

**AÇIK GÖZENEKLİ ALÜMİNYUM KÖPÜK  
ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**2019  
DOKTORA TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**TALHA SUNAR**

**AÇIK GÖZENEKLİ ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİMİ VE  
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**Talha SUNAR**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Doktora Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Eylül 2019**

Talha SUNAR tarafından hazırlanan “AÇIK GÖZENEKLİ ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Melik ÇETİN

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 30/09/2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Serdar SALMAN (MÜ)

Üye : Prof. Dr. Mustafa YAŞAR (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Ferhat GÜL (GÜ)

Üye : Prof. Dr. Mustafa BOZ (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Melik ÇETİN (KBÜ)

...../...../2019

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Talha SUNAR

## ÖZET

**Doktora Tezi**

### **AÇIK GÖZENEKLİ ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**Talha SUNAR**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Melik ÇETİN**

**Eylül 2019, 109 sayfa**

Bu çalışmada; infiltrasyon ve karıştırma döküm yöntemleri kullanılarak farklı oranlarda bor karbür ( $B_4C$ ) ilave edilmiş açık gözenekli A360 alüminyum metal köpük numuneler üretilmiştir. Mikroyapı karakterizasyonu, optik mikroskobu (OM), X-ışını kırınım analizi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve görüntü işleme yöntemleriyle yapılmıştır. Basma ve sertlik deneyleri yapılarak farklı oranlarda  $B_4C$  ilavesinin ve gözenek morfolojisinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bor karbür takviyesinin sertlikte ve basma dayanımında artışa sebep olduğu tespit edilmiştir. Ağırlıkça parçacık takviye oranının artmasıyla sertlikte doğrusal bir artış elde edilmiştir. İki farklı yöntemle üretilen düzenli ve düzensiz gözenek morfolojisine sahip numunelerde ağırlıkça %0,5 oranında  $B_4C$  ilavesiyle en iyi basma dayanımı elde edilmiştir.

Bunun yanında, bor karbür takviyesinden bağımsız olarak düzenli gözenek morfolojisine sahip numunelerin düzensiz gözenek morfolojisine sahip numunelerden daha yüksek basma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Her iki yöntem kullanılarak üretilen düzenli ve düzensiz gözenek yapısında sahip numunelerin X-ışını kırınımı analizinden,  $B_4C$  (bor-karbür),  $Al_3BC$  ve  $Mg_2Si$  pikleri tespit edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Gözenekli malzemeler, alüminyum köpük, bor karbür, infiltrasyon, karıştırma döküm.

**Bilim Kodu** : 91530



## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **PRODUCTION OF OPEN CELL ALUMINIUM FOAM AND DEVELOPMENT OF IT'S PROPERTIES**

**Talha SUNAR**

**Karabuk University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Manufacturing Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Melik ÇETİN**

**September 2019, 109 pages**

Throughout this study, open celled A360 aluminum metal foams which are reinforced with different ratios of boron carbide ( $B_4C$ ) were manufactured by infiltration and stir casting methods. In subsequent stages, samples were characterized with optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction analysis (XRD) and Image processing methods. The influences of  $B_4C$  particles addition and pore morphology to the microstructure and mechanical properties were investigated with compression and hardness tests. It is observed that, the addition of  $B_4C$  particles caused an increment on hardness and compression behaviour of the composites. The increment on the weight ratio of reinforced particles showed a linear raise on the hardness of composites. The best compressive strength was obtained by adding 0.5% by weight  $B_4C$  in the samples with unifom and nonuniform pore morphology produced by two different methods.

Besides, independent from boron carbide reinforcement it is established that, the samples which have uniform pore morphology have higher compression strength than the samples which have nonuniform pore morphology.  $B_4C$ ,  $Al_3BC$  ve  $Mg_2Si$  peaks were determined from X-ray diffraction analysis of the samples with unifom and nonuniform pore structure produced using both methods.

**Key Word** : Cellular materials, aluminium foam, boron carbide, infiltration, stir casting.

**Science Code** : 91530





## TEŞEKKÜR

Çalışmaların yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, bu çalışmanın Őekillenmesinde yol gösteren tez danıőmanım sayın Prof. Dr. Melik ÇETİN'e teőekkürlerimi sunarım.

Tüm tasarım ve üretim çalışmalarında üstün gayretini ve yardımlarını esirgemeyen Yük. İmalat Mühendisi sayın Fuat MEDİK'e teşekkür ederim. Araştırma faaliyetlerimi gerçekleőtirirken çalışma ortamı paylaőtığımız sayın mesai arkadaőım Arő. Gör. Yusuf AYAN'a tüm değerli önerileri ve yardımları için teşekkür etmek isterim. Üretim metalürjisi laboratuvarındaki uzun mesailer sırasında değerli yardımlarını hiç esirgemeyen sayın Doç. Dr. Tansel TUNÇAY'a da teőekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne KBUBAP-17-DR-051 nolu projesi ve TUBİTAK 215M233 projesi ile desteklenmiőtir. Bu değerli destek için adları geçen bu saygın kurumlara da teşekkür ederim.

Son olarak sevgili aileme tüm eğitim hayatım boyunca olduğu gibi bu süreçte de sabırları ve destekleri için teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	4
METAL KÖPÜKLER.....	4
2.1. TOZ METALURJİSİ İLE METAL KÖPÜK ÜRETİM ÇALIŞMALARI .....	5
2.2. SIVI METAL İLE METAL KÖPÜK ÜRETİM ÇALIŞMALARI .....	12
2.3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ ÇALIŞMALARI.....	18
2.4. METAL KÖPÜKLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	24
2.4.1. Yoğunluklarına Göre Metal Köpükler.....	25
2.4.2. Ana Malzemelerine Göre Metal Köpükler .....	25
2.4.3. Gözenek Yapılarına Göre Metal Köpükler.....	26
2.5. METAL KÖPÜKLERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ.....	27
2.5.1. Mekanik Özellikler .....	27
2.5.2. Enerji Sönümlenme Karakteristikleri .....	28
2.5.3. Geçirgenlik .....	28
2.5.4. Akustik Özellikler.....	29
2.5.5. Termal İletim Özellikleri ve Diğer Özellikler .....	29

	<b>Sayfa</b>
BÖLÜM 3 .....	33
METAL KÖPÜKLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ .....	33
3.1. SIVI FAZDAN METAL KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ .....	33
3.1.1. Gaz Enjekte Ederek Köpükleştirme.....	34
3.1.2. Köpürtücü Elemanlar ile Köpükleştirme .....	35
3.1.3. Katı – Gaz Ötektik Katılaşma ile Köpükleştirme (Gasar) .....	35
3.1.4. Hassas Döküm Yöntemiyle Metal Köpük Üretimi.....	36
3.1.5. Yer Tutucu Malzemelerle Dökümle Metal Köpük Üretimi .....	37
3.2. KATI FAZDAN METAL KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ .....	38
3.2.1. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Köpük Metal Üretimi .....	38
3.2.2. Metal Tozları veya Fiberlerin Sinterlenmesiyle Köpük Üretilmesi .....	41
3.2.3. Gaz Tuzaklama Yöntemi ile Metal Köpük Üretimi .....	42
3.2.4. Bulamaçtan Metal Köpük Üretimi.....	43
3.2.5. Metal Küre Yapılarının Birleştirilmesiyle Metal Köpük Üretimi .....	44
BÖLÜM 4 .....	47
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	47
4.1. ANA MALZEME VE TAKVİYE MALZEME.....	47
4.2. NUMUNELERİN ÜRETİLMESİ .....	48
4.2.1. İnfiltrasyon Yöntemiyle Numune Üretimi.....	48
4.2.2. Karıştırmalı Döküm Yöntemi ile Numunelerin Üretimi .....	53
4.3. KULLANILAN ÖLÇÜM CİHAZLARI VE YÖNTEMLERİ.....	61
BÖLÜM 5 .....	65
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	65
5.1. GÖZENEKLİLİK DEĞERLERİ .....	65
5.2. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI .....	66
5.3. MEKANİK ÖZELLİKLER.....	89
5.4. XRD KİRİNİM DESENİ ANALİZİ .....	98
BÖLÜM 6 .....	100
SONUÇLAR .....	100

	<b><u>Sayfa</u></b>
KAYNAKLAR .....	102
ÖZGEÇMİŞ .....	109



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1. İleri malzemelerin yakın tarihteki tipik gelişim grafiği. ....	2
Şekil 2.1. Alüminyum köpüğün kalın hücre duvarı yapısının şematik görünümü. ....	9
Şekil 2.2. Partikül ilaveli alüminyum sandviç kompozitlerin elastikiyet grafiği. ....	12
Şekil 2.3. Malzeme bileşimlerinin sınıflandırılması ve katı köpük malzemeler. ....	25
Şekil 2.4. Açık gözenekli hücre yapısı. ....	27
Şekil 2.5. Kapalı gözenekli hücre yapısı. ....	27
Şekil 2.6. Gözenekli yapıdaki malzemelerin özelliklerini. ....	30
Şekil 2.7. Bazı ticari metal köpüklerin dayanım-yoğunluk değerleri. ....	31
Şekil 2.8. Metal köpük araştırma konularının şematik olarak gösterimi. ....	32
Şekil 3.1. Metal köpüklerin üretim yöntemlerinden bazıları ve bu yöntemlere verilen ticari isimler. ....	33
Şekil 3.2. Sıvı metalin gaz püskürtülmesiyle köpükleştirilmesi. ....	34
Şekil 3.3. Sıvı metalin köpük gaz oluşturuçular vasıtasıyla köpükleşmesi ve Ti Ayrışma analiz tepkimesi. ....	35
Şekil 3.4. Gasar yöntemi aparatları, Gasar yöntemi ile elde edilmiş metal köpük, genişçe uzamış gözenekler görülüyor. ....	36
Şekil 3.5. Hassas döküm yöntemiyle gözenekli malzeme elde etme yöntemi. ....	37
Şekil 3.6. Yer tutucu maddeler kullanarak döküm yöntemiyle gözenekli madde elde edilmesi. ....	37
Şekil 3.7. NaCl boşluk tutucu kullanarak Al ergiyiğın infiltrasyonu ile farklı gözenek boyutlarında metal köpük malzeme elde edilmesi. ....	38
Şekil 3.8. Sıkıştırılmış tozların köpürtücü madde vasıtasıyla köpükleştirilmesi. ....	39
Şekil 3.9. Sıkıştırılmış Al/TiH <sub>2</sub> malzemenin 750°C’de köpükleştirildiğindeki genleşme davranışı (köpükleşmemiş malzeme boyutu 32x9 mm). ....	40
Şekil 3.10. Metal tozları ve yer tutucular ile metal köpük üretimi. ....	41
Şekil 3.11. Yaklaşık 100µm çaptaki parçacıklardan üretilmiş gözenekli bronz. ....	42
Şekil 3.12. Gaz tuzaklama yöntemiyle üretilmiş TiAl <sub>6</sub> V <sub>4</sub> sandviç malzeme yapısı. .	43
Şekil 3.13. Sinterlenmiş küresel parçacıkların görüntüsü (köpük malzeme 1350°C’de sinterlenmiştir Fe <sub>0,88</sub> Cr <sub>0,12</sub> O <sub>1,5</sub> ). ....	45
Şekil 4.1. İnfiltrasyon yönteminde yer tutucu olarak kullanılan tuz parçacıkları. ...	48
Şekil 4.2. İnfiltrasyon sisteminin şematik olarak gösterimi. ....	49

Şekil 4.3.	304 paslanmaz çelik malzemeden yapılan infiltrasyon kalıbı, a) kalıp ve bileşenleri, b) kalıp ve bileşenlerinin ölçüleri. ....	50
Şekil 4.4.	Numune hazırlama için kullanılan metal kalıp. ....	50
Şekil 4.5.	İnfiltrasyon işlemi sonrasında kalıptan çıkartılmış ve şekillendirilmemiş haldeki kompozit blok. ....	51
Şekil 4.6.	Manyetik ısıtma ve karıştırma makinesi içerisinde NaCl çözüldürülmesinin gösterimi. ....	52
Şekil 4.7.	Karıştırma işleminin şematik görünümü. ....	54
Şekil 4.8.	Tasarlanan karıştırılmalı döküm sisteminin gösterimi. ....	55
Şekil 4.9.	Üretime hazır haldeki karıştırılmalı döküm sisteminin gösterimi, a) Montajı yapılan sistem b) Karıştırma döküm sisteminin şematik gösterimi. ....	56
Şekil 4.10.	Etial 171 külçeden kesilen metal ve bor karbür tozları. ....	57
Şekil 4.11.	Yer tutucu hücre geometrisi, a) perspektif görünümü, b) boyutları. ....	57
Şekil 4.12.	Yer tutucu hücreler arasında kalan ve üretimi hedeflenen geometri. ....	58
Şekil 4.13.	Shell maça kumu yer tutucuların kalıp içerisine basılarak üretilmesi. ....	59
Şekil 4.14.	Shell maça kumu yer tutucuların üst üste dizilmesi. ....	59
Şekil 4.15.	Üretilen gözenekli metal malzemeler. ....	60
Şekil 4.16.	Nikon Epiphot 200 optik mikroskop cihazının görünümü. ....	62
Şekil 4.17.	Shimadzu mikro sertlik cihazı. ....	62
Şekil 4.18.	Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem taramalı elektron mikroskobu. ....	63
Şekil 4.19.	Rigaku Ultima IV X-Işını kırınım cihazı. ....	63
Şekil 4.20.	Zwick/Roell 600kN mekanik test cihazının görünümü. ....	64
Şekil 5.1.	Metalografik incelemelerde kullanılan numuneler. ....	67
Şekil 5.2.	Çeşitli ilave oranlarına sahip numunelerin SEM görüntüleri 100X (solda), giriş içyapısı 1000x büyütme (orta) ve gözenek duvarları 1000x büyütme (sağda). ....	68
Şekil 5.3.	Çeşitli ilave oranlarına sahip numunelerin SEM görüntüleri 100X (solda), giriş içyapısı 1000x büyütme (orta) ve gözenek duvarları 1000x büyütme (sağda). ....	69
Şekil 5.4.	F0,5 kodlu numune üzerinde yapılan nokta EDS analizi sonuçları. ....	71
Şekil 5.5.	Numuneler üzerinde yapılan nokta EDS analizi sonuçları, a) F0 kodlu numune, b)F0,25 kodlu numune, c)F0,5 kodlu numune, d)F0,75 kodlu numune, e)F1 kodlu numune. ....	72
Şekil 5.6.	Numuneler üzerinde yapılan nokta EDS analizi sonuçları, a)F1,25 kodlu numune, b)F1,5 kodlu numune, c)F1,75 kodlu numune, d)F2 kodlu numune, e) F2,5 kodlu numune. ....	73

Şekil 5.7. Numuneler üzerinde yapılan nokta EDS analizi sonuçları, a)F3kodlu numune, b)F4 kodlu numune, c)F4,5 kodlu numune, d)F5 kodlu numune. ....	74
Şekil 5.8. F1,75 kodlu numunenin gözenek duvarlarındaki yapının EDS haritalama analizi sonuçları. ....	75
Şekil 5.9. F2 kodlu numunenin gözenek duvarı ve giriş kesitinin EDS haritalama analizi sonuçları. ....	76
Şekil 5.10. İnfiltrasyon yöntemiyle üretilen numunelerin gözenek duvarlarının EDS analizi, a) F0, b) F0,5, c) F1 d) F5. ....	77
Şekil 5.11. Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen numunelerin giriş kesitlerinin EDS analizi, a) S0, b) S1, c) S0,5, d) S1 .....	78
Şekil 5.12. Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen numunelerin mikroyapılarının optik mikroskopla görüntülenmesi.....	79
Şekil 5.13. Karıştırma döküm numunelerin mikroyapı SEM görüntüleri.....	80
Şekil 5.14. S0,5 kodlu numunenin SEM görüntüleri ve EDS haritalama yöntemi ile analizi, a) Genel görünüm, b) Karbon, c) Bor, d) Alüminyum, Bor ve Karbon.....	80
Şekil 5.15. S1 kodlu numunenin SEM görüntüleri ve EDS haritalama yöntemi ile analizi, a) Genel görünüm, b) Bor, c) Karbon, d) Alüminyum, Bor ve Karbon.....	81
Şekil 5.16. Düzenli yapılı gözenekli malzemelerin farklı bölgelerinden alınan metalografi numuneleri. ....	82
Şekil 5.17. Optik mikroskop ile farklı bölgelerden alınan mikroyapı görüntüleri. ....	83
Şekil 5.18. Mikroyapıların görüntü işleme yöntemleriyle filtrelenmesi. ....	84
Şekil 5.19. Faz bölgelerinin alanlarının karşılaştırılması.....	86
Şekil 5.20. Sertlik değerlerinin grafik halinde gösterimi, a) numunelerin ortalama sertlikleri, b) B <sub>4</sub> C parçacıklarının çevresinden alınan sertlik sonuçları... ..	87
Şekil 5.21. Farklı oranlarda B <sub>4</sub> C, SiC ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> gibi seramik parçacıkların alüminyum matrisli kompozitlerin sertlik özelliklerine etkisi. ....	88
Şekil 5.22. Basma testleri için hazırlanan numuneler, a) infiltrasyonla üretilmiş düzensiz gözenek yapısına sahip numune, b) karıştırma dökümle üretilmiş düzenli gözenek yapısına sahip numune. ....	90
Şekil 5.23. Ortalama basma gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesi ve plato gerilmesi bölgesinin gösterimi. ....	90
Şekil 5.24. a) Düzensiz gözenek yapısına sahip numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi, b) Düzenli gözenek yapısına sahip numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi. ....	92
Şekil 5.25. Ortalama basma gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesi ve plato gerilmesi bölgesinin gösterimi. ....	95

## **Sayfa**

Şekil 5.26. Her iki üretim yöntemiyle üretimi gerçekleştirilen numune serilerinin ilk maksimum basma gerilmesi ve plato gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması olarak gösterimi. ....	96
Şekil 5.27. Ortalama basma gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesi ve plato gerilmesi bölgesinin gösterimi. ....	97
Şekil 5.28. Köpük numunelerden alınan XRD kırınım deseni analizi grafikleri, a) F0, F1 ve F2 numunelerin grafiği, b) F3, F4 ve F5 numunelerin grafiği, c) S0, S0,5 ve S1 numunelerin grafiği.....	99





## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 4.1. Elemental analiz ve malzemenin kimyasal bileşimi. ....	47
Çizelge 4.2. İnfiltrasyon yöntemiyle üretilen numuneler ve takviye oranları.....	52
Çizelge 4.3. Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen numuneler ve takviye oranları .	61
Çizelge 5.1. Üretilen numunelerin gözeneklilik sonuçları. ....	66
Çizelge 5.2. Basma testi sonuç değerlerinin tablo üzerinde gösterimi. ....	94
Çizelge 5.3. Tüm faz bölgeleri alan sonuçları.....	85
Çizelge 5.4. Faz bölgelerinin alanlarının ortalama değerleri. ....	85

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Al	: alüminyum
Si	: silisyum
Mg	: magnezyum
Ti	: titanyum
Ar	: argon
Cu	: bakır
H	: hidrojen
B	: bor
C	: karbon
He	: helyum
Mo	: molibden
Ni	: nikel
Pb	: kurşun
Zn	: çinko
Ca	: kalsiyum
B <sub>4</sub> C	: bor karbür
SiC	: silisyum karbür
SiO <sub>2</sub>	: silisyum oksit
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: alüminyum oksit
TiC	: titantum karbür
TiH <sub>2</sub>	: titanyum hidrür
ZrH <sub>2</sub>	: zirkonyum hidrür
CaCO <sub>3</sub>	: kalsiyum karbonat
NaCl	: sodyum klorür

## **KISALTMALAR**

ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)

DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Standartları)

EN : European Norm (Avrupa Standartları)

TS : Türk Standartları

TM : Toz Metalurjisi



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

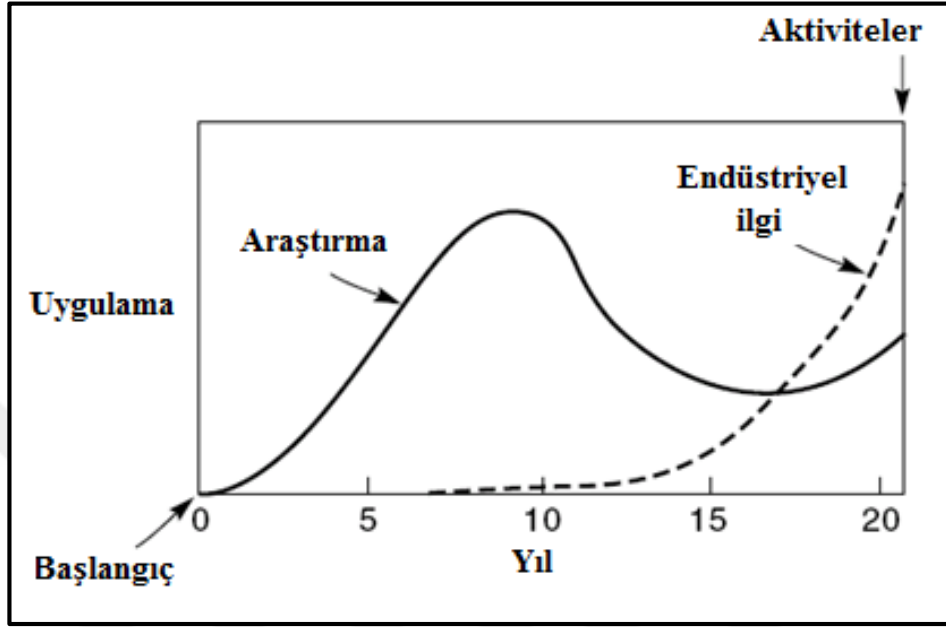
Gözenekli yapıdaki metalik malzemeler, mekanik ve fiziksel özellikler bakımından oldukça önemli avantajlar sağlarlar. Bunları başlıca; tokluk, basma mukavemeti, enerji ve akustik sönümlenme, ateşe dayanıklılık gibi özellikler olarak sıralayabiliriz. Bu tür malzemelerin özellikleri yoğunluklarına ve gözenek tiplerine bağlıdır. Gözenek tipleri olarak iki tip hücre yapısından söz edilebilir. Bunlar açık ve kapalı gözenekli yapılardır. Bu hücre yapılarının oluşumları ise doğrudan üretim metodu ve parametreleri ile ilgilidir.

Bir malzemeye gözenekli yapı kazandırdığımızda elde ettiğimiz en önemli kazanım bu malzemenin artık çok daha hafif olmasıdır. Ayrıca gözenekli malzemeler deforme edildiklerinde yoğunluklarında artış gözlenir. Deformasyon elastik kaldığı süreçte dağılım homojendir. Fakat plastik bölgede gözeneklerde bölgesel bantlar halinde hasarlar başlar. Aralardaki hasara uğramış gözenekler sayesinde gerilme sabit seviyede tutulur böylece düşük gerilme seviyesinde enerji absorbe edilmiş olunur [1].

Gözenekli yapılar iyi akustik sönümlenme yeteneğine de sahiptirler. En önemli işlevi gazın bir gözenekten diğerine akışı sırasındaki ses dalgalarındaki sürtünme kayıplarıdır. Yani gözeneklerin birbiriyle bağlantılı olması sesin iyi absorbe edilmesini sağlar. Bunun yanında, gözenekli yapı oldukça yüksek ısı iletim katsayısına sahip olduğundan ısı izolasyonda da kullanılabilir. Ayrıca yüksek yüzey alanı ısı eşanjör uygulamaları için ideal özelliktir.

Günümüzde üretim mühendisliğinde verimli, sürdürülebilir ve çevreci yaklaşımlar önemli bir rol almaktadırlar. Bu gibi yaklaşımlar da beraberinde üretilmesi daha karmaşık olan fakat geleneksel malzemelere göre çok daha iyi özelliklerdeki ileri malzemeleri gün yüzüne çıkardılar. Ashby vd. [2] birçok ileri malzemenin geçmişteki

gelişimlerini Şekil 1.1’de ifade etmektedirler. Gözenekli malzemeler de son zamanlarda sıklıkla söz edilen oldukça düşük yoğunluklarının yanında kayda değer mekanik, ısı, elektriksel özellikler gösteren malzemelerdir.



Şekil 1.1. İleri malzemelerin yakın tarihteki tipik gelişim grafiği [2].

Günlük hayatımızda oldukça popüler olan polimer köpük malzemeler örnek alınarak metallerin de bu yapıda üretilebileceği ve özelliklerinin modifiye edilebileceği fikri doğmuştur. Köpük metaller özellikle otomotiv ve inşaat alanlarında sıklıkla kullanılırlar. Otomotiv sektöründeki başlıca kullanım sebeplerinden en önemlisi yüksek darbe enerjisi sönmüleme kabiliyetidir. İnşaat sektöründe ise ses ve ısı yalıtım özelliğinin yanında hafiflik ve dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılır. Metal köpük malzemelerde ise hammadde olarak, düşük yoğunluğu, düşük ergime sıcaklığı ve iyi mekanik özellikleri sebebiyle alüminyum en fazla tercih edilir.

Bu çalışmanın amacı, bor karbür ( $B_4C$ ) takviye edilmiş açık gözenekli alüminyum köpüklerin ekonomik ve kolay bir üretim yöntemi kullanarak üretmek ve bu yöntemlerle elde edilecek olan açık gözenekli köpük malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmektir. Bu amaçla infiltrasyon ve karıştırma döküm olmak üzere iki farklı üretim yöntemi kullanılarak açık gözenekli metal köpük üretimi çalışmaları yapılmıştır. Üretilen alüminyum köpüklere ağırlıkça farklı oranlarda bor karbür ( $B_4C$ )

takviye edilerek B<sub>4</sub>C seramik parçacık ilavesinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri, optik mikroskobu (OM), görüntü analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektrometresi (EDS) eşleme, haritalama (mapping) ve X-Ray dağılım (XRD) analizleri yapılarak incelenmiştir.



## BÖLÜM 2

### METAL KÖPÜKLER

Metal köpükle ilgili belirtiler ilk olarak Meller tarafından 1926 yılında gerçekleştirilmiş çalışmada ortaya çıkmıştır. Hafif metaller (alüminyum ve alaşımları vbg.) gaz enjekte edilerek ve ilave köpürtücü maddeler kullanılarak (karbonat ve bikarbonat vbg.) köpükleştirilmiştir. Sonrasında, Sosnick 1948 yılında ve ilerleyen yıllarda ergimiş alüminyum içinde köpükleştirici madde olarak kullandığı cıvayı buharlaştırma yöntemini kullanarak kendi deyimiyle “Sünger Metal”i oluşturmuştur [3]. Bu yıldan sonra 1990 yılına kadar bu metaller üzerine ciddi araştırmalar yapılmamıştır. 1950’den 1970’li yıllara kadar metalik köpük üretebilmek için çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmiş ve bu yöntemlerin bazıları patentleşmiştir. Fakat o yıllarda basılı patentler dışında fazla bilimsel yayın çıkartılmamıştır. Daha sonra 1980’li yıllarda bilimsel çalışmaların başlaması, eski üretim tekniklerinin tekrar gözden geçirilmesine ve çok sayıda bilimsel yayının çıkarılmasına neden olmuştur [4].

İlerleyen yıllarda Elliott [5, 6] ergiyik alüminyum içerisine  $TiH_2$  ve  $ZrH_2$  gibi köpükleştirici maddeler eklenerek köpükleşme gerçekleşebileceğini ileri sürmüştür. Pashak ve Lenots [7] ise bu köpükleştirici maddelerin metal tozlarıyla karıştırılabileceğini bildirdiler. Metal tozları karışımına karbonat tozları eklenerek başlangıç malzemesi elde edildi. Karışım sıkıştırılarak köpükleştirme için ısıl işleme tabi tutulmuştur. İleriki çalışmalarda ise  $ZrH_2$ ,  $TiH_2$  ve  $CaCO_3$  gibi maddeleri köpükleştirici olarak kullanıldılar. Al ve Mg metalleri ve alaşımlarının yanında diğer metal ve alaşımları da kullanıldı [3]. Niebylski vd. Pb-Zn alaşımı köpüğünü ürettiler. Ayrıca köpükleştirici maddelerin eklenmesi sırasında karıştırma işlemi, daha düzenli bir yapının oluşmasını sağladığı görüldü [8].

1980’lerin sonlarına doğru başlayan diğer bir aşamada ise endüstriyel ve bilimsel ilginin arttığı gözlemlenmiştir [8]. 1987’de Japonya’da Shinko Wire Şirketinde

Akiyama vd. Ca ve TiH<sub>2</sub> gibi köpürtücü maddeleri ergiyik alüminyum ekleyerek ve bu sistemi karıştırma yoluyla ekonomik ve hızlı bir üretim yöntemi geliştirmiştir. Bu işlem Alporas ismi verilerek ticarileştirilmiştir [9]. Gaz enjekte ederek köpükleştirme 1990 yılında Kanada, Montreal'de Alcan International firmasında keşfedilmiştir. Jin vd. [10], metalik ergiyiğe gaz enjekte ederek ergiyiğin yüzeyinde ve yüzeye yakın bölgelerinde köpükleştirme meydana getirilir. Bu işlem günümüzde Cymat ticari isimle bilinir. Sıvı ve katı haldeki metal arasında hidrojen çözübilirlik bakımından ciddi farklılık vardır. Ergiyik bir metal hidrojenle doymuştur, katılaşma sırasında katı sıvı arayüzeyinde gaz çıkışından dolayı katılaşma doğrultusunda silindirik köpükleşme gerçekleşir. Shapovalov tarafından bulunan bu yöntem Gasar olarak adlandırılan köpükleştirme işlemidir [11].

