad (3.10)$$

$$V_d = \frac{4}{\pi r^3} \frac{(2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta)}{4} \quad (3.11)$$

$$S_{s-k} = \pi r^2 (1 - \cos \theta) \quad (3.12)$$

$$S_{k-a} = \pi r^2 \sin^2 \theta \quad (3.13)$$

$$\Delta G_{het}^* = \Delta G^* f(\theta) \quad (3.14)$$

$$f(\theta) = \frac{(2 - \cos \theta + \cos^3 \theta)}{4} \quad (3.15)$$

$$r^* = \frac{2\sigma_{s-k}V_m}{\Delta G_v} \quad (3.16)$$

denklemleri yazılabilir. $f(\theta)$, kristal çekirdek ve alt tabaka arasındaki temas açısı (θ) bağlı olan bir fonksiyondur ve $0 \leq \theta \leq \pi$ için $f(\theta) \leq 1$ 'dir. θ değerine bağlı olarak termodinamik engel azalır.

Düz bir alt tabakadaki (aşırı soğumuş sıvılarda) kararlı heterojen çekirdeklenme hızı,

$$I_{het} = n_s \left(\frac{kt}{h} \right) \exp \left[-\frac{(\Delta G_{het}^* + \Delta G_a)}{kT} \right] \quad (3.17)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada n_s , sıvının her bir birim hacmindeki alt tabaka taneleri ile temastaki sıvı atomlarının toplam sayısı; h , Planck sabiti; k , reaksiyon hız sabiti ve t , zamandır [39].

3.2.3.2. Faz ayrışması

Cam hammaddeleri eridiğinde sıvı oluşur ve kendiliğinden yüksek viskoziteli iki ayrı sıvı veya faza ayrışabilir (bazı durumlarda). Başlangıçta karışmış olan bu sıvılar, yavaş bir süreç ile iki tabakaya ayrılırlar. Cam geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklığa soğutulan eriyik, ana faz içinde saçılmış-dağılmış halde damlacıklar içeren bir katı oluşur [71]. Cama uygulanan ısı işlemleri iki fazın ayrışmasına (kristal olmayan) neden olabilir. Bu faz ayrışması, “kararlı karışmazlık” ve “yarı kararlı karışmazlık” olarak isimlendirilir. Likidüs sıcaklığının üzerinde kararlı karışmazlık, altında ise yarı kararlı karışmazlık olarak adlandırılır. Yarı kararlı karışmazlığa, “cam içinde cam fazı ayrışması” da denilir. Çekirdeklenme ve büyümeden önce faz ayrışmasının olması durumunda kristalizasyon kinetiğinde ciddi değişimler görülebilir. Yarı kararlı karışmazlık, cam-seramiklerin üretimi açısından önem taşır ve iki mekanizma ile gerçekleşebilir;

- Çekirdeklenme ve büyüme mekanizması
- Spinodal faz ayrışması [10].

Çekirdeklenme ve büyüme mekanizması için küresel şekilli (genellikle) kristalin fazlar olurken, spinodal faz ayrışması ile büyüyen kristaller ise iğnesel şekildedir. Spinodal faz ayrışmasında kristalizasyon için çekirdeklenmeye ihtiyaç duyulmaz [10,70].

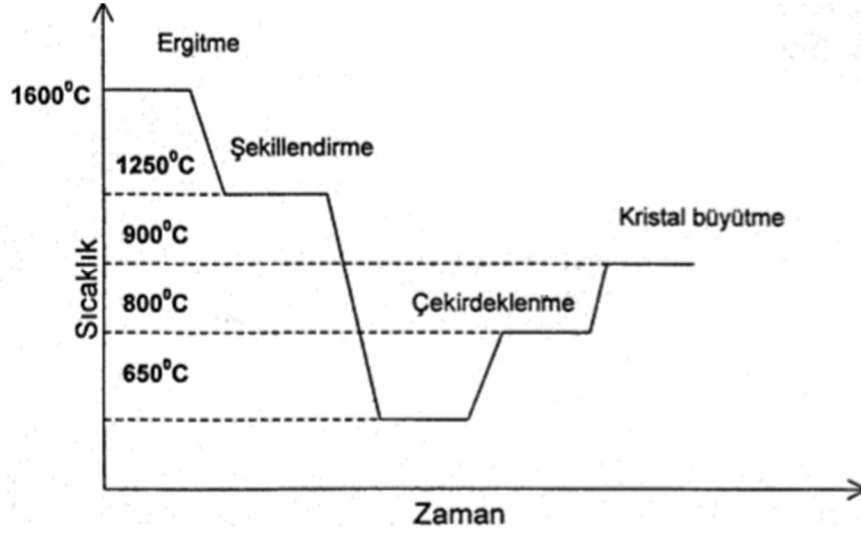
Kristalizasyondan önce camlarda faz ayrışmasının olması mikroyapıyı ve kristalizasyon davranışını önemli derecede etkiler. Ayrılan fazlar, kristalizasyon aşamasında heterojen çekirdeklenme etkisi yaparlar. Faz ayrışması olan camların kontrollü kristalizasyonu ile oluşan ince mikroyapı, çekirdeklenme yoğunluğundaki artış ile difüzyon aktivasyon enerjilerinin yükselmesi (ayrışan fazların) sonucunda kristal büyüme hızını düşürmelerinden kaynaklanır [10].

3.2.4. Cam-seramik üretimi

Cam-seramikler, klasik cam üretim yöntemleri kullanılarak üretilbileceği gibi alternatif yöntemler kullanılarak da üretilir. Cam-seramik oluşumunun anlaşılması için camlardaki faz dönüşümlerinin ve cam oluşumunun anlaşılması gerekir. Endüstriyel atıklar, termik santral uçucu külleri ve yüksek fırın cürüfları kullanılarak cam seramiklerin üretiminin yanında, sol-jel metodu ile de cam seramik üretimi mümkündür [8]. Cam yapılarıdaki faz dönüşümlerinin ve cam oluşumunun iyi anlaşılması ile cam-seramik oluşumu gerçekleştirilebilir [10].

3.2.4.1. Klasik cam-seramik üretimi

Klasik cam-seramik üretiminde ilk aşama olarak homojen bir cam hazırlanır, hazırlanan cam şekillendirilir ve kontrollü ısı işlem ile kristalize edilerek cam seramiğe dönüştürülür. Uygulanan ısı işlem Şekil 3.21.'de şematik olarak verilmiştir [70].



Şekil 3.21. Cam-seramiğin ($\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$) genel ısıtım işlemi diyagramı [70].

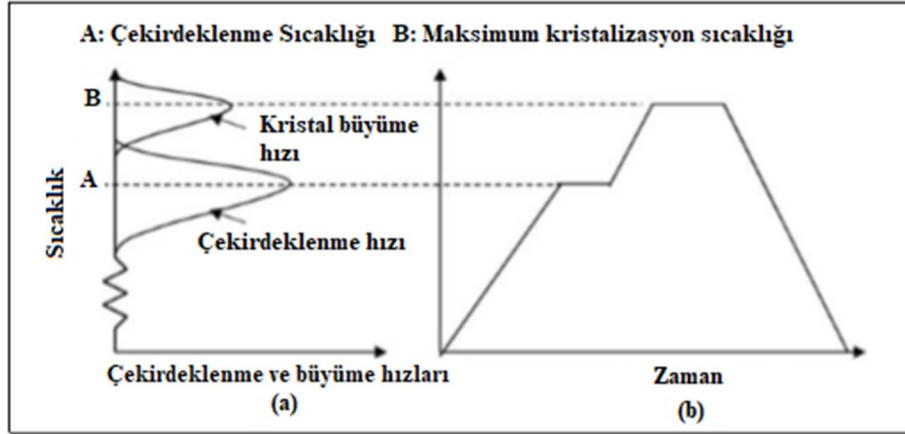
Cam üretimi cam-seramik üretmeye uygun kimyasal bileşimdeki camların üretimi ile başlar. Camı oluşturan hammaddelerin bileşimlerinin basit olması, saflık derecesinin yüksek ve ekonomik olmaları önemli hususlardandır. Hammaddelerin hazırlanması, bu hammaddelerin karıştırılması ve ergitme sıcaklıkları da önemlidir. Cam hammaddesi, üretilecek olan camın mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilediğinden dolayı bu hammaddelerin içerdiği empüriler (küçük miktarlarda bile olsa) üretilecek olan cam-seramiğin özelliklerini etkileyecektir. Bu yüzden hammaddelerin yüksek saflıkta olması istenir [8].

Silika (SiO_2) camın ana bileşeni olup, yüksek saflıktaki silika kumundan karşılanmaktadır. Cam üretiminde florürlü ve klorürlü hammaddelerin yanında Al_2O_3 , B_2O_3 , Na_2O , BaO , CaO , K_2O ve MgO 'da kullanılabilir. Bu bileşenlerin bazıları karbonat mineralleri şeklinde de katılabilir. Hammaddeler camların istenen özelliklerine göre seçilir, oranlar belirlenir ve tartımları alınarak karıştırıldıktan sonra cam fırınlarında ergitilir. Küçük çaplı işletmeler ergitme işlemini potalarda yaparken, büyük ölçekli üretimler için cam fırınları kullanılır. Ergitme işlemi, camın bileşimindeki hammaddelere bağlı olarak 1250 – 1600 °C sıcaklıkları arasındaki bir sıcaklıkta yapılmaktadır. Yüksek kaliteli müllit esaslı refrakterler, müllit-zirkon refrakterler fırın refrakteri olarak tercih edilir. Platin potalar ise bazı özel bileşimlerde kullanım alanı bulmaktadır [8]. Harman sıcaklığına ulaşıldığında, kimyasal tepkimeler hızlanır, cam harmanı içerisindeki hammaddelerin ergitilmesi

sağlanır. Isı iletimi, ergime süresinde etkin rol oynayan parametredir. Fakat oksit esaslı cam harmanında ısı iletim katsayısı düşük olur. Isı iletimi, cam ergitme fırınında radyasyonla olur. Zayıf ısı iletiminden dolayı harman yüzeyinde ergime olur. Yoğunluk kazanan eriyen hammadde akışkanlığından dolayı aşağılara inerken radyasyonla ısı iletiminden dolayı soğuk hammaddeler ile teması sağlanır. Bunun için fırın içerisindeki sıcaklığın ve sürenin iyi ayarlanması gerekmektedir [70].

Camın şekillendirilmesi için döküm yöntemi en basit yöntemdir. Camlarda üretim esnasında kullanılan şekillendirme yöntemleri cam-seramik üretiminde de kullanılmaktadır. Çekme, presleme, haddeleme ve üfleme cam-seramik üretiminde kullanılan yöntemler arasındadır. Bu tekniklerle, tüp, boru, şerit, levha veya çubukların üretimi yapılabilmektedir. Tabak, kâse gibi et kalınlığı fazla olan cam ürünlerin üretiminde ise presleme yöntemi en uygun yöntemdir. Derinliği fazla olan eşyalarda ise üfleme yöntemi tercih edilir. Plaka ve levha halinde düz camların üretiminde haddeleme ve yüzdürme, Danner yöntemi ise cam boruların üretiminde kullanılmaktadır. Cam üretiminde soğuma sırasında meydana gelen gerilimleri gidermek için kristalizasyondan önce gerilme giderme tavlamaının mutlaka yapılması gerekir [8,10,70].

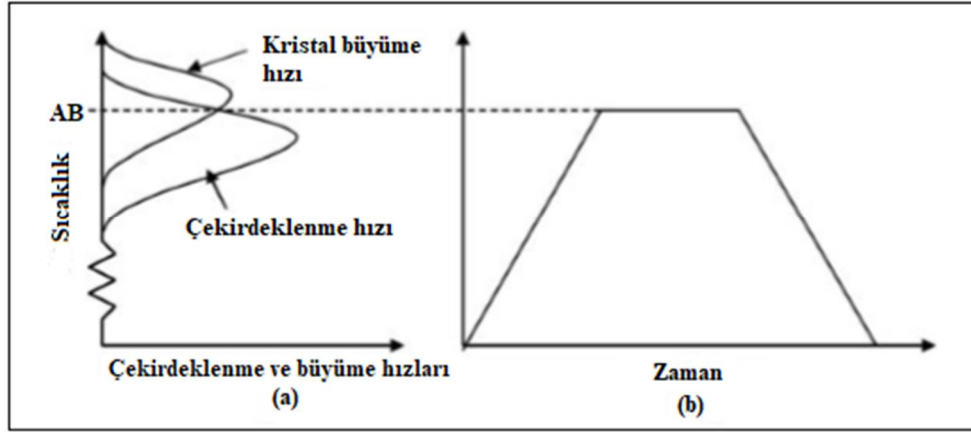
Camın kontrollü kristalizasyon ısııl işlemi cam-seramik üretiminde kontrollü kristalizasyon ile amorf cam yapıların mikrokristalli seramiklere geçişini sağlamaktır. Bunun amacı aşınma ve mukavemet özelliklerini geliştirmektir [10]. İnce kristallerin çok iyi dağıtılması ve boşluksuz oluşturulan yapının mukavemete katkısı büyüktür. Isıl işlem parametrelerinin başında ısıtma hızı gelir. Takip eden aşamalar ise çekirdeklenme ve kristallenme sıcaklıkları ve uygulama süresidir. Isıl işlemin çekirdeklenme aşaması kontrollü ve dikkatli yapılır ise az sayıda ve kaba kristaller yerine daha sık ve ince kristaller elde edilir. Etkili çekirdeklenme, sık ve çok sayıda küçük kristaller oluşturur. Cam seramik üretmek için en önemli faktördür [39,69]. Şekil 3.22.'de cam-seramiklerin kristalizasyon (iki aşamalı) ısııl işlemi görülmektedir [39].



Şekil 3.22. Cam-seramiğin kristalizasyonu, a) çekirdeklenme ve kristal büyümesine sıcaklığın etkisi, b) iki aşamalı ısıtma işlemi [39,69].

Prosesin iyi kontrol edilebilmesi açısından A ve B sıcaklıkları arasındaki fark yüksek olmalıdır. İki sıcaklık arasında (A ve B sıcaklığı) çekirdeklerin sayısını kontrol etmek kristallenmeye izin vermeden mümkündür. Yeterli sayıda çekirdek A sıcaklığında oluşur ve B'ye getirilerek kristal büyümesi sağlanır [39].

Sıcaklığın yükseltilmesi ile çekirdeklenme üzerinde kristal büyümesi olur ve çekirdeklenmiş cam elde edilir. Cam-seramiğin deformasyonunu engellemek için sıcaklığın artışı kontrollü bir şekilde olmalıdır. Çok küçük ısıtma hızları ile deformasyon olmaz yüksek oranda cam fazı oluşur. Deformasyonun istenmeyen etkilerine karşı hızlı ısıtmalardan kaçınılmalıdır. Cam-seramiklerde hızlı ısıtma neticesinde çatlamlar olur. Kristallerin farklı yoğunluklarda olmaları bu tehlikeli duruma yol açar. Yüksek sıcaklık sınırına kadar sıcaklık artışı yapılabilir. Bu sınır ise kristallenmenin olduğu en üst sıcaklık seviyesidir. Kristallenmenin tamamlanması için yüksek kristallenme sıcaklığında cam seramik malzeme uygun zaman aralığında bırakılmalıdır. Yapıda kalıntı cam fazları az miktarda kalır. Şekil 3.23.'de tek aşamalı ısıtma işlemi ile cam seramiğin kristalizasyonu görülmektedir [10,39,69].



Şekil 3.23. Tek aşamalı ısıtma işlemi ile cam-seramiğin kristalizasyonu, a) çekirdeklenme ve kristal büyüme hızı eğrilerinin sıcaklığa bağımlılığı ve üst üste çakışması b) tek aşamalı ısıtma işlemi [39,69].

Cam yapıların çekirdeklenme ve büyüme eğrileri bir noktada çakışıyor ve A sıcaklığı B sıcaklığına çok yakın ise T_{AB} olarak ifade edilen bir sıcaklıktan tek aşamalı ısıtma yapılabilir [39].

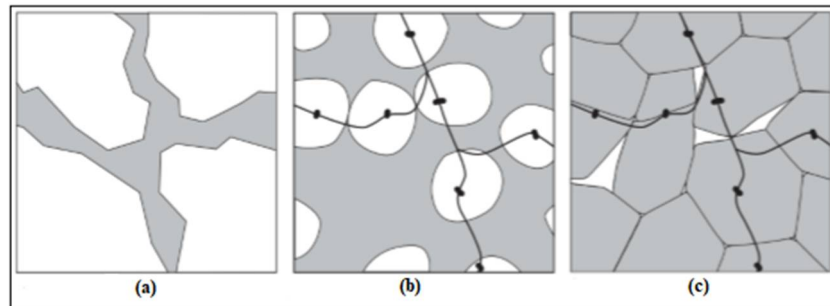
Camın kırılmadan yüksek sıcaklıklara dayanması için düşük genişleme katsayılarında olması gerekir. İstenilen özellikteki cam malzemelerin kimyasal bileşimlerine göre hazırlanan hammaddeler karıştırılır ve istenilen özelliğe göre uygun sıcaklıkta eritilir ve şekillendirilir. Daha sonra ısıtma işlemi ile cam seramiğe dönüştürülür. Genellikle $2^{\circ}\text{C}/\text{dk} - 5^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızıyla ısıtma işlemi uygulanır. İnce camlar için ısıtma hızı $10^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ 'lara kadar çıkılabilir. Kristallerin büyümesi için kontrollü bir sıcaklıkla cam daha yüksek sıcaklıklarda ısıtılır ve belirli bir süre bekletilir. Kristal büyüme sıcaklığının, malzemede distorsiyon oluşumuna sebep vermeyen bir sıcaklık olması gerekir. İyi bir ısıtma işlemi ile 50 – 100 nm aralığında kristal boyutu elde edilebilirken mikroyapılar genellikle $1\mu\text{m}$ tane boyutuna (ortalama) sahiptir [10].

Bu iki ısıtma işlemi prosesinden farklı olarak Petrurcig yöntemi ile de kristalizasyon ısıtma işlemi yapılabilmektedir. “Silceram” cam-seramik üretimi bu yöntemle yapılmıştır. Oda sıcaklığındaki camın T_{AB} sıcaklığına kadar ısıtılması veya eriyik haldeki camın T_{AB} sıcaklığına kadar soğutulması arasındaki fark çok azdır. Bu durum, erimiş haldeki camın kontrollü ve çok yavaş bir şekilde soğutulup cam seramik üretimini mümkün kılmaktadır [39,69].

3.2.4.2. Toz yöntemleri ile cam-seramik üretimi

Tozların preslenip sinterlenmesi esasına dayanan bu yöntem klasik cam-seramik üretim yöntemlerine alternatif bir cam-seramik üretim şeklidir. Klasik yöntemde çekirdeklenme ve kristal büyümesi ısıtma adımlarının kontrol edilmesindeki zorluklar ve ekonomik açıdan maliyetli oluşu bu üretim yöntemi için dezavantaj olarak görülmektedir. Cam üretimi sırasında sistemde oluşan gözenekler, cam-seramik ürünlerinin mekanik özelliklerini düşürmektedir. Uzun sürelerde ve yüksek sıcaklıklarda rafinasyon ile birlikte camlarda oluşan hatalar giderilebilir [10,39,69].

Seramiklerde tozların soğuk presleme tekniği ile şekillendirilip yüksek sıcaklıklara tabi tutularak ısıtma işlemi ile üretilmesi geleneksel bir yöntemdir. Cam-seramik malzemelerin üretiminde de bu yöntem kullanılmaktadır. Seramiklerdeki toz üretim yöntemi ile cam-seramik üretim yönteminde temel fark cam-seramiklerde seçilen tozların amorf yapıda olmasıdır. Bu yöntemin kullanımını preslemeyle üretilen malzemelerin boyut ve şekillerindeki kısıtlamalar ile maliyetli amorf tozlar sınırlamaktadır. Bu yöntemde, camı oluşturan hammaddeler cam fırınlarında ergitilir, ergimiş olan sıvı cam hızlı bir şekilde soğutulmak için su içerisine dökülür. Böylelikle küçük taneler şeklinde camlar elde edilir. Bu cam taneleri genelde 1–30 μm tane boyut aralığına sahip olacak şekilde öğütülerek toz haline getirilir [8,39,69]. Cam tozlarının preslenip sinterlenmesi ile cam-seramiklerin üretilmesinde iki farklı yol izlenir. Birincisi, kompakt cam malzeme preslenerek camsı bir yapı oluşturulur, sinterlenir ve ısıtma işlemi uygulanır. İkincisi ise, sinterleme aşamasında pişme sürecinde kontrollü çekirdek oluşumu ve kristallenme meydana gelir [10]. Şekil 3.24.'de toz yöntemi ile cam-seramik üretimi şematik olarak ifade edilmiştir [69].



Şekil 3.24. Toz yöntemi ile cam-seramik üretimi şematik görüntüsü, a) kompakt cam (toz halinde), b) yoğunlaşma ve kristalizasyonun başlaması, c) cam-seramik [69].

Cam-seramik üretimi, tozların direk olarak sıcak preslenmesi ile de mümkündür. Bu, camların akışkanlığı sayesinde gerçekleşir ve camların yumuşama sıcaklıkları ve oluşum sıcaklıkları arasında sinterleme sıcaklıkları vardır. Cam tanelerinin kırılma yüzeylerinde kristal oluşumu gerçekleşir ve homojen bir şekilde tüm numune boyunca gerçekleşir. Fakat sinterleme ve kristalizasyonun aynı anda gerçekleşmesi için presleme esnasındaki şartların iyi ayarlanması ve kontrol edilmesi gereklidir [10].

3.2.4.3. Sol-jel yöntemi ile cam-seramik üretimi

Cam-seramiklerin üretiminde kullanılan bir diğer teknikte sol-jel yöntemidir. Bu yöntemi geleneksel cam üretiminden ayıran fark, yüksek sıcaklıklardaki sıvı camdan değil de oda sıcaklığında çözeltiden başlamasıdır. Bunun için, soğuk metod olarak da adlandırılır [10]. Sol-jel adını “solution ve gelation” İngilizce kelimelerinin ilk hecelerinin birleşmesinden alır. Bu yöntem, çözeltiye alma jelleştirme (pelteleştirme) yöntemidir [72]. Sol-jel yöntemi kimyasal bir yöntem olup, metal alkoksit, alkol ve su içeren çözeltiler ile yapılır ve seramik üretimi için uygun bir yöntemdir. Bir süspansiyonun ya da solüsyonun jelleşebileceği bütün sistemleri kapsamaktadır. Katı ve sıvı faz arasında geçiş fazı olan jel, ikisinin karışımıdır [73].

Sol-jel işleminin geleneksel işlemlere göre düşük sıcaklıklarda yapılması önemli bir avantajdır. Bazı bileşimlerin kirlenmesi, buharlaşması ve korozyonu önlenabilir. Geleneksel yöntemlerle üretilemeyen bazı özel cam-seramiklerin bu yöntemle üretimi mümkündür [74].

Alkol, su veya asitlerin karışımı sonucunda çözeltilerden hidroliz ve kondenzasyon tepkimeleri ile jel oluşur. Oluşan jeller, ısı işlem ile cam haline dönüştürülür. Bu yöntemin dezavantajı, büyük ebatlarda camların üretiminin zor olması ile organik kalıntıların ve hidroliz ürünlerinin kurutma prosesi ile ortamdan uzaklaştırılması esnasında yapıda çatlaklar oluşabilmesidir. Sol-jel tekniği ile amorf tozlar elde edilir, bu tozlar preslenir ve sinterleme işlemine tabi tutularak cam-seramik üretimi yapılır. Bu teknik ile cam-seramik üretimi, cam tozlarının (sol-jel ile üretilen) sıcak

presleme, presleme-sinterleme-ısıtma işlem ya da presleme-sinterleme proseslerinden biri ile yapılabilir. Klasik cam üretimine göre sol-jel yönteminin en önemli avantajı, çok temiz (molekül bazında) başlangıç malzemeleri ile çok saf ve temiz camların elde edilebilmesi ve oldukça düşük sıcaklıklarda cam üretimidir. Fiber takviyeli cam-seramikler de sol-jel yöntemi ile üretilebilir [10].

Canlı kemiğine yerleştirilen cam-seramikler, kemik dokusuna uyum sağlar ve vücuda zarar vermezler. Bu da biyoyumun göstergesidir. Biyoaktif ve biyoyumlu cam-seramikler sol-jel yöntemi ile de üretilebilmektedir [72].

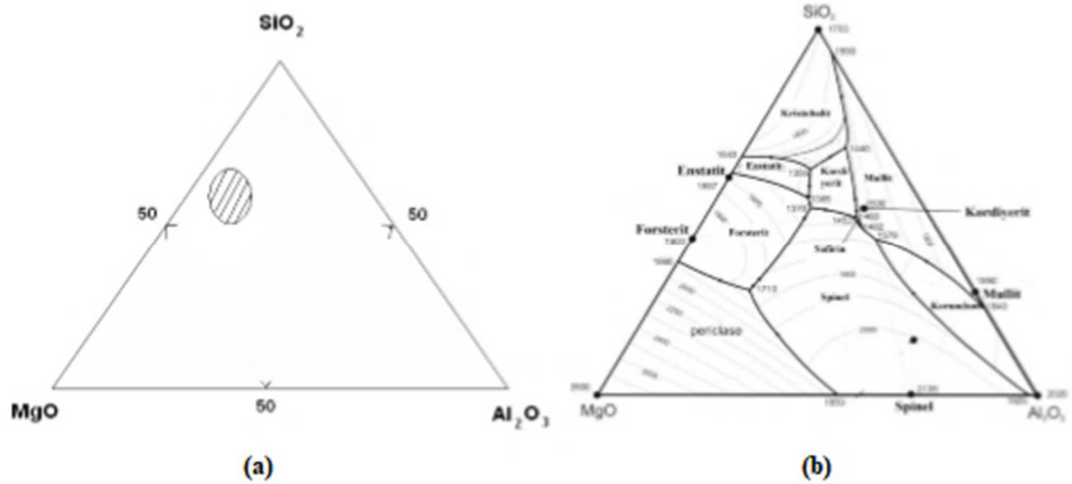
3.2.5. Cam-seramik sistemleri

Bu başlık altında en çok bilinen, $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (M.A.S), $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (L.A.S), $\text{Li}_2\text{O-ZnO-SiO}_2$, $\text{Li}_2\text{O-MgO-SiO}_2$, $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ cam-seramik sistemleri ele alınmıştır [39].

3.2.5.1. $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ cam-seramik sistemi (MAS)

Rankin ve Merwin $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (MAS) sistemi üzerinde ilk çalışan bilim insanlarıdır. Daha sonra sistemdeki fazlar ve bu fazlara ait diyagramlarda değişiklikler kaydedilmiştir [39]. MAS sistemindeki cam-seramikler kontrol edilebilen kristal fazları içermesi nedeni ile önemli inorganik malzeme olarak kabul edilir [75].

Alkali metal iyonları içermeyen $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (MAS) sistemindeki cam seramiklerin mekanik mukavemetleri ve elektrik dirençleri oldukça yüksektir [8,70]. Kordiyerit fazına ($2\text{MgO-2Al}_2\text{O}_3\text{-5SiO}_2$) sahip olmalarından dolayı, mekanik mukavemetleri yüksektir [10,70,75]. MAS sistemindeki cam-seramiklerde kordiyerit fazının yanında mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-2SiO}_2$), klineenstatit (MgO.SiO_2), spinel (MgO.SiO_2) forsterit (2MgO.SiO_2) ve kristobalit (SiO_2) fazları da görülebilmektedir. Cam karakteristikleri az miktarda alkali ilavesi ile modifiye edilebilir [10]. Şekil 3.24.(a)'da $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ sisteminde (% mol) cam oluşum bölgesi, Şekil 3.24.(b)'de ise $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ sistemi üçlü denge diyagramı verilmiştir [10].



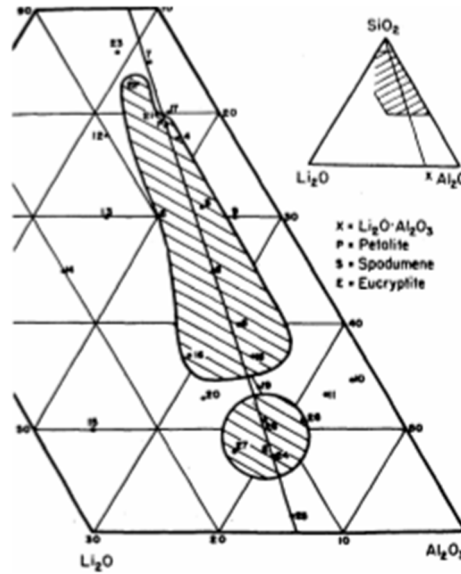
Şekil 3.25. MgO-Al₂O₃- SiO₂ sisteminde, a) Cam oluşum bölgesi (% mol), b) üçlü denge diyagramı [10].

Pb₂O₅ (%0,5-6) ve Ti₂O (% 7-15) çekirdeklendirici olarak kullanılır [10,70]. Kordiyerit esaslı cam-seramiklerin çekirdeklenme sıcaklığı 850-950 °C aralığında olup kristallenme ise 1250 °C'ye kadar ısıtılarak sağlanabilir [39].

Bu sistemdeki cam-seramikler düşük ısıl genleşme katsayısı, yüksek çalışma sıcaklıkları, düşük dielektrik kayıpları, yüksek eğme mukavemetleri (475 MPa kadar) ve yapılarında alkali oksit olmamasından dolayı yüksek kimyasal kararlılığa sahiptirler [75].

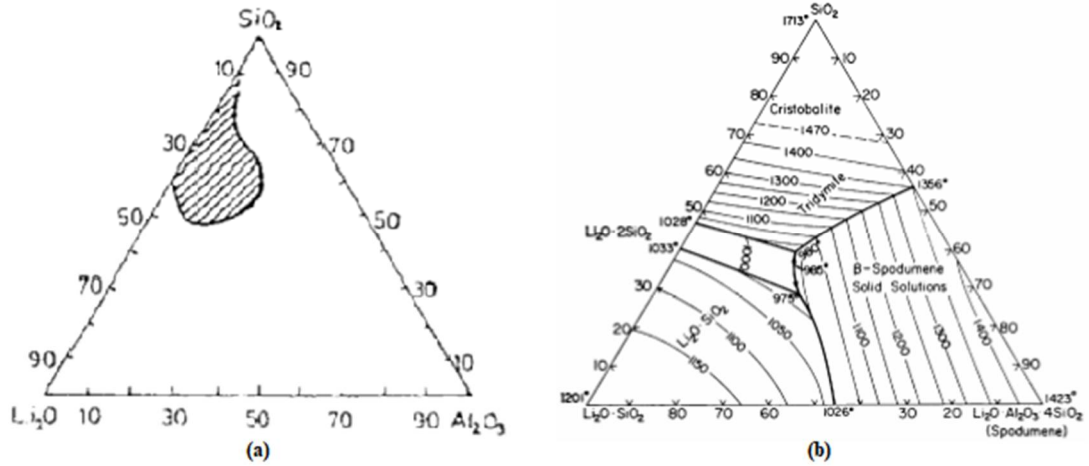
3.2.5.2. Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ cam-seramik sistemi (LAS)

Bu sistemde üretilen cam seramikler Owen Illinois, PPG's Hercuvit, Corning Ware, Corning's, CER-VİT gibi ticari isimleri ticari anlamda en önemli ve en çok kullanılan cam-seramiklerdir. Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ sistemindeki cam-seramikler düşük ısıl genleşme katsayılarına sahiptirler [8,39]. Lityum minerallerinin sahip olduğu düşük termal genleşme özelliği Hummel tarafından ilk olarak keşfedilmiştir. Smoke tarafından yapılan daha sonraki çalışmalarda termal genleşmenin Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ sisteminde negatif olduğu iki alanı tanımlamıştır. Şekil 3.26.'da negatif olan bu alanlar gösterilmiştir [76].



Şekil 3.26. LAS siminde ngatif termal genişlemenin olduğu alan [76].

Yüksek termal şok direnci $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ sisteminin en önemli özelliğidir. Bu özellik bu sistemdeki β -Spodümenin (birincil kristal faz) katı çözeltisinin sahip olduğu düşük genişleme katsayısına dayanmaktadır. Malzemenin ısıtılması ve soğutulması esnasında ebatlarında büyük değişimler olmamaktadır ve kırılmaya sebep olan iç gerilmeler oluşmamaktadır [76]. β -ökrıptit ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ve β -spodümen ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$) fazlarının varlığı LAS sistemine düşük genişleme katsayısı özelliği kazandırır. [39]. Al_2O_3 miktarı termal genişleme özelliklerinde önemli derecede etkilidir. Düşük Al_2O_3 miktarı ile silikat veya lityum disilikat fazları oluşur ve yüksek genişleme meydana gelir. Yüksek Al_2O_3 miktarı ile β -ökrıptit ile β -spodümen fazları oluşur ve bu fazlar sayesinde düşük termal genişleme katsayılı cam-seramikler elde edilir [10]. Yüksek Al_2O_3 'e sahip bileşimlerde ZrO_2 , düşük Al_2O_3 'e sahip bileşimlerde P_2O_5 çekirdeklenme katalisti olarak kullanılır. TiO_2 'de LAS sisteminde çekirdeklenme katalisti olarak kullanılır. Stookey, bu sistemde TiO_2 katalistini çekirdeklendirici olarak seçerek kristallenmenin kontrollü bir şekilde yapılabileceğini, üniform ve çok ince taneli kristallerin dağıtılabileceğini ve ticari öneme sahip malzemelerin bu yöntemle üretilabileceğini keşfetmiştir [10,39]. $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ sistemin Şekil 3.27.'da cam oluşumuna uygun bölgesi ve üçlü denge diyagramı gösterilmiştir [10,76].

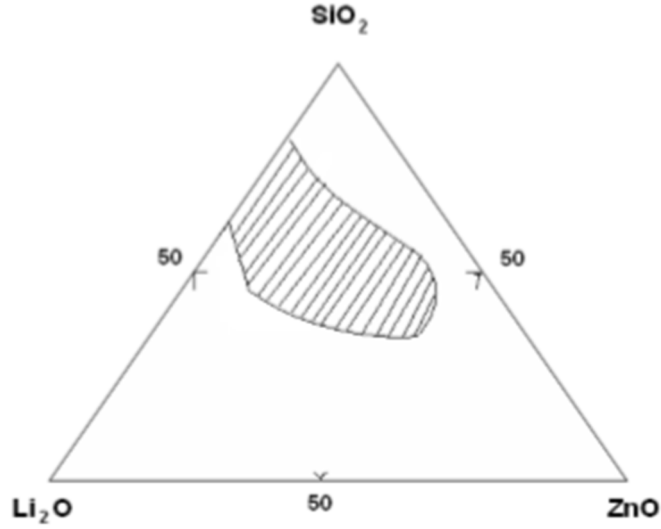


Şekil 3.27. $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ sistemin, a) cam oluşumuna uygun bölgesi, b) üçlü denge diyagramı [10,76].

Düşük ısı genleşme katsayısına sahip $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ sisteminde geliştirilen cam-seramikler aynalar, ocak üstü, saydam ve opak mutfak eşyaları, ısıl değiştiriciler, laboratuvar malzemeleri gibi alanlarda kullanılmaktadır [10].

3.2.5.3. $\text{Li}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2$ cam-seramik sistemi

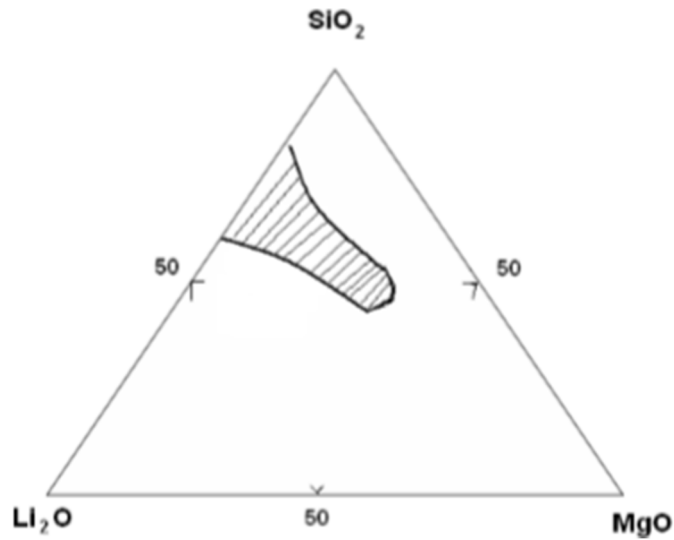
Yüksek mekanik mukavemete sahip $\text{Li}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2$ sisteminde üretilen cam-seramikler geniş bir aralıkta değişim gösteren termal genleşme özelliklerine sahiptir. Bu sistemdeki cam-seramikler %43-81 SiO_2 , %10-59 ZnO ve %10-27 Li_2O aralıklarında değişen ana bileşenlerin yanı sıra kalan kısmında B_2O_3 , Al_2O_3 , PbO , Na_2O , K_2O , MgO , BaO ve CaO oksitleri de içerir. Çekirdeklendirici olarak metalik fosfatlar ya da Cu , Au ve Ag gibi metaller kullanılır. % 0,5-6 P_2O_5 , % 0,02-0,03 Au , % 0,02-0,03 AgCl veya % 0,5-1 Cu_2O oranlarında çekirdeklendiri kullanılabilir. $\text{Li}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2$ cam-seramik sisteminin Şekil 3.28.'de cam oluşum bölgesi görülmektedir [8,70].



Şekil 3.28. Cam oluşum bölgesi (Li_2O - ZnO - SiO_2 sisteminde) [10].

3.2.5.4. Li_2O - MgO - SiO_2 cam-seramik sistemi

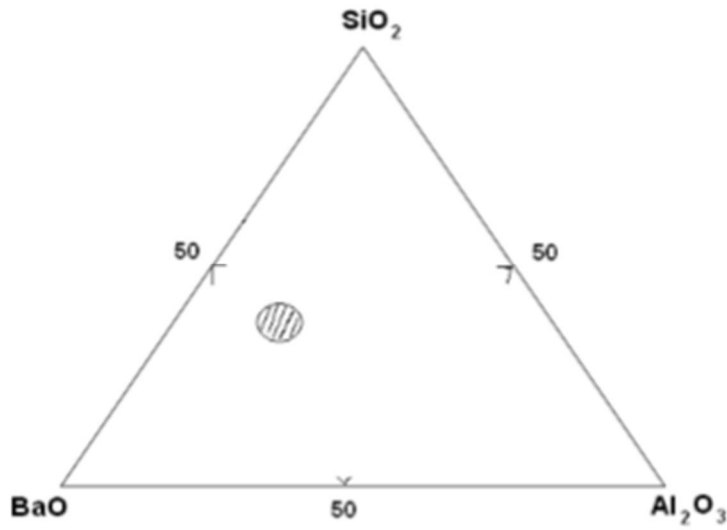
Bu sistemdeki cam seramiklerin çok yüksek ısı genleşme katsayıları vardır ve 140×10^{-7} 'lere kadar çıkabilmektedir. Bu cam seramik sistemlerinde kristalizasyon katalisti olarak metalik fosfatlar kullanılmaktadır. %51-88 arasında SiO_2 , %2-27 aralığında MgO , %9-27 arasında Li_2O içeren bu sistemdeki camların bileşimde % 0,5-6 civarlarında P_2O_5 'de bulunabilmektedir [39]. Bu sisteme ait cam oluşum bölgesi Şekil 3.29.'da gösterilmiştir [8].



Şekil 3.29. Cam oluşum bölgesi (Li_2O - MgO - SiO_2 sisteminde (% mol)) [8].

3.2.5.5. BaO-Al₂O₃-SiO₂ cam-seramik sistemi

BaO-Al₂O₃-SiO₂ sistemi, %40-42 SiO₂, %17-19 Al₂O₃, %40-42 BaO aralıklarında kimyasal bileşime sahiptir. Bu sistemdeki cam-seramiklerde TiO₂ çekirdeklendirici olarak kullanılır. Selsian ve BaTiO₃ bu yapının hâkim fazlarını oluşturur. Termal şok dirençlerinin iyi, mukavemetlerinin yüksek oluşu nedeni ile mutfak eşyalarının üretiminde kullanım alanı bulmaktadır. Şekil 3.30.'da bu cam-seramik sistemin cam oluşum bölgesi görülmektedir [10].

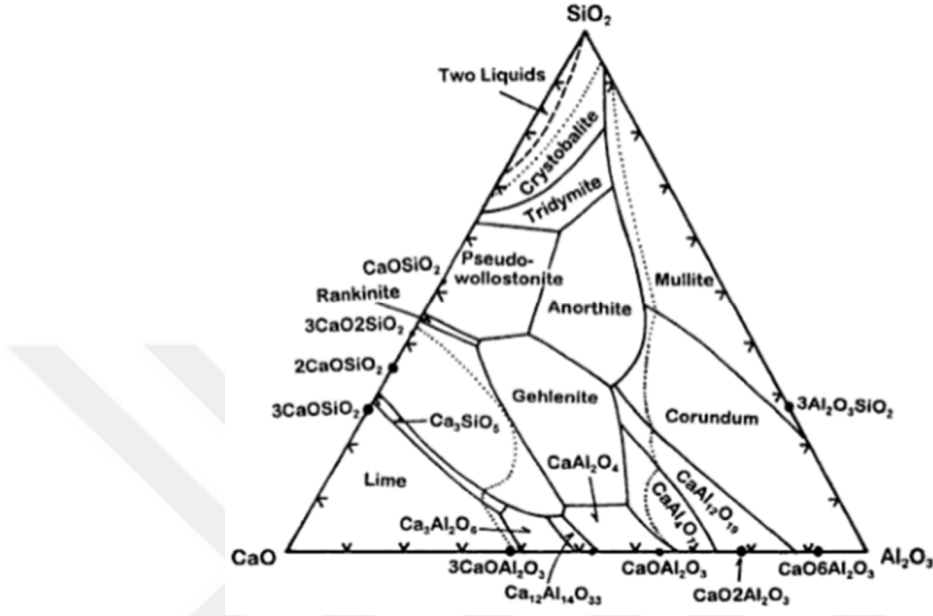


Şekil 3.30. Cam oluşum bölgesi (BaO-Al₂O₃-SiO₂ sisteminde) [10].

3.2.5.6. CaO-Al₂O₃-SiO₂ cam-seramik sistemi (CAS)

Optik, mekanik ve yüksek refrakterlik özelliğinden dolayı birçok endüstri alanında kullanılan CaO-Al₂O₃-SiO₂ sistemindeki cam-seramikler silikat sistemlerinden birisidir ve kısaca CAS olarak ifade edilir. Nükleer atıkların depolanması gibi özel kullanım alanlarında bu sistemdeki bazı camlar kullanılabilir [39,77]. Kontrollü ısıtma işlemi sonucunda kristallendirilerek CaO-Al₂O₃-SiO₂ sistemindeki camlar cam-seramiğe dönüştürülebilir. Monterio ve arkadaşları yaptığı çalışmalarda CAS sistemlerinde SiO₂ içeriği düşük ise bütün yapıda kristallenme olduğunu tespit etmişlerdir. Başka bir grup araştırmacının yaptığı bir araştırmada ise SiO₂ oranının yüksek oranlardaki kullanımı ile yüzey kristallenmesi olduğu, çekirdeklendirici olarak TiO₂, Cr₂O₃ kullanımında ise kristallenmenin bütün hacimde olduğu tespit

edilmiştir. Şekil 3.31.'de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ faz diyagramı verilmiştir [39]. Volostanit (CaO.SiO_2) düşük genleşme katsayısına sahiptir. CAS cam-seramikleri, normal camların aksine Volostanit (CaO.SiO_2) kristal fazlarının varlığından dolayı heterojen bir malzemedir [39].



Şekil 3.31. Faz diyagramı ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) [10].

$\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ cam-seramikleri, saf oksitlerin yanında atıklardan da üretilmektedir. Endüstriyel ve metalurjik atıkların birçoğu yüksek oranda $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ içerir ve bu atıklardan da geleneksel yöntemler veya toz yöntemi ile cam-seramik üretimi mümkündür. Aşınma ve korozyon dirençleri iyi olan yüksek sertlikteki bu malzemeler pompa ve boru gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılmasının yanında, dış cephe kaplaması ve duvar karosu üretimi gibi yapı malzemesi olarak da kullanılır [39].

3.2.6. Doğal kayalardan üretilen cam-seramikler

Geleneksel seramik üretiminde, doğal kayalar önemli bir yer teşkil etmektedir. Yüksek silika içeren doğal kayalar seramik üretiminde en çok tercih edilen malzemeler arasındadır. Aktif volkanik hareketler sonucunda oluşan volkanik kayalar, magmatik yapıların yeryüzüne çıkıp soğuması ile oluşurlar. Bölgelerine göre farklı bileşimlerde olan kayalar, soğuma ve katılaşma esnasındaki farklılıklardan dolayı da farklı türlerde olabilirler [10]. Volkanik kayaların en çok

rastlanılanları, yer kürenin büyük bir çoğunluğunu oluşturan bazalttan başka, andezit, gabro, diorit, granit ve riyolittir. Yapılarında yüksek silika içeren bazalt (%45-52 SiO₂) cam-seramik üretiminde en çok tercih edilen doğal kayaçların başında yer almaktadır [8,39,78].

Doğal bazalt, ince taneli ve gri siyah koyu renktedir. SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO ana bileşenlerinin yanında Fe₂O₃ ve FeO gibi demir oksitleri ve daha az miktarlarda K₂O MnO, Na₂O, TiO₂ ve P₂O₅ bileşiklerde bazaltın kimyasal bileşiminde yer almaktadır [78]. Bazalt kaynakları ülkemizde de bol miktarda bulunmaktadır. Ülkemizdeki bazı bazalt kayaçların ve kimyasal bileşimleri Tablo 3.5.'de verilmiştir.

Tablo 3.5. Ülkemizdeki bazı bazaltların kimyasal bileşimleri [10].

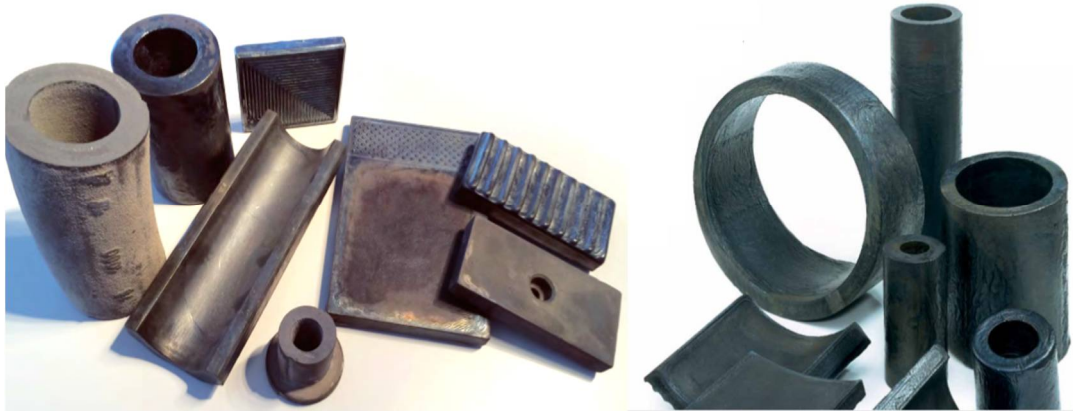
Oksit	Manisa yöresi (Kula)	Konya yöresi (Acıgöl)	Erciyes dağı (Akdere)
SiO ₂	47,50-48,24	50,13	47,50
Al ₂ O ₃	18,52 -20,95	17,60	18,04
Fe ₂ O ₃	3,29 - 4,75	2,49	3,13
FeO	5,20 - 6,32	5,00	6,41
CaO	7,56 - 8,37	11,26	10,35
MgO	4,36 - 5,54	7,09	7,18
Na ₂ O	5,08 - 7,66	4,04	3,50
K ₂ O	0,69 - 2,31	0,91	0,49
P ₂ O ₅	0,13 - 0,97	0,18	0,22
H ₂ O	0,02 - 0,46	0,16	-
TiO ₂	-	-	1,36
MnO	-	-	0,14

Doğal bazaltlar, 20 ila 50 mm boyutlarına kırılıp, ergitilir, istenilen şekil ve boyutlarda dökülür ve bazalt camları üretilir. Isıl işlem ile bazalt camları bazalt cam-seramiklerine dönüştürülür ve kristallerin oluşumu sağlanır, bu da yüksek aşınma direnci ve sertlik gibi özellikler kazanmasında etkilidir [79].

Bazalt kayaçlarının müllit veya ZAS (ZrO₂-Al₂O₃-SiO₂) esaslı refrakter içeren fırınlarda 1300-1500°C sıcaklıklarda eritilip kalıplara dökülmesi ve ısıl işlem ile

kristallendirilmesi ile bazalt cam-seramikleri elde edilir. Bazalt banyosunda demirin oksidasyon hali bazalt cam-seramiklerinde kristal boyutlarını ve camların çekirdeklenmesini etkileyen en önemli faktördür. $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ oranı 0,5-0,6'dan daha büyük ise oksitleyici şartlar oluşturulur ve ince taneli cam-seramik meydana gelir. Ayrıca, bazalt içerisindeki Fe_2O_3 miktarı ağırlıkça %5'den fazla olmalıdır. Bu cam-seramiklerdeki ana kristalin faz ve bazen de tek kristal türü monoklinik piroksendir [39,41].

Ergitilmiş bazalt yani bazalt cam-seramikleri aşınmaya karşı uzun yıllardan beri başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Mohs sertlik skalasına (karşılaştırma için; en yüksek sertlik ile elmas 10'dur.) göre 8 sertliğindedir. Ergitilmiş bazalt ürünleri, yaklaşık +350 °C ve -40 °C sıcaklık aralığında kullanılabilir Şekil 3.32.'de bazı ticari bazalt cam-seramikler görülmektedir [79,80].



Şekil 3.32. Bazalt cam-seramikler [79,80].

Bazalt kayaçları, ucuz oluşu, alkali ortamlardaki kimyasal dayanıklılığı, termal kararlılığı, yüksek mukavemeti ve aşınma direnci nedeniyle cam-seramik üretiminde kullanılabilecek potansiyel bir malzemedir. Bazalt cam-seramikleri plaka, boru, pnömatik ve hidrolik sistemlerde (dirsek şeklinde) silolarda, tanklarda ve mikserlerde kullanım alanı bulmaktadır [10].

3.2.7. Atıklardan üretilen cam-seramikler

Endüstriyel atık kullanımı, doğal kaynakların tüketimini azaltmak, çevre kirliliğini daha düşük seviyelere indirmek ve enerji maliyetlerini düşürmek için gün geçtikçe

ilgi çeken konular arasındadır. Endüstriyel atıklar, çevre sorunun dışında depolama açısından da ekstra maliyetler getirmektedir. Bunun için, atıklar içeriklerine bakılmaksızın imha edilmeye çalışılmaktadır. Fakat atıklarında bir değeri vardır ve bu atıklar katma değeri yüksek olan ürünlerin yapımında kullanılabilir [81].

Endüstriyel atıkların silika (SiO_2) içeriği yüksek ise cam yapımında değerlendirilmesi son yıllarda hem endüstriyel hem de bilimsel açıdan çalışma alanı bulmuştur. Cam üretimine uygun olan atıklar cam-seramiklerin üretiminde de yer alabilmektedir. Atık malzemeler olan, termik santral uçucu külleri ve yüksek fırın cürufu, cam-seramiklerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların dışında silika içeren atıkların bazıları da cam-seramik yapımında kullanılmaktadır. Bu atıkların bir kısmı bilimsel araştırma kapsamında yer alırken bazıları da endüstri uygulamalarında yer almıştır. Çöp yakma tesisinde oluşan atıklar, çimento atık tozları, feldspat atıkları, çinko atıkları, kil ve cevher rafinasyonları gibi diğer atık malzemeleri cam-seramiklerin üretilmesinde kullanılabilir [10]. Atık camların değerlendirmesinde kullanılan cam köpük, atık camlardan üretilen bir malzemedir [39].

3.2.7.1. Termik santral uçucu külleri ile üretilen cam-seramikler

Termik santrallerde kömürün yanması sonucu uçucu kül atık malzeme olarak ortaya çıkar. Çok ince boyutlarda düşük kaloriye sahip kömürlerin, termik santral fırınlarında yakılması sonucunda oluşan uçucu küller, siklonlarla ya da elektrofiltreler ile bacanın üst kısımlarında mekanik ve elektrostatik yöntemlerle tutulurlar. Uçucu küllerin rengi, karbon oranına göre değişse de genellikle gri renktedir. Seramik endüstrisinde uçucu küller maliyetleri düşürmek amacı ile tuğla ve karo üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca çimento ve beton üretiminde de kullanılırlar [82].

Çok ince tanelerden meydana gel uçucu küller yüksek oranda (%60-90) camsı bileşen içermektedir. Çapları 1-200 μm arasında değişen uçucu küller yuvarlak tane şekillerine sahiptir. Ayrıca uçucu küller demir oksitler de içermektedir [82].

Seyitömer termik santral uçucu külü %44,58 SiO₂, %22,54 Al₂O₃, %8,98 MgO, %9,85 Fe₂O₃, %6,76 CaO kimyasal bileşimine sahiptir [10]. Uçucu kül katkılı cam-seramikleri geliştirmek için CaCO₃, B₂O₃, Na₂CO₃, dolomit ve atık cam katkıları ilavesi ile cam-seramik malzemeler üretilmiştir. Bu tür cam-seramikler yapı malzemesi olarak duvar ve yer karolarında kullanımının yanında valf, boru ve pompa şeklinde parçalar ile çeşitli endüstri uygulamalarında kullanılmaktadır [10].

