

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SiC SERAMİK PREFORM OPTİMİZASYONU VE FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM MATRİS KOMPOZİT
ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ebru YILMAZ

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Fatih ÇALIŞKAN

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SİC SERAMİK PREFORM OPTİMİZASYONU VE
FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM MATRİS
KOMPOZİT ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ebru YILMAZ

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 30/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu
ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr.
Fatih ÇALIŞKAN
Jüri Başkanı

Prof. Dr.
Adem DEMİR
Üye

Dr. Öğr. Üyesi
Mehmet UYSAL
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.

Ebru YILMAZ
09.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Fatih ÇALIŞKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığına ve bütün öğretim üyelerine teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına da (Proje No: 2017-09-08-012) teşekkür ederim.

Ayrıca, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen maddi manevi her zaman yanımda olan babam Ufuk YILMAZ, annem Nebahat YILMAZ, kız kardeşim Büşra YILMAZ, erkek kardeşim Emin Mustafa YILMAZ'a ve manevi desteğini esirgemeyen arkadaşlarım Elif YENİLMEZ ve Kübra UÇAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KOMPOZİT MALZEMELER	2
2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	2
2.1.1. Takviye elemanına göre kompozitler	2
2.1.2. Matris malzemesine göre kompozitler	3
2.1.2.1. Polimer matrisli kompozitler	3
2.1.2.2. Seramik matrisli kompozitler	3
2.1.2.3. Metal matrisli kompozit malzemeler	4
2.1.2.3.1. Alüminyum metal matrisli kompozit malzemeler	4
2.2. Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri	7
2.2.1. Sıvı faz üretim yöntemi	7
2.2.1.1. Vorteks döküm yöntemi	7
2.2.1.2. Santrifüj döküm	8
2.2.1.3. Sıvı metal infiltrasyonu	9
2.2.2. Katı faz üretim yöntemleri	10
2.2.2.1. Toz metalurjisi	11

BÖLÜM 3.	
GÖZENEKLİ SERAMİKLER	12
3.1. Seramik Köpüklerin Üretim Yöntemleri	13
3.1.1.Kısmi sinterleme	13
3.1.2.Harcanan malzeme	13
3.1.3.Doğrudan köpükleştirme tekniği	14
3.1.4.Replikasyon yöntemi	15
3.2. Seramik Köpüklerin Yapısı	17
BÖLÜM 4.	
SİNERLEME	19
4.1. Sinterleme Mekanizmaları	20
4.1.1.Katı faz sinterlemesi	20
4.1.2.Sıvı faz sinterlemesi	21
4.1.3.Buhar faz sinterlemesi	22
4.2. Sinterleme Sistemleri	22
4.2.1.Basınçsız sinterleme	22
4.2.2.Sıcak presleme	23
4.2.3.Sıcak izostatik presleme	24
4.2.4.Gaz basınçlı sinterleme	25
4.2.5.Spark (kıvılcım) plazma sinterleme	26
BÖLÜM 5.	
FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEME	27
5.1. FDM Malzemelerinin Uygulama Alanları	29
5.1.1.Havacılık uygulamaları	29
5.1.2.Nükleer uygulamalar	29
5.1.3.Enerji sistemleri uygulamaları	30
5.1.4.Biyomedikal uygulamaları	30
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
6.1. Malzeme	31
6.1.1.Silisyum karbür tozu	31

6.1.2.Bentonit tozu	32
6.1.3.Silisik asit ve sitrik asit	33
6.1.4.Magnezyum oksit- alümina-silika (MAS)	34
6.1.5.Poliüretan sünger	35
6.1.6.ETİAL 171	35
6.2. Kullanılan Araç-Gereçler ve Uygulama Yöntemi	35
6.3. Deney Akış Şeması	38
6.4. Karakterizasyon	39
6.4.1.Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışınları spektroskopisi (EDS)	39
6.4.2.X-ışınlan difraktometresi ile karakterizasyon	40
6.4.3.Tane boyut ölçümü	41
6.4.4.Makro stereo mikroskop	42
6.4.5.Basma testi	42
6.5. Seramik Köpük Üretim Yöntemi	43
6.5.1.Reçetenin hazırlanması	43
6.5.2.Seramik çamurun hazırlanması	44
6.5.3.Seramik köpüğün sinterlemesi	45
6.5.4.Yoğunluk testi	46
6.5.5.Basma testi	46
6.5.6.İnfiltrasyon işlemi	47
6.5.7.Sertlik testi	49

BÖLÜM 7.

DENEYSEL SONUÇLAR	50
7.1. 10 Ppi Seramik Köpük Üretim Aşamaları	50
7.1.1.Yoğunluk hesaplama	50
7.1.2.Makro ve SEM incelemeleri	52
7.2. Katkı Malzemelerin 10 Ppi'lık Seramik Köpüğün Mikroyapısı Üzerindeki Etkisi	53
7.2.1.1BMAS ve 1BMAS18 kodlu seramik köpüklerin makro görüntüleri	53
7.2.2.1B, 1BMAS ve 1BMAS18 Kodlu seramik köpüklerin SEM görüntüleri	55

7.2.3.1BMAS18, 1BMAS25 ve 1BMAS50 kodlu seramik köpüklerin makro stereo görüntüleri	60
7.3. 10 Ppi'lık Seramik Köpüğün EDS Analiz Sonuçları	62
7.4. 10 Ppi'lık Seramik Köpüğün XRD Analiz Sonuçları	63
7.5. 10 Ppi'lık Seramik Köpüğün Basma Test Analiz Sonuçları	65
7.6. 20 Ppi'lık Seramik Köpük Üretim Aşamaları	67
7.6.1.Yoğunluk hesaplama	68
7.6.2.Makro ve SEM incelemeleri	69
7.7. 20 Ppi'lık Seramik Köpüğün Basma Test Analiz Sonuçları	72
7.8. 20 Ppi'lık Seramik Köpüğün EDS Analiz Sonuçları	72
7.9. İki Katmanlı Seramik Köpük Üretimi	74
7.10. SiC Takviyeli Metal Matrisli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozit Malzeme Üretimi	76
7.10.1.Tek katmanlı döküm numunesi	76
7.10.2.İki katmanlı döküm numunesi	77
7.10.3.İki katmanlı döküm numunesinin sertlik ölçümü	82
BÖLÜM 8.	
GENEL SONUÇLAR	83
8.1. Öneriler	84
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	91

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AMMK	: Alüminyum metal matrisli kompozit
SiC	: Silisyum karbür
PMK	: Polimer matrisli kompozit
SMK	: Seramik matrisli kompozit
FDM	: Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme
EDS	: X-ışını spektroskopisi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
XRD	: X-ışını difraksiyonu
1B	: Bentonit katkılı numune
1BMAS	: Bentonit-magnezyumoksit-alümina-silika katkılı numune
1BMAS12	: %12 Formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit katkılı numune
1BMAS18	: %18 Formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit katkılı numune
1BMAS25	: %25 Formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit katkılı numune
1BMAS50	: %50 Formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit katkılı numune
MPa	: Mega Paskal
HIP	: Sıcak izostatik presleme
N	: Newton
MgO	: Magnezyum oksit
Al ₂ O ₃	: Alümina
SiO ₂	: Silika
H ₄ SiO ₄	: Silisik asit
C ₆ H ₈ O ₇	: Sitrik asit
Ağ.	: Ağırlıkça

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Takviye elemanının şekline göre kompozit çeşitleri	3
Şekil 2.2. (a) Partikül takviyeli, (b) kısa fiber takviyeli (c) sürekli fiber takviyeli, (d) plaka takviyeli metal matrisli kompozitlerin farklı takviye tipleri	6
Şekil 2.3. Vorteks yöntemi bileşenlerinin kesit görünümü	8
Şekil 2.4. (a) Santrifüj döküm ile üretilmiş fren diski (b) disk içindeki bölgesel mikroyapılar (1) matrisçe zengin, (2) arayüzey, (3) takviyece zengin bölge	9
Şekil 2.5. Sıvı metal infiltrasyonu	9
Şekil 2.6. Sıvı metal infiltrasyon yöntemi ile üretilen Al-SiC metal matrisli kompozit malzeme	10
Şekil 2.7. Toz metalurjisi tekniği ile parça üretim aşamaları	11
Şekil 3.1. Köpüklerin hücreli yapı olarak sınıflandırılması açık (a) ve kapalı (b)	12
Şekil 3.2. Kurban şablon tekniğinin şematik görünümü	14
Şekil 3.3. Direk köpükleştirme tekniğinin şematik görünümü	14
Şekil 3.4. Replikasyon yönteminin şematik görünümü	15
Şekil 3.5. Replikasyon yöntemi üretilmiş nihai seramik köpük	16
Şekil 3.6. Seramik köpük üretiminde açığa çıkan kusur (üçgensel bölge)	17
Şekil 3.7. Seramik köpük mikroyapı analizinde kullanılan stereolojik parametreler	17
Şekil 4.1. Sinterleme sırasında taneler arasında meydana gelen büzülme	19
Şekil 4.2. Katı faz sinterlemesi	20
Şekil 4.3. İki toz karışımı kullanılarak sıvı faz sinterlemesinin aşamaları	21
Şekil 4.4. Basıncsız sinterleme grafit fırınının şematik gösterimi	23
Şekil 4.5. Sıcak presleme fırını	24

Şekil 4.6. Sıcak izostatik presleme fırını	25
Şekil 4.7. Spark (kıvılcım) plazma sinterleme	26
Şekil 5.1. %10 Al ₂ O ₃ takviye edilen malzemedeki (a) Saf alüminyum alaşımına (b) geçiş bölgesi	28
Şekil 5.2. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme sınıflandırılması	29
Şekil 6.1. SiC tozun tane boyut dağılım grafiği	32
Şekil 6.2. SiC tozun SEM görüntüsü	32
Şekil 6.3. Bentonit tozun tane boyut dağılım grafiği	33
Şekil 6.4. Bentonit tozun SEM görüntüsü	33
Şekil 6.5. MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ üçlü faz denge diyagramı	34
Şekil 6.6. Precisa marka hassas terazi	35
Şekil 6.7. Atmosfer kontrollü yatay tüp fırını	36
Şekil 6.8. Yatay tüp fırınında kullanılan kayıkçığın katı modeli	36
Şekil 6.9. Kum karıştırma makinesi	37
Şekil 6.10. Ergitme ocağı	37
Şekil 6.11. Deney akış şeması	38
Şekil 6.12. SEM ve EDS analiz cihazı	40
Şekil 6.13. XRD analiz cihazı	41
Şekil 6.14. Tane boyut ölçüm cihazı	41
Şekil 6.15. Makro stereo mikroskop	42
Şekil 6.16. Basma test cihazı	43
Şekil 6.17. Hazırlanan seramik çamur	44
Şekil 6.18. Sinterlenen numunelerin sıcaklık- zaman grafiği	45
Şekil 6.19. Sinterlenmiş seramik köpük	45
Şekil 6.20. Basma mukavemeti test düzeneğinde numune görüntüsü (a), basma mukavemeti testi yapılmış numune görüntüsü (b)	47
Şekil 6.21. Tek katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemedeki kullanılmak üzere hazırlanan alt ve üst döküm kalıbı (a) ve İki katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemedeki kullanılmak üzere hazırlanan alt ve üst döküm kalıbı (b), (c)	48
Şekil 6.22. Sertlik ölçme cihazı	48
Şekil 7.1. Seramik köpüğün katkı oranı ile gözeneklilik ilişkisi	52

Şekil 7.2. Seramik köpüğün yoğunluk ile gözeneklilik ilişkisi	52
Şekil 7.3. 1B (a), 1BMAS (b) ve 1BMAS18 (c) kodlu seramik köpüklerin makro görüntüleri	54
Şekil 7.4. 1B (a), 1BMAS (b) ve 1BMAS18 (c) kodlu seramik köpüğün üçgensel bölgelerinin SEM görüntüleri	57
Şekil 7.5. 1B (a), 1BMAS (b) ve 1BMAS18 (c) kodlu seramik köpüğün hücre kollarının SEM görüntüleri	59
Şekil 7.6. 1BMAS18 (a), 1BMAS25 (b) ve 1BMAS50 (c) seramik köpüklerin makro görüntüleri	61
Şekil 7.7. 1B kodlu seramik köpüğün map EDS analizi	62
Şekil 7.8. 1BMAS18 kodlu seramik köpüğün map EDS analiz	63
Şekil 7.9. 1B (a), 1BMAS (b) ve 1BMAS18 (c) seramik köpüğün XRD analiz sonucu	65
Şekil 7.10. Formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit türev solüsyonlarının ağırlıkça katkı oranı %18, %25, %50 olan seramik köpüklerin basma mukavemet değerleri	66
Şekil 7.11. Basma mukavemeti-gözeneklilik ilişkisi	66
Şekil 7.12. 1B, 1BMAS ve 1BMAS18 seramik köpüklerin basma mukavemet değerleri	67
Şekil 7.13. 1B (a), 1BMAS (b) ve 1BMAS12 (c) kodlu seramik köpüklerin makro stereo görüntüleri	70
Şekil 7.14. 1B (a), 1BMAS (b) ve 1BMAS12 (c) SEM görüntüleri	71
Şekil 7.15. 1B kodlu seramik köpüğün SEM görüntüsü	72
Şekil 7.16. 1B kodlu seramik köpüğün EDS analiz sonucu	73
Şekil 7.17. 1BMAS12 seramik köpüğün SEM görüntüsü	73
Şekil 7.18. 1BMAS12 seramik köpüğün EDS analiz sonucu	74
Şekil 7.19. Fonksiyonel derecelendirilmiş seramik köpük üretimi (a) ve (b)	75
Şekil 7.20. Tek katmanlı alüminyum infiltre edilmiş kompozit malzeme	77
Şekil 7.21. Alüminyum infiltre edilmiş kompozit malzeme 10 ppi (a), 20 ppi (b)	77
Şekil 7.22. Çift katmanlı alüminyum infiltre edilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme-1.döküm (a), (b) ve (c)	78

Şekil 7.23. Çift katmanlı alüminyum infiltre edilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme-2.döküm	79
Şekil 7.24. Çift katmanlı alüminyum infiltre edilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme-3.döküm (a), (b) ve (c)	81
Şekil 7.25. Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin brinell sertlik testi	82



TABLolar LİSTESİ

Tablo 6.1. SiC tozun kimyasal özellikleri	31
Tablo 6.2. Bentonit tozun kimyasal bileşenleri	33
Tablo 6.3. ETİAL 171 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi	35
Tablo 6.4. Seramik çamurlarının içindeki malzemelerin ağırlıkça katkı oranları .	44
Tablo 7.5. 1B kodlu seramik köpüğün kimyasal bileşimi	62
Tablo 7.6. 1BMAS18 kodlu seramik köpüğün kimyasal bileşimi	63

SiC SERAMİK PREFORM OPTİMİZASYONU VE FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM MATRİS KOMPOZİT ÜRETİMİ

ÖZET

Son yıllarda, partikül takviyeli alüminyum metal matris kompozitler (AMMK); yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve yüksek aşınma direncine sahip olması sebebiyle havacılık ve savunma sanayinde gittikçe artan bir öneme sahip olmuştur. Bu özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler, diğer malzemelere kıyasla özelliklerinin geliştirilmeye açık ve çeşitlendirilmeye daha uygun olduğu görülmektedir.

Bu çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, replikasyon yöntemi ile ana iskelet yapıyı oluşturan Silisyum karbür (SiC) seramik köpükler üretilmiştir. Ağırlıkça (Ağ.) formülize edilmiş silisik asit (H_4SiO_4) ve sitrik asit ($C_6H_8O_7$) türevi %18, %25, %50 katkı oranlarına sahip SiC seramik köpükler 1200 °C’de 90 dakikada sinterlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda belirlenen %18 Ağ. formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit türevi ile katkılandırılmış olan kompozisyon optimum olarak belirlenmiştir. Daha sonra sinterlenmiş numunelerin karakterizasyonunda, elementel analizi için X-ışını spektroskopisi (EDS), faz analizleri için X-ışını difraksiyonu (XRD), ağ yapılarının morfolojilerini ortaya çıkarmak için Makro stereo mikroskop ve yoğunlaşma davranışlarını incelemek için ise Taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazları kullanılmıştır.

Partikül takviyeli SiC seramik köpük üretiminde kullanılan formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asitin, mekanik özelliklere olumlu/geliştirici etkisi olduğu, basma testi yapılarak görülmüştür.

Son olarak da 10 ve 20 ppi oranına sahip SiC seramik köpüklere döküm yöntemi ile alüminyum metali infiltre edilerek 2 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş metal matrisli kompozit malzeme üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Seramik köpük, metal matrisli kompozit, silisyum karbür, polimerik sünger, replikasyon yöntemi

SiC CERAMIC PREFORM OPTIMIZATION AND PRODUCTION OF FUNCTIONAL GRADED ALUMINUM MATRIX COMPOSITE

SUMMARY

Particulate reinforced aluminum alloy matrix composites (Al MMC's) with high strength, high resistance to wear and low density properties have become important in the aerospace and the defense industry recently, when compared to other similar engineering materials, novel composite materials can derive from the Al MMCs due to their superior properties

This study was carried out in two stages. First, SiC ceramic foams which form the main net structure, were produced. by a replication method . SiC ceramic foam having different amounts of formulated silicic acid additive and citric acid (18%, 25 % and 50 % wt.) were sintered at 1200 °C for 90 min. As a consequence of the study, the composition of 18 (wt%) formulated silicic acid and citric acid was choosen as an optimum ratio. Thereafter, In the characterization of the sintered samples, conventional characterization methods were performed to analysis the sintered samples; X-ray spectroscopy (EDS) for ultimate analysis, X-ray diffraction (XRD) for the determination of phase composition, Macro stereo microscope to reveal the morphology of the network structures and Scanning Electron Microscope (SEM) for examination the densification behavior.

Mechanical properties of the sintered samples were evaluated and characterized by a compressive testing instrument. These results revealed that the additive of silicic acid influenced and enhanced the mechanical properties of the sintered ceramic foams.

In the last stage, Liquid aluminum metal was infiltrated without squeezing to the high porous foams with 10 and 20 ppi. Therefore, fabrication of functionally graded metal matrix composite was successfully carried out as two-layer in a body.

Keywords: Ceramic foam, metal matrix composite, silicon carbide, polymeric sponge, replication method

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Savunma sanayisinde, savunma malzemelerine duyulan ihtiyaç nitelik ve zaman yönünden diğer ürünlere göre farklı özellik taşımaktadır. Bu farklı özellik taşıması sebebiyle, yeni bir malzemeyi üretmek için olanak vermektedir. İleri teknoloji malzemesi olan fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) savunma sanayisine yeni bir yön kazandırmasıyla önem arz etmektedir.

Farklı özelliklere sahip malzemeler farklı kombinasyonlarda bir arada kullanılarak yeni özellikleri bünyesinde bulunduran ileri teknolojik malzeme üretimine olanak sağlamaktadır. Bunun sonucunda da ileri teknoloji malzemesi olan fonksiyonel derecelendirilmiş metal matrisli kompozit malzemeler savunma sanayisi alanında kullanılması yaygınlaşmaktadır (Kırmızı, Arık ve Çinici, 2019).

Metal matris kompozitler (MMK), iki veya daha fazla bileşene sahip ve malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanarak üretimi gerçekleşen kompozit malzemelerdir. MMK üretiminde yaygın olarak kullanılan hafif metaller olarak da bilinen matris metalleri alüminyum ve magnezyumdur. Silisyum karbür, Alüminyum oksit (Al_2O_3), grafit veya uçucu kül gibi yaygın olan seramikler de matris malzemesi içinde homojen olarak dağıtılmış takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Silisyum karbür takviyeli alüminyum matris kompozitleri, monolitik alaşımlarla kıyaslandığında gelişmiş fiziksel ve mekanik özelliklere sahip ileri mühendislik malzemeleridir. SiC takviyeli alüminyum metal matrisli kompozitler düşük maliyetleri ve izotropik özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerin kullanımında avantajlı olmuştur. Son yıllarda, metal matris kompozitler sürünme koşulları altında korozyona ve yüksek sıcaklığa karşı dirençli olmaları, yüksek mukavemet-ağırlık oranına ve yüksek sertliğe sahip olmaları nedeniyle, özellikle uçak ve otomobil motor teknolojilerinde çoğunlukla kullanılmaktadır (Das, Mishra, Singh ve Pattanaik, 2014).

BÖLÜM 2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzeme, her iki bileşene ait özelliklerin birleşimi ile daha iyi özelliğe sahip olan en az iki fazın oluşturduğu malzemedir. Çoğu kompozit malzeme yalnızca iki fazdan oluşup birinci faz olan matris, genellikle dağıtılmış faz olarak adlandırılan takviye fazını sararak sürekliliğini sağlamaktadır (Callister ve Rethwisch, 2007).

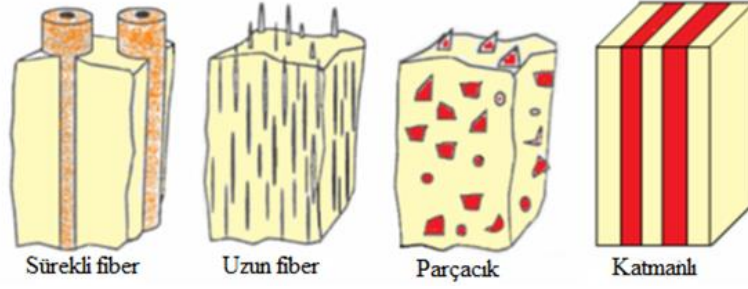
2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler kullanılan matris malzemesi ve takviye elemanına göre sınıflandırılmaktadır.

2.1.1. Takviye elemanına göre kompozitler

Kompozit malzemelere kazandırılan özellikler kullanılan takviye elemanlarından sağlanmaktadır. Matris malzemesi ile takviye elemanının uyumu sayesinde istenilen üstün özelliklerin elde edilmesi mümkündür. Takviye malzemesi olarak genellikle oksit, karbür ve nitrür bileşikleri kullanılmaktadır (Çalın, 2006). Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmak üzere takviye elemanları dört gruba ayrılabilir (Şekil 2.1.).

1. Sürekli fiber
2. Uzun ve kısa fiber
3. Parçacık
4. Katmanlı



Şekil 2.1. Takviye elemanının şekline göre kompozit çeşitleri (Çalın, 2006).

2.1.2. Matris malzemesine göre kompozitler

Matris malzemesine göre kompozitler üç gruba ayrılır.

1. Polimer matrisli kompozitler (PMK)
2. Seramik matrisli kompozitler (SMK)
3. Metal matrisli kompozitler (MMK)

2.1.2.1. Polimer matrisli kompozitler

Düşük yoğunluk, ekonomik oluşu, kolay bir şekilde üretilmesi, yalıtkanlık ve mekanik özelliklerinin iyi olmaları sebebiyle endüstride yaygın biçimde kullanılmaktadırlar. Kompozit malzemelerde matris malzemesi sıcaklık dayanımını büyük oranda etkiler. Polimer matrisli kompozitlerin termal dayanımlarının düşük olması bu malzemenin dezavantajıdır. Polimer matrisli kompozitlerin üretiminde pres yoluyla kalıplama ve iletmeli kalıplama, soğuk şekillendirme ve profil çekme yöntemi kullanılarak üretilirler (Şahin, 2000, s. 91-134).

2.1.2.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik malzemeler hem oksidasyona hem de yüksek sıcaklıktaki bozulmaya dirençlidir. Bu malzemelerin gevrek kırılma eğilimlerinden dolayı yüksek sıcaklık ve yüksek gerilmenin olduğu uygulamalar için özellikle otomobil ve uçak gaz türbini parçaları gibi alanlarda kullanılmamaktadır.

Seramik malzemelerin kırılma tokluğu değeri düşüktür. Parçacık, kısa ve uzun fiber formundaki seramik malzemenin başka bir seramik içine yerleştirilmesiyle seramik matrisli kompozitler geliştirilmiş böylelikle seramiklerin kırılma tokluğu değerleri önemli oranda artış gözlenmiştir. Parçacık, kısa fiber ve uzun fiber formundaki takviye malzemesi matristen başlayan çatlakın ilerlemesini engelleyerek kırılma tokluğunda artışa sebep olmaktadır. Böylelikle, SMK'lerin yüksek sıcaklıktaki sürünme davranışı ve termal şoka karşı dirençlerinin de iyileştiği görülmektedir.

Seramik matrisli kompozitlerin üretimi sıcak izostatik presleme (HIP), sıcak presleme ve sıvı faz sinterlemesi yöntemleriyle gerçekleştirilir. Bu ürünler talaşlı imalat üretiminde kesici takım olarak da kullanılır (Callister, 2000 s.56-58).

2.1.2.3. Metal matrisli kompozit malzemeler

Metal esaslı kompozit malzemelerde matris fazı, metal veya metal alaşımı olup takviye fazı ise sürekli fiber, kısa ve uzun fiber ve partikül şeklinde sınıflandırılarak istenen özelliklere ulaşılmasını sağlayan iki veya daha fazla farklı sistemin birleşimidir. Bu kompozit malzemede matris seçimi yapılırken aşınma direnci, termal iletkenlik, mukavemet, yoğunluk, süneklik, kırılma tokluğu gibi özellikler dikkate alınarak oluşturulur. Bahsedilen bu özelliklerin hepsi bir arada elde edilemez. Bu özellikler bir yandan malzemeyi iyileştirirken diğer yandan kötüleştirir (Mindivan, ve Kayalı, 2007).

Metal matrisli kompozitler adından da anlaşıldığı gibi matrisi sünek metal olan kompozit grubudur. Metal matrisli kompozit malzemeler takviyesiz olan metallerle kıyaslandığında daha yüksek ortam sıcaklıklarında kullanılabilir. Takviye malzemesi bu malzemenin özgül dayanımı, sürünme direnci, aşınma dayanımı, ısıl iletkenliği gibi birçok özelliğine olumlu yönde katkı sağlamaktadır. Bu tür malzemeler, yüksek sıcaklıklarda kullanıldığında alev almaması ve bozulma direncinin yüksek olmasından dolayı polimer matrisli kompozitlerden üstündürler. PMK'lere göre daha pahalı olmaları sebebiyle metal matrisli kompozitler kullanımları sınırlıdır.

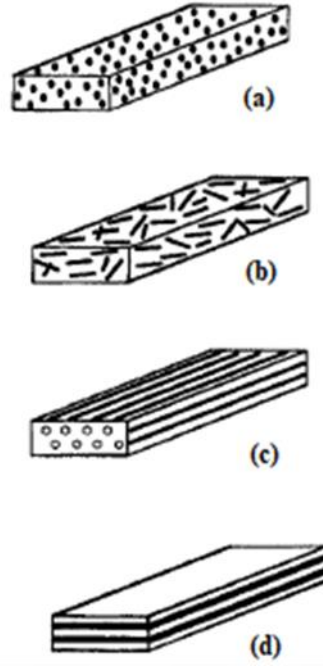
Matris malzemesi olarak alüminyum, magnezyum, titanyum ve bakır gibi metal malzemeler yanında süper alaşımlar da kullanılmaktadır. Takviyeler hacimce oranları çoğunlukla %10 ile %60 arasında olup parçacık, sürekli ve uzun ve kısa fiber şeklindedir. Takviye malzemesi olarak silisyum karbür, alüminyum oksit, karbon kısa fiberler, silisyum karbür ve alüminyum oksit parçacıkları kullanılmaktadır.

Bazı matris-takviye birleşimi yüksek sıcaklıklarda reaksiyona girme eğilimi oldukça fazladır. Bu durumda kompozit malzeme, üretim ya da kullanım sırasında oluşan yüksek sıcaklığın etkisiyle özelliklerini yitirir. Bu sorun genellikle, takviye yüzeyinin kaplanması veya farklı matris alaşımı kullanılarak çözüme ulaştırılır.

MMK'lerin genel olarak üretimi, matris malzemesinin içerisine takviyelendirme aşaması ve şekillendirme prosesi olmak üzere iki adımdan oluşur. Son zamanlarda MMK'ler otomotiv üreticileri tarafından kullanılmaya başlamışlardır. Örneğin, alüminyum oksit veya karbon fiber ile mukavemeti artırılmış bazı motor parçalarında alüminyum alaşımı matris olarak kullanılmıştır. Bu MMK parçalar, aşınmaya ve ısıl çarpılmaya karşı dirençlidir. Havacılık sektöründe MMK'ler kullanılmaktadır. Bor elyafın kullanıldığı uzay mekiği uyduları ve sürekli grafit elyafın kullanıldığı Hubble Uzay Teleskobu örnek olarak bu sektörde yer almaktadır (Callister ve Rethwisch, 2007).

3 çeşit metal matrisli kompozit türü vardır (Şekil 2.2.).

1. Partikül takviyeli MMK
2. Kısa fiber veya visker takviyeli MMK
3. Sürekli fiber veya plaka takviyeli MMK



Şekil 2.2. (a) Partikül takviyeli, (b) kısa fiber takviyeli (c) sürekli fiber takviyeli, (d) plaka takviyeli metal matrisli kompozitlerin farklı takviye tipleri (Chawla ve Chawla, 2006).

2.1.2.3.1. Alüminyum metal matrisli kompozit malzemeler

Genellikle Al-MMK'lar üretimi, toz metalurjisi ve sıvı faz yöntemleri ile uygulanarak elde edilmektedir. Takviye edilen malzemenin türüne göre Al-MMK'ların farklı mekanik özellikler sergiler. Partikül takviyeli Al-MMK'ların üretimi pahalı olmamasına rağmen diğer takviye türlerine sahip kompozitlerden daha üstün mekanik özellikleri vardır. Bir başka takviye türü olan Fiber takviyeli Al-MMK'ların yoğunluğu çelik malzemesinin yarısı kadar olmasına rağmen eşit mukavemet gösteren bir kompozit çeşididir.

Al-MMK'lar yüksek aşınma dayanımı, yüksek sıcaklıkta kararlılık, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek mukavemet, yüksek yorulma direnci, düşük termal genişleme katsayısı, yüksek rijitlik, yüksek elastiklik modülü ve düşük yoğunluğa sahip özelliklerinin olmasından dolayı tercih edilmektedir. Al-MMK'lar özellikle havacılık/uzay sanayinde ve otomotiv sektöründe ilgi çekmektedir. Al-MMK'lar son zamanlarda özellikle otomobillerde motor pistonu, silindir gömleği gibi kullanım alanlarında tercih edilmesinin sebebi, bu malzemelerin hafifliğinden, yüksek dayanımlarından, düşük termal genişleme katsayılarından ve aşınmaya karşı yüksek dirence sahip özelliklerinin olmasından kaynaklanmaktadır.

Al-MMK'lar diğerkompozit malzemelere göre; yüksek mukavemet, iyileştirilmiş aşınma özellikleri, düşük yoğunluk, iyileştirilmiş rijitlik, kontrollü termal genleşme katsayısı, yüksek sıcaklık özellikleri, elektriksel özellikleri ve özellikle sönümlenme kapasite özellikleri bakımından birçok avantajlara sahiptir.