Metal ve köpürtücü maddelerin tozlarının başlangıç malzemesi olarak kullanılmasına dayalı üretimi fikri Almanya Fraunhofer Enstitüsünde Baumeister tarafından ileri sürüldü. Bu işlem bugün toz metalurjisi veya TM yöntemiyle köpük üretimi olarak bilinir. Bu yöntem Avusturyalı Alulight firması tarafından sahiplenilmiştir [12]. 2000 yılında ergiyik ve toz metalurjisi yöntemleriyle köpükleştirmenin bazı avantajlarını birleştiren ve FORMGRIP olarak adlandırılan bir teknik geliştirildi. Bu yöntem gaz ortaya çıkartan öncü malzemelerin alüminyum temelli kompozit sıvının içinde ayrışmasına olanak sağlar. Bu öncü malzemelere uygulanan ısı işlem köpük oluşumuyla sonuçlanır [13].

Bir diğer yeni teknik ise Berlin Hahn-Meitner Enstitüsü tarafından geliştirildi. Bu yöntem de TM tabanlıdır fakat köpükleştirici madde eklenmesi gerektirmez. İlk aşamada sıkıştırılmış metal tozları aşırı basınç altında ısıtılır, sonrasında basıncın salınması köpükleşmeyi sağlar. Bu yöntem basınç uyarılmış köpükleştirme olarak adlandırılır [14].

## **2.1. TOZ METALURJİSİ İLE METAL KÖPÜK ÜRETİM ÇALIŞMALARI**

Metal köpüklerin üretimi çalışmaları literatürde genellikle toz metalurjisi yöntemleri ve diğer sıvı metal döküm yöntemleri olarak ayrılmaktadır. Bu bölümde çoğunlukla toz metal teknolojileriyle metal köpük üretim çalışmaları derlenmiştir. Amirah vd.



[15], kapalı gözenekli alüminyum köpüklerdeki yer tutucu miktarı ve bunları ayrıştırma yöntemlerinin morfolojiye etkilerini ve bunun yanında alüminyum köpüğün yoğunluk, gözeneklilik ve basma özelliklerini incelemişlerdir. Alüminyum köpük malzemeyi alüminyum tozları ( $<35\mu\text{m}$ ), 1-5 mm boyut aralığındaki küresel karbomitlerin ( $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ) yer tutucu olarak kullanılmasıyla toz metalurjisi yöntemiyle üretmişlerdir. Oksitlenme probleminin üstesinden gelmek için ise ağırlıkça %1 magnezyum ( $<10\mu\text{m}$ ) Karbomit yer tutucuları ayrıştırmak için çözündürme, normal sinterleme ve iki adımda sinterleme işlemleri olmak üzere üç farklı ayrıştırma yöntemi kullanmışlardır. Ağırlıkça %60 karbomit içeriğine sahip alüminyum köpük, tüm ayrıştırma yöntemlerinde en düşük yoğunluktaki ve en yüksek gözeneklilik oranına sahip olarak gösterilmiştir. Ayrıca sonuçlara göre kabul edilebilen yoğunluk ve gözeneklilik ile birlikte en yüksek basma özelliğinin çözündürme ile ayrıştırma yöntemiyle elde edildiğini fakat en yüksek gözenekliliğin ise iki adımda sinterleme yönteminde görüldüğünü belirtmişlerdir.

Asavavisithchai ve arkadaşları [16], kapalı gözenekli alüminyum köpüklere TiC parçacıkların eklenmesinin köpüklenme davranışını dönüştürmesi ve bunun sonucunda basma dayanımı ve enerji emme kabiliyetlerinin iyileştirmesi üzerinde çalışmışlardır. Havada atomize edilmiş %99,7 saflıkta Al tozlarını ( $D_{50} = 102 \mu\text{m}$ ) ve homojen olarak ağırlıkça %0,6 olarak karıştırdıkları  $\text{TiH}_2$  parçacıkları ( $<48 \mu\text{m}$ ) ve sırasıyla ağırlıkça %1, 3, 5 ve 7 oranında TiC parçacıkları ( $D_{50} = 1 \mu\text{m}$ ) 60 dakika kadar mekanik alaşımlama ardından da karışımı 600 MPa'da soğuk preslemişlerdir. Daha sonra  $800^\circ\text{C}$ 'de fırında köpüklenmeye bırakmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre TiC parçacık takviyesinin köpük genişlemesi üzerinde bir etkisinin bulunmadığını gözlemlemişlerdir. Parçacıkların iyi ıslatabilirlik özelliğinin parçacıkların dağılmasını kolaylaştırdığını ve bu durumun sızma oranının da düşmesine sebebiyet vererek plato sınırları ve hücre duvarlarını dayanıklılaştırdığını ifade etmişlerdir.

Avalle vd. [17], kapalı gözenekli  $\text{AlSi7}$  alaşımı matris malzemesine sahip metal köpük üretmişler ve yarı-statik ve dinamik yük altında mekanik testler uygulamışlardır. ABAQUS “buruşabilir köpük” malzeme modeli ve Deshpande-Fleck için model parametrelerini  $0.3-0.9 \text{ g/cm}^3$ ’lük bir yoğunluğu kapsayacak şekilde belirlemişlerdir. Akma yüzeyinin belirlenmesi için tek eksenli hidrostatik basma testi sonuçları, çekme

test sonuçlarıyla ikinci bir model için genişletilmiştir. Gerinme sertleşmesi parametreleri yoğunluğun bir fonksiyonu olarak türetilen Rush modelinin deney verilerine uydurulması ile tek eksenli basma temelinde tanımlanmıştır. Analizleri deneysel ile simülasyon çalışmalar arasında iyi bir uyum olduğunu göstermiştir.

Zhao [18], sinterleme ve çözündürme işleminde NaCl parçacıkların uzaklaştırılmasının olasılıksal olarak modellenmesi üzerinde çalışmıştır. Geliştirilen model Al ve NaCl parçacıklarının köpük içerisinde sıkışan NaCl miktarını en aza indirecek biçimde seçilmesi temeline dayanır. Oluşturduğu modelin, yarı üründeki hacimce NaCl parçacık oranı ve parçacıkların boyutları arttıkça, köpük içerisinde sıkışan NaCl oranının azaldığını tahmin ettiğini belirtmiştir. Modelin tahminlerinin, on adet deneysel çalışma ile genel olarak uyum sağladığını bildirmiştir.

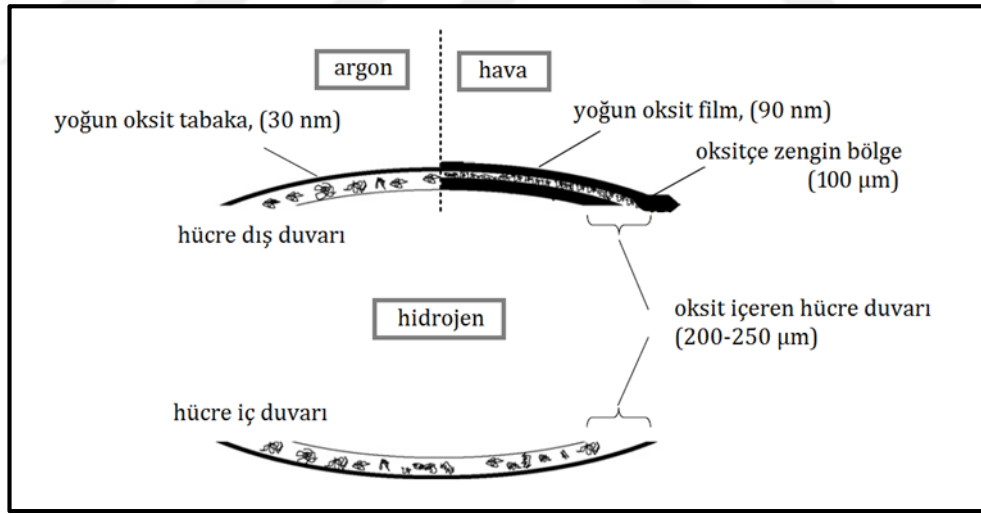
Kim vd. [19], Al-Si-Cu-Mg alaşımının köpükleşme davranışını incelemişlerdir. Toz metalurjisi yöntemini kullanarak 544 alaşımı (Al-5Si-4Cu-4Mg) ve 322 alaşımı (Al-3Si-2Cu-2Mg) metal köpükler elde etmişlerdir. Santrifüj atomizasyon, alaşım tozlarının karıştırılması ve köpükleştirici madde (ağırlıkça %1 TiH<sub>2</sub>), karışımın soğuk sıkıştırılması, sıcak ekstrüzyon ve ön ısıtılmış fırında köpükleşme gibi çeşitli adımlar hazırlanmıştır. Alaşımların köpükleşme hareketinin dijital mikroskop, görüntü analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile incelemişlerdir. 544 alaşımı daha fazla Cu ve Mg içerdiği için gözenek çekirdeklenmesinin daha düşük ötektik sıcaklığa sahip olması sebebiyle 322 alaşıma göre daha kısa sürede başladığını ve aynı şekilde 544 alaşımının daha fazla Si ihtiva etmesinden dolayı, gözeneklerinin ön ayarlanmış fırınlarda daha yüksek oranda geliştiğini gözlemlemişlerdir. İki alaşımda da alüminyum tozları arasında tozların yüzeylerindeki zayıf bağlama özelliğine sahip alüminyum oksit filmler sebebiyle ekstrüzyon yönüne paralel yönde uzamış ve çatlak şeklinde çekirdeklenme oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Her iki alaşımda da çatlak şeklinde çekirdeklenmeyle, küresel gözenek gelişimi, komşu gözeneklerin birleşmesi ve numune serbest yüzeylerine bitişik gözeneklerin yıkılması gibi aynı köpükleşme düzeninin görüldüğünü ifade etmişlerdir. Aynı zamanda gözenek çekirdeklenmesinin başlaması için gerekli zamanın, köpükleşme sıcaklığının artmasıyla düştüğünü bildirmişlerdir. İki alaşımda da hücre duvarlarının  $\alpha$ -Al ve ötektik faz barındırdığını belirtmişlerdir.

Matijasevic ve Banhart [20], alüminyum köpük teknolojisinin köpükleştirici maddeleri daha uyumlu hale getirerek geliştirilmesi başlıklı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarına sıkıştırılmış tozların ergitilmesiyle üretilen alüminyum köpüklerde köpükleştirici maddelerin düzgün dağılımda olmamalarının kötü mekanik özelliklere yol açtığı fikrini ortaya atarak başlamışlardır. Bunun sebebi olarak da köpükleşme sırasındaki termal değişimler ve köpükleştirici maddelerin köpükleşecek alaşımın ergime aşamasına uygun olmamaları olarak belirtmişlerdir.  $TiH_2$ 'nin seçilen oksidasyon yöntemleriyle uygun hale getirilerek köpüğü geliştirmek için çeşitli stratejiler üzerinde çalışmışlardır. Havada belirli sıcaklıkta ve belirli sıcaklıklarda işlem yapılmış  $TiH_2$  ile üretilen köpüklerde, köpüğün genişleme potansiyeli ve düzenli hücre boyutu dağılımının arttığını ve bağımsız hücre duvarlarının daha yumuşak geçişli ve az buruşmuş olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmalarından elde ettikleri sonuçlar olarak;  $TiH_2$ 'ün ön işlemiyle köpükleşme başlangıcının ertelendiği (45K'lık sıcaklık değişimiyle yaklaşık 45 saniye kadar), istenilen köpük hacmine ulaşmanın daha fazla zaman aldığı, (mevcut durumda 60 saniye kadar), köpüğün genişlemiş son halindeki kazancın %4,5-5.5 olduğu şeklinde maddeler bildirmişlerdir.

Dudka vd. [21], alüminyum köpüklerde oksitlerin dağılımı ve yapıları üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Alüminyumun oksitleyici ve oksitleyici olmayan gaz atmosferlerinde köpükleşmesini araştırmışlardır. Al ve  $TiH_2$  tozlarının karıştırılması ve preslenmesi yöntemleriyle elde edilen yarı ürünün şeffaf ve gaz geçirmez fırında köpükleşmesinin X-Ray radyografi incelemesi ile takip etmişlerdir. Ayrıca tozlarda, yarı ürünlerde ve köpüklerde, oksitlerin yapısı ve dağılımı mikroskopla, taramalı ve iletimli elektron mikroskoplarıyla incelemişlerdir. Daha sonra hücre duvarlarındaki oksit ve mikro gözenek dağılımlarının görüntülerini elde etmek için odaklanmış iyon ışınıyla dilimleme kullanmışlardır. Oksitlerin karmaşık hiyerarşik yapıda olduklarını gözlemlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları ise aşağıdaki gibi maddelemişlerdir.

1. %99,95 Alüminyum köpük, atomize edilmiş başlangıç tozlarında hali hazırda bulunan oksitlerden dolayı oksit içeren  $TiH_2$  ile şişmiş ve köpük oluşmuştur. Bu oksitlerin hücreli yapıyı dengede tutmuşlardır. Elektron kırınımı (SAED) ile alüminyum oksit fazı tespit edilmiştir.

2. Oksitlerin karmaşık hiyerarşik yapıda şekillenmişlerdir. Temel yapılar 10 nm genişlikte kristalciklerin birkaç yüz nanometre boyutlarında ve mikrometre boyutlarındaki alt gözenekler etrafında merkezlenen daha geniş topluluklar ile kümelenmeleri şeklindedir. Böyle kümeler (yarı-parçacık), Körner vd. [22] tarafından yapılan çalışmada kabul ettikleri ağ parçacıklarının elemanları olarak gözükmektedir.
3. İki çeşit oksit olduğu kabul edilebilir; ergiyikte serbestçe yüzen oksitler ve önceki toz sınırları boyunca düz hatlarda birlikte kümelenmiş oksitler.
4. Bir diğer oksit ise köpükleşmenin hava ortamında yürütülmesiyle oluşan 100µm kalınlığında bölgedir. Bu ek oksitler köpükleşmeyi geciktirirler. Bu durum da oksijenin mevcudiyetiyle gelişen dış oksit tabakasının oluşturduğu mekanik kuvvetler tarafından açıklanabilir.
5. Yüzey segregasyonu ile diğer tiplerdeki alüminyum köpükleri dengeleyen serbestçe yüzen oksitlerin aksine, çalışılan köpüklerde oksitler sıvı metal tabakalarının yığınlarında hareket ederler.



Şekil 2.1. Alüminyum köpüğün kalın hücre duvarı yapısının şematik görünümü [21].

Yukarıdaki şekil ile bu çalışmada elde edilen bazı bulguları özetleyerek ve literatürden bilgilerle birleştirerek; havadaki köpükleşme sırasında ince, yoğun oksit tabakası tarafından kaplanan ekstra oksitçe zengin bir bölgenin oluştuğunu ifade etmişlerdir. Oksitleyici olmayan atmosferde elde edilen metalik tabakaların daha ince oksit içerdikleri ve hatta daha ince oksit tabakası ile kaplandıklarını fakat geniş ölçekteki

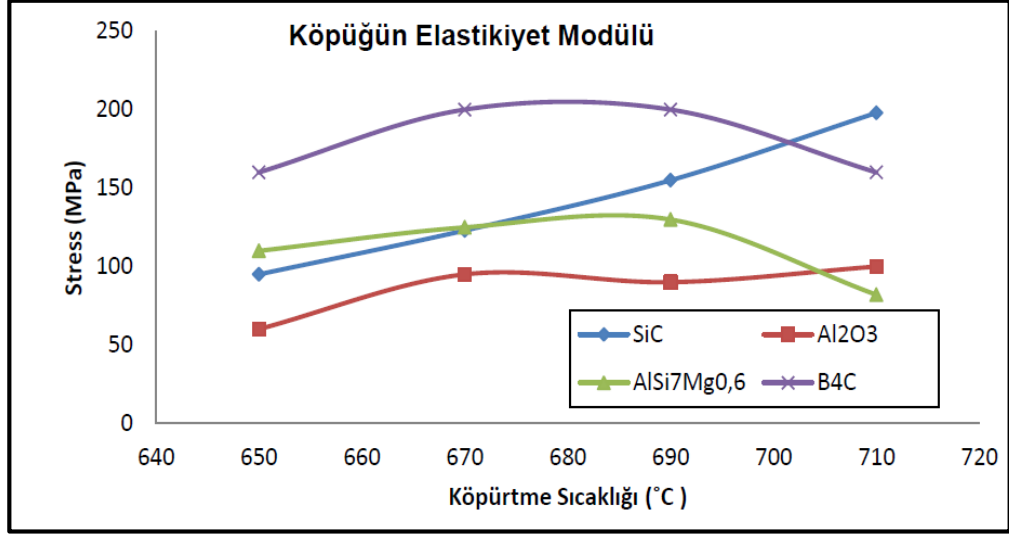
yapılarda ve görüntülerdeki oksit parçacıklar ve tabakaların çok fazla kalın olması nedeniyle analiz edilemediğini bildirmişlerdir.

Mukherjee vd. [23], sıvı metal köpüklerin katılaşması sırasında büzülme ve genişleme olayları üzerinde çalışmışlardır. Köpükleri metal tozlarını  $TiH_2$  tozları ile karıştırmışlar ve ortaya çıkan harmanlanmış karışımı sıkıştırdıktan sonra bu yarı ürünü ergiterek üretmişlerdir. Sırasıyla köpükleşme işlemini yerinde X-ray radyografi ile incelemişlerdir. Katılaşma sırasında orta seviye genişleme aşaması gözlemlemişlerdir. Bu katılaşma genişlemesinin alaşımdaki faz dönüşümlerine bağlı olabileceğini belirtmişlerdir. Katılaşma genişlemesinin genel olarak soğutma (bekletme) öncesi köpükleşme sıcaklığında harcanan zamana, soğuma oranına ve alaşım bileşimine bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Gaz büzüşmesi, katılaşma büzüşmesi, köpükleştirici madde tarafından gaz üretimi ve dış difüzyon sebebiyle gaz kaybı arasındaki etkileşimin katılaşma genişlemesi için ana sebep olduğunu belirlemişlerdir. Köpükleştirici maddenin katılaşma genişlemesine büyük oranda etkisi varken, metalde çözülmüş gazın da bunda önemli rol oynadığını gözlemlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları maddeler halinde şöyle değerlendirmişlerdir;

1. Farklı tür metal köpüklerin katılaşmaları sırasında bir genişleme aşaması (Katılaşma genişlemesi veya KG) gözlemlenmiştir. Buna da çoğu durumda iki kısımda katkı sağlandığı düşünülebilir, KG1 ve KG2.
2. KG1 temelde bir taraftan gaz büzüşmesi ve dış difüzyon nedeniyle meydana gelen gaz kaybı, diğer taraftan ise süregelen  $TiH_2$ 'den  $H_2$  üretimi ve katılaşma sırasında  $H_2$  çökmesinin aralarındaki etkileşiminin bir sonucudur. (KG2)
3. KG1 ve KG2 katılaşma sırasındaki faz dönüşümleriyle bağlantılıdır.
4. KG soğuma öncesinde bekleme süresine bağlıdır ve 200-400 saniye bekleme süresi için maksimum değer gösterir.
5. KG1 500 saniyeden büyük bekleme sürelerinde kaybolur. Bu durumda köpükleştirici maddede azalan gaz miktarı artık gaz kayıplarını telafi edemez.
6. KG2 tüm bekleme sürelerinde mevcuttur ve 500 saniyeden büyük süreler için neredeyse sabittir ve bu da katılaşma sırasındaki  $H_2$  çökmesinin KG2 için bir sebep olduğunu gösterir.

7. KG<sub>2</sub>'nin miktarı alaşımın bileşimi ile belirlenir ve TiH<sub>2</sub>'nin varlığına bağımlı değildir. Bu da neden köpükleştirici maddenin kullanılmadığı numunelerde de KG gzlemediğimizi açıklar.
8. Alaşımın bileşimi TiH<sub>2</sub>'den gaz oluşum kinetiğinin KG'nin farklı sıcaklıklara kaymasıyla etkilenmesi KG'yi de etkile

Çinici [24], toz metalurjisi yöntemiyle alüminyum esaslı seramik parçacık takviyeli kapalı gözenekli metal köpük üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması üzerine çalışma yürütmüştür. Üretim için Al (160 m), Si (10 m), Mg, TiH<sub>2</sub> (45 m) tozları ve SiC (<8 m), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(<12 m), B<sub>4</sub>C(<10m) seramik parçacıklarını kullanmıştır. Bu tozları kalıp içerisinde (Al, %7 Si, %0,6 Mg, %0,8 TiH<sub>2</sub> tozları ve %5 oranlarında da Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>C ve SiC) sabit basınçta sıkıştırılarak ve 500°C'de ekstrüze edilmiş ve aynı sıcaklıklarda Al levhalar arasında haddelenerek n şekilli yarı ürün haline getirmiştir. 650, 670, 690 ve 700°C olarak belirlediği sıcaklıklarda 6-16 dakika arasında değişen (14, 12, 10 ve 8 dakika) farklı köpürtme sürelerinde köpükleşme gerçekleştirmiş ve atmosferik ortamda soğumaya bırakmıştır. Köpükleşme süresi ve sıcaklığının artması ile gözenek boyutunun, gözenekliliğin ve lineer uzamanın arttığını ve böylece köpüğün yoğunluğunun düşük olduğunu tespit etmiştir. Aynı zamanda %5 SiC ve %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesi AlSi7Mg0.6 esaslı alüminyum sandviç kompozitlerin basma mukavemetini arttırdığını belirtmiştir. Köpükleşme sıcaklığının artmasıyla eğme ve basma mukavemetlerinin azaldığını bildirmiştir. 650°C'de üretilen alüminyum sandviç köpüklerin basma dayanımları 20 MPa civarındayken 710°C köpürtme sıcaklıklarında 12 MPa civarında olduğu ve aynı şekilde 650°C'de üretilen alüminyum sandviç kompozitlerin üç nokta eğme dayanımları 5,5 MPa civarındayken, 710°C köpürtme sıcaklıklarında 3,5 MPa civarında olduğunu gözlemiştir.



Şekil 2.2. Partikül ilaveli alüminyum sandviç kompozitlerin elastikiyet grafiği [24].

## 2.2. SIVI METAL İLE METAL KÖPÜK ÜRETİM ÇALIŞMALARI

Aida vd. [25], A356 Alüminyum alaşımını ve çeşitli miktarlardaki NaCl parçacıkları yer tutucu malzeme olarak kullanarak, kokil kalıba döküm işlemi gerçekleştirmişlerdir ve bu işlem sonucunda açık gözenekli alüminyum köpük elde etmişlerdir. Elde ettikleri numuneler üzerinde mikroyapı analizinin yanısıra, gözeneklilik ve yoğunluk incelemelerinde bulunmuşlardır. Köpüklenme işlemini alaşımın ergitilerek 680°C'de NaCl parçacıklarının eklenmesi potada 1 dakika boyunca elle karıştırılmasıyla dışarda gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda ergiyiğe NaCl'nin düzgün dağılımı için Argon gazı püskürtmüşlerdir. Daha sonra elde ettikleri numuneyi oda sıcaklığında yaklaşık 30 dakika soğutarak ardından tuzları 90°C'de çözüdürmüşler ve açık gözenekli köpük malzeme elde etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda eklenen NaCl yer tutucu parçacıkları arttıkça, gözenekliliğin arttığı ve bunun da köpük malzemenin yoğunluğunun düşmesine sebep olduğunu belirtmişlerdir. A356 alüminyum köpük malzemenin gözenek dağılımının NaCl yer tutucu miktarı ile kontrol edildiğini ve yüksek miktardaki parçacık miktarının gözenekler arasında bağlantılar meydana getirdiğini ifade etmişlerdir.

Cao vd. [26], düşürülmüş basınç altında üretim sırasında alüminyum köpüklerde hücre gelişimini incelemiştir. Çalışmalarında AlCa alaşımına küçük miktarlarda TiH<sub>2</sub>

ekleyerek geleneksel işleme kıyaslamışlardır. Basıncın düşürülmesini takiben ergiyiğin karıştırılması ile  $TiH_2$ 'ün tümüyle ayrıştığını belirtmişlerdir.  $TiH_2$  köpürtücü eleman olarak değil, AlCa ergiyikteki  $H_2$  konsantrasyonunu arttırmak için kullanmışlardır. Basınç değişiminin Ti fazından Hidrojen'in daha fazla salınmasını teşvik ettiğini görmüşlerdir. Sonuçları özetle basınç düşürme operasyonu oluşan zar tabakanın dengesi ve hücre yapısının gelişmesine önemli etki göstermiştir. Ti-H içeriği ağırlıkça %0,1'den 0.4'e yükseltirken, Al ergiyiğin maksimum genişleme(şişme) oranı %226'dan %321'e artmıştır. Ortam basıncı düşen basınçla birlikte baloncukların hızlıca birleşmesiyle 10kPa değerine düşürüldüğünde alüminyum köpüğün ortalama hücre boyutu 10 mm'ye ulaşmıştır. Basınç hücre duvarı kalınlığı ve boyutu üzerinde kayda değer bir etki göstermiştir. Sıvı-gaz ara yüzündeki negatif basınç değişiminin zar tabakanın dengesi üzerine negatif etki gösterdiğini bildirmişlerdir.

Shorowordi vd. [27], çeşitli seramiklerle takviye ettikleri Al matrisli kompozitleri mikroyapı ve ara yüzey karakteristikleri bakımından karşılaştırmak üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında seramik takviyeler olarak  $B_4C$ , SiC ve  $Al_2O_3$  parçacıkları ağırlıkça %0 – 20 aralığında çeşitli oranlarda kullanmışlardır. Üretimlerini karıştırmalı döküm yöntemiyle gerçekleştirmişler ve ardından sıcak presleme yöntemlerini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Al- $B_4C$  ve Al- $Al_2O_3$  ara yüzeylerinde hiçbir reaksiyonla karşılaşmamışlar, fakat Al-SiC arayüzeyinde uzun süreli işlemlerde (<30 dakika) açık bir şekilde yüzeyler arası reaksiyon tabakasıyla karşılaşmışlardır. Bunun yanında Al- $B_4C$  kompozit arayüzeyden uzakta  $Al_2O_3$  ve  $Al_3BC$  olduğunu düşündükleri iki ikincil faz bulmuşlardır. Kırılma yüzeyi analizlerinden,  $B_4C$  takviyeli Al kompozitin diğer iki kompozit ile karşılaştırıldıklarında daha iyi yüzeyler arası bağlanma ortaya koyduğunu gözlemlemişlerdir.

Gaillard vd. [28], NaCl tozların Al köpüklere mikroyapısal olarak uyumu için kontrollü şekillerde ve boyutlarda işlenmesi konusunda çalışmalarda bulunmuşlardır. NaCl tozları çözücü olmayan kristalizasyon yoluyla çeşitli morfolojik biçimlerde ve boyutlarda hazırlanmışlardır. Daha sonra bu tozlar infiltrasyon ile açık gözenekli saf alüminim köpükleri üretmek için kullanılmışlardır. Bu köpüklerin basma mekanik özellikleri ve mikroyapıları, daha az düzenli şekilli ve boyuttaki diğer ticari NaCl tozlarından üretilen benzer köpüklerle karşılaştırılmıştır. Köpük gözenek şeklinin



köpüğün başlangıç güç yasası (Power Law) hareketine etkisinin görülmediğini fakat gerinmedeki değişimlerle köpüğün güç yasası hareketinden saptığını gözlemlemişlerdir.

Goodall vd. [29], replikasyon yöntemi ile elde edilmiş alüminyum köpüklerde yer tutucu malzemelerin köpüğün yapısı ve mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Bağlı yoğunluğun infiltrasyon öncesinde ön şekillendirilmiş NaCl yapıların yoğunlaştırılmasına göre farklılık gösterdiğini ve bunun da soğuk presleme veya sinterleme ile mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Bu yöntemleri karşılaştırarak bu yöntemlerde neden daha üstün köpük modülü ve akma gerilmesi sonuçları alındığını ifade etmişlerdir. Soğuk izostatik presleme ve yüksek sıcaklıklarda sinterleme (>750°C, 0.95 Tm) yöntemlerinin her biri replikasyon işleminde kullanılan NaCl yoğunluğunu değiştirebilir. Sinterlenmiş olan yer tutucuların soğuk preslenmişlere göre daha yuvarlaklaşmış ve düzenli yapılara sahip olduklarını gözlemlemişlerdir.

Despois vd. [30], replikasyonla üretilmiş alüminyum köpüklerde infiltrasyon basıncının yapı ve özelliklere etkilerini incelemişlerdir. Bağlı yoğunlukları %15 ile 25 arasında değişen saf alüminyum köpükleri, 400µm boyutundaki NaCl parçacıkları kullanarak, replikasyon yöntemiyle çeşitli infiltrasyon basınçları uygulayarak üretmişlerdir. İnfiltrasyon basıncının artmasıyla köpük direklerinde akışkan akışı için köpük geçirgenliğini azaltan parmak şeklinde küçük çıkıntıların ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir. Köpüğün basma mekanik özellikleri şöyle ki elastikiyet modülü ve akma gerilmesinin bağlı yoğunluğun artmasıyla düzenli bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Tüm bunlar birlikte ele alındığında artan infiltrasyon basıncıyla köpük özelliklerinin gelişiminin metalin komşu parçacıklar arasındaki dar boşluklara kademeli olarak girişi ile kontrol edilebildiğini bildirmişlerdir.