3.2.7.2. Yüksek fırın cürufları ile üretilen cam-seramikler

Metalurji tesislerinden atık madde olarak cüruflar elde edilir. Cürufların kimyasal bileşimleri ve özellikleri üretim yöntemine göre değişiklikler göstermektedir. Yüksek fırın cürufu, demir üretimi esnasında fırınlarda ergimiş halde olan atık malzemedir ve silis, alümina, kalsiyum ve bazik karakterde bileşenler içerirler. Kimyasal bileşimi, CaO-SiO₂-Al₂O₃'den oluşmaktadır ve kimyasal bileşimin yanında kristal yapısının da önemi büyüktür. Yüksek fırın cürufunun, camsı madde bileşimi ve oranı, tane boyutu ve karakteristikleri aktivitelerinde temel faktörler arasındadır. Yüksek fırın cüruflarının camsı faz (en az 2/3 oranında) içermesi ve fırın çıkışında hızlı bir şekilde soğutulması gerekmektedir. İçerisindeki SiO₂, MgO ve CaO toplam miktarı 2/3 oranında olmalı ve (CaO + MgO)/ SiO₂ bu oranında 1'den fazla olması tercih edilmektedir [83]. Cr₂O₃, P₂O₅, TiO₂ ve ZrO₂katalister yüksek fırın cürufunda çekirdeklendirici olarak kullanılır. Korozyon ve aşınma dayanımı, yüksek sertliğe sahip olan yüksek fırın cürufları içeren cam-seramikler abrasif aşındırıcıların (kömür gibi) nakillerinde ve stoklanmasında kullanılan boru ve plakaların yanında, yapı malzemesi olarak da yüzey ve dekoratif dış cephe kaplamalarında da kullanılırlar.

3.2.8. Cam-Seramiklerin Özellikleri

Cam-seramikler, yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci, kimyasal ve termal kararlılıkları gibi özelliklerle ön plandadırlar. Tane boyutlarının ince ve küçük olmaları cam-seramiklerin en önemli özellikleri arasındadır. İdeal polikristal yapısında olmalarından dolayı serttirler. Kristal büyüklükleri ortalama birkaç mikrondan büyük değildir ve rast gele yönlenmişlerdir. Bazı malzemeler

camların kristallenmesi ile oluşur ve bunlar daha büyük tane boyutlarındadır. Böyle durumlarda çekirdeklenme yoğunluklarının az oluşu ve kristallerin büyümeleri küresel şekillidir. Bu tipteki yapıların çoğunun mekanik dayanıklılığı iyi değildir. Düşük genleşmeye sahip cam-seramik malzemelerin kristal fazların hacimsel oranları 0,86-0,90 arasında değişmekte, geriye kalan artık cam oranı ise 0,1 bölgesinde yer almaktadır [10].

Cam-seramiklerde kristal fazların hacimlerindeki oranların düşük olması, sıvı fazların etkisi altında olduğunu ifade eder. Düşük değerden kast edilen 0,35-0,40 aralığından az olmasıdır. Eşit hacim oranlarında ise iki faz birbiri içine örgü oluşumuna neden olmaktadır. Kristal fazların fazla olması, komşu olan kristallerin arasında ince bir katman şeklinde kalmasına ya da tane sınırlarında bazı durumlarda izole olmuş cepçikler şeklinde olmasına neden olur. Camda homojen sıvı fazların çökmesi ile cam-seramik kristalleri rastgele yönelmişlerdir. İzotropik olması durumunda ise yönelmeler olmaz. Farklı kristolografik yönlerdeki kristallerin olması, farklı özellikler sağlar. Bazı mühendislik malzemeleri ile cam-seramiklerin bazı fiziksel özellikleri Tablo 3.6.'da karşılaştırılmıştır [10].

Tablo 3.6. Bazı mühendislik malzemeleri ile cam-seramiklerin bazı fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması [10].

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Termal iletkenlik (W/m°C)	Termal genleşme katsayısı 20÷100 °C, (10-6 m/m °C)	Elektriksel direnç (Ωm)
Cam	2304	34	1	10 ⁷
Cam-seramik	2592	33	9,4	10 ¹²
Plastik	1296	0,2	6,7	8.10 ¹⁴
Çelik	8064	47	11,9	20

Cam-seramik malzemelerin, elastisite, aşınma dayanımı, mukavemet, sertlik gibi bazı özellikleri, kristalin faz hacmine elastik modülüne, partikül boyutuna, termal genleşme katsayısına göre farklılıklar gösterir. İnce tane boyutuna sahip homojen mikro yapıdaki cam-seramikler, arttırılmış mukavemete sahiptirler [10]. Cam seramikler ile bazı cam ve metallerin özellikleri Tablo 3.7. ve Tablo 3.8.'de karşılaştırılmıştır [10].

Tablo 3.7. Cam-seramiklerin, bazı seramik ve metallerle eğme mukavemetlerinin karşılaştırılması [13],

Malzeme	Eğme gerilmesi (MPa)
Cam-seramik	70-350
Yüzeyi modifiye edilmiş cam-seramik	1400 üstü
Cam	55-70
Elektroporselen	86-140
Al ₂ O ₃	212-350
Dökme demir	140-320
Çelik	300-1400

Tablo 3.8. Cam-seramiklerin, bazı cam ve seramiklerle elastik modüllerinin karşılaştırılması [10].

Malzeme	Elastik modül (MPa 10 ⁻⁴)	Malzeme	Elastik modül (MPa 10 ⁻⁴)
Cam-seramik	8-14	Yekpare seramik	7
Silika camı	7,4	Elektroporselen	6,7
Sodyum silikat camı	7	Al ₂ O ₃	28-35
Boro-silikat camı	6,6	Granit	4,2-6

3.2.9. Cam-seramiklerin kullanım alanları

Cam seramikler, genellikle mühendislik malzemeleri uygulamalarında kullanım alanı bulan malzemelerdir. Bu malzemeler, diğer malzemelere nazaran farklı bazı özelliklerinden dolayı özel uygulama alanları bulmaktadır. Bu özelliklerin başında aşınma direnci, sertlik, boyutsal kararlılık, oksidasyon direnci, korozyon karşı dayanıklılık, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık, optik ve elektriksel özellikler gelmektedir. Cam-seramikler sızdırmazlık, vakum, elektronik, biyomedikal seramikler, savunma sanayii ve mutfak eşyalarının yanı sıra son yıllarda dental ve ortopedik implantların yapımında da kullanılmaktadır [8,10]. Cam-seramik uzmanları ve tasarım mühendisleri tarafından gerekli özel uygulamalar doğrultusunda malzemeler ve bileşenler geliştirilir. Cam-seramiklerin içerisinde yer aldığı bazı kullanım alanları [39];

- Motor, pompa valf ve boru uygulamaları
- İşlenebilir cam seramikler

- Yüksek dielektirik sabitine sahip malzemeler
- Düşük ve sıfır genleşmeli malzemeler
- Refrakter cam-seramikler
- Elektronikde altlık uygulamaları
- Biyomedikal uygulamaları
- Süper iletken malzemeler
- Radyoaktif/nükler atık depoları
- Malzeme bağlantıları'dır.

Yüksek sıcaklık direnci, düşük ısıl genleşme ve transparantlık özelliği sayesinde $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ sisteminde ZrO_2 , TiO_2 katalisleri ile birlikte üretilen cam-seramikler mutfak eşyası, fırın üstleri ve teleskop aynalarında kullanılırlar. Dielektrik özellikleri ve kimyasal dirençleri ile P_2O_5 katalisti ile oluşan $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ sistemindeki cam-seramikler optik kodlama, elektronik yalıtım, manyetik kayıt kafası, elektronik kayıt kovanı gibi uygulama alanı bulurlar. Savunma sanayinde, füze başlığı, radar kubbesi olarak kullanım alanı bulan cam-seramikler, $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ sisteminde TiO_2 ve P_2O_5 katalistleri ile üretilir [39]. Şekil 3.33.(a)'da savunma sanayiinde füze başlığı olarak cam-seramik kullanımı görülmektedir [8,39].

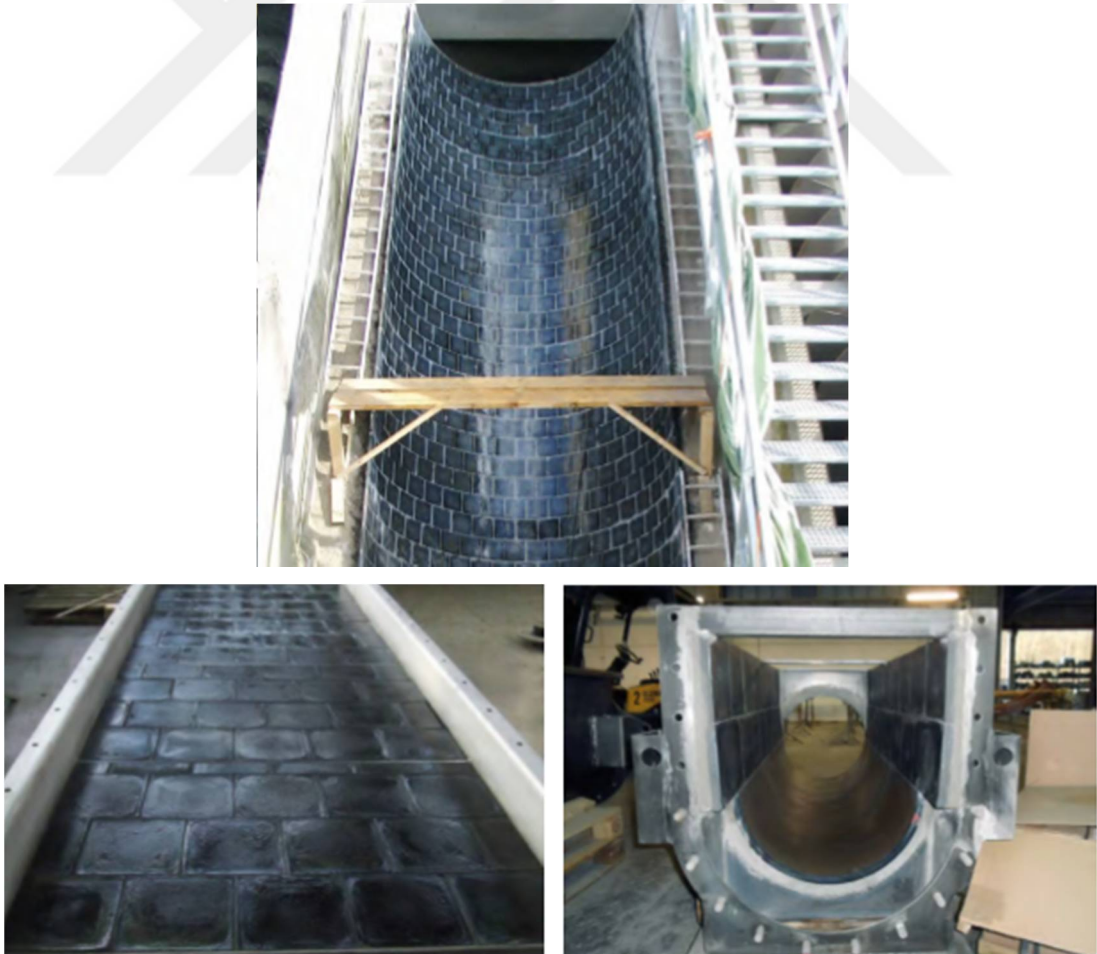


Şekil 3.33. Cam-seramikler, a) savunma sanayinde kullanılan füze başlığı, b) mutfak eşyaları [8].

$\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ sistemindeki cam-seramikler elektronik alanında, ısı ve vakum yalıtımı sayesinde kapasitör, elektro teknoloji ve mikro elektronik devrelerde

kullanılır. Yüksek mukavemet, termal şok dirençlerinden dolayı aynı zamanda mutfak eşyaları yapımında da kullanılır [39]. Şekil 3.33.(b)'de cam-seramik mutfak eşyalarına örnekler verilmiştir [8].

Sert oluşları, mukavemetleri, neme karşı dirençleri, kimyasal dirençleri, düzgün yüzeyleri, asitlere karşı ve aşınmaya karşı yüksek dirençleri gibi özelliklerinden dolayı inşaat alanında, dış cephe malzemesi, yer karasu, pompa, plaka, borularda, bunker ve silolarda cam-seramikler kullanılır. Bu alanlarda kullanılan cam-seramikler $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ sisteminde çekirdeklenme katalisti olarak TiO_2 , $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ sisteminde çekirdeklenme katalisti olarak ZnO ve $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaO}$ sisteminde çekirdeklenme katalisti olarak ise sülfür, oksit ve florit kullanılarak üretilen malzemelerdir [39,79]. Şekil 3.34.'de bazalt esaslı cam-seramik malzemeler görülmektedir [79].



Şekil 3.34. Ergitilmiş bazalt cam-seramiklerinin bazı uygulamaları [79].

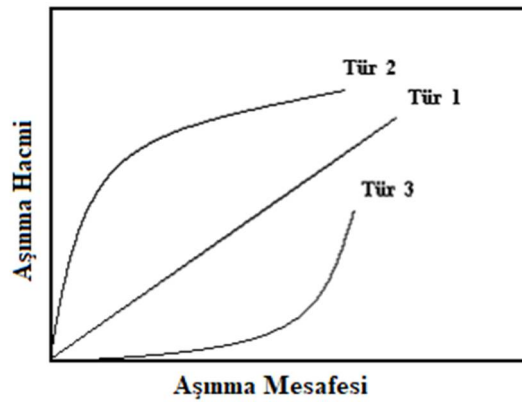
Biyomalzeme olarak kullanılan ve canlı kemiğine yerleştirilen cam-seramikler, biyouyumludur, kemik dokusu ile bütünleşir ve vücuda zarar vermezler [72]. SiO_2 - Al_2O_3 - Na_2O sisteminde P_2O_5 çekirdeklendirici ile üretilen cam-seramikler vücuda uyumluluğu, kimyasal dirençleri ve mukavemetli oluşları nedeni ile dişçilikte ve vücut protezlerinin yapımında kullanılır [39].



BÖLÜM 4. AŞINMA VE KATI PARTİKÜL EROZYONU

4.1. Giriş

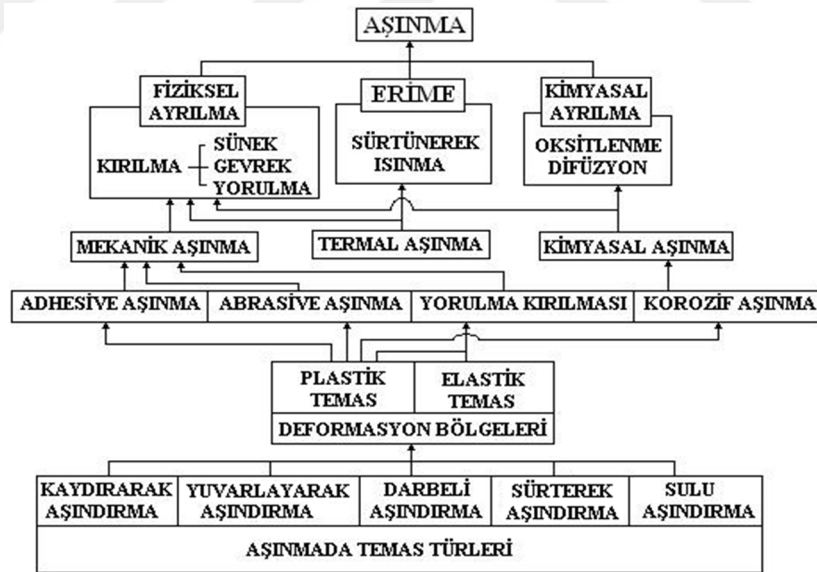
Aşınma, etkileşim içinde olan bir birleşme yüzeyinden, farklı tribolojik etkiler sonucunda oluşan istenilmeyen malzeme kayıpları şeklinde tanımlanmaktadır. Talaş kaldırılarak yapılan imalat yöntemlerinde, istenilerek malzeme ayrımları olmaktadır. Örneğin, matkap ile bir malzemenin delinmesi esnasında matkaptaki malzeme kayıpları istenmeyen bir durumdur ve aşınma olarak nitelendirilirken, delinen malzemedeki oluşan kayıp şekil vermeden kaynaklanmaktadır. Malzemelerde meydana gelen aşınma kaybı, temasta olan yüzeylerin biçimine, ortamın kimyasal etkilerine, sürtünme şartlarına ve malzemenin türü ile yakından ilgilidir. Üzerinde araştırmalar yapılmasının sebebi ise, büyük ekonomik kayıplardır. Temasta olan yüzeylerde uzaklaşan malzemeler, kimyasal bozulma, fiziksel ayrılma ve temastaki ara yüzeylerin erime sonucunda mikro çatlama şeklinde olmaktadır. Aşınma genelde, tek tip aşınma mekanizması ile olmamakta ve meydana gelen sürtünme esnasında kompleks değişiklere bağlı olarak aşınma mekanizmaları tanımlanmaktadır [4,20,84]. Şekil 4.1.'de aşınma eğrilerinin üç farklı örneği görülmektedir [84].



Şekil 4.1. Aşınma eğrileri [84].

Aşınma şiddet eğrilerinde; tür 1 eğrisi temas yüzeylerinde işlem süresince sabit bir aşınma oranını, tür 2 eğrisi yüksek bir aşınma ile başlayan ve düşük bir orana kadar ki geçişi, tür 3 eğrisi ise çatlama kırığı oluşmasıyla düşük bir şekilde başlayan aşınmanın yüksek orandaki aşınmaya geçişini ifade etmektedir. Tür 2 deki aşınma eğrisi metallerde karşımıza çıkarken, tür 3 deki eğri seramiklerdeki aşınmayı göstermektedir [84].

Aşınma genel olarak, malzeme kaybının miktarı ve aşınma yüzeyinin durumu ile değerlendirilmektedir. Malzemelerde aşınmayı tamamen önlemek imkânsızdır, ancak aşınmayı yakından tanıyıp, etkileyen faktörleri iyi saptayıp, en düşük seviyelere indirme yönünden faydalı olacaktır. Aşınmanın derecesi, aşınma oranı ve katsayısı değerleri ile tanımlanır. Aşınma oranının tarifi, aşınma yüklemesi ve aşınma mesafesi için aşınma şiddeti şeklindedir. Aşınan malzemenin sertliği ve belirli aşınma oranı ise aşınma katsayısını tarif eder. Aşınmanın temas tipleri ve anahtar kelimeleri Şekil 4.2.'de verilmiştir.

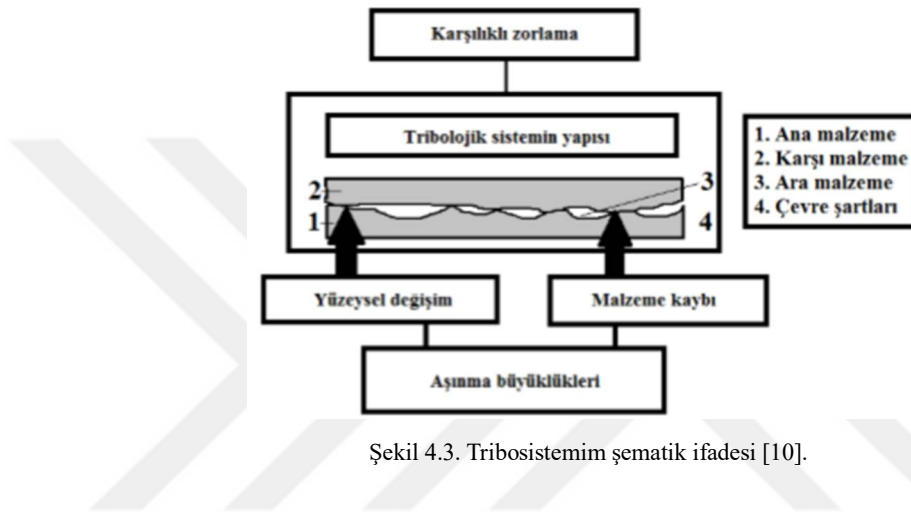


Şekil 4.2. Aşınmanın temas tipleri ve anahtar kelimeleri [84].

Aşınma, çevresel, dinamik ve malzeme parametrelerinin oluşturduğu sürtünme sistemindeki ufak bir değişiklik bile büyük oranlarda değişiklikler meydana getirebilir [84].

4.2. Aşınma Mekanizmaları

Aşınma sistemleri, temas türleri ile ilişkilidir. Aşınma mekanizmalarının basit şekilde ve direk olarak anlaşılır olması açısından temas şiddeti, plastik ve elastik temas olarak ifade edilir [84]. Ana malzeme (aşınan), temas edilen karşı malzeme (aşındırıcı) hareket, yük ve ortam unsurları tribosistemi oluşturur. Tribosistemin şematik ifadesi Şekil 4.3.'de verilmektedir [10].

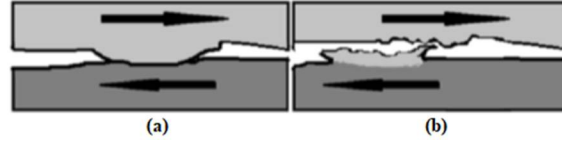


Sürtünme ve aşınma davranışları, malzeme özelliklerinin yanı sıra kayma yüzey çiftlerinin etkileşimi ve ortam şartlarını da içermektedir. Isıl genleşme, ısı iletkenlik, mukavemet, yorulma ömrü, ısılatma kapasitesi, yüzey sertliği gibi bazı malzeme özellikleri tribolojide önemlidir. Malzemelerin ısı özellikleri, sürtünme ve aşınma sırasındaki ısınmalardan dolayı önemlidir [10]. Aşınmaya sebep olan tribolojik mekanizmalar, adhezif aşınma, abrezif aşınma, korozif aşınma, yorulma aşınması, erozif aşınma ana başlıkları şeklindedir [4,10].

4.2.1. Adhezif aşınma

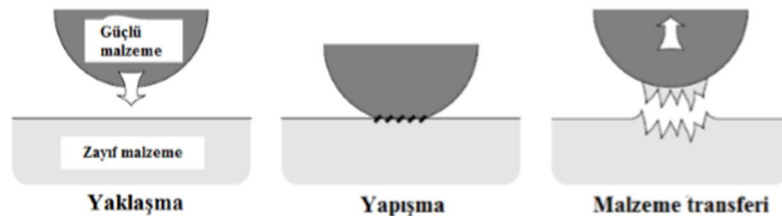
Adhezif aşınma, birbirleriyle temas halinde olan bağıl hareket yapan kuru kayma yüzeylerinde daima mevcut olan bir aşınma türüdür. Diğer aşınma mekanizmalarının önüne geçilse bile bu aşınma türü daima vardır. Bu aşınma türüne kayma aşınması da denilmektedir [4]. İki yüzeyin temas bölgesinde geniş deformasyonlar oluşur, deformasyondan kaynaklı çatlamlar başlar ve gerilmelerle birlikte birleşerek

artmasına sebep olur. Ara yüzeylerde meydana gelen bu çatlak uzamaları, parçada aşınma ve malzemelerin yapışarak transferi ile tamamlanır [84]. Şekil 4.4.'de adhezif aşınma gösterilmiştir [85].



Şekil 4.4. Adhezif aşınma, a) kaymadan önce yüzeylerin birbirine teması ile yapışma, b) yapışmadan kaynaklanan plastik deformasyon ile malzeme kaybı [85].

Adhesif aşınma, yüksek aşınma oranları ve oldukça değişik sürtünme katsayıları ile kendini gösteren bir aşınma türüdür. Özellikle kayma sürtünmesi olan malzemelerde rastlanan bu olay, birbiri üzerinde kayan yüzeylerin pürüzlü olmasından dolayı küçük boyutlarda gerçek temas alanı vardır. Temas eden yüzeylerdeki gerilmeler, küçük yükler altında bile akma gerilmesi sınırına ulaşabilirler veya bu sınırı geçebilirler [4,10]. Akma sınırının üzerine çıkılması durumunda küçük kaynak bağlar meydana gelir (soğuk kaynama adhezyon). Kayma esnasında yüksek yerel basınçların yanında, kaynak bağların kolay bir şekilde oluşumunu sağlayan temas noktalarındaki sıcaklığın aşırı yükselmesidir. Adhezyon, farklı malzeme yüzeylerinin veya farklı moleküllerin meydana getirdiği bağlar ve karşılıklı etkileşimi olarak tanımlanır. Bu bağların oluşması esnasında, yüzeylerin kimyasal ve fiziksel karşılıklı etkileşimleri önemli derecede rol oynar. Bağların kuvvetli olması, fonksiyon yüzeylerinin temiz olması ile olur. Yağlayıcı maddeler, absorbe gazlar, rutubet ve oksitler bağ kuvvetini buna bağlı olarak aşınmayı azaltır [4]. Adhezyon ile malzeme transferi Şekil 4.5.'de görülmektedir [10].



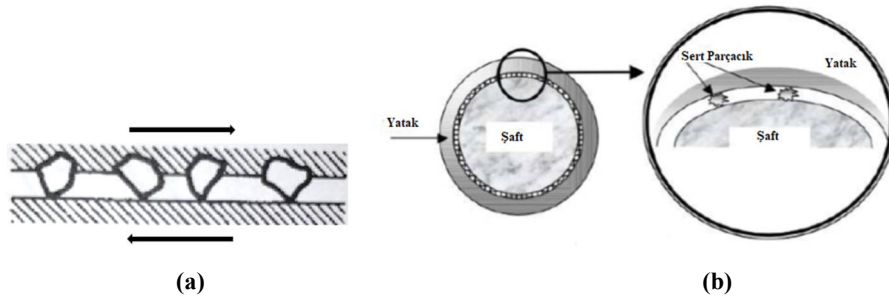
Şekil 4.5. Adhezyon mekanizması ile malzeme transferi [10].

Belirli koşullar altında iki katının bir biri ile teması gerekli bir durumdur. Yapışma etkisi, temas yüzeylerinde kendini gösterir. Yüzey sertliği ve yüzey pürüzlülüğünün artması ile yapışma etkisi azalmaktadır. Bu aşınma türünde, karşılıklı temas halindeki

yüzeylerde yapışma meydana gelir ve yüzeyden malzeme transferine sebep olur. Yüzeyler arasında oluşan yapışmayı görmek zordur. Yüksek vakum altında yapılan kayma ve adhezyon deneyleri, atmosferik ortamdakinden farklı sonuçlar verir [10]. Yapılan araştırmalar sonucunda adhezyon oluşumu, katı eriyik oluşturabilen ve yumuşak homojen yapıdaki metallerde daha kolay ve buna bağlı olarak aşınmanın şiddeti fazla olur. Sert ve homojen olmayan, farklı türde metallerde ise adhezif aşınma daha az olur [20]. Bu aşınma türü, en çok rastlanan aşınma olmasına rağmen hasarı hızlandırıcı etkide değildir [85].

4.2.2. Abrezif aşınma

Abrezif aşınma, temas halindeki iki yüzeyin birinin diğerinden daha sert olduğu durumlarda veya kayan iki yüzey arasında sert, aşındırıcı partiküllerin meydana getirdiği aşınma türüdür. Sert yüzey kabarıklıklarının veya partiküllerinin katı yüzeylerde hareketi ile oluşur. Yüzey pürüzlülüğü olan sert yüzey, yumuşak yüzey bastırıldığında yumuşak olan malzemede plastik akma olur. Sert yüzeyin teğetsel hareketi sonucunda, yumuşak malzeme yüzeyinde çizikler ve kanallar meydana gelir. Sert olan yüzeyin geometrisine bağlı olarak temas yüzeyinde malzeme kaybı olur [4,10,85]. İki ve üç elemanlı olmak üzere abrezif aşınma kendisini iki tipte gösterir [10,85]. Şekil 4.6.'da abrezif aşınmanın şematik gösterimi verilmiştir [4,85].



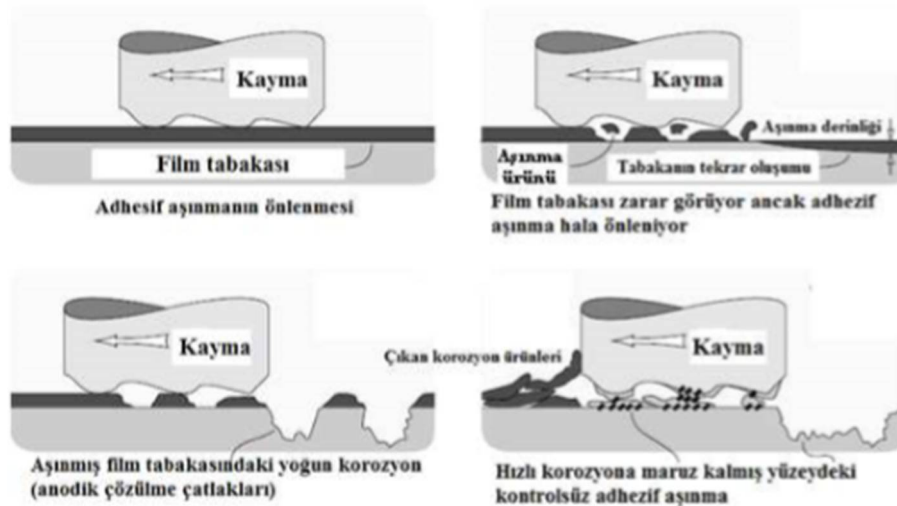
Şekil 4.6. Abrezif aşınmanın a) iki elemanlı, b) üç elemanlı şematik gösterimi [4,85].

İki elemanlı abrezif aşınma, sürtünmeye maruz kalan yüzeylerin pürüzlü ve sert olanın ya da yüzeye gömülü olan sert bir parçanın temas halindeki diğer yüzeyi kazıması ile olmaktadır. Üç elemanlı abrezif aşınma ise; sürtünmenin olduğu yüzeylerin arasında bulunan üçüncü olan diğer bir parçanın serbest halde yüzeylerin arasında aşındırıcı olarak bulunması ve kazıma etkisi yapmasıdır [4].

Abrezif aşınmanın azaltılması (malzeme açısından) için daha sert alaşımlar kullanılabilir, ısıl işlem ile sertliği artırılabilir veya sert bir tabaka ile malzeme yüzeyi kaplanabilir [85].

4.2.3. Koroziif aşınma

Elektrokimyasal ya da kimyasal olaylar sonucunda koroziif aşınma meydana gelir [4]. Aşınmaya maruz kalmış yüzeylerde kimyasal reaksiyonlar sonucunda malzeme kaybının meydana gelmesi koroziif aşınma olarak tanımlanır. Kimyasal aşınma diğer aşınma türleri ile birlikte görüldüğü gibi tek başına da olabilir. Yüzeylerde kullanılan film tabakalarının hasarlanması malzeme, asitler ve oksijen gibi elementler ile reaksiyona girmeleri sonucunda yüzeyde bileşik yaparlar. Metal sanayisinde, koroziif aşınma malzeme yapısına verdiği aşınmadan dolayı çok büyük zararlara sebep olmaktadır. Kaymanın oluşturduğu aşındırıcı ve kimyasal bir ortamda kimyasal korozyon olmaktadır. Oksijen, en baskın koroziif aşınmaya sebep olan ortamdır [85]. Malzeme yüzeylerinde korozyonu önlemek amacı ile tabaka oluşması bazı olayları beraberinde getirir. Yağlayıcı tabaka, aşınmaya ve korozyona karşı dayanıklıdır. Aşınmanın hızlanmasının sebebi film tabakasında oluşan deformasyondur. Alt malzeme ve hasar görmüş film tabakası galvanik çift oluşturur. Bu da aşınma hızını artırmaktadır. Koroziif aşınmanın şematik ifadesi Şekil 4.9.'da görülmektedir [10].



Şekil 4.9. Koroziif aşınmanın şematik ifadesi [10].

Görüldüğü gibi yüzeydeki koruyucu tabaka mekanik etkiler ile zarar görür, malzeme adhezif aşınmaya karşı direnç gösterir, tamamen aşınan film tabakası ile birlikte koroziif aşınma etkisini gösterir (Şekil 4.9.) [10]. Tablo 4.1.'de korozyon çeşitleri verilmiştir [4].

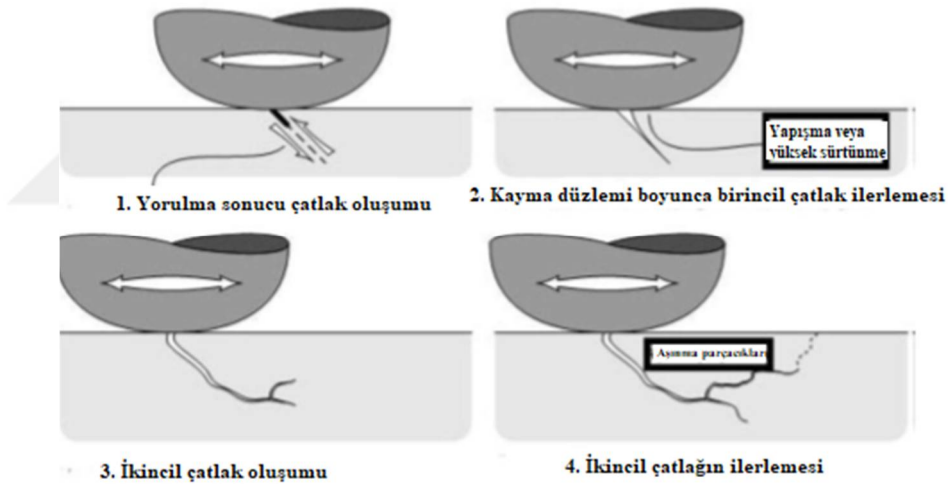
Tablo 4.1. Korozyon çeşitleri [4].

Genel korozyon	Lokal Korozyon	Metalurjik etkili korozyon
Atmosferik korozyon	Çatlak korozyonu	Ara granül korozyonu
Galvanik korozyon	Pitting (pulcuk kalkması)	
Çatlak akımlı korozyon	Lokal biyolojik korozyon	
Genel biyolojik korozyon		
Tuz korozyonu		
Sıvı metallerde korozyon		
Yüksek sıcaklık korozyonu		
Oksidasyon		
Sülfidasyon		
Karbürizasyon		
Diğer formlar		
Mekanik destekli bozunma	Ortam tarafından teşvik edilen çatlaklar	
Erozyon korozyonu	Gerilme-korozyon çatlakları	
Fretting korozyonu (sürtünme oksidasyonu)	Hidrojen bozunması	
Kavitasyon	Sıvı metal çatlakları (gevrekleşmesi)	
Korozyon yorulması	Katı metal destekli gevrekleşme	

Yüzeyde oluşan ince film tabakası malzeme kaybını ilk etapta azaltıcı etki yapar. Yüzeye uygulanan kayma gerilmeleri ile malzeme kaybı olur. Koroziif aşınmada ana malzeme içerisinde kırılma olmaz, sürtünme sırasında oluşan ince yüzey film tabakalarının içlerinde kırılmalar olması başlıca özelliklerindendir. Kimyasal ve mekanik proseslerin dinamik dengesi ile oksit filmleri meydana gelir ve sonrasında kırılır [85]. Malzeme ve makine mühendisleri bir tasarım için malzemeleri bazı açılardan incelemeleri kullanılacak uygun metalin seçiminde gereklidir. Mesela, malzemedeki tokluk, yorulma, şekil değiştirme derecesi, korozyon direnci ölçümleri yapılmalıdır. Çalışma şartlarında, koroziif ortam, çalışma sıcaklığı ve yüzey dayanıklılığı malzeme seçimini etkileyen faktörlerdir [84].

4.2.4. Yorulma aşınması

Makine elemanlarında, zamanla titreşimlerden ya da tekrarlanan yüklerden dolayı yorulma meydana gelir. Değişken ve sürekli yüklere maruz kalan yüzeylerin altında yorulma çatlakları oluşur. Oluşan bu mikro çatlaklar zamanla malzeme yüzeyine ilerlerler ve yüzeyden parça kopmasına neden olur. Yorulma aşınması bu şekilde meydana gelmektedir. Bu aşınma türü, genellikle mekanik etkilerin ve sıcaklığın kombinasyonu olarak ortaya çıkar. Mekanik etkinin ve sıcaklığın oluşturduğu etkilerin belirli periyotlarla devam etmesi malzemelerin yapılarında çatlak ve kırıklara sebep olur. Yüklerin tekrarlı olması ve deformasyonlar, çatlakların ilerlemesine ve diğer çatlakla birleşmesine sebep olur. Yüzeye paralel oluşan çatlaklar ince ve uzun aşınmış tabakaları oluşturur. Yorulma ile çatlakların oluşumu ve oluşan çatlakların ilerlemesi Şekil 4.10.'da görülmektedir [10,85].



Şekil 4.10. Yüzeyde meydana gelen çatlak oluşumları ve ilerlemesi [10,85].

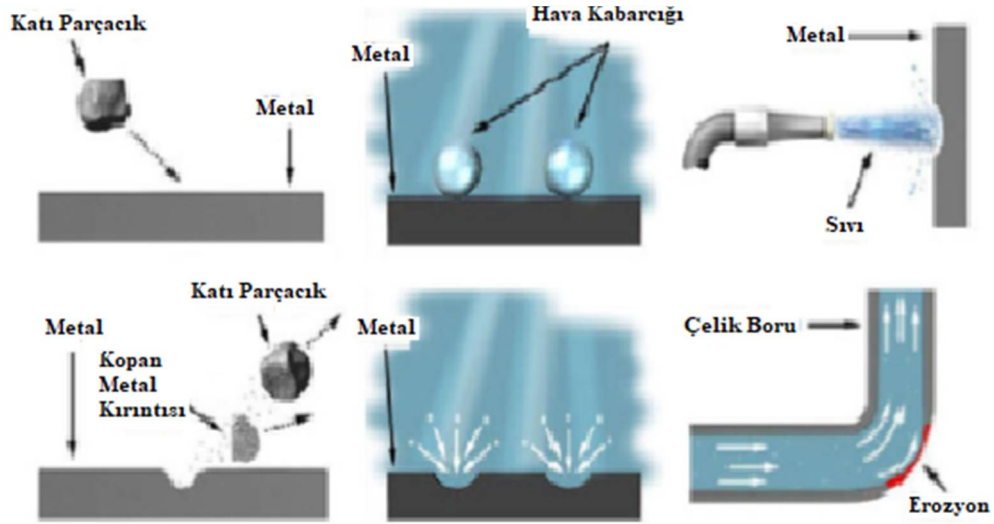
Özellikle rulmanlar, kam mekanizmaları, dişli çarklar gibi makine parçalarında yuvarlanma hareketi sonucunda yüzeylerinde oluşan malzeme yorulması olayıdır [86]. Sürtünme yorulmasının hacimsel yorulmadan farkı, alt yüzey bölgelerinde ve yüzeyde sınırlı oluşudur. Katı yüzeylerden sürtünme yorulması ile malzeme kaybı yorulma aşınmasını ifade eder. Yorulma çatlakları, teğetsel gerilimin maksimum olduğu noktalarda başlar. Teğetsel maksimum gerilimin konumu, kontak yüklemesi altında sürtünme katsayısına bağlıdır [85]. Birbirine değen yüzeylerde plastik şekil değiştirmeden kaynaklı pekleşme olur ve malzeme gevrekleşir. Tekrarlı kuvvetin

gevrek malzeme üzerinden geçmesiyle çatlama olur. Bu çatlamlar metallerde yüzeyden 0,2-0,3 mm derinlikte başlar, zamanla yayılır ve yüzeyden malzeme kopar. Yüzeylerin iyi parlatılması ve sertleştirilmesi ile bu tür yüzey yorulması önlenir [20].

4.2.5. Eroziyon aşınma

Eroziyon aşınma birçok yönüyle abradatif aşınmaya benzerlik göstermektedir. Üç elemanlı abradatif aşınmada iki yüzey arasındaki sert partiküller yüzeyi kazırken eroziyon aşınmada, sert partiküller yüzeye çarpmaktadır [4]. ASTM G76–95 standardına göre; belirli hızlardaki katı parçacıkların bir yüzeye çarpmasıyla üst tabakadan malzeme kayıplarının meydana gelmesi eroziyon aşınma olarak adlandırılmaktadır. Bir akışkana karşı malzemelerin yüzeyinden madde kaybı erozyonu tanımlanmaktadır [86]. Eroziyon aşınma ile ilgili araştırmalar 1950’li yıllarda başlamış ve günümüze kadar gelmiştir. Katı partikül erozyonu ile mühendislik malzemeleri üzerinde, bu tarihten günümüze birçok sayıda çalışma yapılmıştır [3].

Akışkan ortam, sıvı, gaz ve katı (toz) olabilir. Sıvı içerisinde sert partiküllerin hareketi ile malzeme yüzeyinde yuvarlanması ve kaymasına (yüksek hızlarda) bağlı olarak malzeme yüzeyinden parça kopması da eroziyon aşınmayı meydana getirmektedir. Yüzeye çarpan malzemeye göre katı partikül erozyonu ya da sıvı partikül erozyonu olarak adlandırılır [10,86]. Uçuş sırasında kum ve benzeri partiküller uçakların gaz türbin kanatlarına zarar vermesi, toz bulutu tarafından uçakların aşınması, pompa-kompresör çarkında meydana gelen aşınma erozyon aşınmasına verilebilecek örneklerin başında gelir ve çok rastlanan bir aşınma mekanizmasıdır [10,85]. Şekil 4.11.’de erozyon aşınmasının farklı türleri görülmektedir [86].



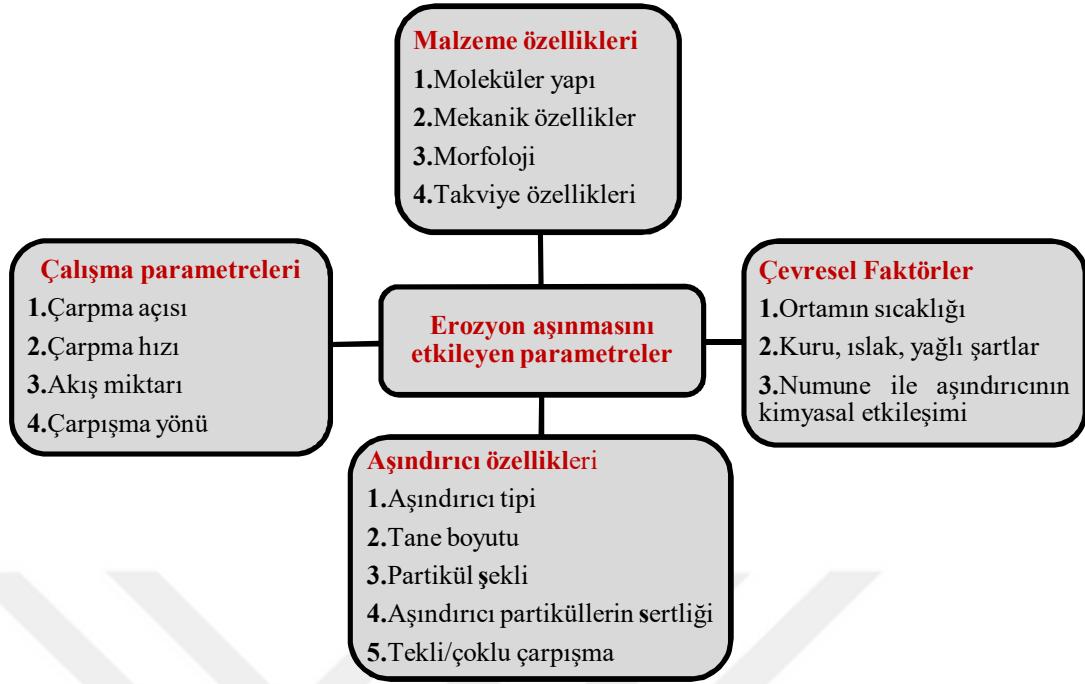
Şekil 4.11. Erozyon aşınması [86].

Erozyon aşınması;

- Yüksek hızlarla akışkan içerisinde partiküllerin katı yüzeyine çarpması,
- Yüksek hızlardaki sıvı damlaların hareketi ile katı yüzeye çarpması sonucunda şok dalgasıyla tahribat oluşturmaları,
- Yüksek hızlarla hareket eden katının, daha yavaş harekete sahip su damlalarına tekrarlı çarpması,
- Yüksek basınç ile gaz kabarcıklarının malzeme yüzeyine çarpması

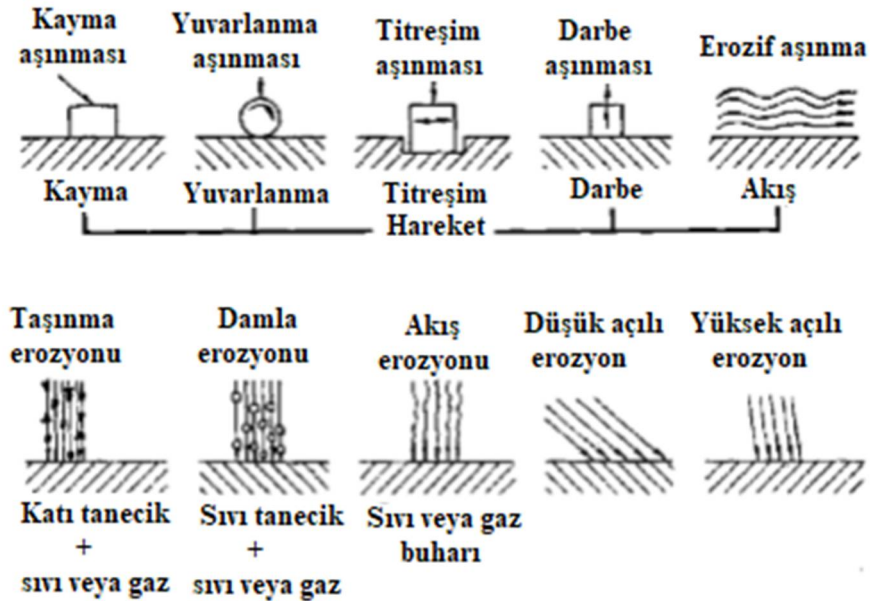
ile meydana gelir [85].

Erozif aşınmada madde kaybına sebep olan partiküllerin önemi oldukça fazladır. Malzemenin cinsi, aşındırıcı partiküllerin boyutları, çarpma hızları ve çarpma açıları gibi parametreler erozif aşınma mekanizmasını belirlemektedir. Erozif aşınmada yüzeye çarpan partiküller, katı ve sert bir halde ise aşınma türü abrezif karakterdedir. Sıvı olan aşınma ortamında ise, tekrarlı sıvı akışının stresleri ile oluşan bir aşınma türü haline gelir [10]. Makine parçalarının yüzeylerinde, meydana gelen çatlak, çizik çukurcuklar ve oyular erozyon aşınmasında önemli etkilere sahiptirler. Birçok faktör erozyon aşınma performansında etkilidir. Bu etkiler çizelge halinde Şekil 4.12.'de verilmiştir [86].



Şekil 4.12. Erozyon aşınmasını etkileyen parametreler [86].

Erozyon aşınmasında etkili olan bu parametrelerin hepsi bütün malzemelerde aynı etkiyi oluşturmamaktadır. Farklı kombinasyonlardaki bu faktörler sonucunda erozif aşınmanın seyrinde değişiklikler olmaktadır. Farklı değişkenler ile etkileşim sonucunda oluşan erozyon mekanizmaları Şekil 4.13.'de şematik olarak ifade edilmektedir [86].



Şekil 4.13. Erozyon mekanizmalarının şematik gösterimi [86].

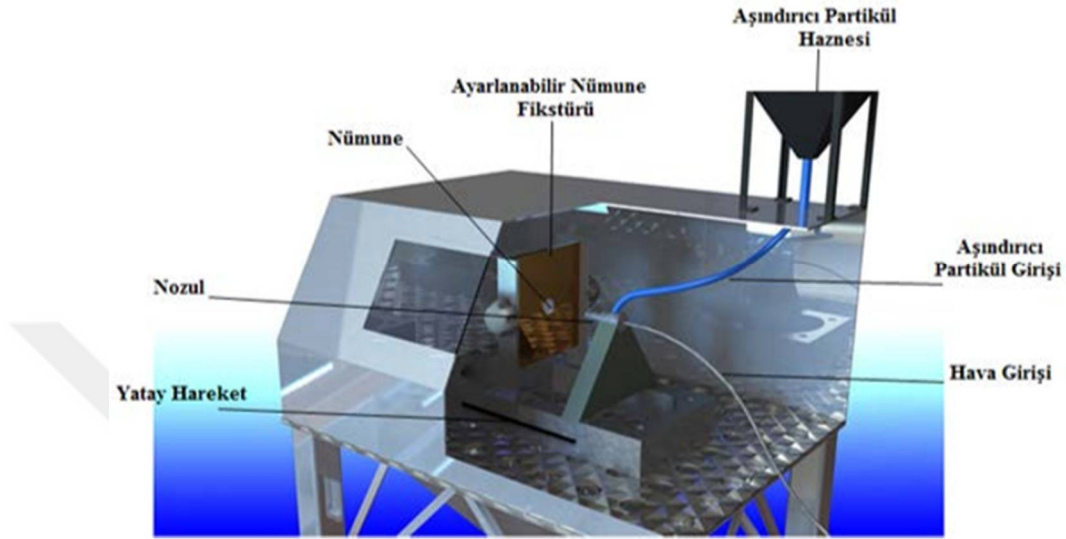
Katı partikül erozif aşınması (taşınma erozyonu), erozif aşınma mekanizmaları içerisinde en çok rastalanan ve en fazla etkili olan aşınma mekanizmasıdır [4]. Katı partikül erozyonu, “4.3. Katı Partikül Erozyonu” başlığı altında detaylı olarak ele alınmıştır.

4.3. Katı Partikül Erozyonu

Katı partiküllerin oluşturduğu erozyon aşınması, yüksek hızlardaki katı parçacıklarının etki yüzeyine çarpması ile birlikte ortaya çıkmaktadır [4]. Bazen aşınma, bir gaz akışı tarafından taşınan veya akan bir sıvının içinde sürüklenen, yüzeye çarpan sert parçacıklardan kaynaklanır. Bu tür aşınmalara erozyon denir ve bu erozyon genellikle katı parçacık erozyonu veya katı çarpma erozyonu olarak nitelendirilir [87]. Katı partikül erozyonunda, sert partiküllerin belirli bir hızla malzeme yüzeyine çarpıp malzeme yüzeyinde malzeme kaybı gerçekleşir [88]. Malzemelerde aşınma, servis çalışma süresince malzeme performansının tespit edilmesinde önemli parametrelerden biridir. Malzemelerin yüzeylerinde mekanik bir etki ve izafi bir hareketle meydana gelen malzeme kaybı aşınma olarak adlandırılır [89]. Mühendislik malzemelerinde, çalışma ortamlarının, katı partikül içermeleri ve ağır şartlarda farklı açılarda ve yüksek hızlarda katı partiküllerin tekrarlı bir şekilde malzeme yüzeyine temas etmeleri sonucunda erozif aşınma olmaktadır. Bunun sonucu olarak, çalışan malzemelerin yüzeylerinde aşınmadan dolayı malzeme kayıpları meydana gelmekte ve hasar oluşturmaktadır [3]. Katı partikül erozyonu da diğer tribolojik süreçlerdeki gibi kompleks bir süreçtir [89]. Seramiklerin, kompozitlerin, metallerin, alaşımlarının ve değişik yöntemlerle üretilen kaplamaların erozyon davranışlarını incelemek amacı ile katı partikül erozyon testleri uygulanır [3].

Malzemelerin katı partikül erozyonu davranışlarının incelenmesinde öncelikle etkin parametreler belirlenmektedir. Bu parametreler; partikül türü ve boyutu, çarpma hızı, çarpma açısı, nozul mesafesi, erozyon süresi vb. şeklinde sıralanmaktadır. Daha sonra belirlenen parametrelerde kütleli debi ve partikül çarpma hızları hesaplanır ve katı partikül erozyonu gerçekleştirilir. Şekil 4.14.’de katı partikül erozyonu deney

düzeneginin şematik gösterimi verilmiştir. Bu testler sonrasında; erozyon oranları hesaplanır ve sonuçlar değerlendirilir. Profilometre yardımı ile aşınan yüzeylerin üç boyutlu olarak yüzey pürüzlülük değerlerinin topografyası ve SEM/EDX analizleri de yapılabilmektedir [3].



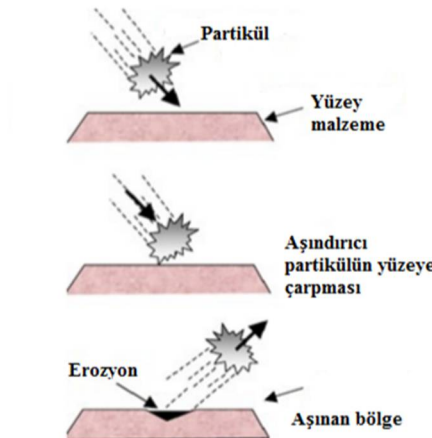
Şekil 4.14. Katı partikül erozyonu deney düzeneginin şematik gösterimi [3].

Basınçlı hava, kompresörden sağlanır ve aşındırıcı partikülleri hızlandırarak malzeme yüzeyine tekrarlı bir şekilde çarpması sağlanır. Böylece erozif aşınma meydana getirilir. Kompresörden sağlanan basınçlı havanın kurutulmasını sağlayan bir düzenekte kompresörün yanında mevcuttur. Bu ünite ile hava nemden arındırılır ve aşındırıcı partiküllerin nozule iletilmesinde oluşabilecek olumsuzluklar ortadan kaldırılmış olur. Bu şekilde aşındırıcı partiküllerin nemden kaynaklı topaklanmasının önüne geçilir ve partikül taşıma kanallarının tıkanması engellenmiş olur. Bu test düzeneği, kumlama düzeneğinin özel olarak tasarlanması ile gerçekleştirilir. Kumlama düzeneğini oluşturan elemanlar, basınçlı hava tankı, basınçlı hava kompresörü, kumlama kabini ve içerisindeki ayarlanabilir (farklı açılarda ve numune-nozul mesafelerinde) numune fikstürü, kumlama tabancası şeklindedir. Kabin dışarısında bulunan pedal sayesinde, kumlama kabini içine sabitlenmiş nozulun açılıp kapanması kontrol edilir. Basınç, basınç ayarı regülatörü yardımı ile ayarlanır. Numune fikstürünün hareketi ile numune yüzeyine farklı açılarda aşındırıcı partikül püskürtülmesine ve numunenin nozuldan istenilen mesafede ayarlanmasına olanak sağlamaktadır [3].

Malzeme yüzeyine, farklı açılarda, sert ve aşındırıcı partiküllerin belirli hızlarda çarpması ile malzeme yüzeyinde malzeme kaybı olmaktadır. Karşılıklı zorlamalar sonucunda triboloji sistemin elemanları arasında oluşan aşınma birçok mühendislik sistemlerinin performansını etkiler ve tasarımda dikkat edilmeyen bir faktördür. Makine elemanlarında tamir ve yenileme masraflarını beraberinde getirir ve kullanım sürelerini düşürür [3].