Al-MMK'lar tek fazlı sistemlerle kıyaslandığında üstün özelliklere sahip olmasından ötürü tercih edilmektedir. Al-MMK'lar ekonomik açıdan geniş kullanım alanları olması, yüksek performansı ve çevreye olumsuz etkilerinin sınırlı olması sebebiyle önem arz etmektedir (Bedir, 2010, 28-35).

2.2. Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

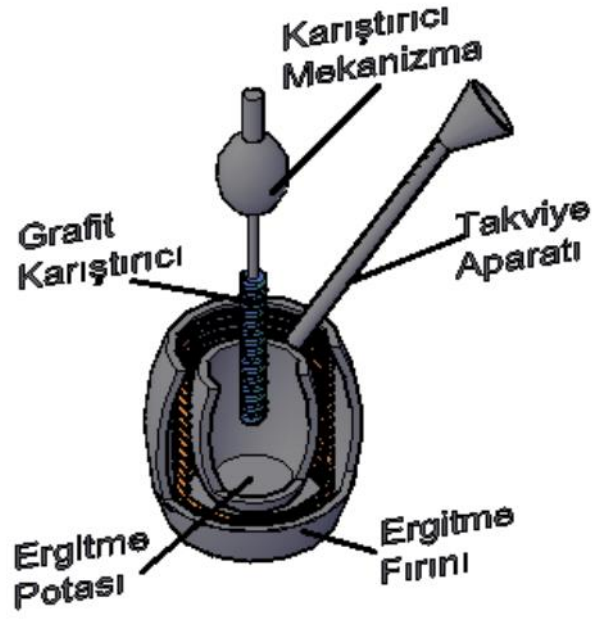
Metal matrisli kompozit malzeme üretiminde temel olarak iki yöntem mevcuttur. Bunlar sıvı faz ve katı faz üretim yöntemidir.

2.2.1. Sıvı faz üretim yöntemi

Bu yöntemde, metal matris (sürekli faz) sıvı halde olduğunda, takviye (süreksiz faz) edilecek malzeme sıvı metale dahil edilmesiyle gerçekleşir. Sıvı halde bulunan ergimiş metal, geleneksel döküm yoluyla istenen şekillerde çeşitli kalıplara dökülür. Bu kategorideki ana süreçler aşağıdaki gibidir (Sharma, Khanduja ve Sharma, 2014).

2.2.1.1. Vorteks döküm yöntemi

Matris malzemesi bir pota içerisinde ısıtılarak ergitme işlemi gerçekleştirilir. Karıştırma, karıştırıcının tepesindeki bir motor vasıtasıyla aktive edilir. Matris malzemesini belirli bir süre boyunca karıştırdıktan sonra matrise seramik partikül takviyesi yapılır (Şekil 2.3.). Yeterli miktarda karıştırdıktan sonra ergimiş kompozit malzeme katılma için bir kalıba dökülüp soğumaya bırakılır (Panwar ve Chauhan, 2018).



Şekil 2.3. Vorteks yöntemi bileşenlerinin kesit görünümü (Avcı, Erdem ve Karabulut, 2017).

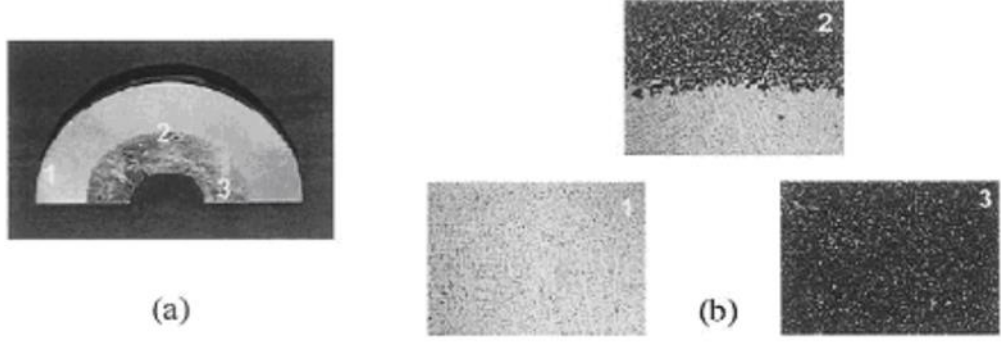
Vorteks dökümün başarılı olması için gereken önemli faktörler;

1. Takviye malzemesi ile matris alaşımı arasında olumsuz bir kimyasal reaksiyon olmaması,
2. Çok düşük gözeneklilik,
3. İki ana faz arasındaki ıslanabilirlik
4. Takviye malzemesinin homojen bir dağılımını sağlamak. Islanabilirlik ve reaktivite, bileşenler arasındaki bağın kalitesini belirler ve böylece kompozit malzemenin nihai özelliklerini büyük ölçüde etkiler (Soltani, Khosroshahi, Mousavian, Jiang, Boostani ve Brabazon, 2017).

2.2.1.2. Santrifüj döküm

Seramik partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin olumsuz özelliklerinden biri partikül takviyesi yapılmamış alaşımlara göre daha zor işlenebilme kabiliyetine sahip olmasıdır. Santrifüj dökümde partikül takviyesi yapıldığında kompozit malzemesinin ideal konumu döküm sırasında gerçekleşen merkezkaç kuvvetiyle elde edilir. Örneğin fren disk üretiminde disk yüzeylerinde aşınma dayanımına ihtiyaç duyulurken malzemenin iç kısımlarında duyulmaz. Yani malzemenin orta kısmında takviye

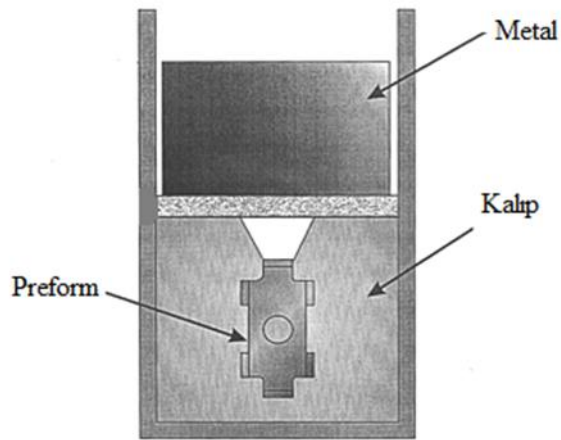
malzemesine gerek duyulmadığı için bu bölgelerin işlenmesi kolaylaşacaktır. Santrifüj döküm ile üretilmiş fren diskinin değişik noktalarındaki mikroyapılarını döküm yapılmış malzemede arayüzey bölgesi ve takviye bölgesi olarak Şekil 2.4.'de göstermektedir (Chawla ve Chawla, 2006).



Şekil 2.4. (a) Santrifüj döküm ile üretilmiş fren diski (b) disk içindeki bölgesel mikroyapılar (1) matrisçe zengin, (2) arayüzey, (3) takviyece zengin bölge (Chawla ve Chawla, 2006).

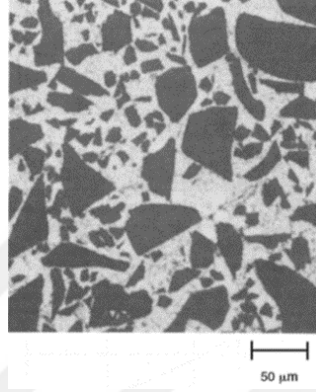
2.2.1.3. Sıvı metal infiltrasyonu

Basıncsız sıvı metal infiltrasyonu yöntemi, basınç veya vakum ortamı oluşturulmadan ergitilen sıvı metali takviye malzemesine yani üretilen poroz malzemelere emdirilme işlemini esas olarak gerçekleştirmektedir. Birbirine bağlı ve açık gözenekliliğe sahip köpük üretiminde uygun koşullar sağlandığı sürece, sıvı metal kendiliğinden takviye malzemesine nüfuz edecektir (Şekil 2.5.).



Şekil 2.5. Sıvı metal infiltrasyonu (Miracle, Donaldson, Henry, Moosbrugger, Anton, Sanders, Scott, 2001, s. 107-119).

Basınçsız sıvı metal infiltrasyon prosesinde, takviye edilen alaşımın kimyasal kompozisyonun ve partikül tipinin, şeklinin, boyutunun uygun hale getirilmesiyle çeşitli kompozit malzemeler üretilebilir. Bu yöntemin en önemli kullanım alanı Al-SiC kompozit malzeme üretimi Şekil 2.6.'da gösterilmektedir (Miracle et al., 2001, s. 107-119).



Şekil 2.6. Sıvı metal infiltrasyon yöntemi ile üretilen Al-SiC metal matrisli kompozit malzeme (Miracle et al., 2001, s. 107-119).

Basınçsız infiltrasyon yöntemi, basınçlı infiltrasyon yöntemi ile karşılaştırıldığında dikkat çeken önemli nokta uygulanan prosesin kolay olması ve düşük bir maliyetle elde edilmesidir (Ren, Shen, Qu, ve He, 2011).

Sıvı metal infiltrasyon yönteminin avantajları;

1. Karmaşık şekilli kompozit parçaların üretimi,
2. Takviye edilmiş bileşenlerin imalat kolaylığı
3. Geleneksel döküm teknolojisi ile benzerliği
4. Seri üretim için elverişliliği
5. Hızlı üretimdir (Zhang, Long ve Flower, 1994).

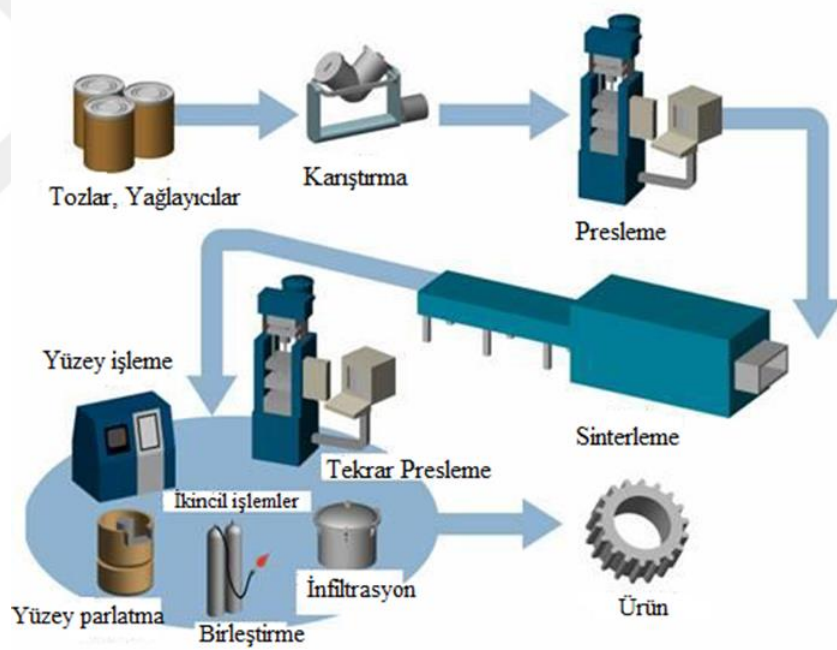
2.2.2. Katı faz üretim yöntemleri

Katı hal süreçlerinde, partikül takviyeli MMK'lerin üretimi, temel tozları birkaç adımda harmanlayarak ve ardından birleştirilmesi (sinterleme) ile gerçekleştirir (Sharma et al., 2014).

2.2.2.1 Toz metalurjisi

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan çeşitli yöntemlerden biri de toz metalurjisi yöntemidir. Malzeme içerisine partikül ve alaşım elementleri ilavesi yapılarak üretimi gerçekleştiren bu parçalara istenilen özellikler kazandırılıp farklı uygulama alanlarında kullanılacak yeni malzemeler elde edilmektedir (Çolak ve Turhan,2016).

Toz metalurjisi ile üretilen parçalar genellikle tozların öncelikle soğuk sıkıştırma yöntemi ile şekillendirilmesiyle gerçekleşir (Şekil 2.7.). Daha sonra bu tozların soğuk şekillendirilmesi ve kalıptan çıkarılması esnasında metal tozları ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünme meydana gelir. Burada oluşacak sürtünmeyi azaltmak için yağlayıcılar kullanılır.

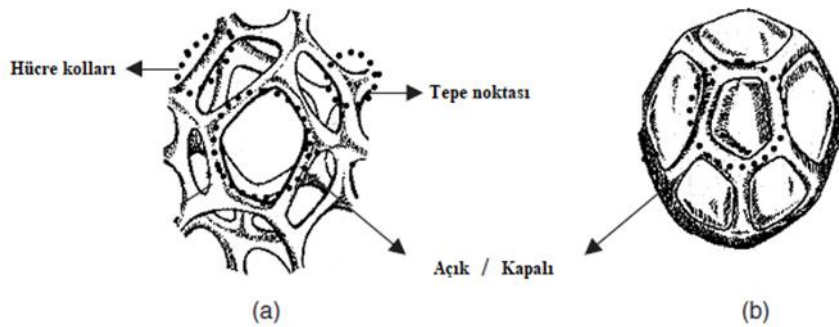


Şekil 2.7. Toz metalurjisi tekniği ile parça üretim aşamaları (Güven, 2011, s.22-28).

Karışımı hazır olan tozlar istenilen boyutlarda kalıplarda preslenir. Presleme işlemi ile kalıp içerisinde bulunan tozlar parçanın şeklini alır. Presleme sonucu elde edilen parçalarda mukavemet değerine düşük olmaktadır. Kalıptan çıkartılan ham malzemelerin mukavemet değerlerini artırmak için de sinterleme işlemi yapılır. Toz metalurjisi ile küçük, kompleks ve boyutsal hassasiyeti yüksek olan parçaların üretimi uygundur (Güven, 2011, s.22-28).

BÖLÜM 3. GÖZENEKLİ SERAMİKLER

Son yıllarda gözenekli seramik malzemelerin üretimi ve kullanımı önemli bir ilgi çekmektedir. Gözenekli seramikler teknolojik uygulamalarda yüksek yüzey alanı, yüksek geçirgenlik, düşük yoğunluk, düşük özgül ısı ve yüksek ısı yalıtımı gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir (Scheffler ve Colombo, 2005). Köpükler, açık ve kapalı hücre olmak üzere iki tip hücresel yapıya sahip olup Şekil 3.1.'de gösterilmektedir. Kapalı hücreli seramik köpükler genellikle ısı yalıtımı ve yangın koruma uygulamaları için kullanılır. Açık hücreli seramik köpükler ise özellikle ergimiş metal filtrasyonu, dizel motor egzoz filtreleri ve sıcak gaz filtrasyonu için kullanılır (Ahmad, Latif, Taib ve Ismail,2013). Öte yandan, metal veya polimer matris kompozit üretiminde takviye malzemesi olarak da kullanımı yaygındır (Colombo, 2005, s. 109-124). Makro-poroz seramik köpükler, genellikle toplam hacmin yaklaşık %70 ile %90 arasında geniş bir gözenek hacmine sahip seramik yapılardır. Ancak gözeneklerin genel morfolojisinde ve köpüklerin özelliklerinde farklılık gözlenmektedir. Seramik köpüklerde ana iskelet olarak silisyum karbür, alümina, zirkonya, silika yaygın kullanılmaktadır (Ahmad et.al, 2013).



Şekil 3.1. Köpüklerin hücresel yapı olarak sınıflandırılması açık (a) ve kapalı (b) (Scheffler ve Colombo, 2005).

3.1. Seramik Köpüklerin Üretim Yöntemleri

Seramik köpüklerin üretim yöntemleri ise dört sınıfa ayrılabilir;

1. Kısmi sinterleme
2. Replikasyon tekniği
3. Şablon malzeme
4. Doğrudan köpükleştirme (Ahmad, Ha ve Song, 2014).

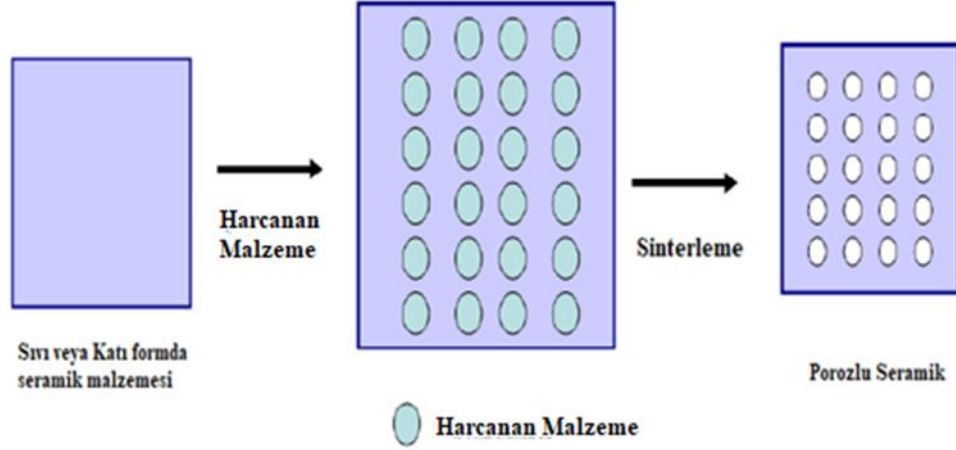
3.1.1. Kısmi sinterleme

Toz bileşenin kısmi sinterlenmesi, gözenekli seramik malzemeleri üretmek için en kolay yöntemdir. Bu yöntemle yoğun malzemeler elde etmek için gerekli sıcaklık ve sürelerde önemli miktarda düşüş sağlanabilir. Gözenekler, sinterlenme sıcaklığında toz partiküllerinin boyun vermesi sonucu, tozların arasında hapsolan boşluklardan meydana gelmektedir. Gözeneklilik derecesi, sinterleme işleminin optimize edilmesiyle kontrol edilebilir ve gözenek büyüklüğü, ham maddenin başlangıç tanecik boyutuyla belirlenir (Jean, Sciamanna, Demuynck, Cambier ve Gonon, 2014). Bu teknikle elde edilen gözenekli seramikler maksimum %60 gözenekliliğe sahiptir (Liu, 2011).

3.1.2. Harcanan malzeme

Gözenekli seramikleri bu yöntemle elde edebilmek için yani gözenek oluşturması amacıyla uygun miktardaki kurban malzemeler sinterlemeden önce seramik toz içerisine karıştırıp sinterleme işlemi uygulanarak gözenekli yapı oluşturulur (Şekil 3.2.).

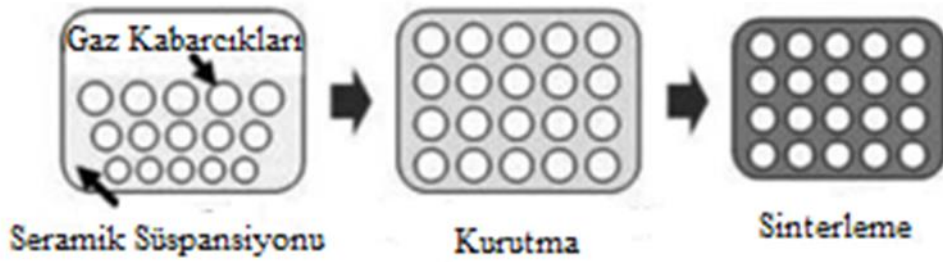
Sık kullanılan gözenek oluşturucu maddeler, polimer boncuklar, organik lifler, patates nişastası, grafit, kömür, salisilik asit, karbonil, kömür ve sıvı parafindir. Gözenek oluşturan maddeler genellikle sentetik organik maddeler (polimer boncuklar, organik lifler, vb.), doğal organik maddeler (patates nişastası, selüloz, pamuk, vb.), metalik ve inorganik maddeler (nikel, karbon, uçucu kül, cam) olarak sınıflandırılır. Malzemelerin gözenekliliği, kurban malzemelerin miktarı ile kontrol edilebilir (Ohji, 2013, s. 1131-1143).



Şekil 3.2. Kurban şablon tekniğinin şematik görünümü (Liu, 2011).

3.1.3. Doğrudan köpükleştirme tekniği

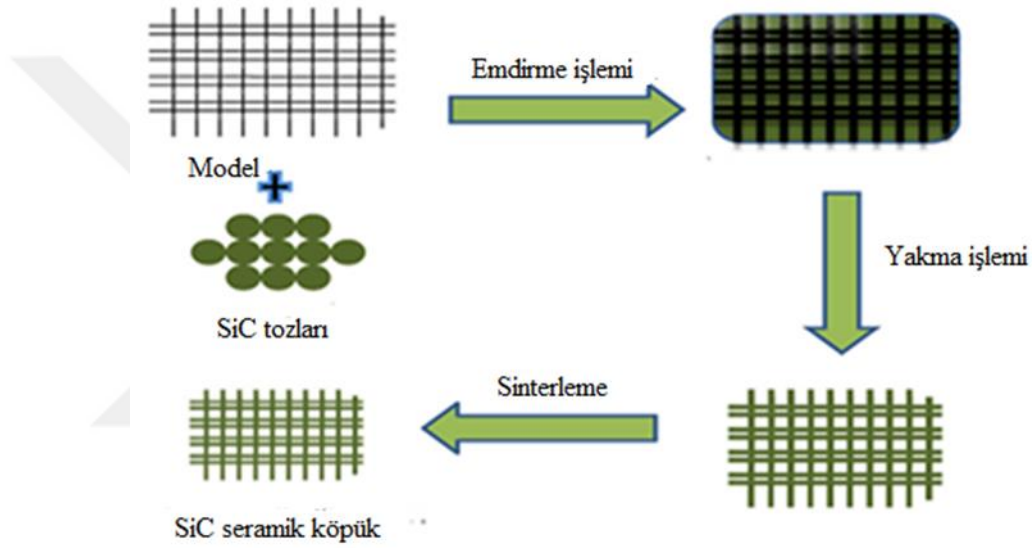
Doğrudan köpükleştirme tekniği, %45 ile %97 arasında değişen gözenekliliğe ve 1 mm ile 30 mm aralığındaki hücre boyutlarına sahip açık ve kapalı gözenekli yapıların üretimi için uygun bir yöntemdir (Gonzenbach, Studart, Tervoort ve Gauckler, 2007). Bu yöntemde, gözenekli malzemeler genellikle seramik çamurun içinde kabarcıklar oluşturularak elde edilir. Bu işlem mekanik çalkalama veya gazların in situ dönüşümü ile gerçekleştirilir. Daha sonra köpürtülen seramik çamur kurutulur ve sinterlenme işlemi uygulanarak yüksek mukavemetli gözenekli bir yapı elde edilmektedir (Şekil 3.3.) (Ahmad et.al 2014).



Şekil 3.3. Direk köpükleştirme tekniğinin şematik görünümü (Ahmad et.al 2014).

3.1.4. Replikasyon yöntemi

Organik köpük emdirme işlemi Schwartzwalder ve Somers tarafından 1963 yılında ortaya çıkmıştır (Karl ve Somers, 1963). İlk üretim yöntemlerinden biri olup, hala endüstride en yaygın olarak kullanılan makro-poroz seramik köpük üretim işlemidir. Bu üretim işlemi açık hücreli bir polimer köpüğünün seramik çamurlar ile kaplanmasını içerir. Fazla çamurun polimerden uzaklaştırılması, akabinde sinterlenmesi ve polimer yanması sonucu seramik köpük tek bir aşamada üretilir. Replikasyon yönteminin akış şeması Şekil 3.4.'de gösterilmektedir.



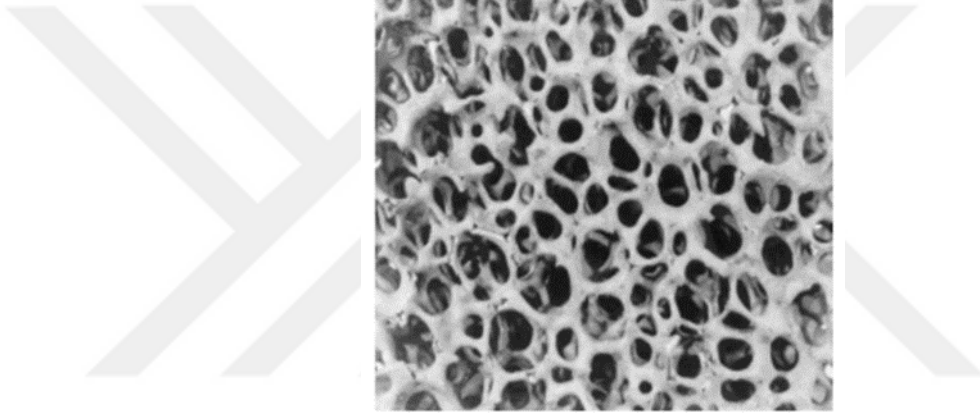
Şekil 3.4. Replikasyon yönteminin şematik görünümü (Eom, Kim ve Raju, 2013).

Bu yöntemde altlık malzeme seçimi için farklı polimer malzemesi olarak poliüretan (PU), poli(vinil klorür) (PVC), polistiren (PS) ve selüloz kullanılmaktadır. Organik köpüğün özelliklerinin tekrarlanabilirliği son derece önemlidir. Sıkıştırıldıktan sonra geriye dönebilmelidir. Son olarak, sinterleme işlemi sonunda seramik köpüğe zarar vermeden temiz ve tamamen yanması gerekir. Örnek olarak, Amerika Birleşik Devleti'ndeki Selee Corp, organik altlık malzeme olarak %97 boşluk hacmine sahip birbirine bağlı, açık hücreli bir poliüretan köpüğü kullanır. Bu yapı, üç boyutlu olarak tekrarlanan dodekadehedra karmaşık bir desenden oluşur.

Seramik çamur hazır olduğunda polimer köpüğe emdirilme işlemi yapıp poliüretanın yüzeyleri kaplanır. Köpük çamurun içine daldırılır ve sıkıştırılarak havası alınır. Hala

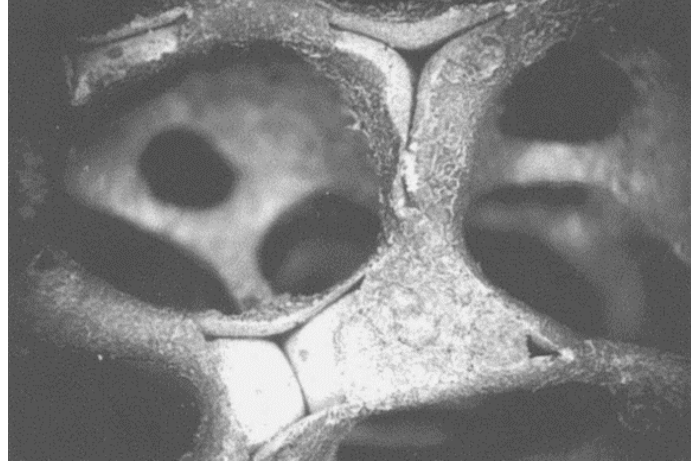
seramik çamurun içindeyken, köpüğün yeniden genişmesine izin verilir ve bu çamur köpüğün açık hücrelerine doğru emilir. İstenilen kaplama yoğunluğunu elde etmek için bu aşama birkaç kez tekrar edilebilir.

Köpük uygun bir şekilde kaplandığında, bir fırında kurutulur ve seramik yapıya dönüştürülür. Daha sonra organik katkıları seramik çamurdan uzaklaştırmanın yanı sıra seramik kolların içindeki polimerin yakılması için sinterleme işlemine maruz bırakılır. Sinterleme işleminin sonucunda üretilmiş nihai seramik köpük Şekil 3.5.'de gösterilmektedir (Scheffler et.al, 2005).



Şekil 3.5. Replikasyon yöntemi üretilmiş nihai seramik köpük (Scheffler et.al, 2005).

Bununla birlikte, bu üretim yönteminde istenmeyen bir kusur ortaya çıkar. Polimer altlık malzemenin pirolizi sırasında polimer yanar ve polimerin tepe noktalarında Şekil 3.6.'da görülen üçgensel bir boşluk ile seramik köpüğün kollarında çatlaklar oluşur. Bu tür kusurlar gözenekli seramiklerin nihai mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkiye sahip olacaktır (Liu, 2011). Seramik köpüğün yoğunluğunu ve mukavemetini sağlamak için de bir sinterleme çizelgesine ihtiyaç duyulur. Gerekli koşullar, kullanılan seramik malzemenin bileşimine bağlıdır (Scheffler et.al, 2005).

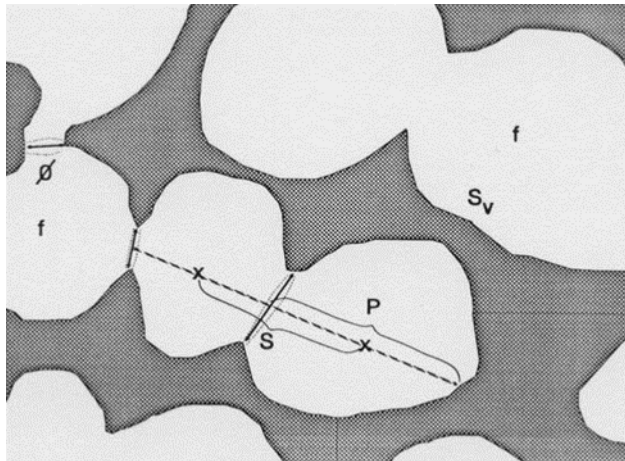


Şekil 3.6. Seramik köpük üretiminde açığa çıkan kusur (üçgensel bölge) (Scheffler et.al, 2005).

3.2. Seramik Köpüklerin Yapısı

Replikasyon yöntemi ile üretilen seramik köpükler genellikle 5 ve 65 ppi (cm başına 2-25 gözenek) arasında değişen gözenek boyutlarına sahiptir. Yoğunlukları ise teorik olarak %5 ile %30 arasında değişmektedir.

Gauckler ve arkadaşları (Gauckler ve Waeber, 1985) seramik köpüklerin akış özelliklerini anlamak için metal infiltrasyonunda kullanılan seramik köpüklerin mikroyapısını karakterize etmede stereolojik yöntemler kullandılar. Kullanılan temel stereolojik parametreler Şekil 3.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Seramik köpük mikroyapı analizinde kullanılan stereolojik parametreler (Scheffler et.al, 2005).