Mukherjee vd. [31], diğer bir çalışmada da alüminyum köpüklerin katılaşması sırasındaki hataların oluşumu üzerinde çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Hücre duvarlarında sıklıkla oluşan hataların sebeplerini araştırmışlardır. Katılaşma sırasındaki genişlemenin (KG) alüminyum köpüklerin yapısına etkilerini X-Ray radyografi ve X-Ray tomografi yöntemleriyle incelemişlerdir. Köpüklerdeki hata ve

bozulmalarının bir mekanizma ile oluştuğu ve bu mekanizmanın da katılaşma sırasındaki genişlemeye (KG) bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Soğuma oranının düşmesi ile KG miktarının arttığını, böylece KG ile ilişkilendirilen bozulmaların da arttığını ifade etmişlerdir. Hücre duvarının katılaşma sırasında bozulmasının, yarı-katı ergiyiğin yüksek viskozitesi nedeniyle yavaşladığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak yavaş katılaşan köpüklerin yüksek değerdeki katılaşma genişlemesinden dolayı (KG), hızlı katılaşan köpüklere göre daha fazla hata içerdiğini bildirmişlerdir.

Malachevsky vd. [32],  $AlSi6Cu4$  köpüklere mikrometre-altı boyuttaki seramik parçacıkları takviye etmişler ve bunun endirekt köpükleşme sırasındaki etkilerini incelemişlerdir. Parçacık boyutlarını metalik olmayan takviyelerin düşük miktarlarda köpük dengelenmesini sağlayabileceğini çözümlmek için 0.4-0.7 mm aralığında seçmişlerdir. Seçilen alüminyum kimyasal bileşimi ile uyumlu olan iki farklı parçacık tipi ile; alümina ( $Al_2O_3$ ) ve mullit  $Al_6Si_2O_{13}$  ile çalışmışlardır. Alümina eklenmesinin verimli bir şekilde homojen hücre boyutu dağılımlarına sahip ve daha uzun köpükleşme zamanlarında kararlı bir malzeme elde edilmesini desteklediğini ifade etmişlerdir. Mullit eklenmesinin ise  $SiO_2$  indirgenmesiyle köpükleşme sıcaklığını düşürdüğü tespit edilmiştir. Ergimiş alaşımın köpükleşme aşamasında süzülme için tercih edilen düşük viskozitesi homojen olmayan hücre ölçüleri ve buruşuk hücre duvarları oluşturmuştur. Düşük köpükleşme sıcaklıklarının ise homojen bölgesel yapıların oluşmasına ve buruşuk hücre duvarlarından kaçınılmasına yol açar.

Fischer vd. [33], döküm ve kalıp sıcaklıklarının, açık gözenekli hassas döküm alüminyum köpüklerin mikroyapıları ve basma hareketleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Değişik döküm ve kalıp sıcaklıklarında A356 alüminyum malzemeyle hassas döküm yöntemi ile üretimler gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, düşük kalıp sıcaklığının ve yüksek döküm sıcaklığının 10 ve 15 ppi (ppi: inç başına düşen gözenek miktarı) A356 köpüklerin statik basma testleri sırasında daha yüksek mekanik özellikler doğurduğunu belirtmişlerdir. Bu artışın da ötektik silisyum parçacıklarının azalan sayısı ve artan kırıç çapı ile ergiyiğin daha iyi kalıp doldurma yeteneğine sahip olması ile gerçekleştiğini bildirmişlerdir. İşlem parametrelerinin etkisinin 15 ppi köpüklerin mekanik özellikleri için istatistiksel olarak kayda değer olduğunu ifade etmişlerdir. Bunun da muhtemelen 10 ppi köpüklerin kırıç ölçülerine

göre bu tip köpüklerin kırıç çaplarının daha küçük olmasından kaynaklandığını ve daha ince kırıçlerin daha yüksek miktarda silisyum fazı açısından hassas olması ve azalan kırıç çapıyla da kalıp doldurma yeteneğinin düşmesiyle gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Hernández vd. [34], silisyum karbür (SiC) ilave edilmiş Al<sub>6</sub>Si<sub>3</sub>Mg ergiyik alaşıma N<sub>2</sub> enjeksiyonunun köpük şekillenmesine katkıda bulunması amacıyla işlem parametreleri üzerinde çalışma gerçekleştirmişlerdir. SiC parçacıklarının ağırlıkça %0, 10, 30 ve 50 olacak şekilde, aşırı ısıtmanın  $\Delta T = T_F - T_L$  ( $T_L$  soğuma eğrisinden elde edilen likidüs sıcaklığı) bağıntısını sağlayacak şekilde ve  $T_F$  köpükleşme sıcaklıklarının 630, 610, 580 ve 570°C olarak seçildiği bir deney tasarlamışlardır. Havanın debisi ve basıncı sabit ve sırasıyla 2,0 lt/min ve 4,0 atm seçmişlerdir. Köpük şekillenmesi sadece belirtilen iki deneysel koşulda (%10 SiC –  $\Delta T > 12^\circ\text{C}$  ve %30 SiC  $\Delta T > 10^\circ\text{C}$ ) gerçekleştirebilmişlerdir. Diğer deney koşullarında ise gaz balonlarında birleşme gözlemlenmiştir. Sonuç olarak köpük şekillenmesi SiC içeriğinin %30'dan düşük ve sıcaklığın ise nispeten likidüs sıcaklığının üzerinde olduğu koşullarda gerçekleştiğini bildirmişlerdir.

Hernández ve arkadaşları [25], replikasyon döküm işlemiyle açık gözenekli Mg köpük üretilmesi üzerinde çalışmışlardır. Ön şekil olarak (A) 1 mm ve (B) 2 mm aralığındaki boyutlarda küresel NaCl parçacıkları üretmişlerdir. Gözenek boyutunun artmasıyla bağıl yoğunluğun azaldığı ve (D) 2 mm ön şekil kullanılan numune için minimum bağıl yoğunluk olan 0,22 ve maksimum gözeneklilik olan %78 değerlerini kaydetmişlerdir. Ayrıca basma testi vasıtasıyla mekanik özellikleri ve enerji emme karakteristikleri araştırmışlardır. Aynı test koşulları altında daha küçük gözenek boyutuna ve gözeneklilik yüzdesine sahip olan A (1mm) numunesinin en yüksek mekanik özellikleri (Elastikiyet modülü 0.72 GPa, akma gerilmesi 2.5 MPa ve enerji emme kapasitesi 5.5 MJ/m<sup>3</sup>) gösterdiğini ifade etmişlerdir. Pratik bakış açısından baktıklarında, çalışmalarından elde ettikleri mekanik özelliklerin yapı iskelesi malzemeleri, enerji emiciler ve diğer fonksiyonel filtreler, katalizör destekler gibi bazı malzemelerin mekanik taleplerini karşılamak için yeterli olduğunu ifade etmişlerdir.

Suarez vd. [35], Al<sub>68</sub>Cu<sub>20</sub>Fe<sub>12</sub> alaşım köpüklerin kendiliğinden şekillenmesi üzerine çalışmışlardır. Kendiliğinden kelimesinden kasıtlarının ise köpürtücü veya yer tutucu

malzemeye ihtiyaç duymadan köpükleşme olduğunu ifade etmişlerdir. Alaşım fırında yavaşça soğumaya bırakarak temelde  $k\text{-Al}_{13}\text{Fe}_4$ , I-icosahedral (20 eşkenar üçgen yüzlü),  $h\text{-Al}_2\text{Cu}$  ve  $x\text{-Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  fazlarını içeren çokfazlı bir mikroyapı elde etmişlerdir. Dökülen numunelere ısı işlemler uygulamışlardır. %60'ın üzerinde gözeneklilik elde etmek amacı ile dökülen numuneler üzerinde ısı işlem gerçekleştirmişlerdir. Mikroyapı, termal özellikler, gözenek morfolojisi ve gözeneklilik SEM, DTA, görüntü analiz ve Arşimet prensibine göre karakterize etmişlerdir. 900°C'de 360 dakika ısı işlem uygulanan numune için en yüksek %65 makro-gözeneklilik (yaklaşık  $1.3\text{mm}^2$ ) ve  $1,5\text{ g/cm}^3$  yoğunluk elde etmişlerdir. Bu sıcaklıkta, aşırı gözenekli yapı temelde  $k\text{-Al}_{13}\text{Fe}_4$ , I-icosahedral (20 eşkenar üçgen yüzlü) ve  $x\text{-Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  fazlarının şekillendiğini belirtmişlerdir. Kendiliğinden gözenek şekillenmesinin Cu-zengin fazların ergimesiyle oluşan yüksek miktardaki sıvı faz ve peritektik reaksiyonla meydana gelen genişçe bir büzülme şeklinde bir mekanizmayla gerçekleştiğini bildirmişlerdir ( $k\text{-Al}_{13}\text{Fe}_4$  ve sıvı fazda şekillenen aşırı yoğun  $x\text{-Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  ve I-icosahedral fazları arasındaki reaksiyon). Böylece malzemede gözenekli yapının kalmasına sebebiyet verir.

Aly vd. [36], farklı metal köpük soğutucu plakaların termal performanslarını üzerine deneysel bir çalışmanın sonuçlarını ve bu sonuçların geleneksel katı soğutucu plakalar ile karşılaştırılmasını paylaşmışlardır. Deneysel çalışmalarda gözenek yoğunlukları 4 ve 8 ppi ve %93 gözenek oranına sahip 6101 alüminyum metal köpük kullanılmıştır. Çalışma sonucunda tek soğutucu plaka örnekleri için, termal püskürtmeli kaplanmış metal köpük aynı test koşullarında yapıştırılmış ve işlenmiş katı plakalara göre daha üstün performans göstermiştir. Deneysel sonuçlara göre metal köpük plaka, termal olarak yapıştırılmış plakayla karşılaştırıldığında ısı yayılımında %10 daha verimlidir. Ayrıca hava akış hızının etkisi incelenmiş ve ısı transferinin havanın hızı ile doğru orantılı olduğu fakat daha fazla güç tüketimi gerçekleştiği belirtilmiştir.

Campana ve Pilone [37], alüminyum alaşım köpüklerin duvar mikroyapılarının ve morfolojik parametrelerinin çarpma davranışına etkisini incelemişlerdir. 7075, 6061 ve AlSi7 alaşımları olmak üzere üç farklı sıkıştırılmış toz teknolojisi ile üretilmiş köpük malzeme kullanmışlardır. Eksenel çarpma testlerinden elde edilen yük-gerinme eğrisinin malzemenin mikroyapısı ve boşluk dağılımı ile doğrudan bağıntılı olduğunu

belirtmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre köpüğün dış kısımlarındaki duvarlar uzaklaştırıldığında 7075 alaşım serisine sahip köpük çarpma sırasında en iyi davranışı göstermiştir. Mikroyapısal incelemeler neticesinde 6061 ve 7075 alaşım köpüklerin dış kabuklarının, hücre duvarlarına kıyasla daha yüksek bir hacim oranına sahip ikincil fazlar içerdiği gözlemlenmiştir. Bu karakteristiğin özellikle 7075 alaşım köpüklerde dış kabuğun kırılabilirliğine neden olduğu belirtilmiştir. AlSi7 numunelerde boşlukların genel olarak numune merkezinde yerleşmiş olmasından ve 5mm'den daha kalın alaşım tabakası tarafından çevrelendiklerinden dolayı bu davranışın görülmediğini savunmuşlardır. Bu morfolojik dağılım ve malzemenin mikroyapısı bir arada değerlendirildiğinde AlSi7 alaşım köpüğün yük-gerinme eğrilerinde yumuşaklık ve gerinme-sertleşmesi etkisinin meydana geldiğini belirtmişlerdir. Mikroyapı ve boşluk heterojenliğinin düşürülmesinin çarpma sırasında köpük kararlılığını iyileştireceğini ve bunun da ancak üretim parametrelerinin optimize edilmesi ile sağlanabileceğini bildirmişlerdir.

Campana ve Pilone [38], alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemin mekanik davranış üzerindeki etkilerini incelemiştir. 7075 ve 6061 alaşımlarından sıkıştırılmış toz teknolojisi ile iki farklı kapalı gözenekli alüminyum köpük elde etmişlerdir. Bu malzemeler ısıl işlemin eksenel çarpma hareketine etkisini incelemek amacıyla kullanılmışlardır.

### **2.3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ ÇALIŞMALARI**

Parçacık takviyeli alüminyum kompozit malzemelerin üretiminde takviye parçacıkları olarak genellikle  $Al_2O_3$ , SiC,  $SiO_2$ ,  $B_4C$ , Al-N gibi sert seramik parçacıklar seçilmektedir [39]. Döküm yöntemiyle üretilen seramik parçacık takviyeli Al-matrisli kompozit malzemelerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri arasındaki ilişki, literatürdeki güncel makaleler incelenerek toparlanmıştır.

Viala vd. [40], Alüminyum'un bor karbür ile kimyasal reaktivitesi üzerinde çalışmışlardır. Metalik alüminyum (Al) ve bor karbür ( $B_4C$ ) arasındaki reaktivite çalışmalarını 627-1000°C sıcaklık aralığında gerçekleştirmişlerdir. Al- $B_4C$  toz karışımını soğuk presleyip ardından 1-450 saat, 105 Pa argon ortamında ısıtmışlar ve

X-ışını kırılım analizi (XRD), optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskop (SEM) ve elektron sondalı hassas çözümüleme (EPMA) yöntemleri ile karakterize edilmiştir. İnceledikleri tüm sıcaklık aralığında, bor karbürün sıvı veya katı alüminyum ile tepkimeye girdiği gözlemlenmiştir. Sıcaklığın 660°C'den düşük olduğu sürece (Al katı durumda olduğunda), etkileşimin oldukça yavaş ilerlediği, üçlü karbür ( $Al_4BC$ ) ve diborür ( $AlB_2$ ) oluşmasına sebebiyet verdiğini belirtmişlerdir. 660°C veya daha yüksek sıcaklıklarda ise (Al sıvı durumda olduğunda) tepkime oranının keskince arttığını ve 868 ±4°C'ye kadar tepkime ürünlerinin  $Al_3BC$  ve  $AlB_2$  olduğunu ve bu sıcaklığın üzerinde  $AlB_2$  yerini  $Al_3B_{48}C_2$  ( $\beta$ - $AlB_{12}$ )'ye bırakırken  $Al_3BC$ 'nin ise oluşumunu hala koruduğunu gözlemlenmiştir. Üç durumda da etkileşimin başarılı bir şekilde, bir kuluçka dönemi, alüminyumun B ve C açısından doyması,  $Al_3BC$  ve zayıf borürün çözünmesi-çökmesi ile çekirdeklenme ve büyüme ve son olarak  $B_4C$ 'ün  $Al_3BC$  tarafından dinginliğe erişmesi dahilinde aynı mekanizmayla ilerlediğini bildirmişlerdir.

Toptan [41], Al- $B_4C$  kompozitlerin sıvı faz üretim yöntemleri ile üretimi ve korozyon ve aşınma özellikleri üzerinde çalışmıştır. Üretim öncesinde parçacık ve yüzey değişikliklerinin matris-takviye arayüzeyine etkilerini gözlemek için takviye partiküllerine kontrollü oksidasyon, akımsız nikel kaplama ve  $K_2TiF_6$  ile karıştırma gibi işlemler uygulamıştır. Üretimden sonra yaptığı incelemede  $K_2TiF_6$  ilavesi ile üretilen kompozitlerde en iyi arayüzey özelliklerinin elde edildiğini belirtmiştir. Bu şekilde üretilen kompozitlerde arayüzeylerde titanyumca zengin (80-180 nm) ve sürekli bir reaksiyon tabakası oluştuğu ve bu sayede ıslatılabilirliğin arttırıldığını belirtmiştir. İkinci aşamada ise  $AlSi_9Cu_3Mg$  döküm alaşımı, matris malzeme olarak kullanılmıştır. Arttırılan ıslatılabilirliğe bağlı olarak %15 ve 19 hacim oranında ve %91,54 ve 87,02 parçacık ilave verimine sahip kompozitler üretilmiştir. Basınç altında sıkıştırma döküm yöntemi ile ve ergitme ve parçacık ilavesinin vakum altında uygulanması ile %0,33 ve 1,22 gibi düşük porozite oranına sahip kompozitler üretilmiştir.

Kennedy [42], Al-Si- $B_4C$  metal matris kompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ergiyik Al- 7 ağı. % Si- 0.3 ağı. % Mg alaşımına K-Al-Ti-F flaks kullanarak ağırlıkça %5 ve %10 seviyelerinde  $B_4C$

parçacıkları eklemiştir. Ürettiği kompozitleri metalografik incelemelere tabi tutmuş ve ilk üretilmiş şekliyle ve 500 ve 700°C’lerde 48 saat ısıtma işlemi görmüş şekliyle mekanik testler gerçekleştirmiştir. Toklukta gözlemlenen artış, modülün eklenen parçacıkların hacim yüzdesi kadar arttığı şeklinde ifade edilmiştir. Ti içeren flaks kullanılarak Al ergisiye B<sub>4</sub>C birleştirildiğinde, parçacık yüzeylerinde karmaşık bir Ti-B-C tepkime tabakasının oluştuğunu, bu tabakanın ısıtma sırasında sağlam ve kararlı kaldığını ve tabakanın koruyucu doğası gereği diğer Al-B<sub>4</sub>C kompozitlerle kıyaslandığında tepkime oranının düşmesine sebebiyet verdiğini gözlemlemişlerdir. Katılaşmış matris ve B<sub>4</sub>C takviye arasındaki yapışmanın (tutma) reaksiyon tabakasının gelişen metalik karakteriyle birlikte arttığını belirtmiştir.

Cambroner vd. [43], toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş ve seramiklerle takviye edilmiş AA7015 alüminyum alaşımının mekanik karakterizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Seramiklerce %5 desteklenmiş hafif alaşım elde etmişlerdir. Takviye için ise B<sub>4</sub>C, TiB<sub>2</sub> ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> eklenmiştir. Bu malzemelerin mikroyapıları incelendiğinde seramiklerin alüminyum matris içerisinde düzenli dağıldıklarını gözlemlemişlerdir. Üretilen MMC numuneler üzerinde yoğunluk, iletkenlik ve genleşme katsayısı gibi fiziksel özellikler belirlemişlerdir. Bunların yanında sertlik ve çekme dayanımı tayin edilmiş ve aşınma davranışı da test edilmiştir. Alınan sonuçlara göre sertlikte ve aşınma dayanımında alaşıma göre MMC numunelerde iyileşme gözlemlenirken, seramik takviyesinin mekanik özellikler üzerine olumlu etki yapmadığını ve bu kötü mekanik özellikleri değerlendirmek için başka araştırmalar yapılması gerektiğini bildirmişlerdir. T6 ısıtma işlemi uygulanmış AA7015 alaşımının en iyi çekme dayanımı ve sertlik özelliğine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Mazahery vd. [44], karıştırma döküm yöntemiyle A356 alaşımına nano-boyutta Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıkları takviye etmişlerdir. A356 alaşıma kıyasla sertlikte artış meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca akma dayanımı, maksimum çekme dayanımı ve süneklikte takviye oranının artmasına bağlı bir artış olduğunu bildirmişlerdir. Bunun sebepleri olarak ise aşağıdaki maddeleri bildirmişlerdir;

1. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıklar ilave edilmesi alüminyum matrisin tane boyutunu inceltmiştir.

2. Takviye elemanı boyutunun 1  $\mu\text{m}$ 'nin altında olduğu bölgelerde topaklaşmalar meydana gelmiştir.
3. Bunların sonucuna katılma sırasındaki termal gerilmelerin de eklenmesiyle dislokasyon yoğunluğunun artmasının plastik zorlamaya neden olmaktadır.
4. En iyi sertlik sonucunu hacimce %2,5 parçacık oranında seramik ilave edildiğinde elde etmişlerdir. Akma ve maksimum çekme dayanımı seramik takviyesiyle kayda değer oranda artış gösterirken, belirli bir takviye oranından sonra (%1,5) düşüş göstermiştir. Bunun sebepleri olarak seramik ilavesinin artmasıyla parçacıkların topaklaşması ve porozite gibi kusurların daha fazla meydana gelmesinden kaynaklandığını düşünmektedir.

Baradeswarn vd. [45], B<sub>4</sub>C takviyeli 7075 alüminyum kompozit malzemelerin mekanik davranışını incelemişlerdir. Yayınlarında maksimum çekme dayanımı, basma dayanımı ve sertlik değerlerinin B<sub>4</sub>C hacim oranına bağlı olarak doğrusal arttığını bildirmişlerdir. Mekanik özelliklerdeki bu artışı şöyle yorumlamışlardır;

1. Matris içerisinde dağılmış olan seramik parçacıkların çevresinde gerinme enerjisinin artmasından dolayı sertlikte bir artma olduğunu bildirmişlerdir.
2. B<sub>4</sub>C partiküllerinin ilavesiyle mukavemetteki artış, çekme gerilmelerine karşı daha fazla direnç sağlanarak matris alaşımına daha fazla dayanım iletilmesiyle gerçekleşmiş olabilir. Bunun nedeni yükün matristen takviyeye transfer edilmesidir.
3. Basma dayanımındaki artışın dislokasyon hareketini engelleyici bir şekilde davranan sert seramik parçacıkların takviyesi olduğu şeklinde yorumlamışlardır.
4. B<sub>4</sub>C parçacıklarının çatlak engelleyici veya çatlak ilerleme düzlemini saptırıcı bir hareket sergilemelerinin deformasyon sırasında plastik akmayı sınırladığını ve bu yüzden basma dayanımında artış meydana geldiğini de belirtmişlerdir.

Mazaheri vd. [46], saf alüminyuma ayrı ayrı %10 TiC ve %10 B<sub>4</sub>C ilave etmişlerdir. Ek olarak da %5 TiC ve %5 B<sub>4</sub>C hibrit kompozit üretmişler ve mikroyapısal ve mekanik olarak karakterizasyon çalışmaları yapmışlardır;

Elde ettikleri sonuçlar özetle;



1. Mmkn olabilecek dayanım mekanizmalarından birisinin; Bir dislokasyonun takviye sert parçacık ile karılatığı yerde takviye elemanını kesmeye veya takviye elemanı etrafında dislokasyon halkası oluşturması olarak tanımlanan Orowan mekanizması olabileceğini belirtmişlerdir.
2. Plastik matris malzeme ve elastik takviye parçacıklar arasındaki birim Şekil değişiminden kaynaklı bir çalışma sertleşmesi gerçekleştiği ve bunun da sertliği arttırdığını bildirmişlerdir.
3. Sert parçacıklar, dislokasyonların hareketini engellerler veya dislokasyonları matris fazı boyunca hareket ettirmek için gerekli olan gerilme değerlerini daha yüksek seviyelere ulatırırlar. Böylece ikincil faz parçacıkları iki yönlü olarak dislokasyon hareketlerini engellediklerini bildirmişlerdir.

Balasivanandha vd. [47], A384 serisi alüminyum alaşımı ve ağırlıkça %10 oranında ortalama 60  $\mu\text{m}$  parçacık boyutuna sahip SiC parçacıklarını karıŐtırarak alüminyum matrisli kompozit üretmişlerdir. alıŐmaları sonucunda karıştırma zamanı ve karıştırma hızının parçacık dağılımına etkilerini incelemişlerdir. 500, 600 ve 700 rpm'lik hızlarda her bir hız için 5,10 ve 15 dakika karıştırma süresi belirlemişlerdir. KarıŐtırmadaki yüksek hızların parçacık dağılımını olumlu etkilediğini ve daha homojen parçacık dağılımının elde edildiğini bildirmişlerdir.

Kalaiselvan vd. [48], AA6061 serisi alüminyum malzemeye ağırlıkça %4-12 aralığında B<sub>4</sub>C ilave ederek karıştırmalı döküm yöntemiyle metal matrisli kompozit malzemelerin üretilmesi üzerinde çalışmışlardır. alıŐmalarında ıslatılabilirlik ve atmosfer temasını engellemek için K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> flaks kullanmışlardır. alıŐmalarının sonucunda takviye parçacıkların ilavesinin dayanımı ve sertliği arttırdığını belirtmişlerdir. Bu artışın sebeplerinin ise takviye parçacıkların eklenmesinin matristeki tane boyutunu düşürdüğü ve bu sert takviye parçacıklarının yüzey alanlarının plastik deformasyonu engellediğini ve böylece sünekliğin düştüğünü bildirmişlerdir. Kompozitlerin dayanımlarının artmasının bir diğer sebebinin ise alüminyum ve bor karbür malzemelerin termal genleşme katsayıları arasındaki uyumsuzluk (Termal genleşme katsayıları, Al;  $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  ve B<sub>4</sub>C;  $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) sebebiyle katılaşma sırasında matriste dislokasyon yığılmalarının meydana geldiği ve

buna ek olarak sert parçacıkların yük taşıma kapasitelerinin yüksek olması olarak açıklamışlardır.

Sajjadi vd. [49], A356 alüminyum alaşımına ağırlıkça %1-10 aralığında mikro (20 µm) ve nano (50 nm) boyutlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıkları takviye etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda basma dayanımında elde ettikleri artışın sebepleri olarak; seramik parçacıkların sebep olduğu tane iyileşmesi ve matris ile takviye malzemelerin arasındaki termal genleşme katsayılarındaki uyumsuzluk sebebiyle meydana gelen dislokasyon yığılmaları olarak ifade etmişlerdir. Ayrıca dislokasyonların deformasyon sırasında orowan mekanizmasıyla birbiri üzerine ilerleyen ve yoğunluklarını arttırdıklarını da bildirmişlerdir.

Mazahery ve Shabani [50], A356 serisi alüminyum alaşımına hacimce %5-15 aralığında, boyutları 1 µm ve 5 µm arasında değişiklik gösteren B<sub>4</sub>C parçacıkları takviye ederek sıkıştırma döküm yöntemiyle alüminyum matrisli kompozit malzemeleri üretmişlerdir. Takviye oranının artmasıyla sertlikte ve dayanımda artışın meydana geldiği fakat %15 takviye oranında meydana gelen parçacık topaklaşmalarından dolayı dayanımın daha düşük değerlerde elde edildiğini ifade etmişlerdir. Sertlikteki artışın seramik parçacıkların dislokasyon hareketini engellemesi ve matris ve takviye arasındaki termal genleşme katsayısı farkından dolayı kalıntı gerilmelerin oluşması ve hızlı soğumadan kaynaklı dislokasyon yoğunluğunun artması dolayısıyla gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Alizadeh vd. [51], Al-2 wt%Cu alüminyum malzemeye ağırlıkça %1-4 aralığında B<sub>4</sub>C nanoparçacıklar (ortalama boyut 0,8 µm) takviye edilerek karıştırmalı döküm yöntemiyle alüminyum matrisli kompozitler üretmişlerdir. Takviye oranının artmasıyla sertlik ve dayanımda iyileşmeler olduğunu raporlamışlardır. Bu sertlik artışının, çok güçlü ve rijit bor karbür parçacıklarının matris malzemenin akışını zorlaştırması ve plastik akmadan dolayı dislokasyonların yoğunluğunun artması ile gerilme sertleşmesinin meydana gelmesinden dolayı gerçekleşebileceğini belirtmişlerdir.

Kumar vd. [52], A359 serisi alüminyum malzemesini ağırlıkça %2-8 aralığında ve 30 µm ortalama parçacık boyutuna sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıkları ile takviye ederek alüminyum matrisli kompozit malzemeleri elektromanyetik karıştırma döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Takviye parçacıkların üretilen kompozitlerin sertliklerini ve çekme dayanımlarını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bu artışın sebeplerinin seramik parçacıkların çekirdek oluşturucu etki göstererek tane yapısını iyileştirmesi ve katılaşma sırasındaki tane sınırı miktarlarını arttırması olabileceğini ifade etmişlerdir. Çekme dayanımının ileri takviye oranlarında düşmesinin ise porozitenin artmasından kaynaklı olabileceğini bildirmişlerdir.

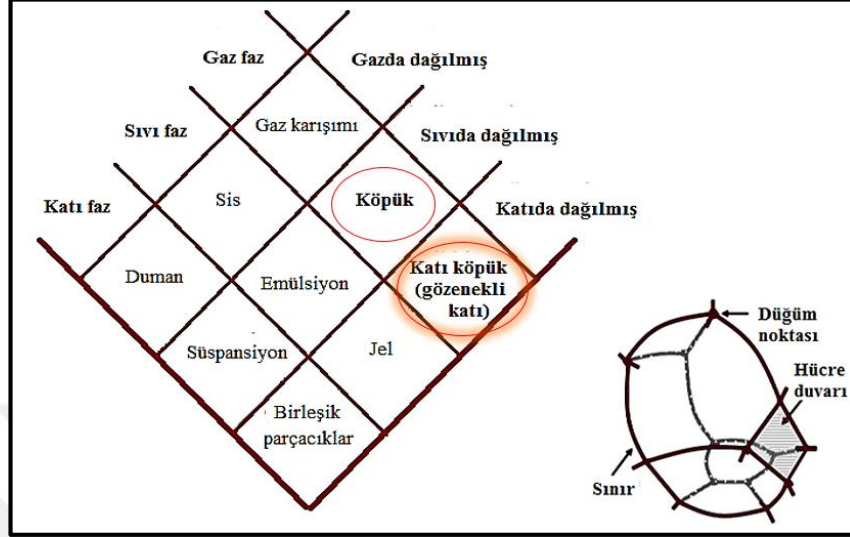
Kok vd. [53], karıştırmalı döküm yöntemiyle 2024 alüminyum alaşımına ortalama 16, 32 ve 64 µm parçacık boyutuna sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıkları ağırlıkça %10-30 oranlarda ilave ederek karıştırma döküm yöntemiyle alüminyum matrisli kompozit üretmişlerdir. Çalışmaları sonucunda ince tane boyutuna sahip seramik parçaların yüksek oranda takviye edildiği durumlarda sertliğin arttığını bildirmişlerdir. Çekme dayanımının ise takviye oranına bağımlı olduğu ve takviye oranının artmasıyla artan bir eğilim gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Soltani vd. [54], %99.8 ticari saflıktaki alüminyum malzeme ile ağırlıkça %3 ve 80 µm ortalama parçacık boyutuna sahip SiC parçacıkları ile takviye ederek karıştırma döküm yöntemi ile alüminyum matrisli kompozit üretim çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Islatılabilirliği arttırmak için sıvı metale ağırlıkça %1 Mg ilave etmişlerdir. Çalışmalarının sonuçlarını incelediklerinde SiC takviyesinin sertlik ve dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir. Bu dayanım ve sertlik artışının matris içerisinde hapsolan sert seramik parçacıkların etrafında dislokasyonların birikmesi ve bu nedenle iç gerilmelerin artması sebebiyle meydana gelebileceğini bildirmişlerdir.