Küçük katı parçacıkların, tekrarlanan etkilerinden kaynaklanan malzemenin bozulması katı parçacık erozyonu olarak tanımlanabilir [90]. Erozyon aşınmasında temel olarak tekli çarpma aktif olarak görülmekle birlikte çoklu çarpma ile aşındırıcı partiküllerin etkileşimi ve bu etkileşimle yüzeyde değişiklik kompleks olaylar da oluşabilmektedir. Tanecikler yüksek hızla birlikte kinetik enerji oluşturur ve yüzeylere çarparak yüzeyde değişiklikler meydana getirir. Bu değişimler ana malzemede abrezif ve adhezif etkilere sebep olur, yüzeyde plastik deformasyon oluşur ve ısı artar. Bu da erozif aşınmada artış gösterir [86].

Tekli ve çoklu çarpma ile malzemelerin yüzeylerinde makro çizilmeler, mikro çatlaklar ve kesilmeler meydana gelmektedir. Darbelerin etkisiyle yüzeyde ve yüzeyin alt kısımlarında yorulma çatlakları çıkar ve sonrasında yüzeyde çukurlar ve oluklar meydana gelir [86]. Katı partikül erozyonu mekanizması Şekil 4.15.'de gösterilmektedir. Şekil 4.15.'de görüldüğü gibi katı partikül erozyonunda, mühendislik makine ve elemanlarının yüzeyleri abrasif bir ortamda katı partiküllerin çarpmasına maruz kalmaktadır [3].



Şekil 4.15. Katı partikül erozyonu mekanizması [3].

Helikopterlerin rotor kanatları, partikül madde taşıyan boru hatları ve vanalar, enerji santralleri, denizcilik ve otomobil uygulamaları, uzay ve hava taşıtları katı parçacık erozyonuna şiddetle maruz kalmaktadır. İşlem, malzemenin aşınması, yüzey pürüzlülüğü, yüzey bozulması, mikroskobik kepçe görünümü ve yapısal bileşenin işlevsel ömründe azalma gibi olumsuz sonuçları ortaya koymaktadır [24,27].



(a)

(b)

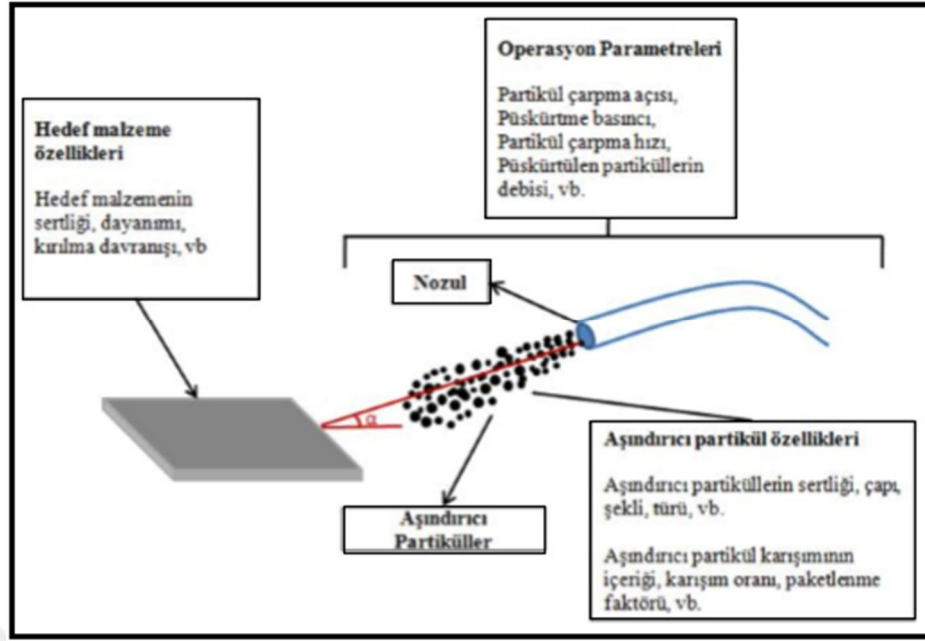
(c)

Şekil 4.16. Katı partikül erozyonuna maruz kalmış a) türbin bıçakları, b) buhar kazan borusu ve c) Enerji hatlarında rüzgar yönüne bağlı olarak aşındırıcı partiküllerin çarpma açısının değişimi [3,27].

Enerji nakil hatlarındaki malzemelerin servis ömürleri atmosferik hava şartlarına maruz kalmaktadır. Özellikle kum fırtınası enerji nakil hatlarında erozyon aşınmasına ve böylece malzeme kaybına, ömürlerinin kısılmasına ve büyük enerji kayıplarına sebep olur [27].

Katı partikül erozyonu, buhar ve jet türbinleri, partikül madde taşıyan valfler ve boru hatları gibi birçok mühendislik sistemlerinde ciddi problemlere sebep olsa da bazı durumlarda kumlama ve yüksek hızlı aşındırıcı su jeti kesiminde uygulama alanı bulmaktadır [90]. Abreziv ve erozif aşınma, öğütme, parlatma işlemlerinde ve malzemelerin kesilmesinde ve şekillendirilmesinde kullanılan bir yöntemdir [87].

Katı partikül erozyonu esnasında oluşan değişimler birden fazla faktöre bağlıdır. Bunlar, aşındırıcı partiküllerin hızı, çarpma açısı, boyutu ve debisi, aşınan malzemelerin özellikleri en önemli parametrelerdir. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler Şekil 4.17.'de şematik olarak ifade edilmiştir [88].



Şekil 4.17. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler [88].

Erozif aşınma etkisi altında kalan malzemeler aşınma davranışlarına bağlı olarak, gevrek, sünek ve yarı gevrek davranış gösterirler [3].

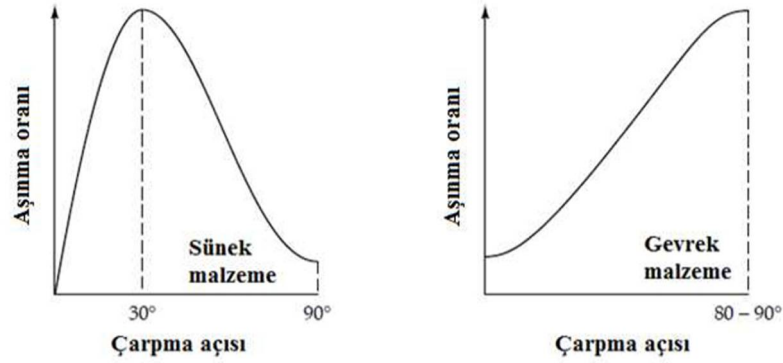
4.3.1. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı

Katı partikül erozyon davranışı üzerinde birçok araştırmacı tarafından farklı malzemeler üzerinde denenen çalışmalar sonucunda, aşındırıcı partiküllerin malzemeye çarpma açılarının büyük etkileri olduğu tespit edilmiştir [3]. Malzemelerin katı partikül erozyonunu etkileyen önemli parametrelerden biri aşındırıcı partikül çarpma açısıdır. Katı partikül erozyonunun, partikül çarpma açısı ile ilişkisi iki şekilde incelenebilir [88];

- Dik çarpma (çarpma açısı=90°) açılarındaki erozyon
- Eğik çarpma ($0^\circ < \text{çarpma açısı} < 90^\circ$) açılarındaki erozyon.

Malzemenin sünek erozif aşınma karakterinde, düşük partikül çarpma açılarında maksimum aşınma olmaktadır. Maksimum aşınmaya yüksek partikül çarpma açılarındaki karşılaşılıyorsa malzeme gevrek erozif aşınma karakterindedir [91]. Sünek davranıştaki malzemeler 30°'lik çarpma açısı ile aşınırken, sert malzemelerde aşınma

90°'ye yakın çarpma açılarında olmaktadır. Yarı gevrek malzemelerde, 45°-60°'lik çarpma açılarında en yüksek aşınmalar meydana gelir [3]. Şekil 4.18.'de gevrek ve sünek malzemelerin partikül çarpma açısı ile aşınma hızları arasındaki ilişkisi verilmiştir [91].

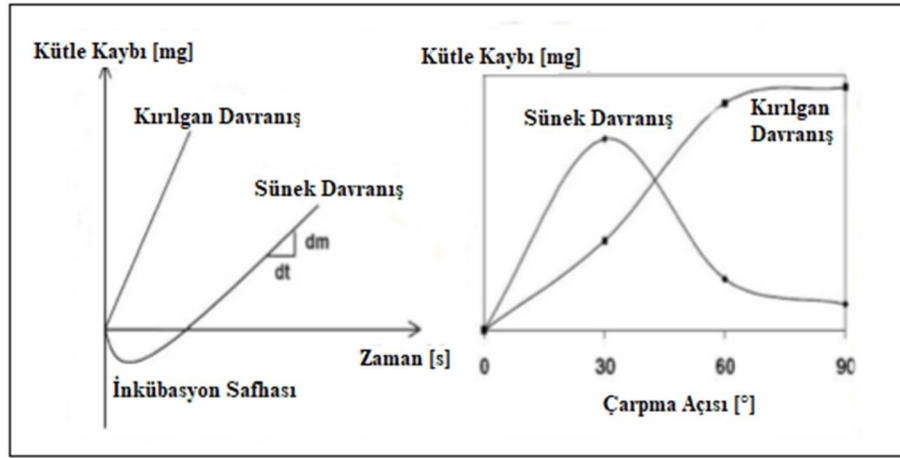


Şekil 4.18. Sünek ve gevrek malzemelerin partikül çarpma açısı-aşınma hızı ilişkisi [91].

Partikül çarpma açıları 0°-90° arasında olabilmektedir. Çarpma açısının 0° olduğu durumlarda aşındırıcı partiküllerin yüzey ile teması olmadığı için aşınma önemsizdir. 20°'ye kadar düşük partikül çarpma açılarında kadar eğer aşındırma partikülleri sert ve temas yüzeyi yumuşak ise ciddi boyutlarda aşınma olur ve abrezif karakterde aşınma gerçekleşir. Yüzeyin kırılğan olması durumunda en yüksek aşınma 90°'ye yaklaşan partikül çarpma açılarında yüzeyin parçalanması şeklinde meydana gelir. Artış belirgin ölçüdedir. Düşük açılarda yüksek erozif aşınma olursa sünek davranış, yüksek açılarda daha fazla erozif aşınma olur ise gevrek durum söz konusudur [10,91].

Düşük çarpma açılarında katı partikül erozyonunun sahip olduğu mekanizma iki cismin sürtünmesine benzer. Çünkü malzeme yüzeyi boyunca etkileşimde olan partiküller bir yol izler. Yüksek çarpma açılarında ise çarpma şeklinde aşınma mekanizmasına sahiptir [88]. Sünek davranıştaki malzemelerde aşınma, malzeme kaybıyla çarpma zamanı ilişkisindeki değişim, zamanla lineer orantılı duruma gelmeden önce aşınan malzeme ağırlığının arttığı gelişim safhası söz konusu olmaktadır. Bu, aşındırıcı partiküllerin sünek yapıdaki hedef malzemeye gömülmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 4.19.'da yer verilen grafiklerde bu durum

görülmektedir. Hedef malzeme üzerinden aşındırıcı partiküllerin ayrılması ile erozyon aşınması kararlı davranış gösterir [88].

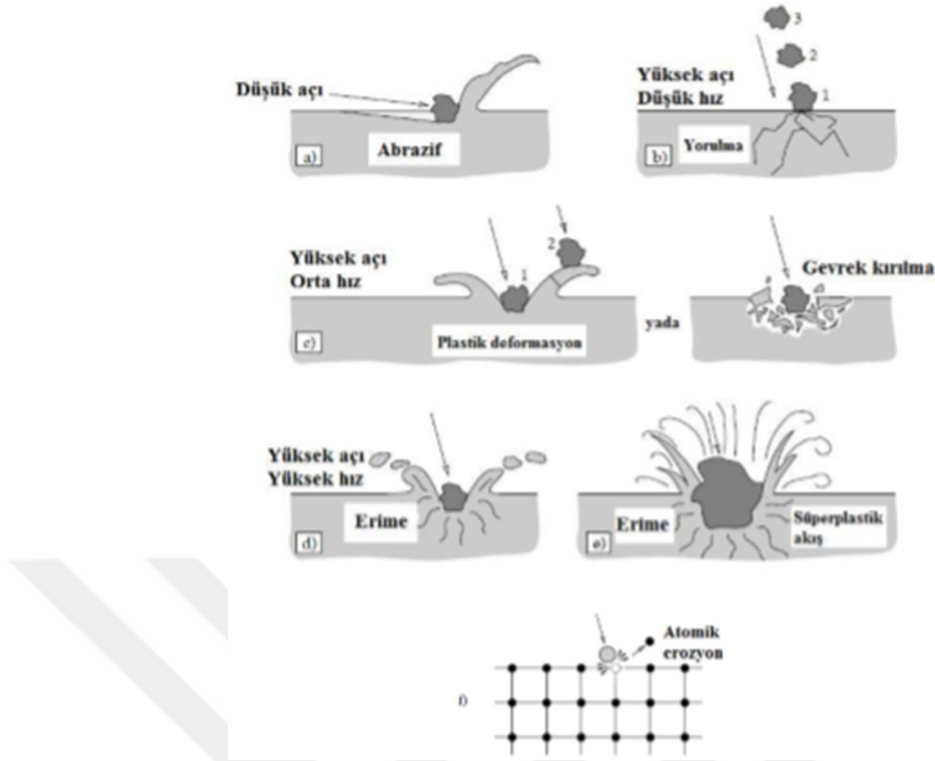


Şekil 4.19. Gevrek/sünek malzemelerde partikül erozyonu karakteristikleri [88].

Polimerler ve sünek metaller için sürünme ve kesme, kauçuklar için yırtılma ve yorulma, camlar ile gevrek polimerler ve seramikler için ise çatlak oluşumu ve gevrek kırılma gibi farklı erozyon davranışları ortaya çıkmaktadır. Partikül hızının dikey bileşeni açı büyüdükçe artmakta ve çarpma etkisine benzer bir şekilde etki mekanizması ağırlık kazanmaktadır. Sünek malzemelerde bu etkinin etkisi ile çarpma açısı küçükten büyüğe gidildikçe orta dereceli açılarda aşınma mekanizmasının en yükseğe erişildiği görülmektedir [92].

4.3.2. Aşındırıcı partiküllerin hızı

Malzemelerin aşınma proseslerinde erozif aşındırıcı partiküllerinin hızı, güçlü bir etkiye sahiptir. Düşük partikül çarpma hızlarında aşınma abrezif eğilimlidir. Çarpma anında oluşan gerilimler plastik deformasyon oluşumu için yetersiz kalır ve yüzey yorulması şeklinde aşınma gerçekleşir. Yüksek partikül çarpma hızlarında ise plastik deformasyon oluşur (örneğin, aşındırıcı partiküllerin hızları 20 m/s'den yüksek ise plastik deformasyon başlar) ve tekrarlanan plastik deformasyonlar ile aşınma meydana gelir. Kırılkan malzemelerde aşınma, yüzeyin altındaki kırılmalar ile gerçekleşir [10,91,92]. Partikül hızının ve çarpma açısının erozif aşınmaya etkileri Şekil 4.20.'de görülmektedir [10].



Şekil 4.20. Çarpma hızına ve açısına bağlı olarak erozyon mekanizmaları a) abrazif etki, düşük çarpma açısında, b) yüksek açı düşük hızda yorulma, c) yüksek açı orta hızda gevrek kırılma ya da plastik deformasyon, d) yüzeyde meydana gelen erime (yüksek hızda), e) erozyonun ikincil etkileri, f) kristal latisindeki atomik erozyon [10].

Aşındırıcı parçacıkların hızları çok yüksek ise darbeye maruz kalan malzeme yüzeyinde erime bile gözükabilir. Diğer önemli bir etken ise parçacık boyutudur. Aşınma hızı, aşındırıcı tane boyutu arttıkça artar. Sert parçacıkların aşınma hızı yumuşak parçacıklara göre daha yüksektir. Nispeten yuvarlak şekilde sert parçacıklar şiddetli erozif aşınma oluşturmazlar [91].

Orta hızlardan yüksek hızlara doğru, bir güç kanunu çarpma hızı ve aşınma oranı arasındaki ilişkiyi açıklayabilir [93];

$$-\frac{dm}{dt} = kv^n \quad (4.2)$$

Bu denklemde aşınan malzemenin kütlesi “m”, işlemin devam etme süresi “t”, aşındırıcı partikül hız değeri “v” ile ifade edilirken “k” ise deneysel bir sabittir. “n” üssünün değeri, hedef malzemenin ve aşındırıcı partiküllerin karakteristik özelliklerini tanımlar [93].

4.3.3. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debisi

Birim zamanda birim alana çarpan parçacık akış değeri (aşındırıcı partikül kütlesi) kütleli debi olarak tanımlanmaktadır ve erozif aşınmayı yakından ilgilendiren bir parametredir. Bütün aşındırıcı partiküllerin teorik olarak eşit çarpma hızında ve açısında çarptıkları varsayıldığından aşındırıcı partiküllerin akış debisinden aşınma miktarı bağımsız olmalıdır. Aşınmanın belirli bir limitteki değerine kadar, erozyon aşınma hızı ile parçacık akış değeri doğru orantılıdır. Limit parçacık akış değerinin üzerine çıkıldığında malzemeden seken aşındırıcı parçacıklar ile yeni gelen aşındırıcı parçacıklar çarpışır ve bunun sonucunda aşınma miktarında azalma görülebilir [88,91].

Kütleli debinin etkisi ile farklı mekanizmalar da oluşarak erozyon aşınmasında etkili olabilir. Bu farklı mekanizmalar geçici reaksiyonlar olarak değerlendirmek mümkündür. Akış debisinin artması ile birlikte hedef malzemenin yüzeyinde gerçekleşen çarpma arası zaman azalır. Bunun için, ilk çarpmadan sonra başlayan bozulma reaksiyonu için bir sonraki çarpma olana kadar daha az bir zaman olacaktır. Bu da bozulma derecesini etkileyecektir ve erozyon aşınmasının miktarı da buna bağlı olarak düşecektir. Hızlı ve büyük parçalarla metallerde oluşan partikül akış oran sınırı 10000 kg/m^2 kadar yüksek, elastomerlerde oluşan erozyon için 100 kg/m^2 kadar düşük olabilmektedir [93].

Seçilen malzemenin erozyon davranışında etkili olmaması açısından çevresel bozulma etkileri ve partikül etkilerini ortamdan kaldırmak için özel debi miktarı tercihi gerekli olabilir [88].

4.3.4. Aşındırıcı partiküllerin özellikleri

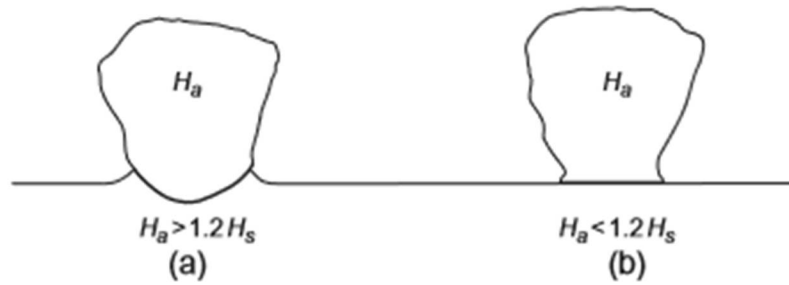
Katı partikül erozyon davranışlarında, malzeme yüzeyine temas eden partiküllerin boyutları önemli derecede rol oynamaktadır [3,88]. Aşındırıcı tanelerin boyutlarına bağlı olarak aşınma mekanizması değişimler gösterir. Malzemede küçük aşındırıcı partikül boyutları ile mikro kesme mekanizması ile hasar gerçekleşirken, mikro

büyük aşındırıcı tane boyutları ile çatlama ve kırılmalar şeklindeki hasarlar gerçekleştiği yapılan araştırmalar ile belirlenmiştir [88].

Erozyon miktarı, kritik bir tane boyutu değerinin (bu değerin 100-200 μm arasında olduğu gözlemlenmiştir) üzerinde bağımsız olduğu kabul edilir. Bu kritik değer, partikül ile hedefin etkileşimine ve etki aşamalarına bağlıdır. Kritik değere kadar erozyon oranı miktarının artan aşındırıcı partikül boyutu ile arttığı ifade edilmiştir [93].

Gevrek malzemelerin yüzeylerinde eğik açılardaki partikül erozyonunda radyal çatlaklar oluşmaktadır. Malzemelerde aşınmayı hızlandıran bu radyal çatlaklar malzeme kaybını artırır. Daha derin radyal çatlakların aşındırıcı tanelerin boyutların artmasıyla oluştuğu ve malzemelerde aşınma oranının arttığı tespit edilmiştir. Aşındırıcı partikül boyutlarının hedef malzemeye göre aşınma oranına etkilerinin değişiklik göstereceği açıktır. Malzemelerin kırılma karakterleri sünek kırılma, gevrek kırılma ve yarı sünek kırılma şeklindedir [92].

Erozyon sürecinde aşındırıcı partiküllerin artan sertliği, kırılman ve eğik açılı erozyon mekanizması etkin olduğunda erozyonu artıran bir etki gösterir [93]. Aşındırıcı partiküllerin sertliği, aşınmayı etkilemektedir. Aşındırıcı partiküllerin sertliği malzeme yüzeyinin sertliğinden daha düşük ise sert parçacıklara göre daha az aşınmaya neden olmaktadır. Aşındırıcı partikülün sertliği H_a , yüzey sertliği H_s ile ifade edilirse, H_a/H_s 1'den küçük olursa aşınma oranına karşı çok daha duyarlı olur. Şekil 4.21.'de normal yük altında bir katı parçacık ve yüzey arasındaki temas ilişkisi verilmiştir [87].



Şekil 4.21. Normal yük altında bir katı parçacık ile yüzey arasındaki temasın gösterimi, a) $H_a > 1.2 H_s$ parçacık yüzeyi girintili olur, b) $H_a < 1.2 H_s$ keskin köşeler körleşir plastik akış meydana gelir [87].

Aşındırıcı partiküller eğer küresele yakın keskin olmayan şekle sahiplerse plastik deformasyon ağırlıklı erozyon, keskin kenarlı partiküller ise kırılma, kesme ve parçalanma şeklinde erozyon olur [93].

4.3.5. Aşınan (hedef) malzemenin özellikleri

Erozyon aşınmasına, malzemelerin karakteristik özelliklerinin (moleküler yapısı, morfolojisi, mekanik özellikleri ve takviye özellikleri gibi) etkileri çok önemlidir ve yaygın olarak incelenmiştir [86,93]. Aşınma olayının kompleks bir süreç olmasından dolayı, aşınan malzemelerin net bir şekilde aşınma karakterlerinin belirlenmesi için farklı parametreler (aşındırıcı partikülün hızı, debisi, çarpma açısı vb) ile malzemelerin aşındırılması gerekir. Katı partikül erozyonunda, aşınma esnasındaki etkin aşınma mekanizmasının belirlenmesinde hedef (aşınan) malzemenin kırılma davranışları önemli bir faktördür [88].

4.4. Seramiklerde Ve Cam-Seramiklerde Aşınma

Kovalent ve iyonik bağ yapısında olan seramik malzemelerin korozyon ve yorulma dirençleri yüksek olup aynı zamanda yüksek sıcaklıklardaki sertlikleri ve mukavemetleri de oldukça iyidir. Seramik malzemeler bu özellikleri ile aşınmanın etkili olduğu alanlarda kullanılan bir malzeme grubudur [22]. Aşınmaya dayanıklı malzemeler ile yüksek sıcaklıklarda kullanılan endüstriyel parçalar, seramik ve aşınmaya dayanıklı refrakterler gibi kırılğan malzemelerdir [94]. Seramik malzemelerde aşınma, seramik yapıdaki tek tanelerin kimyasal ve/veya mekanik zorlamalar ile bünyeden uzaklaşması şeklindedir. Bazı seramiklerde ise yüzeyden veya bir taneden mikro partiküllerin kopması şeklinde olabilmektedir. Kopan mikro partiküller, mikron altı boyutlarda ve bir taneden daha küçüktür [22].

Seramik malzemelerde mikro kırılma, aşınmanın en önemli kaynağıdır. Seramik malzemelerde üretimden ve hammaddeden kaynaklı boşluk, çatlak, zayıf tane sınırı, inklüzyon gibi hatalardan dolayı mikro çatlaklar oluşur. Gerçek temas alanı statik temas şartlarında çok küçük olduğu için temas noktalarında yüksek gerilimler

meydana gelir. Bu olay metallerde plastik deformasyona, seramiklerde ise yüksek gevreklikten dolayı kırılmalara sebep olur. Dinamik kaymada temas ara yüzeydeki yüksek gerilimlerden başka kayma gerilimleri de üretilir. Bu gerilimler ise yüzey çatlaklarına sebep olur. Seramikler, statik şartlarda yüksek kararlılık, dinamik şartlarda ise çevresel maddelerle etkileşim gösterebilirler. Oksit olmayan seramiklerde rastlanan bu durum aşınmaya sebep olur [10]. Yağsız tribosistemlerde, ulaşılabilecek tribolojik hedefler; 0,2'den düşük sürtünme katsayısı, $1.10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 'den daha küçük aşınma katsayısı, kayma hızından bağımsız sürtünme ve aşınma, sürtünme ve oda sıcaklığından bağımsız aşınmadır. Silisyum nitrür (Si_3N_4), zirkonya (ZrO_2), Silisyum karbür (SiC), ve alümina (Al_2O_3) gibi seramik malzemelerin kayar çiftleri normal olarak yüksek gerilmeli tribosistemlerde serbest kayma koşulları altında yüksek sürtünme katsayısına sahiptir [95].

Sürtünme ve kayma sırasında meydana gelen diğer bir etki ise yüksek ısıdır. Sürtünme ısısının miktarı, nominal temas alanı ile ters, uygulanan güç, sürtünme katsayısı ile doğru orantılı olarak değişir. Metallere göre seramiklerin ısı iletkenlikleri düşük olduğu için meydana gelen bu ısı yapıya dağılmaz. Bu durumdan kaynaklı ısı gerilimler oluşur ve aşınmaya sebep olur. Bir diğer seramik aşınma mekanizması ise plastik akıştır ve kayma yüzeylerinde oluşmaktadır [10]. Hızlı bir şekilde soğutulan seramik malzemelerde, yapıda büyük oranda çekme gerilmeleri meydana gelir ve sonucunda çatlaklar oluşabilir. Büyük parçaların yüzeyden kopmasıyla aşınmada artış olur [22].

Enerji koruma sistemlerinin verimliliğini artırmak için, yüksek verimli enerji üreten bileşenler kullanılmalıdır. Islak buhar türbin sistemleri enerji tasarrufu sağlamak için kullanılır. Türbin kanatları ve bileşenleri ıslak bir buhar ortamında su damlacıklarının çarpmasıyla erozyon hasarına maruz kalır. Erozyon hasarının malzemelerde doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve enerji üretim sistemlerinin bakımı için yüksek erozyon direncine sahip malzemelerin seçilmesi çok önemlidir. Seramik malzemelerin erozyon dirençleri metalik malzemelere oranla daha fazladır ve bu da seramik malzemeleri enerji üretim sistemlerinde aşınmaya maruz kalan bileşenlerinde iyi bir aday haline getirmiştir. Enerji direnci yüksek seramik kaplama malzemeleri son

zamanlarda fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve yüksek hızlı oksijen yakıtlı (HVOF) püskürtme yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir [96].

Katı partikül erozyonunda, malzemenin kopma hızını partikül çarpma açısı etkilemektedir. Metal malzemeler için, 20° - 40° partikül çarpa açılarında maksimum erozif aşınma gözlenirken, seramik malzemelerde erozyon aşınma hızı 90°'ye yaklaştığı zaman artar. Erozyon mekanizmaları için seramik ve aşındırıcı ortamın bağlı sertliği de önemlidir. Aşındırıcının sertliği seramik malzemenin sertliğinden fazla olduğu zaman, kırılma tokluğu ve mikro yapı erozyon hızında önemli bir hale gelmektedir. Tane boyutunun küçültülmesi ve gözenek miktarının azaltılması erozyon hızını minimize edebilir. Tablo 4.2.'de aşınma uygulamalarında kullanılan ticari seramik malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir [22].

Tablo 4.2. Aşınma uygulamalarında kullanılan ticari seramik malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri [22].

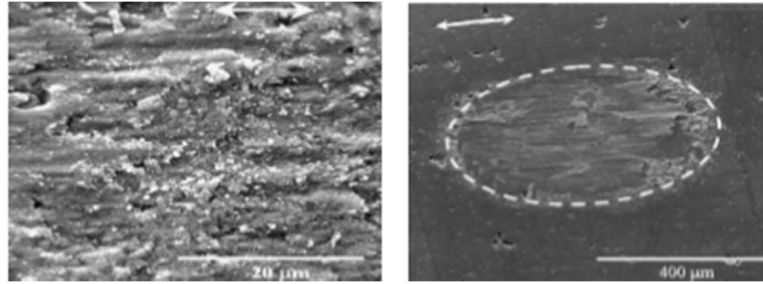
Özellik	Al ₂ O ₃	SiC	Si ₃ Ni ₄	PZS	SiALON	TiC	WC/Co	Pyrex
Yoğunluk (g/cm ³)	3,9	3,1	3,3	5,8	3,2	4,9	3	2,5
Sertlik HV (kg/mm ²)	1500	2700	1300	1600	1780	3000	1500	-
Elastisite Modülü GPa	370	410	276	20	290	430	552	70
Çekme Mukavemeti MPa	262	100	524	700	450	896	896	-
Basma Mukavemeti MPa	2600	-	-	1850	3500	-	-	-
Eğme Mukavemeti MPa	380	550	660	690	-	250	250	69
Kırılma Tokluğu	-	4,6	4,5	9,5	7,7	-	-	-
Poisson Oranı	0,26	0,19	0,24	0,23	-	0,19	-	0,2
Erime Noktası °C	2015	2700	1900	2700	-	-	-	-

Seramik malzemelerde, sertlik, termal iletkenlik, kırılma tokluğu, korozyon direnci, porozite gibi temel faktörler aşınmayı etkiler [22].

Cam-seramik malzemelerin de seramik malzemelere benzer bir şekilde aşınma özellikleri vardır. Cam-seramik yapıda kullanılan cam veya hammaddelerin kimyasal bileşimi, kristalizasyon süresi ve sıcaklığı parametreleri aşınmanın sonuçlarını etkiler. Cam-seramik malzemeler üzerinde aşınma ilgili araştırmalar yapılmaktadır [10].

İmplant malzeme üretiminde, biyouyumlulukları ve üstün aşınma davranışlarından dolayı cam-seramikler tercih edilmektedir. Diş implantları bu uygulamaların başında gelir. Ağız, mekanik ve korozyon aşınma etkilerinin çok fazla olduğu bir ortamdır. Bunun için cam-seramiklerin dental alanda kullanımı ile ilgili aşınmaya yönelik yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar, cam-seramiklerin diş implant malzemesi olarak kullanılabilirliğini ortaya koymuştur [10].

Cam-seramik malzemelerin üzerinde çalışılan bir diğer konu ise yorulma ile ilgili aşınma özellikleridir. Bu konu üzerine yapılan bir çalışmada $K_2O-B_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-MgO-F$ cam seramik sisteminde yorulma aşınması özellikleri incelenmiştir. 10 mm çapındaki çelik bilyeler ile bu test yapılmıştır. Çevrim sayısındaki artışa bağlı olarak aşınma hızları artmıştır. Aşınma yüzeylerinin SEM ve EDS analizlerinde malzeme transferinin olduğu gözlemlenmiştir. SEM mikroyapılarında tanelerin yerlerinden ayrılma etkisi görülmüş ve çevrim sayısındaki artış ile de sürtünme yüzeylerinde deformasyon miktarında değişim gözlenmiştir. Eliptik yorulma izleri yüzeyde dikkat çekerken adhezif aşınmaya benzer bir yapı görülmüştür. Şekil 4.22.'de cam-seramik bünyedeki yorulma aşınması izlerinin SEM yapıları verilmiştir [10].



Şekil 4.22. Cam-seramik bünyedeki yorulma aşınması izlerinin SEM yapıları [10].

Volkanik kayaç bazalttan cam-seramik malzemeler üretilmekte ve hatta ticari olarak kullanılmaktadır. Döküm yöntemi ile şekillendirilen bazaltın ısı ile cam-seramiğe dönüştürülmesi ile plaka ve boru şeklinde ürünler yapılmaktadır. Bazaltın camdan cam-seramiğe dönüşümüyle oluşan kristallerden dolayı aşınma dirençleri arttığı için bu tür uygulamalarda kullanılabilir. Yapılan bir araştırmada cam-seramik malzemeler, bilyeler ile aşınma testine tabi tutulmuştur. Cam ve cam-seramik durumlarındaki aşınma hızları tespit edilmiş ve arasındaki farkın 150 kata

yaklaştığı tespit edilmiştir. Yine yapılan bu çalışmada kristalizasyon sıcaklığı ile aşınma hızının ilişkisi incelenmiş ve genellikle ısıtıl işlem sıcaklığın artması ile aşınma hızının azaldığı görülmüştür. Isıl işlem sıcaklığının cam-seramiklerde aşınma hızında etkin bir parametre olduğu bu durum ile kanıtlanmaktadır [10].



BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Giriş

Aşınma, birbiriyle temas halinde bulunan malzemelerin mekanik etki sonucunda yüzeylerinden malzeme kaybı şeklinde tanımlanırken, bu durum bütün endüstri kollarında gizli bir tehlike olarak karşılaşılmaktadır. Zamanında ve sistematik bir önlem alınmaması durumunda yüksek maliyet kayıplarına sebebiyet vermektedir. Bunun için, aşınmaya maruz kalacak malzemelerin seçiminde uzun ömürlü, yüksek aşınma dirençli ve aynı zamanda uygun maliyetlerde malzeme olmasına dikkat edilmelidir.

Cam-seramikler malzemelerin, metal ve diğer malzemelere nazaran aşınma ve korozyon dayanımı yüksektir. Tokluk ve darbe dirençlerinin cama göre üstün oluşu nedeniyle mutfak malzemesinden yer döşemesi gibi geleneksel kullanım alanlarının yanı sıra, ileri teknoloji malzemeleri arasında da oldukça yaygın kullanım alanına sahiptir. Cam-seramik malzemeler, yüksek aşınma direnci, nemden etkilenmemesi, asitlere karşı dayanıklılığı ve yüzeylerinin düz oluşu nedeni ile atmosferik ve sıcak işlem uygulamalarında farklı boyut ve çeşitlerdeki malzeme naklinde de iyi bir akış sağlamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, termik santraller, çimento ve cam sanayi gibi çeşitli sanayi kollarında kullanılan, bunkerler, spiral oluklar, kömür tozu kanalları, siklonlar, dirsekler, borular, silolar, su kanalları gibi uygulama alanları olan bazalt cam-seramiklerinin katı partikül erozif aşınma özellikleri incelenmiştir. Deneylerde kullanılan cam-seramik malzemeler Almanya'da faaliyet gösteren Kalenborn firması tarafından üretilmiş olup Türkiye temsilcisi Mataş aracılığı ile temin edilmiştir. Bazalt cam-seramikleri kullanıldığı uygulamalarda yoğun bir şekilde erozif aşınmaya

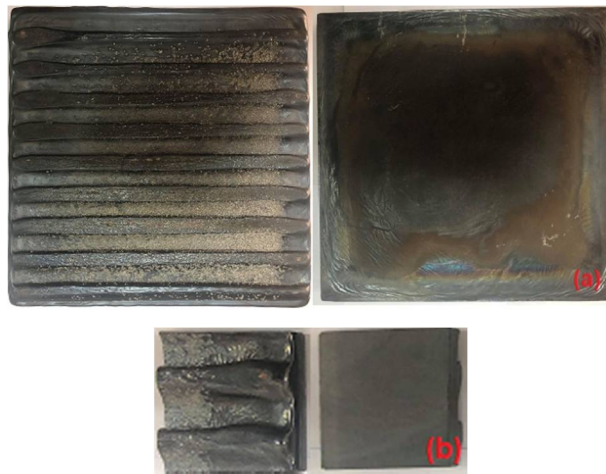
maruz kalmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında da bazalt cam-seramiklerinin erozif aşınma özellikleri farklı aşındırıcılar, farklı partikül hızları ve değişik partikül çarpma açılarında testlere tabi tutularak detaylı olarak irdelenmiştir.

5.2. Malzemeler

5.2.1. Hedef Malzeme

Deneyisel çalışmalarda hedef malzeme olarak bazalt cam-seramikleri kullanılmıştır. Bazalt cam-seramikleri ticari ürün olarak temin edilmiştir. Ticari ürün boyutu 200 x 200 x 30 mm olan bazalt cam seramikleri, laboratuvar ölçekli hedef malzeme (aşındırma işlemine tabi tutulacak malzeme) olacak şekilde seramik kesiciler yardımıyla kesilmiştir. Tablo 5.1.'de ergitilmiş bazaltın kompozisyonu ve fiziksel özellikleri verilirken Şekil 5.3.'de deneyisel ölçekli malzemenin boyutları ifade edilmektedir.

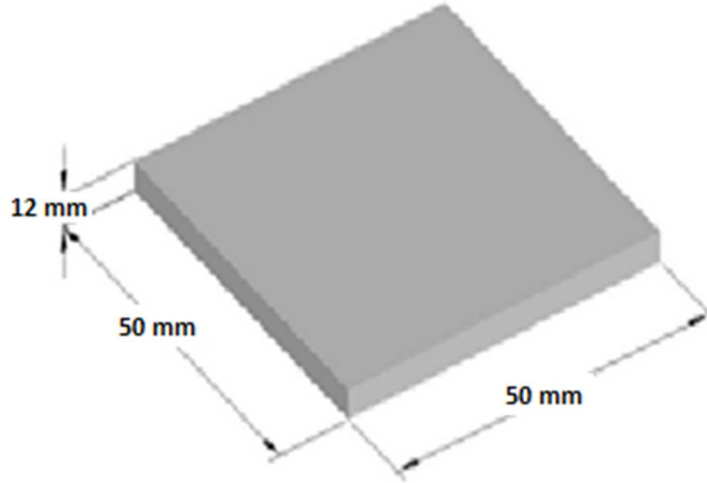
Temin edilen bazalt cam-seramik plakaları 200 x 200 x 30 mm ölçülerindedir. Bu ölçülerdeki plakalar seramik kesiciler ile kesilerek 50 x 50 x 12 mm ölçülerinde deney numunesi boyutlarına indirilmiştir. Şekil 5.2.'de bazalt cam-seramiklerinin ticari boyutları ve deney numunesi boyutlarına indirildikten sonraki makro görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5.1. Bazalt cam-seramiğin (a) Ticari ürün boyutu, (b) deney numunesi boyutu ön ve arka yüzünün makro görüntüleri.

Tablo.5.1. Ticari bazalt cam-seramiğin bileşimi ve fiziksel özellikleri [97].

Ergitilmiş bazaltın kompozisyonu		Ergitilmiş bazaltın fiziksel özellikleri		
Kimyasal Formül	%	Özellikler	Değer	Birim
SiO ₂	43,0 – 47,5	Yoğunluk	2,9 – 3,0	gr/cm ³
Al ₂ O ₃	11,0 – 13,5	Porozite	0 – 3	%
Fe ₂ O ₃ -FeO	11,0 – 15,0	Sertlik	8	MOHS
CaO	10,0 – 12,5	Basma direnci	300 – 450	N/mm ²
MgO	9,5 – 12,5	Eğilme mukavemeti	45	N/mm ²
K ₂ O	0,5 – 2,0	Uzama katsayısı (0 – 100°C)	8.10 ⁻⁶	1 / K
Na ₂ O	1,5 – 3,5	Isıl iletkenlik	1,1 – 1,16	W / Mk
TiO ₂	1,0 – 3,5	Max. uygulama sıcaklığı sınırı	350	°C
Diğer (MnO ve P ₂ O ₅)	0,5 – 1,5	Aşınma direnci	5	cm ³ / 50 cm ²
		Özgül ısı kapasitesi	0,8	Kj (Kg x K)
		Özgül indüksiyon kapasitesi	7	MHz



Şekil 5.2. Deneylerde kullanılan bazalt cam-seramik numunelerin boyutları.

Endüstride kullanılan malzemeler, bunker, silo ve tankların içerisinde yığın halde depolanır. Malzeme nakliyatı esnasında yüzeyde aşınma meydana gelir. Malzemelerin bunker, silo ve tanklara doldurulması esnasında iç yüzeylerde darbe oluşurken, boşaltılması sırasında ise sürtünme oluşur ve aşınmaya sebebiyet verir. Bunun sonucunda, depolama alanlarının iç yüzeyleri zamanla kullanılmaz hale gelirler. Bu kısımlar, hegzagonal veya dikdörtgen biçimindeki bazalt plakalar ile kaplanarak ömürleri uzatılır. Hekzagonal ve dikdörtgen biçimindeki plakalar kullanılmasının sebebi, bunker ve silolar dairesel kesitleri korunmuş olmasıdır.

Bazalt plakalar, yüksek mukavemeti, termal kararlılığı, iyi aşınma direncinden dolayı, topaklanmayı önleyici düzgün yüzeyi boru, dirsek ya da plaka şeklinde hidrolik ve pnömatik sistemlerde, siklon ve seperatörlerde, kanallı ve zincir taşıyıcılarda, bunker, silolarda, mikserlerde ve tanklarda kullanılmaktadır [10,98,99].

5.2.2. Aşındırıcı malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere üç farklı tipte ve iki farklı tane boyutunda aşındırma partikülleri kullanılmıştır. Kullanılan aşındırıcı partiküller Saykar Metalurji ve Yüzey İşlem Ürünleri San. Tic. Ltd. Şti (garnet ve silisyum karbür) ve Eczacıbaşı Topluluğu'nun seramik fabrikalarına hammadde temini amacıyla kurulmuş olan ESAN firmasından (sodyum feldspat) temin edilmiştir. Aşındırıcı tozlar öğütülmüş (ESF 501 SG, - 63 μm) ve flote (ESF 501 GG, - 300 μm) sodyum feldspat, garnet C (30-60 mesh, 200-600 μm) ve garnet E (120 mesh, 180-250 μm) ile silisyum karbür SiC F 36 (425 - 600 μm) ve SiC F 180 (53 - 90 μm) şeklinde seçilmiştir.

5.2.2.1. Sodyum feldspat

Magmatik kütlelerin en önemli minerallerinden birisi feldspatlardır. Feldspat bileşimleri alüminyum silikat ile potasyum, sodyum, kalsiyum içermektedir. Feldspatların bütün bileşimlerinde alüminyum bulunurken, potasyum, sodyum ve kalsiyum içermektedir. Feldspatlar yüksek sıcaklıklarda ve çeşitli derinliklerde oluşabilmektedirler [100].

Feldspat grubunun mineralleri, bileşimindeki Na, K veya Ca'a bağlı olarak, Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), ortoklaz (KAlSi_3O_8) ve anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) olmak üzere en önemli üç farklı mineralleridir [101]. Saf potasyum feldspatın (ortoklaz) erime sıcaklığı 1170 °C, sodyum feldspatın (albit) ise 1120 °C'dir. Ancak ortoklasın tam erime sıcaklığı yaklaşık 1280 °C dolayına ulaşmaktadır [38]. Tablo 5.2.'de Na-Feldspat (Albit)'in fiziksel özellikleri verilmiştir [100,102].

Tablo 5.2. Na-Feldspat (Albit)'in fiziksel özellikleri [100,102].

Mineral Adı	Albit			
Kimyasal Formülü	NaAlSi ₃ O ₈			
Yoğunluk (20°C) g/cm³	2,62			
Sertlik	6-6,5			
Kristal sistemi	Triklinik, yassı masif taneli			
Kafes sabitesi	a	α	8,14	94°19'
	b (Å)	β	12,79	116°34'
	c	γ	7,16	87°39'
Kırılma indisi	n_a		1,528	
	n_{β}		1,532	
	n_{γ}		1,538	
Renk, parlaklık	Renksiz, beyaz, saydam, yarısaydam, camı, inci			
Oluşum	Asit ve ortaç magmasal kayalar; pegmatitler, albitler, albitize granit, alkalın kayalar, gnays, kristalize sist, andezit, siyenit			

Deneysel çalışmalarda kullanılan sodyum feldspat, Eczacıbaşı Topluluğu'nun seramik fabrikalarına hammadde temini amacıyla kurulmuş ESAN firmasından öğütülmüş (ESF 501 SG) ve flote (ESF 501 GG) şekli ile temin edilmiştir. Öğütülmüş Na-Feldspatın tane boyutu 63 μm 'nin altında ($-63 \mu\text{m}$), flaote Na-Feldspatın tane boyutu ise 300 μm 'nin altındadır ($-300 \mu\text{m}$). Öğütülmüş (ESF 501 SG) ve flote (ESF 501 GG) Na-feldspat mineralinin kimyasal bileşimi Tablo 5.3.'de verilmektedir.

Tablo 5.3. Öğütülmüş (ESF 501 SG) ve flote (ESF 501 GG) Na-feldspat mineralinin kimyasal bileşimi [103,104].

Kimyasal Analiz (%)	ESF 501 SG	ESF 501 GG
SiO₂	70,00 $\pm$ 1,00	70,00 $\pm$ 1,00
Al₂O₃	18,00 $\pm$ 1,00	18,5 $\pm$ 1,00
Na₂O	10,00 $\pm$ 0,50	10,50 $\pm$ 0,50
CaO	0,70 $\pm$ 0,30	0,70 $\pm$ 0,30
K₂O	0,40 $\pm$ 0,20	0,30 $\pm$ 0,10
MgO	0,20 $\pm$ 0,10	0,20 $\pm$ 0,10
TiO₂	0,30 $\pm$ 0,02	0,04 $\pm$ 0,01
Fe₂O₃	0,10 $\pm$ 0,02	0,02 $\pm$ 0,01
LOI	0,40 $\pm$ 0,20	0,30 $\pm$ 0,20

ESAN firmasından temin edilen flote (ESF 501 GG) Na-feldspat % 8 oranında nem ihtiva etmektedir. Bu nem değerinin erozif aşınma esnasında aşındırıcı partiküllerin toz akışına etki edeceği düşünülmüştür. Bunun içinde flote Na-Feldspat, Sakarya Üniversitesi laboratuvarında bulunan etüvde 105 °C’de tamamen nemi uzaklaştırılana kadar bekletilmiştir.

5.2.2.2. Garnet

Garnet minerali silikatlar gurubu minerallerindendir. Doğada % 98 oranında saf halde bulunan garnet kayalarından öğütülerek elde edilir. Sertliği elmas ve oksit sınıfı koruntadan sonra gelen mineraldir. Sertlikleri 7,5 - 8,5 arasındadır. Deneysel çalışmalarda ikinci bir partikül türü olarak silikat grubu minerallerinden garnet seçilmiştir. Garnet mineralleri Saykar Metalurji ve Yüzey İşlem Ürünleri San. Tic. Ltd. Şti’nden temin edilmiştir ve iki farklı tane boyut dağılımında olacak şekilde tercih edilmiştir. Erozif aşınma testlerinde kullanılan garnet C (30-60 mesh) 200-600 µm, garnet E (120 mesh) 180-250 µm tane boyut aralığına sahiptir. Temin edilen firmadan alınan ürünlerin fiziksel özellikleri Tablo 5.4.’de ve kimyasal özellikleri ile mineralojik yapısı Tablo 5.5.’de verilmiştir [105].

Tablo 5.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan garnet minerallerinin fiziksel özellikleri [105].

Özgül Ağırlığı	4,1 g/cm ³
Ortalama Dökme Yoğunluğu	2,4 g/cm ³
Sertliği	>8 (mohs skalası)
Kristal Sistemi	Kübik
Kırılması	Yarı-concoidal (midye kabuğu şekli)
Dayanıklılığı	Yüksek
Aside Duyarlılığı	Yoktur
Nem Çekme Özelliği	Nem çekmez (higroskopik değildir)
Magnetiklik Özelliği	Çok hafif magnetikdir
Serbet Silika İçeriği	Yoktur

Tablo 5.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan garnet mineralinin kimyasal özellikleri ve minerolojik yapısı [105].

Garnet Mineralinin Kimyasal Özellikleri	
Al ₂ O ₃	% 21
Fe ₂ O ₃	% 31
SiO ₂	% 35
MgO	% 8
CaO	% 1,5
TiO ₂	% 1
P ₂ O ₅	% 0,05
MnO	% 0,5
ZrO ₂	Eser Miktarda
Garnet Mineralinin Minerolojik Yapısı	
Garnet (Almandine)	% 97-98
İlmenite	% 1-2
Kuartz	% 0,5
Diğer	% 0,5

5.2.2.3. Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbürün SiC kimyasal formülü ile ifade edilir. Silisyum karbürün çok sayıda (yaklaşık 200) tipi bulunmaktadır, fakat birkaçı yaygındır. Bütün yapılar arasındaki farklar, tetrahedra katmanlarının dizilimlerinden meydana gelmektedir. Silisyum karbür doğada direk olarak rastlanmaz iken, bileşenleri olan silisyum ve karbon bol miktarda bulunmaktadır. Saf α /hegzogonal SiC renksiz, β /kübik sarı, azot veya fosfor daldırılmış yeşil, alüminyum daldırılmış mavi, bor daldırılmış kahverengi ve yoğun bir şekilde alüminyum daldırılmış SiC ise siyah olarak sentezlenmektedir [106,107]. Endüstride, iki çeşit silisyum karbür bulunmaktadır. Yeşil Silisyum Karbür özellikle sert ve çok kırılğan bir aşındırıcıdır. Sertliği yaklaşık 9,5 mohs' dur. Çarpma ve darbelere karşı duyarlıdır. Başlıca sert metal ve seramik gibi malzemelerin, cam ve aside dayanıklı östenitik içyapılı çeliklerin işlenmesinde kullanılır. Siyah Silisyum Karbür çok sert fakat yeşil Silisyum Karbüre nazaran daha az kırılğandır. Silisyum Karbür, düşük çekme mukavemetine sahip metal ve metal dışı malzemeler ile gri döküm, küresel grafitli döküm, soğuk dökme demir, prinç, bronz, alüminyum, organik mineraller ve seramik malzemelerin işlenmesinde kullanılır. Yüksek mekanik mukavemet, yüksek oksitlenme direnci ve termal şok

direnci gibi özelliklere sahip silisyum karbür bazlı malzemeler, pişirilme fırınlarında kullanılan refrakterler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Balistik zırh plakalar, aşınmaya dirençli nozul, döküm filtresi, döküm potası ve seramik fırın malzemelerinde silisyum karbür bazlı malzemeler kullanılmaktadır [108]. Silisyum karbür (α -SiC ve β -SiC) ait özellikler Tablo 5.6.'de verilmiştir [109].

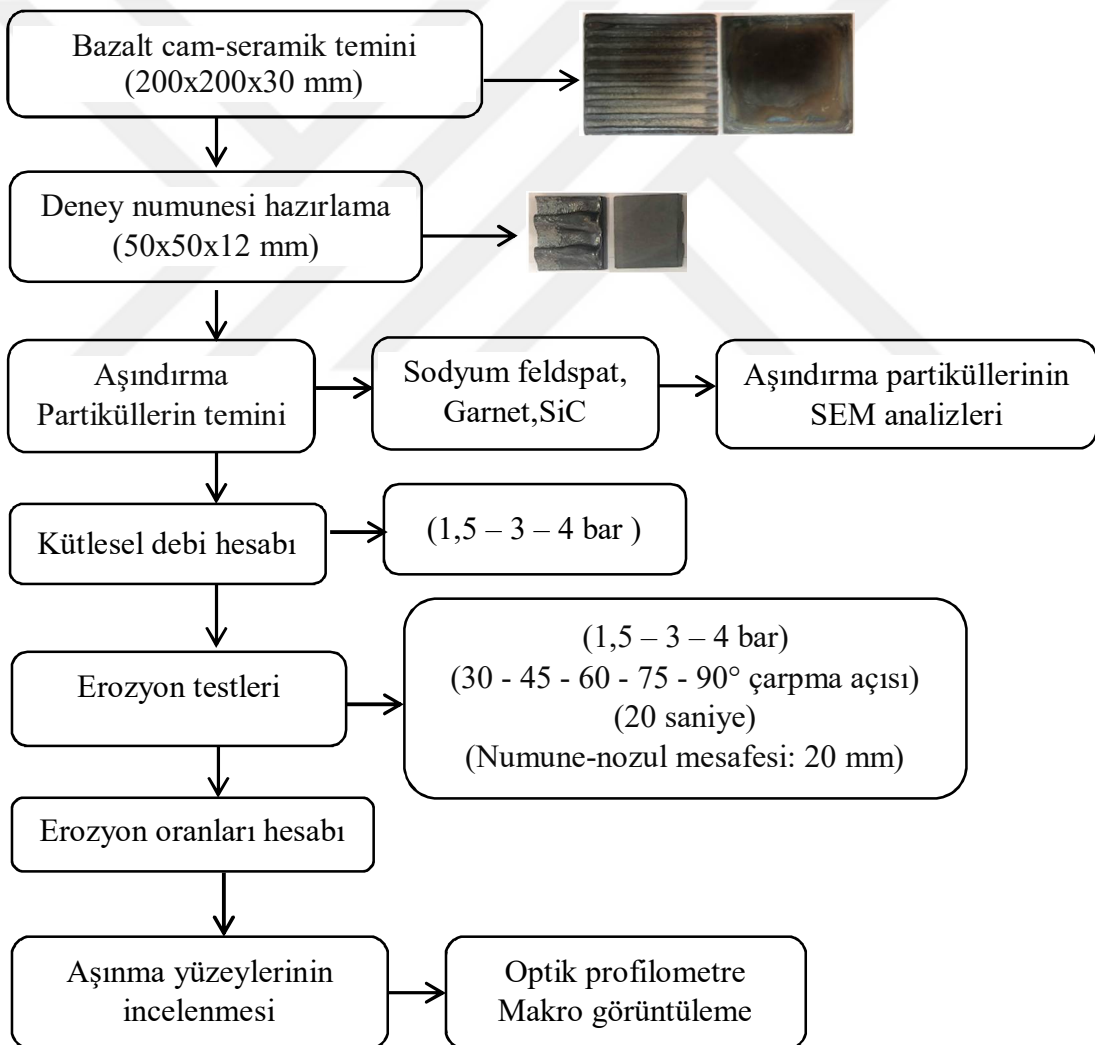
Tablo 5.6. Silisyum karbürün (α -SiC ve β -SiC) özellikleri [109].