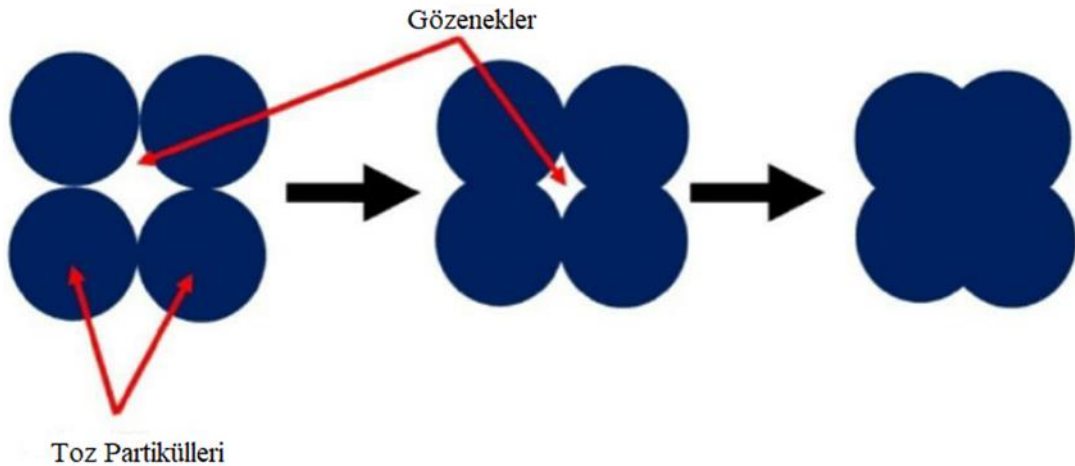
Seramik köpüğün yapısı, çapı ϕ olan açıklıklar ile yuvarlatılmış nominal çapı P olan yuvarlak polihedradan oluşmaktadır. Ağ yapılı gövdenin toplam gözenekliliği f, birim hacim başına toplam iç hücre yüzey alanı S_v ve iki gözenek merkezi arasındaki mesafe S olarak adlandırılmıştır (Scheffler et.al, 2005).



BÖLÜM 4. SİNERLEME

Sinterleme, metal veya seramik tozlarından oluşan bileşimlerin ısı enerjisi yardımıyla yoğun malzemeler elde etme yöntemidir. Son yıllarda malzeme gelişiminde, malzeme sentezinin ve üretim süreçlerinin öneminin artmasıyla beraber sinterleme işleminin de önemi artmıştır (Kang, 2005, s.51-63).

Sinterleme, toz partiküllerinin birbirine bağlanmasını sağlayarak dayanımlarını artıran, yüzey alanlarını düşürmesini sağlayan ısıl işlemdir. Sinterlenecek malzemeye ve sinterleme sürecine göre sinterleme işlemleri değişiklik göstermektedir. Sinterleme işlemi atom difüzyonu ile yüksek sıcaklıklarda meydana gelen bir işlemdir (Şekil 4.1.). Birim hacimdeki partikül miktarının artmasıyla birim hacimdeki yüzey enerjisinde artış meydana gelir. Bu nedenle, partiküllerin yüzey alanlarının artması ile sinterlenme işlemi kolaylaşır. Yüksek serbest enerjiye sahip toz bileşeni, daha az gözenekli ve dayanımı yüksek bir malzemeye dönüşür (Gökçe, Fındık ve Kurt, 2017).



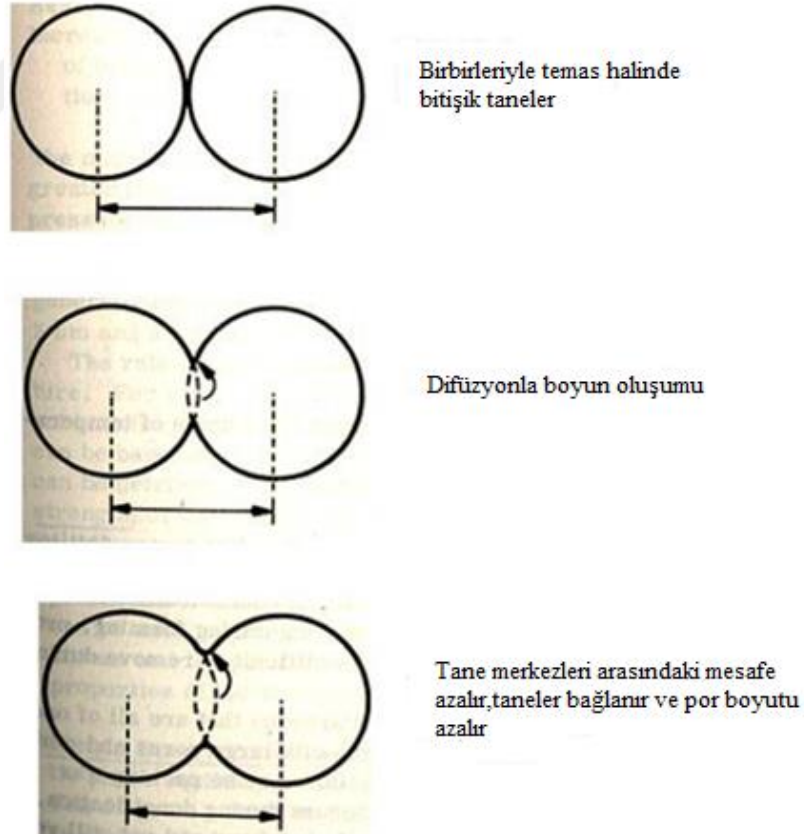
Şekil 4.1. Sinterleme sırasında taneler arasında meydana gelen büzülme (Mangkonsu, Kunio ve Othman, 2008).

4.1. Sinterleme Mekanizmaları

Sinterleme mekanizmaları katı faz sinterlemesi, sıvı faz sinterlemesi ve buhar faz sinterlemesi olarak sınıflandırılır (Bernard-Granger ve Guizard, 2008).

4.1.1. Katı faz sinterlemesi

Katı faz sinterleme işlemi, atomların yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyon bölgelerine doğru yayılması (difüzyon) prensibine dayanmaktadır (Şekil 4.2.). Bu proses için itici güç yüzey alanındaki azalmadır. Diğer bir mekanizma ise boyun bölgesi ve tozun yüzeyleri arasında oluşan serbest enerjiden kaynaklanmaktadır. Tozların, boyun vermeye başladığı noktada buhar basıncı azalmakta olup bu alana doğru tozların difüzyonu hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir (Kingery, Bowen ve Uhlmann, 1976, s.45).

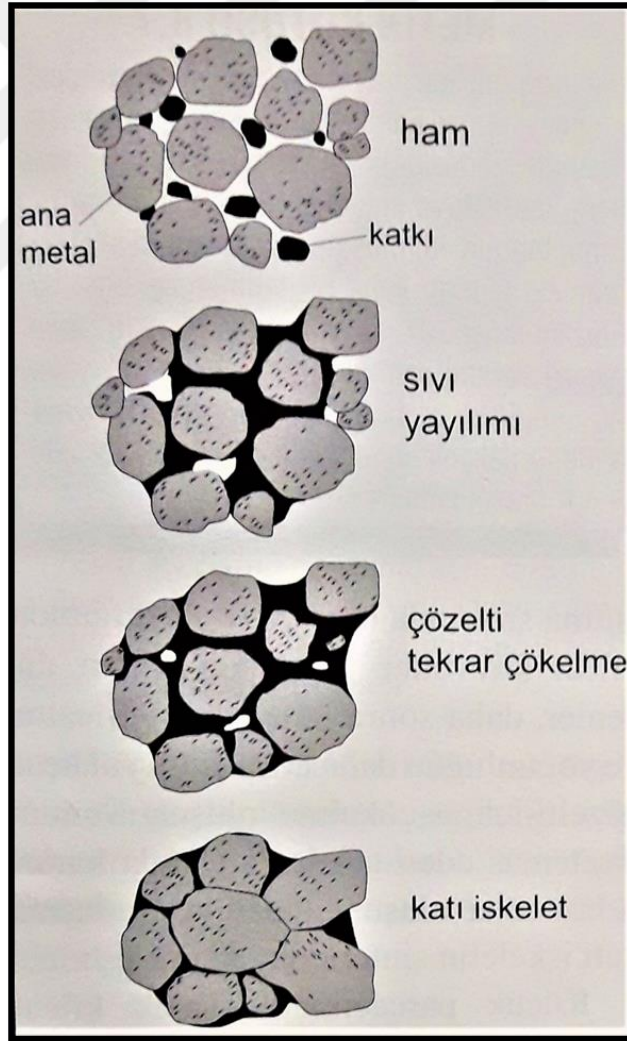


Şekil 4.2. Katı faz sinterlemesi (Çalışkan ve Demir, 2017).

4.1.2. Sıvı faz sinterlemesi

Sıvı faz sinterlemesi için temel prensip ıslatmadır. Islatma katının sıvı içerisinde çözündüğü durumlarda meydana gelmektedir. Bunun dışında bu çözünürlük katının sıvı içerisinde yayınabilmesini sağlamaktadır. Bu şartlardaki difüzyon hızları olası katı-hal difüzyonundan çok daha fazladır.

Sıvı fazlı sinterlemesindeki yoğunlaşma adımları Şekil 4.3.'de şematik olarak gösterilmiştir. İlk başta, sinterleme sırasında taneler katı hal sinterlemesiyle birbirlerine temas eder ve ilk sıvı oluştuğu anda taneler yeniden düzenlenmeye başlar. Bunun sonucunda yapının yoğunluğunda artış meydana gelir.



Şekil 4.3. İki toz karışımı kullanılarak sıvı faz sinterlemesinin aşamaları (German, 2005, s.99).

Katı taneler, oluşan sıvı yardımı ile ıslanarak tanelerin arasındaki bağları çözmeye başlar. Böylelikle yeniden düzenlenme aşaması gerçekleşir. Daha sonra, sıvı faz içerisinde küçük katı partiküller çözünmeye başlayarak sıvı içinde yayılır ve çökeltme işlemi büyük tanelerin üzerinde meydana gelir. Katı tanelerin çözünürlüğü ile tane boyutu ters orantılıdır. Dolayısıyla öncelikle küçük tanelerin sıvı faz içinde çözüldüğü gözlenmektedir. Zamanla tane sayısında azalmalar oluşur ve tane boyutu artar (German, 2005, s.99).

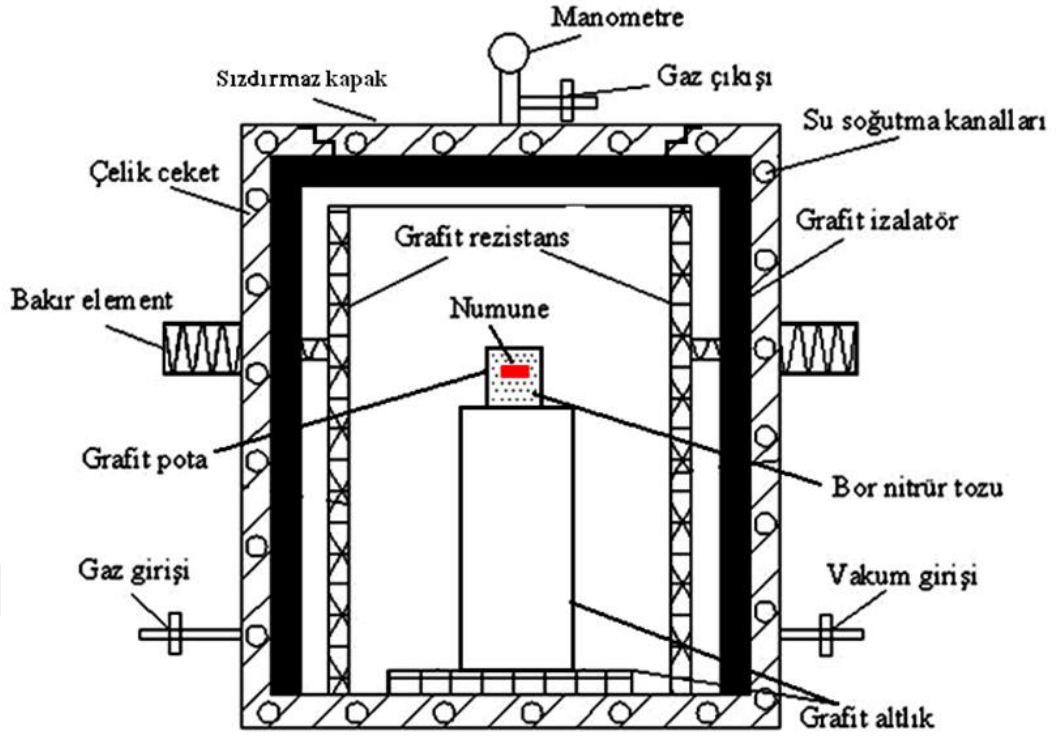
4.1.3. Buhar faz sinterlemesi

Buhar fazı sinterlenmesinde itici güç olan yüzey eğriliği, buhar basıncında farkın oluşmasına sebep vermektedir. Buhar basıncının yüksek olması, tozların yüzeyinin pozitif eğrilik yarıçapından dolayı kaynaklanmaktadır. İki tozun boyun vermeye başladığı bölgede eğrilik çapının negatif olması buhar basıncını düşürmektedir. Böylece tozların difüzyonu, yüksek buhar basıncından düşük buhar basıncına doğru gerçekleşir. Bunun sonucunda ise porların morfolojik yapısında yoğunlaşma (densifikasyon) meydana gelir (Çalışkan ve Demir, 2017).

4.2. Sinterleme Sistemleri

4.2.1. Basıncsız sinterleme

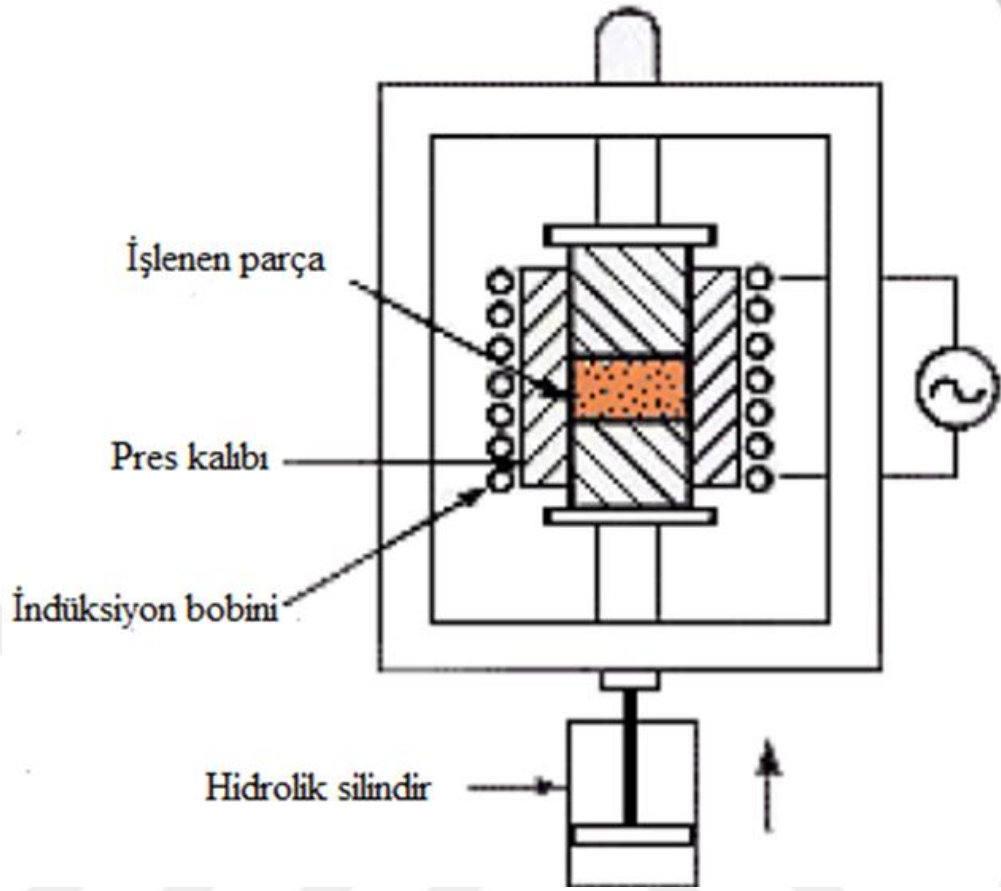
Basıncsız sinterleme yöntemi ile üretilen kompleks şekilli seramik malzemelerin yapısının yoğun olmasına olanak veren ekonomik bir yöntemdir (Şekil 4.4.). Aynı zamanda seramik tozlarının basıncsız sinterlenme işleminde istenen kimyasal bileşime uygun olarak hazırlanmış toz bileşenlerinin yüksek sıcaklıklarda 0,1MPa bir basınç altında sinterlenme işlemi uygulanmaktadır. Ayrıca tozların bileşiminde bulunan katkı malzemeleri sıvı fazın yoğunlaşması için gereken şartları sağlar. Sinterleme işleminde basıncın yerine, tozların yüzey enerjisinin azalması itici güç görevi görmektedir (Terwilliger ve Lange, 1975).



Şekil 4.4. Basıncısız sinterleme grafit fırınının şematik gösterimi (Çalışkan ve Tatlı, 2018).

4.2.2. Sıcak presleme

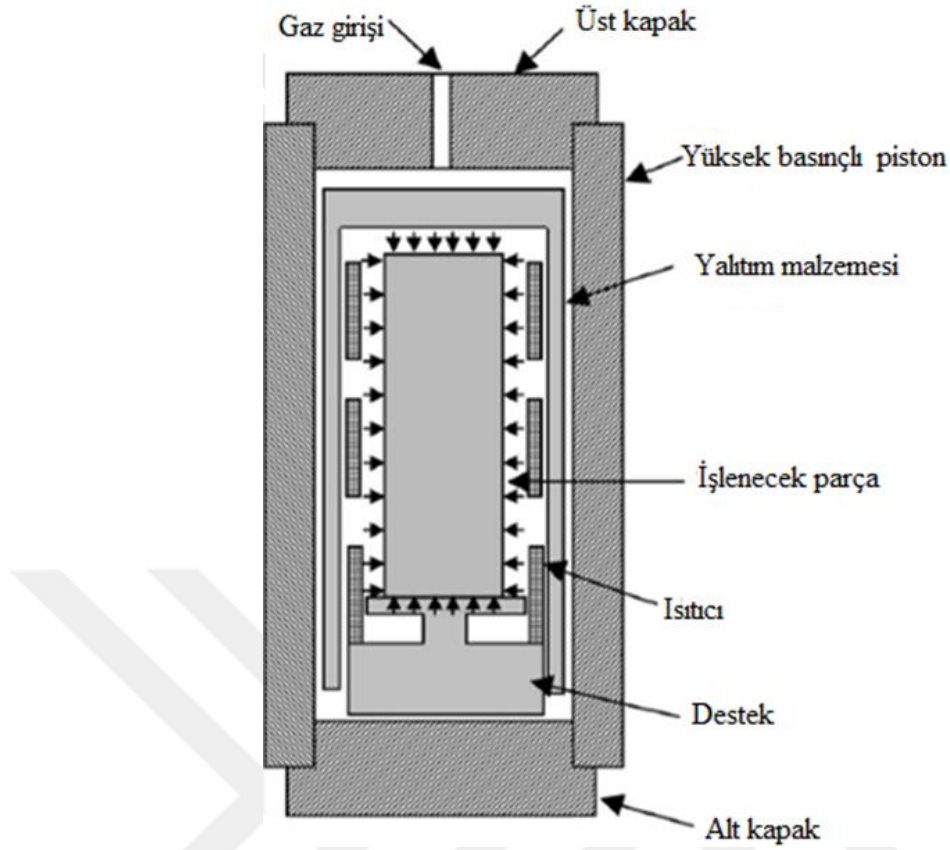
Ham seramik numunenin grafit kalıpta hem ısı hem de tek eksenli basıncın uygulanmasını ve genellikle indüksiyon ve rezistansla ısıtılmasını içeren bir işlemdir (Şekil 4.5.). Normal olarak, numunenin mevcut karbonla reaksiyondan korumak amacıyla kontrollü veya vakum atmosferi gereklidir. Kalıbın içinde astar olarak bor nitrür kullanılır ve numuneyle grafit kalıbın reaksiyonunu engellemek amacıyla pistonlara bor nitrür uygulanır. Bor nitrür tozu sıcak preslenmiş malzemenin kalıptan uzaklaşmasını kolaylaştıran katı yüksek sıcaklık katı yağlayıcı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.5. Sıcak presleme fırını (Çalışkan ve Tatlı, 2018).

4.2.3. Sıcak izostatik presleme

Sıcak izostatik presleme ile 1700°C sıcaklıkların üzerinde çalışarak seramik parçaların üretimi gerçekleştirilmiş olup seramik malzemelerin özelliklerini daha da iyileşmesine katkı sağlamak için kullanılmaktadır (Şekil 4.6.). Özel alaşımlar ve sert metalleri üretebilmek için geliştirilmiş bir yöntemdir. Tam yoğun malzeme üretimini mümkün kılan bu yöntemin ekonomik olmaması önemli bir dezavantajdır. Bütün şartlarda sıvı faz sinterlemesi gereksinimi bulunmakta, gerektiğinde çok daha az miktar da bu ihtiyacı karşılamaktadır. Ancak daha küçük miktar katkı malzemesi kullanılmasından ötürü, son durumda elde edilen özellikler, başka benzer üretim yöntemiyle üretilen seramik malzemelere göre daha üst seviyede olacaktır.



Şekil 4.6. Sıcak izostatik presleme fırını (Çalışkan ve Tatlı, 2018)

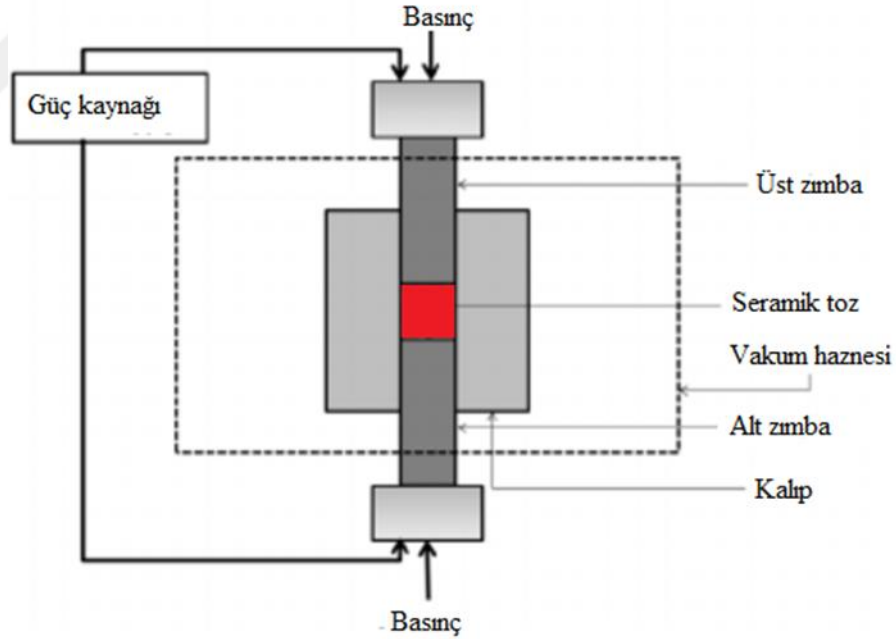
4.2.4. Gaz basınçlı sinterleme

Kararsız ve uçucu katkıları sahip seramiklerin yüksek sıcaklıklarda sinterlenmesinde kullanılan bir yöntem olmasının yanında fazla gaz basıncı uygulanarak uçucu olan esas malzemenin ayrışmasını minimize etmektedir. Örneğin; Gaz basınçlı sinterleme yönteminde 1700°C-2000°C sıcaklık ve 0,1-70 MPa basınç aralığı kullanılarak elde edilen ve çeşitli katkı malzemeleri içeren silisyum nitrür seramikleri bu yöntem ile üretilmektedir. Bu yöntem ile yapılan çalışmalarda kullanılan yüksek basıncın malzemenin yoğunlaşmasına engel olmaktadır. Yani yüksek basınç kullanıldığında kompakt malzemenin gözeneklerinde yüksek basınçlı gaz kalmaktadır. Bu yüzden sinterleme işlemi iki aşamada gerçekleşmektedir. Bu sinterleme işleminin ilk adımında, malzemenin gözenekleri tamamen kapanana kadar basınç uygulanmaz. Daha sonra yoğunlaşmanın tam gerçekleşebilmesi için sinterleme işleminin geri kalan kısmında basınç uygulanır. Gaz basınçlı sinterleme işleminde katkı malzemelerinin kaybindan

dolayı oluşan gözenekler bu yöntem için sorun teşkil etmektedir (Açıkbaş, 2018; Çalışkan ve Tatlı, 2018).

4.2.5. Spark (kıvılcım) plazma sinterleme

Spark plazma sinterleme (SPS) işlemi yeni ve hızlı sinterleme yöntemi olup uygulanması bakımından sıcak presleme yöntemine benzemektedir. Çünkü sıcak presleme işleminde toz silindirik grafit kalıbın içerisine konularak tozun yoğunlaşması sağlanmaktadır. SPS’de ise ısıtma ne rezistans ne de induksiyon ile yapılmaktadır yani Joule etkisinden yararlanılmaktadır. Böylece kalıp ve zımbalara yüksek akım verilerek tozun yoğunlaşması sağlanmaktadır. Ayrıca bu yöntem, yüksek ısınma ve soğutma hızına da olanak sağlar. Dolayısıyla hızlı soğutma ve daha kısa bekleme süresiyle tane büyümesi sınırlandırılarak daha ince taneli mikroyapıya sahip malzeme üretimi gerçekleştirilir (Şekil 4.7.) (Omori,2000).



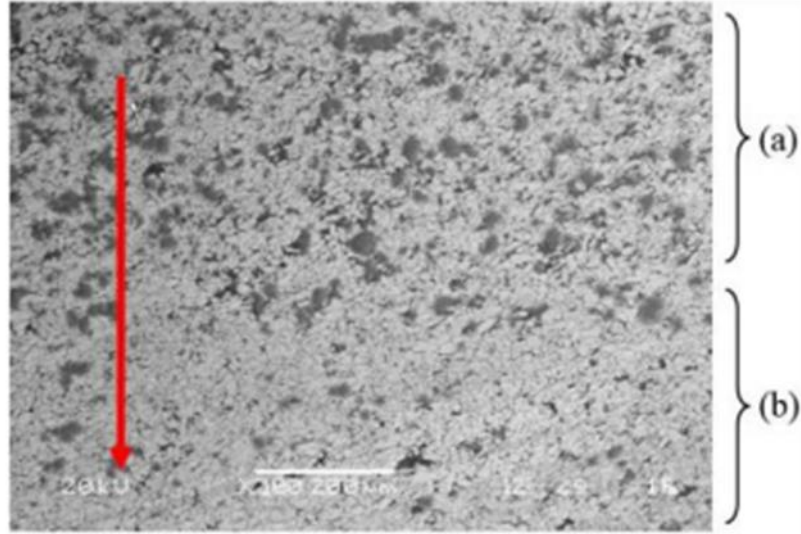
Şekil 4.7. Spark (kıvılcım) plazma sinterleme (Sonber, Murthy, Subramanian, Hubli ve Suri, 2013).

BÖLÜM 5. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEME

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş metal matriks kompozitler farklı özellikleri bir arada bulundurarak mekanik özellikleri iyileştiren yapıların tasarımı ve üretimi için en yaygın kullanılan malzeme çeşidi olup metal ve seramik bileşenlerden oluşmaktadır (Rajan, Pillai ve Pai, 2010).

Hayvanların dokularında ve doğadaki birçok alanda olduğu gibi örneğin kemiklerde, dişlerde ve bitkilerde fonksiyonel derecelendirilmiş yapıları görebiliriz. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin yorulma ve kırılma gibi özelliklerini iyileştirmek için malzemenin yüzeyine yüksek aşınma özelliği iç yapıya ise tokluk kazandırarak daha mukavemetli bir yapı elde edilir.

Fonksiyonel olarak derecelenmiş malzemeler (FDM) olarak da bilinen kademeli özelliklere sahip kompozit malzemeler özellikle otomotiv, biyomedikal ve havacılık sanayisinde üretilen mekanik parçaların gelişmesine katkı sağlamaktadır (El-Galy, Ahmed ve Bassiouny, 2017). FDM'ler çoğunlukla yüksek aşınma direncinin gerekli olduğu uygulama alanları için geliştirilmiştir (Radhika ve Raghu, 2016). FDM malzemesi toz metalurjisi, buhar biriktirme ve santrifüj döküm yöntemi ile üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerle ilgili Bölüm 1'de detaylı bilgi verilmiştir (El-Galy et.al, 2017). FDM'ler, Şekil 5.1.'de gösterildiği gibi özel bir kompozit malzeme sınıfıdır.

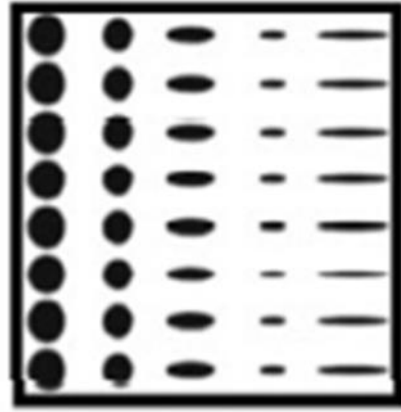


Şekil 5.1. %10 Al₂O₃ takviye edilen malzemeden (a) saf alüminyum alaşımına (b) geçiş bölgesi (Çalışkan, Cömert ve Kocaman, 2017).

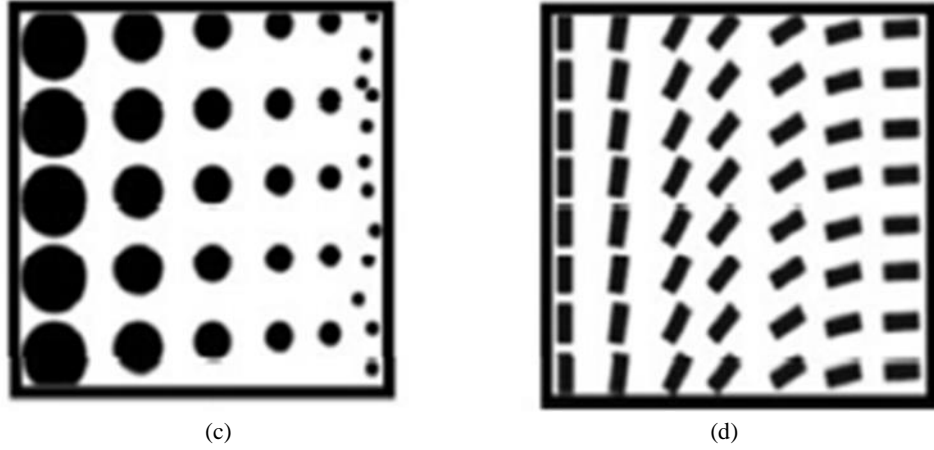
FDM'ler, katmanlarda malzeme yoğunluğu(a) şekil farklılıkları(b), tane boyutu (c) ve malzemede bulunma yönüne göre(d) değişkenlik gösterip Şekil 5.2.'de belirtilmektedir (Sarathchandra, Subbu ve Venkaiah, 2018).



(a)



(b)



Şekil 5.2. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme sınıflandırılması (Sarathchandra et.al, 2018).