#### **2.4. METAL KÖPÜKLERİN SINIFLANDIRILMASI**

“Gözenekli malzeme”, genel anlamda katı bir matris içerisinde gaz dağılımı mevcut olan iki fazlı malzeme olarak tanımlanmaktadır. Köpük ve gözenekli malzeme eşanlamlı olmasına rağmen bazı araştırmacılar aralarında temel farkın köpük olarak

değerlendirilen malzemelerin %90 gibi çok yüksek boşluk oranına sahip olduğunu belirtmişlerdir [1, 2].



Şekil 2.3. Malzeme bileşimlerinin sınıflandırılması ve katı köpük malzemeler [55].

#### 2.4.1. Yoğunluklarına Göre Metal Köpükler

Metal köpükler yoğunluklarına göre düşük, orta ve yüksek yoğunluklu olarak sınıflandırılırlar. Düşük yoğunluklu metal köpükler  $0,1 \text{ g/cm}^3$  değerinden daha düşük yoğunluk değerine sahip malzemelerdir. Tipik gözenek boyutları  $300 \mu\text{m}$ 'den daha düşüktür. Genellikle termal izolasyon, filtreleme, akustik ve darbe emme, akışkanda yüzdürme gibi uygulamalarda kullanılırlar. Orta yoğunluklu metal köpükler  $0,1$  ila  $0,3 \text{ g/cm}^3$  arasında yoğunluk değerleri gösteren malzemelerdir.  $0,3 \text{ g/cm}^3$ 'den daha yüksek yoğunlukta bulunan malzemeler yüksek yoğunluklu metal köpükler olarak isimlendirilirler. Tipik gözenek boyutları  $100 \mu\text{m}$ 'den daha düşüktür ve çoğunlukla yapısal uygulamalarda kullanılırlar [1].

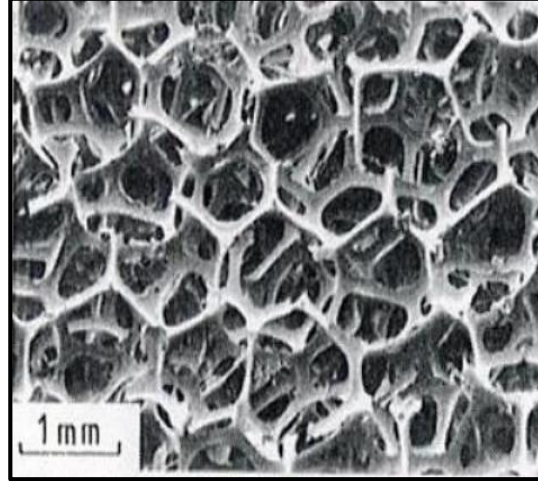
#### 2.4.2. Ana Malzemelerine Göre Metal Köpükler

Metal köpükler ana malzemeleri ile de sınıflandırılırlar. Doğada bulunan çoğu malzeme süngerler, mercanlar, ağaç gövdeleri aslında birer gözenekli malzemelerdir. Aynı şekilde insan kemiğini içerisindeki gözenekli yapı da bilinmektedir. Bu şekilde doğada bulunan malzemeler doğal köpükler olarak nitelendirilirler. Bunların haricinde insanlık tarafından üretilen yapay gözenekli malzemeler, kendilerini oluşturan ana

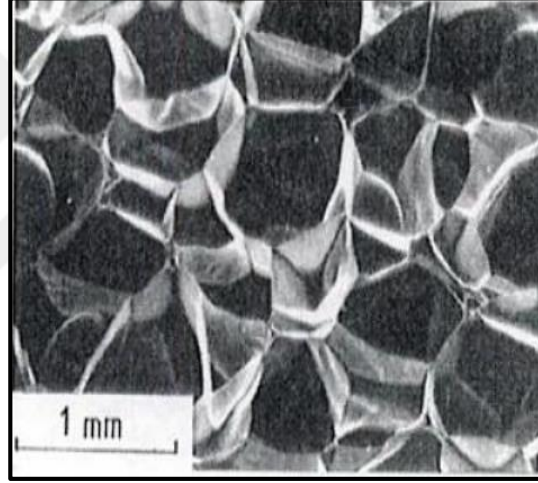
malzemenin ismi ile değerlendirilirler. Örneğin seramik malzemeden yapılanlara seramik köpükler, metal malzemeden yapılanlara metal köpükler ve bunlara benzer şekilde polimer malzemelere de polimer köpükler denilir.

### **2.4.3. Gözenek Yapılarına Göre Metal Köpükler**

Gözenekli malzemeleri sınıflandırmada kullanılan ve belki de en belirgin araç, bu malzemelerin gözenek yapılarıdır. Bal peteği veya üç kenarlı gibi özel gözenekli malzemeler yine gözenek şekilleri ile isimlendirilirler. Bunu yanında diğer metal köpükler genellikle açık ve kapalı gözenekli olarak ikiye ayrılırlar [1]. Açık ve kapalı gözenek yapısının her ikisini de barındıran bazı nadir köpük tipleri de hibrit gözenek yapısına sahip köpükler olarak nitelendirilirler. Açık hücreli yapı içerisinde hücre duvarları bulunmaz. Böylece malzeme içerisindeki gaz fazının sürekli olduğu söylenebilir. Katı fazı ise kırışlerden meydana gelmektedir. Kırışler birleşerek metal köpüğün katı gövdesini oluştururlar. Çoğunlukla düşük yoğunluğa sahip olan bu tip köpükler genellikle akustik ve darbe sönümlenme, filtreler ve ısı değiştiriciler gibi kullanım alanlarına sahiptirler. Kapalı hücreli yapı içerisinde hücre duvarları bulunmaktadır. Böylece malzeme içerisinde sınırlı ve birbirinden bağımsız gaz fazının olduğu söylenebilir. Katı fazı ise hücre duvarları ile birleşen kırışlerden meydana gelmektedir. Kırışler ve hücre duvarları birleşerek metal köpüğün katı gövdesini oluştururlar. Çoğunlukla yüksek yoğunluğa sahip olan bu tip köpükler iyi dayanım özellikleri gösterirler ve genellikle yapısal uygulamalarda kullanılırlar. Bunlara ek olarak iyi yalıtım özelliklerinden ısı yalıtımı uygulamalarında da kullanılırlar[1, 2, 56].



Şekil 2.4. Açık gözenekli hücre yapısı [1].



Şekil 2.5. Kapalı gözenekli hücre yapısı [1].

## 2.5. METAL KÖPÜKLERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

Bir metal köpük malzemeyi karakterize etmek için temelde hangi malzemedan yapıldığına, bağıl yoğunluğuna  $\rho/\rho_s$  ( $\rho$ : katı malzemenin yoğunluğu,  $\rho_s$ : katı malzeme yoğunluğuna) ve gözenek yapısına (açık/kapalı) bakılır. Bunun yanında gözeneklerin şekli, boyutu, homojen dağılım durumları, gözeneklerin yüzey alanı gibi başka özellikler de mevcuttur [1, 57].

### 2.5.1. Mekanik Özellikler

Metal köpüklerin mekanik özellikleri geniş ölçüde yoğunluklarına bağlıdır. Fakat gözenek boyutu, yapısı ve dağılımı da bu özelliklerin belirlenmesinde önemli parametreler olabilirler. Metal köpüklerde malzemelerin yapısı çekme testine uygun olmadığından, genellikle basma testleri ile dayanım özellikleri tayin edilir. Basma dayanımına etki eden en önemli parametrenin yoğunluk olduğu genel bir kanı halini almıştır. Örneğin %30 teorik yoğunluğa köpükleştirilmiş bir Tungsten malzeme, katı haldeki çekme ve basma dayanımlarının sadece %4 ila %5'ini göstermektedir [1, 58].

### **2.5.2. Enerji Sönümlenme Karakteristikleri**

Enerji emme kabiliyeti basitçe ifade edilirse, malzemenin birim hacminin sönümlendiği enerji olarak tanımlanır ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan olarak hesaplanabilir. Enerji emme kabiliyetinin, aynı zamanda, yoğunluk ile bağıntılı olduğu ve artan yoğunlukla hızla arttığı bilinmektedir. Bunun nedeni, köpüğün deformasyon direncinin yoğunlukla birlikte artmasıdır. Deformasyon direncine etki eden bir diğer önemli faktör ise malzemenin yani metal ve alaşımın cinsidir. Deformasyon direnci, uygun bir metal alaşımı kullanılarak orijinal değer beş ila altı katı arasında arttırılabilir [58].

### **2.5.3. Geçirgenlik**

Özellikle filtreleme, sıvı-sıvı ayrıştırma, sıvıda yüzdürme ve gürültü sönümlenme gibi çeşitli amaçlarda kullanılacak olan aşırı gözenekli malzemeler için bir diğer önemli parametre de geçirgenliktir. Köpüklerin geçirgenlik özelliği genelde gözenek boyutunun artmasıyla artış gösterir. Bu durum ayrıca gözeneklerin yüzey pürüzlülüklerinden ve köpük içerisindeki kapalı gözenek sayısından da etkilenmektedir. Sadece açık gözenek yapısına sahip köpükler yüksek geçirgenlik özellik gösterirler. Geçirgen bir metal köpük malzemenin sıvı geçirgenliği deneysel olarak belirlenebilir. Bilinen viskozite ve yoğunluğa sahip bir test sıvısı bir test numunesinden geçirildiğinde basınç düşüşü ve hacimsel akış hızı gibi bazı sıvı geçirgenlik parametreleri ölçülebilir. Genellikle bu tip malzemeler bu deneylerden hesaplanan geçirgenlik katsayısı ile sınıflandırılırken, buna alternatif olarak

maksimum ve ortalama gözenek boyutları dikkate alınarak da sınıflandırılabilirler [3, 50].

#### **2.5.4. Akustik Özellikler**

Metalik köpükler ve polimerik köpükler, hücreli yapı nedeniyle geniş bir frekans aralığında akustik ve titreşim sönümlenmesi için iyidir [56]. Sesin iç kısımlara veya hücrelere girmesine ve titreşmesine izin veren herhangi bir açık gözenekli yapı, akustik enerjisi emecektir. Bir ses dalgası yapıya girerken, dalganın basınç darbesi gözenek duvarları veya kirişlerinin titreşmesine neden olur. Ortaya çıkan mekanik hareketle, ısı enerjisi olarak yayılır. Metalik köpüklerdeki gözeneklerin özellikleri, farklı frekanslarda ses emilimini etkiler. Yapının çoğunun veya tamamının açık gözenekli olduğu malzemeler daha iyi sonuç verirler. Gözenek boyutu köpüklerin akustik emme verimini etkiler. Gözenekler ne kadar küçükse, emme verimliliği o kadar büyük olur [3, 56].

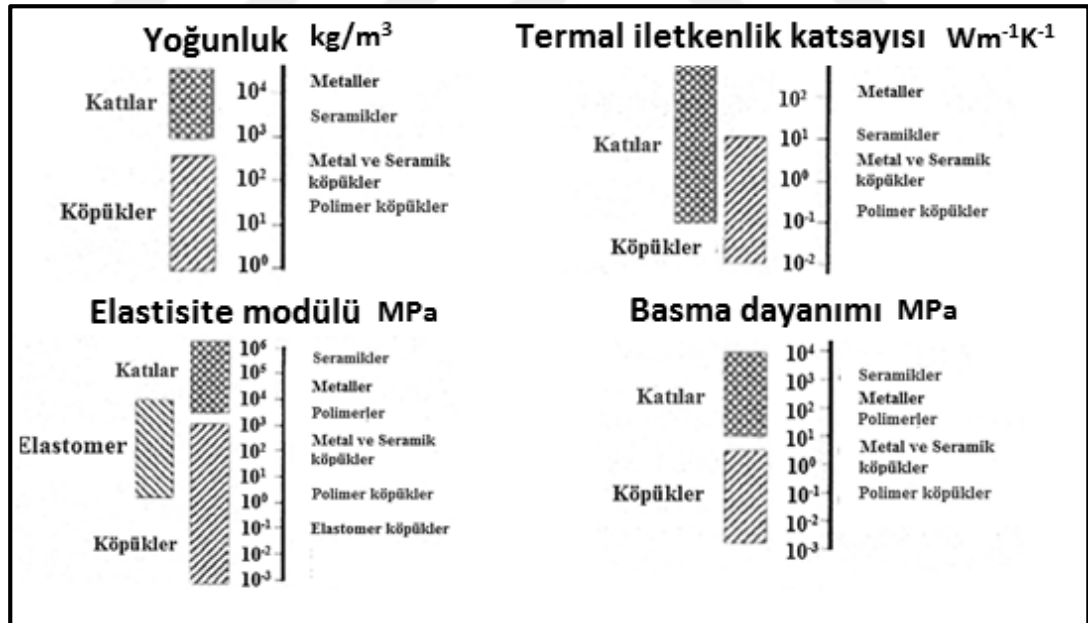
#### **2.5.5. Termal İletim Özellikleri ve Diğer Özellikler**

Köpükler, özellikle seramik, cam ve polimerik köpükler, ısı yalıtım özellikleriyle bilinmektedir. Metal köpüklerin ısı iletkenliği, karşılığı olan kütleli (bulk) metalden daha azdır, ancak ısı yalıtımı bakımından seramik veya polimerik köpüklerle rekabet edemezler. Diğer yandan, açık hücreli metal köpükler oldukça geniş bir yüzey alanına sahiptir ve iyi ısı iletkenliğe sahip matris metali (örneğin Cu veya Al) ile birlikte, ısı dağıtımını ve pasif soğutma gibi tamamen farklı bir amaç için kullanılabilirler. Alüminyum ve bakır malzemenin üretilmiş süngerler, matris malzemenin özelliği sayesinde sıcaklığı çok iyi iletir ve bu nedenle bu köpükler ısı eşanjörleri için kullanılırlar [56].

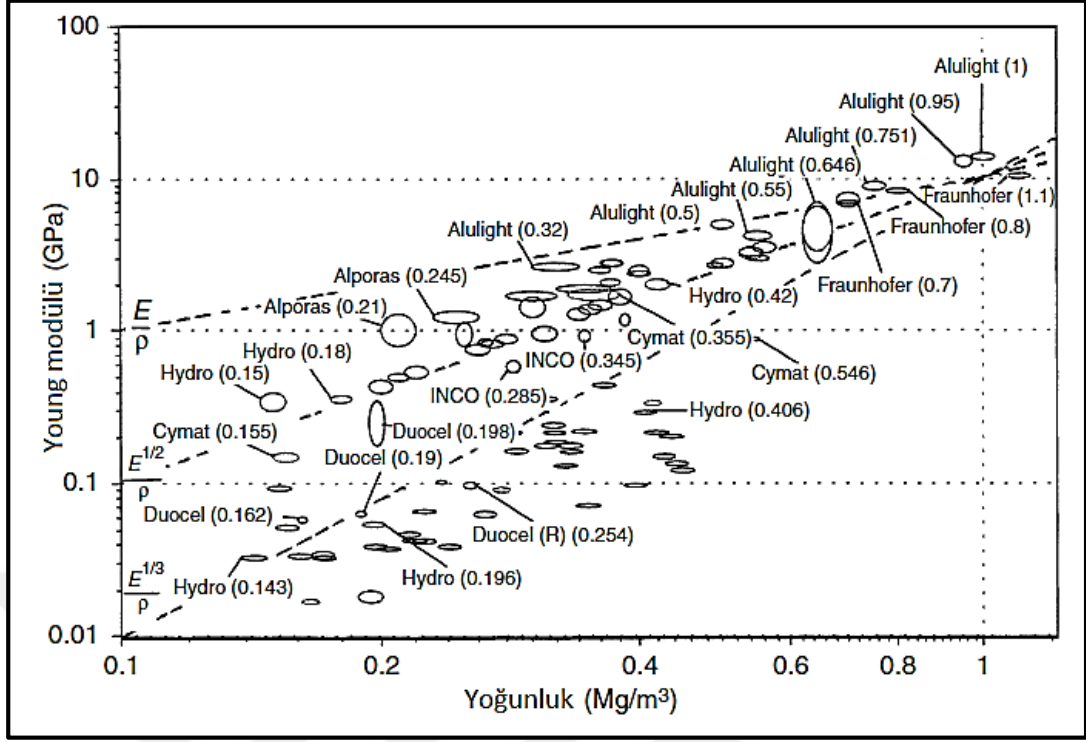
Metal köpük malzemelerin yukarıda sayılan özelliklerin haricinde uygulamaya yönelik birçok özellikleri bulunmakta ve halen daha yenileri keşfedilmektedir. Bu özelliklere birkaç örnek verilecek olursa; Alüminyum veya bakır gibi malzemelerden üretilmiş metal köpük malzemeler deforme olduklarında veya bozulduklarında kolayca geri dönüştürülebilirler. Bu özellikleri sayesinde yeniden ergitme ve



köpükleştirme işlemleri gerçekleştirilebilir veya kaliteli hurda olarak maddi kazanç sağlanabilir. Diğer yandan son yıllarda sıklıkla insan vücuduna uyumlu implantlar üretmek için çalışmalar yapılmaktadır. Ti gibi biyo-uyumlu malzemelerden üretilen metal köpükler aynı zamanda gözenekli yapıları sayesinde vücuda eklenen bölgede daha fazla doku oluşması ve bu dokuların gözeneklere doğru büyümeleri sayesinde yüksek verimli vücut implantlarının üretilmesine imkân sağlamaktadırlar [56]. Son olarak bir değerlendirme yapmak gerekirse, köpük malzemeler birçok bakımından bulk malzemelere göre daha farklı özelliklere sahiptirler, fakat bu özellikleri onları özel uygulamalarda kullanılmalrı için gözde malzemeler yapmaktadır. Şekil 2.6. üzerinde çeşitli köpük ve kütsel malzemelerin özellikleri verilmiştir. Şekilde soldaki damalı alan geleneksel katı malzemenin özellik aralığını gösterirken, çapraz çizgili alan ise köpükler için geçerli olan aralığı simgelemektedir. Bazı ticari metal köpüklerin yoğunluk-dayanım ilişkisi de Şekil 2.7. üzerinde gösterilmiştir. Artan yoğunlukla birlikte dayanımın artmasının genel bir kabul olması grafik üzerinden de anlaşılabilir.

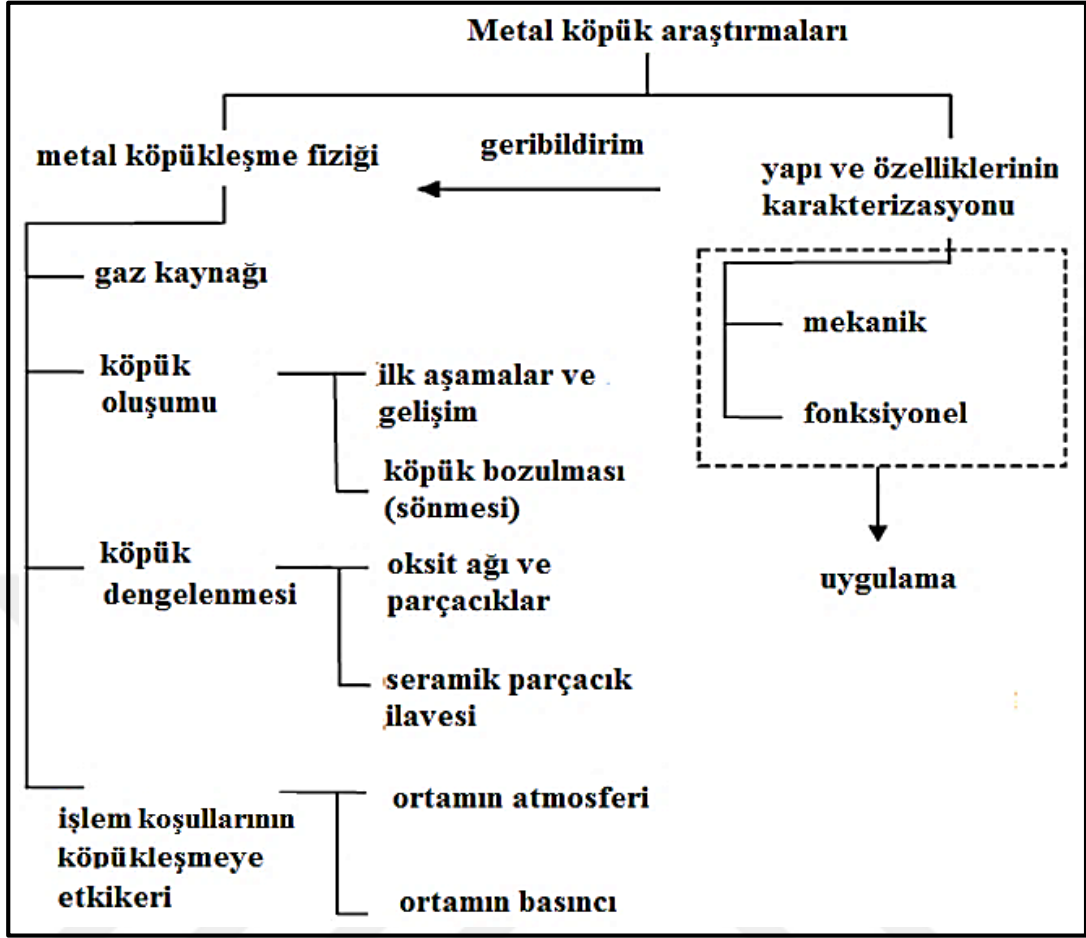


Şekil 2.6. Gözenekli yapıdaki malzemelerin özelliklerini [1].



Şekil 2.7. Bazı ticari metal köpüklerin dayanım-yoğunluk değerleri [2].

Metal köpük malzemelerin yapı ve özelliklerinin karakterizasyonu araştırmaları son yıllarda önem arz etmektedir. Bu çalışmalar metal köpüklerin üretim yöntemlerine kadar inmekte ve köpük oluşum mekanizmaları, köpük dengeleme mekanizmaları ve bu mekanizmaları etkileyen parametreler üzerine yoğunlaşmıştır. Metal köpükler üzerine yapılan araştırmalar ve bu araştırmaların odaklandığı konular Şekil 2.8. üzerinde şematize edilmiştir.

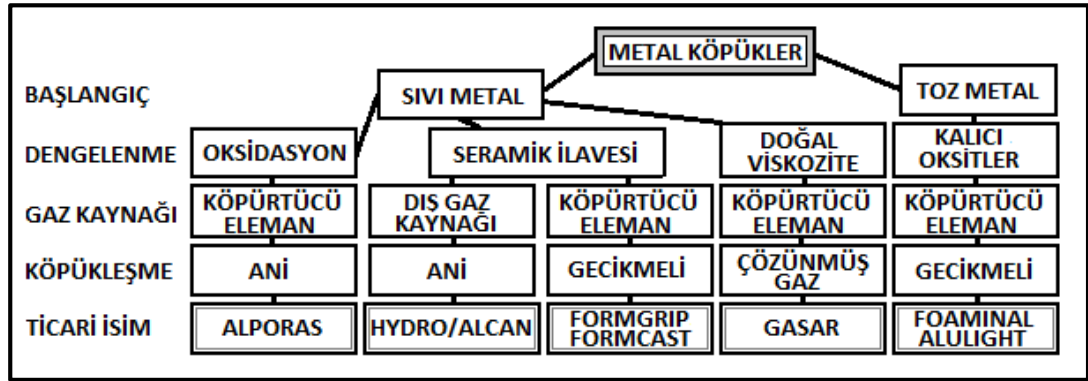


şekil 2.8. Metal köpük araştırma konularının şematik olarak gösterimi [1].

## BÖLÜM 3

### METAL KÖPÜKLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Asıl köpükleşme işlemi her zaman sıvı halde gerçekleşir. Fakat üretim yöntemleri arasında çeşitli farklılıklar mevcuttur [57]. Birincil farkları, başlangıç malzemesini oluşturmak için “ergiyik metal” veya “metal tozları” kullanılabilir. İkincil fark olarak poroziteyi oluşturan mekanizmanın farklı olması gösterilebilir. Bunun için dışarıdan köpürtücü bir gaz kaynağı kullanılabilir veya malzeme içerisine köpürtücü maddeler eklenmesi vasıtasıyla gaz oluşturulabilir. Üçüncü olarak, köpükleşme “ani” veya “gecikmeli” gerçekleşebilir. (Örneğin gaz eklenmesi köpükleşmeyi ani gerçekleştirir.). Son olarak ise köpükleşmeyi dengeleyen mekanizma farklılık gösterebilir [3]. Bazı ticari alüminyum köpük üretim yöntemleri ve bu yöntemlerde kullanılan çeşitli parametreler Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



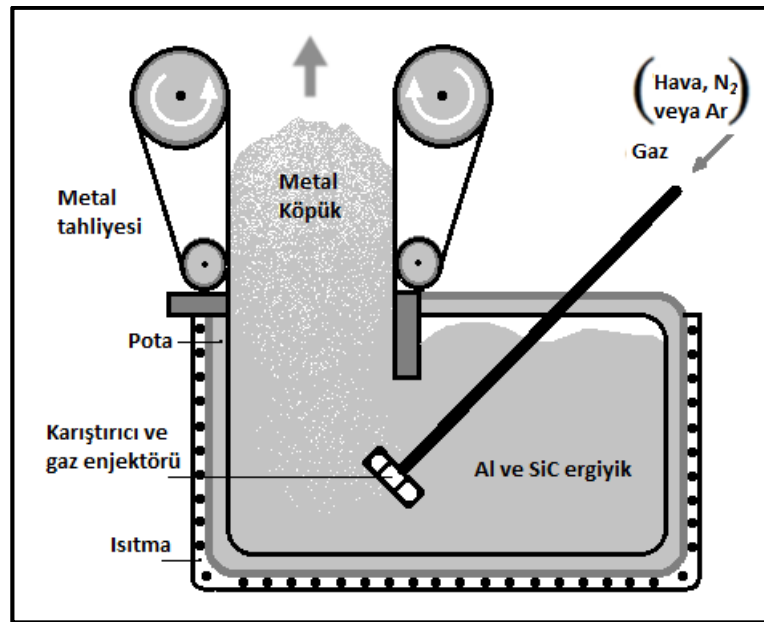
Şekil 3.1. Metal köpüklerin üretim yöntemlerinden bazıları ve bu yöntemlere verilen ticari isimler [57].

#### 3.1. SIVI FAZDAN METAL KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Başlangıç malzemesinin veya köpükleşmenin gerçekleşeceği esnada ana malzemenin sıvı fazda olduğu ve köpükleşmenin sıvı faz içerisinde meydana geldiği üretim yöntemlerini sıvı fazdan metal köpük üretim yöntemleri olarak sınıflandırabiliriz.

### 3.1.1. Gaz Enjekte Ederek Köpükleştirme

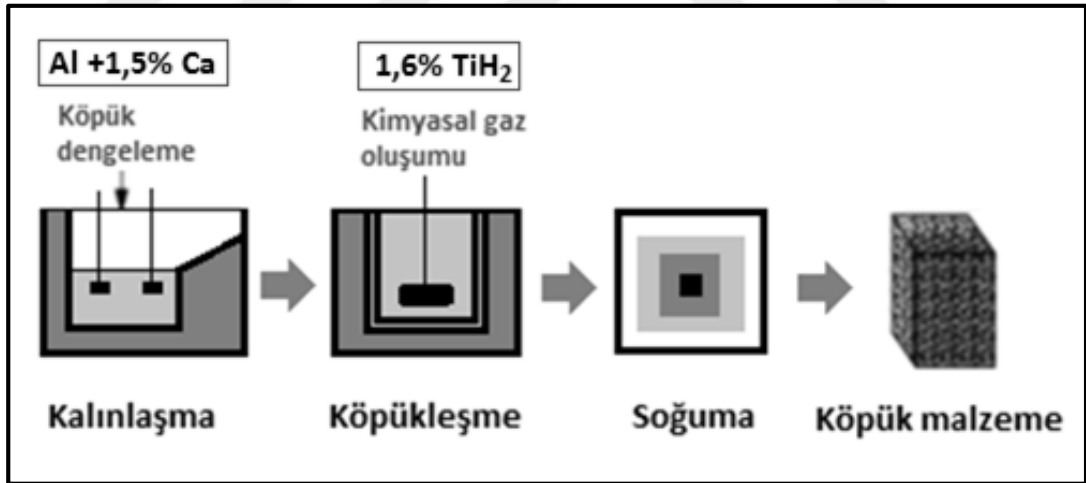
Temelde amaçlanan yöntem, sıvı metal içerisinde dışarıdan gaz enjekte ederek ergiyik içerisinde gaz boşlukları meydana getirmektir. Elde edilen gaz baloncuklarını dengelemek ve sıvı metal yüzeyine kaçmalarını önlemek adına sıvının viskozitesi artırılır. Viskoziteyi arttırmak için genellikle sıvı metale SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> veya MgO gibi seramik parçacıklar ilave edilir ve çeşitli karıştırma teknikleri kullanılarak ergiyik karıştırılır. “Alcan” ticari ismiyle bilinen bu metal köpük üretim yöntemi Şekil 3.2. üzerinde detaylı olarak gösterilmiştir. Ortalama parçacık boyutları 5-20 µm olan ilave parçacıkların hacimce oranları %10-20 aralığındadır. İkinci adımda ise enjekte edilecek gaz (hava, nitrojen, argon) özel tasarlanmış döner çarklar veya titreşimli üfleçler vasıtasıyla püskürtülmesi ile düzgün gaz baloncukları oluşturulur. Bu baloncuklar dağılarak yüzeye çıkarlar ardından konveyöre çekilirler ve soğuma ve katılaşmaya bırakılırlar. Bu yöntemle üretilen metal köpükler 0.069-0.54 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk aralığında ve %80-98 gözenekliliğe sahip olabilirler. Ortalama gözenek boyutları 3 ila 25 mm arasında ve gözenek duvarı kalınlıkları 50-85 µm arasında değişiklik gösterebilir. Bu değerler gaz akışına, çark hızına, üflecin titreşim frekansına ve diğer parametrelere göre değişiklik gösterebilir [1, 57].