Molekül Ağırlığı (g/mol)	40,09
Renk	Saf ise sarıya yakın yeşil (Bor, azot veya alüminyum katkısı renkte değişikliğe sebep olabilmektedir.
Yoğunluğu (g/cm ³)	α -SiC(6H) : 3,211 β -SiC : 3,214
Ergime Sıcaklığı	~2545 °C'de dekompoze olur (1atm'de)
Spesifik Isı (J/mol.K)	α -SiC : 27,69 β -SiC : 28,63
Oluşum Isısı (-ΔH)(kJ/mol.K)	α -SiC : 25,73±0,63 β -SiC : 28,03±2
Isıl İletkenlik (W/m.°C)	α -SiC : 41,0 β -SiC : 25,5
Isıl Genleşme (10-6/°C)	α -SiC : 5,12 β -SiC : 3,8
Elektriksel Direnç (Ω.cm)	α -SiC : 0,0015-103 β -SiC : 10-2-106
Dielektrik Sabiti (300K'de)	α -SiC(6H) : 9,66-10,03 β -SiC : 9,72
Vickers Sertliği (GPa)	24,5-28,2
Elastisite Modülü (GPa)	441-475
Kayma Modülü (GPa)	192
Hacim (Bulk) Modülü	96,6
Poisson Oranı	0,142
Kırılma Mukavemeti (MPa)	350-600
Oksidayson Dayanımı	SiO ₂ tabakası oluşumuna karşı mükemmel dayanıma sahip
Kimyasal Dayanımı	Oda sıcaklığında inerttir

Deneyisel çalışmalarda bir diğ er aşındırıcı partikül türü olarak silisyum karbür seçilmiştir. Silisyum karbür Saykar Metalurji ve Yüzey İşlem   r  nleri San. Tic. Ltd. şti'nden temin edilmiştir ve iki farklı tane boyut dağılımında olacak şekilde tercih edilmiştir. Eroziyon aşınma testlerinde kullanılan Silisyum Karbür SiC F 36 (425-600 μm) ve SiC F 180 (53-90 μm) tane boyut aralığına sahiptir.

5.3. Deney Programı ve Yöntem

Bazalt cam-seramiklerine uygulanan işlem basamakları ve deneyisel çalışmalar akım şeması şekil 5.3.'de gösterilmiştir.



şekil 5.3. Deneyisel  alışma işlem basamakları.

Deneysel çalışmalarda üç farklı aşındırıcı partikül kullanılmıştır. Aşındırma partiküllerine, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile tane boyut ve mikroyapı analizleri yapılmıştır. Ayrıca, belirlenen deney parametrelerine göre kütleli debileri hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler Tablo 5.7.'de verilmiştir.

Tablo 5.7. Katı partikül erozif aşınma deneylerinde kullanılan parametreler.

Aşındırma Partiküllerinin Türü	Sodyum Feldspat Garnet Silisyum Karbür
Aşındırma Partikül Boyutları	Sodyum Feldspat Öğütülmüş ESF 501 SG (-63 µm) Flote ESF 501 GG (-300 µm) Garnet C 30-60 mesh (200-600 µm) E 120 mesh (180-250 µm) Silisyum Karbür F 36 (425-600 µm) F 180 (53-90 µm)
Partikül Püskürtme Basıncı	1,5 – 3 – 4 bar
Partikül Çarpma Açısı	30 - 45 - 60 - 75 - 90°
Partikül Püskürtme Süresi	20 saniye
Nozul İç Çapı	7,8 mm
Numune – Nozul Arasındaki Mesafe	20 mm
Deneysel Test Sıcaklığı	Oda Sıcaklığı (25 °C)

5.3.1. Erozif Aşınma Deneyleri

Bazalt cam-seramik numuneleri, Sakarya üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan özel olarak tasarlanan erozif aşınma test düzeneğinde katı partikül erozyonuna tabi tutulmuştur. Aşındırılmış numunelerin erozyon oranları hesaplanmış ve bazalt cam-seramiklerinin yüzeyinde oluşan aşınma izleri incelenmiştir. Aşınma izleri hakkında makro görüntülerden ve optik profilometre yardımıyla bilgi edinilmiştir.

5.3.1.1. Katı partikül erozif aşınma test ünitesi

Erozif aşınma test ünitesi basınçlı hava kompresörü ve basınçlı hava tankı, püskürtme kabini ve aşınma esnasında tozların toplandığı toz toplayıcı kısımlarından oluşmaktadır. Eroziyon aşınma test ünitesi üç kısım olarak Şekil 5.4.'de görülmektedir.



Şekil 5.4. Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan eroziyon aşınma test ünitesi.

Aşınma test ünitesi üç kısımdan oluşmaktadır ve bu üç kısım incelenecek olursa;

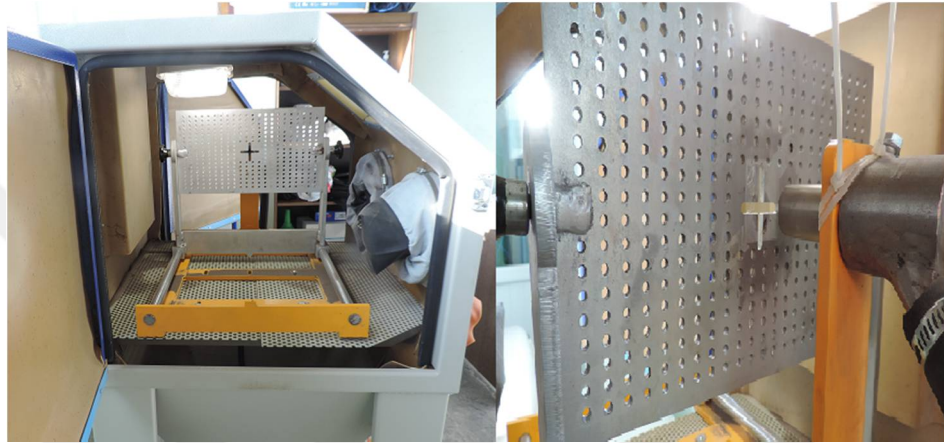
1.Kısım; basınçlı hava kompresörü ve basınçlı hava tankı

Basınçlı hava kompresörü, atmosferik basıncıdaki havayı sıkıştırarak daha yüksek basınçlara ulaşmasını sağlamaktadır. Bir filtre üzerinden emilen hava kompresör içinde küçük bir hacme hapsedilir ve belirli oranlarda sıkıştırılır. Sıkıştırma oranına bağlı olarak basınç yükselir. Aşındırma partiküllerin bulunduğu kap içerisinden püskürtme kabine hareketini sağlamaktadır.

2.Kısım; püskürtme kabini

Bu kısımda, ayarlanabilir numune fikstürü, tozun numune üzerine püskürtüldüğü nozul ve alt kısımda artık aşındırma partiküllerin ve aşınma parçalarının depolandığı alan bulunmaktadır. Ayarlanabilir numune fikstürü, açısal hareket ve yatay hareket

yapabilmektedir. Açısal hareket, tozun numune yüzeyine çarpma açısını, yatay hareket ise, numune nozul arasındaki mesafeyi ayarlamaktadır. Püskürtme nozul çapı 7,8 mm'dir. Püskürtme kabini içerisine sabitlenmiş nozul, numunenin 15'er derece ile döndürülmesine olanak veren fikstürün hareketi ile numune üzerine istenilen açılarda aşındırma partikülleri püskürtülebilmektedir [88]. Şekil 5.5.'de erozif aşınma test ünitesinin püskürtme kabini içerisinde bulunan ayarlanabilir numune fikstürü ve püskürtme nozulu görülmektedir.



Şekil 5.5. Püskürtme kabini içerisindeki ayarlanabilir numune fikstürü ve püskürtme nozulu.

3.Kısım; aşındırıcı toz toplayıcı

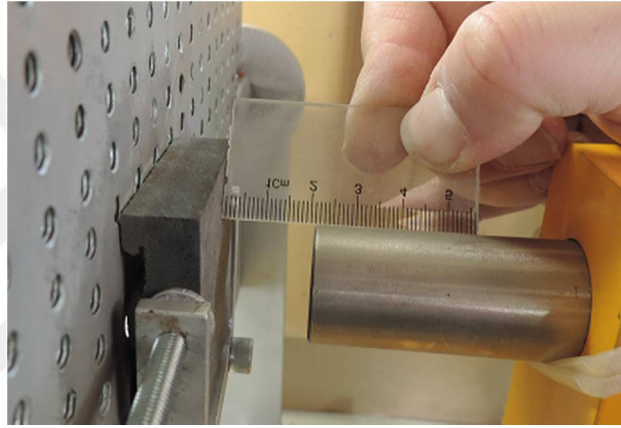
Bu kısımda, elektrik motoru sayesinde erozif aşınma esnasında uçucu tozların toz haznesinde toplanması sağlanmaktadır.

Püskürtme tabancası püskürtme kabini içerisine sabitlenmiştir ve kabin dışarısından bir pedal vasıtasıyla kontrol edilebilmektedir. Püskürtme basıncı da kabin dışarısına yerleştirilen bir basınç regülatörü ile ayarlanabilmektedir [88].

5.3.1.2. Katı partikül erozif aşınma deneyleri

Erozif aşınma test ünitesinde aşındırıcı haznesine aşındırıcı partikül ilave edilmiştir. Aşındırıcı partiküller, sodyum feldspat, garnet ve silisyum karbürdür. Her bir aşındırıcı partikül için iki farklı tane boyut dağılımı tercih edilmiştir. Bazalt cam-seramik numuneler ilk tartımları alındıktan sonra erozif aşınma test cihazında numune

fikstürü üzerine sabitlenmektedir. Numune ile nozul arasında 20 mm'lik bir mesafe olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 5.6.'da numune-nozul arasındaki mesafe görülmektedir. Eroziyon aşınma test cihazı üzerinde bulunan basınç ayar göstergesinden basınç ayarlanır. Deneysel çalışmalarda, aşındırıcı partiküller 1,5 – 3 ve 4 bar basınçlarında hızlandırılmıştır. Numune fikstürü 30 – 45 – 60 – 75 ve 90° açılarında numune partikül çarpma açısı ayarlanmıştır. Numune üzerine aşındırıcı püskürtme süresi 20 saniye olarak ayarlanmıştır. Bu süre sonunda numune fikstüründeki aşınmış bazalt cam-seramik numunesi alınmış ve ikinci tartımı yapılmıştır. İlk tartımdan ikinci tartım çıkarılarak aşındırılmış bazalt cam-seramik numunesinin kütle kaybı hesaplanmıştır. Kütle kaybı erozyon oranı hesabında kullanılmıştır.



Şekil 5.6. Numune fikstürü içerisinde, numune-nozul mesafesi 20 mm ve 90° açı ile sabitlenmiş numune.

Erozyon oranlarının hesaplamaları şu şekilde yapılmıştır;

Erozyon oranı, katı partikül eroziyon aşınma sonrasındaki kütle kaybı, bu kayba neden olan toplam aşındırıcı partiküllerin kütlelerine oranı olarak tanımlanmaktadır. Püskürtme basıncına bağlı olarak aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri değişmektedir. Farklı basınçlarda farklı aşındırıcı partiküller ile aşındırılan numune yüzeyine çarpan partikül sayısı değişebilir. Aşındırılan numunelerde meydana gelen kütle kaybının kullanılması malzemelerin erozyon davranışlarının karşılaştırılmasında doğru bir yöntem değildir. Malzemelerde erozyona sebebiyet veren erozyon miktarları aşındırıcı partiküllerin külesinden bağımsız olarak hesaplanması gerekmektedir. Malzemelerin erozyon davranışı, birim aşındırıcının gerçekleştirdiği erozyon miktarı hesaplanmalıdır. Bu durumda değişen parametreler ile malzemelerde meydana gelen erozyon karşılaştırılabilir. Bu sebeplerden dolayı

deneysel sonuçlar denklem (5.1)'de ifade edilen formül ile erozyon oranı olarak ifade edilmektedir [88,110].

$$E = \frac{\Delta m_s}{m_e} \quad (5.1)$$

E : Erozyon oranı

Δm_s : Numunenin kütle kaybı

m_e : Aşındırıcı kütlesi'dir.

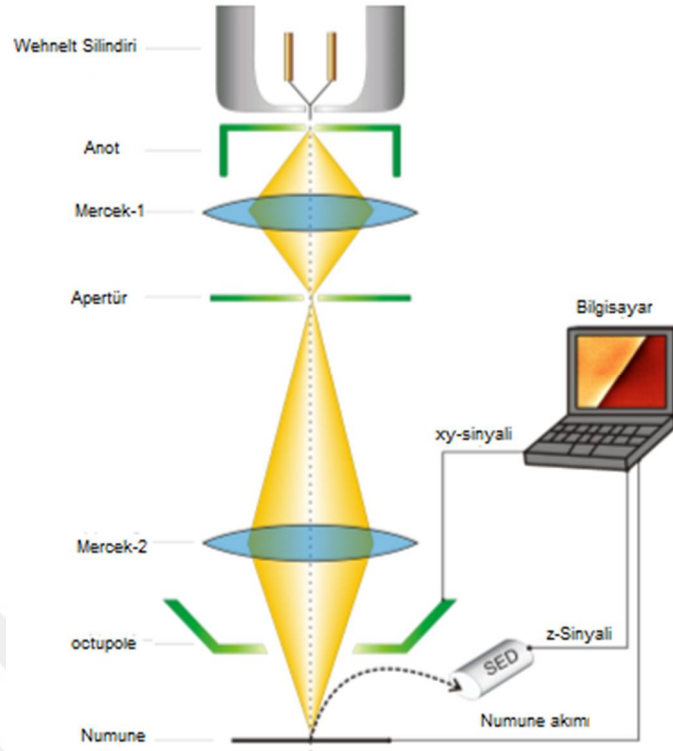
Erozyon oranları, partikül tane boyutuna, partikül çarpma açısına ve partikül püskürtme basıncına göre değişimleri değerlendirilmiştir.

5.4. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

5.4.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Elektron mikroskobu, ürünlerin ve hammaddelerin gözle görülemeyen kristal yapıları, minerallerin cinsi hakkında bilgi veren bir cihazdır [111]. Elektron mikroskobu 1931 yılında Ersnt Ruska ve Max Knoll tarafından geliştirilmiş olup, zamanla çeşitli değişiklikler ve eklemeler yapılarak orijinal teknik ortaya çıkmıştır. 1965 yılında ilk olarak ticari taramalı elektron mikroskop (SEM) piyasaya sürülmüş ve günümüze kadar oldukça yaygınlaşmıştır [112,113].

Taramalı elektron mikroskopunda (SEM), numune tutucusunun ve çeşitli algılayıcıların bulunduğu bölmeye numune odacığı adı verilmektedir (Şekil 5.7.). Optik kolon alttan bu odacığa açılarak demet numune etkileşimi sonucunda oluşturulan sinyaller algılayıcıya ulaştırılması sağlanmaktadır. Numune odacığı içerisinde bulunan numune kızıağı, numune tutucusunu taşımakta ve x,y,z boyutunda rahatlıkla hareket ederek, çevirme ve eğme yapabilme özelliğine sahiptir. Numune odacığının, numune yerleştirilmesinden sonra vakum ile havası alınır [113]. Topografik (görüntü) kontrast mekanizmaları, numunelerin tane boyutu, şekli, yüzey dokusu, sahip olduğu porozite, partiküllerin tane dağılımı yüksek kaliteli üç boyutlu görüntüleri ve malzemelerin homojenliği SEM analizleri ile belirlenebilir [111,114].



Şekil 5.7. Taramalı elektron mikroskobunun yapısı [112].

Wehnelt silindiri içerisinde Schottky-Emitörleri bulunur. Anot kapağı emilen elektronları 25 keV'a kadar hızlandırır. Mercek-1'den Crossover noktası olarak adlandırılan noktadan yansır. Bu nokta tam olarak apertür yüksekliğindedir ve maksimal ışın akımı yaklaşık 100 nA ile mercek-2'den geçirilir. Mercek-2 ışına, daha sonra numune yüzeyine odaklanır. Oktupol saptırma ünitesi yardımı ile numune üzerinde ışının şekli ve pozisyonu değiştirilebilir. İhtiyaç duyulan saptırma sinyali bilgisayardan tedarik edilir. Üretilen ikincil elektron ışınları ikincil detektörleri tarafından toplanır ve güçlendirilir. Bu ikincil elektron detektör sinyali bilgisayar tarafından işlenir ve resim elde edilir [112].

Bio-teknolojik numunelerin incelenmesi, metal malzemelerde yapılabilecek her türlü katkı ve faz değişiklikleri, metal-metal, iletken-yarı iletken, yarı iletken-yarı iletken tabakaların temas özellikleri, kristal yapıların temas özellikleri, faz haritaları ve renkli kompozisyon görüntüleri de SEM analizleri ile yapılabilmektedir. Malzemeler toz ya da bulk halde yüzey veya kesitten yüksek büyütme analiz edilebilir. Ayrıca cihaza entegre edilebilen Enerji dağılımlı X-ray (EDX) sistemi ile elektron mikroskobu noktasal element analizi de yapabilmektedir [10].

Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırma partikülleri, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan SEM ile görüntülenmiştir. Öğütülmüş (ESF 501 SG) ve flote (ESF 501 GG) Na-feldspat, garnet C (30-60 mesh) 200-600 μm , garnet E (120 mesh) 90-150 μm ve Silisyum Karbür SiC F 36 (425-600 μm) ve SiC F 180 (53-90 μm) Şekil 5.8.'deki SEM ile analiz edilmiştir. SEM görüntülerine göre aşındırma partiküllerinin tane boyutları ve şekilleri hakkında bilgi edinilmiş erozif aşınmaya etkileri yorumlanmıştır.



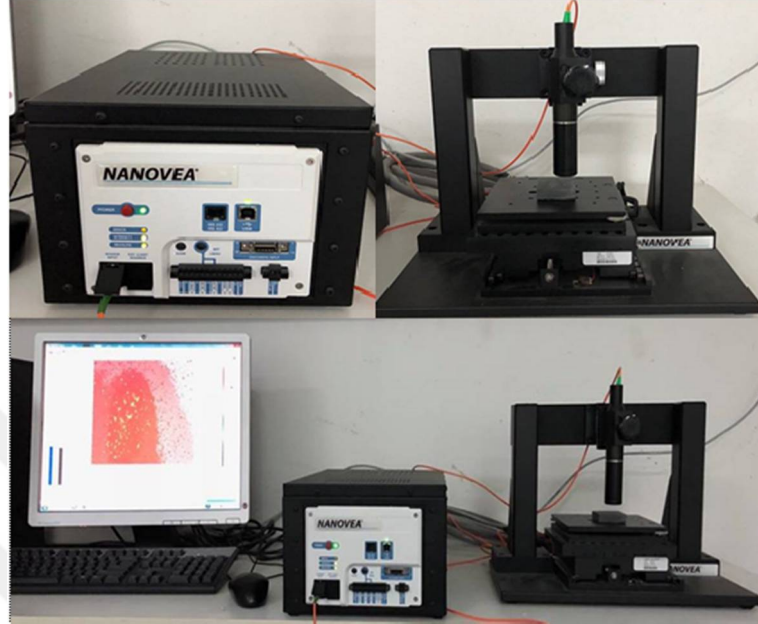
Şekil 5.8. Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan SEM cihazı.

5.4.2. Optik profilometre

Erozif aşınma testlerine tabi tutulan bazalt cam-seramik numunelerinin aşınma yüzeyi görüntü analizleri 3D optik profilometre ile yapılmıştır. Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi laboratuvarında bulunan Nanovea marka optik profilometre ile aşınma yüzey görüntüleri elde edilmiştir ve aşınma derinlikleri hakkında bilgi edinilmiştir.

Nanovea PS50 küçük ayak izi ile (30x25x27 cm) ile en geliştirilmiş mevcut kompakt profilometredir. Yüksek performanslı PS50, 50 mm X-Y ölçülerinde ideal prob ucunun geliştirilmesi ve lazer profilleri için en ideal seçimdir. Nanovea PS50

profilometresi bilgisayar bağlantısı yapılabilir ve program yardımı komut verilerek istenilen yüzey taraması yapılabilir [115].



Şekil 5.9. Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi laboratuvarında bulunan optik profilometre.

5.4.3. Aşınma yüzeylerinin makro görüntülenmesi

Aşınma deneyleri sonrasında oluşan aşınma izleri fotoğraf makinesi yardımıyla makro olarak görüntülenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan fotoğraf makinası, Nikon Coolpix p520 marka kompakt fotoğraf makinasıdır. Yapılan görüntülemeler düz bir beyaz zemin üzerinde numune yüzeyleri ekstra ışıkla desteklenerek yapılmıştır. Bazalt cam-seramiklerinin, deney parametrelerine göre yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin yüzey alanları, geometrik şekilleri ve aşınma derinlikleri hakkında bilgi edinilmiştir.

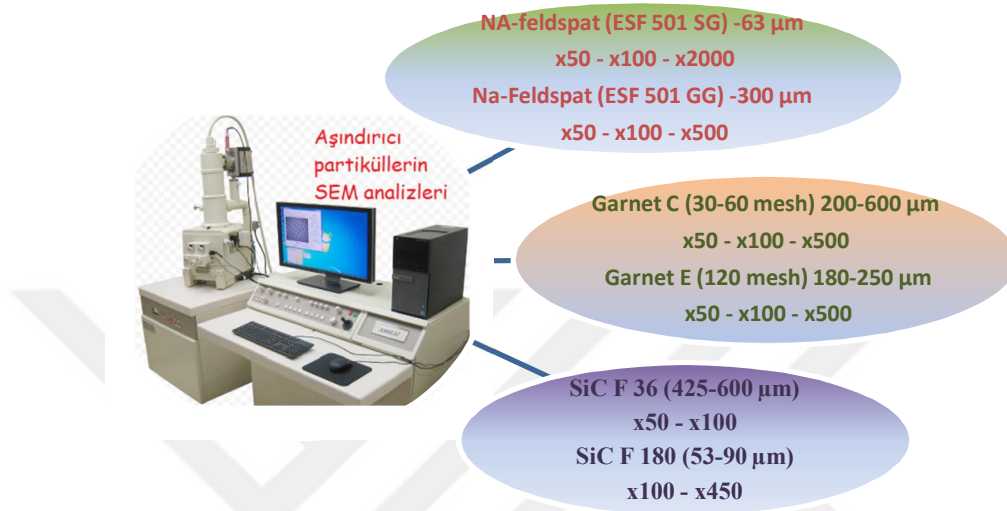
BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

6.1. Giriş

Yapılan bu doktora tezi çalışmasında, bazalt cam-seramikleri ticari ürün olarak temin edilmiştir. Temin edilen bazalt cam-seramik plakaların boyutları 200x200x30 mm ölçülerine sahiptir. Seramik kesiciler yardımı ile bu plakalar laboratuvar ölçekli deney numunesi boyutlarına (50x50x12 mm ölçülerine) getirilmiştir. Katı partikül erozif aşınma testleri için farklı özelliklerde aşındırma partikülleri temin edilmiştir. Bu partiküller, öğütülmüş (ESF 501 SG, - 63 μm) ve flote (ESF 501 GG, - 300 μm) sodyum feldspat, garnet C (30-60 mesh, 200 - 600 μm) ve garnet E (120 mesh, 180-250 μm) ile Silisyum Karbür SiC F 36 (425-600 μm) ve SiC F 180 (53-90 μm) olmak üzere üç farklı tipte ve iki farklı tane boyut dağılımında seçilmiştir. ESAN firmasından temin edilen sodyum feldspat nem ihtiva ettiği için etüvde tamamen neminden uzaklaştırılmıştır. Kullanılan aşındırma partiküllerin SEM analizleri yapılarak tane boyutu ve şekli hakkında bilgi edinilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin (her bir çeşidi (sodyum feldspat, garnet, silisyum karbür) ve tane boyut dağılımında) debileri hesaplanmıştır. Yapılan aşınma testleri sonucunda bazalt cam-seramik numunelerinde meydana gelen ağırlık kaybı ve hesaplanan kütleli debiler ile erozyon oranları hesaplanmıştır. Eroziyon aşınma deneylerinde kullanılan parametreler; partikül püskürtme basıncı 1,5 – 3 – 4 bar, partikül çarpma açıları 30 – 45 – 60 – 75 – 90°, partikül püskürtme süresi 20 saniye ve 20 mm numune – nozul arası mesafe olacak şekilde seçilmiştir. Bazalt cam-seramikleri atmosferik ortamda (25 °C’de) erozif aşınmaya maruz bırakılmıştır. Eroziyon aşınma test ünitesi üzerinde bulunan nozulün çapı 7,8 mm’dir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde bazalt cam-seramik numunelerinin yüzeylerinde oluşan aşınma izleri makro olarak görüntülenmiş ve optik profilometre ile yüzey incelemesi de yapılmıştır.

6.2. Aşındırıcı Partiküllerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

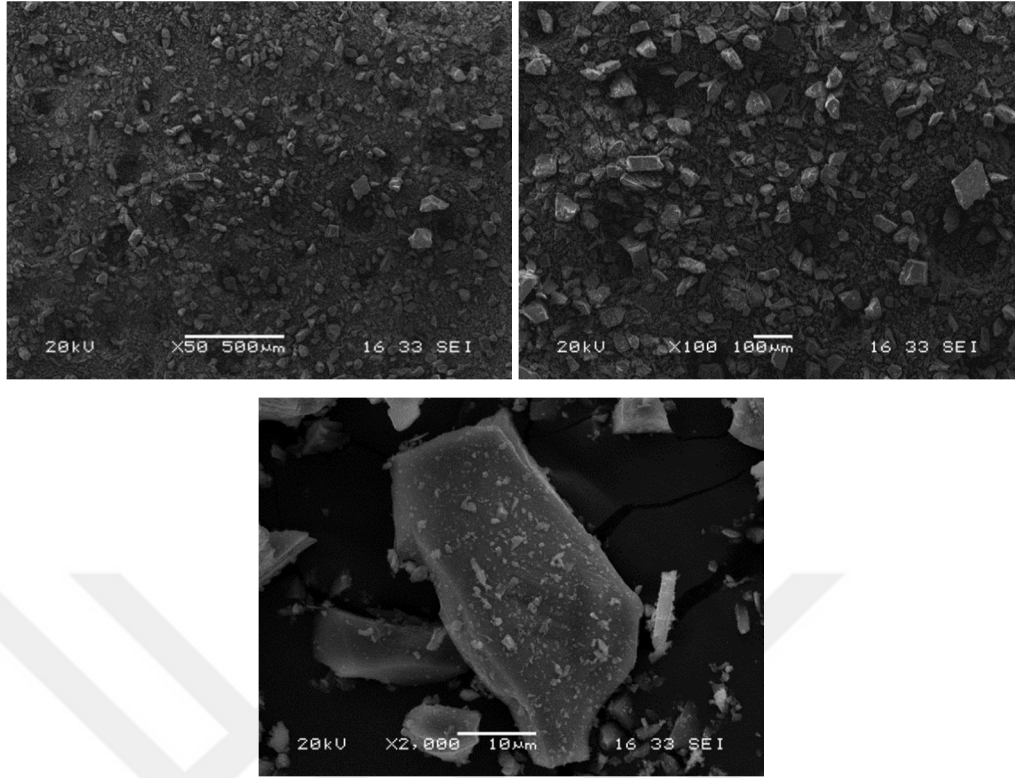
Aşındırma partikülleri, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Metalurji ve malzeme mühendisliği laboratuvarında bulunan SEM ile görüntülenmiştir. Aşındırıcı tane boyutuna göre farklı boyutlarda büyötmeler tercih edilmiştir.



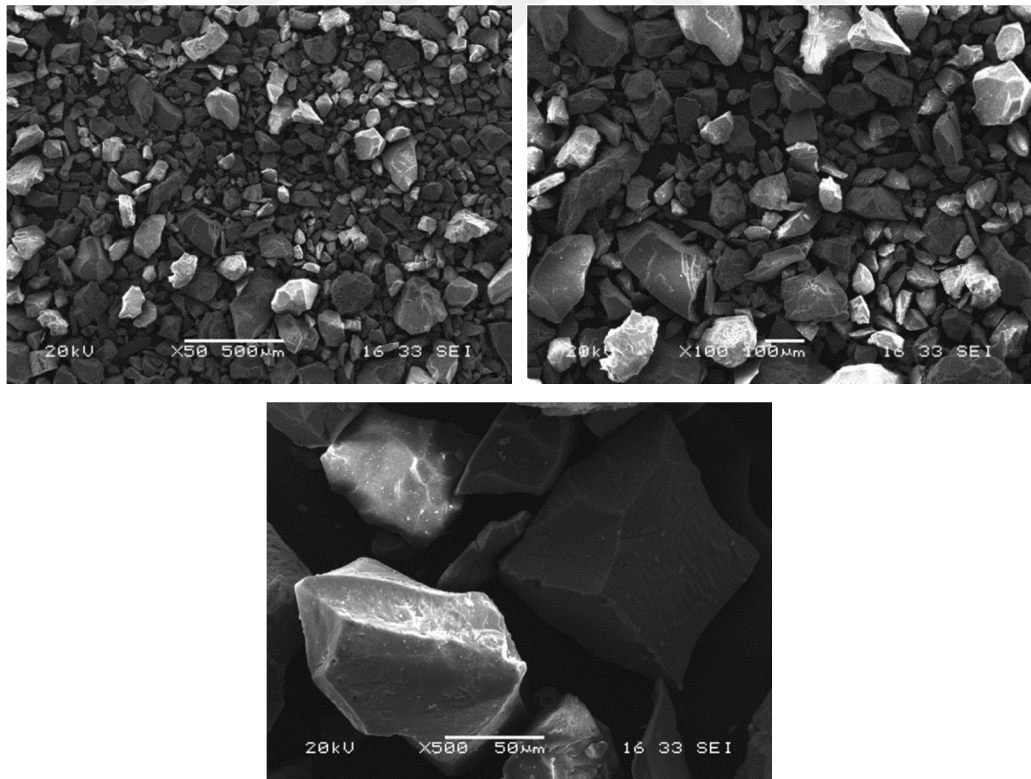
Şekil 6.1. Aşındırma partiküllerinin SEM analiz şeması.

6.2.1. Sodyum feldspat aşındırıcı partiküllerin SEM analizleri

Öğütölmüş sodyum feldspat (ESF 501 SG, -63 μm) ve flote sodyum feldspat (ESF 501 GG, -300 μm) SEM görüntöleri Şekil 6.2.'de ve Şekil 6.3.'de verilmiştir. Taramalı elektron mikroskop (SEM) analizlerinde göröldüğü gibi öğütölmüş haldeki Na-feldpat (ESF 501 SG) aşındırıcı partikülleri 63 μm 'den daha küçük tane boyutlarına sahiptir. Flote Na-feldpat (ESF 501 GG) aşındırıcı partiküllerinin tane boyutları ise 300 μm 'nin altındadır.



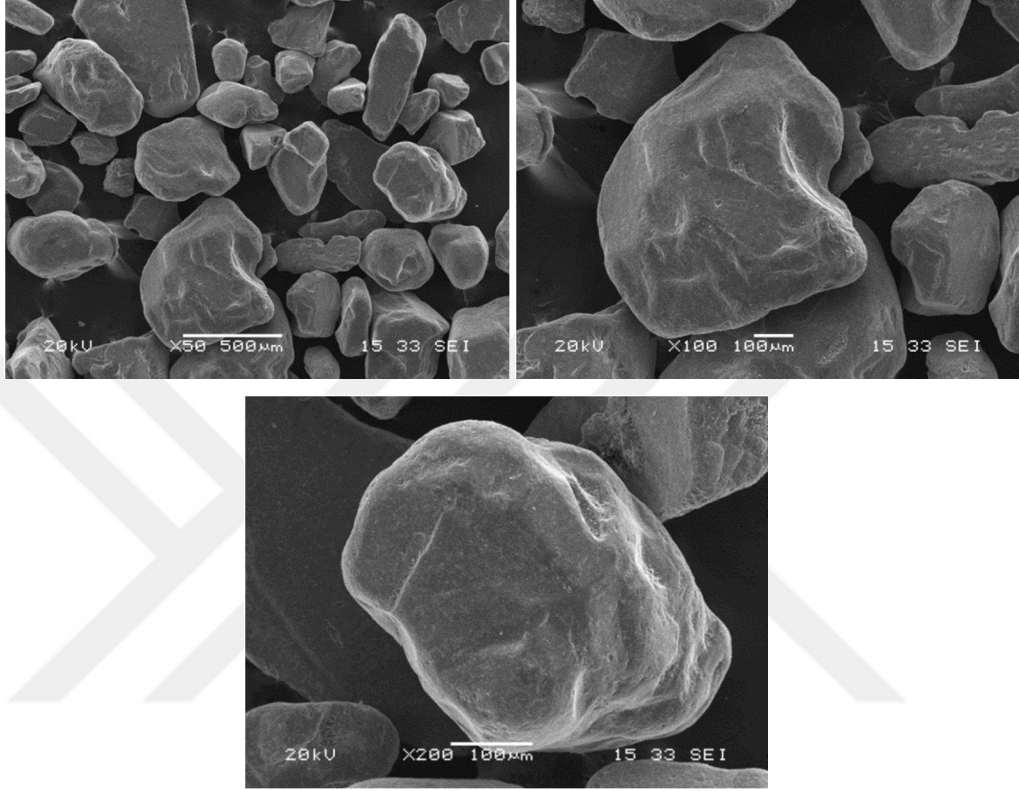
Şekil 6.2. Öğütülmüş sodyum feldspat (ESF 501 SG) aşındırıcı partiküllerinin SEM görüntüleri.



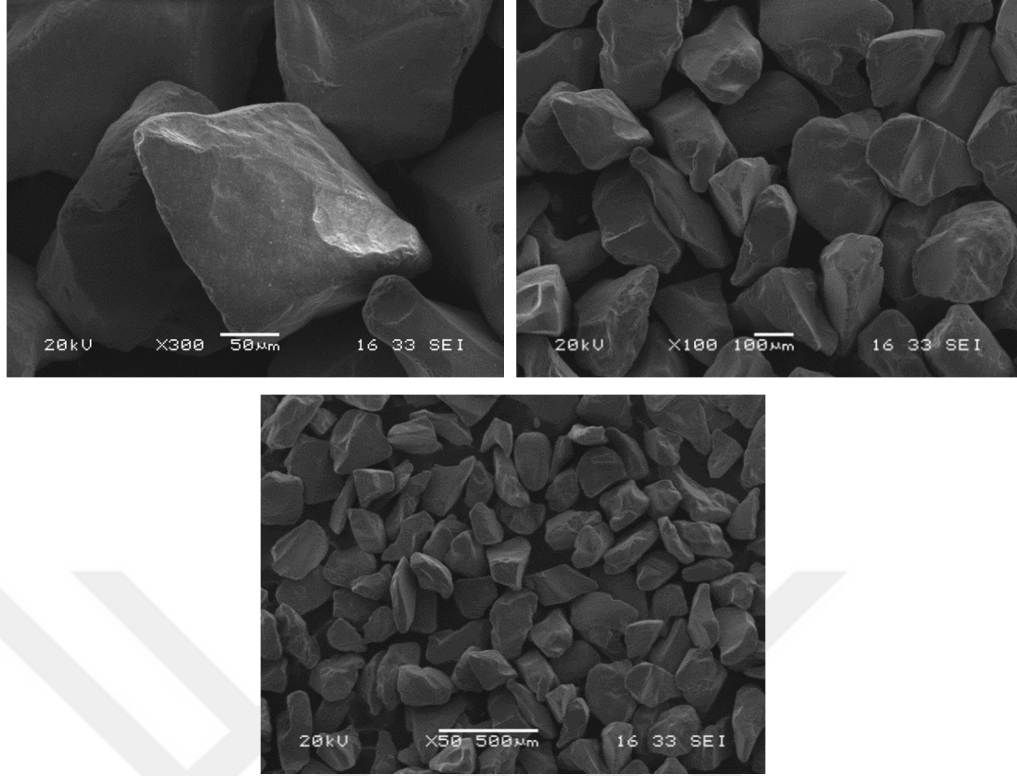
Şekil 6.3. Flote sodyum feldspat (ESF 501 GG) aşındırıcı partiküllerinin SEM görüntüleri.

6.2.2. Garnet aşındırıcı partiküllerin SEM analizleri

Garnet C (30-60 mesh, 200-600 μm) ve garnet E (120 mesh, 180-250 μm) SEM görüntüleri Şekil 6.4.'de ve Şekil 6.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Garnet C (30-60 mesh) aşındırıcı partiküllerinin SEM görüntüleri.



Şekil 6.5. Garnet E (120 mesh) aşındırıcı partiküllerinin büyütmelerdeki SEM görüntüleri.

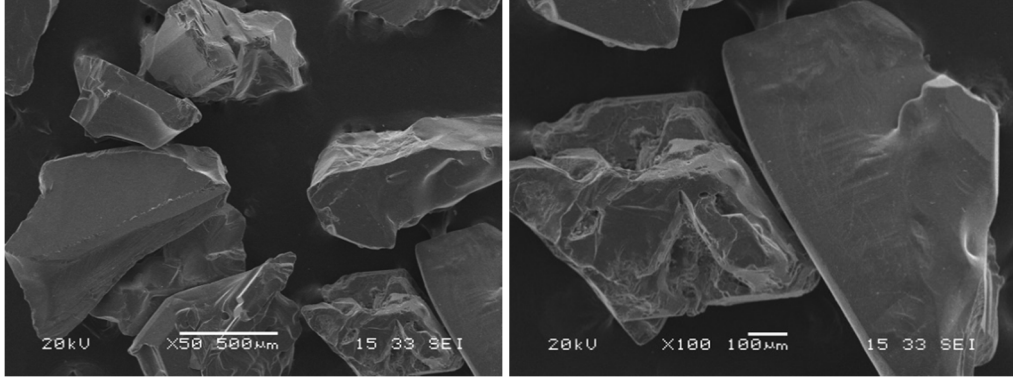
Yapılan SEM analizleri sonucunda aşındırıcı partiküllerin tane boyutları, garnet C (30-60 mesh) 200-600 μm ve garnet E (120 mesh) 180-250 μm aralıklarında olduğu anlaşılmaktadır.

6.2.3. Silisyum karbür aşındırıcı partiküllerin SEM analizleri

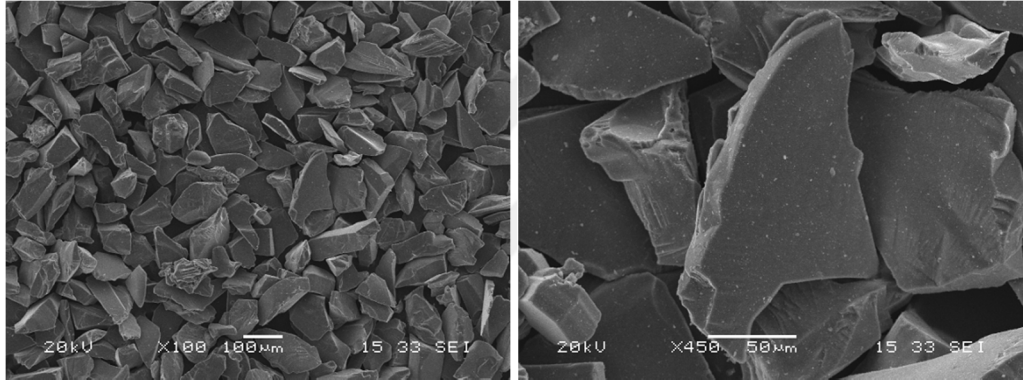
Silisyum karbür F 36 (425-600 μm) ve silisyum karbür F 180 (53-90 μm) aşındırma partiküllerinin SEM analizleri sonucunda elde edilen görüntüler Şekil 6.6. ve Şekil 6.7.'de verilmiştir.

Silisyum karbür aşınma partiküllerinin SEM analizlerinde görüldüğü gibi, SiC F 36 aşındırıcı partiküllerinin boyutları 600 μm civarlarındadır. SiC F 180 aşındırıcı partiküllerine bakıldığında ise en büyük tane boyutunun 100 μm 'nin altında olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca SiC partiküllerinin keskin köşelere sahip olduğu görülmektedir. Bu keskin köşeler, bazalt cam-seramiklerinin erozif aşınması esnasında etkin role sahiptir. Aşınma hızı aşındırıcı parçacıkların şeklinden

etkilenmektedir, açısız ve keskin köşeli parçacıklar yuvarlak ve oval parçacıklardan daha fazla aşınmaya neden olmaktadır [87].



Şekil 6.6. SiC F 36 (425-600 µm) aşındırıcı partiküllerinin SEM görüntüleri.



Şekil 6.7. SiC F 180 (53-90 µm) aşındırıcı partiküllerinin SEM görüntüleri.

6.3. Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debilerinin Hesabı

Deneyisel çalışmalarda erozif oranların hesaplanmasında kullanılmak üzere öğütülmüş (ESF 501 SG, -63 µm) ve flote (ESF 501 GG, -300 µm) sodyum feldspat, garnet C (30-60 mesh, 200-600 µm) ve garnet E (120 mesh, 180-250 µm) ile silisyum karbür F 36 (425-600 µm) ve Silisyum karbür F 180 (53-90 µm) aşındırma partikülleri için ayrı ayrı olarak kütlesel debileri hesaplanmıştır.

2 farklı tane boyutunda olan 3 farklı aşındırıcı aşındırıcı partiküllerin her birinden, farklı püskürtme basınçlarında ve farklı sürelerde püskürtme yapılmak üzere kütlesel debi hesaplarında yeterli olacak kadar tartımı alınarak aşındırıcı partikül püskürtme haznesine ilave edilmiştir. Her bir farklı grup partiküllerin önce ilk tartımları

belirlenmiş daha sonra numune püskürtme kabininde numune sabitlenmeden üç farklı basınç (1,5 – 3 ve 4 bar) ile hızlandırılarak 20 saniye ve 30 saniye süre ile ayrı ayrı olmak üzere püskürtülmüştür. Püskürtme işlemi sonrasında (her bir basınç ve süre için) aşındırıcı partikül haznesi içerisinde kalan aşındırıcı partiküllerinin tekrar tartımları alınmıştır. Her bir parametre için ilk tartımdan ikinci tartım çıkarılarak harcanan partikül miktarı belirlenmiştir. Aşındırıcı partikül kütlelerinin püskürtme süresine bölünmesi ile her bir partikül boyutu ve basınç değeri için kütleli debi hesaplanmıştır. Elde edilen debi değerleri daha sonra bazalt cam-seramiklerinin farklı tür ve boyutlardaki partiküller ile aşındırılması sonrasında erozyon oranlarının hesaplanması için kullanılmıştır.

6.3.1. Sodyum feldspat aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri

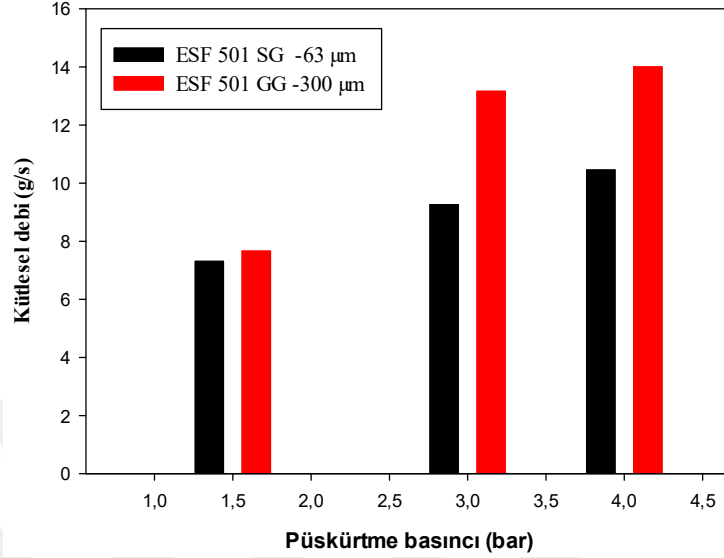
Tablo 6.1.'de Öğütülmüş Na-feldspat (ESF 501 SG, -63 μm) ve flote Na-feldspat (ESF 501 GG, -300 μm) partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi verilmiştir.

Tablo 6.1. Na-feldspat (ESF 501 SG) -63 μm ve flote Na-feldspat (ESF 501 GG) -300 μm partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi.

Partikül Püskürtme Basıncı (bar)	Kütleli debi (g/s)	
	Na-Feldspat (ESF 501 GG) -300 μm	Na-feldspat (ESF 501 SG) -63 μm
1,5	7,66	7,31
3	13,16	9,26
4	14	10,45

Sodyum feldspat (ESF 501 GG) -300 μm ve sodyum feldspat (ESF 501 SG) -63 μm ve aşındırıcı partiküller ile hesaplanan kütleli debi verilerinin grafiksel gösterimi Şekil.6.8.'de ifade edilmiştir. Basıncın artması ile kütleli debilerin de arttığı görülmektedir. Tane boyutunun debi üzerindeki etkisi daha ince taneli olan Na-feldspatda (ESF 501 SG, -63 μm) belirgin bir şekilde göze çarpmakta olup aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri daha az değerdedir. Tozun partikül boyutundaki azalma, birim kütle başına artan yüzey alanı nedeni ile toz akışında azalma meydana getirmektedir. Bu durum artan yüzey alanı ile tozların topaklanma eğiliminin

artmasından kaynaklanmaktadır [116]. Aşındırıcı tane boyutu ve püskürtme basıncının artmasına bağlı olarak kütleli debilerde artış gözlenmektedir.



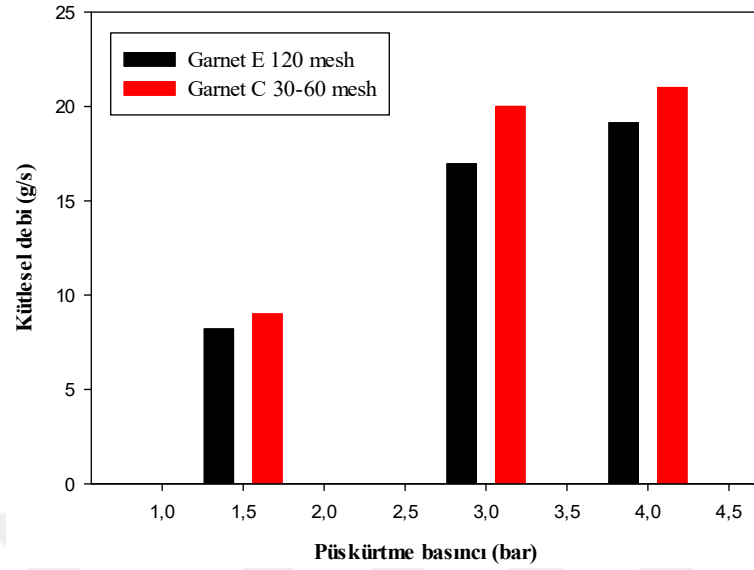
Şekil 6.8. Öğütülmüş Na-feldspat (ESF 501 SG, -63 µm) ve flote Na-feldspat (ESF 501 GG, -300 µm) partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi.

6.3.2. Garnet aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri

Garnet C (30-60 mesh 200-600 µm) ile garnet E (120 mesh 180-250 µm) partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi Tablo.6.3. ve Şekil.6.9.'da gösterilmiştir. Aşındırıcı tane boyutundaki büyümesi ve püskürtme basıncındaki artışla birlikte kütleli debi değerlerinin arttığı görülmektedir. Na-Feldspat tozlarındaki kütleli debi sonuçlarına benzer şekilde artan partikül boyutu ile kütleli debilerin belirgin şekildeki artışı yine artan yüzey alanının toz akışına olumsuz etki etmesinden kaynaklanmaktadır [116].

Tablo 6.2. Garnet C (30-60 mesh 200-600 µm), garnet E (120 mesh 180-250 µm) partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi.

Partikül Püskürtme Basıncı (bar)	Kütleli debi (g/s)	
	Garnet C (30-60 mesh) 200-600 µm	Garnet E (120 mesh) 180-250 µm
1,5	9	8,2
3	20	16,96
4	21	19,13



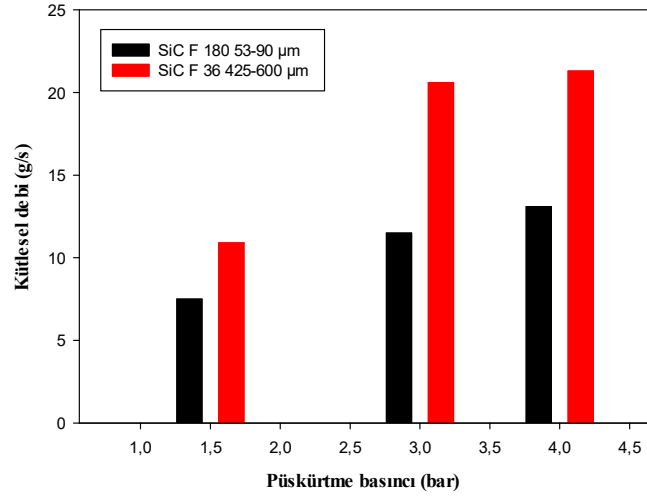
Şekil 6.9. Garnet C (30-60 mesh 200-600 μm), garnet E (120 mesh 180-250 μm) partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi.

6.3.3. Silisyum karbür aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri

Tablo 6.4. ve Şekil 6.10.'da SiC F 36 ve SiC F 180 partiküllerinin kütleli debilerinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Diğer aşındırma partiküllerinde olduğu gibi püskürtme basıncının artması ile kütleli debilerde artış görülmektedir. Tane boyutunun etkisi de kütleli debi değerlerini değiştirmiş olup daha ince taneli olan SiC F180 (53-90 μm) kütleli debi değerlerinin daha az olduğu Şekil 6.10.'daki grafikte görülmektedir. Tane boyutunun incelenmesi ile tozların akış oranlarındaki belirgin azalma artan yüzey alanı ile toz partikülleri arasında artan kohezyon kuvvetinden kaynaklanmaktadır [116].

Tablo 6.3. SiC F 36 ve SiC F 180 partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi.

Partikül Püskürtme Basıncı (bar)	Kütleli debi (g/s)	
	SiC F 36 425-600 μm	SiC F 180 53-90 μm
1,5	10,9	7,5
3	20,6	11,5
4	21,3	13,1



Şekil 6.10. SiC F 36 ve SiC F 180 partiküllerinin kütleli debisinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi.

Tozların tamamı için elde edilen kütleli debiler karşılaştırıldığında; Na-feldspat tozunda elde edilen akış miktarları Garnet ve SiC tozlarına göre belirgin şekilde düşükken, Garnet ve SiC tozlarının kütleli debileri birbirine nispeten yakındır. Bu durum toz partiküllerinin pürüzlülükleri ve şekli ile açıklanabilir. Pürüzlü ve düzensiz şekilli partikül hareket esnasında birbirini kilitleyerek toz hareketini zorlaştırmaktadır [117]. Aşındırıcı tozlardan alınmış SEM görüntüleri incelendiğinde Na-feldspat tozlarının pürüzlülük ve şekil olarak Garnet ve SiC tozlarından belirgin şekilde farklı olduğu gözlenmiştir. Özellikle öğütülmüş Na-feldspat tozlarına ait görüntüler diğerlerine göre daha düzensiz görünmekle birlikte tüm tozlar arasında elde edilen en düşük kütleli debi değerleri bu gruptaki tozlarda (Na-feldspat (ESF 501 SG)) ölçülmüştür.

6.4. Eroziyon Aşınma Oranları

Sodyum feldspat flote (ESF 501 GG) -300 µm ve öğütülmüş sodyum feldspat (ESF 501 SG) -63 µm, garnet C (30-60 mesh) 200-600 µm, garnet E (120 mesh) 180-250 µm ve Silisyum Karbür F 36 (425-600 µm) ve Silisyum karbür F 180 (53-90 µm) aşındırma partikülleri ile aşındırılan bazalt cam seramik numunelerin erozyon oranları hesaplanmıştır. Erozyon oran verileri Tablo 6.4. - 6.6.'da her bir aşındırıcı partikül, püskürtme açısına ve püskürtme basıncına bağlı olarak ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 6.4. Na-feldspat flote (ESF 501 GG) -300 μm ve Na-Feldspat öğütülmüş (ESF 501 SG) -63 μm aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin erozyon oran verileri.

Partükül çarpma açısı (°)	Na-Feldspat (ESF 501 GG)			Na-Feldspat (ESF 501 SG)		
	Tane boyut dağılımı		-300 μm	Tane boyut dağılımı		-63 μm
	Partikül püskürtme basıncı (bar)			Partikül püskürtme basıncı (bar)		
	1,5	3	4	1,5	3	4
Erozyon oranları X1000						
30	0,137	0,138	0,177	0,069	0,097	0,129
45	0,146	0,217	0,296	0,089	0,142	0,183
60	0,170	0,270	0,306	0,094	0,152	0,260
75	0,207	0,287	0,472	0,093	0,156	0,262
90	0,210	0,228	0,479	0,049	0,107	0,116

Tablo 6.5. Garnet C (30-60 mesh) 200-600 μm , garnet E (120 mesh) 180-250 μm aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin erozyon oran verileri.

Partükül çarpma açısı (°)	Garnet C (30-60 mesh)			Garnet E (120 mesh)		
	Tane boyut dağılımı		200-600 μm	Tane boyut dağılımı		180-250 μm
	Partikül püskürtme basıncı (bar)			Partikül püskürtme basıncı (bar)		
	1,5	3	4	1,5	3	4
Erozyon oranları X1000						
30	0,149	0,369	0,668	0,335	0,571	0,894
45	0,264	0,969	1,515	0,492	0,947	1,643
60	0,533	1,251	2,035	0,739	1,542	2,155
75	0,541	1,383	2,122	0,713	1,551	2,021
90	0,491	1,507	2,079	0,854	1,362	1,756

Tablo 6.6. SiC F 36 (425-600 μm) ve SiC F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin erozyon oran verileri.