5.1. FDM Malzemelerinin Uygulama Alanları

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme 1984'de Japonya'da yapılan bir uzay aracı projesinde yüksek sıcaklıklara dayanabilen (yaklaşık 1000°C) 10 mm'den ince olan bir kesit parçanın ısı bariyer malzemesi olarak kullanılması üzerine ortaya çıkmıştır (Kumar ve Chandrupa, 2014). 1990'larda geliştirilen FDM'lerin pratik kullanımı hala çok sınırlıdır. Ancak, yakın zamanlarda FDM'lerin kullanımı yaygın olmaya başladı.

5.1.1. Havacılık uygulamaları

Havacılık ve uzay mekiği uygulamalarında kullanılan FDM'ler, bünyesinde seramik malzemeler bulundurup yüksek sıcaklık uygulamalarında genellikle termal bariyerlerde veya ısı koruma levhalarında kullanılmaktadır. Bu tür malzemeler nikel ve titanyum kaplamalarında düşük sıcaklıklarda uygulanması sebebiyle termal bariyer olarak kullanılabilir.

5.1.2. Nükleer uygulamaları

Nükleer alanında kullanılan malzemeler çoğunlukla yüksek ısı akışına maruz kalırlar. Bu ısı akışından dolayı malzemede termal yorulma, termal çatlaklar ve erozyon meydana gelir. Özellikle tungsten/bakır bazlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin kullanılması ve geliştirilmesi bu alanda önem arz etmektedir.

5.1.3. Enerji sistemleri uygulamaları

Enerji sistemlerinde kimyasal dayanıklılık, termal gerilim direnci ve elektronik potansiyele sahip özelliklere ihtiyaç duyulması ve geliştirilmesi üzerine yakıt hücreleri, güneş enerji sistemleri, termo elektrik dönüştürücülerde kullanılmaktadır (Sarathchandra et.al, 2018).

5.1.4. Biyomedikal uygulamaları

Bu uygulama için ideal malzeme adayı fonksiyonel dereceli malzemelerdir. FDM, genellikle diş ve kemiklerin ortopedik işlemlerinde geniş bir uygulama alanına sahiptir Mahamood, Akinlabi, Shukla ve Pityana, 2012).

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Malzeme

Bu çalışmanın ilk aşaması olan seramik köpük üretiminde ana yapıyı oluşturan başlangıç malzemesi SiC ve Bentonit tozu kullanılmıştır. Daha sonra seramik köpük malzemesine alüminyum alaşımı infiltre etmek için ETİAL 171 alüminyum alaşımı kullanılmıştır.

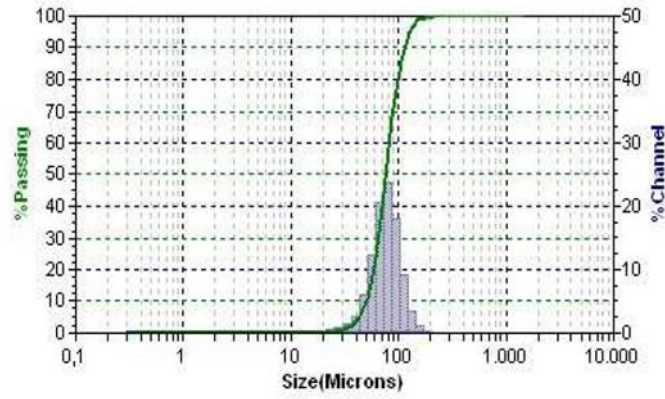
6.1.1. Silisyum karbür tozu

Bağlayıcı kullanarak şekillendirilen ve nihai ürünün ana yapısında makro ve mezo poroziteli olması istenen silisyum karbür tozları Fetaş Alüminyum firmasından temin edilmiştir. Tane boyut analizi sonuçlarında ortalama tane boyutunun 77,24 mikron olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan SiC tozlarının kimyasal özellikleri Tablo 6.1.'de, tane boyut dağılım grafiği Şekil 6.1.'de ve SEM görüntüsü ise Şekil 6.2.'de verilmiştir.

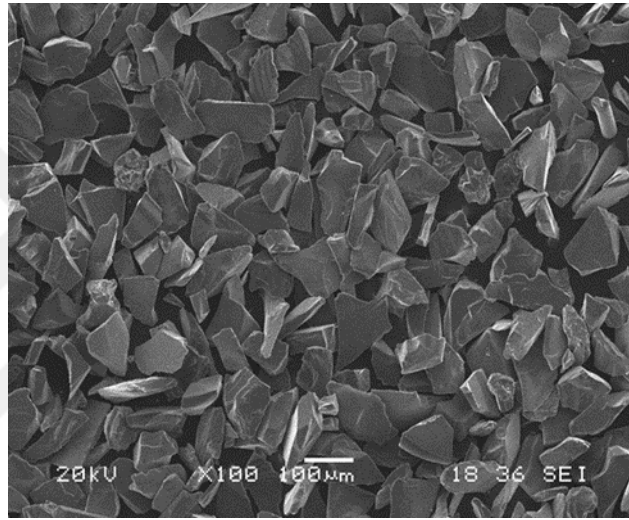
Tablo 6.1. SiC tozun kimyasal özellikleri

	SiC	Fe ₂ O ₃	Serbest C	Si-SiO ₂	Al ₂ O ₃
% Ağ.	98	0,24	0,5	0,4	0,08

("Silisyum-karbür", 2018)



Şekil 6.1. SiC tozun tane boyut dağılım grafiği



Şekil 6.2. SiC tozun SEM görüntüsü

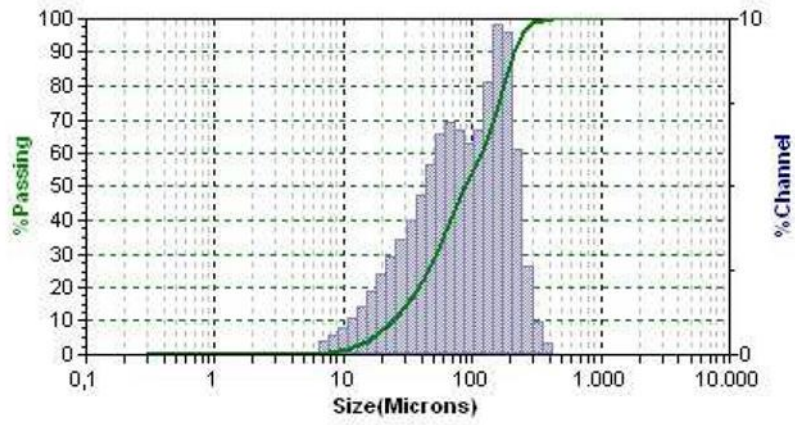
6.1.2. Bentonit tozu

Koloidal özelliği ve yüksek plastisite nedeniyle bağlayıcı olarak kullanılan bentonit tozu Karakaya Bentonit A.Ş. Ankara'dan temin edilmiştir. $(Na,Ca)(Al,Mg)_6(Si_4O_{10})_3(OH)_6 nH_2O$, bentonitin genel kimyasal formülüdür ("Bentonit", 2018). Kimyasal içeriği Tablo 6.2.'de gösterilmektedir. Seramik köpük üretiminde kullanılan poliüretan sünger sinterleme işlemi sırasında yapıdan uzaklaştığında yapıdaki diğer tozların birbirinden ayrılmaması için yapıda bağlayıcı etkisi gösteren bentonit tozu kullanılmıştır. Toz boyut analizleri sonuçlarında ortalama tane boyutu 89,32 tespit edilmiştir. Şekil 6.3.'de tane boyut dağılım grafiği Şekil 6.4.'de SEM görüntüsü verilmiştir.

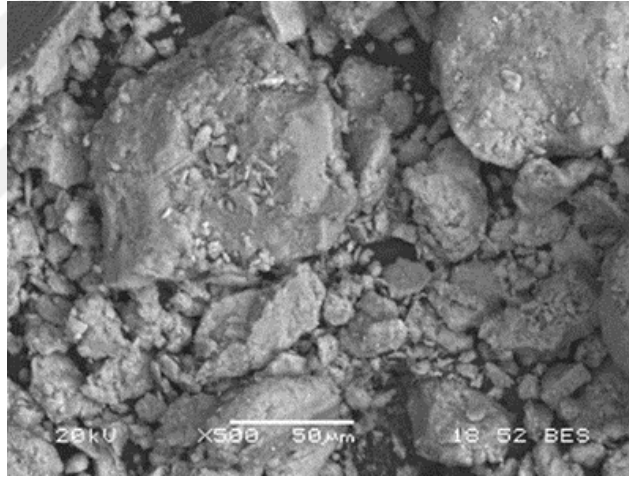
Tablo 6.2. Bentonit tozun kimyasal bileşenleri

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO
% Ağ.	60-62	3-3,5	2,5-3	1,8-2	17-18	0,9-9,95	3,5-4

(Soy, Demir ve Caliskan, 2011)



Şekil 6.3. Bentonit tozunun tane boyut dağılım grafiği



Şekil 6.4. Bentonit tozun SEM görüntüsü

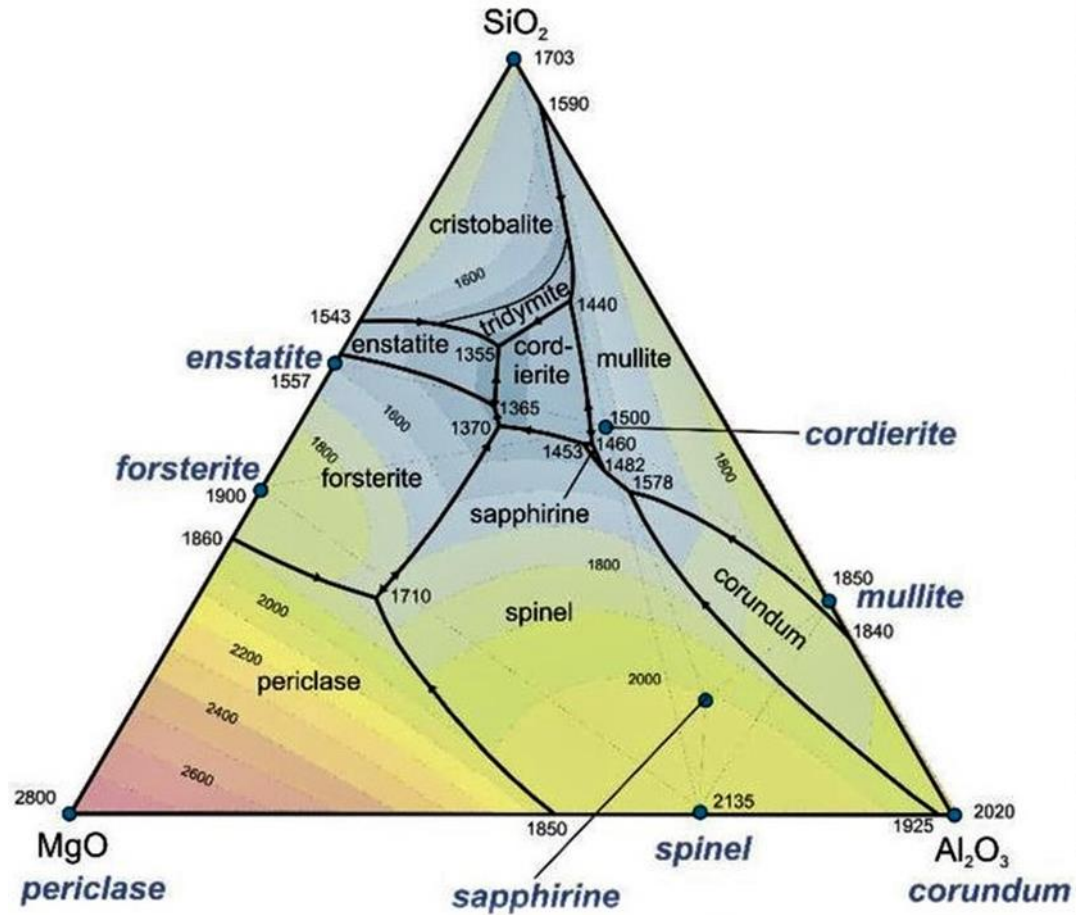
6.1.3. Silisik asit ve sitrik asit

Genel kimyasal formülü H₄SiO₄ (“Silisik asit”, 2018) olan silisik asit Merck KGaA şirketinden temin edilmiştir. Sitrik asitin genel kimyasal formülü ise C₆H₈O₇ (“Sitrik asit”, 2018) olup Tekkim Kimya Sanayi ve Ticaret Şirketinden temin edilmiştir. Bu katkı malzemeleri seramik çamurda stabilizör etkisi sağlayarak tozların askıda kalması ve kararlı bir seramik çamur eldesi için ilave edilmiştir. Ayrıca polimer sünger daldırıldığında hazırlanan seramik çamurun sünger ağ yapısı içerisine girebilecek, her

tarafını eşit şekilde doldurup kaplayabilecek viskozitede olmasını ve sünger içerisinde kalabilmesini sağlamaktadır.

6.1.4. Magnezyum oksit- alümina-silika (MAS)

MAS fazını oluşturan bileşiklerin her biri Alfa Aesar şirketinden temin edilmiştir. Nihai seramik köpüğe mukavemet kazandırılması üzere seramik çamurda kullanılmıştır. MAS denge diyagramını oluşturan bileşikler tek başına kullanıldığında ergime sıcaklıkları yüksek sıcaklıklardadır. MAS bileşikleri bir arada kullanıldıklarında denge diyagramında ergime sıcaklıkları Şekil 6.5.'de görüldüğü gibi 1365 °C'ye düşmektedir. Bu sıcaklığa düşmesi bize enerji tasarrufu sağlamaktadır.



Şekil 6.5. MgO- Al₂O₃- SiO₂ üçlü faz denge diyagramı (Hampshire, 2012).

6.1.5. Poliüretan sünger

Seramik köpüklerin iskelet yapısını oluşturmak için farklı gözenek boyutlarına sahip 10 ppi ve 20 ppi'lık (1 inç başına düşen gözenek sayısı) poliüretan süngerler kullanılmıştır. Poliüretan Süngerler Kurtoğlu Filtre firmasından temin edilmiştir.

6.1.6. ETİAL 171

Seramik köpüklere alüminyum alaşımı infiltre etmek için kullanılmıştır. ETİAL 171 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 6.3.'de gösterilmektedir.

Tablo 6.3. ETİAL 171 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi

	Si	Fe	Mn	Cu	Mg	Ti	Zn	Ni	Al
% Ağ.	9,6	0,36	0,43	0,07	0,044	0,002	0,035	0,01	Kalan

(Azaklı, Aslan, Bindal, ve Akbulut, 2003).

6.2. Kullanılan Araç-Gereçler ve Uygulama Yöntemi

Deneyleerde kullanılan malzemelerin tartılmasında Şekil 6.6.'da görülen +/-0,01 gr hassasiyetli dijital göstergeli terazi kullanılmıştır.



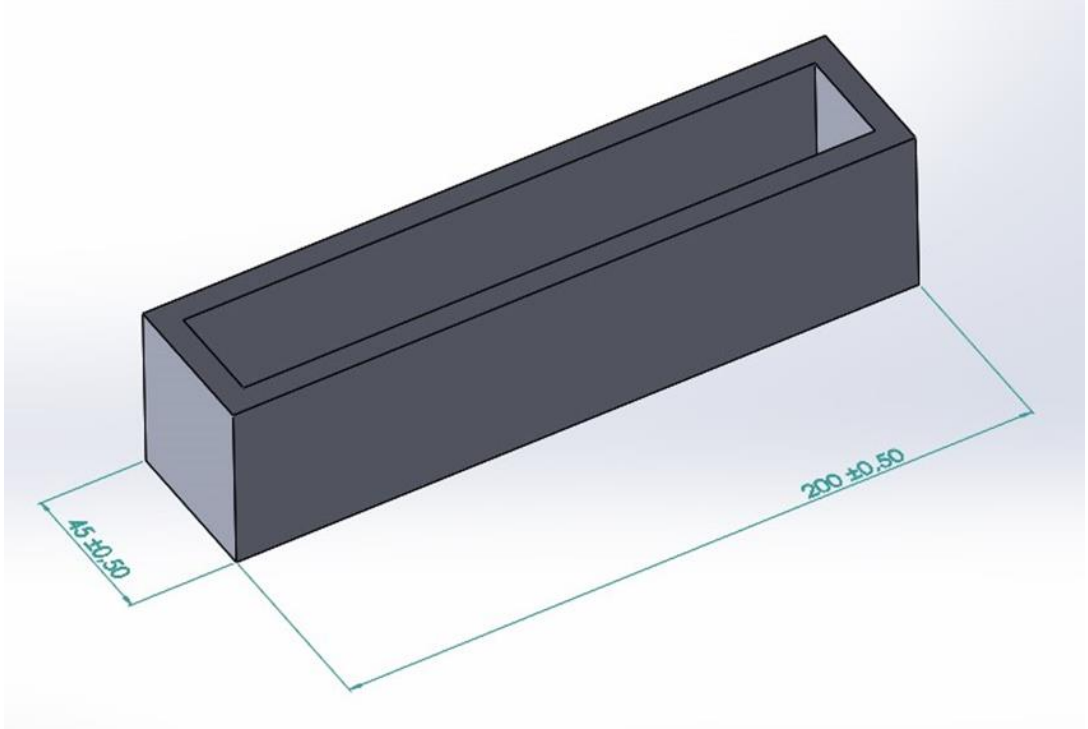
Şekil 6.6. Precisa marka hassas terazi

Poliüretan süngerlerin sinterlenmesinin gerçekleşmesinde Şekil 6.7.'de görülen maksimum 1600 °C çıkabilen atmosfer kontrollü yatay tüp fırını kullanılmıştır.



Şekil 6.7. Atmosfer kontrollü yatay tüp fırını

Poliüretan süngerlerin atmosfer kontrollü yatay tüp fırında sinterlenme olayının gerçekleşmesi için fırının içinde kullanılan kayıkçık Şekil 6.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Yatay tüp fırınında kullanılan kayıkçığın katı modeli

Silis kumu ile sodyum alüminat tozları Şekil 6.9.'daki kum karıştırma makinesinde karıştırılarak oluşturulan döküm kumu, kalıp yapımında kullanılmak üzere hazırlanılmıştır.



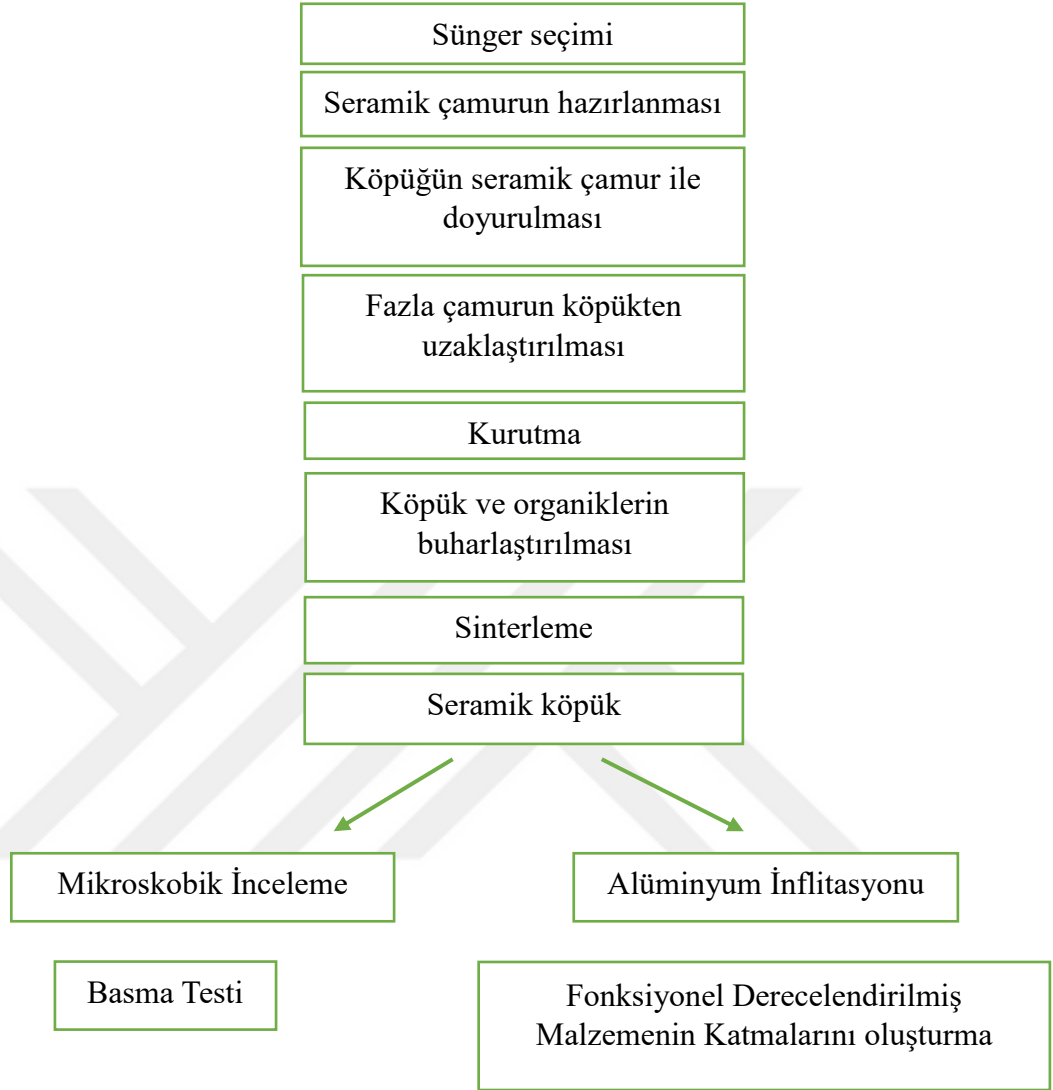
Şekil 6.9. Kum karıştırma makinesi

Sinterlenmiş numunelere alüminyum infiltrasyonu yapmak için kullanılan ergitme ocağı Şekil 6.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Ergitme ocağı

6.3. Deney Akış Şeması



Şekil 6.11. Deney akış şeması

6.4. Karakterizasyon

SiC karbür seramik köpük üretimi çeşitli yöntemler ile karakterize edilmiştir. Karakterizasyon için taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışınları spektroskopisi (EDS), X-ışını difraksiyonu (XRD), makro stereo mikroskop, tane boyutu ölçüm cihazı kullanılmıştır.

6.4.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışınları spektroskopisi (EDS)

Mevcut çalışmada üretilen seramik köpüklerin SEM görüntüleri ve EDS analizleri incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobunda (SEM) genel olarak yapının morfolojik özellikleriyle içyapısını oluşturan bileşenlerin yapıları ve dokusal özellikleri hakkında detaylı bilgi verirken, eş zamanlı olarak da bu görüntülere elementel analizler yapılmaktadır. Taramalı elektron mikroskobundaki elementel analizler, numune üzerine elektron demeti bombardımanı yapılarak numuneyi oluşturan elementlerden yayılmaya başlayan karakteristik X-ışınlarının, elektron mikroskobuna bağlı olan EDS dedektörleri ile algılanmasıyla analiz gerçekleştirilmektedir. Bu sayede, morfolojik yapının görüntü analizlerinde bir nokta/bölge ve bir hattın elementel analizi yapılabilmekte ve numune üzerinde istenen bir bölgedeki elementlerin dağılım haritaları çıkarılmaktadır. SEM ve EDS analizleri JEOL 6060 LV marka olan, Şekil6.12.'de gösterilen cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir ("SEM", 2018).



Şekil 6.12. SEM ve EDS analiz cihazı

6.4.2. X-ışınlan difraktometresi ile karakterizasyon

Kristalin yapıya sahip olan fazlar, X-Işını Kırınımı (XRD) tekniği ile tanımlanabilmektedir. XRD tekniğinin temelinde, kristallerin yüzeylerinde bulunan atom düzlemleri arasına girip çıkan X-ışınları, yüzeylerden kırılarak yansımalarıyla oluşmaktadır. (Bragg Eşitliği). X-Işını Kırınımı (XRD) analizleri, standartlara uygun olan numunelerin üzerinde, X-ışını difraktometresinde amacına uygun olan şartlarda gerçekleştirilmektedir (“XRD”, 2018). XRD analizinde Şekil 6.13.’de gösterilen RIGAKU marka D/MAX/2200/PC model X ışınları difraktometresi cihazı kullanılmıştır.



Şekil 6.13. XRD analiz cihazı

6.4.3. Tane boyut ölçümü

Seramik çamuru hazırlarken kullanılan tozların toz boyut dağılımını veren tane boyut ölçüm analizleri yapılmıştır. Tane boyut analizini yapmak için markası Microtrac S3500 marka lazer toz boyut analizi cihazı ile tespit edilmiştir. Kullanılan cihaz Şekil 6.14.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Tane boyut ölçüm cihazı

6.4.4. Makro stereo mikroskop

Sinterlenen numunelerin karakterizasyonu ve morfolojik yapı incelemesi Nikon SMZ800 markalı Makro Stereo Mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiş olup Şekil 6.15.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.15. Makro stereo mikroskop

6.4.5. Basma testi

Sinterlenen deney numunelerinin basma mukavemet değerlerine Şekil 6.16.'da gösterilen SHIMADZU markalı cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Basma deneyi, malzemeye uygulanan yük sonucunda numunenin boyunda kısalmayla beraber ezilme meydana gelmesi esasına dayanan deney yöntemidir. Basma deneyinde uygulanan yük, çekme deneyinde uygulanan yükün tersi şeklinde etki etmektedir. Basma deneyi, genelde çekme deneyi test cihazlarında yapılır. Çoğunlukla basma mukavemetleri çekme mukavemetlerinden yüksek olan gevrek malzemelere uygulanır (“Basma Testi”, 2018).



Şekil 6.16. Basma test cihazı

6.5. Seramik Köpük Üretim Yöntemi

Bu çalışma kapsamında replikasyon yöntemiyle seramik köpükler üretilmiştir.

6.5.1. Reçetenin hazırlanması

Seramik çamur için hazırladığımız numuneler kullanılan bağlayıcı ve malzeme cinsine ve miktarlarına göre sınıflandırılmış ve kodlar verilmiştir. Bu kodlar; hazırlanan SiC seramik çamur içine kattığımız malzemeler bentonit, magnezyumoksit, alüminyumoksit ve silika olan malzeme cinsine göre adlandırılmaktadır. Ağırlıkça %30 bentonit SiC tozuna eklediğinde 1B ve bu 1B seramik çamurun içine ağırlıkça totalde %5 magnezyumoksit, alüminyumoksit ve silika (MAS) eklediğimizde 1BMAS olduğunu belirtmektedir. Bu kodların sonunda bulunan 12: 18: 25 ve 50 rakamları ise hazırlanan

çamurun içindeki ağırlıkça formülize edilmiş silisik asit ile sitrik asitin toplam yüzdelerini göstermektedir. Hazırlanan seramik çamurlarının bileşimleri Tablo 6.4.'de gösterilmektedir.

Tablo 6.4. Seramik çamurlarının içindeki malzemelerin ağırlıkça katkı oranları

	Bentonit Ağ. %	SiC Ağ. %	MAS Ağ. %	Formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit Ağ. %
1B	30	70		
1BMAS	28,5	66,5	5	
1BMAS12	24,9	58,1	5	12
1BMAS18	23,1	53,9	5	18
1BMAS25	21	49	5	25
1BMAS50	13,5	31,5	5	50

(Her karışım için 10 ml su kullanılmıştır. Ayrıca sıvı faz oluşumu sırasında hacimsel değişimler hesaba katılmamıştır).

6.5.2. Seramik çamurun hazırlanması

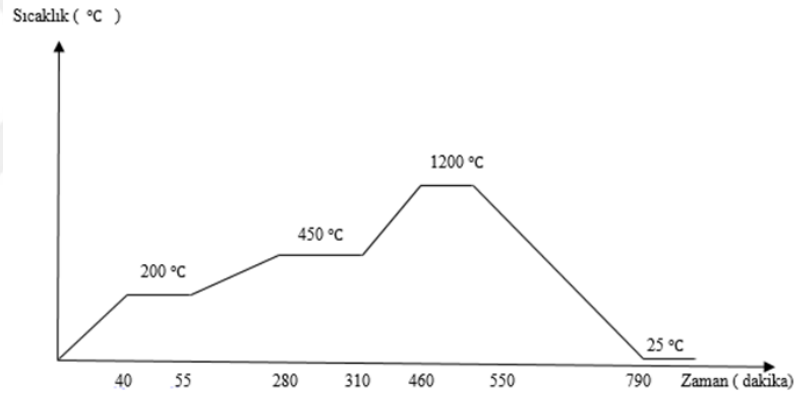
Deneysel çalışmada Tablo 6.4.'de belirtilen karışımlar hassas terazide tartım yapıldıktan sonra seramik havanda bağlayıcı özelliğindeki bentonit tozu, ana iskeleti oluşturan SiC tozu, mukavemet arttırıcı MAS tozları ve kararlı bir yapı meydana getirmek için formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit eklenerek saf su yardımıyla seramik çamura akışkanlık sağlayarak poliüretan süngere emdirilme işlemi yapılmaktadır (Şekil 6.17.).



Şekil 6.17. Hazırlanan seramik çamur

6.5.3.Seramik köpüğün sinterlemesi

Hazırlanan silisyum karbür köpükler infiltrasyon prosesinde kullanılmak üzere içine alüminyum alaşımı emdirilerek kompozit malzeme üretilecektir. Dolayısıyla bu seramik köpüklerde istenen özelliklerin başında gözeneklilik ve sıvı alüminyumun basıncına dayanacak mukavemet gelmektedir. Bu özellikler ise sinterleme işlemi sayesinde bünyeye kazandırılmaktadır. Deneyler boyunca 6 değişik numune hazırlanmış ve bu numunelerin tamamına aynı sinterleme işlemleri uygulanmıştır. Fırına konulan malzemeler atmosfer kontrollü yatay tüp fırında Şekil 6.18.'de gösterilen sinterlenme sıcaklıklarında uygulanmıştır. Bu işlemin ardından fırın kapatılmış ve numunelerin oda sıcaklığına soğutulması işlemi yavaş bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sinterlenen numunelere ait görüntü Şekil 6.19.'da gösterilmektedir.



Şekil 6.18. Sinterlenen numunelerin sıcaklık- zaman grafiği



Şekil 6.19. Sinterlenmiş seramik köpük

6.5.4. Yoğunluk testi

Sinterleme öncesi ve sonrası tüm numunelerin çapları ve yükseklikleri manual kumpasla, ağırlıkları ise hassas terazi ile ölçülüp yoğunluk hesabı her bir numune için yapılmıştır. Yoğunluk testi 1BMAS12, 1BMAS18, 1BMAS25, 1BMAS50 kodlu deney numuneleri için ölçüm yapılmıştır. 1BMAS12 deney numunesi için 20 ppi'lık sünger kullanılıp diğer deney numunelerinde 10 ppi'lık sünger kullanılmıştır.