Şekil 3.2. Sıvı metalin gaz püskürtülmesiyle köpükleştirilmesi [2].

### 3.1.2. Köpürtücü Elemanlar ile Köpükleştirme

Sıvı metali köpükleştirmek için kullanılan bir diğer yöntem ise ergiyik içerisinde doğrudan köpükleştirici elemanlar ilave etmektir. Köpükleştirici eleman ısı etkisi altında bozularak gaz salınımı yapar ve böylece köpükleşmenin temel mekanizmasını gerçekleştirir. Oluşan gaz baloncuklarını dengelemek için sıvı içerisinde Ca elementi ilave edilir. Ca ilavesiyle sıvı metali kalınlaştıran kalsiyum oksit CaO, kalsiyum-alüminyum oksit ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ) veya  $\text{Al}_4\text{Ca}$  gibi intermetalikler oluşur. Viskozite istenilen değere geldikten sonra ergiyik içerisinde köpürtücü eleman olarak yaklaşık %1,6  $\text{TiH}_2$  ilave edilir (veya  $\text{ZrH}_2$ ) ilave edilir, karıştırılır ve  $680^\circ\text{C}$ 'de köpükleşme gerçekleşir. Kademeli olarak malzeme genişlemeye başlar ve köpükleşme sabit basınçta gerçekleşir. Toplam köpükleşme tipik bir uygulama için yaklaşık 15 dakika alabilir. Şekil 3.3. üzerinde detaylandırılan bu üretim yöntemi "Alporas" ticari ismiyle bilinen bir metal köpük üretim yöntemidir. Gözeneklilikleri yaklaşık %90 ve yoğunlukları  $0,18 - 0,24 \text{ g/cm}^3$  aralığındadır. Ortalama gözenek boyutu 2- 10 mm'dir [2, 57].

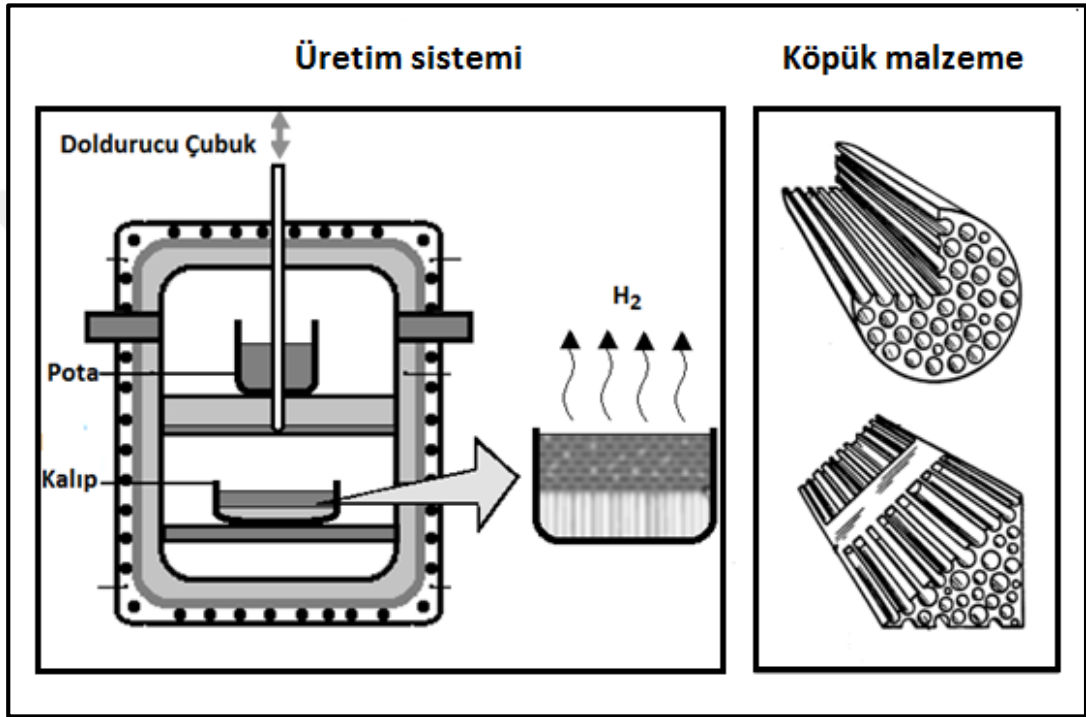


Şekil 3.3. Sıvı metalin köpük gaz oluşturucular vasıtasıyla köpükleşmesi ve Ti Ayrışma analiz tepkimesi [57].

### 3.1.3. Katı – Gaz Ötektik Katılaşma ile Köpükleştirme (Gasar)

Bazı sıvı metallerin hidrojen ile ötektik oluşturmasının keşfedilmesi ile bu üretim yöntemi geliştirildi. Ticari olarak Gasar ismiyle bilinen bu üretim yönteminde ergitme hidrojen atmosferinde ve yüksek basınçta (50 atm'ye kadar) gerçekleştirilir ve sıcaklık

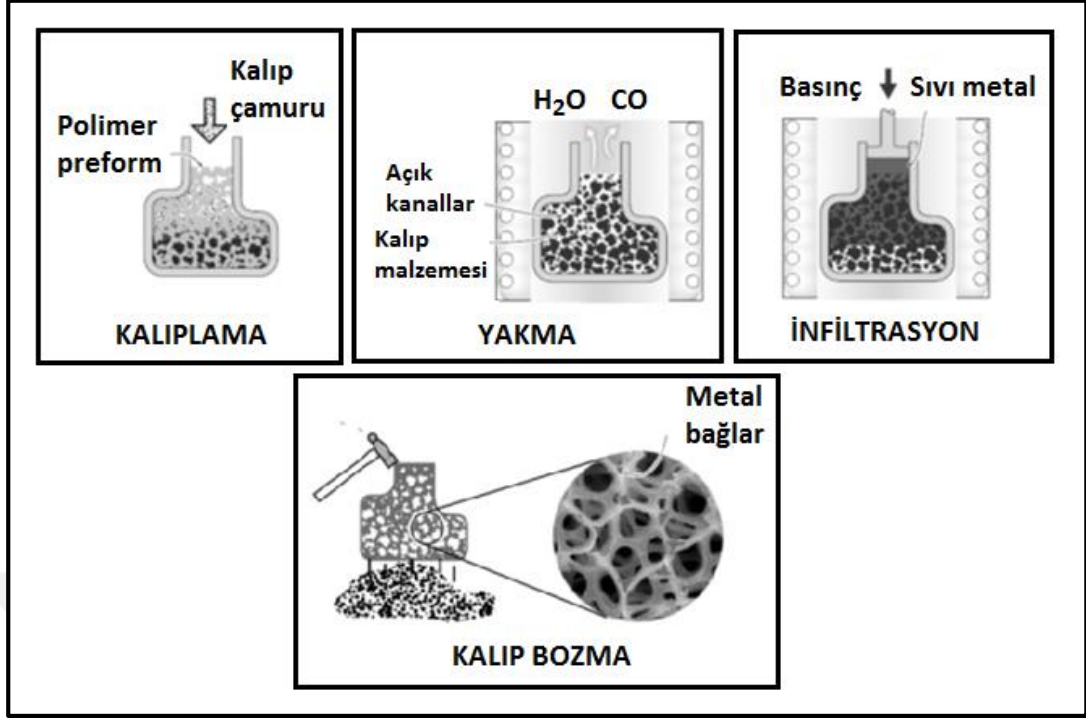
hızlıca düşürüldüğünde yapı ani ötektik dönüşümle 2 fazlı homojen (katı + gaz) forma dönüşür. Ortalama gözenek boyutu 10 µm -10 mm, gözenek uzunluğu 100 µm -300 mm ve hacimce gözenek oranı %5-75 aralığındadır. Gözenek morfolojisi; hidrojen ilavesi, basınç, ısı çıkış yönü ve oranı ve ergiyiğin kimyasal bileşimine göre değişir [11]. Gasar yöntemi, aparatları ve elde edilen metal köpük yapısı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Gasar yöntemi aparatları, Gasar yöntemi ile elde edilmiş metal köpük, genişçe uzamış gözenekler görülüyor [11, 57].

### 3.1.4. Hassas Döküm Yöntemiyle Metal Köpük Üretimi

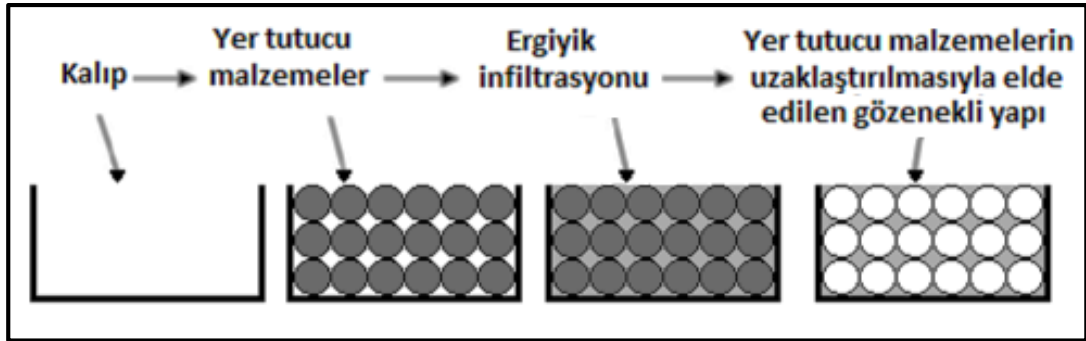
Polimer köpük malzemelerin hassas dökümüyle de köpük malzemeler elde edilebilir. Burada polimer köpük malzeme model olarak kullanılarak ısıya dayanıklı seramik tozlarla oluşturulan çamur dolgu malzemesiyle daldırılarak kalıp oluşturulur. Polimerin uzaklaştırılmasıyla ise metal köpükteki katı boşluklar elde edilmiş olunur. İşlem şematik olarak Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Düşük bağıl yoğunluğa ve geniş aralıkta çeşitli gözenek boyutlarına sahip polimer köpükler bu yöntemde model olarak kullanılabilirler. Bu yöntem, 1-5 mm aralığında gözenek boyutunda ve 0,05 gibi düşük bağıl yoğunluğa sahip açık gözenekli köpükler üretimine imkân vermektedir.



Şekil 3.5. Hassas döküm yöntemiyle gözenekli malzeme elde etme yöntemi [2].

### 3.1.5. Yer Tutucu Malzemelerle Dökümle Metal Köpük Üretimi

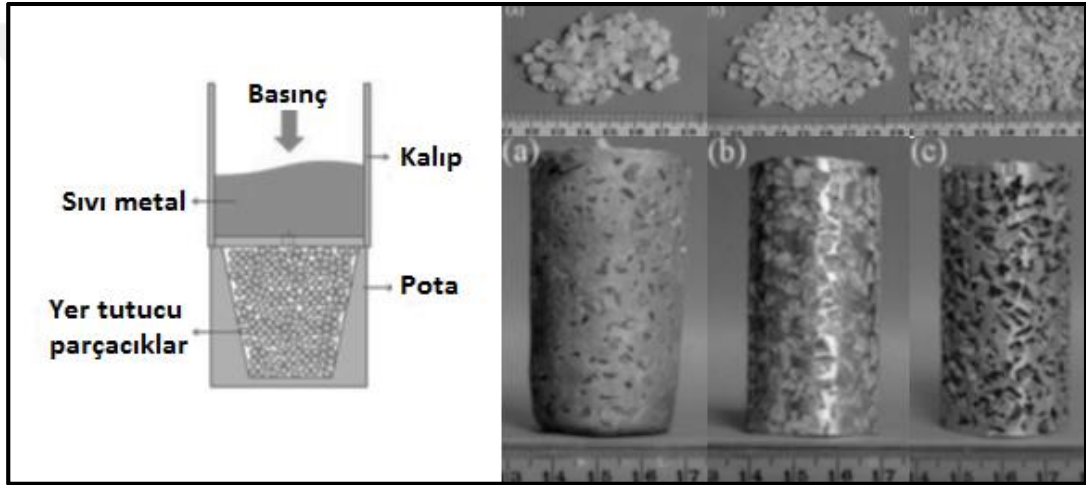
Yer tutucu malzemelerin üzerine döküm yönteminin temeli aşağıdaki şekilde anlatılmaktadır. Kalıp boşluğuna ısıya dayanıklı boşluk tutucu malzemeler doldurularak, döküm gerçekleştirilir. Sonrasında bu yer tutucu malzemeler çeşitli işlemlerle uzaklaştırıldığında geriye gözenekli bir malzeme kalır. Üretim yönteminin şematik olarak gösterimi Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Yer tutucu maddeler kullanarak döküm yöntemiyle gözenekli madde elde edilmesi [57].



Yer tutucu olarak NaCl kullanımı ve çözündürme işlemi ile köpük üretim yöntemlerini 2 temel şekillendirme yöntemi altında uygulandığı görülmektedir. Bunlardan birincisi toz metalurjisi tekniği, ikincisi ise eriyik metalin infiltrasyonu yöntemidir. Toz metalurjisi yönteminde kullanılan tozların ve sinterleme işleminde kullanılması gereken kontrollü atmosfer ortamının maliyeti araştırmacıları alternatif yöntemlere yöneltmiştir. NaCl boşluk tutucu kullanılarak ve eriyik infiltrasyonu yöntemi ile üretilen ve daha sonra tuz parçacıklarının çözündürülmesiyle metal köpük üretimi gerçekleştirilmektedir [60]. Şekil 3.7’de bu yöntem şematik olarak ifade edilmekte ve elde edilen ürünler gösterilmektedir.



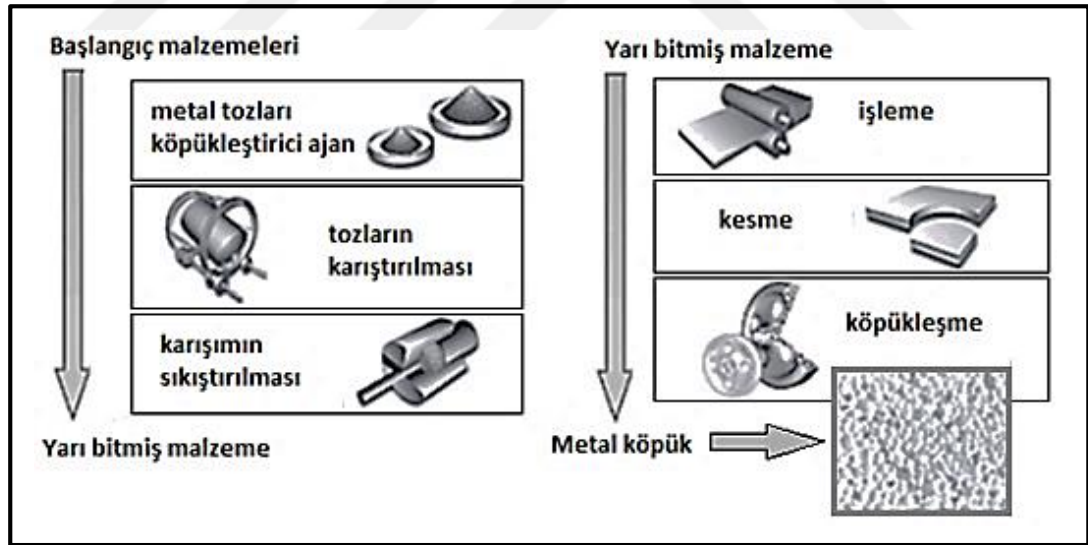
Şekil 3.7. NaCl boşluk tutucu kullanarak Al ergiyiğinin infiltrasyonu ile farklı gözenek boyutlarında metal köpük malzeme elde edilmesi [60].

## 3.2. KATI FAZDAN METAL KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

### 3.2.1. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Köpük Metal Üretimi

Bu yöntem Almanya’da Fraunhofer enstitüsünde geliştirilmiştir [57]. Yöntem toz metalurjisi olarak adlandırılır çünkü başlangıç malzemeler metal tozlarıdır. Toz metalurjisi ile metal köpük üretim yöntemi sadece alüminyum ile sınırlı değildir. Alüminyum alaşımları, titanyum, çinko, kurşun, pirinç ve altın gibi bazı diğer metaller ve alaşımlar uygun işlem parametreleri ve köpürtücü elemanların seçilmesiyle köpükleştirilebilir. Metal tozları ile birlikte gözenekleri oluşturmak amacıyla karışıma köpürtücü elemanlar ilave edilir. Köpürtücü elemanlar  $TiH_2$ ,  $ZrH_2$  veya  $MgH_2$  gibi ısı

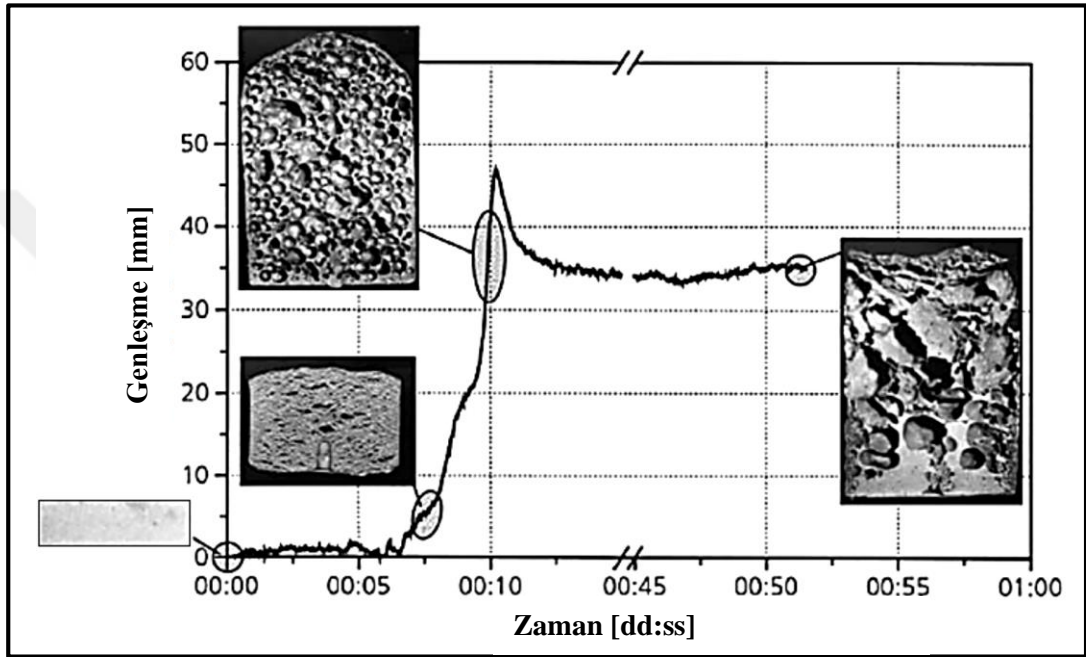
etkisiyle ayrılarak gaz ortaya çıkaran elemanlardır. Üretim prosesi metal tozlarının (elemental, alaşım veya karışım tozlar) köpürtücü elemanlarla birlikte karıştırılması ile başlar. İlave edilecek olan köpürtücü eleman yüzdesi genelde metal hidrürler için %1'den düşük kabul edilir (0,4-0,6 %). Yeterli derecede karıştırılan karışım sıkıştırılarak yarı bitmiş ürün elde edilir. Üretim işlemi aşama aşama Şekil 3.8. üzerinde gösterilmektedir. Sıkıştırma işlemi için köpürtücü elemanların matris malzeme içerisinde homojen olarak dağıldığı herhangi bir sıkıştırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilir. Örneğin sıcak eş eksenli veya izostatik sıkıştırma, mil ekstrüzyon veya toz haddeleme yöntemleri kullanılmaktadır. Sıkıştırma yöntemi üretilen köpük malzemenin şekli göz önüne alınarak tercih edilebilir. Örneğin plaka veya saç benzeri ürünler için toz haddeleme, silindir veya blok için ise ekstrüzyon yöntemleri seçilebilir. Daha etkin bir sıkıştırma için ekstrüzyon ve haddeleme yöntemleri sırayla birlikte kullanılabilir. Yarı ürünün üretilmesi dikkatle yapılmalıdır, çünkü bu aşamada yapıda kalacak kalıcı gözenekler veya diğer hatalar ileriki aşamalarda daha büyük yapı hatalarına sebebiyet verecektir.



Şekil 3.8. Sıkıştırılmış tozların köpürtücü madde vasıtasıyla köpükleştirilmesi [57].

Bir sonraki adım ise ergime derecesine yakın bir sıcaklıkta yapılacak olan ısıtma işlemidir. Yoğun metal matris yapıda homojen olarak dağılmış köpürtücü elemanlar bozunarak gaz salmaya başlarlar. Salınan gazlar yarı bitmiş ürünün genişlemesine ve yüksek derecede gözenek oluşmasına sebebiyet verir. Tamamen genişleme için gerekli zaman

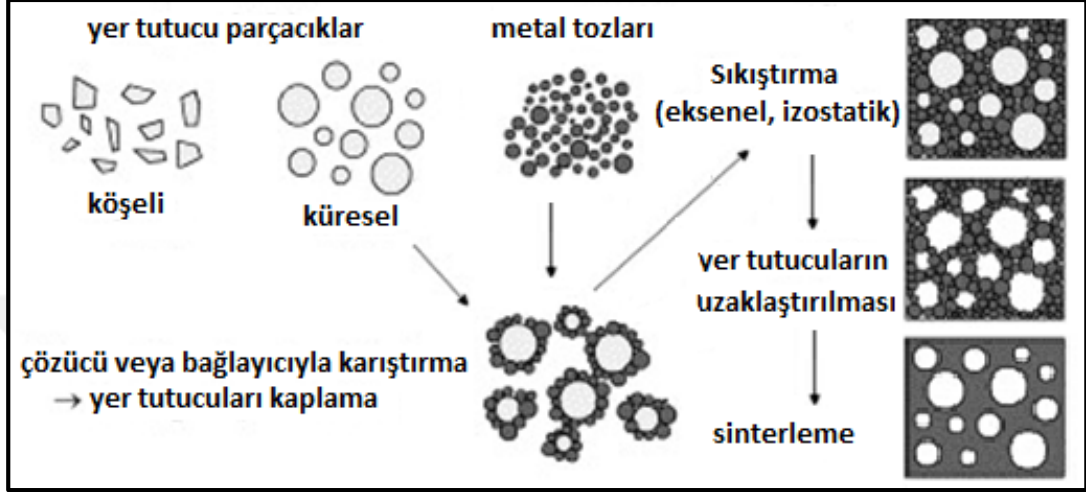
yarı bitmiş ürünün boyutuna bağlıdır ve birkaç saniye ile birkaç dakika arasında değişiklik gösterebilir. Şekil 3.9 sıkıştırılmış alüminyum/TiH<sub>2</sub> yarı bitmiş ürünün genişleme eğrilerini göstermektedir. Genişleyen köpüğün hacmi zamanın bir fonksiyonu olarak bazı gözenek biçimleri ile birlikte verilmiştir. Maksimum genişleme düzgün dağılımlı bir gözenek yapısı olduğu ve sonrasında bu yapının söndüğü ve bozunduğu görülmektedir.



Şekil 3.9. Sıkıştırılmış Al/TiH<sub>2</sub> malzemenin 750°C'de köpükleştirildiğindeki genişleme davranışı (köpükleşmemiş malzeme boyutu 32x9 mm) [57].

Bu bölümde açıklanan yöntemle benzer şekilde, yer tutucu malzemeleri ve metal tozları kullanarak metal köpük malzemeler elde edilebilir. Yukarıdaki yöntemden farkı, kalıbın metal tozlarının arasındaki yer tutucu parçacıklar ile doldurulmuş olmasıdır (Şekil 3.10). Metal tozları, yer tutucular ve uygun bir çözücü veya organik bir bağlayıcı ile bir hazne içerisinde doldurulur ve karıştırılır. Yer tutucu olarak seramik parçacıklar, polimer taneleri veya içi boş polimer veya seramik küreler, tuzlar ve hatta metaller kullanılabilir. Karıştırılarak elde edilen malzeme daha sonra sinterleme sıcaklığında sıkıştırılır. Eğer yer tutucular ısıya dayanıklı ise, sıkıştırmayı arttırmak ve metal tozu parçacıkları arasındaki sinterleme işlemlerini başlatmak için yüksek sıcaklıklarda preslenebilir. Her iki durumda da metal bir matris dolguya gömülü granüllere sahip bir bileşik elde edilir. Metal miktarı yeterince az ise, yer tutucu

malzemeyi sızdırma veya sulu bir çözücü kullanılarak yapı içerisinde neredeyse tamamen çıkarmak mümkündür, çünkü yer tutucu malzemeler tarafından oluşturulan ağ birbirine bağlıdır. Gözenekli metal köpük yapıdaki metalik ağı daha da yoğunlaştırmak için son bir sinterleme adımı uygulanabilir.

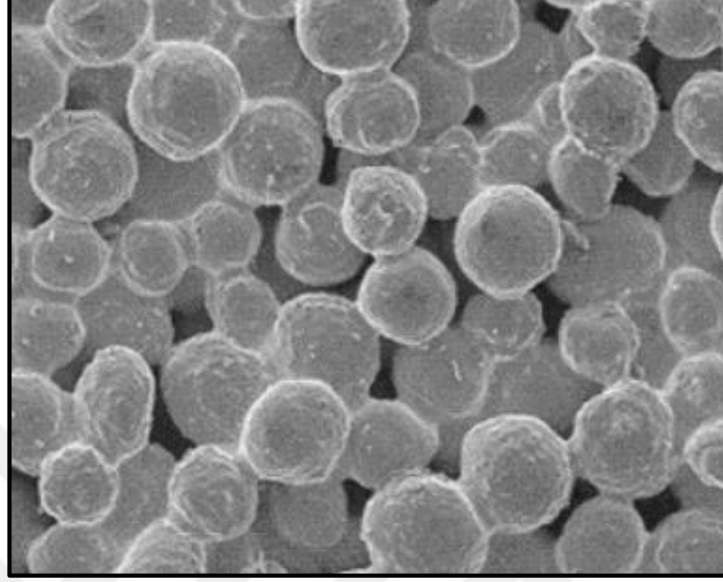


Şekil 3.10. Metal tozları ve yer tutucular ile metal köpük üretimi [57].

### 3.2.2. Metal Tozları veya Fiberlerin Sinterlenmesiyle Köpük Üretilmesi

Titanyum veya süper alaşımlar da dahil olmak üzere çok çeşitli metallerden metal köpük üretilmesine ve kullanılmasına rağmen, çoğu piyasa uygulamalarında bronz ve paslanmaz çelik gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bu tür malzemeleri köpükleştirmenin bir diğer yolu ise eritmeden bu malzemelerden elde edilen metal tozları veya fiberleri direkt sinterleyerek gözenekli bir yapı elde etmektir. Bu tip yapıların üretimi çeşitli aşamalardan oluşur. Bu aşamalar toz parçalama ve hazırlama, sıkıştırma veya kalıplama ve sinterleme olarak sıralanabilir. Bu şekilde gevşek paketli veya yerçekimi sinterlemesi yöntemi çoğunlukla bronzlar (Cu 89%+Sn 11%) için kullanılır. Sinter sıcaklıkları yaklaşık 820°C'dir. Nispeten düşük dayanıma ve %20 ila %50 arasında gözenekliliğe sahip köpükler elde edilir. Bu tür bronzdan yapılmış gözenekli bir malzeme, Şekil 3.11. üzerinde gösterilmiştir. Eksenel veya izostatik presleme ile veya haddeleyerek sıkıştırma ile parçacıkların temas alanlarına soğuk kaynak yapılarak yarı bitmiş ürünün sinterleme öncesi dayanımı artırılır. Daha sonra

uygulanan sinterleme ile malzemenin yoğunluğu ve mukavemeti artırılır ve çok ince bir gözenekliliğe sahip olan parçalar üretilir [57, 61].



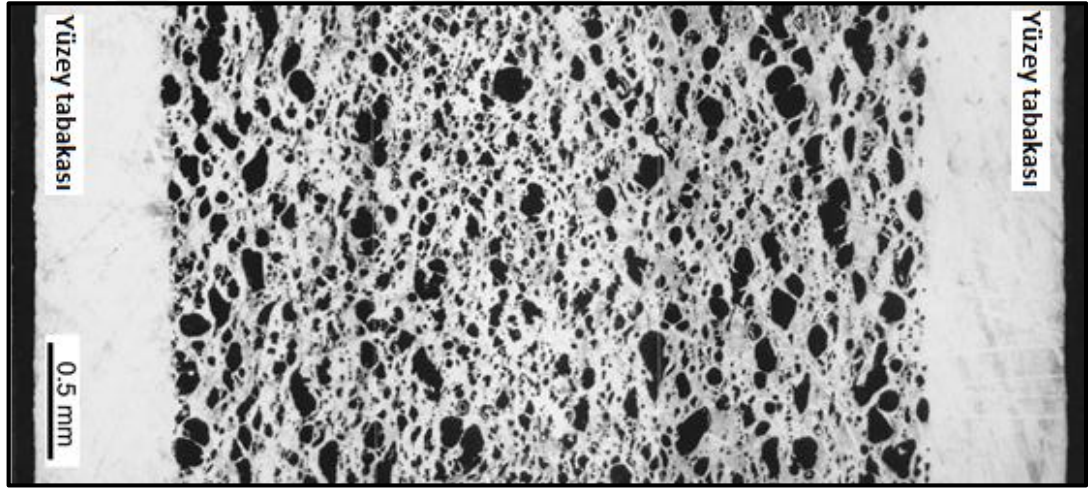
Şekil 3.11. Yaklaşık 100 $\mu$ m çaptaki parçacıklardan üretilmiş gözenekli bronz [61].