Partükül çarpma açısı (°)	SiC F 36			SiC F 180		
	Tane boyut dağılımı		425-600 μm	Tane boyut dağılımı		53-90 μm
	Partikül püskürtme basıncı (bar)			Partikül püskürtme basıncı (bar)		
	1,5	3	4	1,5	3	4
Erozyon oranları X1000						
30	0,340	0,875	1,322	0,513	1,353	2,025
45	0,501	1,458	2,033	0,820	2,061	2,820
60	0,860	1,876	2,389	0,876	2,136	2,497
75	0,864	1,839	2,182	0,872	1,544	1,881
90	0,927	1,656	2,124	0,725	1,310	1,655

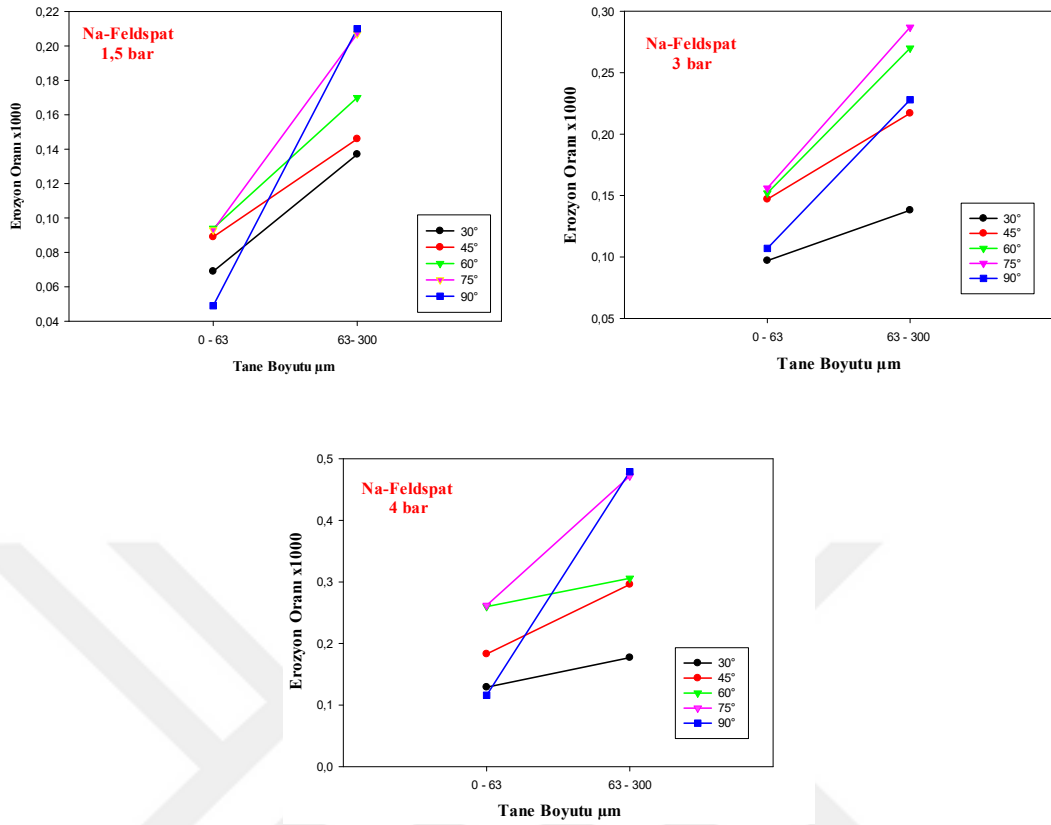
Bazalt cam-seramikleri, belirlenen deney parametreler ile erozif aşınmaya maruz bırakılması neticesinde hesaplanan erozyon oranları, aşındırıcı partiküllerin tane boyutuna, partikül çarpma açısına ve partikül püskürtme basıncına göre etkileri değerlendirilmiştir.

6.4.1. Aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranlarına etkisi

Mühendislik malzemelerinin, katı partikül erozyon davranışlarını etkileyen önemli parametrelerden birisi aşındırıcı partiküllerin tane boyutlarıdır. Tane boyutları farklı olan aşındırıcı partikülleri ile değişik malzemelerin erozif aşınma davranışları birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Erozyon oranındaki artışın aşındırıcı partikül tane boyutuna bağlı olduğunu gösteren araştırmaların yanında, belirli bir tane boyutundan sonra erozyon oranına etkisinin değişmediğini gösteren araştırmalara da rastlamak mümkündür. Ayrıca aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranına etkisinin olmadığını ifade eden araştırmacılar da vardır [88,92].

Bazalt cam-seramiklerin aşındırılmasında kullanılan aşındırıcı partiküller iki farklı tane boyutunda kullanılmıştır. Bu tane boyutları, (ESF 501 GG) kodu ile belirtilen sodyum feldspat -300 μm , (ESF 501 SG) kodu ile belirtilen öğütülmüş sodyum feldspat için ise -63 μm (ESAN firmasının verilerine göre + 63 μm tane boyutu maksimum % 5 olarak verilmiştir [103].) Garnet için ise, garnet C 30/60 mesh 200-600 μm , garnet E 120 mesh 180-250 μm tane boyut dağılımında iken silisyum karbür de bu rakamlar, SiC F 36 425-600 μm ve SiC F 180 53-90 μm tane aralığında kullanılmıştır.

Sodyum feldspat aşındırıcı partikülleri ile aşındırılan bazalt cam-seramiklerin erozyon oranları Tablo 6.4.'de verilmiş ve bu veriler doğrultusunda Şekil 6.11.'deki grafik oluşturulmuştur.



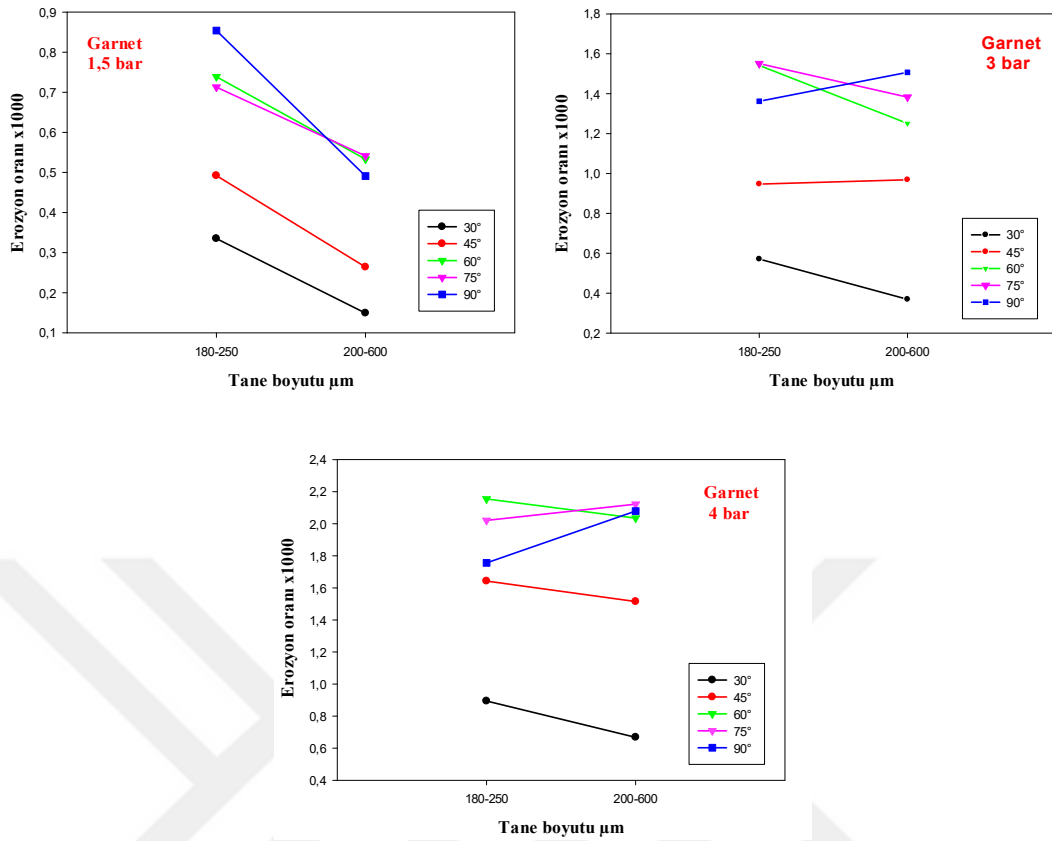
Şekil 6.11. Na-feldspat flote (ESF 501 GG) -300 μm ve Na-Feldspat öğütülmüş (ESF 501 SG) -63 μm aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin tane boyutuna göre erozyon oranları.

Şekil 6.11.'de farklı tane boyutundaki Na-Feldspat aşındırıcı partikülleri ile aşındırılan bazalt cam-seramiklerinin erozyon oran değerleri değişen partikül çarpma açılarına ve partikül çarpma açılarına göre belirtilmiştir. Şekil 6.11.'deki verilen grafiğe göre -63 μm tane boyutundaki Na-Feldspat aşındırıcı partikülleri ile aşındırılan bazalt cam-seramiklerinde erozyon oranının tane boyutu -300 μm olan Na-Feldspat aşındırıcı partiküllerine oranla 1,5 – 3 – 4 bar püskürtme basıncılarında daha az olduğu görülmektedir. Öğütülmüş Na-feldspat (-63 μm) aşındırıcı partiküllerinin 1,5 bar püskürtme basıncı ile hızlandırılması sonucunda aşındırılan bazalt cam-seramikleri üzerinde en yüksek erozif aşınma 60° partikül çarpma açısında olmuştur. Partikül çarpma açıları 30 – 45 – 60°'ye artarken erozif oranlarında artış görülmüş ve 75° partikül çarpma açısında düşmüş ve en düşük erozyon oranı 90° partikül çarpma açısında elde edilmiştir. Daha iri taneli olan flote Na-feldspat (-300 μm) aşındırıcı partikülleri ile aşındırılan bazalt cam-seramiklerinde ise partikül çarpma açısındaki artışa göre erozyon oranlarında artış göze çarpmakta

olup ve en yüksek erozyon oranı 90° partikül çarpma açısında rastlanmıştır. Püskürtme basıncının 3 bar olduğu durumda ise, en yüksek erozyon oranı her iki tane boyut dağılımında da (öğütülmüş Na-feldspat -63 μm ve flote Na-feldspat -300 μm) en yüksek erozyon oranı 75° partikül çarpma açısında görülmüştür. Büyük tane boyut dağılımına sahip olan flote Na-feldspat -300 μm ile aşınmanın daha fazla olduğu görülmektedir. En düşük aşınma ise, küçük tane boyut dağılımına sahip öğütülmüş Na-feldspat ile 30° partikül çarpma açısında olmuştur. Püskürtme basıncı 4 bar iken, en yüksek aşınma yine büyük tane boyut dağılımına sahip flote Na-feldspat -300 μm ile 90° 'lik partikül çarpma açısında olurken, en düşük aşınma öğütülmüş Na-feldspat -63 μm aşındırma partikülleri ile 90° 'lik partikül çarpma açısında olmuştur. İri taneli Na-feldspat ile aşındırılan bazalt cam seramiklerinde ince taneli Na-feldspat aşındırıcı partiküllerine göre daha fazla erozif aşınmanın olduğu görülmektedir.

Sonuçlar; ince tozlardaki erozyon oranlarının iri toz boyutuna göre her deney şartı için daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum debi miktarlarında elde edilen sonuçlar ile uyum göstermekte olup Na-feldspat -63 μm tozu için elde edilen debi değerleri Na-feldspat -300 μm tozlarında elde edilen debi değerlerine göre belirgin şekilde daha düşüktür. Bu durum birim zamanda numune yüzeyine çarpan aşındırıcı partikül miktarının Na-feldspat -63 μm tozlarında daha az olduğunu göstermekte olup bu tozlarla yapılan deneylerde daha düşük aşınma oranlarının elde edilmesi de bu durumun bir göstergesidir. Antonov ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiş olup artan aşındırıcı toz boyutu ile erozyon oranının net şekilde arttığı, aşındırıcı toz boyutu ile birlikte aşındırıcı tozun sertliğinin erozif aşınma üzerinde etkili parametreler olduğu belirtilmiştir [118].

Garnet aşındırıcı partikülleri ile aşındırılan bazalt cam-seramiklerin erozyon oranları Tablo 6.5.'de verilerek bu değerler doğrultusunda Şekil 6.12.'deki grafik oluşturulmuştur.



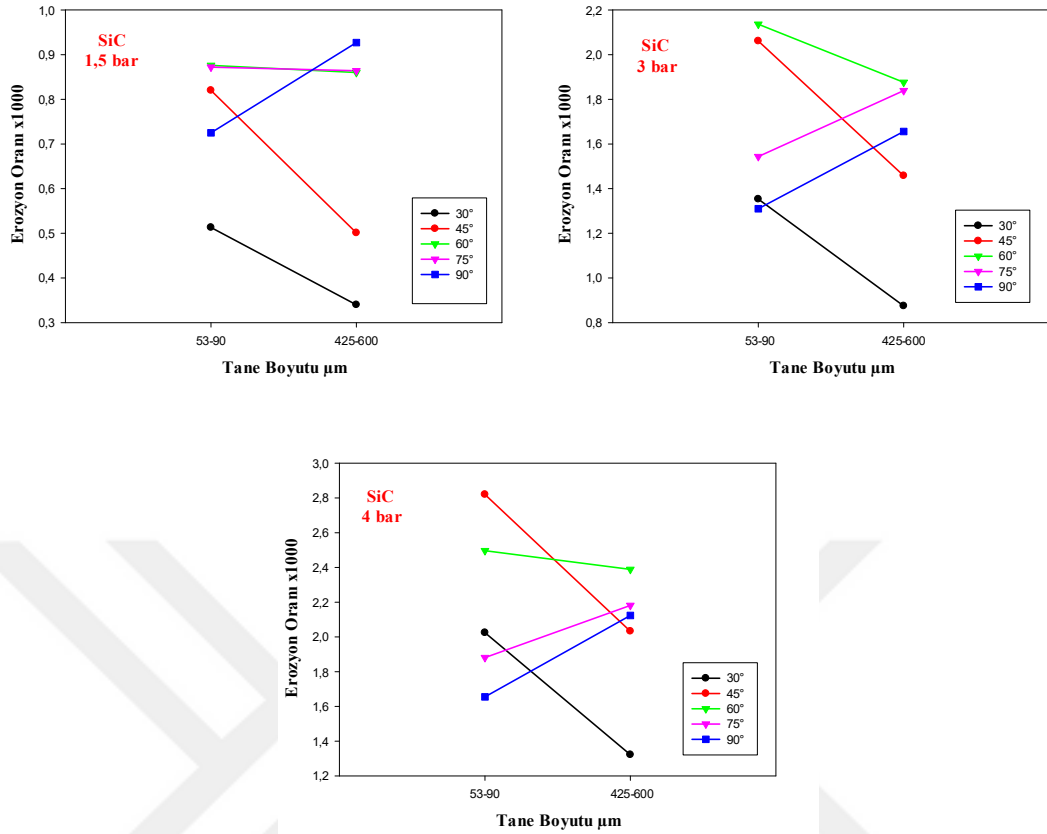
Şekil 6.12. Garnet C (30-60 mesh) 200-600 μm , garnet E (120 mesh) 180-250 μm aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin tane boyutuna göre erozyon oranları.

Şekil 6.12.'de farklı tane boyutundaki garnet aşındırıcı partikülleri ile aşındırılan bazalt cam-seramiklerinin erozyon oran değerleri değişen partikül çarpma açlarına ve partikül çarpma açlarına göre belirtilmiştir. Garnet aşındırma partikülleri, 1,5 bar püskürtme basıncı ile aşındırılan bazalt cam-seramikleri için hesaplanan erozyon oranlarına bakıldığında, ince tane boyutlu aşındırma partikülleri (garnet E (120 mesh) 180-250 μm) ile aşınmanın iri tane boyutlu aşındırma partiküllerine oranla daha fazla olduğu görülmektedir. 3 bar püskürtme basıncı ile aşındırılan bazalt cam-seramiklerine bakıldığı zaman 30° – 60° – 75° partikül çarpma açlarında ince taneli aşındırma partikülleri ile aşınmanın iri taneli aşındırma partiküllerine oranla daha fazla olduğu söylenebilirken bu durum 45° – 90° partikül çarpma açlarında iri taneli aşındırıcı partikülleri ile aşınmanın ince taneli aşındırıcı partiküllere göre daha fazla yani tersi bir durum görülmektedir. Püskürtme basıncının 4 bar olduğu durumda ise, 30° – 45° – 60° partikül çarpma açlarında aşınmanın ince taneli aşındırma partikülleri ile az bir farkla da olsa iri taneli aşındırma partiküllerine göre aşınmanın

daha fazla olduğu görülmektedir. $75^{\circ} - 90^{\circ}$ partikül çarpma açılarında ise iri taneli aşındırma partiküllerinin aşınmada daha etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Erozyon oranlarının toz boyutuna dolayısı ile debi miktarına bağlı olarak değişimleri incelendiğinde artan toz boyutu ve debi miktarı ile birlikte erozyon oranlarında genel olarak (bazı şartlar hariç) düşüşler gözlenmiştir. Eroziyon aşınmada genel olarak numune yüzeyine ulaşan aşındırıcı toz miktarının artışı ile birlikte artan enerji transferi sonucu aşınma miktarlarının artması beklenmektedir. Bu noktada mekanizmayı terse çevirecek bir oluşum; gevrek malzemelerin eroziyon aşınmalarında karşımıza çıkan yüzeyden seken parçalar ile aşındırıcı tozlar arasındaki etkileşimdir. Sünük malzemelerde (plastik v.b.) yüzeyden seken partiküller enerjilerinin bir kısmını numune yüzeyinde sönümlemiş olurlar, oysa gevrek malzemelerde böyle bir sönümleme olamayacağı için yüzeyden seken partiküller ile aşınma partikülleri arasındaki etkileşimler daha keskin ve aşınmayı etkileyici olabilir [119]. Garnet tozları ile yapılan aşınma deneylerinde bu mekanizmanın kendini gösterdiği düşünülmekte olup artan aşındırıcı partikül yüzey alanı ve debi miktarları ile erozyon oranlarındaki düşüşün sebebinin yüzeyden seken partiküller ile aşındırıcı partiküller arasındaki çarpışmalar olduğu düşünülmektedir. Bu mekanizma 30° - 75° arasındaki çarpma açılarında kendini daha net gösterirken numunenin dik konuma gelmesi ve çarpma hızının da artması ile etki azalmaktadır. Çarpma açısının 90° olduğu şartlar için 3 ve 4 barda yapılan deneylerde artan toz boyutu dolayısı ile numune yüzeyine ulaşan toz miktarı ile erozyon oranlarının arttığı görülmektedir. Numune yüzeyine ulaşan toz miktarındaki artışın seken partiküller ile oluşan çarpışma mekanizmasının yenme etkisi 4 bar için 75° çarpma açısında da kendini göstermiştir. Bununla birlikte bu mekanizmanın Na-feldspat aşındırıcı tozları ile yapılan deneylerde kendini göstermemesinin de garnet aşındırıcı tozunun Na-feldspat aşındırıcı tozuna göre daha sert olması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Artan sertlik ile yüzeyden sekme etkisinin artması muhtemel bir sonuç olarak düşünülebilir.

Silisyum karbür aşındırıcı partikülleri ile aşındırılan bazalt cam-seramiklerin erozyon oranları Tablo 6.6.'da verilmiş ve bu değerler ile Şekil 6.13.'de ifade edilen grafik çizilmiştir.



Şekil 6.13. SiC F 36 (425-600 µm) ve SiC F 180 (53-90 µm) aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin tane boyutuna göre erozyon oranları.

Şekil 6.13.'de farklı tane boyutundaki silisyum karbür aşındırıcı partikülleri ile aşındırılan bazalt cam-seramiklerinin erozyon oran değerleri değişen partikül çarpma açılara ve partikül çarpma açılara göre belirtilmiştir. Püskürtme basıncının 1,5 bar olduğu durumda erozyon aşınma oranları 30° – 45° – 60° – 75° partikül çarpma açılarında ince taneli silisyum karbür aşındırıcı partikülleri ile aşındırılması sonucunda erozif aşınmanın iri taneli silisyum karbür aşındırıcı partiküllerine oranla daha fazla olduğu görülürken, 90° partikül çarpa açısında tersi durum görülmektedir, iri taneli aşındırma partiküllerinde aşınmanın fazla olduğu anlaşılmaktadır. Püskürtme basıncı 3 bar olduğunda, 30° – 45° – 60° partikül çarpma açılarında ince tane boyutlu aşındırıcı partikülleri ile aşınmanın fazla olduğu görülürken 75° – 90° partikül çarpma açılarında iri tanelerin daha etkili olduğu görülmüştür. 4 bar püskürtme basınçlarında ise, 3 bar basınçta olduğu gibi 30° – 45° – 60° partikül çarpma ince taneler aşınmayı daha fazla etkilerken, 75° – 90° partikül çarpma

açılarında iri taneli aşındırma partiküllerinin daha fazla aşınmaya sebebiyet verdiği görülmektedir.

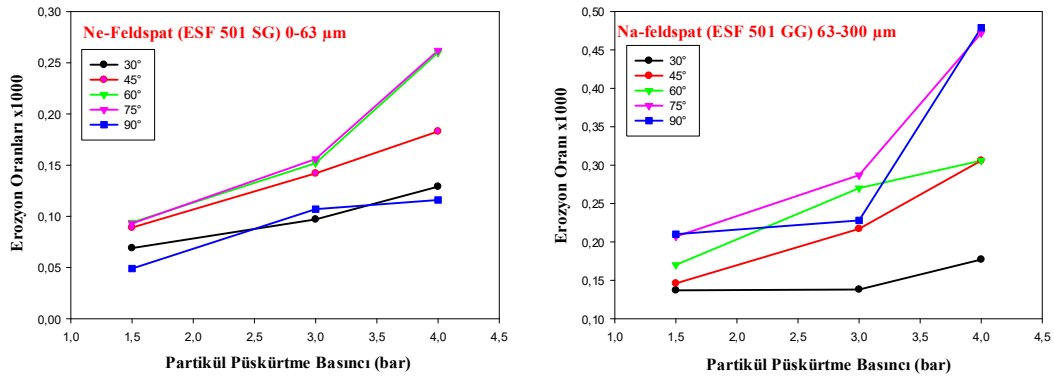
SiC tozları ile yapılan erozif aşınma deneylerinde elde edilen sonuçlar diğer aşındırıcı tozlar ile elde edilen deney sonuçları birbirini destekler niteliktedir. Na-feldspat tozu ile yapılan deneylerde toz boyutunun artması dolayısı ile debinin (numune yüzeyine ulaşan toz miktarı) artması ile erozyon oranlarında belirgin artışlar tespit edilmişken, aşındırıcı tozun garnet olarak uygulandığı deneylerde ise tozun sertliğinin artışı ile numune yüzeyinden seken tozların aşınma miktarını etkilemesi ile artan toz boyutu ve debi miktarları ile erozyon oranlarında düşüşler gözlenmiştir. Bu durum, Garnet tozunun Na-feldspat tozuna göre daha sert olmasının sekme mekanizmasını desteklediği şeklinde yorumlanmıştır. Aşındırıcı tozun SiC olarak uygulandığı deneylerde ise özellikle düşük çarpma açılarında, Garnet tozundakine benzer sonuçlar dikkat çekmektedir. SiC tozu ile yapılan deneylerde tane boyutunun artışı ile düşük çarpma açılarında azalan, yüksek çarpma açılarında ise artan bir erozif aşınma eğilimi gözlenmiştir. Aşındırıcı toz sertliğinin artışı ile yüzeyden sekme etkisinin artacağı ve yüzeyden seken partiküllerinde aşınmayı azaltan yönde (seken partiküllerin yüzeye henüz çarpmamış partiküllere çarpması ile) etki edeceği düşünülmektedir. Artan aşındırıcı toz boyutu ile numune yüzeyine gönderilen toz miktarındaki artışın seken ve çarpmamış tozlar arasındaki çarpma etkisini arttırdığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, literatürde Rebound partikül etkisi olarak bilinen bu mekanizmanın [120] bu çalışmada da etkin şekilde kendini gösterdiği düşünülmektedir.

Bazalt cam-seramikleri üzerinde yapılan erozif aşınma test sonuçları incelendiğinde tane boyut dağılımının aşınma üzerindeki etkisi hakkında orantısal bir yorum yapmanın doğru olmadığı görülmektedir. Tane boyut dağılımının katı partikül erozyon aşınmasındaki etkisi, püskürtme basıncına ve partikül çarpma açısına göre değişim göstermektedir.

6.4.2. Partikül püskürtme basıncının erozyon oranlarına etkisi

Bu başlık altında bazalt cam-seramiklerin partikül püskürtme basıncının eroziv aşınmaya etkileri incelenmiştir. Bazalt cam seramik numuneleri, sodyum feldspat, öğütülmüş (ESF 501 SG) -63 μm ve flote (ESF 501 GG) -300 μm , garnet C (30-60 mesh) 200-600 μm , garnet E (120 mesh) 180-250 μm ve Silisyum Karbür F 36 (425-600 μm) ve Silisyum karbür F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri, 1,5 – 3 – 4 bar olmak üzere üç farklı püskürtme basıncı ile hızlandırılmıştır. Farklı püskürtme basınçlarıyla aşındırılan bazalt cam-seramik numunelerinin erozyon oranları karşılaştırılmış ve basıncın aşınmaya etkileri tartışılmıştır. Farklı partikül çarpma açılarında aşındırılan bazalt cam-seramiklerinin erozyon oranının partikül püskürtme basıncına bağlı olarak değişim gösterdiği görülebilmektedir.

Sodyum feldspat öğütülmüş (ESF 501 SG) -63 μm ve flote (ESF 501 GG) -300 μm aşındırıcı partikülleri, 1,5 – 3 – 4 bar basınç ile bazalt cam-seramiklerin üzerine püskürtülerek aşındırılmıştır. Hesaplanan erozyon oranları Tablo 6.4.'de verilmiştir ve bu veriler doğrultusunda Şekil 6.14'deki grafik çizilmiştir.



Şekil 6.14. Na-Feldspat öğütülmüş (ESF 501 SG) -63 μm ve Na-feldspat flote (ESF 501 GG) -300 μm aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin püskürtme basıncına göre erozyon oranları.

Sodyum feldspat aşınma tozları ile bazalt cam-seramiklerinin aşındırılması sonucunda püskürtme basıncına bağlı olarak artış görülmektedir. Partikül püskürtme basıncının artışı ile aşınma partiküllerinin kinetik enerjilerinde de artış olmaktadır. Yüksek enerjiye sahip aşındırma partikülleri bazalt cam-seramiklerinin yüzeyine

yüksek enerji ile çarpar ve malzeme üzerindeki aşınma miktarını artırır. Daha küçük tane boyut dağılımına sahip Na-feldspat ESF 501 SG aşındırma partikülleri 1,5 bar püskürtme basıncı ile hızlandırılarak uygulanan aşınma testleri sonucunda en az erozyon oran değerleri şekil 6.15.'de görülmektedir. Püskürtme basıncının 1,5 bar olduğu durumda en yüksek aşınma 60° partikül çarpma açısında gerçekleşirken, en düşük aşınma ise 90° partikül çarpma açısında gerçekleşmiştir. Aşındırma partiküllerinin 3 bar püskürtme basıncı ile püskürtülmesi sonucunda ise 30 – 45 – 60 – 75° çarpa açıları orantılı olarak artarken, en düşük erozyon oranına 30° çarpma açısında karşılaşılmıştır. Bazalt cam-seramiklerindeki en fazla aşınmanın 4 bar püskürtme basıncında olduğu Şekil 6.14. ifade etmektedir. 4 bar püskürtme basıncı ile en fazla aşınma 75° partikül çarpma açısında meydana gelirken, en az aşınma 90° partikül çarpma açısında gerçekleşmiştir. Bütün parametreler göz önüne alındığında en fazla erozyon oranının 4 bar püskürtme basıncında 75° partikül çarpma açısında, en az erozyon oranının da 1,5 bar püskürtme basıncında olduğu görülmektedir.

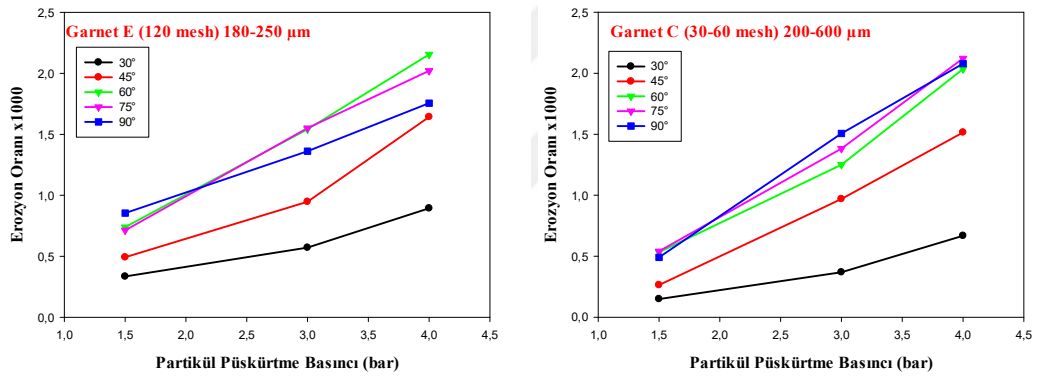
Tane boyut dağılımı daha büyük olan Na-feldspat flote (ESF 501 GG) -300 µm aşındırma partikülleri ile yapılan çalışmalarda, aynı parametrelerde püskürtme basıncının artışı ile erozyon oranlarında artış görülmektedir. 1,5 bar püskürtme basıncında, 30 – 45 – 60 – 75 – 90° partikül çarpma açıları erozyon oranları doğrusal bir artış göstermektedir. En az erozyon oranına 30° partikül çarpma açısında karşılaşılrken, en fazla erozyon oranına 90° partikül çarpma açısında rastlanmıştır. 3 bar püskürtme basınç ile hızlandırılan aşındırma partiküllerinin bazalt cam-seramikleri üzerindeki etkiye bakılacak olursa en fazla erozyon oranı 75° püskürtme açısında olurken, en düşük aşınmanın 30° partikül çarpma açısında olduğu görülmektedir. Partikül basıncının 4 bar olduğu durumda ise, en yüksek aşınma yine 90° partikül çarpma açısında en düşük aşınma ise 30° partikül çarpma açısında karşılaşılmıştır.

İki farklı tane boyutundaki sodyum feldspat aşındırma partikülleri ile yapılan aşınma testleri incelendiğinde, en fazla aşınmanın, büyük tane boyut dağılımına sahip Na-feldspat flote (ESF 501 GG) -300 µm aşındırma partikülleri ile 4 bar püskürtme basıncında ve 90° partikül çarpma açısında olduğu görülmektedir. Eroziyon aşınmanın

en az olduğu parametreler ise, ince tane boyut dağılımına sahip Na-Feldspat öğütülmüş (ESF 501 SG) -63 μm aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar püskürtme basıncında ve 90° partikül çarpma açısında olduğu görülmektedir.

Sonuçlar debi ölçümleri ile elde edilen sonuçlar ile uyum göstermekte olup artan boyut, dolayısı ile numune yüzeyine ulaşan toz miktarının artışı ile erozyon oranlarında artış gözlenmiştir.

Garnet C (30-60 mesh) 200-600 μm , garnet E (120 mesh) 180-250 μm aşındırıcı partikülleri, 1,5 – 3 – 4 bar basınç ile hızlandırılarak bazalt cam-seramiklerinin üzerine püskürtülmüş ve aşındırılmıştır. Erozyon oranları hesaplanmıştır ve Tablo 6.5.'de verilmiştir ve bu veriler doğrultusunda Şekil 6.15.'deki grafik elde edilmiştir.



Şekil 6.15. Garnet E (120 mesh) 180-250 μm ve garnet C (30-60 mesh) 200-600 μm aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin püskürtme basıncına göre erozyon oranları.

Bazalt cam-seramiklerinin garnet aşındırma partikülleri ile basıncın artışıyla orantılı olarak partiküllerin kazandığı kinetik enerji doğrultusunda erozif aşınmanın fazla olduğu Şekil 6.15.'de görülmektedir. Bu durum her iki farklı tane boyut dağılımına sahip Garnet (Garnet E (120 mesh) 180-250 μm ve Garnet C (30-60 mesh) 200-600 μm) aşındırma partikülleri içinde geçerlidir. En az erozyon oranlarına 1,5 bar püskürtme basıncında rastlanırken, en fazla erozyon oranı verileri 4 bar püskürtme basınçlarında elde edilmiştir.

İnce tane boyut dağılımına sahip garnet E (120 mesh) 180-250 μm aşındırma partikülleri ile aşınma testleri sonucunda, 1,5 bar püskürtme basıncı için en yüksek

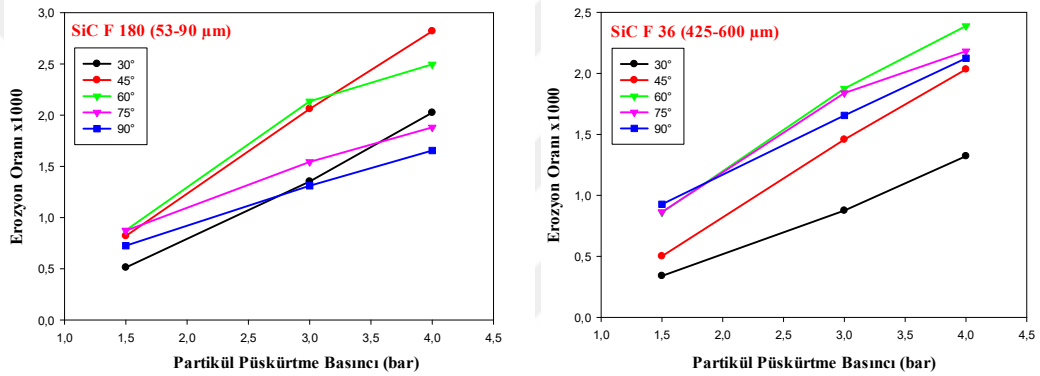
erozyon oranı 90° partikül çarpma açısında elde edilmiştir. Erozyon oranları, $30 - 45 - 60^\circ$ partikül çarpma açılarındaki artış gösterirken 75° partikül çarpma açısında erozyon oranında düşüş olmuş ve tekrar 90° partikül çarpma açısında gerçekleşmiştir. En düşük erozyon oranına, 1,5 bar püskürtme basıncında 30° partikül çarpma açısında karşılaşılmıştır. Püskürtme basıncının 3 bar olduğu parametrede, 75° püskürtme basıncında en fazla erozyon oranına rastlanırken, en düşük erozyon oranı 30° partikül çarpma açısında görülmektedir. 30° partikül çarpma açısından 75° dereceye doğru çıkıldıkça erozyon oranı artarken, 90° partikül çarpma açısında ise erozyon oranı, 45° partikül çarpma açısındaki erozyon oranından fazla 60° partikül çarpma açısından az olduğu anlaşılmaktadır. Partikül püskürtme basıncı 4 bar iken her parametre için en yüksek erozyon oran değerleri elde edilmiştir. Bu basınçta en yüksek erozyon oranı 60° partikül çarpma açısında elde edilmiştir. En düşük erozyon oranı yine 30° partikül çarpma açısında karşılaşılmıştır.

İri tane boyut dağılımına sahip garnet C (30-60 mesh) 200-600 μm aşındırma partikülleri için de püskürtme basıncının artışıyla birlikte erozyon oranlarında artış görülmektedir. Partikül püskürtme basıncı 1,5 bar iken karşılaşılan en yüksek erozyon oranı 75° partikül çarpma açısında iken, en düşük erozyon oranı 30° partikül çarpma açısındadır. 30° 'den 75° 'ye doğru çıkıldığında artan aşınma miktarları görülürken 90° partikül çarpma açısında erozyon oranının düştüğü görülmektedir. 90° partikül çarpma açısındaki erozyon oranı 45° partikül çarpma açısından yüksek 60° partikül çarpma açısından ise düşüktür. Bazalt cam-seramiklerinin, 3 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmasının sonucunda en yüksek erozyon oranı 90° partikül çarpma açısında, en düşük ise 30° derece partikül çarpma açısındadır. Püskürtme basıncının 3 bar olduğu durumda erozyon oranındaki artış 30° 'den 90° 'ye doğru çıkıldıkça artış görülmektedir. Aşındırıcı partiküller 4 bar basınç ile hızlandırıldığı zaman en yüksek erozyon oranı 75° partikül çarpma açısında karşılaşılrken, 30° partikül çarpma açısında en düşük değerdedir.

İki farklı tane boyut dağılımındaki Garnet aşındırıcı partikülleri ile bazalt cam-seramiklerine uygulanan aşınma testleri sonucunda en düşük erozyon oranları 30° partikül çarpma açılarındaki karşılaşılrken, en yüksek erozyon oranları $60^\circ - 75^\circ$ ve

90° partikül çarpma açılarında görüşmüştür. Bu iki tane boyut dağılımındaki Garnet aşındırıcı partikülleri yapılan aşınma testleri sonucunda en yüksek aşınma garnet E (120 mesh) 90-150 μm ile 4 bar partikül püskürtme basıncında 60° partikül çarpma açısında olurken en düşük aşınma ise 1,5 bar basınçta 30° çarpma açısında garnet C (30-60 mesh) 180-600 μm aşındırma partikülleri ile olmuştur.

Silisyum Karbür F 36 (425-600 μm) ve Silisyum karbür F 180 (53-90 μm) aşındırıcı partiküllerinin, 1,5 – 3 – 4 bar basınç ile hızlandırılarak püskürtülmüş ve bazalt cam-seramik numuneleri aşındırılmıştır. Hesaplanan erozyon oranları Tablo 6.6.'deki verilmiş ve bu veriler doğrultusunda Şekil 6.16.'daki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 6.16. SiC F 180 (53-90 μm) ve SiC F 36 (425-600 μm) aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin püskürtme basıncına göre erozyon oranları.

Silisyum karbür aşındırma partikülleri ile yapılan aşınma testleri sonucunda, diğer iki aşındırma partiküllerinde olduğu gibi partikül püskürtme basıncının artışıyla erozyon oranlarında artış görülmektedir. En düşük erozyon oranlarına 1,5 bar püskürtme basıncında ulaşılırken en yüksek erozyon oranına 4 bar püskürtme basıncında ulaşılmıştır.

İnce tane boyut dağılımına sahip SiC F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile yapılan erozif aşınma testleri sonucunda elde edilen erozyon oran değerleri, 1,5 – 3 bar püskürtme basınçları için en yüksek 60° partikül çarpa açısında görülürken, 4 bar püskürtme basıncında 45° partikül çarpma açısında görülmüştür. En düşük erozyon oranları ise, 1,5 bar basınç değerinde 30° derece partikül çarpma açısında 3 ve 4 bar partikül püskürtme basınçlarında 90° partikül çarpma açıları elde edilmiştir.

İri tane boyutlu dağılımına sahip SiC F 36 (425-600 μm) aşındırma partikülleri ile yapılan testler sonucunda elde edilen erozyon oran değerleri ise, her bir partikül çarpma açısı için, en yüksek değerler 4 bar partikül püskürtme basıncında elde edilirken en düşük değerler 1,5 bar partikül püskürtme basınçlarında karşılaşılmıştır. 1,5 bar basınç değeri için en yüksek erozyon oranı 90° 'de, 3 ve 4 bar basınçlarında ise, 60° partikül çarpma açısında karşılaşılrken en düşük erozyon değerleri 30° partikül çarpma açısında elde edilmiştir.

SiC aşındırma partikülleri her iki tane boyutuyla değerlendirilirse, en yüksek aşınma ince tane boyut dağılımına sahip SiC F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile 45° partikül çarpma acısında ve 4 bar partikül püskürtme basıncında olurken, en düşük aşınma ise, iri tane boyut dağılımındaki SiC F 36 (425-600 μm) aşındırma partikülleri ile 1,5 bar partikül püskürtme basıncında 30° partikül çarpma açısında karşılaşılmıştır.

Partikül püskürtme basıncı ile erozyon oranları arasındaki değişim genel olarak değerlendirildiğinde artan basınç değerleri ile erozyon oranlarının arttığı görülmektedir. Erozyonda, malzemenin çıkarılması parçacığın hızına veya ataletine ve yüzeye çarpan toplam parçacık kütesine bağlıdır [121]. Dolayısı ile partikülün hızı arttığı durumda aşınma oranı da belirgin şekilde artar. Yapılan benzer çalışmalar artan püskürtme basıncı ve partikül hızı ile ağırlık kayıplarının ve aşınma oranlarının arttığını ortaya koymaktadır. Wiederhorn ve arkadaşlarının yaptığı geniş spektrumlu bir çalışmada gevrek malzemelerin katı parçacık erozyonu karşısındaki davranışları incelenmiş, gevrek davranış gösteren farklı tip pek çok malzeme için artan aşındırıcı partikül hızı ile ağırlık kayıplarının arttığı rapor edilmiştir [122]. Sonuçların yapılan çalışmalar ile tamamen uyum içinde olduğu görülmektedir.

6.4.3. Partikül çarpma açısının erozyon oranlarına etkisi

Katı partikül erozyonunda partikül çarpma açısı malzemelerin erozif aşınmasında önemli derecede etkileyen parametrelerdendir. Katı partiküllerin oluşturduğu erozyon aşınmasında, partikül çarpma açıları düşük olduğu zaman iki cismin sürtünmesi

mekanizmasına benzerken, yüksek partikül çarpma açılarında, aşınma mekanizması çarpma biçimindedir [88].

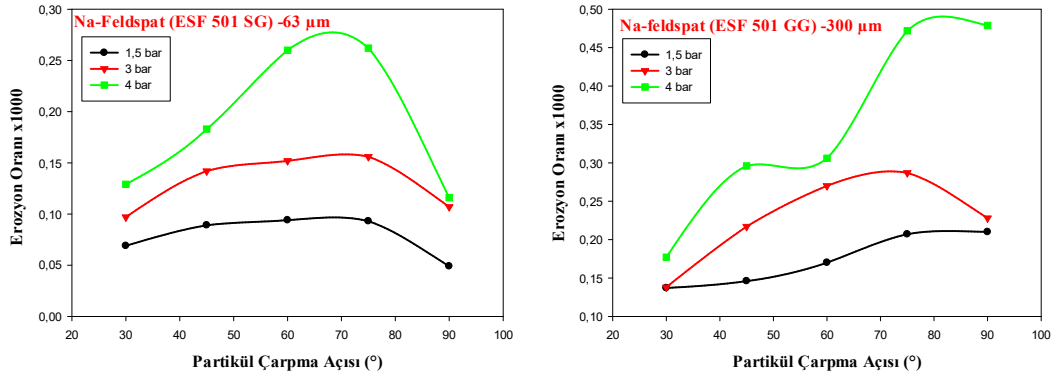
Aşındırıcı partikülün numune yüzeyine ulaşmasından itibaren partikül ile numune arasındaki enerji transferi farklı şekillerde kendini gösterir. Bunlar;

- a) Sürtünme kaybı,
- b) Darbeden sonra hedefte toplanan kalıntı enerji,
- c) Numuneden kopan partikülün kazandığı kinetik enerji,
- d) Çatlak oluşumu

şeklinde özetlenebilir. Bu mekanizmalar tek tek irdelendiğinde; enerjinin sürtünme kaybına dönüşmesi partikülün numune yüzeyinde sürtünmesi ile mümkün olur ki bu durum daha ziyade düşük çarpma açılarında kendini gösterir. Kalıntı enerji oluşumu ise darbe sonrası numune bünyesinde biriken ve genellikle zaman içinde numunede hasara neden olan bir mekanizmadır. Darbe sonucu yüzeyden kopan parçalar, çarpma enerjisinden beslenirler. Çatlak oluşumu ise numune yüzeyine maksimum enerji transferi ile ilgili olup genel olarak artan çarpma açısı ile etkisini artıran bir mekanizma görünümündedir [123].

Deneysel çalışmalarda, ticari ürün olarak temin edilen bazalt cam-seramikler farklı tane boyutlarındaki feldspat, garnet ve silisyum karbür aşındırma partikülleri ile değişik partikül püskürtme basınçlarında (1,5 – 3 – 4 bar) ve açılarında (30 – 45 – 60 – 75 ve 90°) katı partikül erozyonuna maruz bırakılmıştır. Bu kısımda ise, erozyon oranlarına partikül çarpma açısının etkileri incelenmiştir.

Değişik basınçlarda (1,5 – 3 – 4 bar) hızlandırılarak sodyum feldspat ESF 501 SG ve ESF 501 GG aşındırıcı partikülleri bazalt cam-seramiklerine 30 – 45 – 60 – 75 ve 90° partikül çarpma açısı ile püskürtülerek erozif aşınmaya maruz bırakılmıştır ve erozyon oranları hesaplanmıştır. Erozyon oranları Tablo 6.4.'de verilmiştir ve bu veriler doğrultusunda Şekil 6.17.'deki grafik çizilmiştir.



Şekil 6.17. Na-Feldspat öğütülmüş (ESF 501 SG) -63 µm aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin partikül çarpma açısına göre erozyon oranları.

Sodyum feldspat aşındırma partiküllerinin bazalt cam-seramiklerinin üzerinde etkili olduğu partikül çarpma açısı tane boyut dağılımına ve partikül püskürtme basıncına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sodyum feldspat için iri tane boyut dağılımındaki Na-feldspat flote (ESF 501 GG) -300 µm aşındırıcı partiküllerin aşınmada daha etkin role sahiptir ve 1,5 bar ve 4 bar partikül püskürtme basınçlarında 90° partikül çarpma açısında en yüksek erozyon oranlarına ulaşılırken 3 bar püskürtme basıncında en yüksek aşınmanın 75° partikül püskürtme basıncında olduğu şekil 6.18.'de görülmektedir. 1,5 bar ve 4 bar püskürtme basıncında 30 – 45 – 60 – 75 – 90° partikül basıncında sırasıyla artan bir erozyon oranı görülmüştür. 3 bar püskürtme basıncında ise, 30°'den 75°'ye kadar artış görülürken, 90° partikül püskürtme basıncında 45°partikül çarpma açısındaki erozyon oranından yüksek 60° partikül çarpma açısındakinden düşüktür.

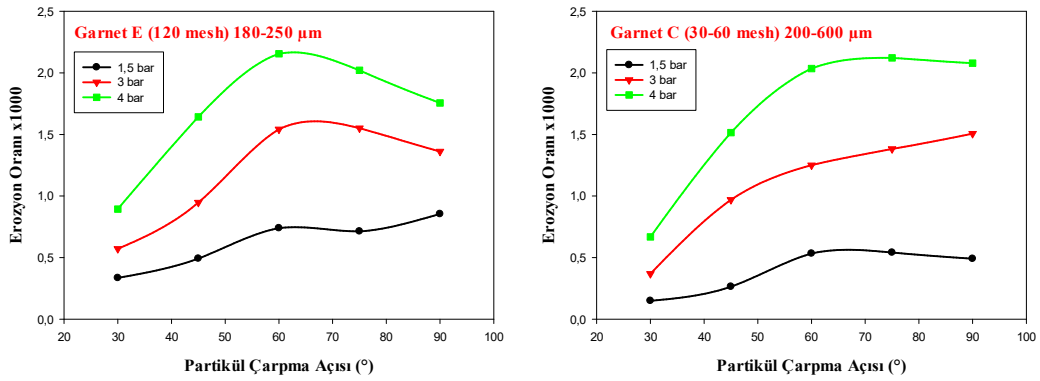
Na-Feldspat öğütülmüş (ESF 501 SG) -63 µm aşındırma partikülleri ile bazalt cam-seramiklerinin aşındırılması sonucunda ise partikül çarpma açısının, 1,5 bar püskürtme basıncında 60°'de etkisinin yüksek olduğu görülürken 3 ve 4 bar partikül püskürtme basıncında en etkili olduğu açı ise 75°'dir. 1,5 bar püskürtme basıncından 30°'den 60°'ye çıkılırken erozyon oranlarında artış görülmektedir ve 90° partikül çarpma açısında erozyon oranı düşmektedir. 3 ve 4 bar püskürtme basınçlarında ise 30°'den 75°'ye doğru erozyon oranlarında artış görülürken 90°de tekrar düşmüştür. 1,5 ve 4 bar için en düşük erozyon oranının 90° partikül çarpma açılarında olduğu

görülmektedir. 3 bar püskürtme basıncında ise en düşük erozyon oranı 30° partikül çarpma açısında karşılaşılmıştır.

Na-felspat aşındırıcı tozu ile yapılan deneylerde toz boyutunun erozif aşınma oranları üzerine etkisi incelendiğinde; artan toz boyutu ile erozif aşınma oranlarının bir miktar arttığı söylenebilir. Bu durum toz boyutunun artışı ile debi miktarlarının dolayısı ile numune yüzeyine ulaşan partikül miktarının artışı ile açıklanabilir. Partikül çarpma açılarının erozyon oranlarına etkisi incelendiğinde; 30° den itibaren 75° ye kadar artan çarpma açısı ile erozyon oranlarının genel olarak arttığı görülmektedir. Erozif aşınma sonuçları ile partikül çarpma açıları arasında direkt bir ilişki vardır. Bu ilişki aşınan malzemenin sünek yada gevrek olmasına bağlı olarak değişir. Sünek malzemelerde genellikle düşük açılarda yüksek aşınma oranları elde edilirken gevrek malzemelerde artan çarpma açısı ile aşınma oranları artar [124-126]. Gevrek malzemelerde oluşan erozif aşınma mekanizması incelendiğinde; düşen çarpma açısı ile partikülün kinetik enerjisini aşınma yüzeyine daha az transfer edebilmesi ve enerjinin düşük çarpma açılarında sürtünme gibi kayıplara uğraması sonucunda aşınma miktarları düşen çarpma açısı ile belirgin şekilde düşmektedir [119]. Artan partikül çarpma açısı ile erozyon oranlarının belirgin şekilde artması gevrek malzemelerdeki bu durumdan kaynaklanmaktadır. Çarpma açısının 90° olduğu deney şartlarında elde edilen erozyon oranları ise diğer çarpma açılarından kısmi farklılık göstermektedir. Açının 90° ye çıktığı deneylerde elde edilen erozyon oranlarında hem Na-felspat -63 µm tozu için hem de Na-feldspat -300 µm tozları için düşüş tespit edilmiştir. Çarpma açısının 90° olduğu deney şartlarında elde edilen aşınma oranlarındaki bu düşüşün, erozif aşınma deneylerinde etkili parametrelerden biri olan aerodinamik etki ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu etki; belirli bir basınçta hedef malzeme üzerine püskürtülen tozlarla birlikte numune üzerinde oluşan basınçlı hava akımı etkisidir. Numune ile nozul arasında oluşan bu hava akımı genel olarak aşındırıcı partiküllerin yönlerinden saparak belirtilen açılardan farklı açılar ile numune yüzeylerine çarpmasına sebep olur [119]. Basınçlı havanın yüksek açılarda yüzeye çarpması ile düşük açılarda yüzeye çarpması arasında farklılık olup yüksek açılarda oluşan akım etkisinin ve partikül sapmasının daha fazla olacağı, düşük açılarda ise hava akımının numune yüzeyinden sıyrılması sureti ile etkisinin daha az

olacağı düşünülmektedir. Bu noktada 90° lik çarpma açılarında elde edilen sonuçların bu etki ile ilgili olduğu düşünülmekte olup Na-felspat -63 μm tozu ile ulaşılan debi değerleri daha önce belirtilen nedenlerle oldukça düşük olmasının da etkisi ile, az miktardaki bu tozların belirtilen hava akımı etkisinde kalarak hedefinden saptığı ve daha az tozun numune yüzeyine ulaşması ile 1,5 bar ve 4 bar basınçlarda tüm şartlara göre daha düşük erozyon oranları elde edildiği tespit edilmiştir. Na-feldspat -300 μm tozunda ise artan debi ile birlikte daha fazla tozun numune yüzeyine çarpması ve 1,5 bar-4 bar basınçlarda tüm şartlara göre daha yüksek erozyon oranları elde edilmiştir. Çarpma açısının 3 bar olduğu deney şartlarında ise bu etki Na-felspat -63 μm tozunda kendini büyük oranda gösterirken Na-feldspat -300 μm tozunda daha az etkili bir durum ortaya çıkmıştır. Aerodinamik etki 4 bar püskürtme basınçlarında Na-felspat -63 μm toz için kendini daha fazla gösterirken, aynı püskürtme basıncında Na-feldspat -300 μm tozu için etki bu şartlarda daha fazla tozun numune yüzeyine ulaşması ile bağlantılı olarak daha az kendini göstermiştir. Aşındırıcı tozlar içinde en düşük yoğunluğa sahip olan grup Na-felspat tozları olup aerodinamik etkinin en çok bu toz ile aşındırılmış numuneler üzerinde kendini göstermesi beklenmektedir. Diğer yandan Na-felspat -300 μm tozu ile 4 barda yapılan deneyde diğerlerinden farklı bir davranış olarak 30° den 45° ye artan 60° de kısmen azalan ve 75° ye doğru tekrar artış eğilimine geçen bir davranış tespit edilmiştir. Aynı durum Dong ve arkadaşları tarafından da rapor edilmiş olup Si_3N_4 numunenin SiO_2 ve SiC tozları ile aşınması esnasında benzer durum görülmüştür. N davranışı olarak belirtilen bu durumun bünyenin sünek/gevrek davranışları birlikte göstermesi ile ilgili olduğu ifade edilmiştir [127].

Garnet C, garnet E aşındırıcı partikülleri, 1,5 – 3 – 4 bar basınç ile bazalt cam-seramikleri üzerine 30 – 45 – 60 – 75 ve 90° partikül çarpma açısı ile püskürtülerek erozif aşınmaya maruz bırakılmıştır. Erozyon oranları hesaplanmıştır ve Tablo 6.5.'de verilmiştir ve bu veriler doğrultusunda Şekil 6.18.'deki grafik elde edilmiştir.



Şekil 6.18. Garnet E (120 mesh) 180-250 μm ve garnet C (30-60 mesh) 200-600 μm , aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin partikül çarpma açısına göre erozyon oranları.

Garnet aşındırma partikülleri ile yapılan bazalt cam-seramiklerinin katı partikül erozyon sonuçları partikül çarpma açısının etkilerini araştırmak için Şekil 6.18.'de görülen grafikler çizilmiştir ve yorumlanmıştır. Her iki tane boyut dağılımındaki garnet aşındırma partikülleri ile yapılan 1,5 – 3 – 4 bar partikül püskürtme basıncı için en düşük erozyon oranları 30° partikül çarpma açılarında çıkarken en yüksek erozyon oranları ise farklı partikül çarpma açılarında karşılaşılmıştır.