Elde edilen yoğunluklar (ρ_1 , sinterleme öncesi yoğunluk; ρ_2 , sinterleme sonrası yoğunluk) kullanılarak (Denklem 5.1) gözeneklilik yüzdeleri hesaplanmıştır;

$$\text{Gözeneklilik (\%)} = ((\rho_1 - \rho_2) / \rho_1) * 100 \quad (5.1)$$

6.5.5. Basma testi

Basma mukavemeti testinde çekme test cihazı kullanılmıştır. Cihaz basma moduna getirilerek standart basma plakaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uygulamada kullanılan test düzeneği ve numunelerin kırılmış hali Şekil 6.20.'de gösterilmektedir. Basma testinde ilk olarak gözenek boyutu 10 ppi seramik köpük üzerinde deney gerçekleştirilmiştir. Bu gözenek boyutunda ağırlıkça formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asitin yüzdesi 1BMAS18, 1BMAS25 ve 1BMAS50 kodlu olan numunelerin mukavemet değerleri elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen optimum numune 1BMAS18 olduğunu gözlemlendikten sonra katkı malzemeleri üzerinde değişken parametreler uygulanmıştır. Kullanılan parametrelere göre üretilen 1B,1BMAS, 1BMAS18 kodlu numunelere basma testi gerçekleştirilmiştir. 20 Ppi seramik köpükte ise, sadece ağırlıkça %12 formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asitin toplam yüzde oranı olan 1BMAS12 kodlu numunede başarılı bir sonuç elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.20. Basma mukavemeti test düzeneğinde numune görüntüsü (a), basma mukavemeti testi yapılmış numune görüntüsü (b)

6.5.6. İnfiltrasyon işlemi

Sinterlenmiş seramik köpüklere ETİAL 171 alüminyum alaşımı infiltre etmek için öncelikle kum kalıp hazırlanmıştır. Kum kalıp hazırlanma işleminde kum karıştırma makinesinde silis kumu ve Sodyum alüminat bileşiği olan iki toz su yardımı ile aglomerasyon meydana gelmeyecek şekilde karıştırarak kum kalıp için kullanılmıştır. Kum kalıp modelleri fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme için ayrı ayrı yapılmıştır Yapılan katmanlar tek ve iki katmanlı olarak modellemesi kum kalıp için de gerçekleştirilip Şekil 6.21.'de ayrı ayrı gösterilmektedir. İnfiltrasyonun gerçekleştirildiği sıvı metal sıcaklığı ise 900 °C'dir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.21 Tek katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemede kullanılmak üzere hazırlanan alt ve üst döküm kalıbı (a) ve İki katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemede kullanılmak üzere hazırlanan alt ve üst döküm kalıbı (b), (c)

6.5.7. Sertlik testi

Üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin sertlik ölçümünde brinell sertlik testi uygulanmıştır. Brinell sertlik cihazı, bulut makina markalı olup 187,5 kg yük altında, 2,5 mm çapında bilye kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.22.).



Şekil 6.22. Sertlik ölçme cihazı

BÖLÜM 7. DENEYSEL SONUÇLAR

Yapılan tez çalışmasında replikasyon yöntemi ile üretilen seramik köpüklerin farklı gözenek boyutuna göre incelemeleri ve sonuçlandırılması yapılmıştır.

7.1. 10 Ppi Seramik Köpük Üretim Aşamaları

7.1.1. Yoğunluk hesaplama

Yoğunluk ölçümü ağırlıkça farklı yüzde oranlarına sahip formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asitin seramik köpük üzerindeki etkisi incelenmiştir. Seramik çamurun içine katılan hammaddenin ağırlıkça yüzde katkı oranının artması ile yoğunlukta azalma meydana gelmiştir. Yoğunluğun azalması, seramik çamura katılan hammaddenin ağırlıkça yüzde oranının artması sonucu seramik çamura akışkanlık kazandırarak sinterleme mekanizmasını zorlaştırmıştır. Bunun sonucunda yoğun bir yapı elde edilememiştir. Optimum seramik köpük olarak 1BMAS18 kodlu deney numunesi elde edilmiştir.

1BMAS18 kodlu deney numunesi;

İlk ağırlık	= 0,6133 gr	
Emdirilme ağırlık	=14,2269 gr	
Sinterleme ağırlık	= 8,6208 gr	
Poliüretan süngerin ebatları	= 3,2 x 3,2 x 1,925 cm	
Sinterleme öncesi yoğunluk	= 14,2269/19,712	= 0,7217 gr/cm ³
Sinterleme sonrası yoğunluk	= 8,6208/19,712	= 0,4373 gr/cm ³
Gözeneklilik (%)	= ((0,7217-0,4373)/0,7217) x 100	= 39,40

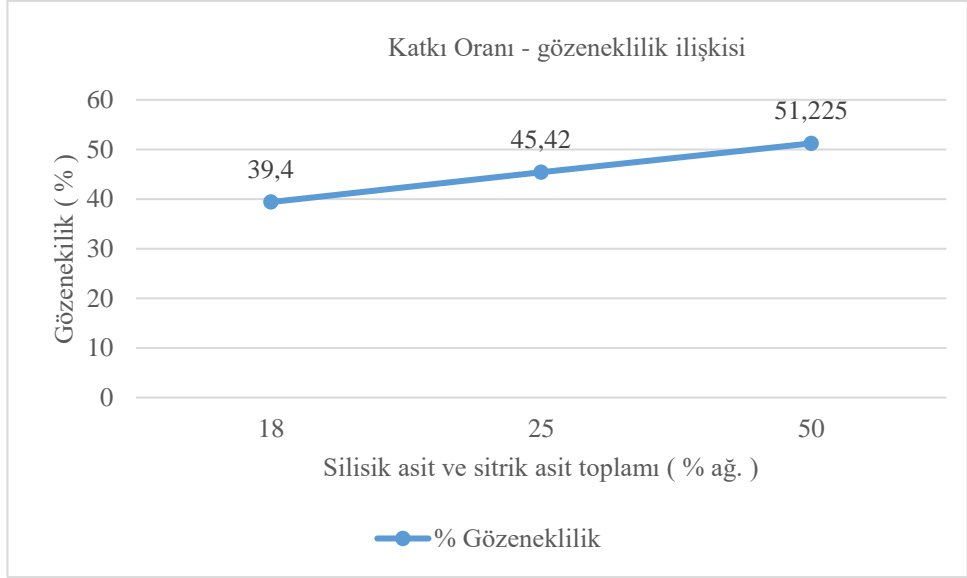
1BMAS25 kodlu deney numunesi;

İlk ağırlık	= 0,7766 gr	
Emdirilme ağırlık	= 15,5130 gr	
Sinterleme ağırlık	= 8,4676 gr	
Poliüretan süngerin ebatları	= 3,6 x 3,4 x 1,925 cm	
Sinterleme öncesi yoğunluk	= 15,5130/23,562	= 0,6583 gr/cm ³
Sinterleme sonrası yoğunluk	= 8,4676/23,562	= 0,3593 gr/cm ³
Gözeneklilik (%)	= ((0,6583-0,3593)/0,6583) x 100	= 45,42

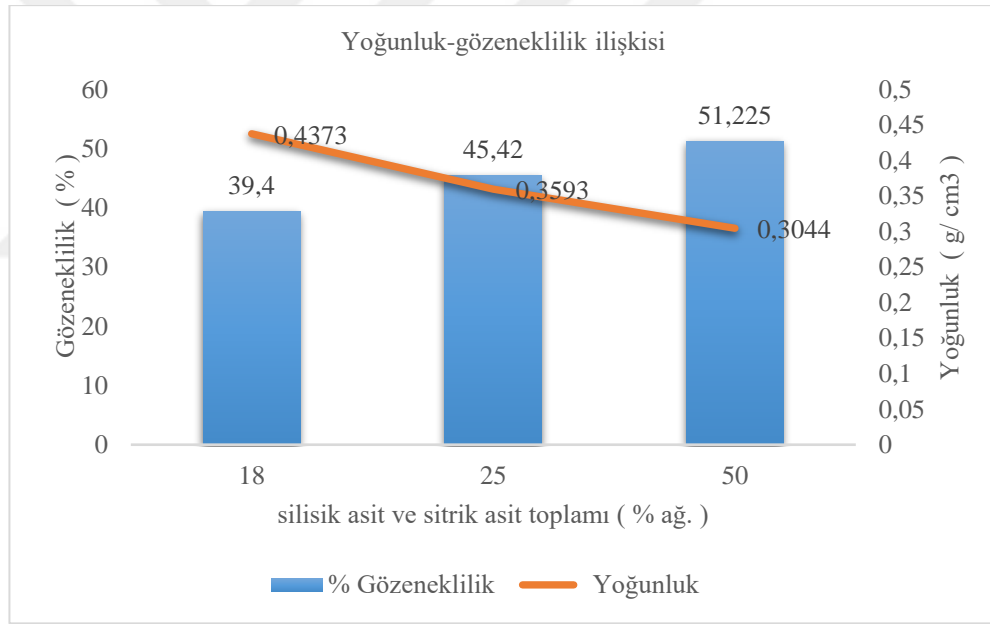
1BMAS50 kodlu deney numunesi

İlk ağırlık	= 0,7440 gr	
Emdirilme ağırlık	= 13,8778 gr	
Sinterleme ağırlık	= 6,7697 gr	
Poliüretan süngerin ebatları	= 3,5 x 3,3 x 1,925 cm	
Sinterleme öncesi yoğunluk	= 13,8778/22,2337	= 0,6241 gr/cm ³
Sinterleme sonrası yoğunluk	= 6,7697/22,2337	= 0,3044 gr/cm ³
Gözeneklilik (%)	= ((0,6241-0,3044)/0,6241) x 100	= 51,225

Gözeneklilik yüzdesi, yoğunluğun azalması ile yapıda daha fazla boşluklu bir yapı olduğundan dolayı artmıştır. Yapılan hesaplamalar Şekil 7.1. ve Şekil 7.2.'de belirtilmektedir.



Şekil 7.1. Seramik köpüğün katkı oranı ile gözeneklilik ilişkisi



Şekil 7.2. Seramik köpüğün yoğunluk ile gözeneklilik ilişkisi

Yoğunluk hesabı yapılırken oluşturulan seramik köpüğün gözenekleri katı olarak baz alınarak hacim hesabına dahil edilmiştir.

7.1.2. Makro ve SEM incelemeleri

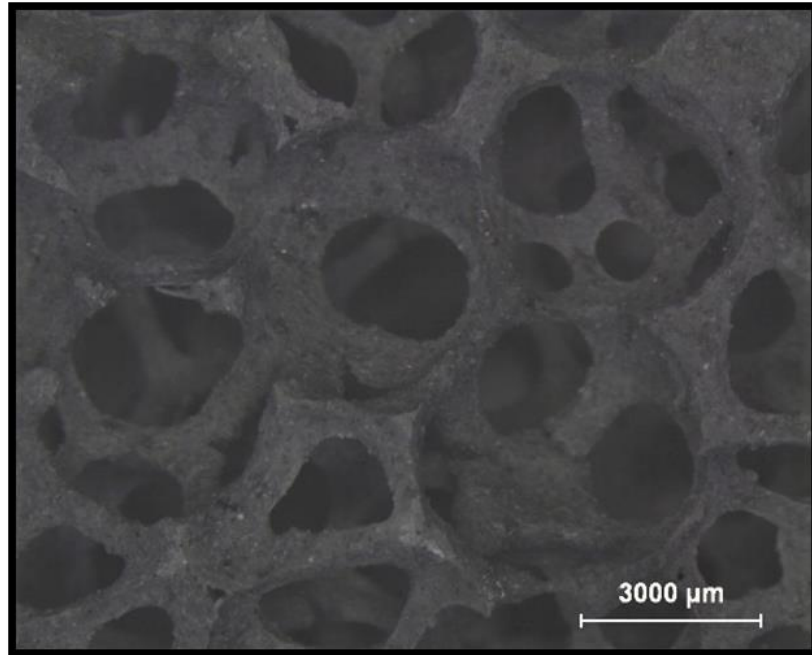
10 ppi'lık seramik köpük üretiminde, seramik çamura katılan katkı malzemelerinin etkisi Makro ve SEM görüntüleri üzerinde incelenmiştir.

7.2. Katkı Malzemelerin 10 Ppi'lık Seramik Köpüğün Mikroyapısı Üzerindeki Etkisi

Katkı malzemelerin seramik çamura katılmasıyla seramik çamurdaki etkisini makro görüntüleri üzerinde gösterilmiştir. Farklı katkı malzemelerine sahip olan her seramik köpük için sinterlenme sıcaklığı 1200 °C olarak kullanılmıştır. Wang ve arkadaşları seramik köpük üretim çalışmalarında jel döküm yöntemi aracılığıyla 2000 °C sinterleme sıcaklığı kullanarak SiC seramik köpük elde ettiği belirtilmektedir (Wang, Yin, Yao, Xia, Zuo, Xu ve Zeng, 2016). Mevcut tez çalışması kapsamında Wang ve ark. çalışmasından farklı olarak replikasyon yöntemi ile üretilen gözenekli SiC seramik malzemenin 1200 °C'lere kadar sinterleme sıcaklığının düşürülmesi başarılmıştır. Yani 800 °C'lik önemli bir düşüş gerçekleştirilmiş olup üretimde önemli bir enerji tasarrufu ortaya çıkartılmıştır.

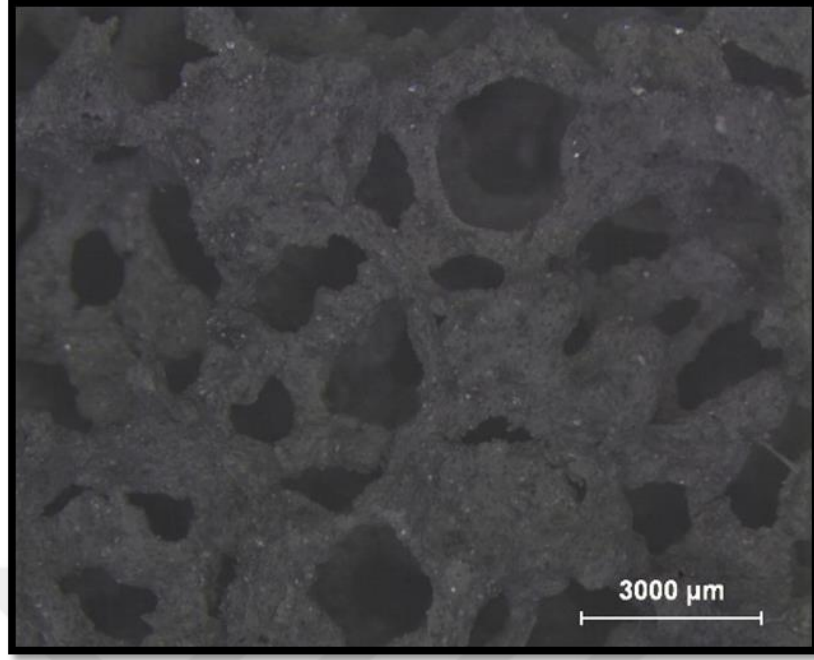
7.2.1. 1BMAS ve 1BMAS18 kodlu seramik köpüklerin makro görüntüleri

Farklı katkı malzemeleri kullanılarak üretilen 1B, 1BMAS ve 1BMAS18 kodlu seramik köpüklerin makro görüntüleri Şekil 7.3.'de verilmiştir.

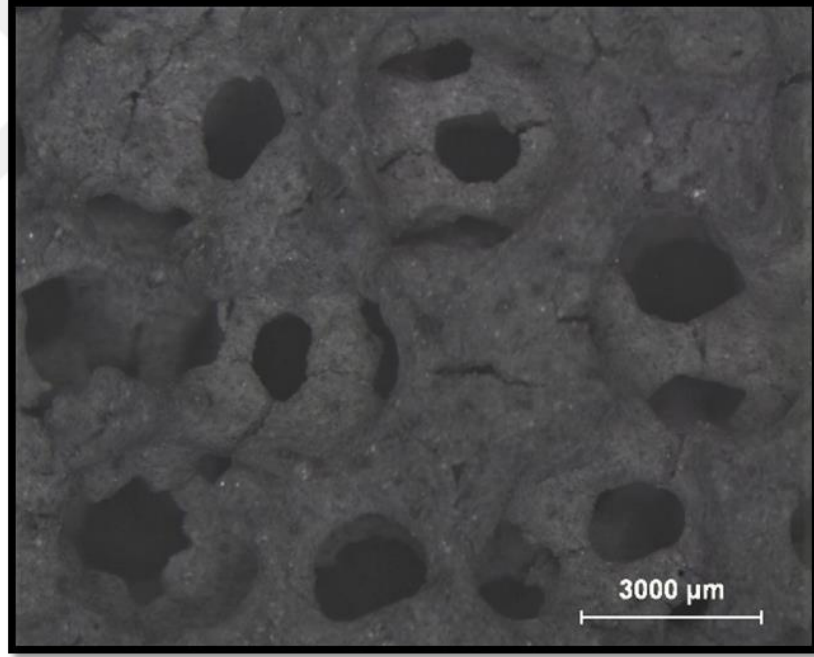


(a)

Şekil 7.3. 1B kodlu seramik köpüklerin makro stereo görüntüsü



(b)



(c)

Şekil 7.3.a (devamı)-1BMAS (b) ve 1BMAS18 (c) kodlu seramik köpüklerin makro stereo görüntüleri

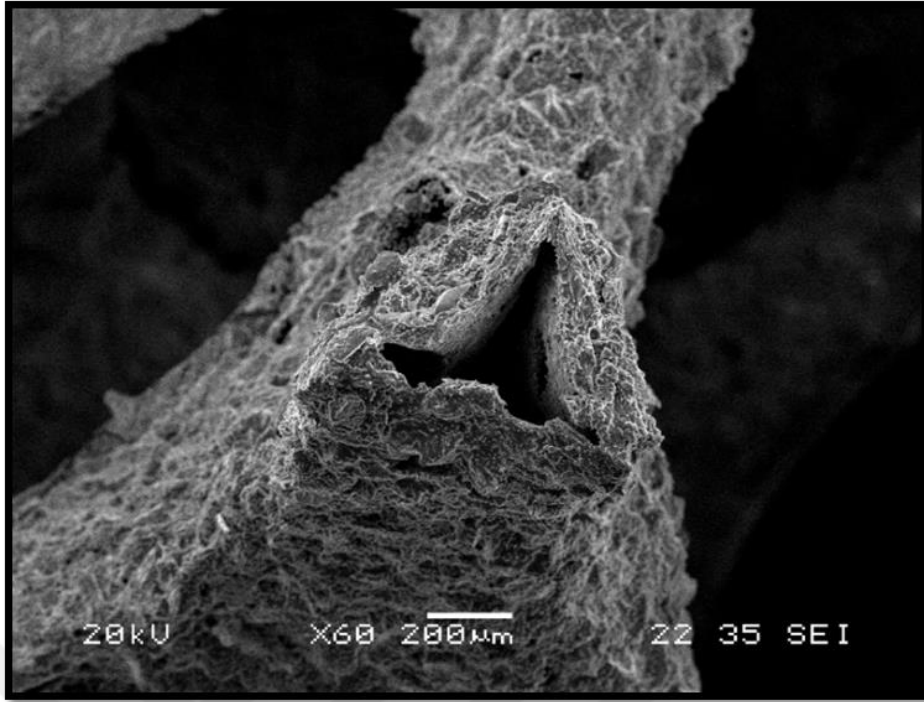
Yao ve arkadaşları SiC seramik köpük üretiminde MgO-Al₂O₃-SiO₂ katkı malzemelerini kullanarak replikasyon yöntemi ile üretmiştir. Seramik köpük üretiminde kullanılan optimum sıcaklığı 1300 °C sıcaklık olarak belirtmektedir (Yao, Tan, Zhang, Huang, ve Jiang, 2007). Yapılan çalışmada replikasyon yöntemi kullanılarak 1200 °C sıcaklıkta elde edilen SiC seramik köpüklerde seramik çamurun içinde bulunan katkı malzemelerinden

sodyum alüminat bileşiğine MgO-Al₂O₃-SiO₂ katkı malzemeleri ilave edilerek üretilen seramik köpüğün hücre kolları ve duvarlarında et kalınlığı oluşturulması başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

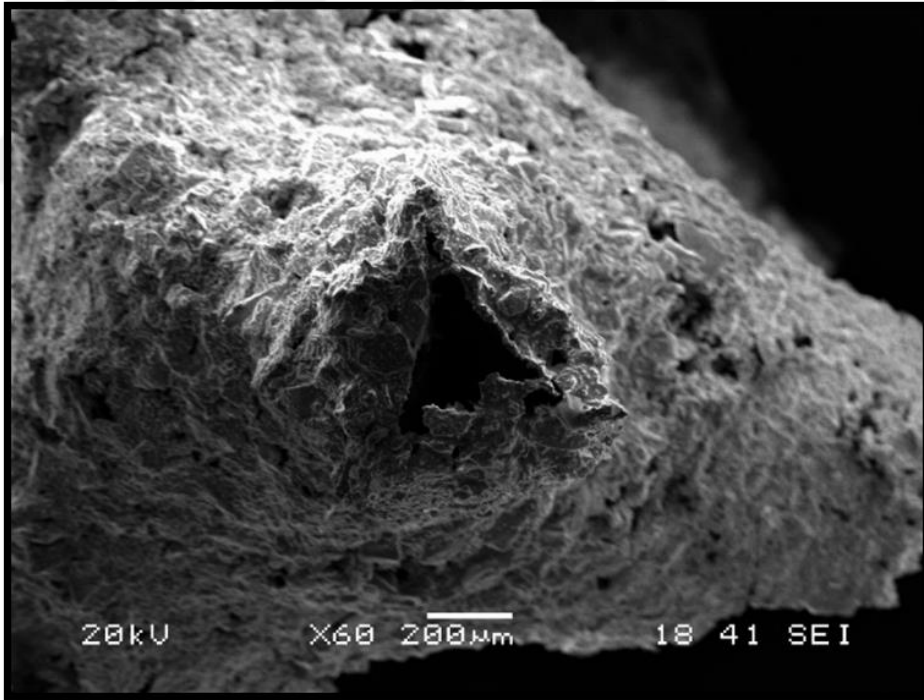
Seramik çamura katılan katkı malzemelerinde uygun parametre olarak 1BMAS18 seramik köpüğü eldesinin sonuçlarının iyi olduğu gözlenmektedir. 1B seramik köpüğünün hücre kolları homojen olarak kaplandığı fakat MAS bileşiği katıldığında aglomerasyonlar meydana geldiği gözlenmektedir. Daha sonra formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit katkı malzemesi eklenmesiyle 1BMAS18 kodlu seramik köpük olan yapının hücre kollarında yeterli bir kaplama miktarına sahip, geometrik şekli korunan ve açık gözenekli seramik köpük meydana geldiği Şekil 7.3.'de gözlenmektedir. Kumar ve arkadaşları farklı bir çalışmayla kapalı gözenekli SiC seramik köpük üretiminde epoksi kaplanmış polikarbosilan içindeki epoksi miktarına göre kapalı gözenekli seramik köpük üretmişlerdir (Mishra, Kumar, Ranjan ve Prasad 2018). Deneysel çalışma kapsamında replikasyon yöntemi ile SiC köpük üretiminde yüzde gözeneklilik oranı Kumar ve arkadaşlarına göre daha fazla olup açık gözenekli seramik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir.

7.2.2. 1B, 1BMAS ve 1BMAS18 Kodlu seramik köpüklerin SEM görüntüleri

Seramik çamura katkı malzemeleri katılmasıyla daha homojen bir yapı olduğundan geçişler daha düzgün ve çatlak oluşumu daha azdır. Replikasyon yönteminin yegane kusuru olan iç kısımlardaki üçgensel boş yapı 1B, 1BMAS, 1BMAS18 kodlu deney numunelerinde Şekil 7.4.'de görüldüğü gibi optimum seramik köpükte (1BMAS18) küçülmenin en fazla olduğu gözlenmektedir. Koh ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada replikasyon yöntemi kullanarak ana iskelet yapısı zirkonya olup atlık malzeme olan polimer süngerin üzeri karbon siyahıyla kaplanarak seramik köpükte oluşan üçgensel boşluklu yapının dağılması önlenmiştir (Jun, Koh, Song, Lee ve Kim, 2006). Yaptığımız çalışmada replikasyon yöntemi ile SiC seramik köpük üretiminde ise üçgensel boşluklu bölgenin dağılması önlenerek yapının küçülmesi amaçlanmış olup başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

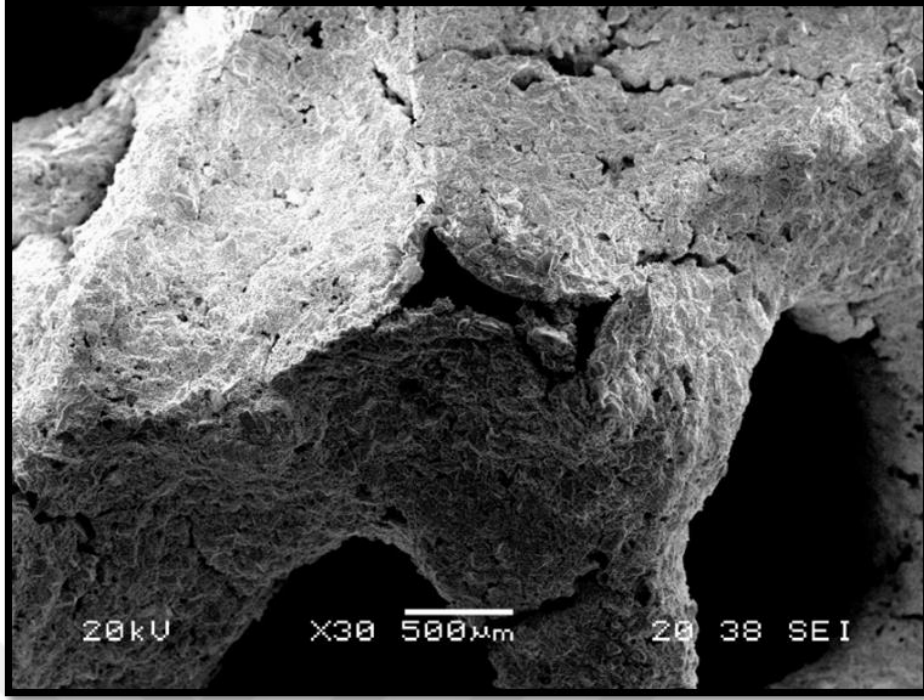


(a)



(b)

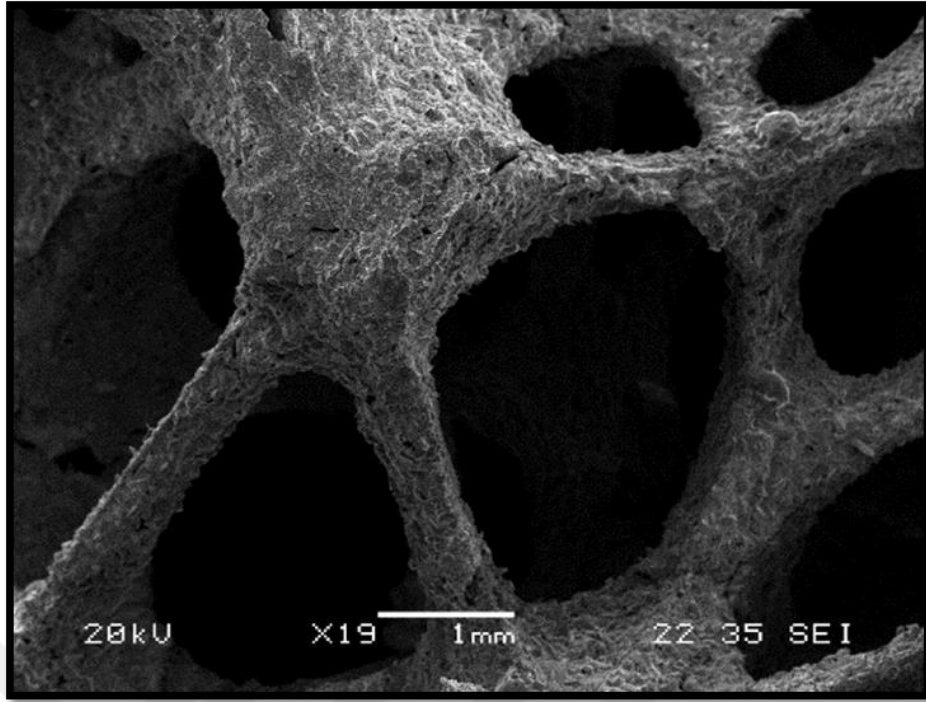
Şekil 7.4. 1B (a), 1B MAS (b) kodlu seramik köpüğün üçgensel bölgelerinin SEM görüntüleri



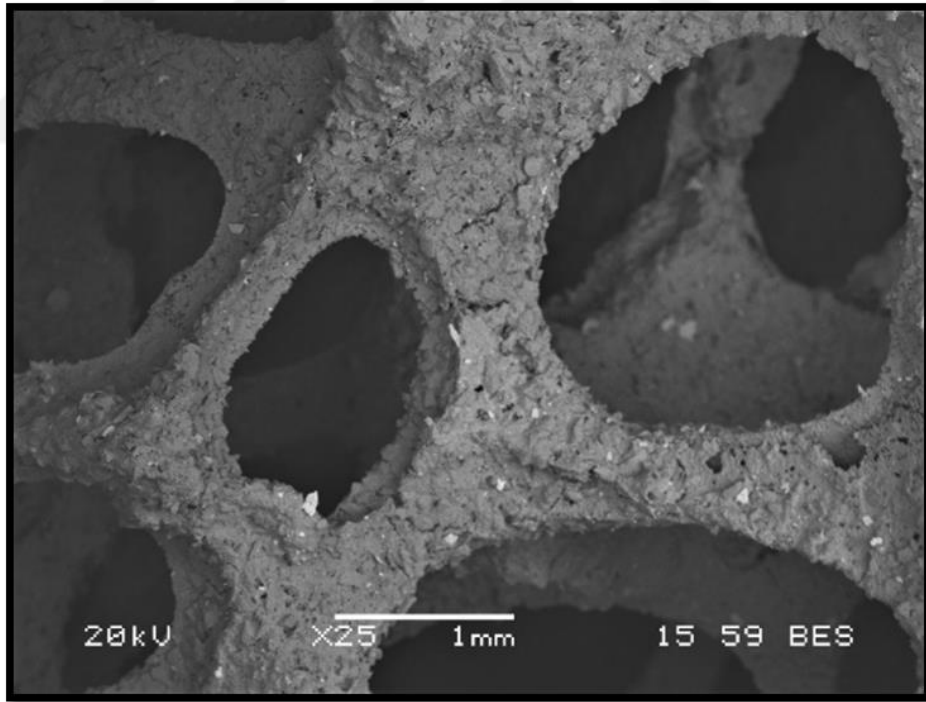
(c)

Şekil 7.4. a-b(devamı) IBMAS18 (c) kodlu seramik köpüğün üçgensel bölgesinin SEM görüntüsü

Farklı katkı malzemelerin seramik köpüğün hücre kollarındaki etkisini en fazla IBMAS18 kodlu seramik köpükte olduğu Şekil 7.5.'de görülmektedir. 1B kodlu seramik köpüğün hücre kolları ve duvarlarında ince bir katman oluşumu meydana geldiği fakat yeterli bir kalınlığa IBMAS18 kodlu seramik köpüğün hücre kollarında ve duvarlarında ulaşıldığı belirtilmektedir. Liang ve arkadaşları çalışmalarında replikasyon yöntemi ile SiC seramik köpük üretip daha sonra üretilen SiC seramik köpüğe vakumlu ortamda, tekrardan hazırlanan alümina seramik çamuruna daldırarak infiltre edilip sinterleme işlemi 1450 °C sıcaklıkta uygulanarak nihai ürünü elde etmişlerdir. Yaptığımız çalışmada ise seramik köpük üretiminde tek aşamada seramik çamurun içine SiC ve alüminada dışında magnezyumoksit, silika ve formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit ilave ederek seramik çamur hazırlanılmıştır. Hazırlanan seramik çamur poliüretan süngere emdirilmesiyle 1200 °C sinterlenme işlemi gerçekleştirerek mukavemet değerlerinde başarılı bir sonuca ulaşılarak daha düşük bir sıcaklıkta nihai ürüne ulaşımı gerçekleştirilmiştir (Liang, Li, Liu, Sang, Chen, Li, ve Aneziris, 2016).