### 3.2.3. Gaz Tuzaklama Yöntemi ile Metal Köpük Üretimi

Metal köpükler, toz metal ve köpükleştirici elemanların sıkıştırılması yöntemine benzer şekilde ancak köpükleştirici eleman kullanılmadan da üretilirler. Bunun için, metal tozları oldukça yoğun bir geometriye sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırma sırasında, malzemeye gaz girmesine izin verilir. Yarı bitmiş ürününü diğer bir aşama olarak ısıtılması, içerisinde tuzaklanan gazın yarattığı iç basınç nedeniyle metal genişmesine yol açar. Genleşme katı halde gerçekleşir ve bu nedenle gerçek bir köpükleşme değil, malzemede katı halde gerçekleşen bir sürünme işlemi olarak ifade edilir.

Yöntem, uçak üreticisi Boeing (ABD) [62] tarafından gözenekli titanyum yapıların üretilmesi için uygulanmıştır. Titanyum tozu ilk önce metal kalıba doldurulur, daha sonra 3 ila 5 atm arasındaki basınçlarda argon gazı ile doldurulur. Daha sonra kalıp kapatılır ve yapıyı yoğunlaştırmak amacıyla sıcak izostatik preslenir. Argon gazı malzeme içerisinde sıkıştırılır ve toplam hacmin %2'sinden daha azını işgal eder ve yüksek bir iç basınç altında düzgün dağılmış gözenekler meydana getirir. Yoğunlaştırılmış malzeme uygun bir ısıl işlemle ile gözenekli bir malzemeye

dönüştürülebilir. Tipik olarak, bu tavlama aşaması, ilgili alaşımın erime sıcaklığının 0,6 katında gerçekleşir ve 6 ila 24 saat sürer. Tavlama işlemi sırasında gaz gözenekleri yavaşça genişler, böylece gaz basıncı ile metalin tavlama sıcaklığındaki mukavemeti arasında bir denge sağlanana kadar iç basınç düşürür. Elde edilen malzemelerin merkezlerindeki gözeneklilik %20-40 aralığındadır. Gözenekler birbirine bağlıdır ve gözenek çapları 10 ila 100 µm arasında değişmektedir. Tozu içeren kalıbın duvarları ikili bir işleve sahip olabilir. Tozun kapatılmasının yanı sıra, tavlama işleminden sonra gözenekli çekirdek üzerinde yoğun bir dış tabaka oluştururlar. Böylece iki yoğun metal tabaka arasında oluşan köpük bir çekirdek ile sandviç yapıların üretilmesi mümkündür. Bu yöntemle üretilmiş ve sıcak haddeleme yöntemiyle yoğunlaştırılmış büyük bir (1.2 x 2.1m) tabakadan kesilmiş bir numunenin görüntüsü Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Bağıl yoğunluğu, dökme titanyumun yaklaşık %66'sıdır.



Şekil 3.12. Gaz tuzaklama yöntemiyle üretilmiş  $TiAl_6V_4$  sandviç malzeme yapısı [63].

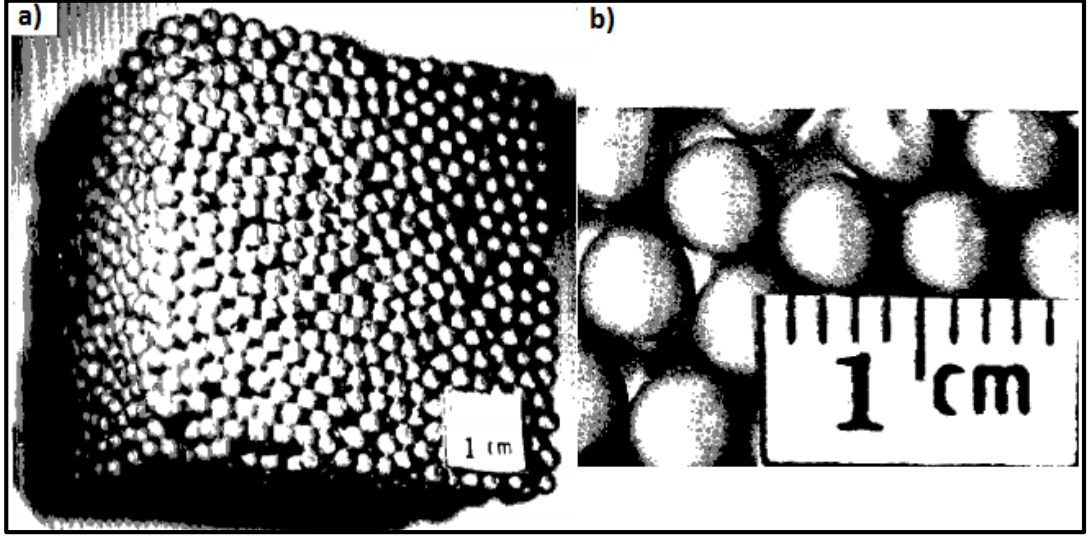
#### 3.2.4. Bulamaçtan Metal Köpük Üretimi

Metalik köpükler ayrıca bir metal tozu, köpürtücü elemanlar ve bazı reaktif katkı maddeleri hazırlanarak da üretilebilir. Karışım bulamaç haline getirilir ve bulamaç karıştırıldıktan sonra bir kalıba dökülür ve burada yüksek sıcaklıklarda bırakılır. Katkı maddelerinin ve köpürtücü elemanların etkisiyle bulamaç yapışkan hale gelir ve köpürtücü elemanlar gaz salınımına başladığında malzeme genleşmeye başlar. Yeterli dengeleyici önlemler alınmışsa, genişletilmiş bulamaç korunabilir ve tamamen

kurutulabilir. Daha sonra yapılan sinterlemeyle önemli ölçüde mukavemetli bir metal köpük elde edilir. Köpürtücü elemanlar olarak alüminyum hidroksit veya hidroklorik asit içeren ortofosforik asit kullanılarak alüminyum tozlarından köpükler üretilebilir. Üretilen malzemelerin bağıl yoğunlukları %7'ye kadar düşebilmektedir. Fakat yetersiz mukavemet, köpüklü malzemede çatlakların oluşması gibi negatif etkiler mevcuttur. Bunun yanında bulamaçlar, açık gözenekli metalik köpük üretmek için alternatif bir şekilde de kullanılabilir. Bu durumda, açık gözenekli hazır bir polimer köpük, gümüş ve gümüş oksit tozu gibi karışım içeren bir bulamaç içine daldırılır. Daha sonra, bulamaçla kaplanan polimer köpük kurutulur ve polimerin yandığı ve metal tozu parçacıklarının birlikte sinterlenmeye başladığı bir sıcaklığa kadar ısıtılır, böylece sert bir metal köpük malzeme oluşturulur [3].

### **3.2.5. Metal Küre Yapılarının Birleştirilmesiyle Metal Köpük Üretimi**

Bu yöntem basitçe bakır, nikel, çelik veya titanyumdan yapılmış içi boş küreleri sinterleme ile birbirine bağlayarak yüksek gözenekli yapılar oluşturmak olarak tanımlanabilir. İçi boş metal küreler çeşitli şekillerde elde edilebilirler. Örneğin ilgili metalin kimyasal ve elektriksel yöntemlerle polimer küreler üzerine biriktirilmesi ile bu tip içi boş küreler üretilebilir. Polimer kürelerin metal tozu süspansiyonu ve bir bağlayıcı ile kaplanmasıyla ve ardından sinterlemeyle polistiren uzaklaştırılırken yoğun bir metal kabuk elde edilebilir. Bunlara benzer olan veya alternatif yollarla üretilebilen içi boş küreler, düzenli veya düzensiz gözenekli açık veya kapalı gözenekli hafif malzemeler üretmek için kullanılabilir. Genelde kullanılan kürelerin çapları 0.8 ila 8 mm ve et kalınlıkları 10 ila 100 µm arasında değişmektedir. Açık gözenekli yapılar, bir dizi içi boş metal kürenin sinterlenmesiyle elde edilir, böylece bitişik küreler arasında sinterleme boyunları oluşturulur. Sinterleme sırasında kürelere kuvvet uygulanması, sinterleme için parçacıkların temas yüzeylerinin artmasına ve aynı zamanda açık gözeneklilik derecesinin azalmasına yol açar. Bu yöntem ile elde edilen ve 1350°C'de sinterlenerek bağlanmış küp şeklindeki oksit köpük ( $Fe_{0,88}Cr_{0,12}O_{1,5}$ ) Şekil 3.13 üzerinde görülmektedir.



Şekil 3.13. Sinterlenmiş küresel parçacıkların görüntüsü (köpük malzeme 1350°C’ de sinterlenmiştir  $Fe_{0,88}Cr_{0,12}O_{1,5}$ ) [64].

Yukarıda anlatılan üretim yöntemlerine ek olarak elektro-biriktirme ve kimyasal buhar biriktirme gibi özel yöntemlerle metal köpük üretim çalışmaları mevcuttur. Araştırmaların devam etmesiyle metal köpükler için ulaşılabilir porozite sınırları ve üretim yöntemleri genişlemektedir. Tablo 3.1 üzerinde yukarıda bahsedilen üretim yöntemleri, bu yöntemlerde kullanılan malzemeler ve elde edilen porozite değerleri verilmiştir. Ticari mevcudiyet, bir malzemenin stoktan satın alınabileceği anlamına gelmez, malzemenin talep üzerine makul bir sürede tedarik edilebileceğini ifade etmektedir.



Çizelge 3.1. Metal köpükler ve gözenekli malzemeleri üretim yöntemleri [57].

Yöntem	Ortalama Gözeneklilik	Üretilen malzemeler	Ticari mevcudiyet
<b>Sıvı Fazdan Metal Köpük Üretim Yöntemleri</b>			
Gaz enjekte ederek	80-97,5	Al, Zn	Satın alınabilir
Köpürtücü elemanlar ile	91-93	Al, Zn	Satın alınabilir
Katı – gaz ötektik katılaşma	5-75	Ni, Cu, Al, Mg	Yok
Hassas döküm yöntemi	80-97	Al, Zn	Satın alınabilir
Yer tutucular ile döküm	≤65	Al, Zn, Pb, Cu	Satın alınabilir
<b>Katı Fazdan Metal Köpük Üretim Yöntemleri</b>			
Toz metalurjisi	60-90	Al, Zn, Pb	Satın alınabilir
Metal tozlarının sinterlenmesi	20-80	Bronz, çelik	Satın alınabilir
Gaz tuzaklama yöntemi	≤45	Ti	Yok
Bulamaçtan metal köpük	≤93	Al	Yok
Metal küreler ile	≤80	Çelik	Yok

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 4.1. ANA MALZEME VE TAKVİYE MALZEME

Deneysel çalışmalar için, %87,9 saflığındaki A360 alüminyum alaşım külçeler Eti Alüminyum A.Ş.'den temin edilmiştir. Eti Alüminyum A.Ş.'nin Eti-normlarına göre Etial 171 (A360) olarak isimlendirdiği bu malzemeyi Türk Standartları Enstitüsü (TSE) AISi10Mg, Alman Standartları Enstitüsü (DIN) G-AISi10Mg ve Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM) A-360 olarak isimlendirmektedir. Külçelerden kesilen parçalar deneylerde kullanılmak üzere 90mm çapında ve 50mm kalınlığında kokil kalıba dökülerek standart boyut korunmuştur. Çizelge 4.1. A360 alüminyum malzemenin kimyasal bileşimini göstermektedir. Elemental analiz Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği bölümünde bulunan GNR Minilab 300 model optik emisyon spektrometresi cihazında gerçekleştirilmiştir. Takviye malzemeler olarak ise Ege Nanotek Kimya Sanayi firmasından temin edilen >%96 saflığa ve ortalama 16 µm toz boyutuna sahip bor karbür tozları kullanılmıştır.

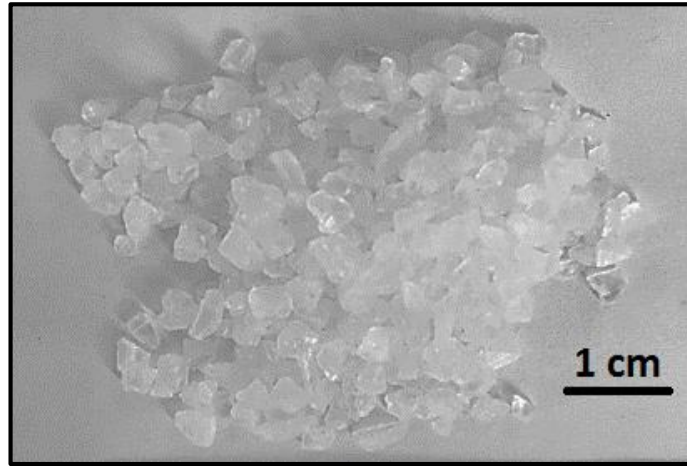
Çizelge 4.1. Elemental analiz ve malzemenin katalog kimyasal bileşimi.

Elementler (%)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Al
Analiz sonucu	10,47	0,54	0,18	0,44	0,48	0,02	0,11	0,02	Kalan
A360 Firma katalog verileri	9-10	≥0,5	0,1	0,4-0,6	0,3-0,45	≥0,1	≥0,1	≥0,15	Kalan

## 4.2. NUMUNELERİN ÜRETİLMESİ

### 4.2.1. İnfiltrasyon Yöntemiyle Numune Üretimi

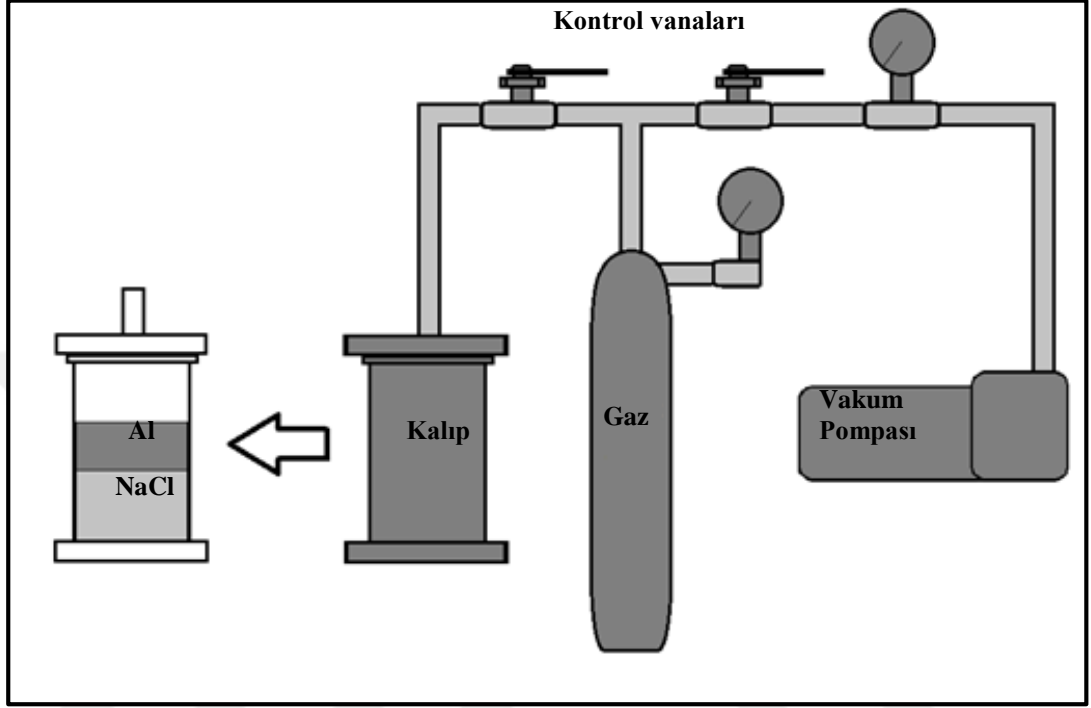
Yer tutucu malzemeler etrafına döküm olarak basitçe tanımlanabilen bu yöntem infiltrasyon veya replikasyon döküm olarak bilinir [65]. Geçtiğimiz yıllarda bazı araştırmacılar bu yöntemde, sodyum klorür (NaCl) parçacıklarını yer tutucu malzeme olarak kullanılmışlardır [29, 66]. Yöntemin başlıca avantajları, oldukça ekonomik olması ve sodyum klorür, yani tuz parçacıklarının zararlı bir madde olmayıp su ile kolayca yapıdan uzaklaştırılabilmeleridir. Metal köpüklerin çoğunda kullanıldığı gibi alüminyum alaşımı infiltrasyon yönteminde tercih edilen bir mühendislik alaşımıdır. Tercih sebeplerinden en önemlileri hafif ve kolay ergitilebilir bir mühendislik malzemesi olmasıdır. Alüminyumun ergime sıcaklığı aralık 650-760°C iken, sodyum klorür yaklaşık 801°C sıcaklıkta ergimeye başlar [67, 68]. Bu sebeple alüminyum köpük üretmek için sodyum klorür parçacıklar yer tutucu olarak kullanılabilirler. Metal köpük üretiminde hücre oluşumu için çözünen tip boşluk tutucu malzeme olarak uygun eleklerle ayrıştırılan 1.8-2.8 mm aralığında tane boyutuna sahip NaCl parçacıklar kullanılmıştır. Şekil 4.1’de kullanılan tuz parçacıkları gösterilmektedir.



Şekil 4.1. İnfiltrasyon yönteminde yer tutucu olarak kullanılan tuz parçacıkları.

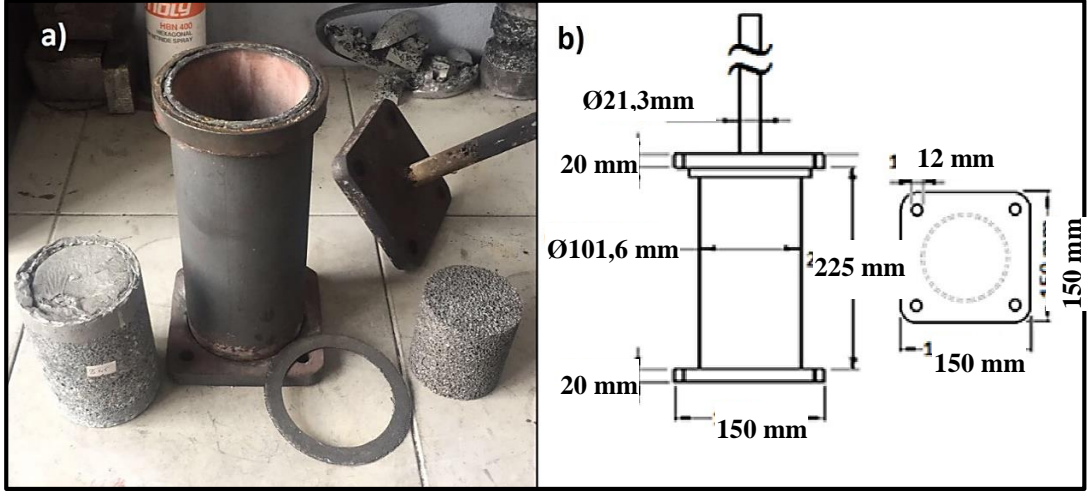
İnfiltrasyon sistemi temel olarak vakum pompası, vakum ölçer, kalıbın oturduğu bir plaka, basınç ölçer ve kalıptan oluşmaktadır. Sistem içindeki vakumun ve inert gazın tahliyesi ve kalıp içinde gerçekleşecek infiltrasyon işlemi kontrol vanalarının açılıp

kapanması ile yönetilmektedir. Rotary tip bir vakum pompası (maksimum  $2 \times 10^{-3}$  mbar) ile -700 mmHg vakum oluşturulmaktadır. Numuneleri üretmek için kurulan üretim sistemi Şekil 4.2 üzerinde şematik olarak gösterilmektedir.



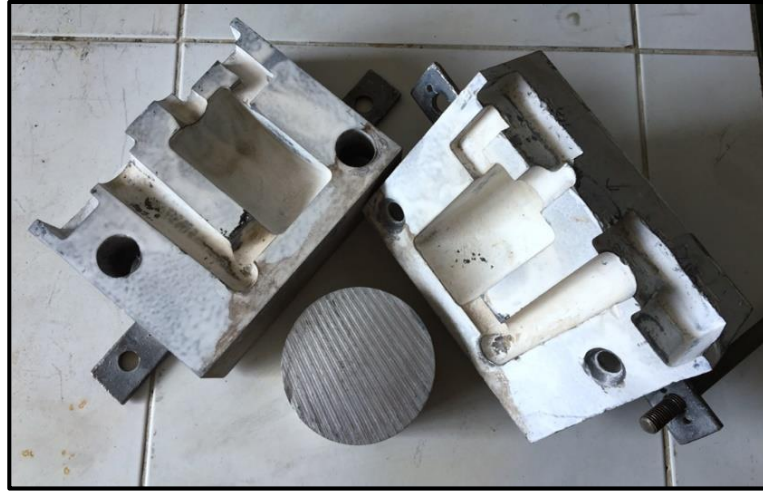
Şekil 4.2. İnfiltasyon sisteminin şematik olarak gösterimi.

Boşluk tutucu malzemeyi ve alüminyum külçeyi içinde barındıran kalıp 304 kalite paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Kalıp yapılan dökümün rahat çıkarılabilmesi için dikey silindirik hazne ve bu silindirin oturacağı kanallara sahip alt ve üst plakalar olarak üç parça halinde üretilmiştir. Kalıbın yüksekliği 225 mm ve dış çapı 101,6 mm'dir ve kalıp bileşenleri ve ölçüleri Şekil 4.3. üzerinde gösterilmektedir. Ayrıca et kalınlığı da 6 mm olarak belirlenmiştir. Döküm sonrasında olabilecek metal yapışmalarını engellemek ve dökümün daha kolay çıkmasını sağlamak için kalıp iç yüzeyine her döküm öncesinde hegzogonal bor nitrür kalıp yüzey ayırıcı sprey uygulanmıştır.



Şekil 4.3. 304 paslanmaz çelik malzemeden yapılan infiltrasyon kalıbı, a) kalıp ve bileşenleri, b) kalıp ve bileşenlerinin ölçüleri.

Külçeler halinde temin edilmiş olan alüminyum alaşımını infiltrasyon için kullanılacak kalıba rahat girebilecek şekle getirmek amacıyla 90 mm çap ve 40 mm uzunluğunda kalıp boşluğu geometrisine sahip ve Şekil 4.4.'te gösterilen metal kalıba dökülmüştür. Ardından yolluk ve besleyici gibi kısımlar kesilerek külçe infiltrasyona hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.4. Numune hazırlama için kullanılan metal kalıp.

Tuz parçacıkları ve bor karbür tozları belirlenen miktarlarda karıştırılarak kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Daha sonra alüminyum külçe de tuz ve bor karbür karışımının üzerine yerleştirilmiş ve kalıp kapatılmıştır. Kalıp fırına konulduktan

sonra fırının ağzı kapatılarak vakum altında eritme işleminin gerçekleşmesi beklenmiştir. İnfiltrasyon için gerekli sıcaklığa ulaşip ulaşmadığı fırın kontrol panelinden sürekli olarak kontrol edilmiştir. Gereken sıcaklığa ulaşan kalıp içerisine kontrol vanaları yardımıyla 2 bar basınçtaki argon gazı 1 dakika boyunca uygulanmış ve kalıp fırın içerisinden çıkartılarak soğumaya bırakılmıştır. İnfiltrasyon işlemi yapılan numune, kalıbın soğuması beklendikten sonra kalıp açılarak, kalıbın içerisinden alınmıştır. İnfiltrasyonla üretilen, tuz parçacıklarını da içeren kompozit blok Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Kalıptan çıkarılan numunelerin alt ve üst kısmındaki düzensizlikler kesilmiş, dış çap kısmındaki düzensizlikler de torna ile işlenerek numuneler diğer deneysel aşamalara hazır hale getirilmiştir. Ayrıca mekanik testlere uygun standart boyutlu numuneler için tekrar boyutlandırma yapılmıştır.



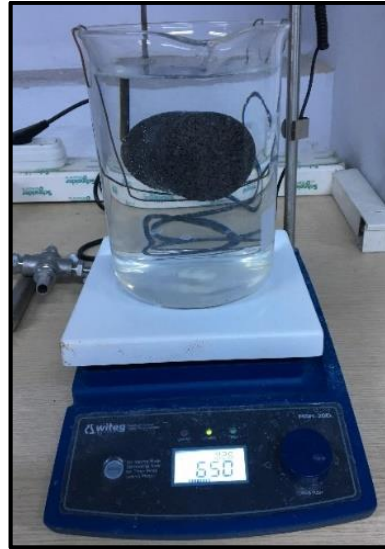
Şekil 4.5. İnfiltrasyon işlemi sonrasında kalıptan çıkartılmış ve şekillendirilmemiş haldeki kompozit blok.

Döküm sonrasında yapı içinde kalan NaCl taneleri daha sonra uygulanan çözündürme işlemi ile bünyeden alınmış ve köpük hücre yapısı oluşturulmuştur. Çözündürme işlemi için numuneler elektrikli ısıtma ve manyetik karıştırma yapan çözündürme makinasında 2 litre su içerisine Şekil 4.6.'de gösterilen şekilde bırakılmıştır. Çözündürme işleminin hızını arttırmak için su 90°C' ye ısıtılmıştır. Her bir numune için 1 saat standart çözündürme süresi uygulanmıştır. İlk 30 dakika sonrasında su değiştirilerek, suyun çözme yeteneği artırılmıştır. Çözündürme süresi sonunda tuzlar çözünerek granüllerin yerinde boşlukların olduğu gözenekli bir yapı elde edilir.

Deneysel çalışmalarda %5' e kadar çeşitli oranlarda takviye oranları tercih edilmiştir. Elde edilen her bir seriyi analiz etmek için üç farklı kompozit blok numune üretilmiştir. Deney planı Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. İnfiltrasyon yöntemiyle üretilen numuneler ve takviye oranları.

Malzeme kodu	B <sub>4</sub> C ekleme oranı	Ergitme sıcaklığı ve bekleme süresi	Uygulanan basınç ve uygulama süresi
F0	%0	715 °C / 1,5 saat	2 bar / 1 dakika
F0,25	%0,25		
F0,5	%0,5		
F0,75	%0,75		
F1	%1		
F1,25	%1,25		
F1,5	%1,5		
F1,75	%1,75		
F2	%2		
F2,5	%2,5		
F3	%3		
F3,5	%3,5		
F4	%4		
F4,5	%4,5		
F5	%5		



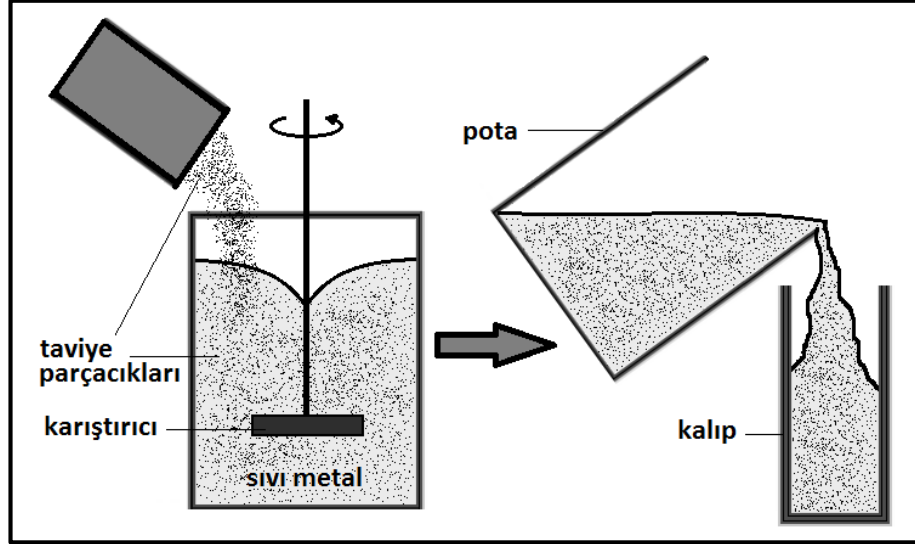
Şekil 4.6. Manyetik ısıtma ve karıştırma makinesi içerisinde NaCl çözündürülmesinin gösterimi.

#### 4.2.2. Karıştırılmalı Döküm Yöntemi ile Numunelerin Üretimi

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin katı-hal üretim yöntemleri toz metalurjisi, eş eksenli presleme, izostatik presleme, ekstrüzyon ve püskürtmeyle şekillendirme (spray forming) gibi yöntemleri içerir. Bu yöntemler, parçaların boyut ve karmaşıklığındaki kısıtlamalar ve yüksek işlem maliyetlerinden dolayı dezavantajlıdır [69]. Karıştırma döküm ve karma döküm gibi bazı sıvı-hal yöntemleri basitlik, parçaları yakın şekle üretebilme ve düşük işlem maliyetleri, matris yapısını daha kolay kontrol etmek ve parça boyut ve karmaşıklığındaki esneklik bakımından önemli avantajlara sahiptirler [39]. Karıştırma döküm yönteminin en büyük avantajı ise seri üretimde uygulanabilirliğidir. Diğer metal matrisli kompozit üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında, karıştırma döküm 1/3 ila 1/10'a kadar daha düşük maliyet sağlar. Düşük maliyet sebebiyle ticari olarak en yaygın kullanılan yöntemdir [54]. Karıştırma döküm işleminde, takviye parçacıklar ergiyik metal içerisine ilave edilirler ve elde edilen karışım belirli bir teknikle karıştırılır. Mekanik karıştırma bu işlemin ana unsurudur ve böylece oluşan girdap etkisi parçacıkların yapıya dağılmasını sağlar [39]. Karıştırılan sıvı metale takviye parçacıklar verimli olarak dağıldığında elde edilen bu karışım istenilen bir kalıba dökülebilir [70]. Karıştırma döküm sistemi şematik olarak Şekil.4.7 üzerinde gösterilmektedir.