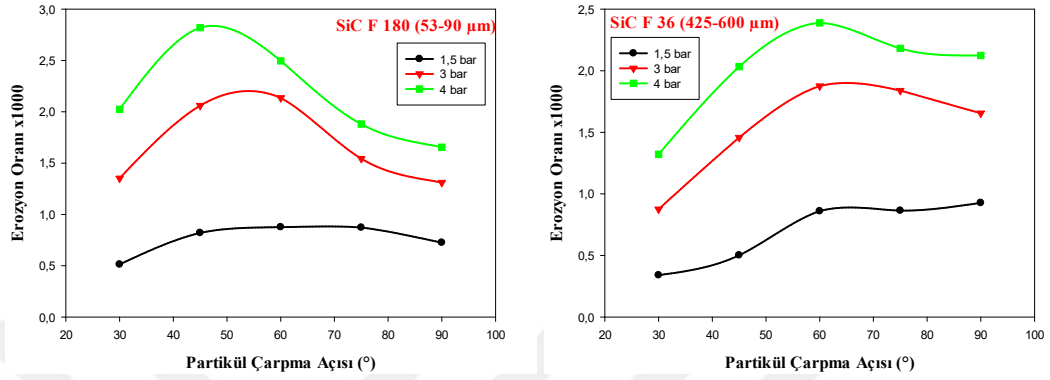
Garnet E 120 mesh 180-250 μm aşındırma partikülleri, 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ile hızlandırılması sonucunda aşındırılan bazalt cam-seramikleri 30° partikül çarpma açısından 60°'ye çıkılırken erozyon oranlarında artış görülmektedir (Şekil 6.18.). 75° partikül çarpma açısında erozyon oranı düşerken, en yüksek erozyon oranı 90° partikül çarpma açısında görülmektedir. 3 bar püskürtme basıncında 30 – 45 – 60 – 75° artan partikül çarpma açısı ile birlikte erozyon oranları artmaktadır. En yüksek değer ile 75° partikül çarpma açısında karşılaşılrken 90° partikül çarpma açısında 45°'deki değerden yüksek 60°'deki erozyon oranından düşük bir erozyon oranı elde edilmiştir. 4 bar partikül püskürtme basıncında en yüksek erozyon oranı değerine 60° partikül çarpma açısında karşılaşılrken en düşük aşınma 30° partikül çarpma açısında olmuştur. 75° ve 90° partikül çarpma açılarında erozyon oranı düşme gösterirken, 45°'deki erozyon oranından yüksek 60°'dekinden düşük erozyon oranları görülmektedir.

Garnet C (30-60 mesh) 200-600 μm aşındırma partikülleri ile bazalt cam-seramiklerinin aşındırılması sonucunda Şekil 6.18.'de çizilen grafiklere bakıldığında, 1,5 bar püskürtme basıncında 30 – 45 – 60 – 75° partikül çarpma açısına çıkılırken erozyon oranlarında artış görülmektedir. En yüksek erozyon oranı 75°'de iken 90°'de erozyon oranı düşmektedir. 90°'deki erozyon oranı 60°'dekinden düşük iken 45° partikül çarpma açısındaki erozyon oranından yüksek değerdedir. 3 bar partikül püskürtme basınçlarında elde edilen erozyon oranları 30°'den 90°'ye çıkarken artmakta ve en yüksek erozyon oranı 90° partikül çarpma açısında görülmektedir. 4 bar püskürtme basıncında karşılaşılan en yüksek erozyon oranı 75° partikül çarpma açısında iken en düşük erozyon oranı 30° partikül çarpma açısındadır. 30°'den 75°'ye çıkılırken artan erozyon oranlarının 90° partikül çarpma açısında düşüş görülmekte ve 60° ile 75° partikül çarpma açılarından oluşan erozyon oranları arasında bir değer elde edilmektedir.

Garnet tozları ile yapılan aşınma deneylerinde toz boyutunun artışı ile erozif aşınma oranı değerlerinde bazı noktalarda düşüşler gözlenmiştir. Bu durum Na-feldspat tozları ile yapılan deneylerden farklı olarak özellikle 30 – 45 – 60° çarpma açılarında yapılan deneylerde kendini göstermektedir. Artan çarpma açısı değerlerinde ise toz boyutu kaba olan tozlarda elde edilen erozif aşınma oranlarının diğer gruba göre artış gösterdiği gözlenmiştir. Na-feldspat ve Garnet tozları arasında oluşan bu farklılığın tozlar arasındaki sertlik farkı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu durumun Rebound etkisi olarak raporlanan saçılma ve saçılan tozların numune yüzeyi ile temas etmemiş tozlar arasındaki ilişkiden kaynaklandığı düşünülmektedir [120]. Bu mekanizmanın özellikle düşük açılarda ve yüksek debi değerlerinde (Garnet C) kendini gösterdiği düşünülmekte olup yüksek debilerde numune yüzeyinde oluşan toz saçılımının daha yoğun olacağı muhtemeldir. Bununla birlikte Garnet tozları ile yapılan erozyon deneylerinde elde edilen sonuçlar Na-feldspat tozu ile yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara benzerlikler içermekte olup çarpma açısının bazı değerlerine kadar artan erozif aşınma oranları gözlenirken bazı değerlerden sonra değişken erozif oranları dikkat çekmektedir. Bu durum çarpma açısının üst değerlere çıkması ile birlikte aşınma mekanizmalarındaki değişimlere işaret etmektedir. Sonuçlar incelendiğinde; Na-feldspat tozunda elde edilen erozif aşınma sonuçlarında

olduğu gibi artan çarpma açısı ile 30 – 45 – 60°'lik açılarda artan erozif aşınma oranları dikkat çekmektedir. Bu durumun daha önce açıklandığı üzere artan çarpma açısı ile partiküllerin numune yüzeyine enerji transferinin artışı ve aşınma oranlarının buna bağlı artması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Çarpma açısının üst değerlere çıkması ile nozül ile numune arasındaki hava akımı etkisinin devreye girmesi ile partiküllerin aşındırıcı etkilerini kısmen kaybetmeleri ve sonuç olarak erozif aşınma oranlarındaki düşüşler gözlenmiştir. Bu durum partikül boyutunun daha ince olduğu Garnet E tozunda 3-4 bar basınçlarda gözlenirken, partikül boyutunun kabalaştığı Garnet C tozunda etkisini kaybetmiş görünmektedir. Tozlar arasındaki bu boyutsal farklılıkla hava akımı etkisinin değişiminin tozlar arasındaki debi farklılıklarına dayandığı düşünülmektedir. Daha önce belirtildiği üzere Garnet C tozunda elde edilen debi değerleri Garnet E tozunda elde edilen debi değerlerine göre bariz bir şekilde yüksektir. Sonuç olarak üst çarpma açılarında (75° ve 90°) Garnet tozları arasındaki farklı erozif davranışlar; Garnet C tozunda artan toz boyutu, artan debi değerleri ile birlikte daha fazla tozun numune yüzeyine ulaşması dolayısı ile numune ve nozül arasındaki etkinin (aerodinamik etki) gücünü yitirmesi şeklinde yorumlanmıştır. Bununla birlikte hava akımı etkisi Na-feldspat -63 mm tozlarında üst çarpma açılarında erozif aşınma oranlarının daha fazla düşmesine sebep olurken, Garnet E tozunda üst çarpma açılarındaki düşüşler daha sınırlı kalmıştır. Bu durumun da; Na-feldspat ve Garnet tozları arasındaki yoğunluk farkı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Na-feldspat tozunun yoğunluğu yaklaşık 2,6 gr/cm³ iken Garnet tozunun yoğunluğu 4 gr/cm³ değerinin üzerindedir [100,105]. Bu durum hava akımı ile uçuşma etkisinin Na-feldspat tozu için daha yoğun olması şeklinde kendini göstermiştir. Diğer yandan Garnet tozlarında elde edilen erozif aşınma oranları Na-feldspat tozunda elde edilen oranlara göre net şekilde yüksektir. Bu durum, Garnet tozunun Na-feldspat tozuna göre daha yüksek olan sertlik değeri ile açıklanabilir. Literatür incelendiğinde yapılan çalışmalar erozif partiküllerin artan sertlik değerleri ile aşınmanın arttığını ortaya koymaktadır. Girish ve arkadaşları Kuvars, alümina ve SiC aşındırıcı tozları kullanarak yaptıkları çalışmada artan aşındırıcı toz sertliği ile erozif aşınma oranlarının arttığını belirtmişlerdir [128]. Benzer bir şekilde Gopi ve arkadaşları da artan aşındırıcı partikül sertlikleri ile erozif aşınma oranlarında artış tespit etmişlerdir [129].

SiC F 36 ve SiC F 180 aşındırıcı partiküllerinin, 1,5 – 3 – 4 bar basınç ile hızlandırılması sonucunda bazalt cam-seramik numuneleri 30 – 45 – 60 – 75 ve 90° partikül çarpma açısı ile aşındırılmış erozyon oranları hesaplanmıştır. Erozyon oranları tablo 6.6.'daki veriler doğrultusunda Şekil.6.19.'deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 6.19. SiC F 180 (53-90 µm) ve SiC F 36 (425-600 µm) aşındırma partikülleri ile aşındırılmış bazalt cam-seramik numunelerin partikül çarpma açısına göre erozyon oranları.

Diğer aşındırma partiküllerinde olduğu gibi silisyum karbür aşındırma partikülleri ile yapılan aşınma testleri sonucunda, değişen partikül püskürtme basıncına ve tane boyut dağılımına göre partikül çarpma boyutunun etkileri değişmektedir. İnce tane boyut dağılımına sahip SiC F 180 (53-90 µm) aşındırıcı partikülleri ile yapılan erozif aşınma testleri neticesinde en düşük erozyon oranları 1,5 bar için 30° partikül çarpma açısında olurken 3 ve 4 bar için 90° partikül çarpma açılarında karşılaşılmıştır. Şekil 6.20.'de bulunan grafiklerin incelenecek olursa 1,5 bar püskürtme basıncıyla yapılan testler sonucunda 30 – 45 – 60° partikül çarpma açılarında erozyon oranlarında artış görülmektedir ve en yüksek aşınma 60° partikül çarpma açısındadır. 75° partikül çarpma açısında erozyon oranında bir miktar düşüş gözlemlenirken, 90° partikül çarpma açısında 30°den fazla 45° partikül çarpma açısında elde edilen erozyon oranından az miktarda erozyon oranı olduğu görülmektedir. 3 bar püskürtme basınçlarında elde edilen erozyon oranları 30°'den 60°'ye yükselmektedir ve en yüksek erozyon oranı 60° partikül çarpma açısında karşılaşılmaktadır. 3 bar püskürtme basıncında 75° partikül çarpma açısında erozyon oranları düşmekte ve 30° ile 45° partikül çarpma açılarında elde edilen erozyon oranlarının arasında bir değere sahiptir. 90° partikül çarpma açısında ise en düşük değer elde edilmiştir. 4 bar püskürtme basıncında ise en yüksek erozyon oranı 45° partikül çarpma açısında

karşımıza çıkmaktadır. 60°'den 90° partikül çarpma açısına inildikçe erozyon oranları düşmektedir ve en düşük erozyon oran 4 bar püskürtme basıncında değer karşımıza 90° partikül çarpma açısında çıkmaktadır.

İri tane boyut dağılımına sahip SiC F 36 (425-600 μm) aşındırma partikülleri ile yapılan bazalt cam-seramiklerine uygulanan aşınma testleri neticesinde, 1,5 bar püskürtme basıncında 30 – 45 – 60 – 75 ve 90° partikül çarpma açılarında erozyon oranları artmaktadır. En düşük erozyon oranı 30° partikül çarpma açısında iken, en yüksek erozyon oranı 90° partikül çarpma açısında karşımıza çıkmaktadır. 3 ve 4 bar püskürtme basıncılarında 30°'den 60°'ye doğru artan partikül çarpmasına göre erozyon oranlarında artış görülmektedir. En yüksek erozyon oranı 60° partikül çarpma açısında, en düşük erozyon oranı ise 30° partikül çarpma açısındadır. 75° ve 90° partikül çarpma açılarında erozyon oranları düşüş göstermektedir. SiC F 36 (425-600 μm) aşındırma partikülleri ile yapılan aşındırma testleri sonucunda en yüksek erozyon oranı 4 bar püskürtme basıncında, 60° partikül çarpma açısında iken, en düşük erozyon oranı 1,5 bar püskürtme basıncında, 30° partikül çarpma açısında karşımıza çıkmaktadır.

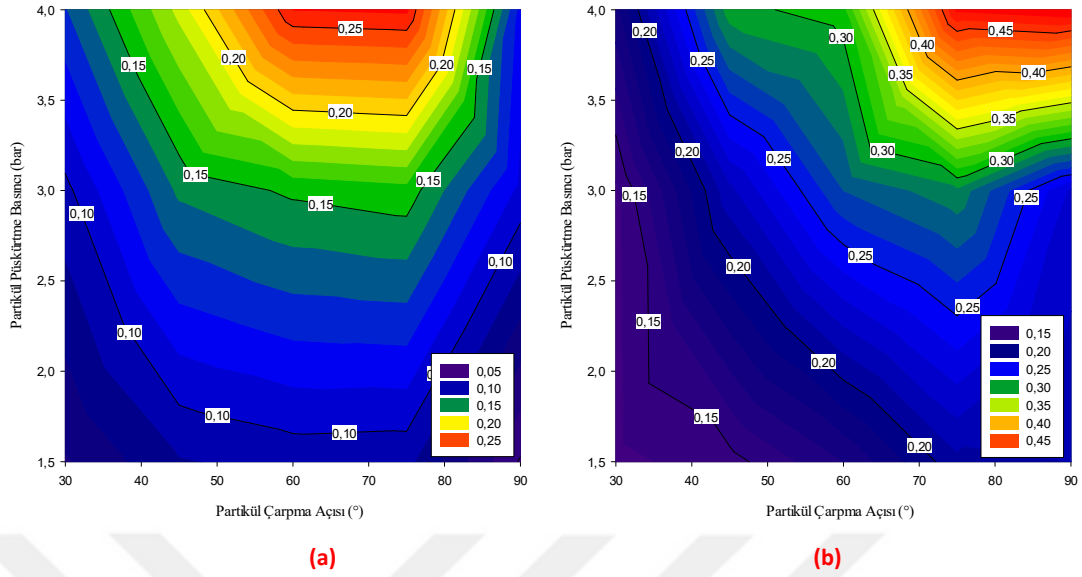
SiC tozu ile yapılan deneylerde elde edilen erozif aşınma oranları tüm deneylerde elde edilen oranlar ile karşılaştırıldığında en yüksek değerler olarak görünmektedir. Bu durum artan aşındırıcı toz sertliği ile erozif aşınma oranlarının artışı etkisini destekler nitelikte olup literatürde de benzer etki rapor edilmiştir [128,129]. Ayrıca açısal ve keskin köşeli parçacıkların yuvarlak ve oval parçacıklara göre daha fazla aşınmaya neden olduğu bilinmektedir [87]. SiC tozları ile elde edilen sonuçlar Garnet tozları ile elde edilen sonuçlara benzer olup düşük açılarda giderek artan yüksek açılardan itibaren ise azalan etki SiC tozu ile yapılan deneylerde de tespit edilmiştir. Bu durumun Garnet tozlarında gözlenen mekanizmaya dayandığı düşünülmekte olup artan çarpma açısı ile daha fazla tozun nozül-numune arasında kalan hava akımının etkisine gireceği ve aşınma etkisinin azalacağı düşünülmektedir. SiC F-36 tozlarına geçiş ile artan debi miktarlarının üst çarpma açılarında erozif aşınma oranlarını azaltma etkisi gücünü kaybetmiş şekilde görünmekte olup bu noktada Garnet tozlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. Diğer yandan Garnet

tozlarında toz boyutunun artışı ile özellikle düşük açılarda kendini gösteren saçılma etkisi SiC tozları ile yapılan deneylerde de kendini göstermiştir. SiC tozlarında 30 – 45 – 60° şartlarında Garnet deneylerindeki benzer olarak, F-180 tozları için elde edilen erozif aşınma oranları F-36 tozunda elde edilen oranlardan bir miktar fazladır. Bu durum, Garnet gibi sert bir yapıya sahip SiC tozlarında da ilgili şartlarda yüksek debi değerlerinde saçılma etkisinin devreye girmesi ile açıklanabilir. Çarpma açısının artışı ile tozların numuneye cepheden çarpmasının bu etkiyi arttırdığı ve yüksek çarpma açılarında yüksek debi değerlerinin aşınmayı arttırıcı etki yaptığı sonucu ortaya çıkmaktadır.

6.4.4. Erozyon oranlarının kontur diyagramları

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda kontur diyagramlar da çizilmiştir. Bu diyagramlar ile deneysel çalışmalarda yer verilmeyen diğer parametreler hakkında bilgi edinilebilmektedir. Örneğin, 1,5 ile 4 bar püskürtme basıncı arasında istenilen basınç ile 30° ile 90° partikül çarpa açısında herhangi iki değer için yaklaşık erozif oranı değerini görmek mümkündür. Çalışmalarda yer verilen üç farklı ve her bir tane boyut dağılımındaki aşındırıcı partiküller ile elde edilen sonuçlar Şekil 6.20., Şekil 6.21. ve Şekil 6.22. grafikler ile verilmiştir.

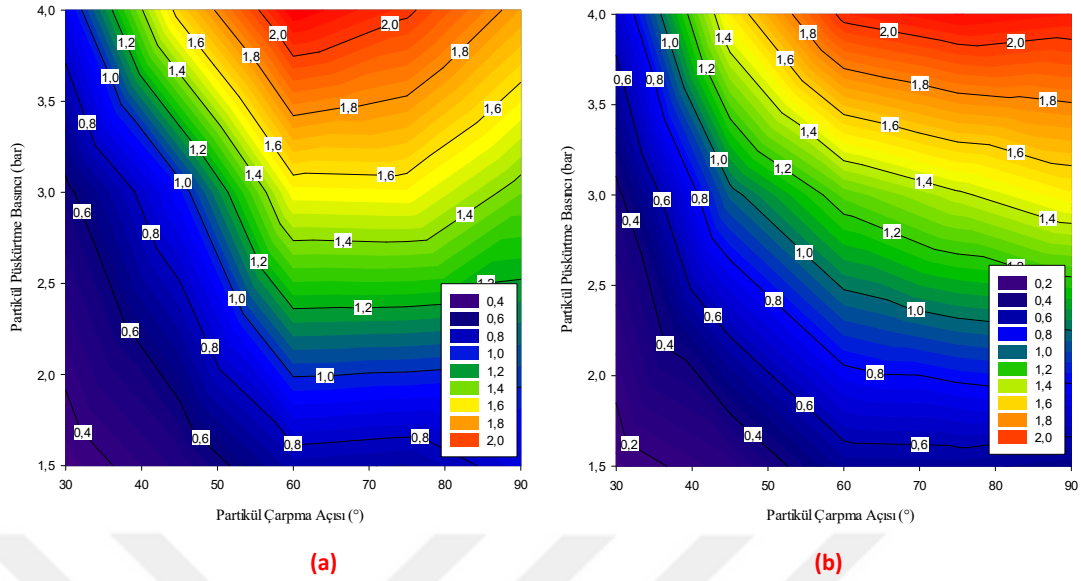
Şekil 6.20.'de öğütülmüş Na-felspat ESF 501 SG, (-63 µm) ve flote Na- Feldspat ESF 501 GG, (-300 µm) aşındırıcı partikülleri ile yapılan erozif aşınma testleri sonucunda elde edilen erozyon oranları ile oluşturulan kontur diyagramları verilmiştir.



Şekil 6.20. (a) Na-feldspat ESF 501 SG, (-63 μm) ve (b) Na-Feldspat ESF 501 GG, (-300 μm) aşındırıcı partikülleri ile elde edilen erozyon oranlarının kontur diyagramları.

Kontur diyagramlarda görüldüğü gibi, Na-Feldspat ESF 501 SG -63 μm için turuncu bölge aşınmanın en fazla olduğu bölgedir. Bu alan 4 bar partikül püskürtme basıncında ve 60° partikül çarpa açısına denk gelmektedir ve 0,25 çizgisinin üzerinde kalan bölümü ifade etmektedir. Ayrıca 75° ve 90° açılarında erozyon oranlarının düşüşü renklendirilmiş alanlarda görülmektedir (Şekil 6.20. (a)). Bazalt cam-seramiklerinin, Na- Feldspat ESF 501 GG, (-300 μm) aşındırma partikülleri ile aşındırılması sonucunda elde edilen kontur diyagramında, en fazla aşınma 4 bar partikül püskürtme basıncında 90° partikül çarpma açısında olduğu 0,45 çizgisinin üzerindeki alana karşılık geldiği görülmektedir (Şekil 6.20. (b)).

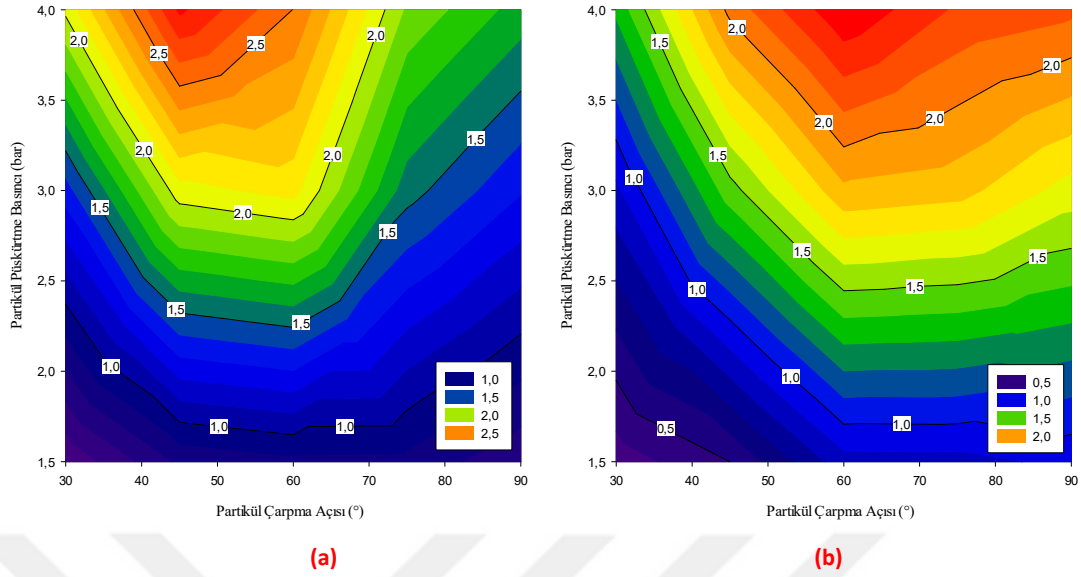
Şekil 6.21.'de garnet E (120 mesh, 180-250 μm) ve garnet C (30-60 mesh, 200 - 600 μm) aşındırıcı partikülleri ile yapılan erozif aşınma testleri sonucunda elde edilen erozyon oranları ile oluşturulan kontur diyagramları görülmektedir.



Şekil 6.21. (a) Garnet E (120 mesh, 180-250 μm) ve (b) garnet C (30-60 mesh, 180-600 μm) aşındırıcı partikülleri ile elde edilen erozyon oranlarının kontur diyagramları.

Bazalt cam-seramiklerinin Garnet aşındırıcı partikülleri ile aşındırılması sonucunda elde edilen kontur diyagramları Şekil 6.21.'de verilmektedir. Garnet E (120 mesh, 180-250 μm) aşındırıcı partikülleri ile aşınma sonucunda en yüksek aşınmanın 2,0 çizgisinin üzerine denk gelen alanda yani 4 bar partikül püskürtme basıncında ve 60° partikül çarpma açısında olduğu görülmektedir. 75° ve 90° partikül çarpma açılarında aşınmanın azaldığı kontur diyagramından da anlaşılmaktadır (Şekil 6.21. (a)). Garnet C (30-60 mesh, 200 - 600 μm) aşındırma partikülleri ile aşınmanın 2,0 çizgisinin üzerinde kalan alanda olduğu görülürken, bu alanın 4 bar partikül püskürtme basıncının ve 75° partikül çarpma açısında olduğu söylenebilir. 90° partikül çarpma açısında aşınmanın düştüğü kontur diyagramında görülebilmektedir (Şekil 6.21. (b)).

Şekil 6.22.'de silisyum karbür F 180 (53-90 μm) ve silisyum karbür F 36 (425-600 μm) ve aşındırıcı partikülleri ile yapılan erozif aşınma testleri sonucunda elde edilen erozyon oranları ile oluşturulan kontur diyagramlarına yer verilmektedir.



Şekil 6.22. (a) SiC F 180 (53-90 µm) ve (b) SiC F 36 (425-600 µm) aşındırıcı partikülleri ile elde edilen erozyon oranlarının kontur diyagramları.

Silisyum karbür aşındırıcı partikülleri ile bazalt cam-seramiklerinin aşındırılması sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda Şekil 6.22.'de kontur diyagramlar elde edilmiştir. SiC F 180 (53-90 µm) aşındırıcı partikülleri ile yapılan aşınma testleri sonucunda en yüksek aşınmanın 2,5 çizgisinin üzerinde kalan alandadır. Bu alan 45° partikül çarpma açısında ve 4 bar partikül püskürtme basıncında olmaktadır (Şekil 6.22. (a)). Büyük tane boyut dağılımına sahip SiC F 36 (425-600 µm) aşındırıcı partikülleri ile elde edilen aşınma testleri sonucunda kontur diyagramı Şekil 6.22. (b)'de verilmiştir. Bu diyagramda, en yüksek aşınma bölgesi 2,0 çizgisinin üzerinde kalan alanda olmaktadır. 4 bar partikül püskürtme basıncında ve 60° partikül çarpma açısındadır.

Kontur diyagramları genel olarak değerlendirildiğinde; tüm şartlar için artan püskürtme basıncı ile eroziv aşınma oranlarının net şekilde arttığı görülmektedir. Çarpma açısının değişiminin eroziv aşınma oranları üzerindeki etkisine bakıldığında sonuçlar birbirine yakın olmakla birlikte kısmi değişiklikler gözlenmiştir. Bu durum aşındırıcı tozun fiziksel özellikleri (sertlik, boyut, şekil) ile çarpma açısının değişimine bağlı olarak aşınma mekanizmalarında değişiklikler olduğunu göstermektedir. Aşındırıcı tozların debilerindeki artışın aşınma üzerindeki etkisinin artan partikül hızı (püskürtme basıncı) ile arttığı literatürde rapor edilmektedir [130].

Diğer yandan, çarpma açısının değişimi ile tozların debileri arasındaki ilişki incelendiğinde; her üç aşındırıcı toz için artan debi miktarları ile (Na-feldspat için - 63 mikrondan -300 mikrona geçişte, Garnet için Garnet E den Garnet C ye geçişte, SiC için SiC F180 den SiC F36 ya geçişte) en yüksek aşınma oranı değerlerinin elde edildiği çarpma açılarından bir miktar arttığı, dikkat çekmektedir. Gevrek malzemelerin erozif aşınması ile ilgili çalışmalarda genel olarak; düşük çarpma açılarından yüksek çarpma açılara gidildikçe açı ile doğru orantılı olarak artan erozif aşınma oranı değerleri rapor edilmektedir [131-134]. Toz boyutunun artışı ile birlikte artan debilerin etkisi ile elde edilen en yüksek erozif aşınma değerleri genel olarak yüksek açılarda (özellikle 60° üzeri) elde edilmişken, toz boyutunun ve debinin düşük olduğu şartlarda yapılan deneylerde en yüksek erozif aşınma değerleri daha düşük açılarda (45° ve 60° arası) tespit edilmiştir. Bu durum debinin yüksek olduğu şartlarda elde edilen sonuçların standart sonuçlara daha yakın olduğu, düşük debilerde ise standarttan sapıldığını göstermektedir. Bu sonuç; daha önceki sonuçlarda açıklanan numune-nozül arasında oluşan hava akımı etkisi (aerodinamik etki), yüzeyden seken partiküller ile yüzeye henüz ulaşmamış partiküller arasındaki etkileşimler (Rebound etkisi) gibi durumların farklı debi değerlerinde kendilerini daha fazla göstermesi ile açıklanabilir. Artan debi miktarlarının ve dolayısı ile numune yüzeyine gönderilen toz miktarındaki artışın bu etkilerin değişimine sebep olduğu düşünülmektedir. Na-felspata göre daha sert olan Garnet ve SiC tozlarında kendini gösteren bu mekanizmalar çarpma açılarından ve debi miktarlarından etkilenmektedir. Düşük debi değerlerinde saçılma etkisi kendini daha az gösterirken, yüksek debi değerlerinde numune yüzeyine çarpan partikül miktarının artışı ile saçılma daha fazla olmaktadır. Bu mekanizmanın Garnet ve SiC tozları ile yapılan deneylerde düşük açı değerlerinde kendini gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum artan debi miktarlarında düşük açı değerlerinde bu tozlar için aşınmayı arttırıcı etki yapmıştır. Hava akımı etkisi ise yüksek çarpma açısı değerlerinde kendini daha çok göstermekte olup yüksek açılarda havanın numune ile nozül arasında sıkışma ve sirküle olma etkisi daha yüksek olmaktadır. Aerodinamik etki olarak tanımlanan bu etki, saçılma etkisinden farklı olarak artan debi miktarları ile daha fazla tozun numune yüzeyine ulaşması ile azalmaktadır.

Aşındırıcı tozun SiC olduğu deney sonuçlarında diğer deneylerden farklı olarak en yüksek erozif aşınma değerlerinin elde edildiği çarpma açıları, hem ince hem de kaba boyutlu tozlarda bir miktar azalma göstermektedir. Bu durum SiC ile yapılan deneylerde orta açılarda (45° ve 60°) en yüksek erozif aşınma değerlerinin elde edilmesi şeklinde kendini göstermekte olup bu şartlarda sert ve köşeli hatlara sahip SiC partiküllerinin numune yüzeyine çarpması ve yüzeyi kazıyarak parça çıkarma etkisinin en yüksek değerlere ulaşması şeklinde düşünülmüştür. Bu etki muhtemelen bazalt numune ile SiC aşındırıcı partikül arasındaki sertlik değerlerinin oldukça farklı olması ve SiC partiküllerin keskin köşeli hatlarından kaynaklanmaktadır. Garnet tozları da bazalta göre sert olmakla birlikte oval toz morfolojisinin bu etkinin daha sınırlı şekilde kendini göstermesine sebep olmuştur. Na-feldspat tozunun sertliğinin bazaltın sertliğine yakın olmasının da Na-feldspat için bu etkinin kendini gösterememe nedeni olarak kabul edilebilir. Aynı mekanizmanın köşeli SiC partiküllerin bu açı değerlerinde yüzeye çarptığında yüzeyde yuvarlanma/sürtünme etkisi ile ikincil hatta üçüncül darbelerin oluşumu sonucu daha etkin hale geldiği de düşünülmektedir ve Hao ile arkadaşlarının çalışmalarıyla benzerlik göstermektedir. Hao ve arkadaşları, gevrek malzemelerde 40° - 50° lik çarpma açılarında köşeli partiküllerin yüzeye çarpması sonucu ikincil darbelerin ve ikincil çatlakların ortaya çıktığını belirtmektedir [135].

6.5. Bazalt Cam-Seramiklerinin Aşınma Yüzey Analizleri

Bazalt cam seramiklerinin katı partikül erozif aşındırılması sonrasında aşınma yüzeyleri 3D optik profilometre ve makro olarak analiz edilmiştir.

Na-feldspat ESF 501 SG ($-63 \mu\text{m}$), Garnet E 120 mesh (180 - $250 \mu\text{m}$), SiC F 180 (53 - $90 \mu\text{m}$) aşındırma partikülleri ile $1,5 - 3$ bar püskürtme açısında $30 - 60 - 90^\circ$ partikül çarpma açılarında aşındırılan bazalt cam-seramiklerinin aşınma yüzeyleri 3D optik profilometre ile incelenmiştir.

Na-feldspat öğütülmüş (ESF 501 SG) $-63 \mu\text{m}$ ve flote (ESF 501 GG) $-300 \mu\text{m}$, garnet C (30-60 mesh) 200 - $600 \mu\text{m}$, garnet E (120 mesh) 180 - $250 \mu\text{m}$ ve Silisyum

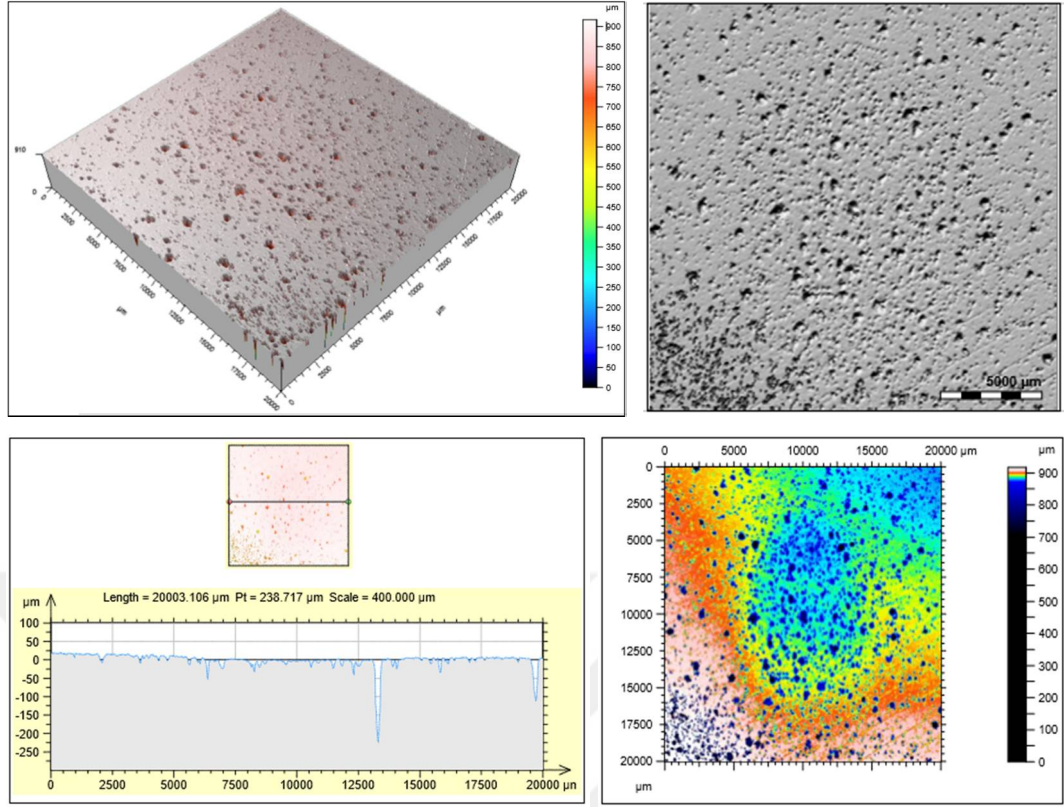
Karbür F 36 (425-600 μm) ve Silisyum karbür F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile 1,5 – 3 – 4 bar püskürtme basınçlarında 30 – 45 – 60 – 75 ve 90° partikül çarpma açısı ile aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin aşınma yüzeyleri de makro olarak görüntülenerek aşınma özellikleri irdelenmiştir.

6.5.1. Aşındırılan bazalt cam-seramiklerinin optik profilometre görüntüleri

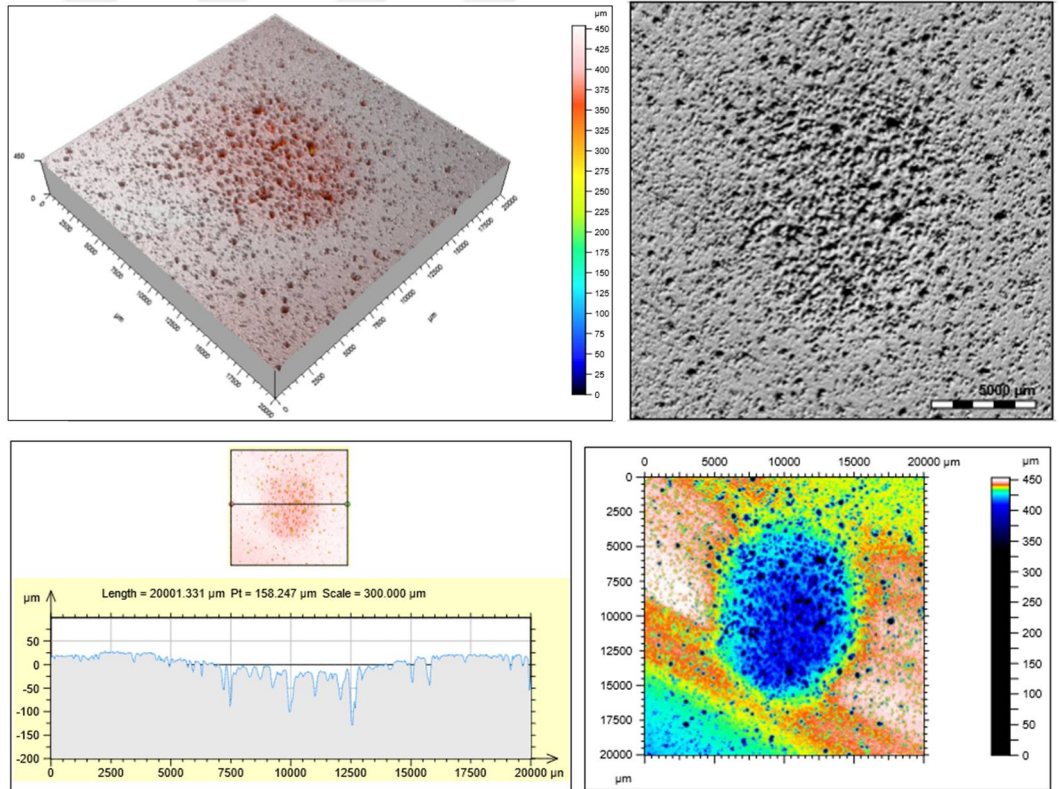
Bazalt cam-seramiklerinin erozif aşınma sonrasındaki yüzeyleri, Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi laboratuvarında bulunan Nanovea marka optik profilometre ile incelenmiştir. Optik profilometrenin sahip olduğu prob ucu 20 mm x 20 mm'lik alanda tarama yapabilmektedir. Bu sebeple, bu alan içerisinde kalan aşınma izleri hakkında bilgi edinilebilmektedir. Na-feldspat ESF 501 SG (-63 μm), Garnet E 120 mesh (180-250 μm), SiC F 180 (53-90 μm), aşındırma partikülleri ile 1,5 bar ve 3 bar basınçlarında 30 – 60 – 90° partikül çarpma açılarında erozif aşındırılan bazalt cam-seramiklerinin optik profilometre analizlerinden elde edilen görüntüler bu kısımda verilmiştir.

6.5.1.1. Sodyum feldspat aşındırıcı partikülleri ile oluşan aşınma yüzeyleri

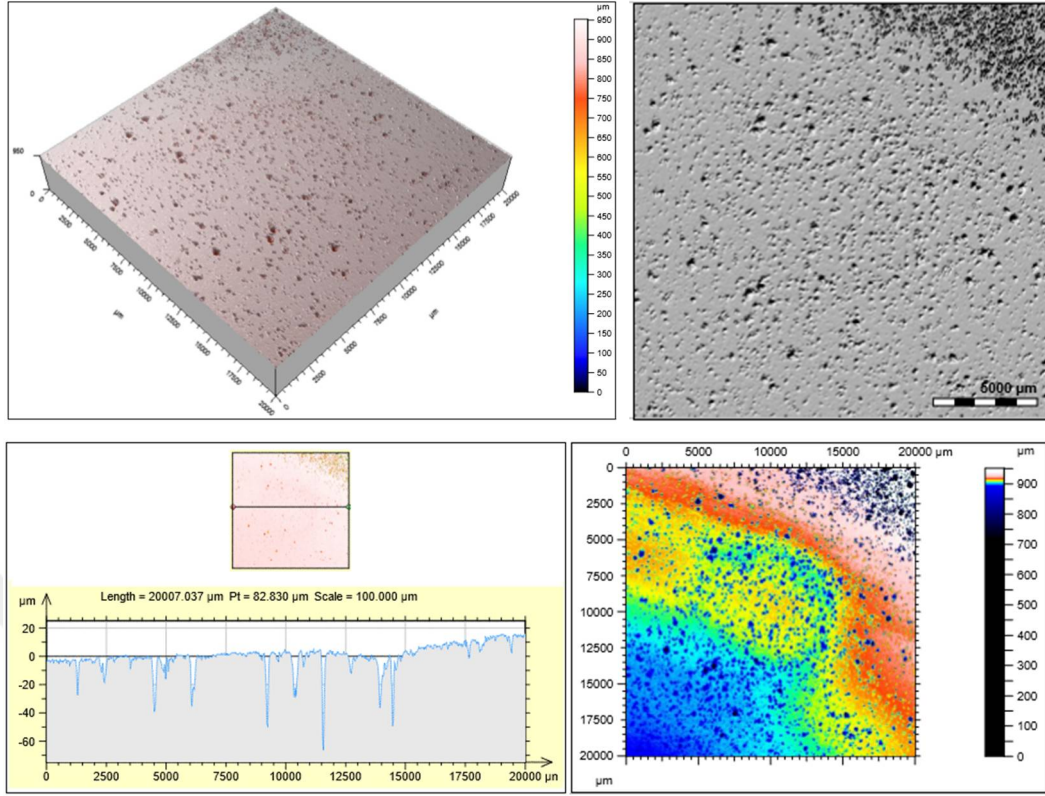
Sodyum feldspat aşındırma partikülleri ile aşındırılan bazalt cam-seramiklerinin 1,5 ve 3 bar partikül püskürtme basıncı ile 30 – 60 – 90° partikül çarpma açılarında aşındırılan bazalt cam-seramiklerinin aşınma yüzeyleri optik profilometre ile incelenmiştir. Şekil 6.23., Şekil 6.24. ve Şekil 6.25.'de Na-Feldspat ESF 501 SG -63 μm aşınma partikülleri ile 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ve 30 – 60 – 90° partikül çarpma açılarında erozif aşınmaya maruz bırakılan bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre ile elde edilen aşınma yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 6.23. Na-Feldspat ESF 501 SG -63 µm aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.



Şekil 6.24. Na-Feldspat ESF 501 SG -63 µm aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ve 60° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.



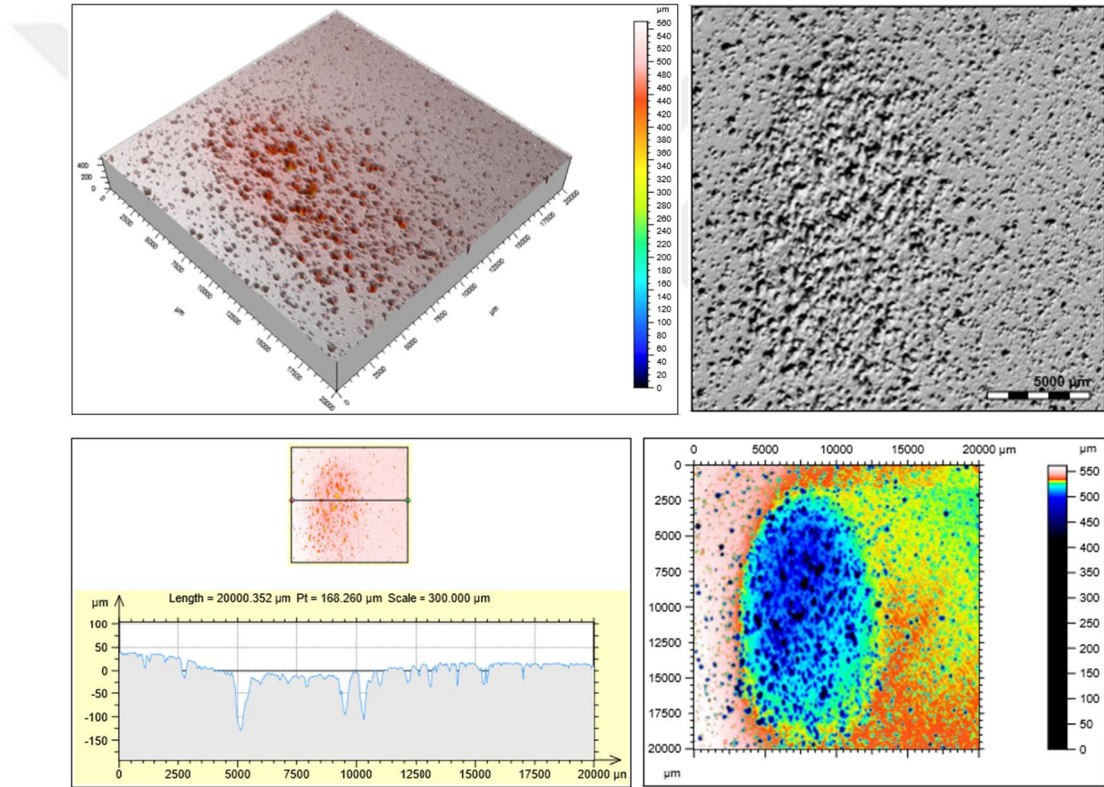
Şekil 6.25. Na-Feldspat ESF 501 SG -63 μm aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ve 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.

Na-Feldspat ESF 501 SG -63 μm (öğütülmüş) aşındırma partikülleri, 1,5 bar basınç ile hızlandırılan aşındırma partikülleri $30 - 60 - 90^\circ$ partikül çarpma açılarında bazalt cam-seramik numunelerin yüzeyine temas ettirilmesi sonucunda farklı geometrik şekillerde ve topografyada aşınma yüzeyleri elde edilmiştir. 30° partikül çarpma açısında (Şekil 6.23.) aşındırma partiküllerinin 1,5 barda püskürtülmesi sonucunda oluşan aşınma yüzeyi elipsoit bir şekilde iken 60 ve 90° çarpma açılarında dairesel olarak yakın durumda olduğu gözlenmiştir.

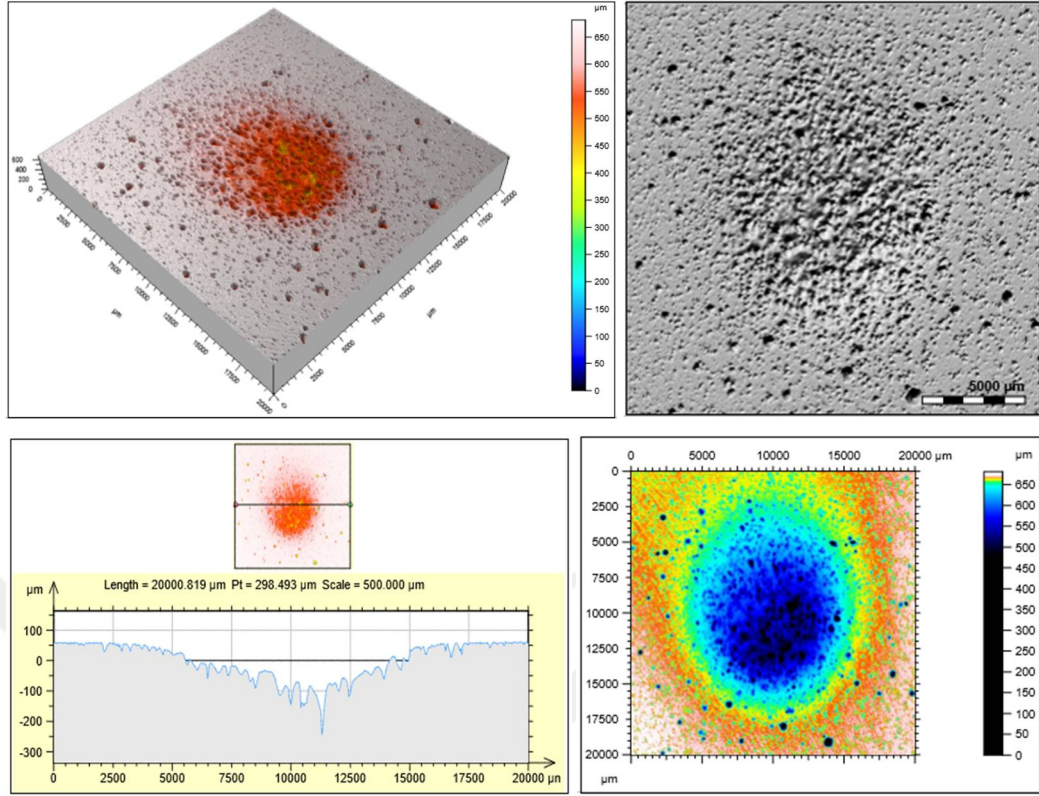
1,5 bar basınç ve 30° çarpma açısında derinlik skalasına bakıldığında (Şekil.6.23) renklerden görülebileceği gibi bazalt cam-seramiklerinin yüzeyinden 850 – 950 μm civarlarında derinliğe inilmektedir. Fakat profilometrenin numune yüzeyindeki poroziteleri de aşınma derinliği olarak belirttiğini de göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Bunun için, çizgisel aşınma yüzeyini dikkate almanın daha doğru olacağı düşünülmektedir. Şekil.6.23.'de aşınma yüzeyindeki belirlenen iki nokta arasındaki çizgisel aşınma derinliği yaklaşık 238.717 μm 'dir. Şekil 6.24.'de 1,5 bar partikül püskürtme basıncında 60° partikül çarpma açısında 450 μm derinliğe inildiği

görülürken, çizgisel doğrultuda aşınma yüzeyine bakıldığında 158,247 μm seviyelerindedir. Şekil 6.25.'de 1,5 bar partikül püskürtme basıncında 90° çarpma açısı ve 1,5 bar püskürtme basıncında 900 – 950 μm civarlarında derinliğe inildiği görülebilmektedir. Çizgisel doğrultudaki aşınma yüzeyi ise 82,830 μm 'dir.

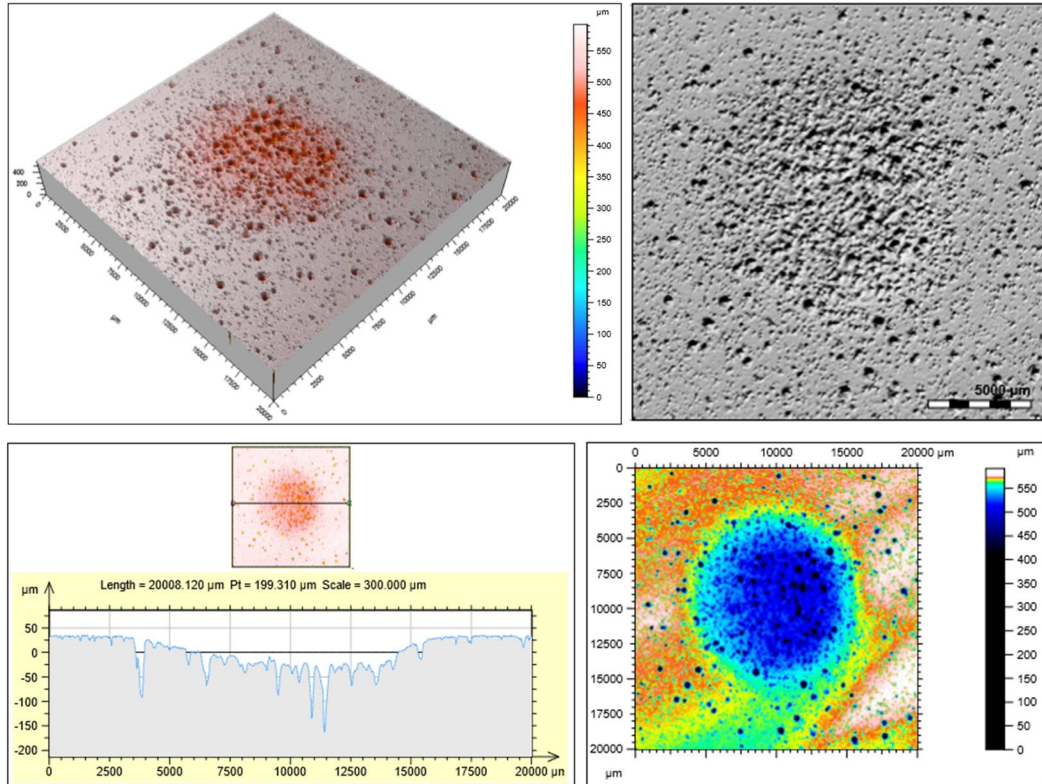
Şekil 6.26., Şekil 6.27. ve Şekil 6.28.'de Na-Feldspat ESF 501 SG -63 μm (öğütülmüş) aşınma partikülleri ile 3 bar partikül püskürtme basıncı ve 30 – 60 – 90° partikül çarpma açılarında eroziv aşındırılan bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre ile elde edilen aşınma yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 6.26. Na-Feldspat ESF 501 SG -63 μm aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.



Şekil 6.27. Na-Feldspat ESF 501 SG -63 μm aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 60° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.

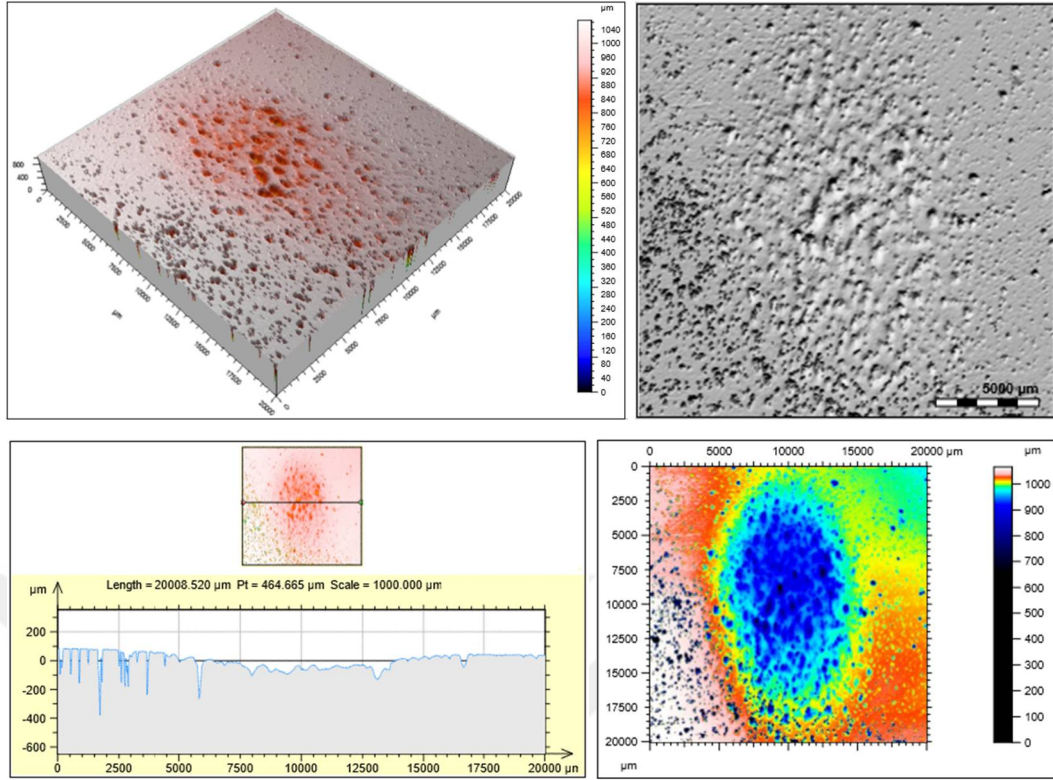


Şekil 6.28. Na-Feldspat ESF 501 SG -63 μm aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.