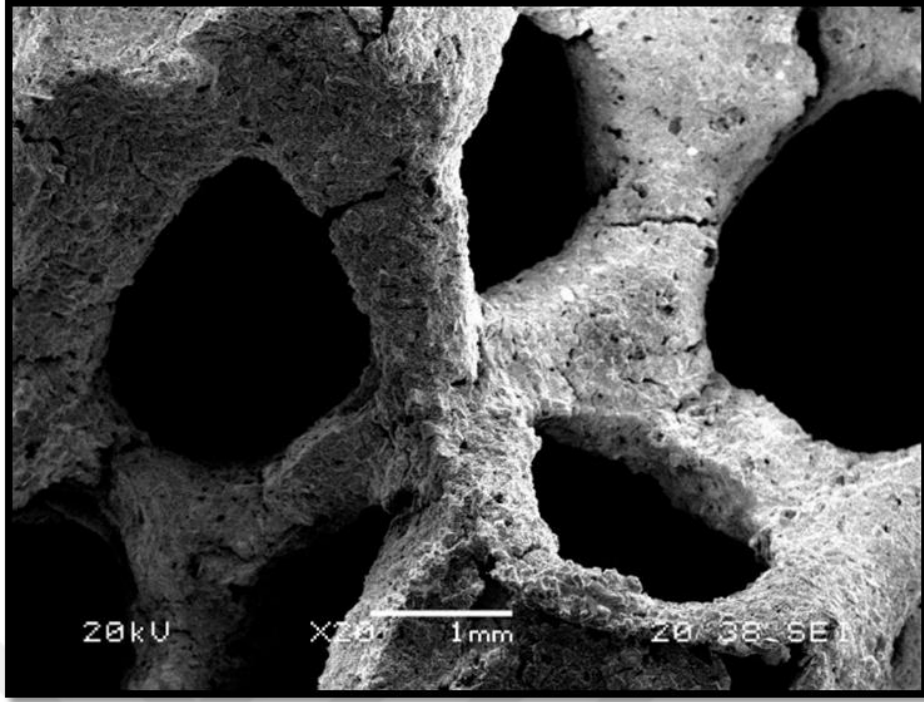


(a)



(b)

Şekil 7.5. 1B (a), 1B MAS (b) kodlu seramik köpüğün hücre kollarının SEM görüntüleri

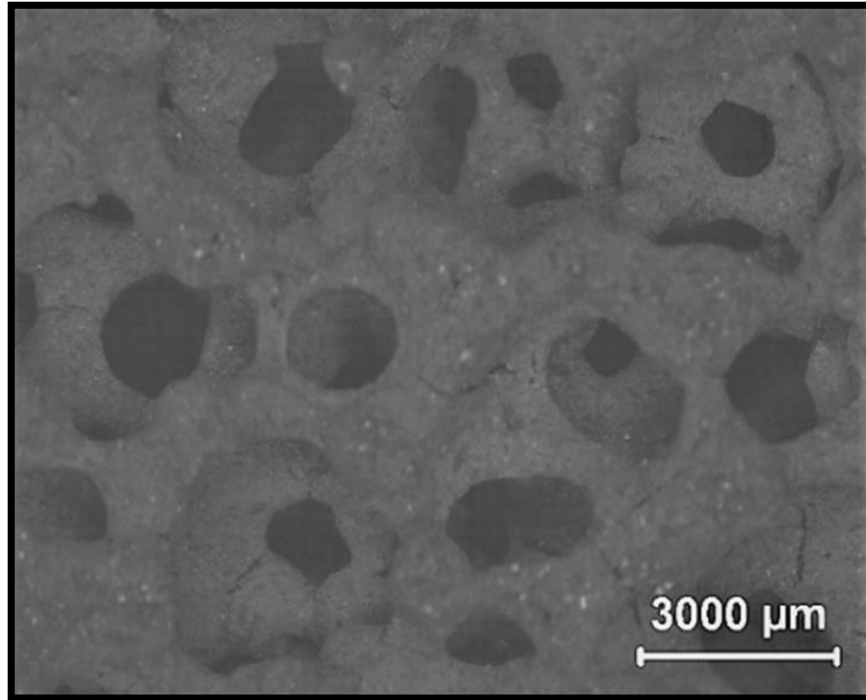


(c)

Şekil 7.5. a-b (devamı) 1BMA518 (c) kodlu seramik köpüğün hücre kollarının SEM görüntüleri

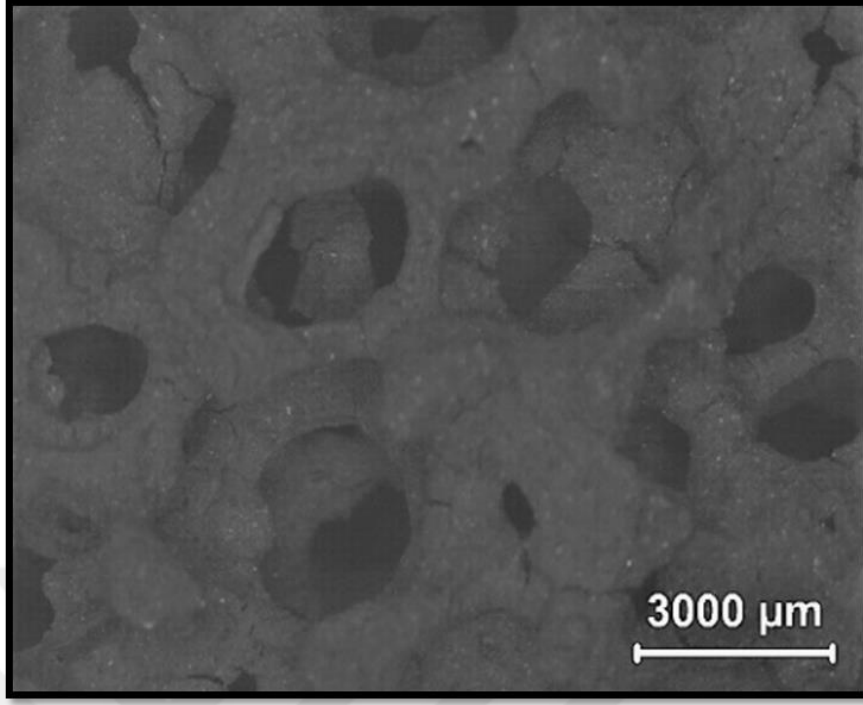
7.2.3. 1BMAS18, 1BMAS25 ve 1BMAS50 kodlu seramik köpüklerin makro stereo görüntüleri

Formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit türev solüsyonlarının ağırlıkça yüzde oranlarının artmasıyla seramik köpüklerin gözeneklerinin açılmasına ve poliüretan köpüğün ilk geometrik şeklini koruyamamasından dolayı seramik köpüklerin gözeneklilik oranında artış meydana gelmiştir. Optimum SiC seramik köpük üretiminde %39,40 gözeneklilik oranına sahip olan %18 oranındaki 1BMAS18 kodlu seramik köpüktür (Şekil 7.6.). Zeng ve arkadaşları SiC seramik köpük üretiminde katı faz sinterlemesinden yararlanılarak 2000 °C sinterleme sıcaklığında %60 gözenekliliğe sahip seramik köpük elde edildiği belirtilmektedir (Wang, Yao, Xia, Zuo, Xu, ve Zeng, 2016). Kim ve arkadaşları ise %32-64% oranındaki gözenekliliğe sahip SiC seramik köpük üretiminde 1750 °C sinterleme sıcaklığında polisiloksan türevli SiOC içeren polimer mikrobuncukların karbotermik indirgenme olayının gerçekleşmesi sonucu üretildiğini belirtmektedir (Chae, Kim, Song, Kim ve Narisawa, 2009). Yapılan tez çalışmasında ise replikasyon yöntemi ile 1200°C sinterleme sıcaklığında %40-%50 gözenekliliğe sahip daha düşük sıcaklıklarda elde edilen seramik köpükler üretilmiştir.

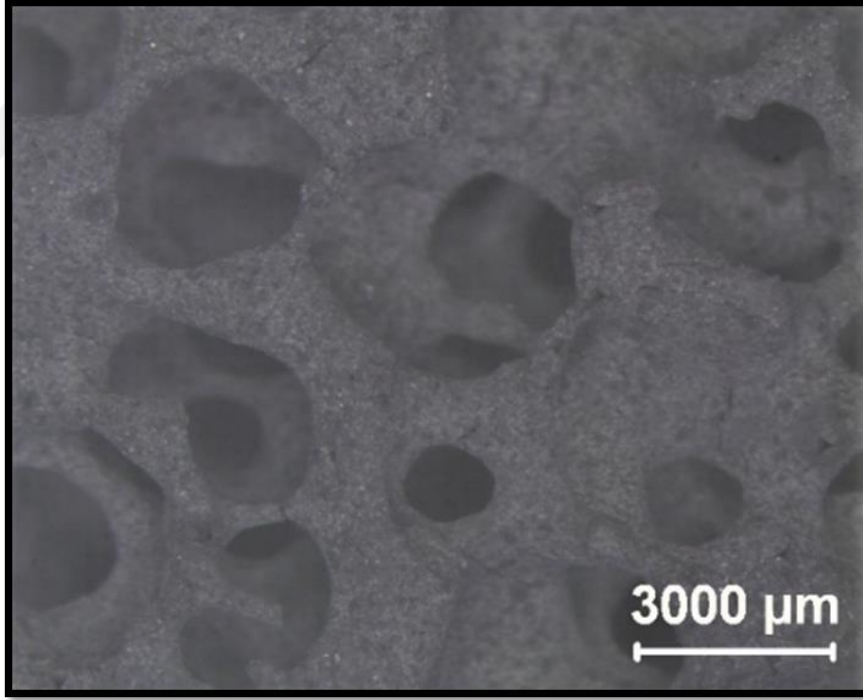


(a)

Şekil 7.6. 1BMAS18 (a) seramik köpüğün makro görüntüleri



(b)



(c)

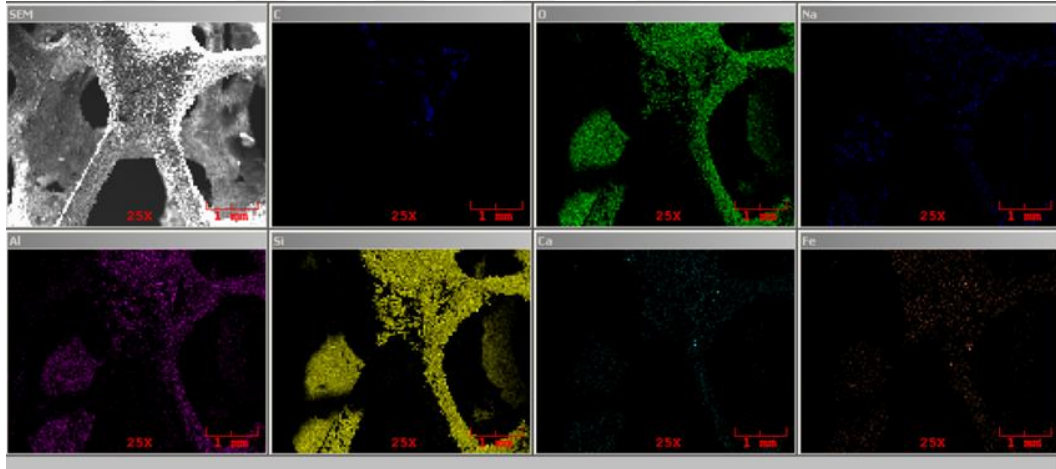
Şekil 7.6.a (devamı) 1B MAS25 (b) ve 1B MAS50 (c) seramik köpüklerin makro görüntüleri

7.3. 10 Ppi'lık Seramik Köpüğün EDS Analiz Sonuçları

EDS analizinde elementel haritalandırma yapılarak seramik köpük yapısının içerisinde bulunan katkı malzemelerinin daha net bir şekilde bulunduğu gösterilmektedir (Tablo 7.5. ve Tablo 7.6.). 1B ve 1BMAS18 kodlu seramik köpükler kullanılarak elementel analizdeki farklılıklar Şekil 7.7. ve Şekil 7.8.'de belirtilmektedir. Şekil 1BMAS18 kodlu seramik köpükte bulunan magnezyum elementinin seramik çamura MAS bileşiğinin eklenmesi sonucu EDS analiz sonuçlarında yansıdığı bir göstergesidir. Ayrıca silisyum elementinin oranının yükselmesi 1BMAS18 seramik köpüğün içeriğindeki Silika ve Silisik asitten dolayı ortaya çıktığını göstermektedir. Fe elementinin varlığı ise Sodyum alüminat bileşiğinden meydana gelmektedir.

Tablo 7.5. 1B kodlu seramik köpüğün kimyasal bileşimi

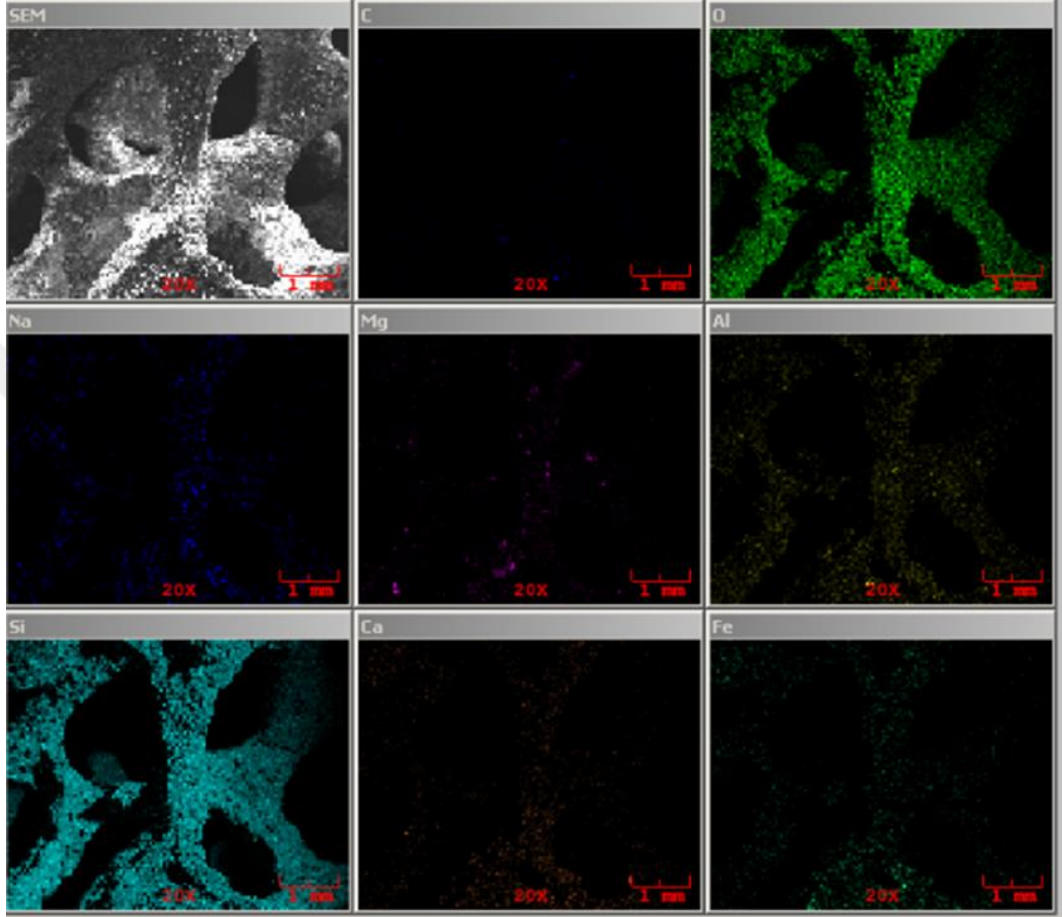
	C	O	Na	Al	Si	Ca	Fe
% Ağ.	11,229	36,098	0,856	4,920	41,710	1,723	3,464



Şekil 7.7. 1B kodlu seramik köpüğün map EDS analizi

Tablo 7.6. 1BMAS18 kodlu seramik köpüğün kimyasal bileşimi

	C	O	Na	Al	Si	Ca	Fe	Mg
% Ağ.	2,929	37,949	1,017	3,768	47,594	1,571	3,568	1,605

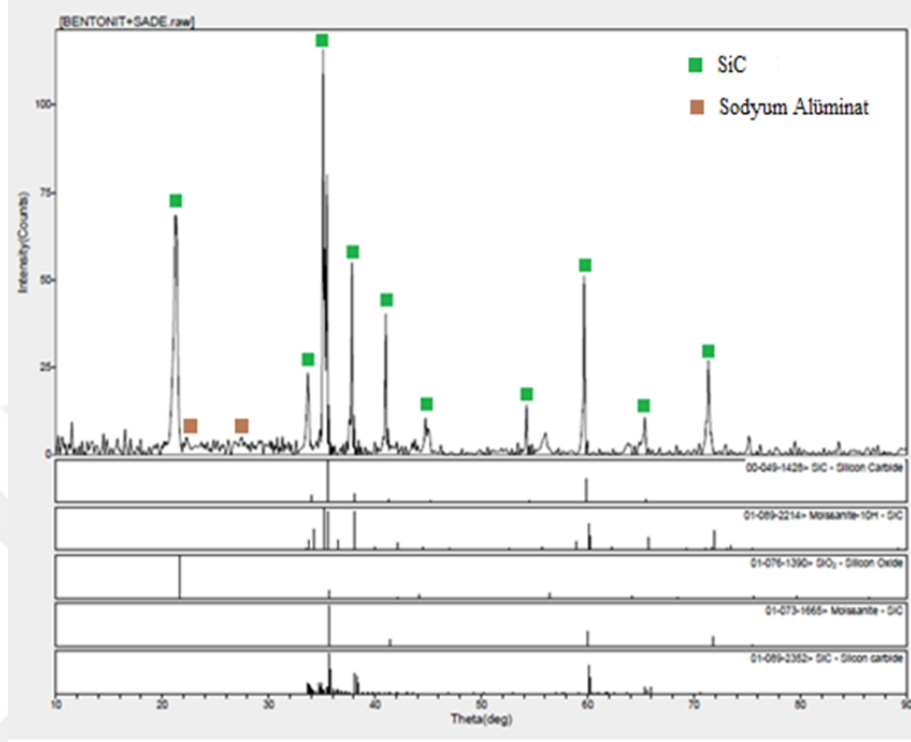


Şekil 7.8. 1BMAS18 kodlu seramik köpüğün map EDS analiz

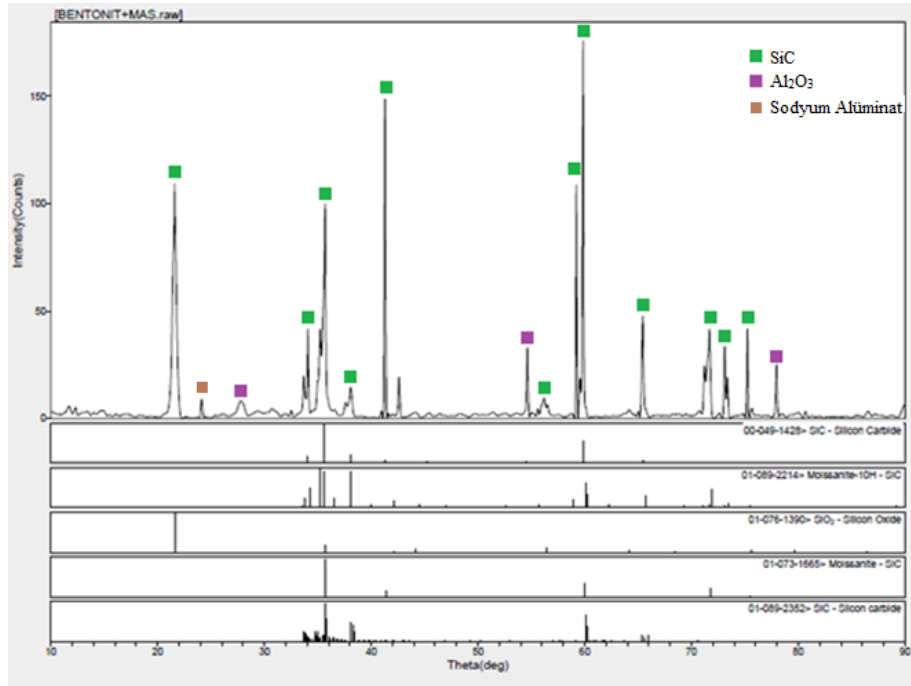
7.4. 10 Ppi'lık Seramik Köpüğün XRD Analiz Sonuçları

SiC takviyeli seramik köpük üretiminde katkı malzemelerin özellikleri ve bu faz yapılarının numune üzerinde etkisini incelemek için XRD analizi yapılmıştır. XRD analizindeki fazlar, SEM-EDS analiz sonuçlarından elde edilerek Şekil 7.9.'da gösterilmiştir.

Al_2O_3 yapıda olması ise hem katkı malzemelerinde hem de Sodyum alüminat bileşiğinin içinde bulunduğundan dolayı XRD analiz sonuçlarına yansımaktadır (Şekil 7.9.-b).

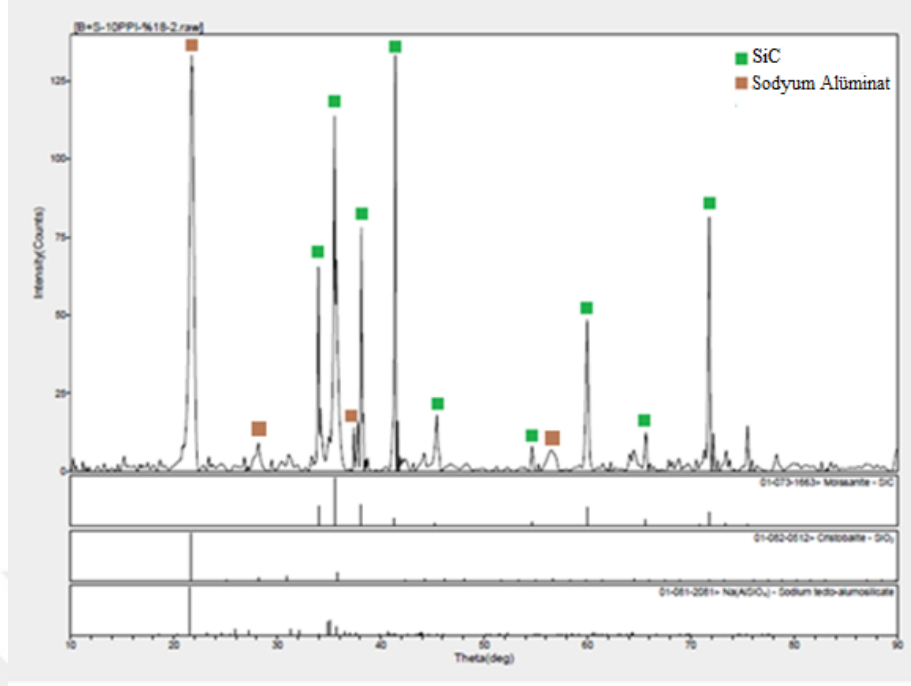


(a)



(b)

Şekil 7.9. 1B (a), 1BMAS (b) seramik köpüğün XRD analiz sonucu



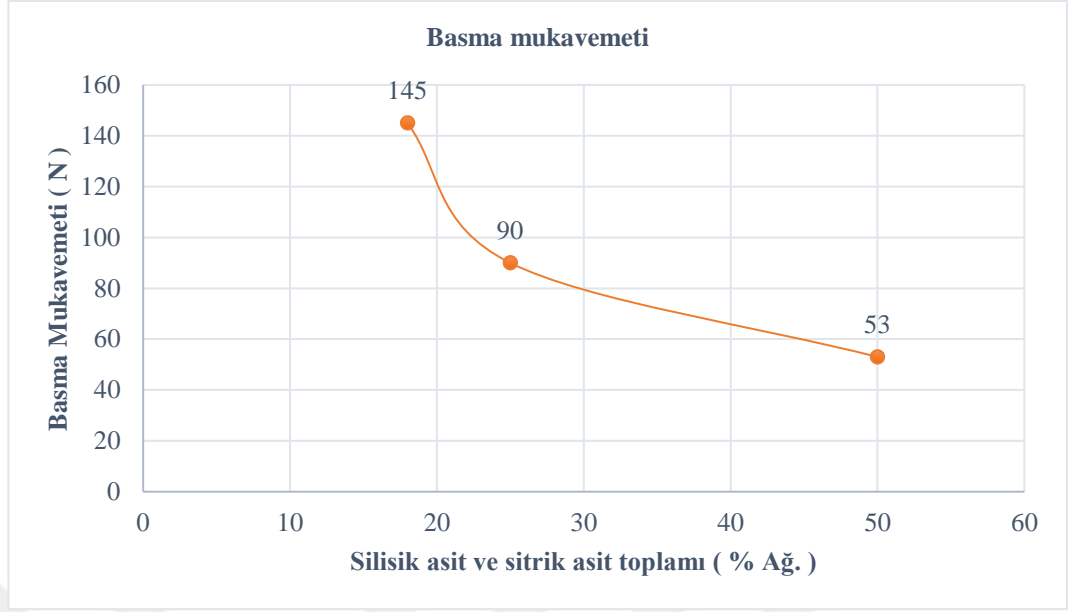
(c)

Şekil 7.9. a-b (devamı) 1B MAS18 (c) seramik köpüğün XRD analiz sonucu

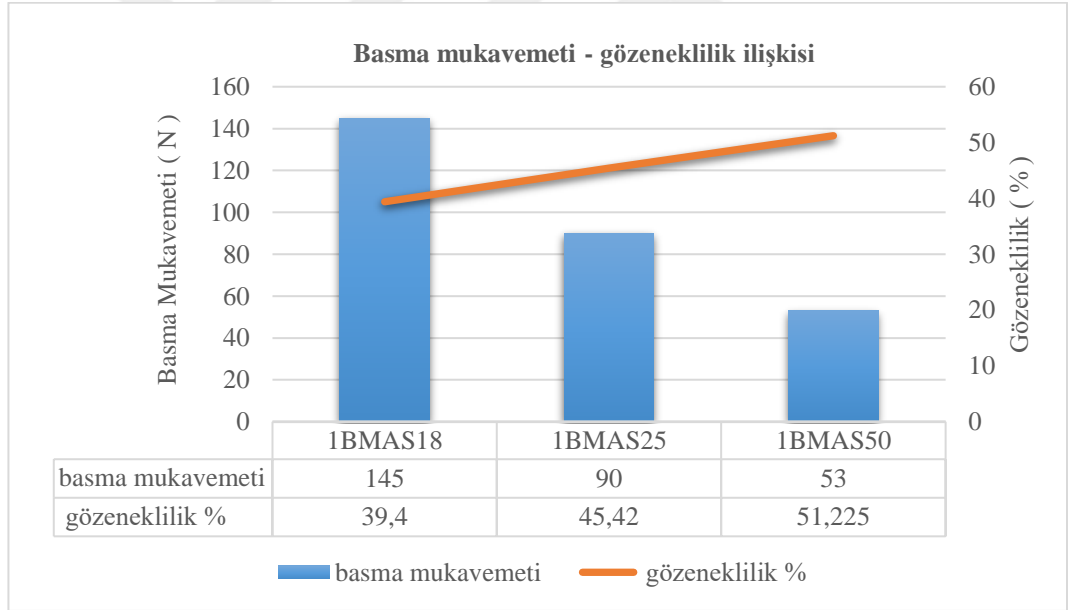
7.5. 10 Ppi'lık Seramik Köpüğün Basma Test Analiz Sonuçları

Alüminyum sıvı metal infiltrasyonunda kullanılmak üzere seramik filtre üretiminde elde edilen seramik köpüklerden formülize edilmiş silisik ve sitrik asit türev solüsyonlarının ağırlıkça yüzde oranlarının artması sonucu seramik köpük hücre duvarları ve kollarında homojen bir dağılıma olmadığından topaklanma olmuş bu da çatlak oluşumuna sebep vermiştir. Çatlak oluşumu sonucunda seramik köpüğün mukavemetinde azalma meydana gelmiştir (Şekil 7.10.).

Seramik köpük üretiminde parametre değişkeni olan formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit türev solüsyonlarının, ağırlıkça %18, %25, %50 oranlarında bulunan seramik köpüklerde optimum 1B MAS18 kodlu seramik köpüktür. Basma mukavemetleri ağırlıkça yüzde katkı oranlarının artmasıyla basma mukavemetlerinde azalma meydana geldiğini Şekil 7.10.'da belirtilmektedir. Katkı oranı artmasıyla seramik çamurun akışkanlığının fazla olmasına sebebiyet vererek, üretilen seramik köpüğün gözenek yapısında boşluklu yapı oluşumu gözlenmiştir. Basma mukavemeti ve gözeneklilik ilişkisi de Şekil 7.11.'de gösterilmiştir.