Bu çalışmanın ikinci aşamasında, infiltrasyon yöntemiyle üretilmiş olan köpük malzemelere yakın gözenekliliğe sahip fakat düzenli gözenek yapısına sahip kompozit malzemeler üretilmek üzere bir karıştırma döküm sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan karıştırma döküm sisteminin üretimi, montajı, çalıştırılması ve bunun yanında bu sistem üzerinde döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8'de üretimi amaçlanan makinanın 3 boyutlu tasarımı ve geniş ölçüde boyutları gösterilmektedir. Karıştırma döküm sistemi temelde dış iskelet üzerine oturtulmuş olan rezistanslı ısıtma ocağı, üst kısımda dikey eksenle hareket edebilen karıştırma sistemi ve gerekli elektrik bağlantılarının konumlandırıldığı bir kontrol kutusundan oluşmaktadır. Şekil 4.9'da montajı yapılmış ve döküme hazır olan karıştırılmalı döküm sistemi gösterilmektedir.

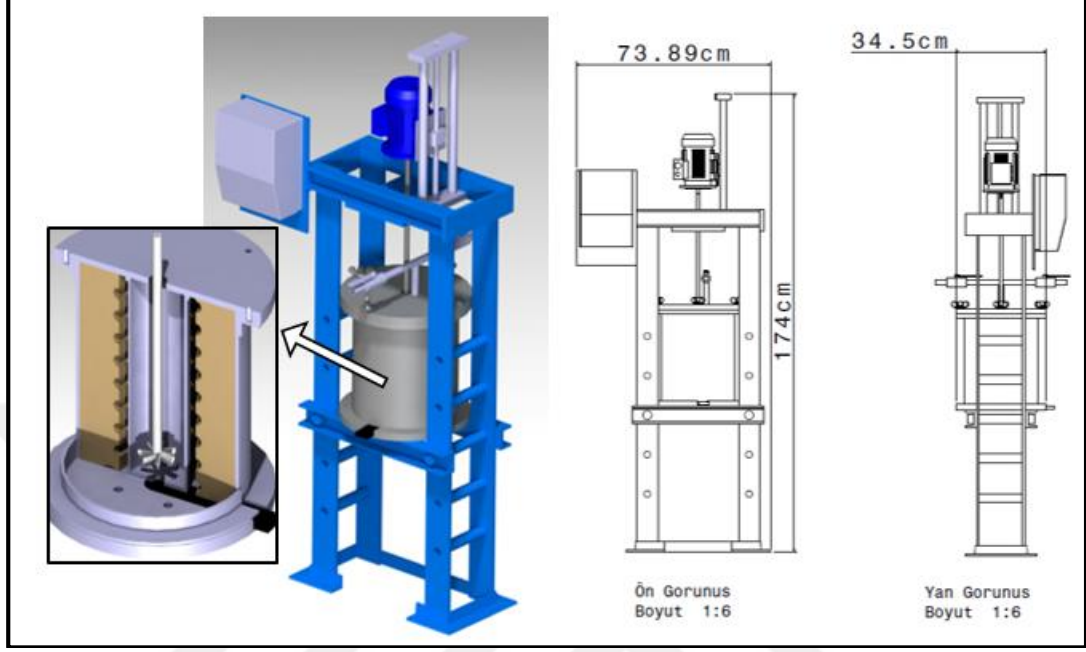




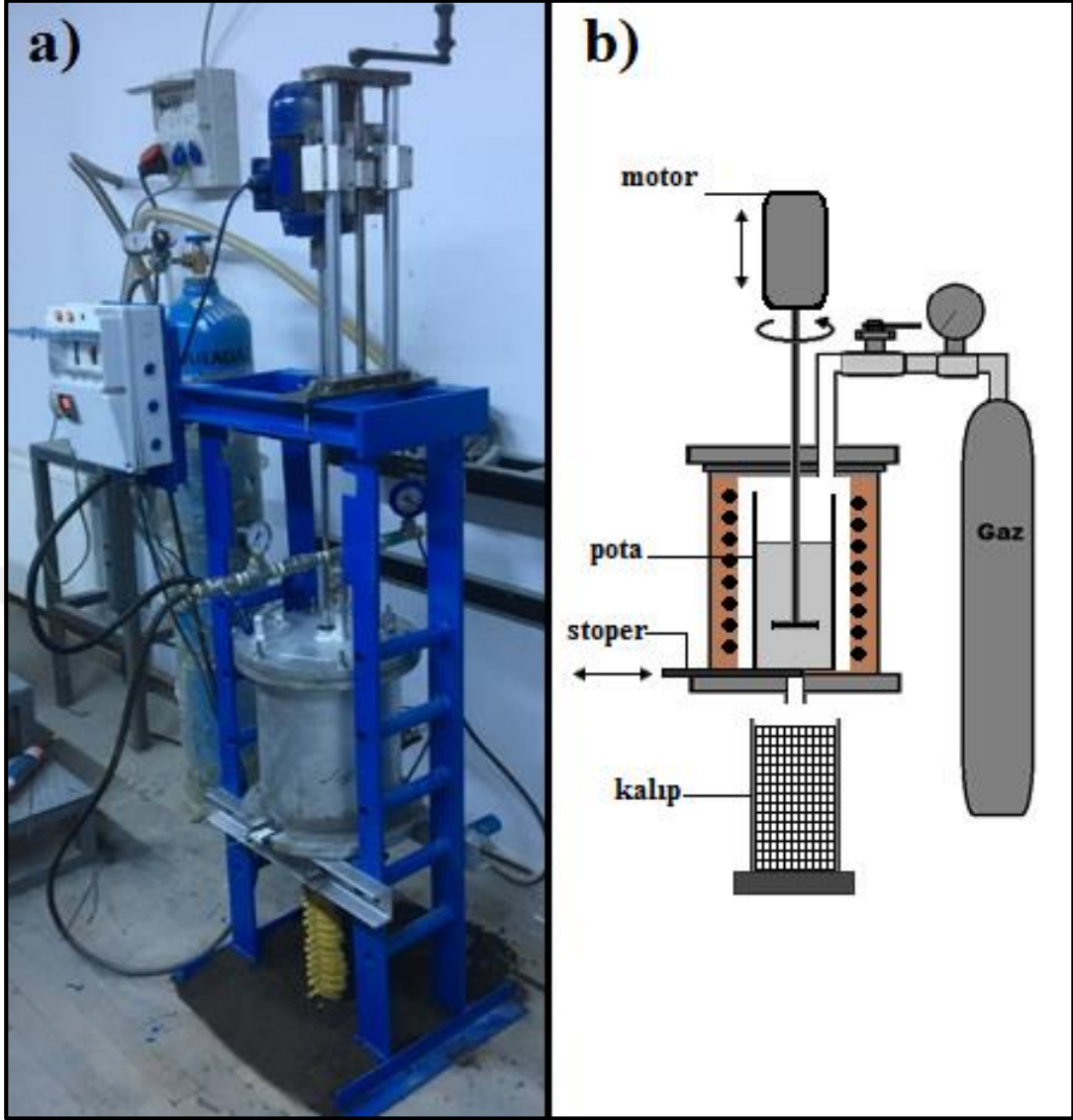
Şekil 4.7. Karıştırma işleminin şematik görünümü [70].

Temel işlem olan ergime 2,4 kg kapasiteli ve 6 mm et kalınlığına sahip 304 kalite paslanmaz çelik pota kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Pota her döküm öncesinde temizlenmiş ve iç yüzeylerinde sıvı metal yapışmasını ve muhtemel difüzyonu önlemek için kübik-bor-nitrür sıvı spreyle kaplanmıştır. Ergitme işlemi için, bir elektrik direnç ocağı tasarlanmıştır. Pota, tasarlanan 3.3 kW gücünde, Hycast 95 izole beton ile yalıtılmış ergitme ocağının ortasına yerleştirilmiştir. Isıtma işlemi, 3.3 kW gücünde ısı çıkışı gerçekleştiren, 30m uzunluğunda ve 2mm çapında A1 kalite rezistans teller kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümü için K tipi bir ısı çifti kullanılmıştır. Kullanılan sıcaklık sensörü potanın üst kısmında konumlandığından döküm öncesinde fırının kontrol ünitesinden ayarlanan sıcaklığı ile alt kısımda meydana gelen sıcaklıklar manuel bir sıcaklık-ölçer ile belirli aralıklarda ölçülerek ergime sıcaklığına yakın olan sıcaklık bölgesinde yaklaşık 8°C bir sıcaklık farkı değeri elde edilmiştir. Bu değer sıcaklık kontrolün sağlandığı Gemo dt106 PID sıcaklık kontrol cihazı üzerine “offset” değeri olarak girilmiştir. Ergime işlemi gerçekleştikten sonra, karıştırma sistemine bağlı paslanmaz çelik milin yaklaşık 300 devir/dakika hızda çevrilmesiyle ergiyik metal karıştırılır. Milin uç kısmında yine paslanmaz çelik bir karıştırıcı eklenmiştir ve bu karıştırıcı da metalle teması engellemek için kübik-bor-nitrür spreyle kaplanmıştır. Karıştırma sonrasında fırının en alt kısmında bulunan grafit stoperin yatay ekseninde çekilmesiyle sıvı metal önceden hazırlanmış ve ön-

ısıtılmış olan kabuk (shell) maça kumu yer tutucular arasındaki kalıp boşluğunu doldurmaktadır.



Şekil 4.8. Tasarlanan karıştırma döküm sisteminin gösterimi.



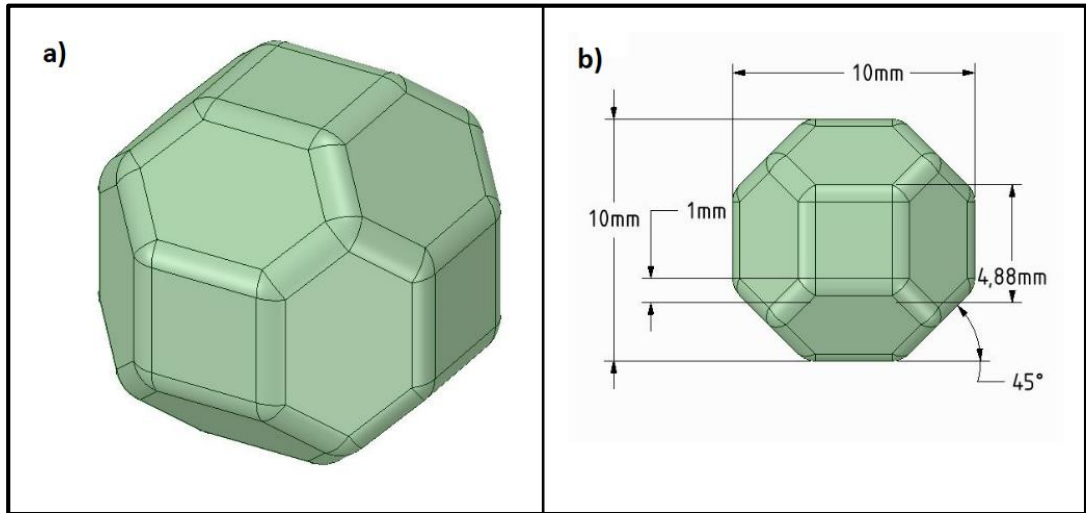
Şekil 4.9. Üretime hazır haldeki karıştırma döküm sisteminin gösterimi, a) Montajı yapılan sistem b) Karıştırma döküm sisteminin şematik gösterimi.

Bu deneysel çalışmada karıştırma döküm sistemi kullanılarak, ağırlıkça %0, %0,5 ve %1 olmak üzere üç farklı oranlarda takviye bor karbür tozu, A360 malzemeye ilave edilmiş ve her bir seriden 3 adet basma numunesi üretilmiştir. Şekil 4.10. bor karbür tozu ve alüminyum külçeleri ve de aynı zamanda bunların ağırlıkça oranlarının belirlenmesini göstermektedir.

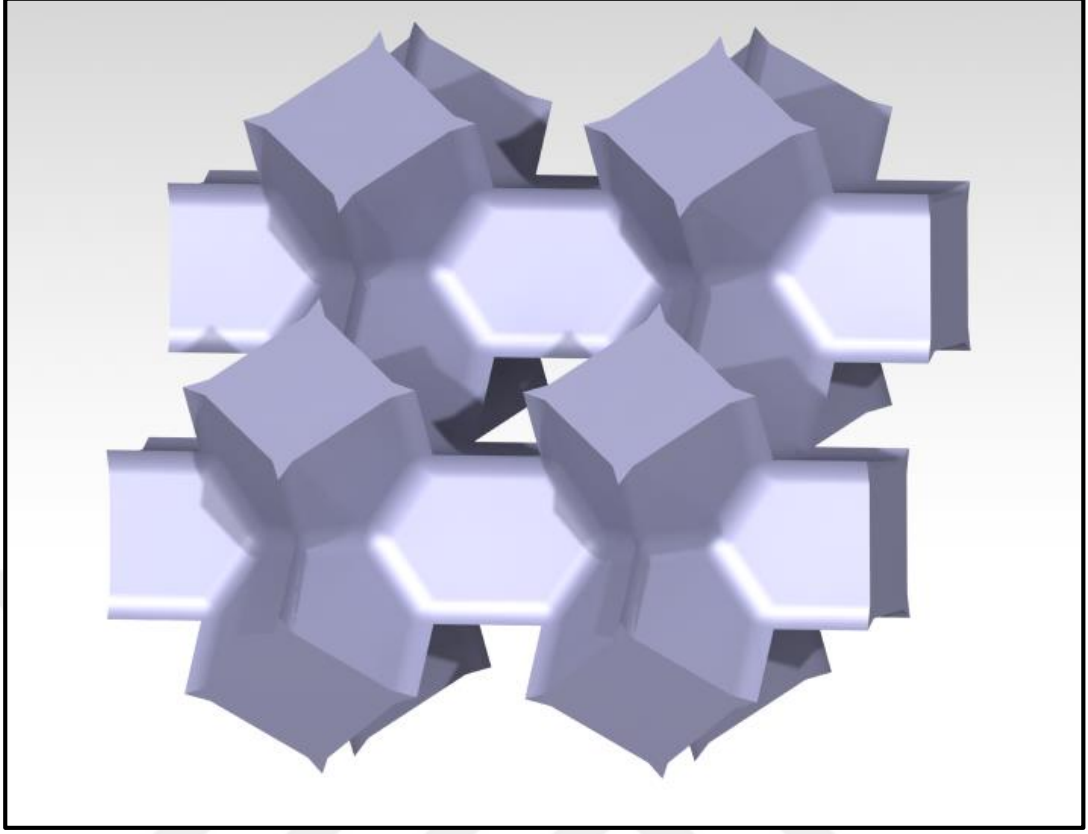


Şekil 4.10. A360 külçeden kesilen metal ve bor karbür tozları.

Düzenli gözenek yapısını sağlayacak olan 10 mm genişlik ve yüksekliğe sahip olan kübik bir hücre geometrisi tasarlanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen hücrenin genel görünümü ve ölçü detayları Şekil 4.11’de verilmiştir. Bu gözeneklerin yan yana yerleştirilmesi ile elde edilecek yapının negatifi olarak oluşması hedeflenen gözenekli malzemenin yapısı Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

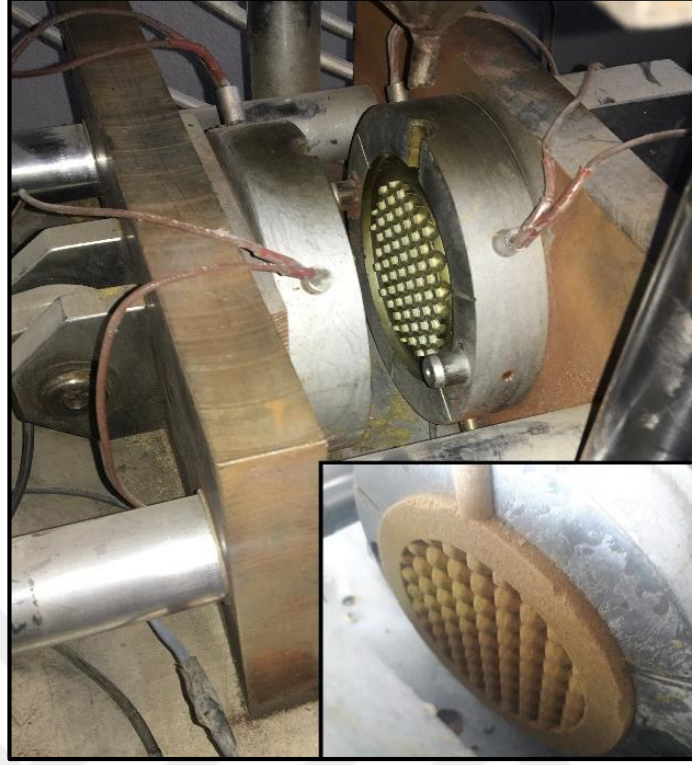


Şekil 4.11. Yer tutucu hücre geometrisi, a) Perspektif görünümü, b) Boyutları.



Şekil 4.12. Yer tutucu hücreler arasında kalan ve üretimi hedeflenen geometri.

Yer tutucu maçaları üretmek için yatay ekseninde hareket edebilen bir kalıp sistemi tasarlanmış ve sıcak iş takım çeliğinden üretilmiştir. Bu kalıp ile 90mm çapında ve 10 mm kalınlığında yer tutucu maçalar üretilmiştir. Kabuk maça kumlarını sıkıştırma ve ısıtma sistemi Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Maça basmak için kullanılacak kalıpta yapışma olmaması için işlem öncesinde kalıp yüzeylerine kalıp ayırıcı sprey uygulanmıştır. Maça kumlarının basılacağı kalıp, içerisine gömülmüş olan 45 W gücündeki 8 adet fişek rezistans yardımıyla ısıtılmıştır. Ardından kabuk maça kumları hava basıncı yardımıyla kalıp boşluğunu doldurmuştur. 175°C sıcaklıktaki kalıp içerisinde maça kumları içerisinde bulunan reçinenin sertleşmesiyle maça kum kabukları üretilmiştir. Düzenli gözenek yapısını elde etmek için önceden hazırlanmış olan kabuk maça kumu yer tutucular Şekil 4.14’te gösterildiği gibi üst üste dizilmiş ve hizalanmıştır. Döküm öncesinde LPG tüpüne bağlı bir ısı tabancasıyla kalıp çevresi ön-ısıtılmıştır. Bu işlem ile döküm sırasında sıvı metalin iç kanallarda katılaşmasının geciktirilmesi ve tam dolum elde edilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.13. Shell maça kumu yer tutucuların kalıp içerisinde basılarak üretilmesi.



Şekil 4.14. Shell maça kumu yer tutucuların üst üste dizilmesi.

Ergitme ve karıştırma işlemi 700 °C sıcaklıkta yapılmıştır. Ergitme gerçekleştirildikten sonra bu sıcaklıktaki karıştırma, 260 devir/dakika dönme hızında ve 1,5 dakika süre zarfında uygulanmıştır. Ergitme ve karıştırma sırasında fırının üst kısmına eklenen gaz tesisatı ve argon tüpüne bağlı flow-metre yardımıyla pota içerisine sürekli olarak argon gazı verilmiştir. Bu sayede fırın içerisinde koruyucu atmosfer oluşturulmuştur. Karıştırma dökümle elde edilen numunelerin döküm hali durumları Şekil 4.15.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Üretilen gözenekli metal malzemeler.

Karıştırma döküm yöntemi deneysel çalışmalarında %0, %0,5 ve %1 olmak üzere üç farklı bor karbür ( $B_4C$ ) ilave oranı tercih edilmiştir. Elde edilen her bir seriyi analiz etmek için yaklaşık 30cm uzunluğuna sahip bir numune üretilmiştir. Deney planı Çizelge 4.3.'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen numuneler ve takviye oranları

Malzeme Kodu	B <sub>4</sub> C Takviye Oranı
S0	%0
S0,5	%0,5
S1	%1

### 4.3. KULLANILAN ÖLÇÜM CİHAZLARI VE YÖNTEMLERİ

Köpük malzemelerin yoğunlukları ağırlık ve hacimlerinden yola çıkılarak hesaplanmıştır [71]. Aşağıdaki eşitlik köpük malzemelerin gözeneklilik oranını vermektedir;

$$P = \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_*}\right) \times 100 \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1.'deki  $P$  gözenekliliği ifade ederken  $\rho_g$  köpük malzemenin yoğunluğunu ve  $\rho_*$  bulk malzemenin yoğunluğunu ifade eder. Kesirli ifade olan  $\rho_g/\rho_*$  ise köpüğün bağıl yoğunluğu olarak tanımlanır [72]. İnfiltrasyon yöntemiyle ve karıştırma döküm yöntemiyle üretilen metal köpüklerin mikroyapılarını incelemek amacıyla kesme, zımparalama, parlatma gibi standart metalografik numune hazırlama işlemleri uygulanarak, görüntü alınacak numuneler elde edilmiştir. Parlatma işlemi sonrasında Keller olarak da bilinen [79] ve bileşimi; 95 ml saf su (H<sub>2</sub>O), 2,5 ml nitrik asit (HNO<sub>3</sub>), 1,5 ml hidroklorik asit (HCl) ve 1,0 ml hidroflorik asit (HF) olan dağlayıcı karışım kullanılarak numuneler dağlanmıştır.

Mikroyapıları tayin etmek üzere yapılan metalografik görüntüleme işlemlerinde, Clemex kamera sistemine sahip Nikon Epiphot 200 serisi optik mikroskop kullanılmıştır. Kullanılan görüntüleme sistemi Şekil 4.16. üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca görüntüler üzerinde yapılan görüntü işleme işlemleri Clemex Vision Lite yazılımı kullanılarak yapılmıştır.





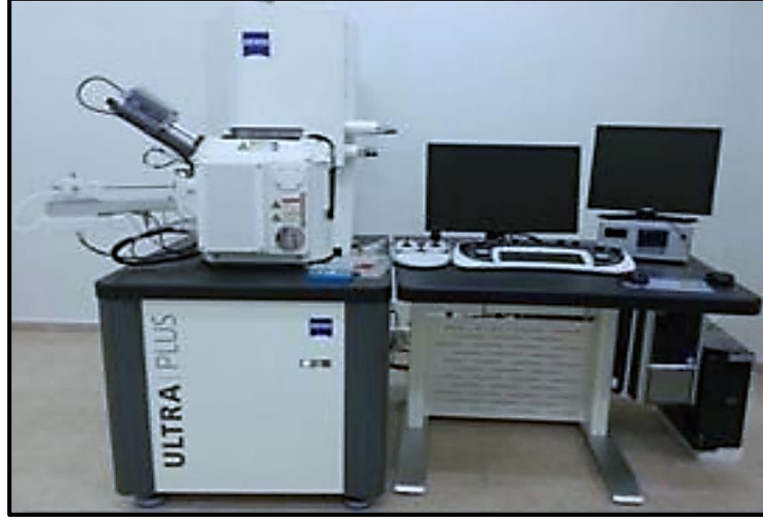
Şekil 4.16. Nikon Epiphot 200 optik mikroskop cihazının görünümü [73].

Sertlik testleri Shimadzu mikro sertlik ölçüm cihazında HV 0,5 test yükü, 4,903 N test kuvveti ile 20 saniye süre ile uygulanarak ölçülmüştür. Deneysel doğruluk için her bir test 3 kez tekrar edilmiş ve aritmetik ortalamaları alınmıştır. Sertlik ölçümleri için kullanılan cihaz Şekil 4.17 üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 4.17. Shimadzu mikro sertlik cihazı [74].

Detaylı mikroyapı çalışmaları Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü bünyesinde bulunan Bruker X Flash 6/10 enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile desteklenmiş Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.18.'de SEM cihazının detaylı görünümü mevcuttur.



Şekil 4.18. Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem taramalı elektron mikroskobu [75].

Numunelerin içerisindeki içerik ve intermetaliklerin ölçülmesi için yine Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü bünyesinde bulunan Rigaku Ultima IV (Cu K $\alpha$  radiation- $\lambda$ :1.54Å) X-ışını kırınım cihazı (XRD) kullanılmıştır. Taramalar 3°/min hızında gerçekleştirilmiştir. Kırınım dokusu 2 theta (Bragg angle) 10° ve 90° aralığında elde edilmiştir. Şekil 4.19 üzerinde analizlerde kullanılan X-ışını kırınım cihazı gösterilmektedir.



Şekil 4.19. Rigaku Ultima IV X-ışını kırınım cihazı [76].

Basma testleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü bünyesinde bulunan Zwick/Roell 600kN mekanik test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Basma testlerinin gerçekleştirildiği cihaz Şekil 4.20. üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 4.20. Zwick/Roell 600kN mekanik test cihazının görünümü [77].

Basma testleri ISO 13314 [78] gözenekli malzemelerin uluslararası mekanik test standartları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler ilgili standarda uygun olarak, çap 50 mm ve boy 80 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Basma çenesinin hızı yine aynı standarda uyularak  $0.005 \text{ s}^{-1}$  olarak belirlenmiştir.

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Deney sonuçlarını daha iyi yorumlayabilmek için numuneler harf kodları ile kodlanmıştır. Kodlamanın ilk kısmı üretim yöntemini belirten bir harf kodu ile belirlenmiştir. İnfiltrasyon yöntemini ifade etmek için “F” harf kodu kullanılırken (Çizelge 4.2.) karıştırma döküm yöntemiyle üretilmiş numuneler “S” harfi ile kodlanmıştır (Çizelge 4.3.). İkinci kısımda ise üretim esnasında numunelere eklenen ağırlıkça bor karbür oranı ondalık olarak yazılmıştır. Buna göre örneğin; F0,75 olarak kodlanan numune, infiltrasyon yöntemiyle üretilmiş ve üretimi sırasında ağırlıkça %0,75 oranında bor karbür eklenmiş numuneyi ifade etmektedir.

#### 5.1. GÖZENEKLİLİK DEĞERLERİ

Metal köpüklerin gözeneklilikleri, hacimce oranlarının yüzdelik ifadesi olarak bilinmektedir [71]. Köpük numunelerin son ağırlıkları, homojen katı haldeki alüminyum malzemenin teorik yoğunluğundan hesaplanan ağırlık ve buna takviye için eklenen seramik parçacıkların ağırlığının da eklenmesiyle elde edilen toplam ağırlığa bölüldüğünde ve yüzde olarak ifade edildiğinde gözeneklilik oranı elde edilmiş olunur. Çizelge 5.1’de infiltrasyon ve karıştırma dökümle üretilen numunelerin gözeneklilik oranları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde elde edilen metal köpüklerin gözeneklilik oranları ortalama yaklaşık %65-70 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Al, Zn, Pb ve Cu ana malzemeler kullanılarak yer tutucular etrafına yapılan döküm yöntemiyle üretilen metal köpüklerin gözenekliliklerinin %65 veya daha düşük olduğu bildirilmiştir [57, 60]. B<sub>4</sub>C eklenmesinin elde edilen gözeneklilik değerleri üzerine etkili olduğu görülmüştür. Çizelge 5.1’den görüleceği üzere %0,25-2 aralığında B<sub>4</sub>C ilavesiyle gözenekliliğin azaldığı, %2-4,5 aralığında B<sub>4</sub>C ilave edilen numunelerde gözenekliliğin ise takviyesiz numunenin gözenekliliğine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu farklar kullanılan NaCl yer tutucu parçacıkların standart bir morfolojiye sahip

olmamalarından ve 1.8-2.8mm aralığında değişen parçacık boyutlarına sahip olduklarından kaynaklanmaktadır. Literatürdeki diğer bir çalışmada AlSi7Mg0.3 alaşımından 1,2–5mm aralığında parçacık boyutuna sahip NaCl yer tutucu parçacıklar kullanılarak infiltrasyon yöntemiyle %57 ile %68 oranında değişiklik gösteren gözenekliliğe sahip açık gözenekli metal köpükler üretilmiştir [66]. Numunelerden elde edilen veriler incelendiğinde, deney sonuçları literatürde farklılık gösteren gözeneklilik sonuçlarıyla uyumludur [57, 60, 66]. Ayrıca İnfiltrasyon yöntemiyle üretilen Al/NaCl kompakt malzeme içerisinde sıvı metalin yüzey çekme gerilmeleri sebebiyle tuz parçacıklarını tam olarak ıslatamamasından kaynaklı az miktarda boşlukların oluştuğu bilinmektedir [60]. Boşlukların oluşmasının bir diğer sebebi ise alüminyum ve NaCl parçacıkları termal genleşme özellikleri arasındaki farktan kaynaklanabilir. NaCl termal genleşme katsayısı  $39,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  iken, AlSi10Mg alaşım için  $21 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  olduğu bilinmektedir [67, 79, 80]. Ayrıca bor karbür tozlarının tuz partikülleri etrafına sarılması bu partiküllerin boyutunu arttırması, gözeneklilikteki bu artışla sonuçlanabilir.