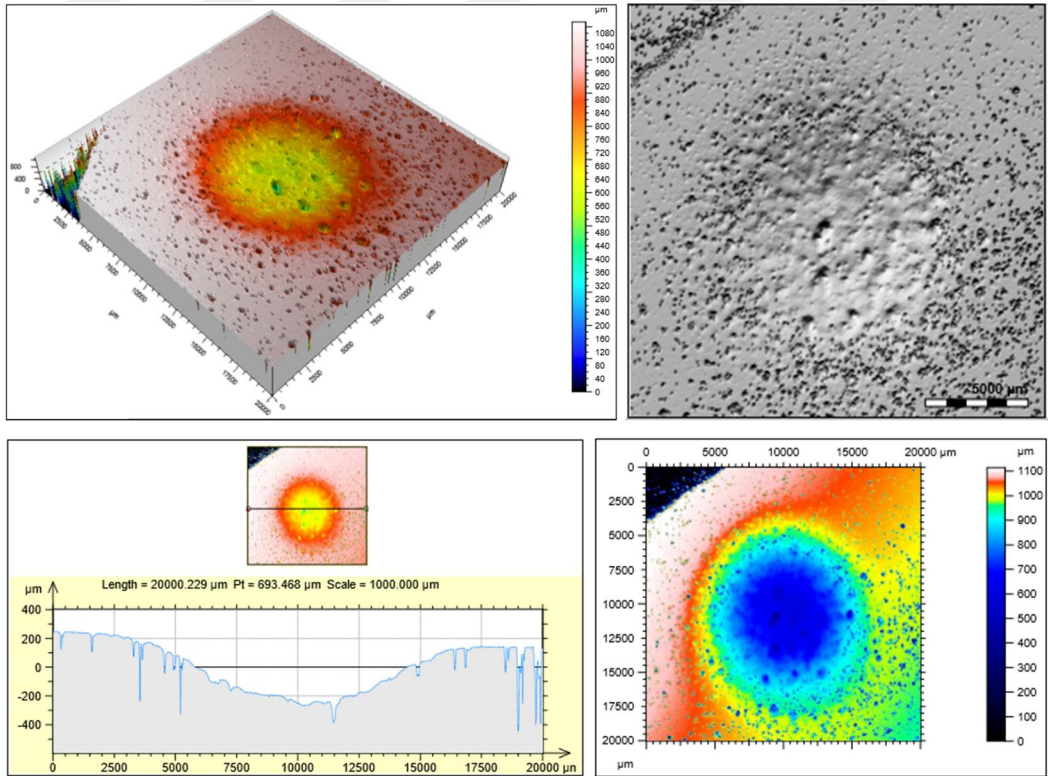
30 derece partikül çarpma açısında aşınma yüzey alanının diğer partikül çarpma açılara oranla daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 6.26.'da verilen renk skalasına bakıldığında yüzeyden 550 μm civarında derinliğe inildiği anlaşılmaktadır. Çizgisel doğrultuda aşınma izine bakıldığında ise 168,260 μm olduğu görülmektedir. Şekil 6.27. ve Şekil.6.28.'de bazalt cam-seramikleri 3 bar partikül püskürtme basıncında ve 60 – 90° çarpma açılarında aşınma yüzeyleri incelendiğinde, aşınma yüzey alanı küçülürken, aşınma derinliğinin arttığı söylenebilir. Şekil 6.27.'de 3 bar partikül püskürtme basıncında ve 60° partikül çarpa açısında renk skalasına bakıldığında 650 μm civarında aşınma derinliği, 298,493 μm çizgisel doğrultuda aşınma izi mevcuttur. Şekil 6.28'da 3 bar partikül püskürtme basıncında ve 90° partikül çarpma açısında renk skalasındaki değer 550 μm , çizgisel doğrultuda aşınma izi ise 199,310 μm 'dir. Bazalt cam-seramiklerinin erozif aşınmanın yüzeyden oluşturduğu aşınma derinliği 60° partikül çarpma açısında diğer partikül çarpma açılarından daha yüksektir. Eroziyon oran hesaplarında da 60° partikül çarpma açısındaki değerler daha yüksektir (30 – 60 – 90° açıları arasında) ve optik profilometre sonuçları ile uyum göstermektedir.

6.5.1.2. Garnet aşındırıcı partikülleri ile oluşan aşınma yüzeyleri

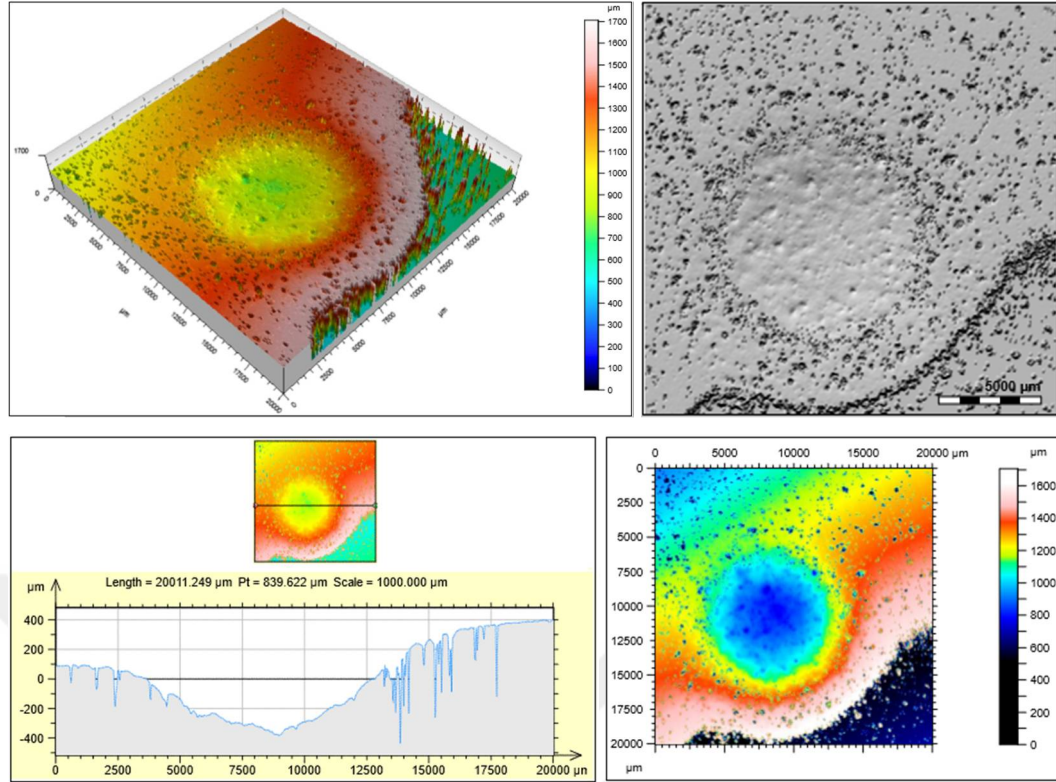
Şekil 6.29. - 6.31.'de bazalt cam-seramiklerinin garnet E 120 mesh (180-250 μm) aşınma partikülleri ile 1,5 bar ve 30 – 60 – 90° partikül çarpma açılarında oluşturdukları aşınma izlerinin yüzey görüntüleri görülmektedir. Şekil 6.29.'dan görüldüğü gibi 30° partikül çarpa açısında renk skalası dikkate alındığında aşınma derinliğinin 1040 μm , çizgisel doğrultudaki aşınma derinliğinin de 464,665 μm olduğu tespit edilmiştir. 60° partikül çarpma açısında (Şekil 6.30.) renk skalasından 1100 μm aşınma derinliği ve 693,866 μm çizgisel doğrultuda aşınma derinliği ölçülmüştür. 90° partikül çarpma açısında (Şekil 6.31.) aşınma derinliği 700-1600 μm (yaklaşık 900 μm), çizgisel doğrultudaki aşınma derinliği ise 839,622 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 6.29. - 6.31.'den görüldüğü gibi renk skalalarından en derin aşınma izinin 60° partikül çarpma açısında olduğu, çizgisel doğrultudaki aşınma izleri dikkate alındığında ise en yüksek aşınmanın 90° partikül çarpma açısında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.29. Garnet E 120 mesh (180-250 μm) aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.



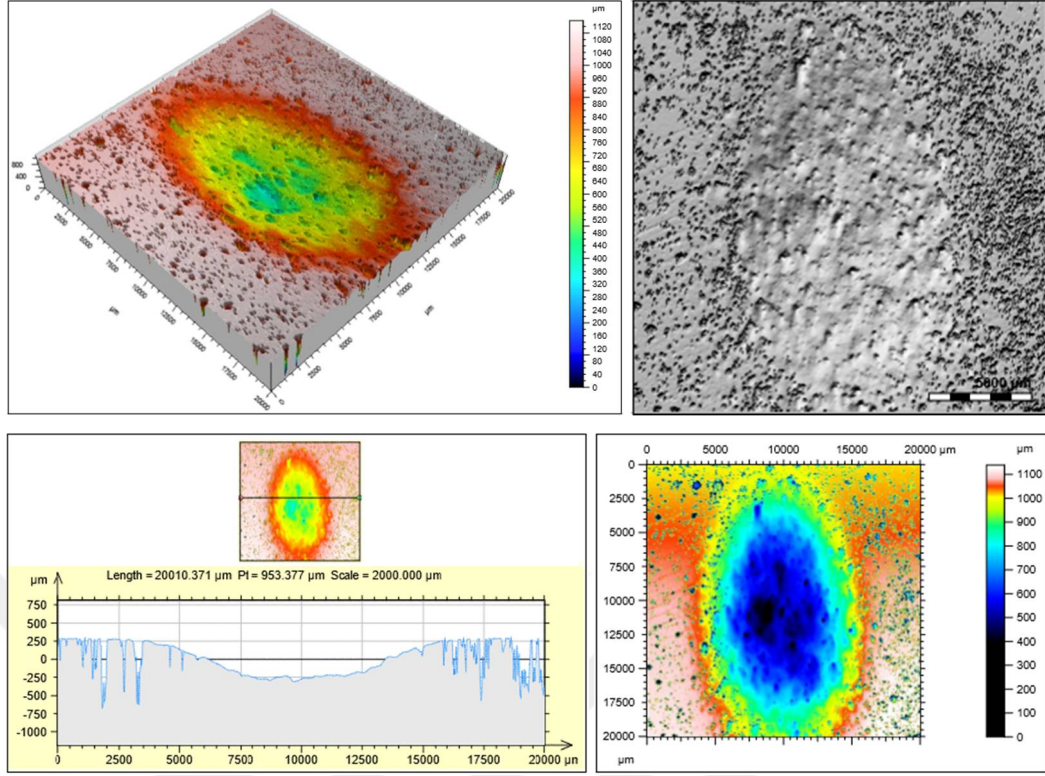
Şekil 6.30. Garnet E 120 mesh (180-250 μm) aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ve 60° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.



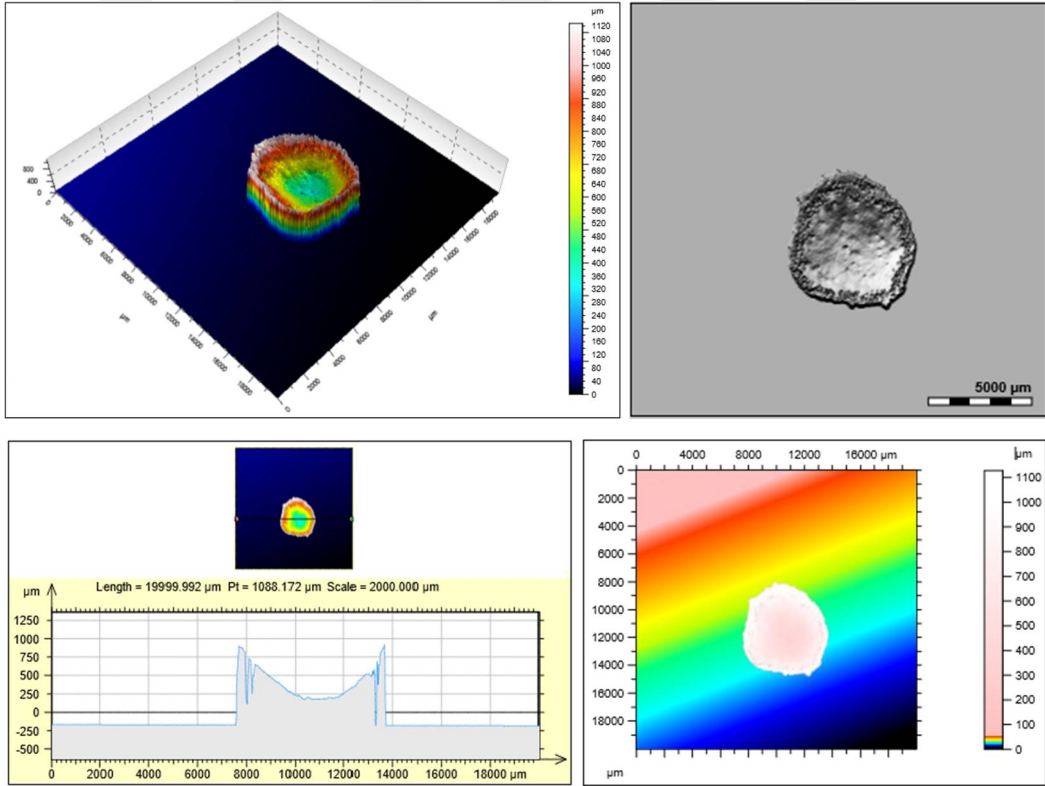
Şekil 6.31. Garnet E 120 mesh (180-250 µm) aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar partikül püskürtme basıncı ve 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.

Şekil 6.32. - 6.34.'de Garnet E 120 mesh (180-250 µm) aşınma partikülleri ile 3 bar partikül püskürtme basıncı ve 30 – 60 – 90° partikül çarpma açılarında eroziv aşınmaya maruz bırakılan bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre aşınma yüzeyleri görülmektedir.

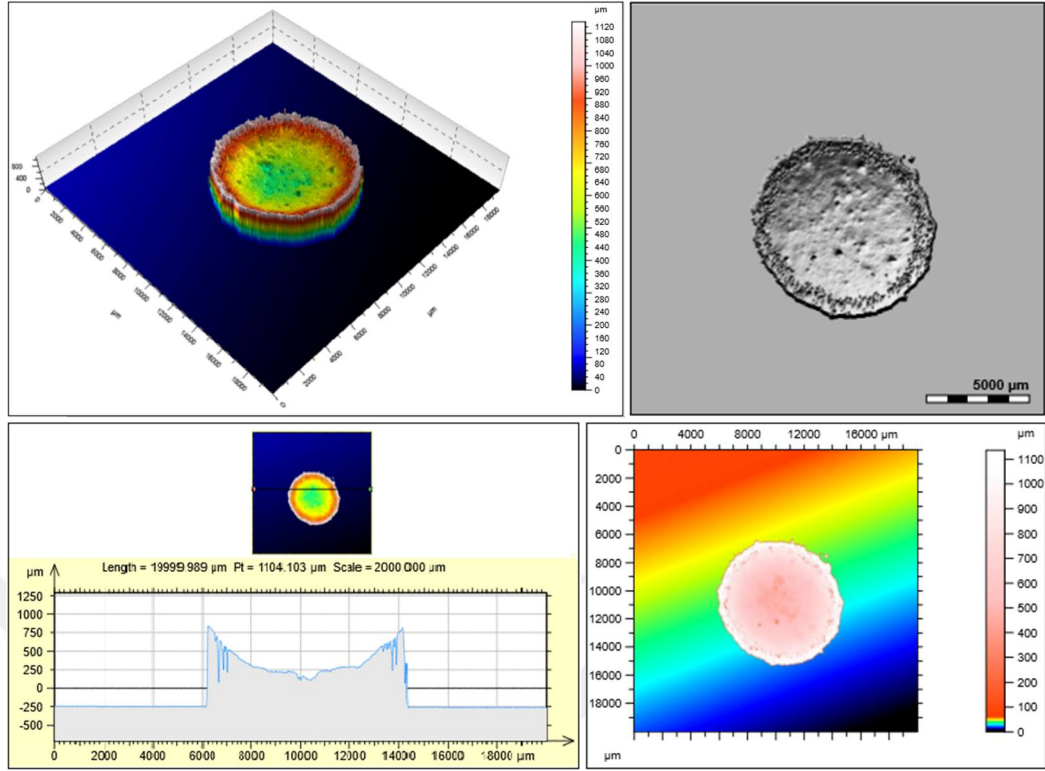
30° partikül çarpma açısında renk skalasına göre aşınma derinliği 1100 µm (Şekil 6.32.) çizgisel doğrultudaki aşınma izi derinliği de 953,377 µm'dir. 3 bar partikül püskürtme basıncında 60° ve 90° partikül çarpma açılarında Şekil 6.33. ve Şekil 6.34.'de görüldüğü gibi kesin bir sonuç elde edilememiştir. Deneysel çalışmaların yapıldığı 3D optik profilometre ile numune yüzeyinden 2 mm (2000 µm) derinliğe kadar görüntü elde edilmektedir. Bu durum göz önüne alınırsa aşınma derinliğinin numune yüzeyinden 2000 µm'den fazla olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.32. Garnet E 120 mesh (180-250 μm) aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.



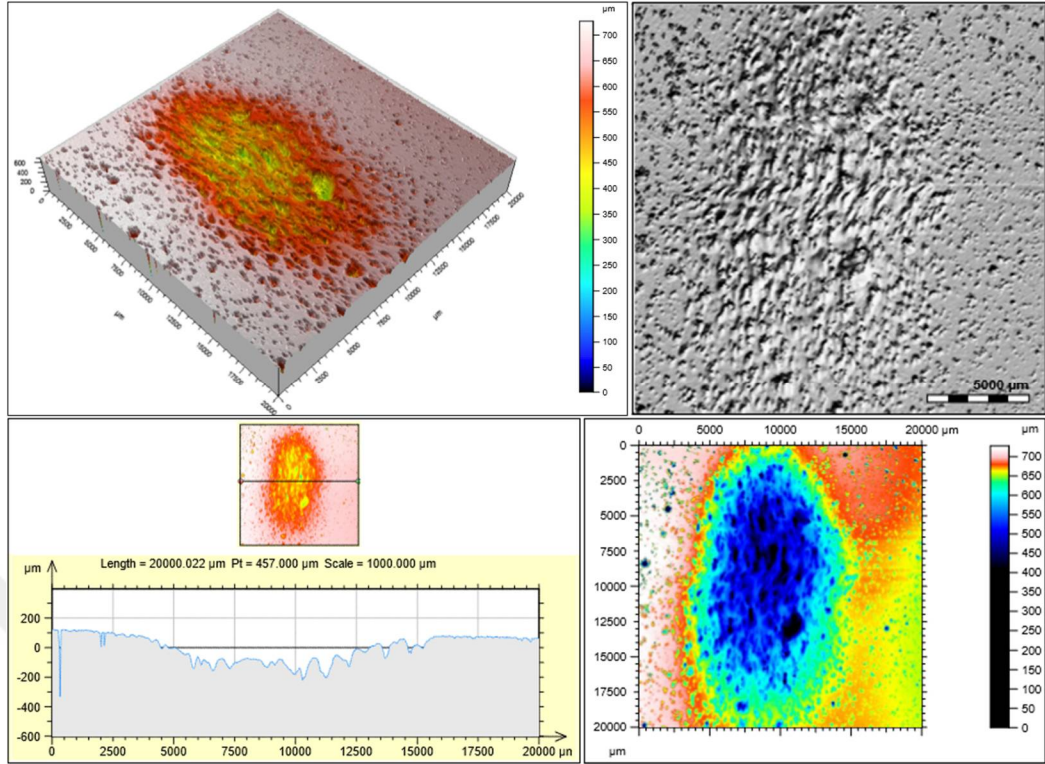
Şekil 6.33. Garnet E 120 mesh (180-250 μm) aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 60° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.



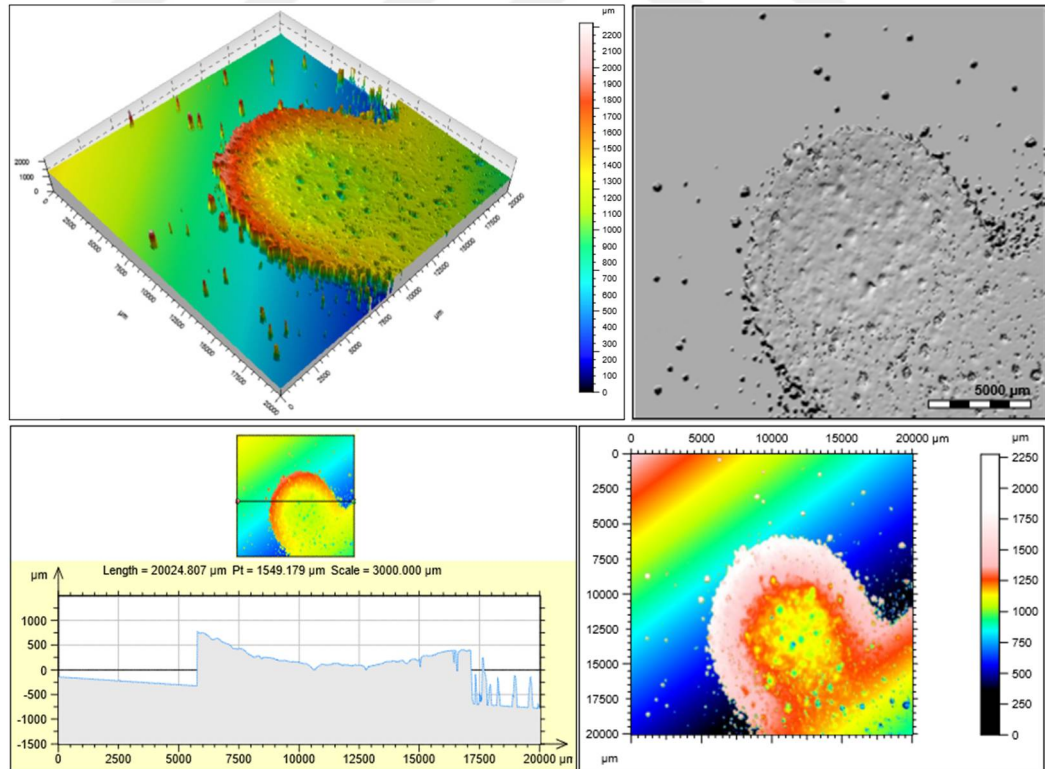
Şekil 6.34. Garnet E 120 mesh (180-250 µm) aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.

6.5.1.3. Silisyum karbür aşındırıcı partikülleri ile oluşan aşınma yüzeyleri

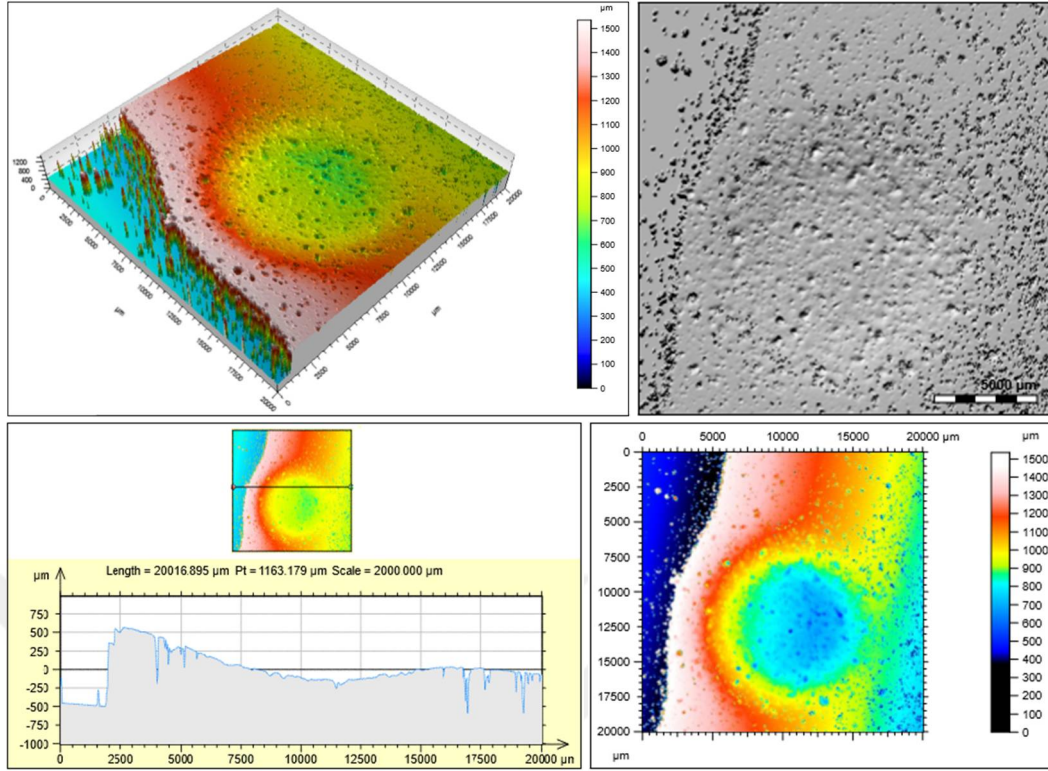
Şekil 6.35. – 6.37.’de SiC F 180 (53-90 µm) aşınma partikülleri ile 1,5 bar partikül püskürtme basıncında ve 30 – 60 – 90° partikül çarpma açılarında aşınma sonrasında bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre ile elde edilen aşınma yüzeyleri görülmektedir. 30° partikül çarpma açısında oluşan aşınma derinliği (Şekil 6.35.) renk skalasına göre yaklaşık 700 µm iken çizgisel doğrultudaki aşınma derinliği 457 µm olarak ölçülmüştür. Şekil 6.36.’da 60° partikül çarpma açısında renk skalasından 2200 µm aşınma derinliği ölçülürken çizgisel doğrultudaki aşınma derinliği kesin sonuç vermemektedir. 1,5 bar püskürtme basıncında ve 90° partikül çarpma açısında 60°’ye oranla derinlik azalmıştır. Şekil 6.37.’de verilen renk skalasına göre aşınma derinliğinin 1500 µm seviyelerinde olduğu görülmektedir. Çizgisel doğrultudaki aşınma derinliğinden net ölçüm alınamamaktadır (çizginin soldan bakıldığında bir kısmının numune kesim hatasına denk geldiği düşünülmektedir).



Şekil 6.35. SiC F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar püskürtme basıncı ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.

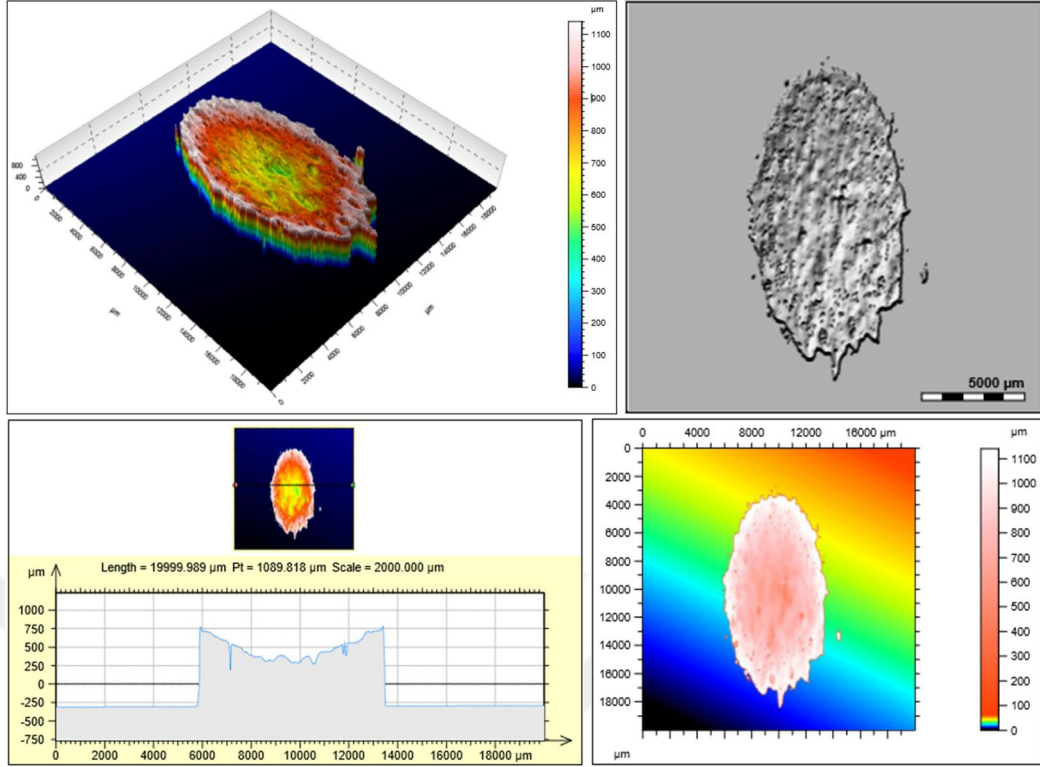


Şekil 6.36. SiC F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar püskürtme basıncı ve 60° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.

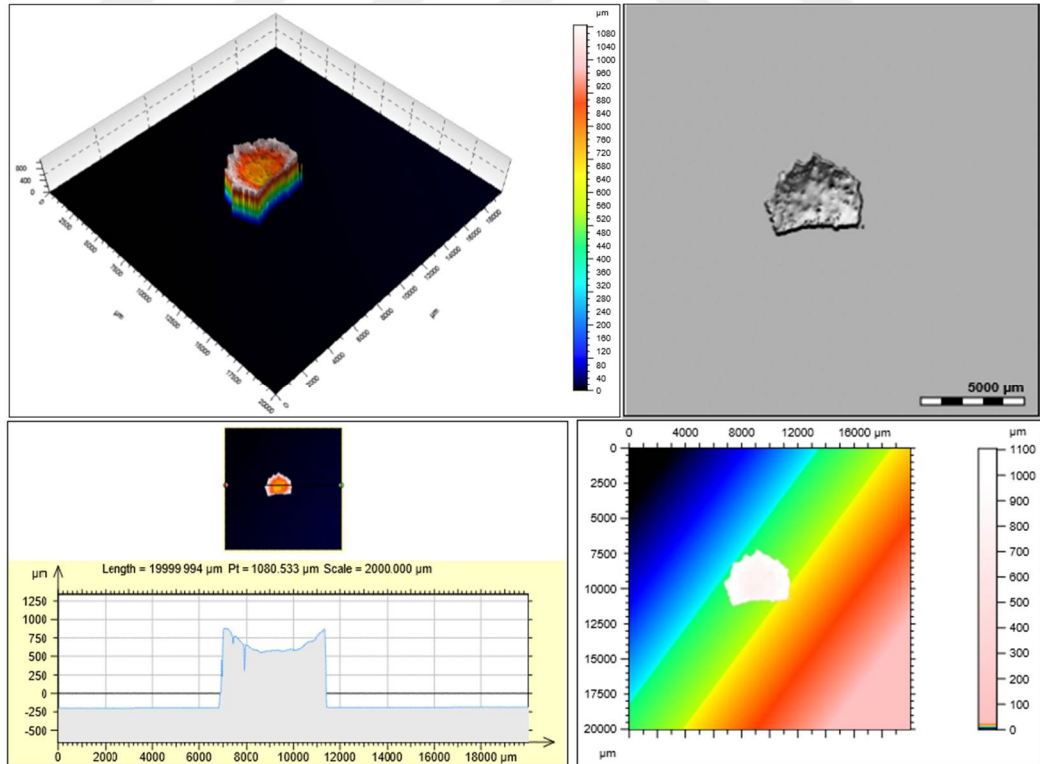


Şekil 6.37. SiC F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar püskürtme basıncı ve 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilometre görüntüleri.

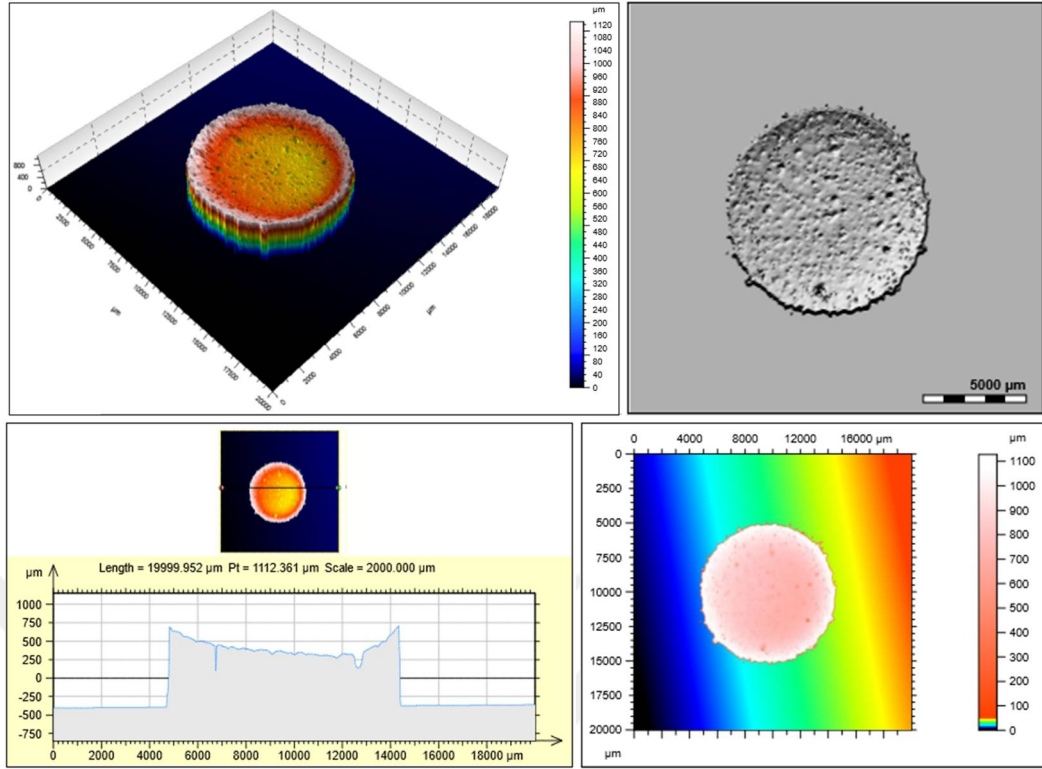
Şekil 6.38. - 6.40.'de SiC F 180 (53-90 μm) aşınma partikülleri ile 3 bar partikül püskürtme basıncında ve $30 - 60 - 90^\circ$ partikül çarpma açıları arasında eroziv aşınmaya maruz bırakılan bazalt cam-seramiklerinin aşınma yüzeyleri 3D optik profilometre ile analizleri sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Fakat her üç açı içinde aşınma derinlikleri hakkında kesin sonuç alınamamıştır. Analiz yapılan 3D optik profilometre prob ucu ile numune yüzeyinden 2000 μm derinliğe ulaşılabilir. SiC F180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile yapılan deneylerde bazalt cam-seramik numuneleri üzerinde 2000 μm 'den daha fazla derinliğe ulaşıldığı düşünülmektedir. Çizgisel doğrultudaki aşınma izlerinden de aşınma derinlikleri hakkında kesin bilgi edinilememiştir.



Şekil 6.38. SiC F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilemetre görüntüleri.



Şekil 6.39. SiC F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 60° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilemetre görüntüleri.



Şekil 6.40. SiC F 180 (53-90 µm) aşındırma partikülleri ile, 3 bar püskürtme basıncı ve 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış bazalt cam-seramiklerinin 3D optik profilemetre görüntüleri.

Sodyum feldspat, garnet ve silisyum karbür aşındırıcı partikülleri ile yapılan katı partikül eroziv aşınma testleri sonucunda bazalt cam-seramiklerinin aşınma yüzeyleri incelenerek aşınma izleri ve derinlikleri belirlenmiştir. Bu analizlerden silisyum karbür aşındırma partikülleri ile en derin, garnet ile daha az ve sodyum feldspat aşındırma partikülleri ile de en az aşınma izlerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca 3 bar partikül püskürtme basıncı ile yapılan testler sonucunda bazalt cam-seramik numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin 1,5 bar partikül püskürtme basıncına göre daha derin olduğu belirlenmiştir.

Optik profilometreden alınan görüntüler genel olarak değerlendirildiğinde; artan püskürtme basınçları ile iz derinliklerinin arttığı tespit edilmiş olup bu sonuçlar eroziv aşınma oranlarında elde edilen sonuçları desteklemektedir. Derinliklerin birbiri ile kıyaslanması noktasında çizgisel doğrultudaki derinliklerin esas alınmasının daha doğru bir yaklaşım olacağı düşünülerek bu değerlerin değişimleri karşılaştırma amaçlı temel alınmıştır. Na-feldspat -63µm tozu ile yapılan deneylerde en düşük iz derinliği 82 µm, en yüksek iz derinliği 298 µm olarak tespit edilmiştir. Aşındırıcı

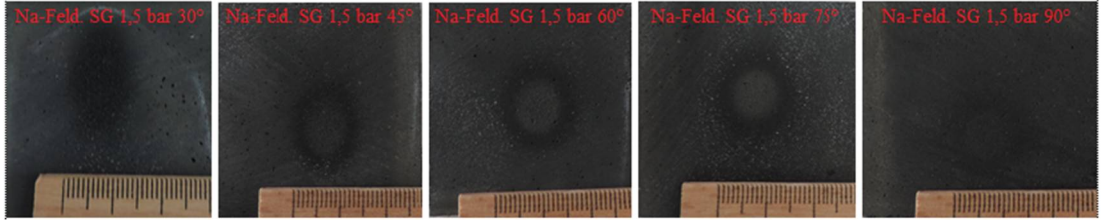
tozun Garnet-E olduğu deneylerde her şart için çizgisel aşınma direnlikleri ölçülemezken ölçülebilen en düşük değer 464 μm , en yüksek değer ise 953 μm dir. SiC F-180 tozu diğer tozlardan farklı olarak çizgisel ölçüm alınamamış olup numune yüzeyinden okunan iz derinliklerinin 2 mm ye ulaştığı gözlenmiştir. Sonuçlar tüm şartlar için elde edilemese de aşındırıcı toz değişiminin aşınma üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi açısından yeterli düzeyde olduğu düşünülmektedir. Aşındırıcı tozun Na-feldspat, Garnet ve SiC olarak giderek artan erozif aşınma oranları iz derinlikleri ölçümlerinde kendini doğrulamaktadır. En az iz derinlikleri Na-feldspat tozunda elde edilmişken, Garnette bir miktar daha derin, SiC tozu ile yapılan deneylerde ise en derin izler tespit edilmiştir. Elde edilen iz derinlikleri ile erozif aşınma oranı sonuçları birbirini desteklemekte olup artan aşındırıcı toz sertliği ve püskürtme basıncına bağlı olarak iz derinliğinin arttığı gözlenmiştir.

6.5.2. Aşındırılan bazalt cam-seramiklerinin makro görüntüleri

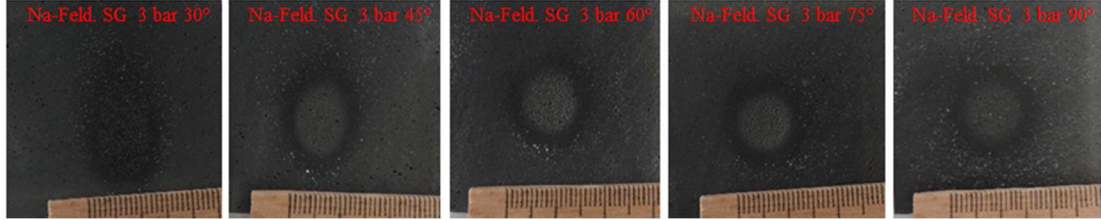
Farklı tane boyutlarına sahip üç farklı aşındırıcı partikülleri ile, 1,5 – 3 – 4 bar partikül püskürtme basınçlarında ve 30 – 45 – 60 – 75 – 90° partikül çarpma açılarında katı partikül erozif aşınması yapılan bazalt cam-seramiklerinin aşınma izleri ve derinlikleri makro görüntüleme yöntemi ile incelenmiştir.

6.5.2.1. Sodyum feldspat ile aşındırılan yüzeyler

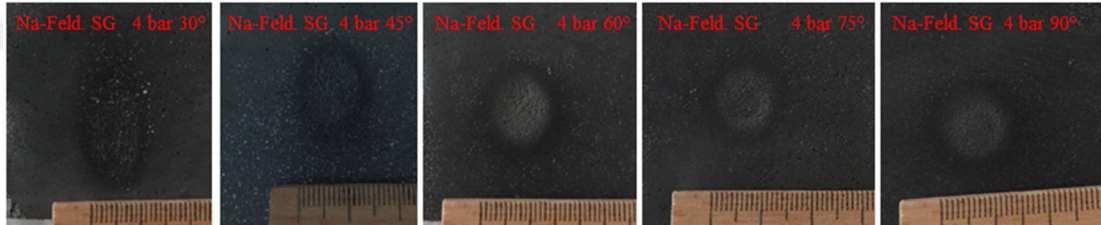
Na-Feldspat ESF 501 SG (-63 μm) ve ESF 501 GG (-300 μm) aşındırma partikülleri ile yapılan deneyler sonrasında bazalt cam-seramik yüzeyleri makro olarak incelenmiştir. Farklı partikül çarpma açısı (30 – 45 – 60 – 75 – 90°) ve farklı partikül püskürtme basınç (1,5 – 3 – 4 bar) parametreleri ile aşındırılan numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin makro görüntüleri Şekil 6.41. ve 6.42. (a), (b) ve (c)'de verilmiştir.



(a) Na-Feldspat ESF 501 SG -63 µm, partikül püskürtme basıncı: 1,5 bar

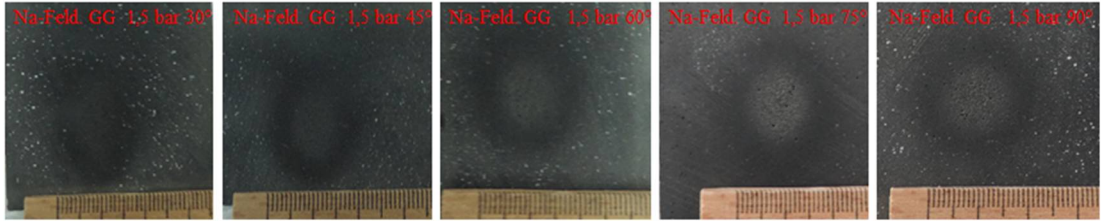


(b) Na-Feldspat ESF 501 SG -63 µm, partikül püskürtme basıncı: 3 bar

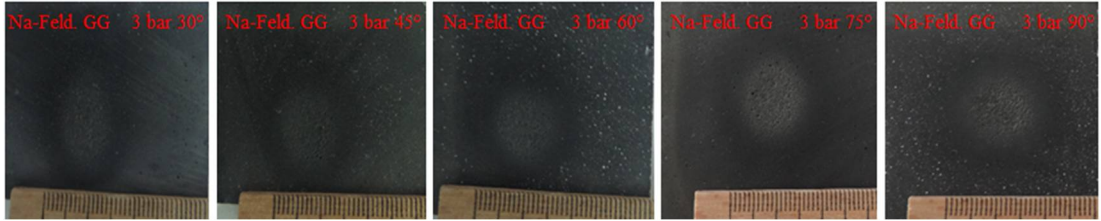


(c) Na-Feldspat ESF 501 SG -63 µm, partikül püskürtme basıncı: 4 bar

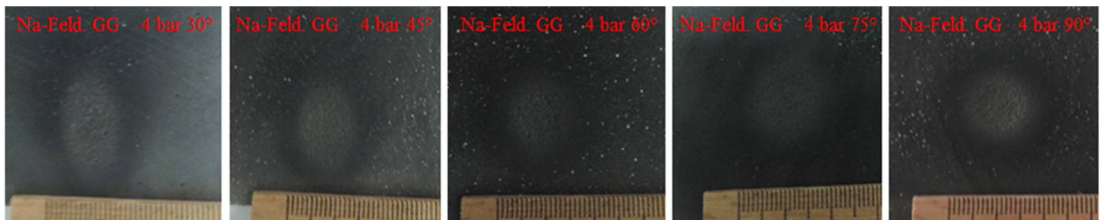
Şekil 6.41. Bazalt cam-seramiklerinin Na-Feldspat ESF 501 SG -63µm aşındırıcı partikülleri ile (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşındırılmış yüzeylerinin optik görüntüleri.



(a) Na-Feldspat ESF 501 GG -300 µm, partikül püskürtme basıncı: 1,5 bar



(b) Na-Feldspat ESF 501 GG -300 µm, partikül püskürtme basıncı: 3 bar



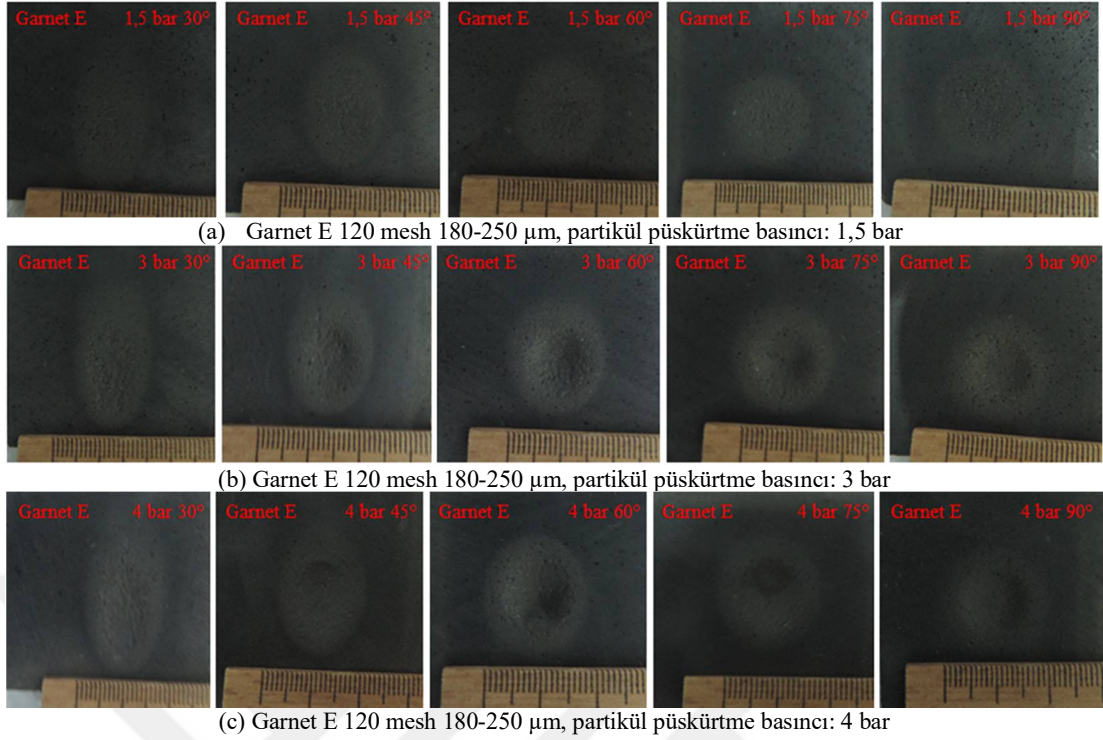
(c) Na-Feldspat ESF 501 GG -300 µm, partikül püskürtme basıncı: 4 bar

Şekil 6.42. Bazalt cam-seramiklerinin Na-Feldspat ESF 501 GG -300 µm aşındırıcı partikülleri ile (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşındırılmış yüzeylerinin optik görüntüleri.

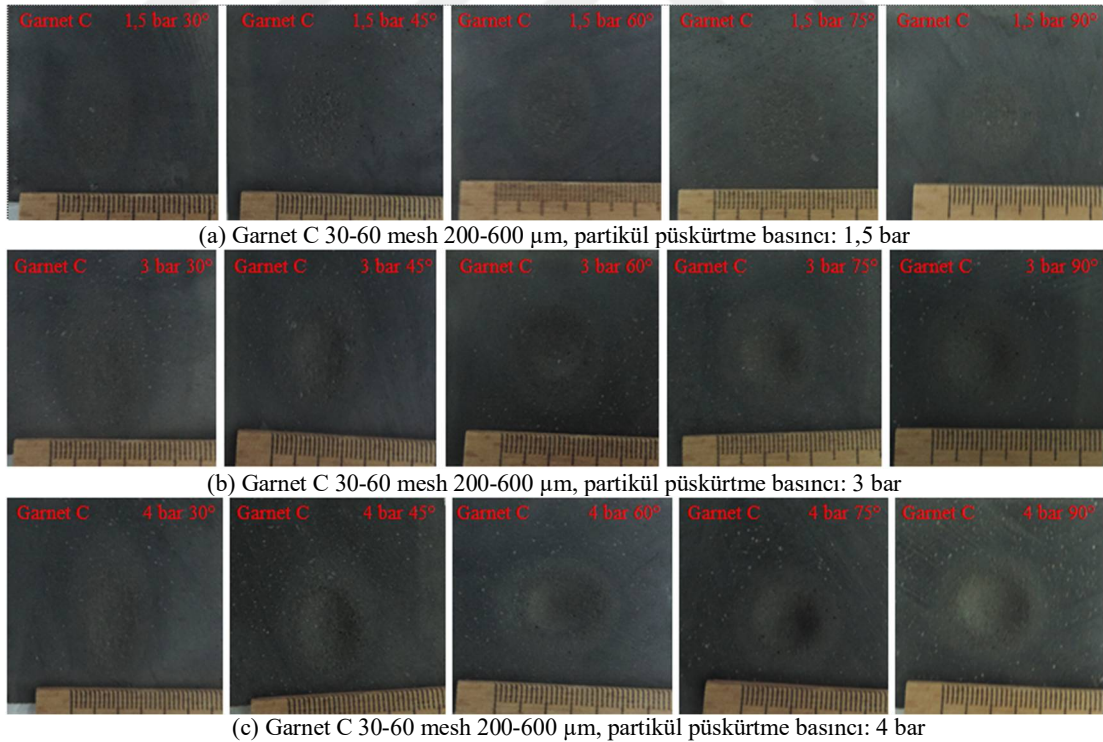
1,5 bar partikül püskürtme basıncından 4 bar partikül püskürtme basıncına çıkılırken aşınma izlerinin derinliği artmaktadır. En derin aşınma izleri 4 bar partikül püskürtme basıncında elde edilirken, 3 bar basınçta daha az ve 1,5 bar partikül püskürtme basıncında en az aşınma izleri karşımıza çıkmaktadır. Makro görüntülerde, 30° partikül çarpma açılarında elipsoid aşınma izleri oluşurken, 45° ve 60° partikül çarpma açılarında elipsoid şeklin dairesele dönüştüğü görülmektedir. 75° ve 90° partikül çarpma açılarında oluşan aşınma izlerinin dairesel olduğu dikkat çekmektedir. Aşınma yüzey alanının 30° partikül çarpma açısında daha fazla olduğu görülürken, 90° partikül çarpma açısındaki aşınma izinin yüzey alanı azalırken, aşınma derinliğinin de daha fazla olduğu göze çarpmaktadır. Ayrıca daha iri tane boyut dağılımına sahip Na-Feldspat ESF 501 GG (-300 µm) aşındırıcı partiküllerle yapılan deneyler sonrasındaki makro görüntülerdeki aşınma izlerinden aşınmanın daha fazla olduğu da görülmektedir.

6.5.2.2. Garnet ile aşındırılan yüzeyler

Garnet E 120 mesh (180-250 µm) ve Garnet C 30-60 mesh (200-600 µm) aşındırma partikülleri ile 30 - 45 - 60 - 75 - 90° partikül çarpma açılarında 1,5 – 3 – 4 bar partikül püskürtme basınçlarında bazalt cam-seramiklerin erozif aşınma sonrasında yüzeylerinin makro görüntülemesi yapılmıştır. Elde edilen makro görüntüler, Şekil 6.43. ve 6.44.'de (a), (b) ve (c)'de gösterilmiştir. Na-feldspat aşındırıcı partikülleriyle aşınma işleminde olduğu gibi 1,5 bar partikül püskürtme basıncından 4 bar partikül püskürtme basıncına çıkılırken aşınma derinliğinin arttığı görülmektedir. 4 bar partikül püskürtme basıncında en derin aşınma izlerine rastlanırken, 1,5 bar partikül püskürtme basıncında aşınma izinin derinlik seviyesi en azdır. Aşınma yüzey alanı 30° partikül çarpma açısından 90° partikül çarpma açısına çıkıldıkça azalırken aşınma derinliğinin ise arttığı görülmüştür. 30 – 45 – 60° partikül çarpma açılarında elipsoid bir şekilde aşınma izlerine rastlanırken, 75 – 90° partikül çarpma açılarında dairesele yakın bir yüzey alanından bahsetmek mümkündür. Garnet tozları ile elde edilen aşınma izlerinin derinlikleri, Na-feldspat tozları ile yapılan deneylerde elde edilen aşınma izlerine göre net şekilde daha derindir, bu durum erozif aşınma oranı sonuçları ile uyum göstermektedir.