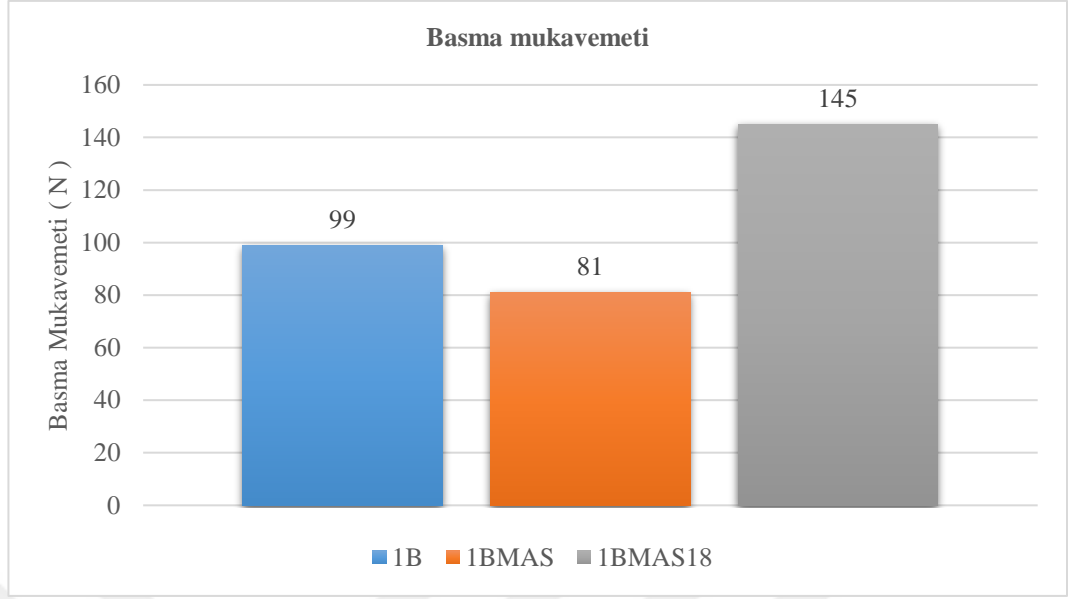


Şekil 7.10. Formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit türev solüsyonlarının ağırlıkça katkı oranı %18, %25, %50 olan seramik köpüklerin basma mukavemet değerleri



Şekil 7.11. Basma mukavemeti-gözeneklilik ilişkisi

Yang ve arkadaşları yaptığı çalışmada seramik köpüklerin gözeneklilik oranının artması ile beraber seramik köpüklerin basma mukavemetinde azalma meydana geldiğini vurgulamaktadır (Huo, Zhang, Chen, Wang, Liu, Yan ve Yang, 2018). Mevcut çalışmada ise seramik köpüklerin basma mukavemetleri ile gözeneklilikleri arasında da ters orantılı bir ilişki olduğu belirtilmektedir.



Şekil 7.12. 1B, 1BMAS ve 1BMAS18 seramik köpüklerin basma mukavemet değerleri

Şekil 7.12.'de gösterilen grafikte ise optimum seramik köpük üretim eldesinden sonra katkı malzemeleri seramik çamura eklenmeden üretilmesi amaçlanıp seramik köpüklerin basma mukavemetleri kıyaslanmıştır. MAS bileşikleri çamurun akışkanlığını olumsuz yönde etkileyip aglomerasyona sebep olup strut yapıda çatlaklar oluşturmuştur. Aglomerasyonları engellemek için ise, formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asitin seramik çamura katılmasıyla seramik köpüğün mukavemet artışına sebep vermiştir.

7.6. 20 Ppi'lık Seramik Köpük Üretim Aşamaları

Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme üretiminin ikinci katmanında kullanılmak üzere 20 ppi seramik köpük üretilmiştir. Soy ve arkadaşları SiC ve bentonit tozu içeren seramik çamur hazırlanarak replikasyon yöntemiyle SiC seramik köpük üretimini 1100°C ve 1200°C sıcaklık kullanarak gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça bentonit oranının artırılmasıyla seramik köpüğün gözenekliliği azaltıp mekanik özelliklerini iyileştirdiğini vurgulamaktadır (Soy ve diğerleri, 2011). Yaptığımız çalışmada aynı yöntemle üretilen SiC seramik köpük 1200 °C sıcaklık kullanılarak elde edilmiştir. SEM görüntülerini kıyasladığımızda, yaptığımız çalışmadaki seramik köpüklerin daha yoğun bir yapıda olduğu gözlenmektedir.

7.6.1. Yoğunluk hesaplama

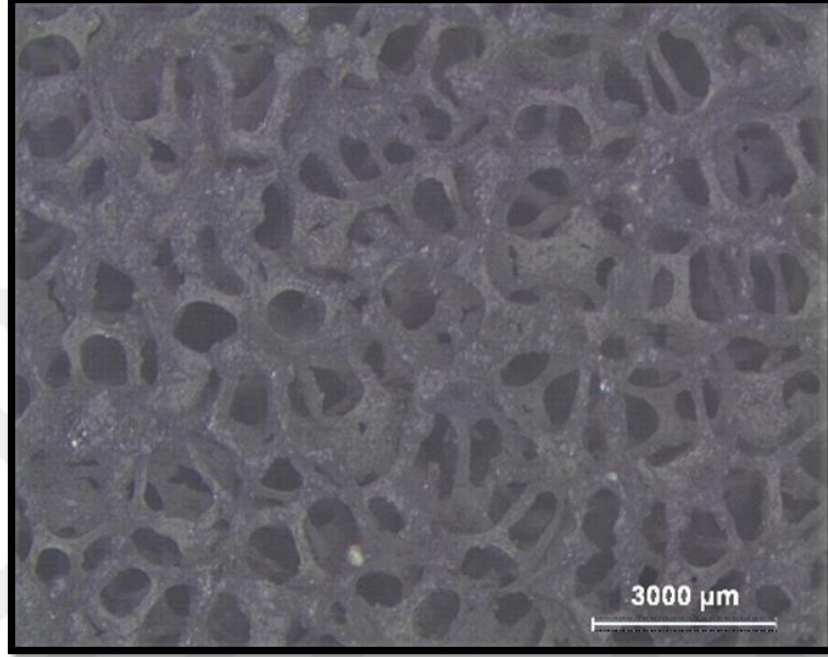
1BMAS12 kodlu deney numunesi;

İlk ağırlık	= 0,5273 gr	
Emdirilme ağırlık	= 8,1993 gr	
Sinterleme ağırlık	= 4,6539 gr	
Poliüretan süngerin ebatları	= 3,5 x 3,0 x 2,1cm	
Sinterleme öncesi yoğunluk	= 8,1193/22,05	= 0,3718 gr/cm ³
Sinterleme sonrası yoğunluk	= 4,6539/22,05	= 0,2110 gr/cm ³
Gözeneklilik (%)	= ((0,3718-0,2110)/0,3718) x 100	= 43,24

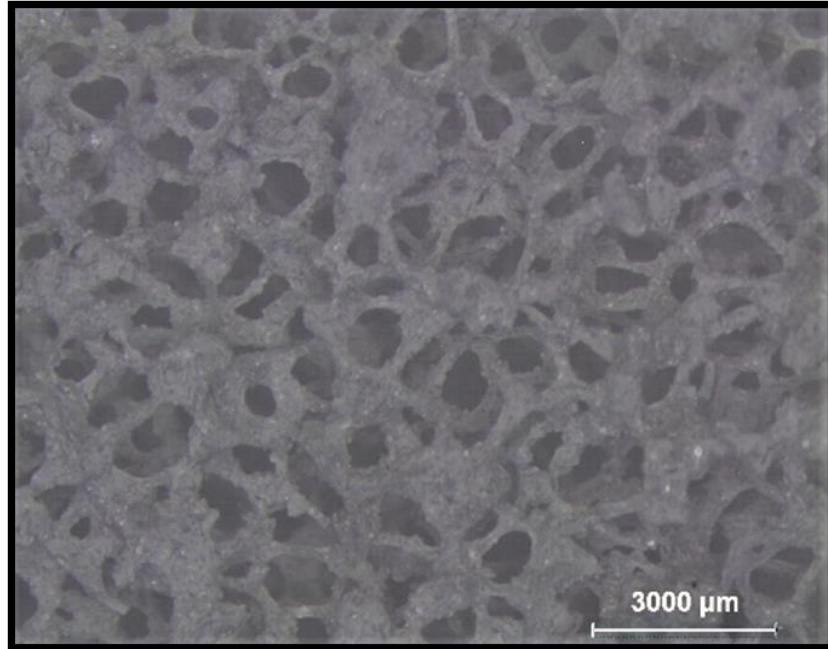
10 ppi seramik köpükte elde edilen optimum seramik köpüğe göre daha fazla gözeneklilik mevcuttur. Gözenek boyutu (gözenek sayısı/inch) büyük olmasından dolayı seramik çamurun doyurulma işlemi homojen bir şekilde gerçekleşemediğinden seramik köpüğün hücre duvarlarında ince bir kaplama meydana gelmiştir. Bunun sonucunda gözenek yüzdesinde artış meydana gelmiştir.

7.6.2. Makro ve SEM incelemeleri

20 ppi'lık seramik köpük üretiminde, seramik çamura katılan katkı malzemelerinin etkisi Makro ve SEM görüntüleri üzerinde incelenmiştir.

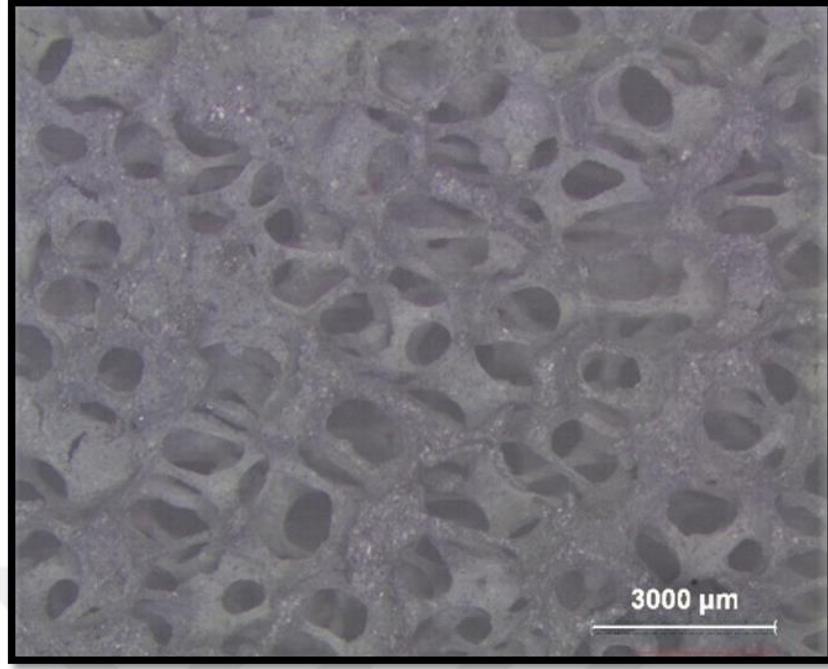


(a)



(b)

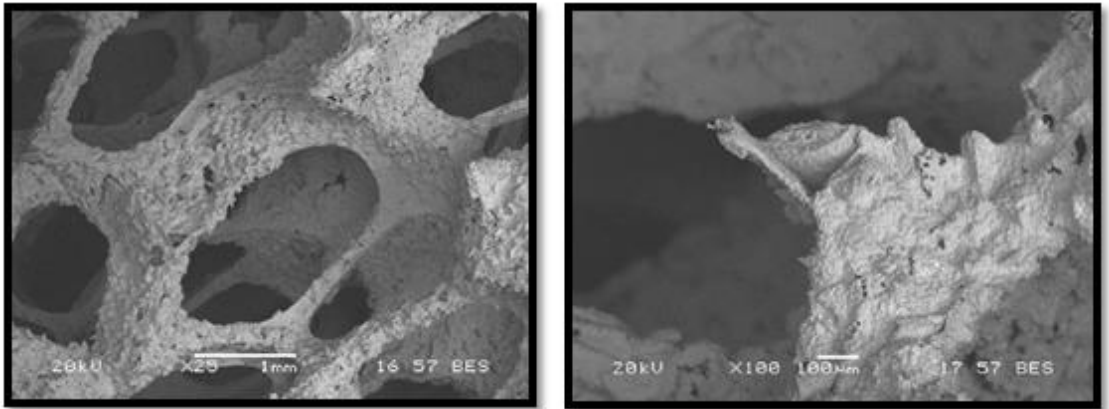
Şekil 7.13. 1B (a) ,1BMAS (b) kodlu seramik köpüklerin makro stereo görüntüleri



(c)

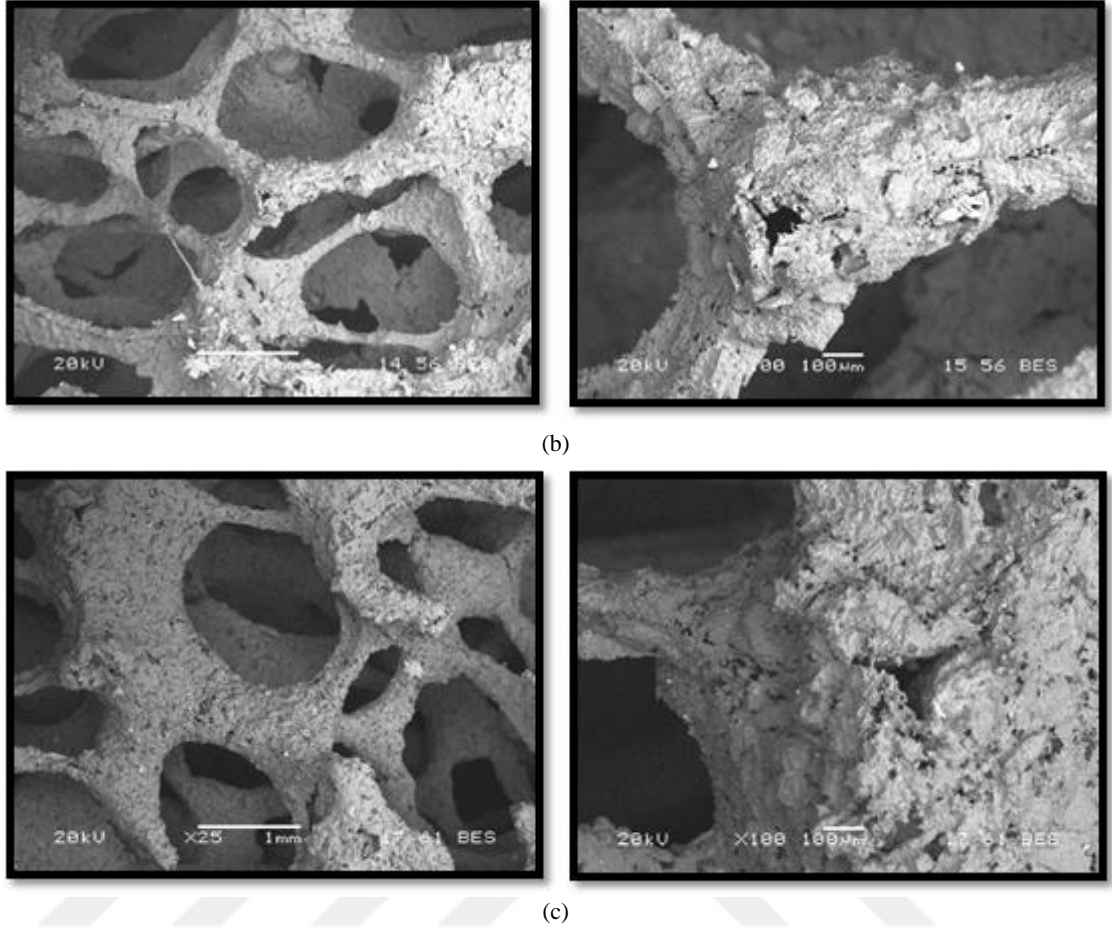
Şekil 7.13. a-b (devamı) 1BMAS12 (c) kodlu seramik köpüğün makro stereo görüntüsü

Sadece bentonit katkılı olan SiC seramik köpükte bağlantı kolları ve hücre duvarlarında ince bir kaplama olduğu gözlenmektedir. 1BMAS seramik köpükte sadece bağlantı kollarında incelikler mevcuttur. Ama 1BMAS12 seramik köpüğün bağlantı kollarında da kaplama miktarı fazla olmuştur. Makro stereo görüntüleri (Şekil 7.13.'de) ve SEM görüntüleri ile (Şekil 7.14.) desteklenmektedir.



(a)

Şekil 7.14. 1B (a) SEM görüntüsü



Şekil 7.14. a-b (devamı)1BMA5 (b) ve 1BMA512 (c) SEM görüntüleri

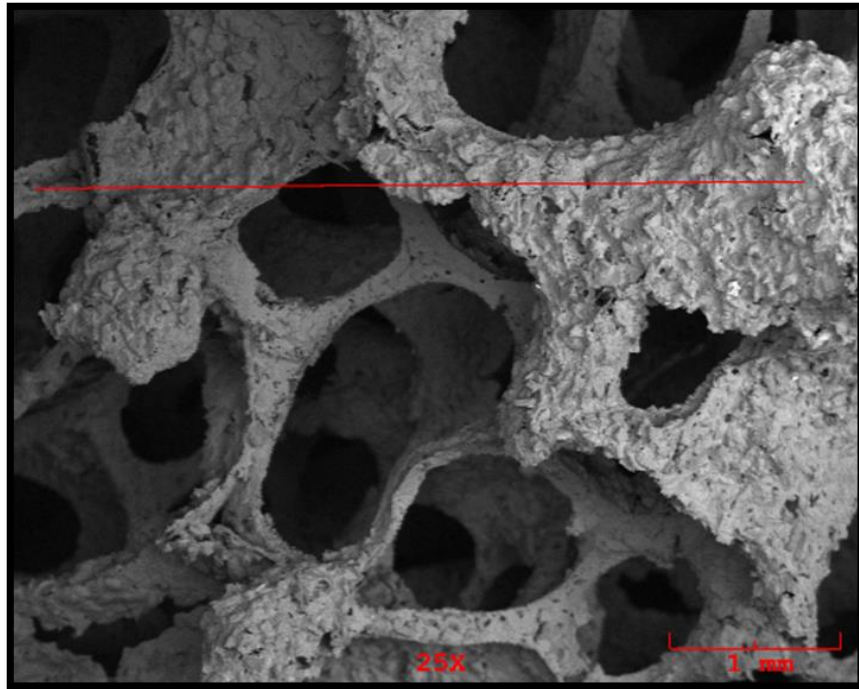
Gözenekler şeklini muhafaza etmiş fakat topaklanmalar meydana gelmiştir. Bu durum ise malzemenin mukavemetini olumsuz etkilemiştir. Zhu ve arkadaşları seramik köpük üretiminde replikasyon yöntemi kullanmıştır. SiC seramik köpük üretimi iki adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda altlık olarak kullanılan poliüretan sünger, hazırlanan seramik çamurla bir kere emdirilip 800 °C sinterlenerek elle tutulabilecek bir seramik köpük üretilmiştir. İkinci aşamada ise, üretilen seramik köpüklere tekrardan hazırlanan seramik çamur ile emdirilip 1400 °C’de sinterlenerek mekanik özellikleri geliştirilmiş seramik köpük üretimi gerçekleştirildiği belirtilmektedir. Yaptığımız çalışmada replikasyon yöntemi ile daha düşük sıcaklık da işlem görülerek mekanik özellikleri başarılı olan seramik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir (Zhu, Jiang, Tan ve Zhang, 2001).

7.7. 20 Ppi'lık Seramik Köpüğün Basma Test Analiz Sonuçları

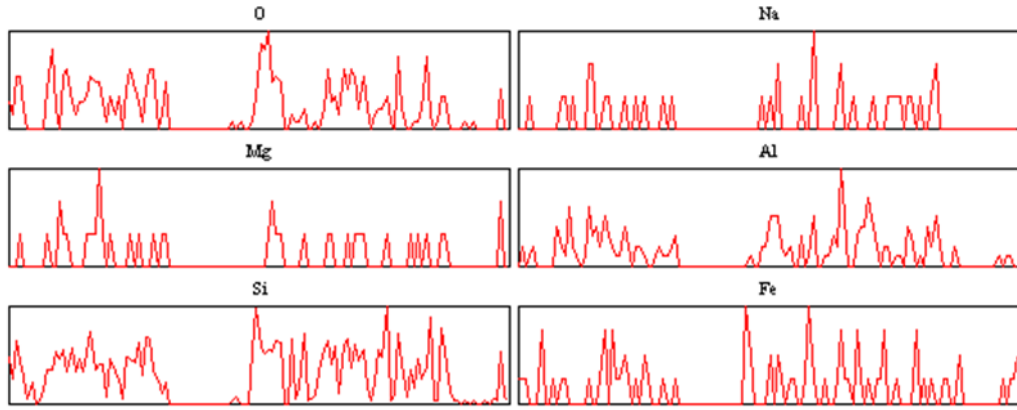
20 ppi'lık seramik köpüklerde sadece katkı malzemeleri olarak ağırlıkça %12 olan formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit seramik köpüğün basma testi sonucu başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Shen ve arkadaşları replikasyon yöntemi ile SiC seramik köpük üretimini 1700°C'de gerçekleştirilmiş olup basma mukavemeti 2,48 MPa olan seramik köpük elde edildiğini belirtmektedir (Chen, Yang, Shen ve Zhang, 2012). Yaptığımız çalışmada 1200 °C sıcaklıkta replikasyon yöntemi ile başarılı bir şekilde üretilen 1BMAS12 kodlu seramik köpüğün basma mukavemet değeri 110 N yani 0,12 MPa olarak belirtilmektedir.

7.8. 20 Ppi'lık Seramik Köpüğün EDS Analiz Sonuçları

Replikasyon yöntemi ile üretilen 20 ppi'lık seramik köpüğe çizgi EDS'i yapılmıştır. EDS analiz sonucu ile seramik köpüğün SEM görüntüsünde bulunan kırmızı hat boyunca elementel değişiklikler Şekil 7.15. ve Şekil 7.17.'de gösterilerek verilmiştir. Element sayımının gerçekleşmediği yerlerde boşluklu bir yapı oluşumu yani porozite meydana gelmiştir.

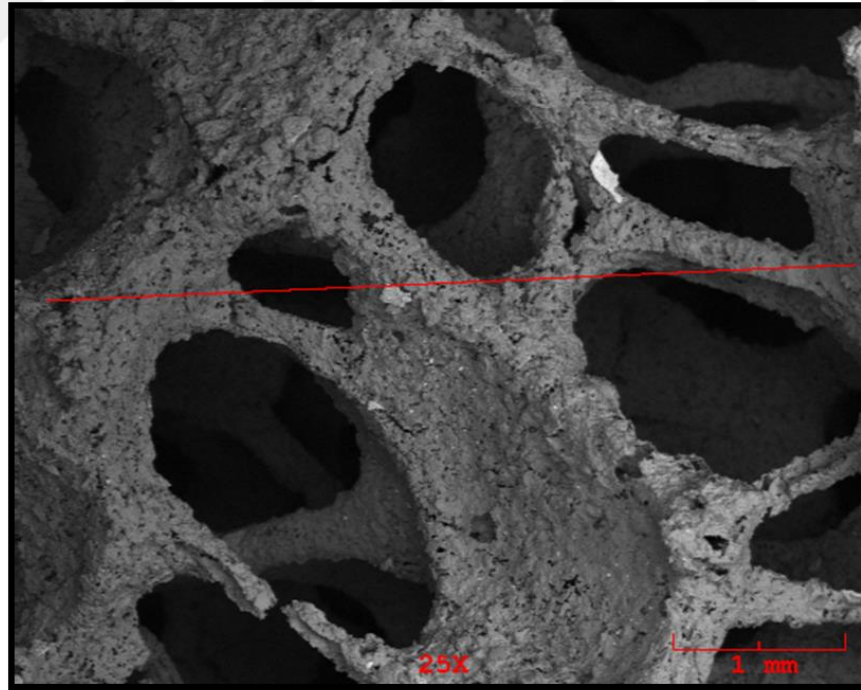


Şekil 7.15. 1B kodlu seramik köpüğün SEM görüntüsü

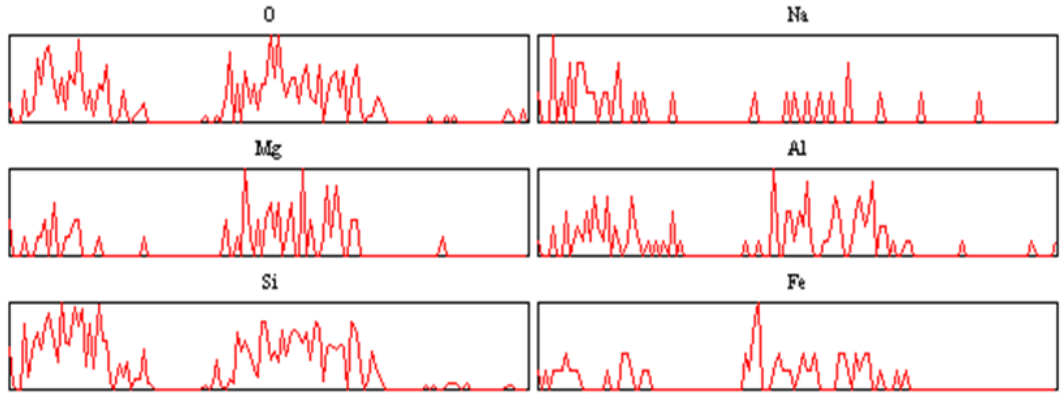


Şekil 7.16. 1B kodlu seramik köpüğün EDS analiz sonucu

Kalan katı kısımlarda ise baskın olarak da O, Si bulunmaktadır. Si elementi başta ana iskeleti oluşturan SiC malzemesinden, geri kalan miktarda formülize edilmiş silisik asitten meydana gelmiştir. O elementinin ise her katkı malzemesinin içinde bulunmasından dolayı EDS analiz sonuçlarına yansımıştır (Şekil 7.16 ve 7.18).



Şekil 7.17. 1BMAS12 seramik köpüğün SEM görüntüsü

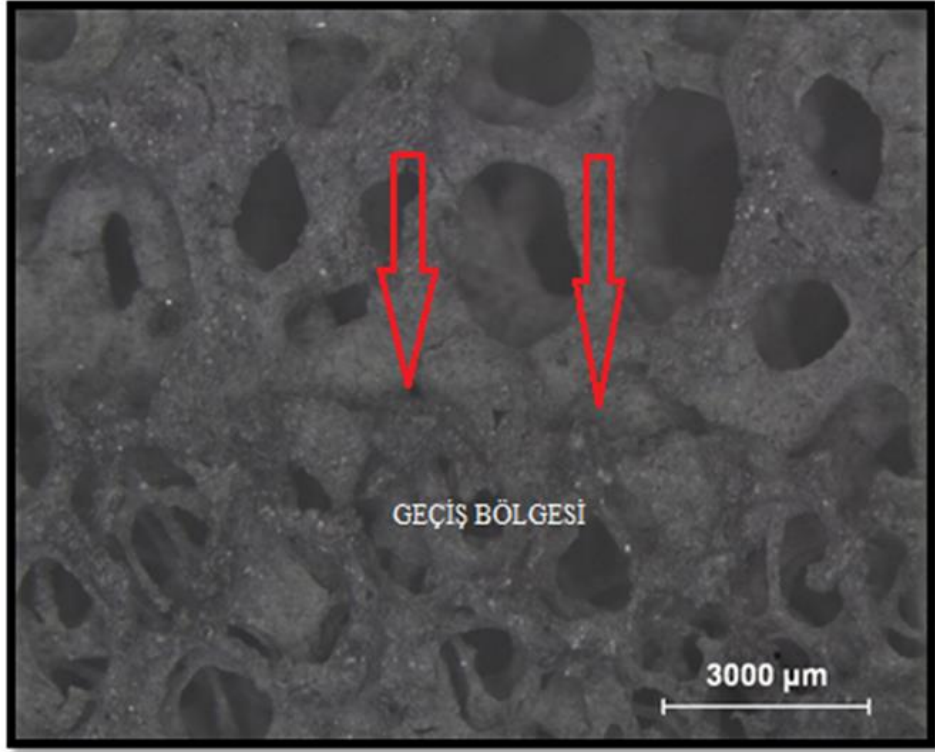


Şekil 7.18. 1BMAS12 seramik köpüğün EDS analiz sonucu

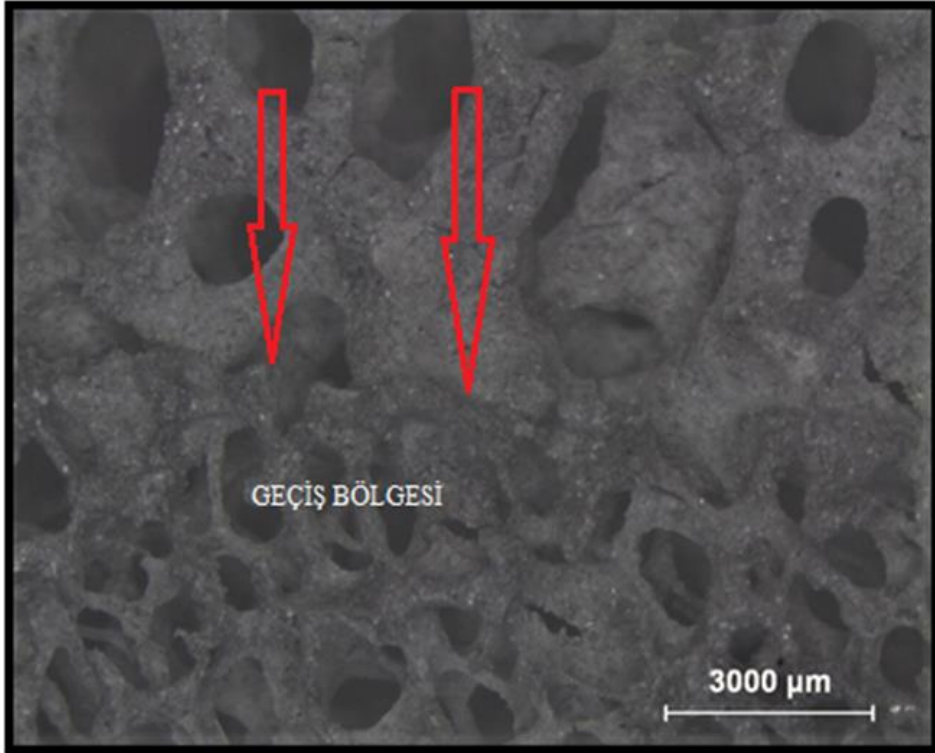
1B seramik köpüğe katkı malzemeler eklenmesiyle oluşan 1BMAS12 kodlu seramik köpüğün elementel değişiminde, elementlerin oranlarında azalma olduğu tespit edilmiştir. Özellikle Bentonit malzemesinin içerisinde bulunan Na ve Fe elementinin oranında düşüş meydana gelmiştir. Çünkü katkı oranlarının artmasıyla safsızlık artmıştır. Bunun sonucunda ise, elementlerin yüzde oranlarında azalma gerçekleşmiştir (Şekil 7.18.).