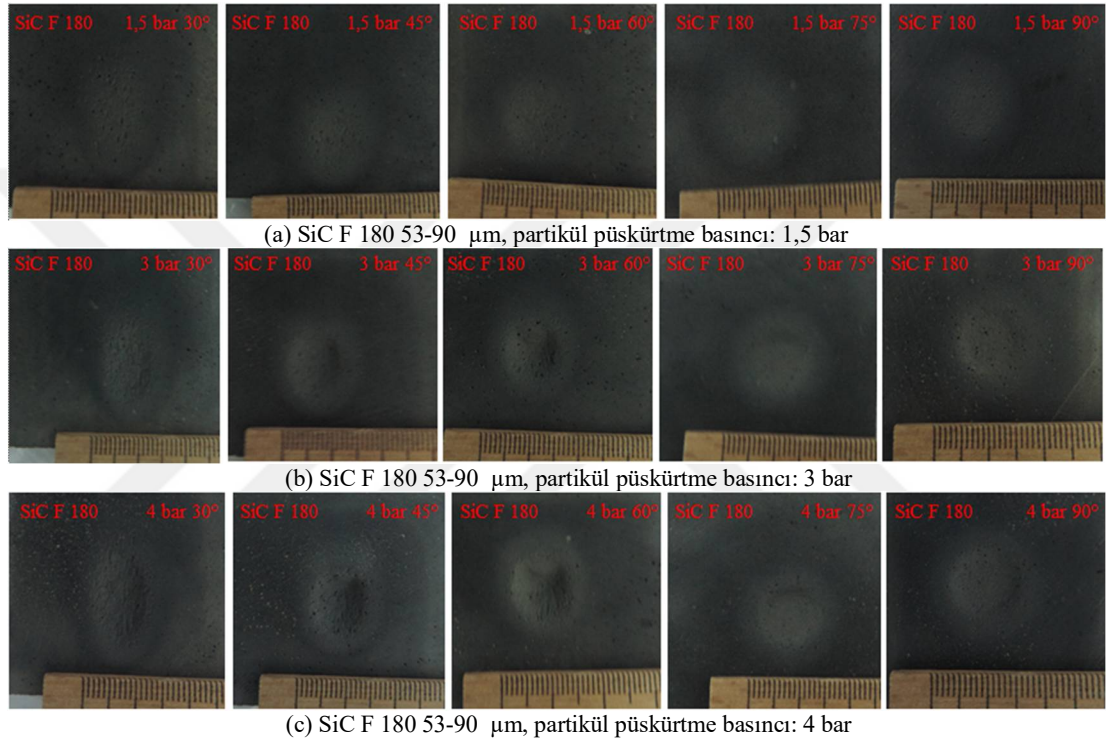
Şekil 6.43. Bazalt cam-seramiklerinin garnet E 120 mesh 180-250 μm aşındırıcı partikülleri ile (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşındırılmış yüzeylerinin optik görüntüleri.



Şekil 6.44. Bazalt cam-seramiklerinin garnet C 30-60 mesh 200-600 μm aşındırıcı partikülleri ile (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşındırılmış yüzeylerinin optik görüntüleri.

6.5.2.3. Silisyum karbür ile aşındırılan yüzeyler

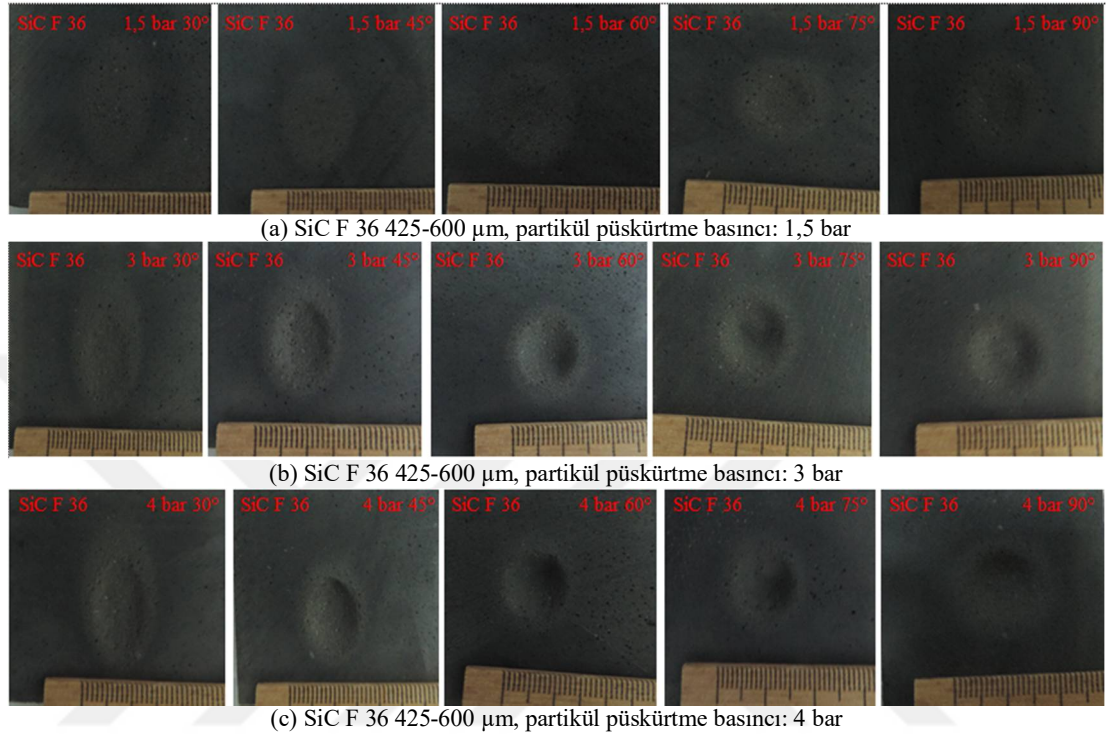
SiC F 180 (53-90 μm) SiC F 36 (425-600 μm) aşındırma partikülleri ile yapılan deneyler sonrasında bazalt cam-seramik yüzeyleri makro olarak incelenmiştir. Farklı partikül çarpma açısı (30 – 45 – 60 – 75 – 90°) ve farklı partikül püskürtme basınç (1,5 – 3 – 4 bar) parametreleri ile aşındırılan numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin makro görüntüleri Şekil 6.45. ve 6.46. (a), (b) ve (c)'de gösterilmiştir.



Şekil 6.45. Bazalt cam-seramiklerinin SiC F 180 53-90 μm aşındırıcı partikülleri ile (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşındırılmış yüzeylerinin optik görüntüleri.

Partikül püskürtme basıncının artması ile birlikte aşınma derinlikleri artmaktadır. Diğer aşındırma partiküllerinde olduğu gibi en derin aşınma izleri 4 bar partikül püskürtme basınçlarında elde edilirken, aşınma derinliğinin en az olduğu partikül püskürtme basıncı 1,5 bar'dır. Partikül çarpma açılarının 30 ve 45° olduğu durumlarda aşınma izlerindeki yüzey alanı diğer açılara oranla büyüktür ve geometrik şekli ise elipsoiddir. 60 – 75 – 90° partikül çarpma açılarında ise yüzey alanı küçülürken aşınma derinlikleri artmakta ve dairesel yakın aşınma izleri makro görüntülerde görülmektedir. Ayrıca bazalt cam-seramiklerinin silisyum karbür aşındırıcı partikülleri ile aşındırılması sonucunda elde edilen makro görüntülerde

ince tane boyut dağılımına sahip SiC F 180 (53-90 μm) aşındırıcı partiküller ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen aşınma izlerine bakıldığında aşınmaya etkisinin daha fazla olduğu söylemek mümkündür.



Şekil 6.46. Bazalt cam-seramiklerinin SiC F 36 425-600 μm aşındırıcı partikülleri ile (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşındırılmış yüzeylerinin optik görüntüleri.

Sodyum feldspat, garnet ve silisyum karbür aşındırıcı partiküller ile aşındırılan bazalt cam-seramiklerinden elde edilen makro görüntüler incelendiğinde (üç aşındırıcı partiküllerin oluşturduğu aşınma izleri), sodyum feldspat aşındırma partiküllerinin aşınma derinliklerinin en az olduğu, silisyum karbür aşındırıcı partiküllerinin aşınma derinliklerinin ise en fazla olduğu dikkat çekmektedir. Makro görüntülerden, erozif aşınmanın silisyum karbür aşındırıcı partiküllerinde garnet aşındırıcı partiküllerine göre daha fazla olduğu, sodyum feldspat aşındırıcı partiküllerinde ise en az erozif aşınmanın meydana geldiği görülmektedir.

Aşınma izlerinden alınan görüntüler, erozif aşınma oranları ile ilgili yapılan hesaplama sonuçları ile uyum göstermektedir. Aşındırıcı toz türü, çarpma açısı ve püskürtme basıncına bağlı olarak aşınma mekanizmaları da belirgin şekilde değişmektedir. Çarpma açısına bağlı olarak iz şekillerindeki değişim ele alındığında;

bu durum çarpma açısının değişkenlik gösterdiği erozif aşınma çalışmalarında karşılaşılan genel bir sonuç olmakla birlikte partikül geometrisine bağlı olarak iz şekli de değişmektedir [126]. Değişen aşındırıcı tozların özelliklerinin aşınma üzerindeki etkileri izlerden net şekilde gözlenmektedir. Tüm aşındırıcı tozlar içinde en az sertliğe sahip olan Na-feldspat tozunun yüzeyde oluşturduğu izler Garnet ve SiC tozları ile elde edilen izlere daha yüzeyselken, Garnet ve SiC tozlarının izlerindeki derinlikler dikkat çekmektedir. Diğer yandan Garnet tozlarında elde edilen izler incelendiğinde Garnet E den Garnet C ye geçişte iz derinliklerinde düşüş gözlenmiştir. Bu durum düşük açılarda daha net olup önceki bölümlerde açıklanan saçılan toz etkisi ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Artan çarpma açısı ile tozların daha yüksek enerji ile numune yüzeyine cepheden çarpması bu etkiyi zayıflatmış görünmektedir. Bu mekanizma Garnet tozu gibi sert bir yapıya sahip SiC tozu ile yapılan deneylerde de kendini göstermiştir. Bununla birlikte Garnet tozları ile elde edilen aşınma izlerinde kısmen, SiC tozları ile yapılan deneylerde elde edilen aşınma izlerinde ise büyük oranda yüzeyde kazıma etkisi görünmektedir. Bu etki Na-feldspat tozları ile elde edilen izlerde gözlenmemiş olup aşındırıcı tozların sertlik ve morfolojisi ile ilgilidir.

Sonuçlar bazaltın deneylerde kullanılan aşındırıcılara benzer nitelikte malzeme taşınmasında kullanılan hatlarda uygulanabilirliği noktasında fikir vermektedir. Bunun için, sodyum feldspat, garnet ve silisyum karbür hammaddelerinin nakli için kullanılan nakil hatlarda bazalt cam-seramiklerinin erozif aşınma oranlarına, optik profilometre görüntülerine ve makro görüntülerine bakıldığında, en uzun süre sodyum feldspat hammaddelerinin taşınımında kullanılabileceğini söylemek mümkündür. Bazalt cam-seramiklerinin, silisyum karbür naklinde kullanım süresi diğerlerine göre daha az olacaktır.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada, ticari olarak temin edilen bazalt cam-seramikleri deneysel numune boyutlarında kesilerek katı partikül erozyonu ile aşındırılmıştır. Katı partikül erozyonunda aşındırıcı partikül olarak üç farklı tipte ve iki farklı tane boyutunda partiküller kullanılmıştır. Kullanılan aşındırma partikülleri; sodyum feldspat (öğütülmüş ESF 501 SG, -63 μm ve flote ESF 501 GG, -300 μm), garnet (E, 120 mesh, 180-250 μm ve C, 30-60 mesh, 200-600 μm) ve silisyum karbür (F 36, 425-600 μm ve F 180, 53-90 μm)'dür. Bazalt cam-seramikleri; 1,5 – 3 ve 4 bar püskürtme basıncında, 30 – 45 – 60 – 75 ve 90° partikül çarpma açılarında, 7,8 mm çapında nozul ile 20 mm olacak şekilde numune-nozul mesafesi ayarlanarak ve 20 saniye aşındırıcı partikül püskürtülerek erozif aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Aşındırıcı partiküllere yapılan SEM mikroyapı analizlerinde öğütülmüş Na-feldspatın tane boyutunun 63 μm 'nin, Flote Na-Feldspatın ise 300 μm 'nin altında olduğu görülmüştür. Garnet aşındırıcı partiküllerinde garnet E 180'nin ortalama 250 μm 'lik boyut dağılımına sahip olduğu görülürken iri taneli olan garnet C'nin ise 200 - 600 μm 'lik tane boyutunda olduğu tespit edilmiştir. Silisyum karbür F 180'nin tane boyut dağılımının 53 - 90 μm arasında, SiC F 36'nın ise 425 - 600 μm arasında olduğu mikroyapı analizlerinde gözlenmiştir. Ayrıca SiC tanelerinin diğerlerine nazaran keskin köşeli tanelerden meydana geldiği de SEM analizlerinde görülmüştür. Aşındırıcı partiküllerin şekilleri, aşınma hızlarını etkilemekte olup keskin köşeli partiküllerin aşınmaya etkisi yuvarlak ve oval olan parçalara göre daha fazladır.

2. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri her bir basınç değeri için ayrı ayrı hesaplanmış ve basınç arttıkça kütleli debilerde de artış olduğu görülmüştür. Ayrıca aşındırıcı partiküllerin tane boyutu büyük olanlarında kütleli debiler daha yüksek ölçülmüştür. Bu durum partikül boyutundaki azalma ile birlikte yüzey alanının artması sonucu tozların topaklanma eğiliminden kaynaklanmaktadır.
3. Büyük tanelere sahip Na-feldspat ile aşındırılan bazalt cam seramiklerinde daha küçük tane boyutundakilere göre daha fazla erozif aşınmanın olduğu görülmüştür.
4. Garnet aşındırıcı partiküllerinde küçük tanelerin erozif aşınmada etkisinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. 1,5 bar püskürtme basıncında daha küçük taneli garnet E'nin erozif aşınmaya etkisi daha büyük taneli olan garnet C'ye göre daha fazladır. 3 ve 4 bar püskürtme basınçlarında ise tane boyutunun etkisi partikül çarpa açılarında değişiklik göstermektedir. Bu durum yüzeyden seken parçalar ile partiküller arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır.
5. İri silisyum karbür aşındırıcı partiküllerinde 1,5 bar püskürtme basıncında, 90° partikül çarpma açısında ince tanelilere göre daha fazla aşınma gözlenmiştir. 3 ve 4 bar basınçlarda ise 30°, 45° ve 60° partikül çarpma açılarında küçük tane boyut dağılımına sahip SiC partikülleri daha fazla aşınma meydana getirirken, diğer açılarda büyük tane boyut dağılımına sahip SiC aşındırıcı partikülleri bazalt cam-seramiklerini daha fazla aşındırmıştır.
6. Na-feldspat aşındırma partikülleri ile bazalt cam-seramiklerinin aşındırılmasında büyük tane boyut dağılımının (Na-Feldspat ESF 501 GG - 300 µm) aşınmada daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Fakat garnet ve SiC aşındırma partiküllerinde ince tanelerin aşınmaya etkisinin birçok parametrede daha etkili olduğu görülmüştür.
7. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin Mohs sertlik skalasına göre sertlikleri arttıkça erozyon oranlarında da artış göze

çarpmaktadır. En az aşınma, en düşük sertlik değerine sahip sodyum feldspat (Mohs sertlik değeri 6-6,5) aşındırma partikülleri ile görülürken en fazla aşınma ise en yüksek sertlik değerine sahip SiC (Mohs sertlik değeri 9,5) aşındırma partikülleri ile gerçekleşmiştir. Bu durum erozyon oran değerlerinden de görülmektedir.

8. Deneysel çalışmalarda kullanılan üç farklı aşındırma partikülleri ile yapılan katı partikül erozif aşınma testlerinden partikül püskürtme basınçlarındaki artış ile birlikte erozif aşınma değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir. En yüksek aşınma ve malzeme kaybı 4 bar partikül basınçlarında görülürken en az aşınma ve malzeme kaybı 1,5 bar partikül püskürtme basınçlarında gözlenmiştir.
9. İki farklı tane boyutundaki sodyum feldspat aşındırma partikülleri ile yapılan aşınma testleri incelendiğinde, en fazla aşınmanın, daha büyük tane boyut dağılımına sahip Na-feldspat flote (ESF 501 GG) -300 μm aşındırma partikülleri ile 4 bar püskürtme basıncında ve 90° partikül çarpma açısında olduğu görülmektedir. Eroziyon aşınmanın en az olduğu parametreler ise, ince tane boyut dağılımına sahip Na-Feldspat öğütülmüş (ESF 501 SG) -63 μm aşındırma partikülleri ile, 1,5 bar püskürtme basıncında ve 90° partikül çarpma açısında olduğu görülmektedir.
10. Garnet aşındırıcı partikülleri ile yapılan aşınma testleri sonucunda en yüksek aşınma garnet E (120 mesh, 180-250 μm) ile 4 bar partikül püskürtme basıncında 60° partikül çarpma açısında olurken olurken en düşük aşınma ise 1,5 bar basınçta 30° çarpma açısında garnet C (30-60 mesh, 200-600 μm) aşındırma partikülleri ile olmuştur.
11. SiC aşındırma partiküllerinde en yüksek aşınma ince tane boyut dağılımına sahip SiC F 180 (53-90 μm) aşındırma partikülleri ile 45° partikül çarpma açısında ve 4 bar partikül püskürtme basıncında gözlenirken en düşük aşınma iri tane boyut dağılımındaki SiC F 36 (425-600 μm) aşındırma partikülleri ile

1,5 bar partikül püskürtme basıncında 30° partikül çarpma açısında meydana gelmiştir.

12. Öğütülmüş Na-Feldspat (ESF 501 SG, -63 µm) ile bazalt cam-seramiklerinin aşındırılmasında 30° çarpma açısından 60°'ye çıkılırken 1,5 bar püskürtme basıncında erozyon oranlarında artış görülmektedir. 90° partikül çarpma açısında erozyon oranı en düşüktür. 3 ve 4 bar püskürtme basınçlarında ise 30°'den 75°'ye doğru erozyon oranlarında artış görülürken 90°de tekrar düşme vardır. 1,5 ve 4 bar için en düşük aşınma 90° partikül çarpma açısındadır. 3 bar püskürtme basıncında ise en düşük aşınmaya 30° partikül çarpma açısında karşılaşılmıştır. Belirli bir basınçta malzemeye püskürtülen tozlar aerodinamik adı verilen basınçlı hava etkisindedir. Numune ile nozül arasında oluşan bu hava akımı aşındırıcı partiküllerin yönlerini saptırarak farklı açılarda numune yüzeyine çarpasına sebep olur.
13. Flote Na-feldspat (ESF 501 GG, -300 µm) ile bazalt cam-seramiklerinin aşındırılmasında 30 – 45 – 60 – 75 ve 90°'ye artan çarpma açısına göre 1,5 ve 4 bar püskürtme basınçlarında aşınma artmaktadır. 3 bar püskürtme basıncında ise 30°'den 75°'ye kadar erozyon oranlarında artış görülürken, 90° partikül püskürtme basıncında azalma gözlenmektedir. Bazalt cam-seramikleri gibi gevrek malzemelerde genellikle artan çarpma açısı ile aşınma oranları artar. Gevrek malzemelerde, düşük partikül çarpma açılarında sürtünme gibi kayıplar sonucunda aşınma miktarı düşer.
14. Garnet E (120 mesh 180-250 µm) ile bazalt cam-seramiklerinin aşındırılmasında 1,5 bar partikül püskürtme basıncında 30° partikül çarpma açısından 60°'ye çıkıldığında aşınma artmakta iken 75°'de 60°'ye oranla düşmekte ve 90° partikül çarpma açısında ise en yüksek değere ulaşmaktadır. 3 bar püskürtme basıncında ise 30 – 45 – 60 – 75° çarpa açılarında açı artıkça aşınma artmakta, 90° partikül çarpma açısında ise 45° ile 60° arasında bir değerde bulunmaktadır. 30°'den 60° çarpa açısına çıkıldığında 4 bar basınçta aşınma artmakta, 75° ve 90°'de tekrar düşmektedir. Hava akımı etkisi yüksek çarpma açılarında Na-Feldspat tozlarına göre daha sınırlı olmuştur. Bu

durumun Na-felspat ve Garnet tozları arasındaki yoğunluk farkı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

15. Garnet C (30-60 mesh, 200-600 μm) aşındırma partiküllerinde 30° 'den 75° partikül çarpa açısındaki artış ile 1,5 ve 4 bar püskürtme basıncında aşınma artarken 90° 'de düşmektedir. 3 bar basınçta ise 30 – 45 – 60 – 75 – 90° çarpa açılarında açı değerindeki artışla birlikte aşınma artmaktadır. Bu durumun artan toz boyutu ve debi ile birlikte daha fazla tozun numune yüzeyine ulaşması sonucunda numune ve nozül arasındaki aerodinamik etkinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
16. SiC F 180 (53-90 μm) aşındırıcı partiküllerinde 30 – 45 – 60° partikül çarpma açılarında açının artmasıyla birlikte 1,5 ve 3 bar püskürtme basınçlarında aşınma artmaktadır. 75° ve 90° partikül çarpa açılarında erozyon oranı değerleri düşmektedir. 45° partikül çarpma açısında 4 bar basınçta en yüksek aşınma değerine ulaşılmakta ve 60 – 75 – 90° çarpma açılarında açı değeri büyüdükçe aşınma miktarı azalmaktadır.
17. SiC F 36 (425-600 μm) aşındırıcı partiküllerinde 30 – 45 – 60 – 75 ve 90° çarpa açılarında açı değerinin artışıyla birlikte 1,5 bar püskürtme basıncında aşınma oranlarında artış görülmektedir. 30° 'den 60° 'ye çıkıldıkça 3 ve 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşınmada artış olurken, 75° ve 90° 'de aşınma miktarı düşmektedir. Aşınma 30° partikül çarpma açısında her bir püskürtme basıncı için en düşük değerdedir. SiC ile yapılan deneylerde elde en yüksek erozif aşınma oranları elde edilmiştir. Bu durum artan aşındırıcı toz sertliği ile erozif aşınma oranlarının artışından kaynaklanmaktadır. Ayrıca açısız ve keskin köşeli parçacıkların yuvarlak ve oval parçacıklara göre daha fazla aşınmaya neden olmaktadır.
18. Bazalt cam-seramikleri üzerine uygulanan katı partikül erozif aşınma testleri sonucunda aşınma yüzey görüntüleri 3D optik profilometre ile incelenmiştir. Silisyum karbür aşındırma partikülleri ile en derin aşınma izlerine rastlanırken, garnet ile daha az derinliklere inilmiş ve sodyum feldspat

aşındırma partikülleri ile en az aşınma izleri görülmüştür. Ayrıca 3 bar partikül püskürtme basıncı ile yapılan testler sonucunda bazalt cam-seramiklerinin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin, 1,5 bar partikül püskürtme basıncına göre daha derin olduğu belirlenmiştir.

19. Bazalt cam-seramiklerinin erozif aşınma testleri sonrası makro yüzey incelemelerinde her bir aşındırma partikülü içinde (Na-Feldspat, garnet ve SiC) 4 bar partikül püskürtme basınçlarında aşınma izlerinin en derin olduğu görülmüştür. 3 bar partikül basıncında derinlik azalırken en az derin izlere 1,5 bar püskürtme basınçlarında rastlanılmıştır. Makro görüntülerde 30° partikül çarpma açılarında oluşan aşınma izleri elipsoid iken açı değerinin artması ile birlikte dairesele yakın izler oluşmuştur. Aşınma yüzey alanı 30° partikül çarpma açılarında en fazla iken 90° partikül çarpa açılarında en derin izler dikkat çekmektedir. Erozif aşınma çalışmalarında çarpma açısının değişkenlik gösterdiği karşılaşılan genel bir sonuç olmakla birlikte partikül geometrisine bağlı olarak iz şekli de değişmektedir.
20. Makro görüntülerde iri tane boyut dağılımına sahip Na-Feldspat ESF 501 GG (-300 µm) aşındırıcı partiküllerinin aşınmaya etkisinin daha fazla olduğu açıkça görülebilmektedir.
21. İnce tane boyut dağılımına sahip garnet E 120 mesh (180-250 µm) aşındırıcı partiküllerin oluşturdukları aşınma derinliğinin makro incelemede iri garnet tanelerinkine göre daha fazla olduğu da görülmektedir.
22. Silisyum karbür aşındırıcı partikülleri ile bazalt cam-seramiklerinin aşındırılması sonucunda elde edilen makro görüntülerde ince tane boyut dağılımına sahip SiC F 180 (53-90 µm) aşındırıcı partiküllerin daha etkili olduğu ve daha derin aşınma izleri oluşturduğu görülmüştür.
23. Üç farklı aşındırıcı partikülleri ile yapılan aşınma testleri sonucunda, sodyum feldspat aşındırma partikülleri ile aşınma derinliklerinin en az olduğu silisyum karbür ile ise en fazla olduğu göze çarpmaktadır.

24. Sodyum feldspat, garnet ve silisyum karbür hammaddelerinin taşınmasında nakil hattı olarak kullanılabilecek bazalt cam-seramiklerinin yapılan deneyler sonucundaki erozif aşınma oranları, optik profilometre ve makro görüntüleri ele alındığında sodyum feldspat naklinde kullanılması durumunda daha uzun ömürlü olacağı belirlenmiştir. Ayrıca bazalt cam-seramiklerinin silisyum karbür naklinde kullanım süresinin diğerlerine göre daha az olacağı da görülebilmektedir.

7.2. Öneriler

1. Bazalt cam-seramiklerinin kullanım amacına uygun olarak farklı aşındırma partikülleri ile de katı partikül erozyon özellikleri incelenebilir.
2. Tane boyutları farklılık gösteren aşındırma partikülleri ile karışımlar hazırlanıp, bu karışımlar ile erozyon testleri yapılarak bazalt cam-seramikleri üzerinde erozif aşınmaya etkileri tartışılabilir.
3. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler (püskürtme nozul çapı, numune – nozul arasındaki mesafe, püskürtme süresi, basınç, partikül çarpma açısı) değiştirilerek bazalt cam-seramikleri aşınma testlerine tabi tutulabilir.
4. Bazalt cam-seramikleri farklı bir aşındırma test düzeneği oluşturularak püskürtme kabininin ısıtılması ile sıcaklığın erozif aşınmaya etkileri belirlenebilir.
5. Farklı malzemeler üzerinde aynı deney parametreleri ile erozif aşınma testleri yapılabilir ve erozyon oranları hesaplanıp bazalt cam-seramikleri ile kıyaslanabilir. Bu kıyaslamalar sonucunda düşük maliyetlerde üretilen malzemeler, benzer mekanik özelliklere sahip ise bazalt cam-seramiklerinin alternatifi olarak endüstride kullanımı tavsiye edilebilir.
6. Deneysel çalışmalarda kullanılan optik profilometrede bulunan prob ucu 20 X 20 mm'lik bir alan tarayıp 2 mm'lik derinlik hakkında bilgi vermektedir.

Optik profilometreye farklı bir prob ucu takılarak, numune yüzeyinde daha fazla alan taraması ve daha derinlere inilmesi sağlanabilir. Bu da aşınma yüzeyleri hakkında daha detaylı bilgi edinilmesine olanak sağlayacaktır.

7. Deneysel sonuçlar irdelendiğinde, genel olarak erozyon oranlarının 60° ve 75° partikül çarpma açılarında en yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Bu dikkate alınarak sanayide ihtiyaç duyulan nakil hatlarının 60° ve 75° 'deki hammadde temas açısında minimum seviyede kullanılması tavsiye edilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Callister W. D., Rethwisch D. G.; Materials Science and Engineering, 8th Edition Printed in the United States of America, 2010.
- [2] Atik E., Ünlü B. S., Şen O., Çavdar U.; Partikül takviyeli $AlSi_{12}CuNiMg$ Kompozitinin Aşınma Dayanımının ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 2.2, 75-87, 2006.
- [3] Kaplan M., Karaoğlu A.C., Uyaner M.; Katı Partikül Erozyonu ve Mühendislik Malzemeleri Üzerindeki Önemi, Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, Cilt 4, Sayı 1, 31-34, 2016.
- [4] Soydan Y., Ulukan L.; Temel Triboloji Sürtünme-Aşınma-Yağlanma Bilim ve Teknolojisi, Tagem Kopisan, Sakarya, 2013.
- [5] Czichos H., Habig K. H., Tribologie-Handbuch Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, Vieweg Teubner Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2010.
- [6] Açıkbş N. Ç., Kara F., Mandal H., Kumar R., Basu B., Tribolojik Uygulamalara Yönelik $SiAlON$ Seramiklerinin Geliştirilmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi; Özel Sayı, 197-202, 2009.
- [7] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Kayaç> Erişim Tarihi: 10.03.2019.
- [8] Bayrak G., Yerli Bazaltlardan Üretilen Cam-Seramik Esaslı Tozların Plazma Sprey Kaplamalarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 2009.
- [9] Okrusch M., Matthes S., Mineralogie, Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde, Springer, Würzburg, 2010.
- [10] Ercenk E.; Bazalt Esaslı Sic Takviyeli Cam Ve Cam-Seramik Kaplamaların Özellikleri, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü, Doktora Tezi, Sakarya, 2011.

- [11] Kahveci A. E., Kadayıfçı A., Diyarbakır Yöresi Bazalt Taşının Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi, SDU International Journal of Technologic Sciences, Vol. 5, No 3, pp. 56-69, December, 2013.
- [12] Ercenk E., Güven B., Yılmaz Ş., Crystallization kinetics of machinable glass ceramics produced from volcanic basalt rock, Journal of Non-Crystalline Solids 498, 262–271, 2018.
- [13] Çınar A., $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ Camlarının Kontrollü Kristalizasyonu Ve Kimyasal Kararlılıkları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2003.
- [14] Deubenera J., Allixb M., Davisc M.J., Durand A., Höchee T., Honmaf T., Komatsuf T., Krügera S., Mitrag I., Müllerh R., Nakanei S., Pascuald M.J., Schmelzerj J.W.P., Zanolto E.D., Zhoul S., Updated Definition of Glass-Ceramics, Journal of Non-Crystalline Solids, 501, 3-10, 2018.
- [15] Önen U., Ercenk E., Yılmaz Ş., Development of Machinable Glass-Ceramics Produced from Vermiculite, Acta Physica Polonica A, vol. 131, 2017.
- [16] Orbay B., Potasyum Mikası Ve Kordierit İçeren İşlenebilir Cam Seramiklere Çekirdeklenme Katalisti (TiO_2) İlavesinin Kristalizasyon Davranışı Ve Elektriksel Özellikler Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2007.
- [17] Yıldırım Y., Şahin A. E., Avcu E., Fidan S., Sınmazçelik T., Aşındırıcı Partikül Boyutu Ve Püskürtme Basıncının $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ Alaşımının Katı Partikül Erozyonu Davranışına Etkileri, 14. International Materials Symposium (IMSP'2012), Pamukkale University, Denizli – Turkey, 10-12 October 2012.
- [18] Kosa E., Çeliklerin Erozif-Abrazif Aşınmasında Aşındırıcı Tane Büyüklüğünün Aşınma Direncine Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Haziran, 2016.
- [19] Sarı N. Y., Kaluç E., Endüstride Aşınma Problemleri, Makine ve Metal Teknolojisi, Sayı 50, Şubat, 1996.
- [20] Onaran K., Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 1995.
- [21] Kılıç C., Sıkıştırma Döküm Yöntemi İle Üretilmiş Ve Soğuk Haddelenmiş $\text{AlMg}_3/\text{SiCp}$ Kompozitinin Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Edirne, 2008.

- [22] Başman G., Atar E., Kayalı E. S., Seramik Malzemelerin Aşınma Davranışı, www.metalurji.org.tr/dergi/dergi127/der127_39.pdf, Erişim Tarihi: 31.03.2019.
- [23] Özmen Y., Jahanmir S., Sulu Ortamda Silisyum Nitrür Üzerindeki Nanoyapılı Yüzeylerin Çok Düşük Sürtünme Özellikleri, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(8), 337-343, (15. Uluslararası Malzeme Sempozyumu Özel Sayısı), 2015.
- [24] Avcu E., Çoban O., Bora M. Ö., Fidan S., Sınmazçelik T., Ersoy O., Possible Use of Volcanic Ash as a Filler in Polyphenylene Sulfide Composites: Thermal, Mechanical, and Erosive Wear Properties, 2014 Society of Plastics Engineers, Polymer Composites, Volume 35, Issue 9, Pages 1826-1833, 2014.
- [25] Finnie I., Some reflections on the past and future of erosion, Wear, Vol. 186-187, pp. 1-10, 1995.
- [26] Bata E., Lentzaris K., Lekatou A. G., Barkoula N. M., Poulia A., Sfikas A. K., Karantzalis A. E., Effect of Solid Particle Erosion on the Aqueous Corrosion Behaviour of a Ti₆Al₄V Sheet, Material Science and Engineering with Advanced Research, Special Issue: 26-33, 2017.
- [27] Avcu E., Fidan S., Karabay S., Sınmazçelik T., Türkiye’de Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan AA-1070 İle AA-6101 Alaşımlarının Katı Partikül Erozyon Davranışlarının Karşılaştırılması, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 27, No 4, 865-874, 2012.
- [28] Çetin C., Kayaçların Oluşumu ve Kayaç Türleri, Taş Malzeme Bilgisi ve Bozulmaları, Ders Notu. https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/2063/mod_resource/content/2/DERS%201.pdf Erişim Tarihi: 07.04.2019.
- [29] <https://homepage.univie.ac.at/Wilfried.Schranz/work/Vulkanismus.pdf> Erişim Tarihi: 05.04.2019.
- [30] Dirik K., Volkanlar, Hacette Üniversitesi, Fiziksel Jeoloji I Ders Notları, 2006. <http://yunus.hacettepe.edu.tr/~kdirik/Volkanlar.pdf> Erişim Tarihi: 04.04.2019.
- [31] Caineng Z., Guangya Z., Rukai Z., Xuanjun Y., Xia Z., Lianhua H., Baihong W., Xiaozhi W., Volcanic Reservoirs in Petroleum Exploration, Elsevier, 2013.
- [32] Ündül Ö., Aysal N., Gökçeada’da Yüzeylenen Andezit ve Riyodasit Bileşimli Kayaların İçyapı Özelliklerinin Dayanım ve Deformasyon Özelliklerine Etkileri, Araştırma Makalesi, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 40 (2), 123-148, 2016.

- [33] <https://kadirhoca.com/10/topografya-ve-kayaclar/> Erişim Tarihi: 07.04.2019.
- [34] Ocakoğlu F., Genel Jeoloji-I, Ders Notları, Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 2014.
- [35] Ersoy H., Mühendislik Jeolojisi Ders Notları, 2008.
http://www.kursatozcan.com/ders_notlari/muhendislik_jeolojisi/1_mineraller_ve_kayaclar.pdf Erişim Tarihi: 08.04.2019.
- [36] <https://de.wikipedia.org/wiki/Basalt> Erişim Tarihi: 08.04.2019.
- [37] Eggleton R. A., Foudoulis C., Varkevisser D., Weathering Of Basalt: Changes In Rock Chemistry And Mineralogy, Clays and Clay Minerals, Vol. 35, No. 3. 161-169, 1987.
- [38] Aksoy F. A.; Porselen Üretiminde Bazaltın Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek lisans Tezi, Sakarya, 2007.
- [39] Günay, V., Yılmaz, Ş., Cam-Seramikler Bilim ve Teknolojisi, Tübitak-MAM, Malzeme Enstitüsü, 2010.
- [40] Kahveci A. E., Diyarbakır Yöresinde Bazalt Taşının Yapı Malzemesi Olarak Kullanımının İncelenmesi Üzerine Bir Araştırma, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 2008.
- [41] Holand W., Beal G., Class-Ceramic Technology, The American Ceramic Society, 2002.
- [42] http://www.basaltsite.com/bazalt_nedir_what_is_basalt.htm Erişim Tarihi: 09.04.2019.
- [43] Araz N. G., Aksoy A., İskender E., Sayın A., Beton Üretiminde Bazalt Fiber Kullanımının Değerlendirilmesi, 9. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 1-3 Kasım 2018.
- [44] Halaç H., H., Yamaçlı R., Geçmişten Günümüze Tasarımda Camın Yeri Ve Önemi, III. Uluslararası Katılımlı Seramik, Cam, Emaye, Sır ve Boya Semineri, SERES, 132-140, Eskişehir, 17-19 Ekim, 2005.
- [45] Kula E., Anadolu Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi'nde Türkiye'nin İlk Cam Bölümü III. Uluslararası Katılımlı Seramik, Cam, Emaye, Sır ve Boya Semineri, SERES, 141-148, Eskişehir, 17-19 Ekim, 2005.

- [46] Küçük N., Gezer O., Doğal Siyah Obsidyen Cevherleri İçin Yığılma Faktörlerinin Belirlenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17, 872-880, 2017.
- [47] Kocabağ D., Camların Kimyası ve Özellikleri, Birsen Yayınları, İstanbul, 2005.
- [48] Erten E., Camcılık Tarihinde Üretim ve Kullanım Kavramları, III. Uluslararası Katılımlı Seramik, Cam, Emaye, Sır ve Boya Semineri, SERES, 99-107, Eskişehir, 17-19 Ekim, 2005.
- [49] Zanolto E. D., Mauro J. C., The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate, Journal of Non-Crystalline Solids, Volume 471, Pages 490-495, 1 September 2017.
- [50] Yılmaz Ş., Volkanik Bazalt Kayaçlarından Cam-Seramik Malzeme Üretim Koşullarının Araştırılması ve Özelliklerinin İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 1999.
- [51] Özsolak İ., Yeşilay S., Sıcak Cam Üfleme Tekniğinde Lüster Etkisinin Araştırılması, Türk Bilim Araştırma Vakfı, Cilt:10, Sayı:4, Sayfa: 21-28, 2017.
- [52] Kocabağ D., Cam Hammaddeleri: Bir İşlevsel Değerlendirme, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 110-122, İzmir, 16-17.Ekim.1997.
- [53] Güvel Ş. B. A., Refrakter Kaynaklı Cam Hatalarının Fırın İçerisindeki Oluşum Yerlerinin Tespiti, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [54] Karasu B., Ay N., Cam Teknolojisi, Milli Eğitim Basımevi, Ankara, 2000.
- [55] MEGEP, Mesleki Eğitim Ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, Seramik ve Cam Teknolojisi, Camın Kimyasal Yapısı, Ankara 2008.
- [56] <https://malzemetreneri.files.wordpress.com/2015/03/met-310-2-hafta.pdf>
Erişim Tarihi: 15.04.2019
- [57] Başer A. T., Kompozit Metalik Camlara Genel Bir Bakış, Mühendis ve Makina, cilt 54, sayı 640, s. 36-44, 2013.
- [58] MEB, Seramik ve Cam Teknolojisi, Cam Türleri ve Camı Oluşturan Oksitler, Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2013.
- [59] Ersundu M. Ç., Geçiş Metal Oksit Katkılı PbCl₂-TeO₂ Camların Yapısal ve Optik İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17 sayfa 218-226, 2017.

- [60] Akkaşoğlu E. Karasu B., Organik Camlar, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 5, No: 2, (512-536), 2018.
- [61] Pulker H. L., Coatings on glass, Second, Revised Edition, Elsevier Science Press, 1999.
- [62] Timur A., Zr-Esaslı Kütlesel Metalik Camın Üretimi Ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2013.
- [63] Yazıcı Z. Ö., Hitit A., Kobalt Esaslı Metalik Cam Kaplamaların Pnömatik Sıkıştırma Yöntemi ile Sentezlenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 727-733, 2016.
- [64] Kumar G., Tang H. X., Schroers J., Nanomoulding with Amorphous Metals, Nature, 457, 868-872, 2009.
- [65] Çolak S. Ç., Geçiş Metal İyonları Katkılı Sodyum-Fosfat Camların Elektrik, Optik, Yapısal, Yüzeysel ve Termal Özellikleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Genel Fizik Bilim Dalı, Doktora Tezi, Eskişehir, 2009.
- [66] MEB, Seramik ve Cam Teknolojisi, Cam Üretimi ve Şekillendirme Yöntemleri, Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2013.
- [67] Deng B., Luo j., Harris J. T., Smith C. M., Mckenzie M. E., Molecular Dynamics Simulations on Fracture Toughness of Al_2O_3 - SiO_2 Glass-Ceramics, Scripta Materialia, Elsevier, 162, 277-280, 2019.
- [68] Stryjak A. J., McMillan P.W., Microstructure And Properties Of Transparent Glass-Ceramics, Journal Of Materials Science, 13, 1275-1281, 1978.
- [69] Kurtuldu F., Kemik Külü İçeren Camlarda ZrO_2 İlavesinin Cam-Seramik Oluşumu Üzerine Etkisi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tez, Gebze, 2015.
- [70] Özdoğan M., %15 Fluorapatit İçeren Potasyum-Kalsiyum Mika Cam Seramiklerinin Kristalleşme Davranışları, Mikro Yapısı ve İşlenebilirlik Özellikleri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2003.
- [71] Çetin S., Deli Halil (Osmaniye) Bazaltik Pomzalarının Cam Seramik Yapımında Kullanım Olanakları Ve Karakterizasyonu, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Adana, 2012.

- [72] Ceyhan T., Günay V., Çapoğlu A., Sayrak H., Karaca Ç., Bir cam-seramik biyomalzemenin üretimi, tanımlanması ve biyolojik etkilerinin canlı-dışı ve canlı-içi ortamda değerlendirilmesi, *Acta Orthop Traumatol Turc*, 41(4), 307-313, 2007.
- [73] Evcin A., Demişulam C., Sol-Jel Yöntemiyle Düşük Ergime Sıcaklıklı Sır Üretimi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, Özel Sayı*, 239-244, 2009.
- [74] Liu C. J., Shi, P.Y, Zhang, D.Y., Jiang M. F., Development of Glass Ceramics Made From Ferrous Tailings and Slag in China, *Journal of Iron and Steel Research International*, 14, 2, pp. 73-78, 2007.
- [75] Gui H., Li C., Lin C., Zhang Q., Luo Z., Han L., Liu J., Liu T., Lu A., Glass forming, crystallization, and physical properties of $MgO-Al_2O_3-SiO_2-B_2O_3$ glass-ceramics modified by ZnO replacing MgO, *Journal of the European Ceramic Society*, 39, 1397-1410, 2019.
- [76] Öder B. M., B_2O_3 İlavesinin Lityum alümina silikat Cam-Seramiğinin Kristalleşme Davranışları ve Isıl Genleşme Özelliklerine Etkisi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 2007.
- [77] Neuville, D. R., Cormier, L., BoizoT, B., Flank, A. M., Structure of H-Irradiated Glasses Studied by X-ray Absorption and Raman Spectroscopies, *Journal of the Non-Crystalline Solids*, 323, pp. 207-213, 2003.
- [78] Ercenk E., Bayrak G., Şen U., Yılmaz Ş., Bazalt Esaslı Cam ve Cam-Seramik Kaplamaların Mekanik Özellikleri, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt: 14, sayı:3, sayfalar: 17-24, 2014.
- [79] Th. Scholten GmbH & Co. KG, Keramische Verschleisschutz-Werkstoffe Für Jede Art Von Verschleiss, *Technische Broschüre*, Robert-Bosch-Str. 23-25 D-42489 Wülfrath, Deutschland, 2019.
- [80] Kalenborn Kalprotect GmbH & Co. KG, Kalenborn Bietet Optimalen Verschleißschutz Für Anlagenkomponenten Und Rohrleitungen, *Vettelschoss*, Deutschland, 2019.
- [81] Yıldız S., Alişer B., Keleştemur O., Atık Mermer Tozu ve Cam Lif Katkılı Çimento Harçlarının Sülfat Etkisi Altındaki Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, 29 (2), 23-31, 2017.
- [82] Taçyıldız E., Uçucu Külün Temmoku Sır Özelliklerine Etkileri, *Yedi: Sanat, Tasarım Ve Bilim Dergisi*, Sayı 20, 39-44, 2018.

- [83] Dorum A., Koçak Y., Yılmaz B., Uçar A., Yüksek Fırın Cürufunun Çimento Yüzey Özelliklerine Ve Hidratasyona Etkileri, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, sayı 19, sayfalar 45-58, 2009.
- [84] Yıldız T., Gür A. K., Aşınma Sistemleri, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırma ve Uygulama Merkezi, cilt 4, sayı 2, sayfalar 86-90, Şubat 2006.
- [85] Demirtaş S., İçten Yanmalı Motorda Üst Ölü Noktada Meydana Gelen Aşınma Mekanizmalarının DeneySEL Olarak İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Programı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2017.
- [86] Bağcı M., Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Konya, 2010.
- [87] Hutchings I., Shipway P., Tribology Friction and Wear of Engineering Materials, Elsevier, Second Edition, 2017.
- [88] Avcu E., Titanyum Alaşımlarının Partikül Erozyonu İle Pürüzlendirilmesi Ve Aşındırılması İşlemlerinin Optimizasyonu, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Kocaeli, 2013.
- [89] Önen B., Fidan S., Sınmazçelik T., Çınar A., Nozul içi geometrilerinin partikül erozyonunda hedef malzeme aşınma ve pürüzlülüğüne etkileri, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32:4, 1051-1061, 2017.
- [90] Curkovic L., Kumic, I., Grilec K., Solid Particle Erosion Behavior of High Purity Alumina Ceramics, Ceramics International, 37, 29-35, 2011.
- [91] Erdem V. E., Arısoy C. F., Başman G., Şeşen M. K.; SAE 1060 Çeliğinin Eroziyon Aşınma Özelliklerinin Aşınmaya Dirençli Ticari Çelik Plakalarla Karşılaştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
<https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/P14.pdf> Erişim Tarihi: 08.12.2018.
- [92] Yıldırım Y., 3003 H14 Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyonu Davranışı, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 2013.
- [93] Fidan S., Sınmazçelik T.; Polimerler Ve Polimer Kompozitlerde Katı Partikül Erozyonunun Mekanizmaları Ve Malzeme Performansını Etkileyen Faktörler, 13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, sayfalar: 1057-1067, İstanbul, 9-12.Kasım.2006.

- [94] Fang M., Liu F., Min X., Huang Z., Liu Y., Wu X., Tang C., Zhang., Peng F., Effect of Temperature on Solid Particle Impact Erosion Wear Mechanism of 5 mol% Yttria Stabilized Zirconia Ceramics, *Ceramics International*, 41, 6807-6811, 2015.
- [95] Skopp A., Woydt M., Ceramic and Ceramic Composite Materials with Improved Friction and Wear Properties, *Tribology Transactions*, Volume 38, 2, 233-242, 1995.
- [96] Oka Y. I., Miyata H., Erosion behaviour of ceramic bulk and coating materials caused by water droplet impingement, *Wear*, 267, 1804-1810, 2009.
- [97] <http://www.matasmaden.com/Urun.aspx?id=25&gid=3> Erişim Tarihi: 11.05.2019.
- [98] <http://www.matasmaden.com/Urun.aspx?id=28&gid=3> Erişim Tarihi: 11.05.2019.
- [99] Ercenk, E., Bayrak, G., Şen U., Yılmaz, Ş., Volkanik Bazalt Kayaçları ve Seramik Sektöründe Kullanımı, VI. Uluslararası Katılımlı Seramik Kongresi, Bildiriler Kitabı, 37-42, Türk Seramik Derneği & Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 30 Ekim –1 Kasım 2006.
- [100] Günçelik S.; K-Feldspat ile Na-Feldspatın Flotasyonla Seçimli Ayırımında Çok Değerlikli İyonların Etki Mekanizmasının Araştırılması, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2006.
- [101] Bayraktar I., Ersayın S., Gülsoy Ö. Y., Ekmekçi Z., Can M.; Temel Seramik ve Cam Hammaddelerimizdeki (Feldspat, Kuvars ve Kaolin) Kalite Sorunları ve Çözüm Önerileri, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Cevher Hazırlama Ana Bilim Dalı, 3.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu/14-15 Ekim İzmir, 1999.
- [102] Heinrich J. G., Gome C. M.; Einführung in die Technologie der Keramik, Vorlesungsmanuskript, Technische Universität, Wien. http://www.ceramics-processing.com/fileadmin/ceramics/Einfuehrung_in_die_Technologie_der_Keramik.pdf, Erişim tarihi: 27.10. 2018.
- [103] <https://www.esan.com.tr/urunDetay/ogutulmus/2-1> Erişim Tarihi: 02.12.2017.
- [104] <https://www.esan.com.tr/urunDetay/flote/2-2> Erişim Tarihi: 02.12.2017.
- [105] <http://www.saykar.net/garnet.html> Erişim Tarihi: 02.04.2016.

- [106] Öztürk M., SiC İlaveli Alümina Seramik Kompozitler, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Yüksel Lisans Tezi, Mayıs 2007.
- [107] A.H. Rashed; “Properties and Characteristics of Silicon Carbide” POCO Graphite, Inc. 2002. Erişim Tarihi: 22.04.2017.
- [108] http://www.saykar.net/silisyum_karbur Erişim Tarihi: 14.04.2017.
- [109] Akarsu M. D.; “SiC Esaslı Seramiklerin Spark Plazma Sinterleme (Sps) Yöntemi İle Üretimi Ve Karakterizasyonu” İTÜ., Fen Bilimleri Enst., Met. ve Malz. Müh. ABD, Doktora Tezi, Nisan 2015.
- [110] Schütze M., Quadackers W. J.; Novel Approaches To Improving High Temperature Corrosion Resistance, Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2008.
- [111] Ercenk, E.; ZnO - % 6 Bi₂O₃ İkili Sisteminde İlavesinin Mikroyapı Ve Tane Büyüme Kinetiğine Etkileri, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Haziran, 2005.
- [112] Jaschinsky P., Kombinierte Rasterelektronen- und Mehr-Spitzen-Rastertunnelmikroskopie als Methode zur Ladungstransportmessung im Nanometerbereich, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften Fakultät, Dissertation, Aachen, 2007.
- [113] Erdin N.; Taramalı Elektron Mikroskobunun Temel Prensipleri Ve Numune Hazırlama, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, Seri B, Cilt 36, Sayı 2, İstanbul, 1986.
- [114] Echlin P.; Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, Springer, USA, 2009.
- [115] <https://nanovea.com/instruments/?p=profilometers> Erişim Tarihi: 02.12.2018.
- [116] Hart A., Effect of Particle Size on Detergent Powders Flowability and Tabletability, Chemical Engineering & Process Technology, 6:1, 2015.
- [117] Mullarney P. M., Leyva N., Modeling Pharmaceutical powder-flow performance using particle-size distribution, Pharmaceutical Technology, 33:126-134, 2009.
- [118] Antanov M., Yung D. L., Goljandin D., Mikli V., Hussainova I., Effect Of Erodent Particle Impact Energy On Wear Of Cemented Carbides, Wear, 376-377, 507-515, 2017.

- [119] Wellman R. G., Solid Particle Erosion Of Ceramics, University of Cape Town, Faculty of Engineering, Materials Engineering, Master of Applied Science, July, 1993].
- [120] Levy A., Solid Particle Erosion and Erosion Corrosion of Materials, ASM international, 1995.
- [121] Otávio L., Affonso A., Machinery Failure Analysis, Handbook, 2006.
- [122] Wiederhorn S. M., Hockey B. J., Effect Of Material Parameters On The Erosion Resistance Of Brittle Materials, Journal of Materials Science, 18, 766-780, 1983.
- [123] Qi H., Fan J., Wang J., Li H., Impact Erosion by High Velocity Micro-Particles on A Quartz Crystal, Tribology International, 82, 200-210, 2015.
- [124] Franco A., Roberts., The Effect of Impact Angle on the Erosion Rate of Polycrystalline α -Al₂O₃, Journal of the European Ceramic Society, 18, 269-274, 1998.
- [125] Shitole P. P., Gawande S. H., Desale G. R., Nandre B. D., Effect of Impacting Particle Kinetic Energy on Slurry Erosion, J Bio Tribo Corros, 1:29, 2015.
- [126] Vite J., Vite M., Castillo M., Laguna-Camacho J.R., Soto J. Susarrey O., Erosive Wear on Ceramics Materials Obtained from Solid Residuals and Volcanic Ashes., Tribology International, 43, 1943-1950, 2010.
- [127] Wang D. F., Mao Z.Y., A Study for Erosion of Si₃N₄ Ceramics by Impact of Solid Particles, Wear, 199, 283-286, 1996.
- [128] Desale G.R., Gandhi B. K., Jain S. C., Effect of Physical Properties of Solid Particle on Erosion Wear of Ductile Materials, World Tribology Congress III, 12-16 September, Washington, D. C., USA, 2005.
- [129] Gopi K. R., Nagarajan R., Rao S. S., Mandal S., Erosion Model on Alumina Ceramics: A Retrospection, Validation and Reinement, Wear, 264, 211-218, 2008.
- [130] Shrivastava A., Suhane A., Effect of Particle and Target Material Characteristics on Erosion Wear by Solid Particles, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 06, Issue: 03, Mar, 2019.
- [131] Jiménez A.E., Bermúdez M. D., Tribology for Engineers; Friction and Wear, Woodhead Publishing, USA, 2011.

- [132] Sharma S. K., Kumar B. V. M., Lim K. Y., Kim Y. W., Nath S. K., Erosion behavior of SiC-WC Composites, *Ceramics International*, 40, 6829-6839, 2014.
- [133] Ballout Y., Mathis J. A., Talia J. E., Solid Particle Mechanism in Glass, *Wear*, 196, 263-269, 1996.
- [134] Wensink H., Elwenspoek M. C., A Closer Look at the Ductile-Brittle Transition, in *Solid Particle Erosion*, *Wear*, 253, 1035-1043, 2002.
- [135] Hao G., Dong, Du, M., Li Z., Dou., A Comparative Study of Ductile and Brittle Materials Due to Single Angular Particle Impact, *Wear*, 428-429, 258-271, 2019.



ÖZGEÇMİŞ

Muhammet Öztürk, 1982 yılında Zonguldak'ın Merkez ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Zonguldak'ta tamamladı. 2000 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi Uşak Mühendislik Fakültesi'nde başladığı Seramik mühendisliği eğitimini başarı ile tamamlayıp 2004 yılında mezun oldu ve Seramik Mühendisi unvanını aldı. 2004 Aralık ve 2005 Mayıs ayları arasında askerliğini kısa dönem er olarak Bitlis'de yaptı. 2005 yılında Sakarya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı yüksek lisans eğitimini 2007 yılında başarı ile bitirdi. 2007 – 2009 yılları arasında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Gökçebey Mithat Mehmet Çanakçı Meslek Yüksek Okulu seramik programında öğretim görevliliği unvanında dışarıdan dersler verdi. Sakarya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 2007 – 2008 eğitim öğretim yılı bahar yarıyılında başlayıp ara verdiği doktora eğitimine, 2012 – 2013 bahar yarıyılında devam etmeye başladı ve halen sürdürmektedir. Belirli bir süre Viyana/Avusturya'da yaşamış ve Almanca bilmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.