7.9. İki Katmanlı Seramik Köpük Üretimi

10 ppi ve 20 ppi'lık seramik köpüğün fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimi gerçekleştirilerek iki seramik köpük arasındaki hücre kolları bağlantılarının başarılı olduğu Şekil 7.19.'da gösterilmektedir. Geçiş bölgesindeki hücre kolları iyi kaynaşmış olup bağlantı noktaları sağlamdır.



(a)



(b)

Şekil 7.19. Fonksiyonel derecelendirilmiş seramik köpük üretimi (a) ve (b)

7.10. SiC Takviyeli Metal Matrisli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozit Malzeme Üretimi

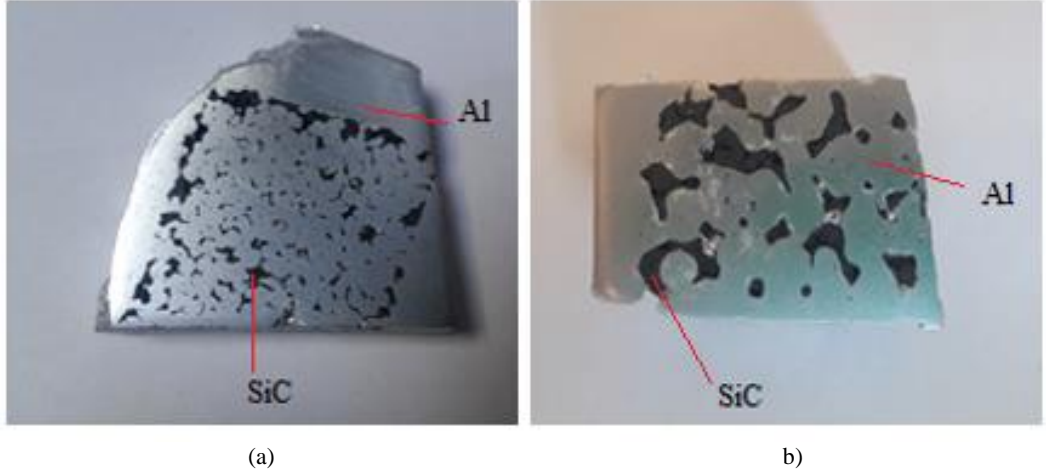
Replikasyon yöntemi ile üretilen seramik köpüklere ETİAL 171 alüminyum alaşımı emdirilerek fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Makhlouf ve arkadaşları kompozit malzeme üretiminde taguchi L8 dizayn yöntemi kullanarak kompozit malzemenin mekanik özellikleri ve mikroyapısını etkileyen parametreleri incelemişlerdir. SiC preform yapımında SiC, nişasta, balmumu emülsiyon karışımı çelik bir kalıp içerisine yerleştirilerek basınç yardımıyla üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra alüminyum alaşımı ve preform, bornitrülle kaplanan seramik kap içerisine konularak 1235 °C sıcaklıkta kompozit malzeme üretilmiştir. Kompozit malzeme üretiminde farklı infiltrasyon süresi, SiC partikül boyutu, preformun ağırlığı ve yoğunluğu gibi birçok parametrelerin etkisinin incelendiğini belirtmektedir (Pech-Canul, Katz, ve Makhlouf, 2000). Yaptığımız mevcut çalışmada ise sabit bir sıcaklıkta farklı katkı malzemeleri kullanılarak replikasyon yöntemi ile üretilen seramik köpüğe alüminyum metali emdirilip nihai ürün olan fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

7.10.1. Tek katmanlı döküm numunesi

Alüminyum infiltrasyonu yapılan numunelerde, ilk aşama olarak 10 ve 20 ppi'lık üretilen seramik köpüklere ayrı ayrı sıvı metal infiltre edilmiştir. Sıvı metal, döküm kalıbının her tarafına homojen bir şekilde nüfuz ederek tek katmanlı nihai malzeme üretilmiştir. Döküm kalıbında bir besleyici kullanılmış olup, seramik köpüğe sıvı metal emdirilme işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.20.).



Şekil 7.20. Tek katmanlı alüminyum infiltrate edilmiş kompozit malzeme



Şekil 7.21. Alüminyum infiltrate edilmiş kompozit malzeme 10 ppi (a), 20 ppi (b)

Seramik köpüğe alüminyum infiltrate edilerek elde edilen kompozit malzemenin içinde bulunan SiC partiküller matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılmıştır (Şekil 7.21.).

7.10.2. İki katmanlı döküm numunesi

İki katmanlı malzeme üretiminde 3 farklı kalıp hazırlayarak nihai ürün elde edilmiştir. İlk gerçekleştirilen dökümde, kalıbın içerisine seramik köpükler iki katmanlı olacak şekilde 10 ve 20 ppi gözenek boyutundaki seramik köpüklerden, 10 ppi seramik köpük alt kısımda 20 ppi seramik köpük üst kısımda kalacak şekilde yatay düzlemde yerleştirilerek yapılmıştır. Kalıpta iki besleyici kullanılmasına rağmen başarılı sonuç alınamamıştır. Bu dökümün sonucunda, metal akışı her tarafa homojen olacak şekilde ilerleyemediğinden iki katmandan oluşan seramik köpüğün alt katmanında bulunan 10 ppi'lık seramik

köpüğe sadece alüminyum infiltrasyonu gerçekleştirilmiştir. İkinci katmana geçememesinin sebebi metal erken katılaşmaya uğradığından dolayı sıcak sıvı metal akışı sağlanamamıştır (Şekil 7.22.).



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.22. Çift katmanlı alüminyum infiltrasyon edilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme-1.döküm (a), (b) ve (c)

İkinci dökümde ise 20 ppi seramik alt tarafta, 10 ppi seramik köpük üst tarafta kalacak şekilde döküm kalıbına yatay yerleştirilerek yapıldığında 20 ppi seramik köpükten hiç metal geçişi olmadığından 10 ppi'lik seramik köpüğe demetal geçişi olmamıştır. Bu dökümde istenilen döküm gerçekleşmemiş olup Şekilde 7.23.'de gösterilmektedir.

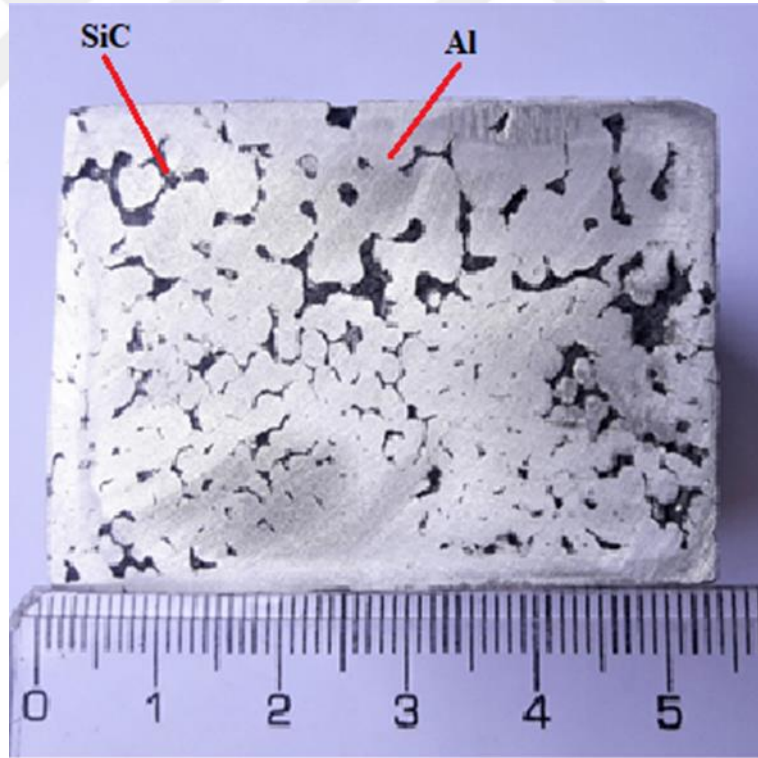


Şekil 7.23. Çift katmanlı alüminyum infiltre edilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme-2.döküm

Üçüncü dökümde ise 10 ve 20 ppi'lik seramik köpükler yerçekimi etkisinden yararlanılarak dikey bir şekilde döküm kalıbına yerleştirildi. Sıvı metal sıcaklığı, 900 °C' sıcaklıklara çıkartılmıştır. Bundan dolayı metalin akışkanlığı artmış olup sıvı metalin dökümü gerçekleşen süreye kadar metalin soğuması kısmen engellenmiştir. Başarılı bir döküm işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.24.-a). Elde edilen döküm sonucunda SiC partiküllerinin dağılımlarının homojen bir şekilde dağıldığı Şekil 7.24.-b, c'de gösterilmiştir.

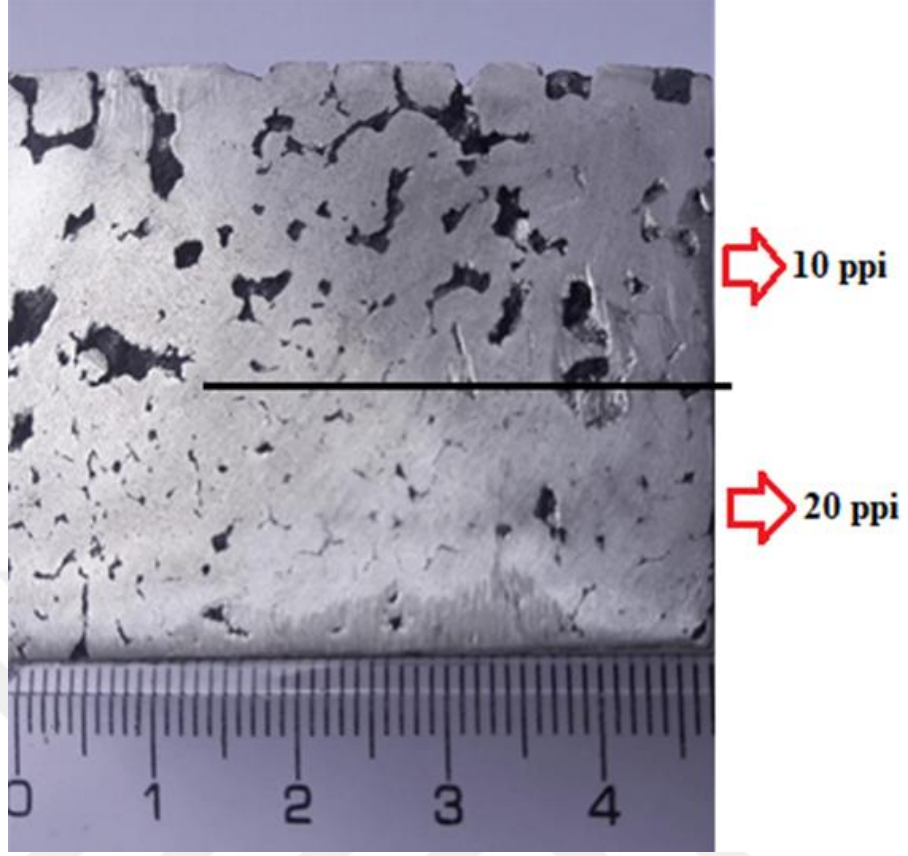


(a)



(b)

Şekil 7.24. Çift katmanlı alüminyum infiltr edilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme-3. Döküm



(c)

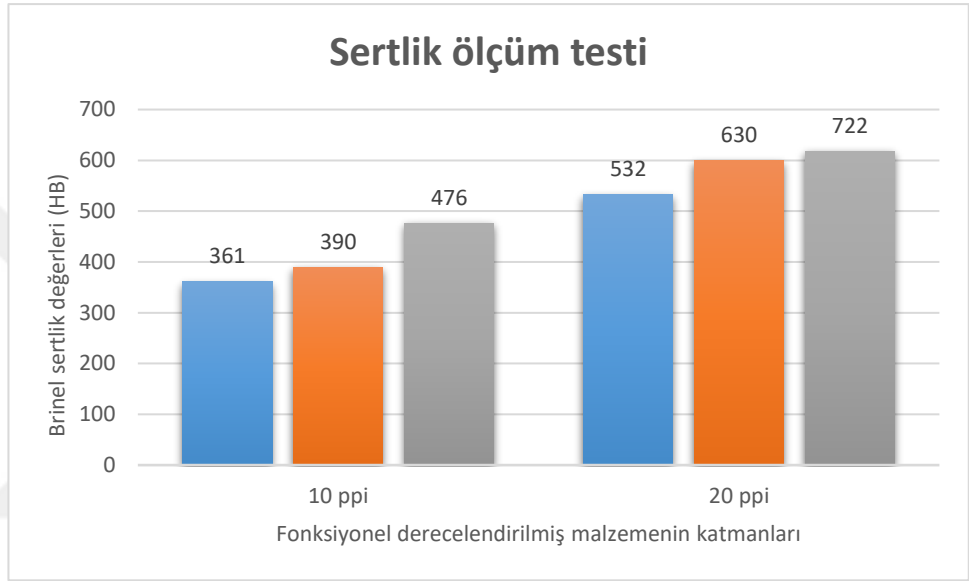
Şekil 7.24. (devamı)-Çift katmanlı alüminyum infiltre edilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme-3. döküm (a), (b) ve (c)

Nihai ürün olan SiC takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin içindeki takviye fazın oranı yapılan hesaplamalarla ağırlıkça %12,97 bulunmuştur. Geriye kalan ağırlıkça %87,03 matris fazıda alüminyum metali oluşturmaktadır.

Rajan ve arkadaşları SiC takviyeli alüminyum matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme üretimini santrifüj yöntemi ile üreterek elde etmiştir (Rajan ve diğerleri, 2010). Yapılan tez çalışmasında ise sıvı metal infiltrasyon yöntemi kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiş olup, başarılı bir şekilde nihai ürünün sertlik değerlerine ulaşılmıştır.

7.10.3. İki katmanlı döküm numunesinin sertlik ölçümü

Brinell sertlik testi 187,5 yük altında 2,5 mm çapındaki bilye kullanılarak ölçüm yapılmıştır. Bunun sonucunda 10 ppi katmanlı malzemedan 20 ppi katmanlı malzemeye geçişi sırasında, malzemenin sertliğinde bir artış meydana geldiği Şekil 7.25.'de belirtilmektedir.



Şekil 7.25. Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin brinell sertlik testi

Brinell sertlik ölçümünde katmanların kendi arasında sertlik ölçümü yapıldığında 10 ppi'lık seramik takviyeli nihai ürünün brinell sertlik değeri 514 HB, 20 ppi'lık seramik takviyeli nihai ürünün ise 682 HB dir.

BÖLÜM 8. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada ana iskeleti oluşturmak için başlangıç malzemesi olarak SiC ve Bentonit malzemesi kullanılmıştır. Çalışma iki adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada replikasyon yöntemi ile farklı katkı malzemelerinden 1200 °C sinterleme sıcaklığında farklı gözenek boyutu kullanarak makroporoz SiC seramik köpükler üretilmiştir. İkinci aşamada ise; üretilen SiC seramik köpüklere ETİAL 171 alüminyum alaşımı infiltre ederek çok katmanlı malzeme üretimi başarılmıştır.

İlk aşamada üretilen farklı gözenek boyutlarına sahip 10 ve 20 ppi'lık SiC seramik köpükler farklı kompozisyonlarda hazırlanmıştır. Farklı kompozisyonlara sahip 1B, 1BMAS, 1BMAS12, 1BMAS18, 1BMAS25 ve 1BMAS50 kodlu seramik köpüklerin, farklı katkı malzemelerin sinterleme ve proses üzerine etkisini, üretilen nihai seramik köpüklerin mekanik test sonuçlarından incelenmiştir. 10 ppi'lık poliüretan süngerlerden elde edilen 1BMAS18 kodlu seramik köpük ile 20 ppi'lık poliüretan süngerlerden elde edilen 1BMAS12 kodlu seramik köpüğün, morfolojik ve mekaniksel olarak optimum seramik köpük olduğu belirtilmiştir. Basma mukavemetleri sırasıyla 145 N ve 110 N değerine ulaşmıştır. Ayrıca yüzde gözenek hesabı yapılmıştır. Bunun sonucunda optimum seramik köpüklerden 1BMAS18 ve 1BMAS12 kodlu seramik köpüklerin sırasıyla yüzde gözeneklilik oranı %39,40 ve %43,24'dür. Replikasyon yöntemi ile üretilen seramik köpüklerde, kusur olarak da bilinen üçgensel bölgenin içerisinde yer alan gözenek boyutunun azalması amaçlanıp üretimi gerçekleştirilmiştir. Formülize edilmiş silisik asit ve sitrik asit kullanılarak üretilen nihai ürünlerdeki etkisi 1BMAS18, 1BMAS25 ve 1BMAS50 kodlu seramik köpüklerde görülmüştür. Bu katkı oranı artıkça gözeneklilik yüzdesi artmakta olup yoğun bir yapı oluşumu elde edilememiştir.

Fonksiyonel derecelendirilmiş metal matrisli kompozit malzeme üretimi için döküm kalıbına yerleştirilen seramik köpüklere, 900 °C sıcaklıklara çıkartılan alüminyum sıvı metal infiltasyon işlemi uygulanmıştır. Üretilen SiC takviyeli alüminyum metal matris kompozit malzemede SiC partiküllerin homojen olarak dağıldığı ve katmanların arasında düzgün geçişler olduğu ortaya konulmuştur.

8.1. Öneriler

1. Farklı gözenek boyutlarında süngerler kullanılarak ve katmanların sayısını ikiden üç'e çıkartılarak fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemeler üretmek,
2. Farklı uygulama alanlarında kullanılmak üzere; daha ucuz malzemelerle seramik köpük üretimi gerçekleştirilerek maliyeti düşürmek,
3. Daha yüksek mukavemet gerektiren yek pare preform kullanım alanları için SiC seramik köpük üretim sıcaklığı bu tez kapsamında kullanılan (1200°C) değerlerden daha yüksek değerlere çıkarmak,
4. Seramik köpük üretiminde iskelet yapıyı oluşturan ve altlık malzeme olarak kullanılan polimer sünger yapının yüzey pürüzlülüğü ve emdirilme işleminin verimli gerçekleştirilmesi prosesinde düzgün geometri ile kesilmiş sünger numunelerinin kullanılması gerektiği,
5. Döküm kalıbı hazırlama sırasında ekzotermik besleyici kullanmak.

KAYNAKLAR

- Açıkbaş, N.Ç. (2018). Seramik malzemeler ders notları, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi.
- Ahmad, R., Ha, J. H., ve Song, I. H. (2014). Processing methods for the preparation of porous ceramics. *J Kor Powd Met Inst*, 21(5), 389-98.
- Ahmad, S., Latif, M. A., Taib, H., ve Ismail, A. F. (2013). Short review: Ceramic foam fabrication techniques for wastewater treatment application. *In Advanced Materials Research Vol. 795*, pp. 5-8. Trans Tech Publications.
- Avcı, U., Erdem, M., ve Karabulut, M. (2017). Vorteks yöntemi ile al_2o_3 takviye edilen 7039 al alaşımı levhanın sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi, mikro yapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 4(3), 560-567.
- Azaklı, A., Aslan, S., Bindal, C., ve Akbulut, H. (2003). Etial 171-SiC-grafit hibrit metal matrikli kompozitlerin üretimi ve mikroyapısı. *Sakarya University Journal Of Science*, 7(2), 104-109.
- Basma testi. (2018, 23 Temmuz). Erişim adresi: <https://malzemebilimi.net/malzemelere-uygulanan-mekanik-testler.html>
- Bedir, F. (2010). Alüminyum kompozitlerin üretimi, karakteristik özellikleri ve endüstriyel uygulamaları. *Mühendis ve Makine*, 47(554), 28-35.
- Bentonit. (2018, 12 Ağustos). Erişim adresi: <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/bentonit>
- Bernard-Granger, G., ve Guizard, C. (2008). New relationships between relative density and grain size during solid-state sintering of ceramic powders. *Acta Materialia*, 56(20), 6273-6282.
- Callister, W. D., ve Rethwisch, D. G. (2007). *Materials science and engineering: an introduction, Vol. 7*, pp. 603-605).
- Callister, W. D. (2000). *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. s.56-58.
- Chawla, K. K., Chawla, N. (2006). *Metal Matrix Composites*.

- Chae, S. H., Kim, Y. W., Song, I. H., Kim, H. D., ve Narisawa, M. (2009). Porosity control of porous silicon carbide ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(13), 2867-2872.
- Chen, F., Yang, Y., Shen, Q., ve Zhang, L. (2012). Macro/micro structure dependence of mechanical strength of low temperature sintered silicon carbide ceramic foams. *Ceramics International*, 38(6), 5223-5229.
- Colombo, P. (2005). Conventional and novel processing methods for cellular ceramics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 109-124.
- Çalın, R. (2006). Magnezya parçacık takviyeli Al matrisli kompozitin vakum infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara).
- Çalışkan, F., Cömert, S., ve Kocaman, E. (2017). Fabrication of functional graded al₂O₃ composite reinforced with al₂O₃ particles. *Acta Physica Polonica, A.*, 131(3).
- Çalışkan, F., Demir, A. (2017). Seramik malzemeleri ders notları, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi.
- Çalışkan, F., Tatlı, Z. (2018). Yüksek lisans seramik malzemeleri ders notları, Sakarya Uygulamalı ve Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
- Çolak, N. Y., ve Turhan, H. (2016) Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen al-si/b₄c kompozit malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 259-266.
- Das, D. K., Mishra, P. C., Singh, S., ve Pattanaik, S. (2014). Fabrication and heat treatment of ceramic-reinforced aluminium matrix composites-a review. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 9(1), 6.
- El-Galy, I. M., Ahmed, M. H., ve Bassiouny, B. I. (2017). Characterization of functionally graded Al-SiCp metal matrix composites manufactured by centrifugal casting. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 371-381.
- Eom, J. H., Kim, Y. W., ve Raju, S. (2013). Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics: A review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 1(3), 220-242.
- Gauckler, L.J. ve Waeber, M.M. in light metals. (1985). *Proc. 114th Ann. Meet. Metal. Soc. AIME*, 1261-1283, 1985.
- German, R. M. (2005). *Powder metallurgy and particulate materials processing*. s.99

- Güven, Ş. (2011). Toz metalurjisi ve metalik köpükler. *Teknik Bilimler Dergisi*, 1(2), 22-28.
- Gonzenbach, U. T., Studart, A. R., Tervoort, E., ve Gauckler, L. J. (2007). Macroporous ceramics from particle-stabilized wet foams. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(1), 16-22.
- Gökçe, A., Fındık, F., ve Kurt, A. O. (2017). Alüminyum ve alaşımlarının toz metalurjisi işlemleri. *Engineer & the Machinery Magazine*, 58(686).
- Hampshire, S. (Ed.). (2012). *Non-oxide technical and engineering ceramics*. Springer Science & Business Media, p.175-190.
- Huo, W., Zhang, X., Chen, Y., Wang, D., Liu, J., Yan, S., ve Yang, J. (2018). Mechanical strength of highly porous ceramic foams with thin and lamellate cell wall from particle-stabilized foams. *Ceramics International*, 44(5), 5780-5784.
- Jean, G., Sciamanna, V., Demuynek, M., Cambier, F., ve Gonon, M. (2014). Macroporous ceramics: Novel route using partial sintering of alumina-powder agglomerates obtained by spray-drying. *Ceramics International*, 40(7), 10197-10203.
- Jun, I. K., Koh, Y. H., Song, J. H., Lee, S. H., ve Kim, H. E. (2006). Improved compressive strength of reticulated porous zirconia using carbon coated polymeric sponge as novel template. *Materials letters*, 60(20), 2507-2510.
- Karl, S., ve Somers, A. V. (1963). U.S. Patent No. 3,090,094. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Kang, S. J. L. (2005). *Sintering: densification, grain growth and microstructure*. Elsevier.51-63
- Kırmızı, G., Arık, H., ve Çinici, H. (2019). Experimental study on mechanical and ballistic behaviours of silicon carbide reinforced functionally graded aluminum foam composites. *Composites Part B: Engineering*, 164, 345-357.
- Kingery, W. D., Bowen, N. K., ve Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to Ceramics*, A Willem Inter Science Publication. New York, s.45.
- Kumar, R., ve Chandrappa, C. N. (2014). Synthesis and characterization of Al-SiC functionally graded material composite using powder metallurgy techniques. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(8).
- Liang, X., Li, Y., Liu, J., Sang, S., Chen, Y., Li, B., ve Aneziris, C. G. (2016). Fabrication of SiC reticulated porous ceramics with multi-layered struts for porous media combustion. *Ceramics International*, 42(11), 13091-13097.
- Liu, G. (2011). Fabrication of porous ceramics and composites by a novel freeze casting process (Doctoral dissertation, University of Birmingham).

- Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T., Shukla, M., ve Pityana, S. (2012). Functionally graded material: an overview.
- Mangkonsu, C., Kunio, I., Othman, R.B., The effect of sintering temperatures on the microstructure and properties of B-TCP, *Aust. J. Basic & Appl. Sci.*, 8(5): 492-497, 2014.
- Mindivan, H., ve Kayalı, E. S. (2007). SiC takviyeli 2618 Al matrisli kompozitlerin aşınma davranışı. *İTÜDERGİSİ/d*, 6(2).
- Miracle, D. B., Donaldson, S. L., Henry, S. D., Moosbrugger, C., Anton, G. J., Sanders, B. R., & Scott Jr, W. W. (2001). *ASM handbook Vol. 21*, pp. 107-119. Materials Park, OH, USA: ASM international.
- Mishra, M. K., Kumar, S., Ranjan, A., ve Prasad, N. E. (2018). Processing, properties and microstructure of SiC foam derived from epoxy-modified polycarbosilane. *Ceramics International*, 44(2), 1859-1867.
- Ohji, T. (2013). *Porous Ceramic Materials*, Handbook of Advanced Ceramics, 1131-1143
- Omori, M. (2000). Sintering, consolidation, reaction and crystal growth by the spark plasma system (SPS). *Materials Science and Engineering: A*, 287(2), 183-188.
- Panwar, N., ve Chauhan, A. (2018). Fabrication methods of particulate reinforced aluminium metal matrix composite-A review. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5933-5939.
- Pech-Canul, M. I., Katz, R. N., ve Makhlof, M. M. (2000). Optimum conditions for pressureless infiltration of SiC_p preforms by aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 108(1), 68-77.
- Ren, S. B., Shen, X. Y., Qu, X. H., ve He, X. B. (2011). Effect of Mg and Si on infiltration behavior of Al alloys pressureless infiltration into porous SiC_p preforms. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 18(6), 703-708.
- Radhika, N., ve Raghu, R. (2016). Development of functionally graded aluminium composites using centrifugal casting and influence of reinforcements on mechanical and wear properties. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(4), 905-916.
- Rajan, T. P. D., Pillai, R. M., ve Pai, B. C. (2010). Characterization of centrifugal cast functionally graded aluminum-silicon carbide metal matrix composites. *Materials characterization*, 61(10), 923-928.
- Sarathchandra, D. T., Subbu, S. K., ve Venkaiah, N. (2018). Functionally graded materials and processing techniques: An art of review. *Materials Today: Proceedings*, 5(10), 21328-21334.

- Scheffler, M., ve Colombo, P. (2005). *Cellular ceramics. Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, 670.
- SEM. (2018, 20 Haziran). Erişim adresi: <http://www.sedlab.com.tr/elementel-analiz-destekli-goruntu-inceleme-semeds.html>
- Sharma, P., Khanduja, D., ve Sharma, S. (2014). Tribological and mechanical behavior of particulate aluminum matrix composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(23), 2192-2202.
- Silisik asit. (2018, 12 Ağustos). Erişim adresi: <https://www.asit.gen.tr/silisik-asit.html>
- Silisyumkarbür. (2018, 12 Ağustos). Erişim adresi: <https://www.mikrometalurji.com.tr/icerik/silisyum-karbur.html>
- Sitrik asit. (2018, 12 Ağustos). Erişim adresi: <http://www.solvekimya.com/site/makaleler/tarim-hammaddemakaleleri.html/sitrik-asit-nedir-teknik-ozellikleri-kullanimi.html>
- Soltani, S., Khosroshahi, R. A., Mousavian, R. T., Jiang, Z. Y., Boostani, A. F., ve Brabazon, D. (2017). Stir casting process for manufacture of Al–SiC composites. *Rare Metals*, 36(7), 581-590.
- Sonber, J. K., Murthy, T. C., Subramanian, C., Hubli, R. C., ve Suri, A. K. (2013). Processing methods for ultra high temperature ceramics. in max phases and ultra-high temperature ceramics for extreme environments (pp. 180-202). IGI Global.
- Soy, U., Demir, A., ve Caliskan, F. (2011). Effect of bentonite addition on fabrication of reticulated porous SiC ceramics for liquid metal infiltration. *Ceramics International*, 37(1), 15-19.
- Şahin, Y. (2000). *Kompozit Malzemelere Giriş*, Gazi Kitabevi, 91-134
- Terwilliger, G. R., ve Lange, F. F. (1975). Pressureless sintering of Si₃N₄. *Journal of Materials Science*, 10(7), 1169-1174.
- XRD. (2018, 20 Haziran).Erişim adresi: <http://www.sedlab.com.tr/x-isini-difraksiyonu-xrd-analizleri.html>
- Yao, X., Tan, S., Zhang, X., Huang, Z., ve Jiang, D. (2007). Low-temperature sintering of SiC reticulated porous ceramics with MgO–Al₂O₃–SiO₂ additives as sintering aids. *Journal of materials science*, 42(13), 4960-4966.
- Wang, F., Yao, D., Xia, Y., Zuo, K., Xu, J., ve Zeng, Y. (2016). Porous SiC ceramics prepared via freeze-casting and solid state sintering. *Ceramics International*, 42(3), 4526-4531.

- Wang, F., Yin, J., Yao, D., Xia, Y., Zuo, K., Xu, J., ve Zeng, Y. (2016). Fabrication of porous SiC ceramics through a modified gelcasting and solid state sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 654, 292-297.
- Zhang, Z., Long, S., ve Flower, H. M. (1994). Light alloy composite production by liquid metal infiltration. *Composites*, 25(5), 380-392.
- Zhu, X., Jiang, D., Tan, S., ve Zhang, Z. (2001). Improvement in the strut thickness of reticulated porous ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 84(7), 1654-1656.



ÖZGEÇMİŞ

Ebru YILMAZ, 22/06/1992'de İstanbul'da doğdu. İlk, orta öğretimini Gebze'de lise eğitimini Darıca'da tamamladı. 2010 yılında Darıca Neşet Yalçın Lisesi'nden mezun oldu. 2010 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nü 2015 yılında bitirdi. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2019 yılında Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.