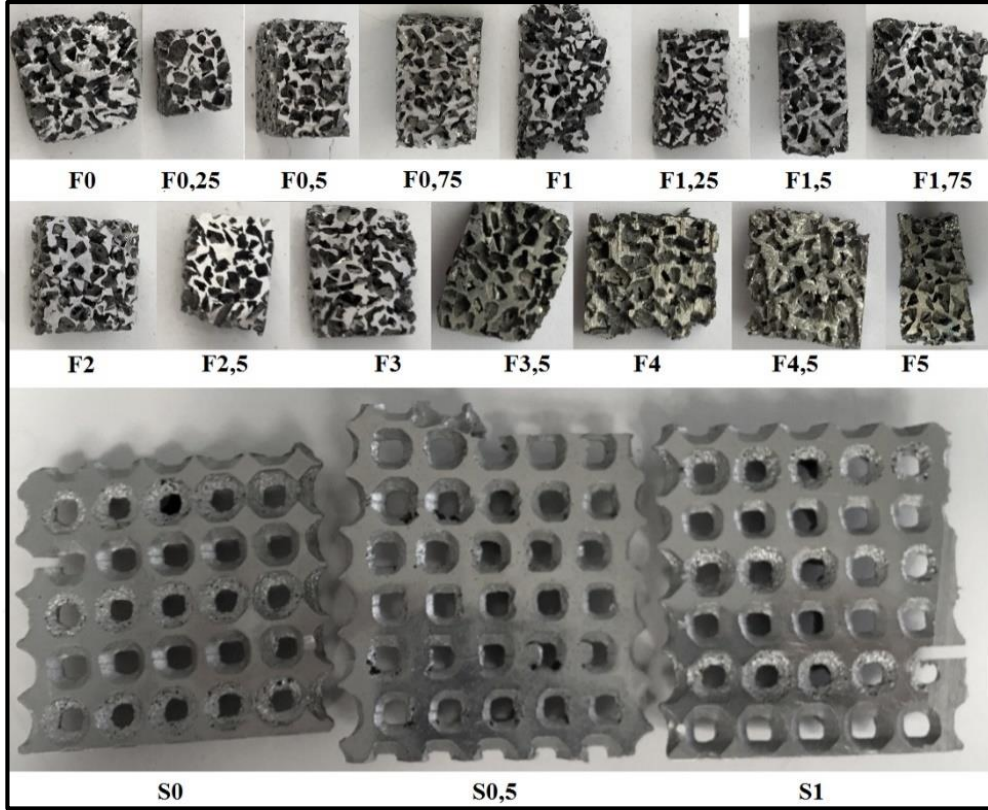
Çizelge 5.1. Üretilen numunelerin gözeneklilik sonuçları.

Malzeme Kodu	Gözeneklilik [%]	Malzeme Kodu	Gözeneklilik [%]
F0	71.73	F2,5	71.99
F0,25	70.79	F3	70.32
F0,5	63.47	F3,5	73.88
F0,75	66.8	F4	73.92
F1	64.48	F4,5	73.19
F1,25	68.62	F5	71.52
F1,5	65.3	S0	61.23
F1,75	63.1	S0,5	58.18
F2	64.24	S1	60.05

## 5.2. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

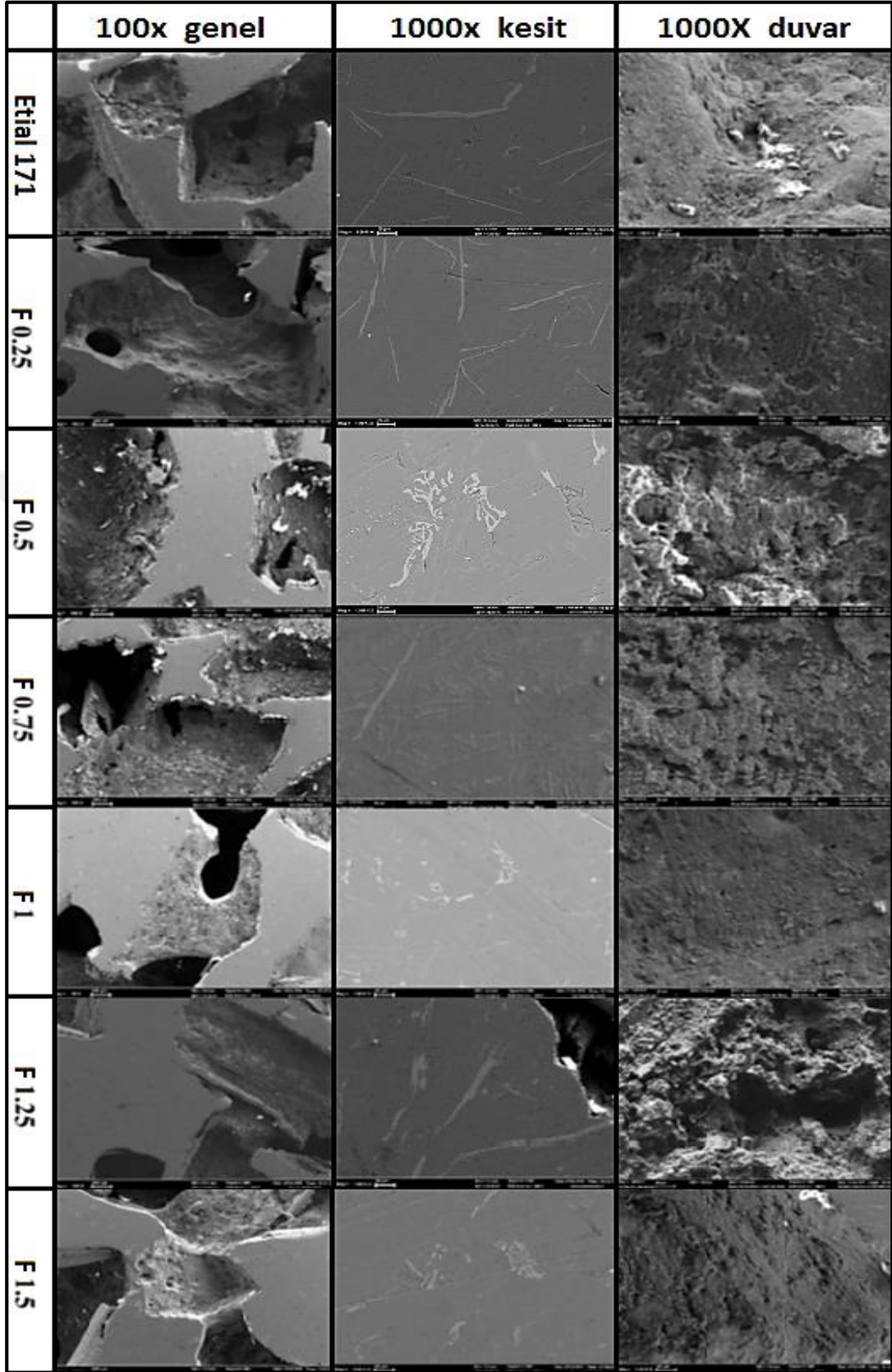
İnfiltrasyon yöntemi ve karıştırma döküm yöntemiyle üretilen düzensiz ve düzenli gözenek yapısına sahip açık gözenekli metal köpüklerin mikroyapılarını incelemek amacıyla Şekil 5.1’de makro görüntüleri verilen numuneler kullanılmıştır. Optik mikroskop görüntüleri Nikon Epiphot 200 optik mikroskop üzerinden alınmıştır.

Enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile desteklenmiş taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak ise SEM görüntüleri alınmış ve bu görüntüler üzerinde EDS nokta ve haritalama gibi analiz yöntemleriyle detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 4.3.'te verilmiştir.

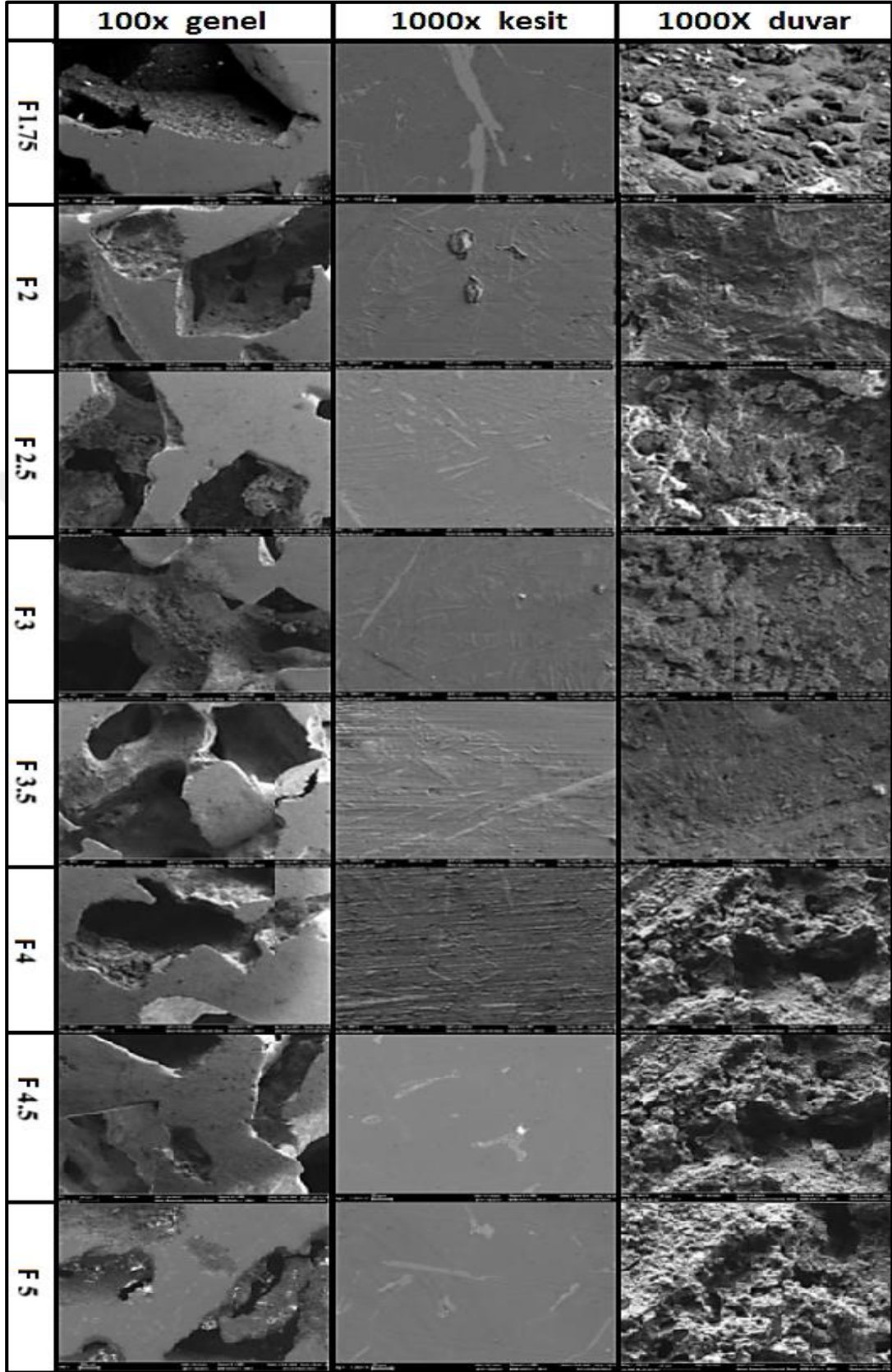


Şekil 5.1. Metalografik incelemelerde kullanılan numuneler.

İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen düzensiz gözenek yapısına sahip metal köpüklerin taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen genel görünüşleri, kiriş kesitleri ve gözenek duvarlarının görüntüleri Şekil 5.2. ve Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Kiriş kesitleri incelendiğinde, takviye oranının artmasıyla mikroyapıdaki ikincil fazlarının miktarlarında ve boyutlarında değişimleri görülmektedir. F0,25, F0,5 ve F0,75 numunelerinde mikroyapıdaki ikincil fazlarının daha küçük boyutlarda oluştuğu tespit edilmiştir. Gözenek duvarlarında ise hızlı soğumadan kaynaklı pürüzlü bir yüzey görünümü mevcuttur. Bunun yanında infiltrasyon esnasında seramik takviye parçacıkları sıvı alüminyuma yer tutucu malzemeler vasıtasıyla tutunduğundan gözenek duvarlarında bor karbür parçacıklarının mevcut olduğu gözlemlenmiştir.



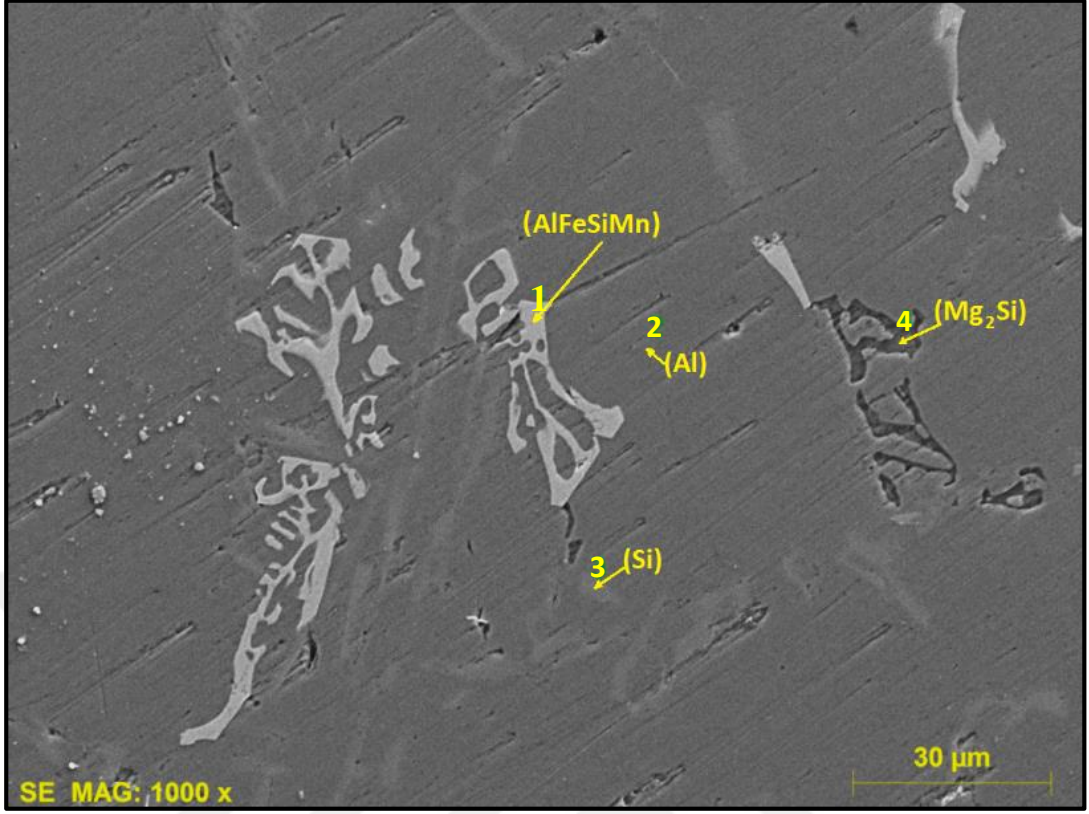
Şekil 5.2. Çeşitli ilave oranlarına sahip numunelerin SEM görüntüleri 100X (solda), giriş içyapısı 1000x büyütme (orta) ve gözenek duvarları 1000x büyütme (sağda).



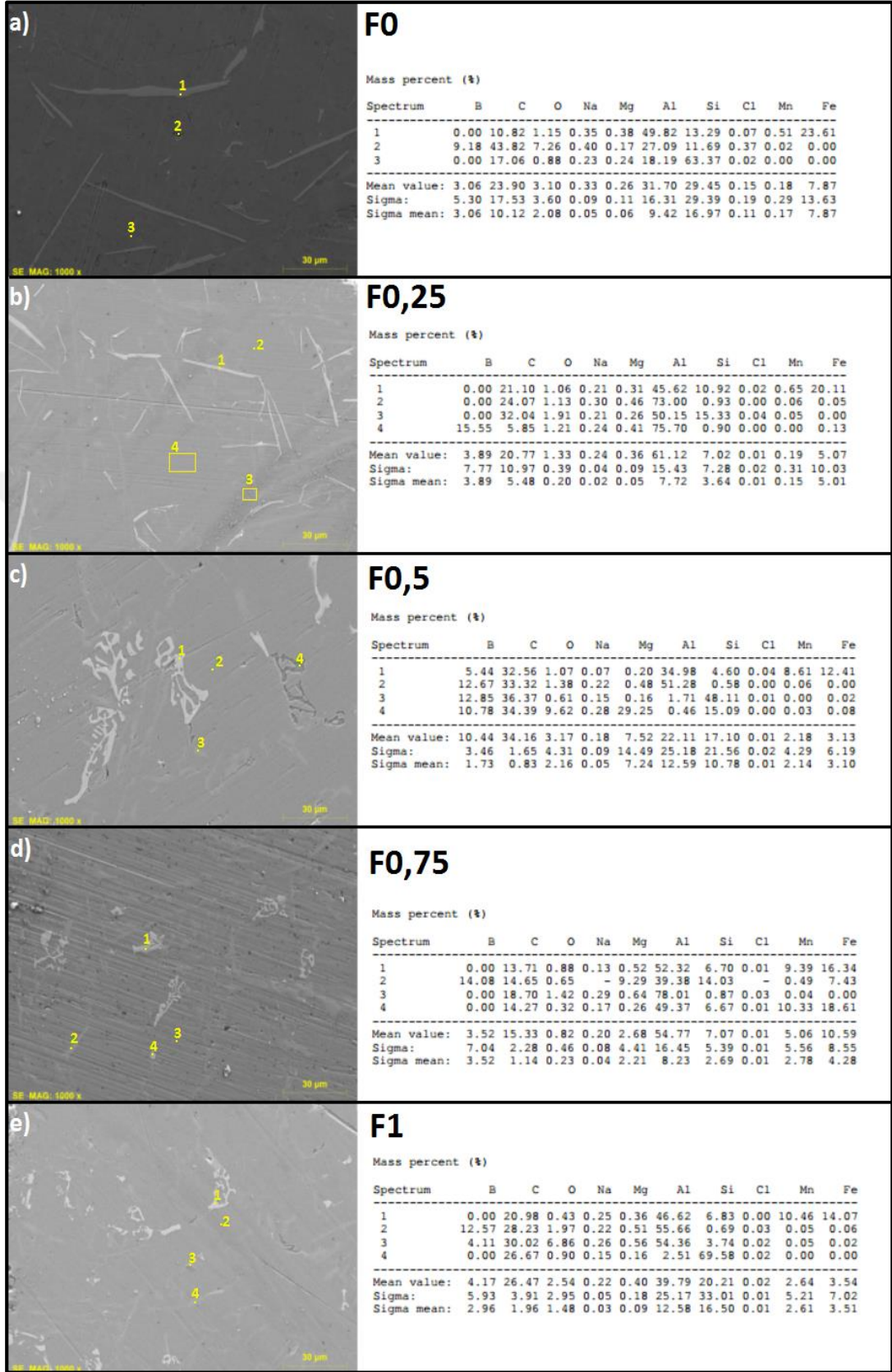
Şekil 5.3. Çeşitli ilave oranlarına sahip numunelerin SEM görüntüleri 100X (solda), giriş içyapısı 1000x büyütme (orta) ve gözenek duvarları 1000x büyütme (sağda).



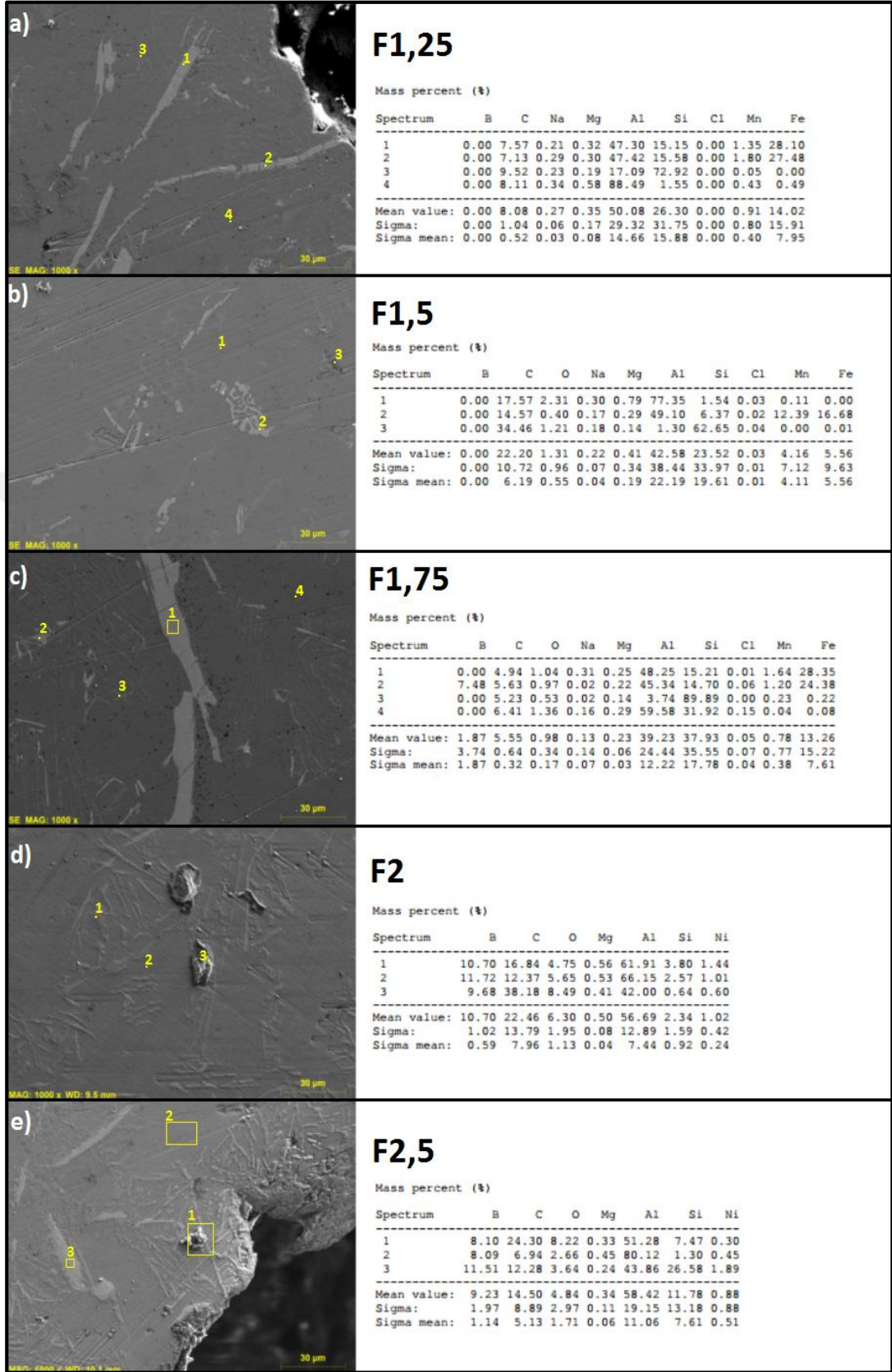
Numunelerden elde edilen SEM görüntüleri üzerinde EDS nokta ve haritalama gibi analiz yöntemleriyle detaylı analizler yapılmış ve mikroyapılarında meydana gelen ikincil fazlar ve intermetalikler incelenmiştir. A360 olarak da bilinen A360 alaşımlarının mikroyapısında birincil Al kristalleri, ötektik (Al+Si),  $Mg_2Si$  ve ayrıca AlFeSi ve AlFeMnSi gibi intermetalik fazlar bulunmaktadır [81–84]. Kiriş kesitleri ve gözenek duvarları daha detaylı bir incelemede bulunmak adına taramalı elektron mikroskopuna bağlı bir diğer ekipman olan enerji dağılım spektrometresi (EDS) yardımıyla analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda mikroyapıda AlFeSi, AlFeSiMn ve  $Mg_2Si$  gibi intermetaliklerin bulunduğu tespit edilmiştir. Örneğin F0,5 kodlu numunenin mikroyapısının 1000 kat büyütülmesiyle elde edilen görüntü üzerindeki bazı noktalar için EDS analizi yapılmıştır ve sonuçları Şekil 5.4. üzerinde verilmiştir. EDS analizi sonucunda elde edilen veriler aynı zamanda Şekil 5.5’de detaylı olarak verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda yapısında literatürde “çin yazısı formu” olarak ifade edilen şekle sahip AlFeSiMn intermetalliği gözlemlenmiştir ve Şekil 5.4’da 1 nolu nokta olarak belirlenmiştir. 3xx serisi döküm alaşımlarında çin yazısı formunda oluşan fazın AlFeSiMn olduğu da literatürde ifade edilmektedir [84]. Şekil 5.5.c üzerinde 1 numaralı noktadan alınan veriler incelendiğinde mikroyapıda AlFeSiMn intermetalliğinin bulunduğunu desteklediği görülmüştür. Aynı numunede Şekil 5.4. üzerindeki 4 numaralı noktada gösterildiği üzere  $Mg_2Si$  intermetalliğinin oluştuğu görülmektedir. Şekil 5.5.c üzerinde 4 numaralı noktadan alınan eşleşme sonuçlarının yapıda  $Mg_2Si$  bulunduğunu desteklediğini göstermiştir. Ayrıca Şekil 5.28’de gösterilen X-ışını kırınım deseni analizi sonuçlarına göre de yapıda  $Mg_2Si$  ( $hkl=102$ ) tespit edilmiştir. Tüm numune serilerinden elde edilen sonuçlar ve EDS analizinden elde edilen veriler sırasıyla Şekil 5.4-5.7’de gösterilmektedir.



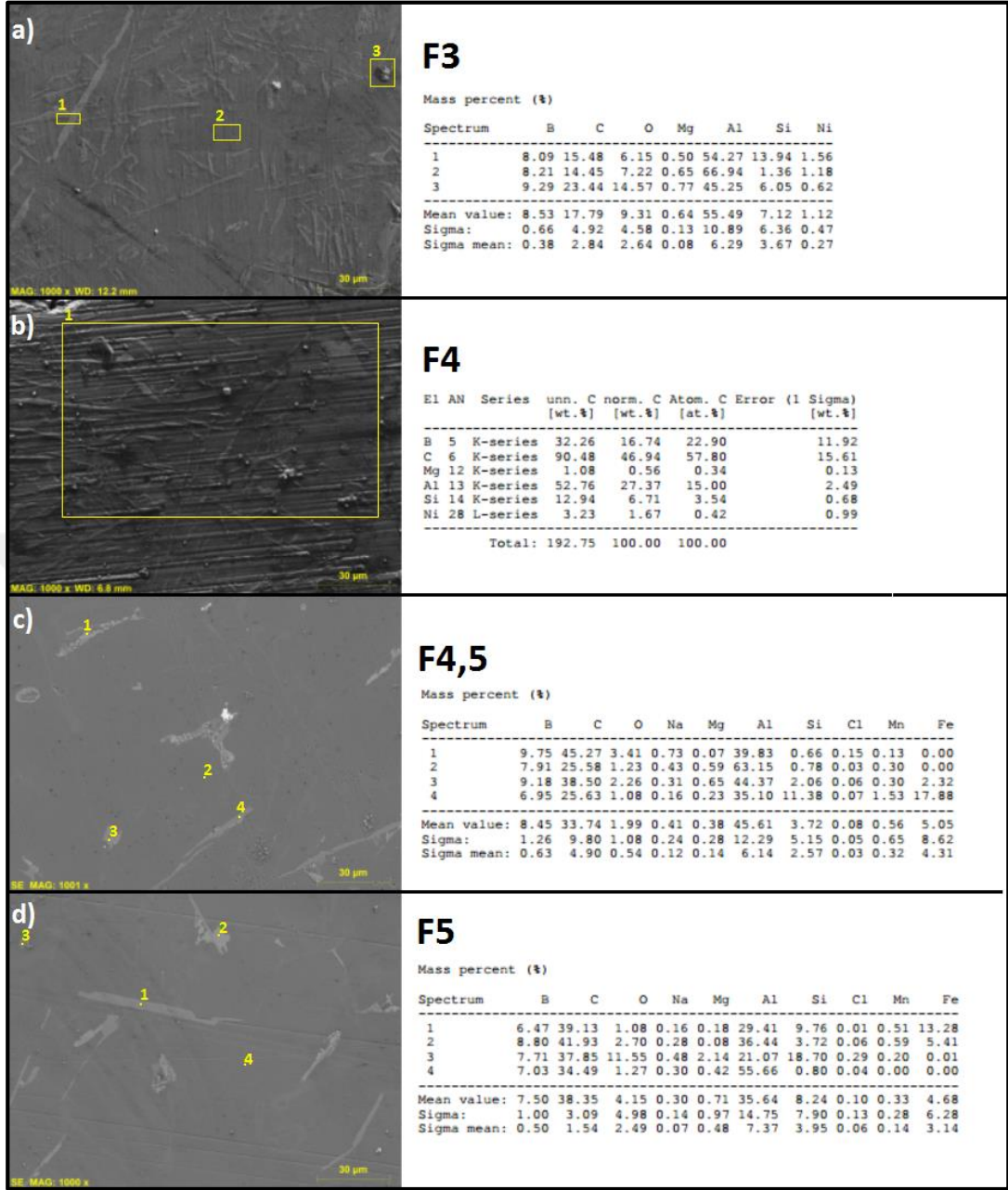
Şekil 5.4. F0,5 kodlu numune üzerinde yapılan nokta EDS analizi sonuçları.



Şekil 5.5. Numuneler üzerinde yapılan nokta EDS analizi sonuçları, a) F0 kodlu numune, b)F0,25 kodlu numune, c)F0,5 kodlu numune, d)F0,75 kodlu numune, e)F1 kodlu numune.



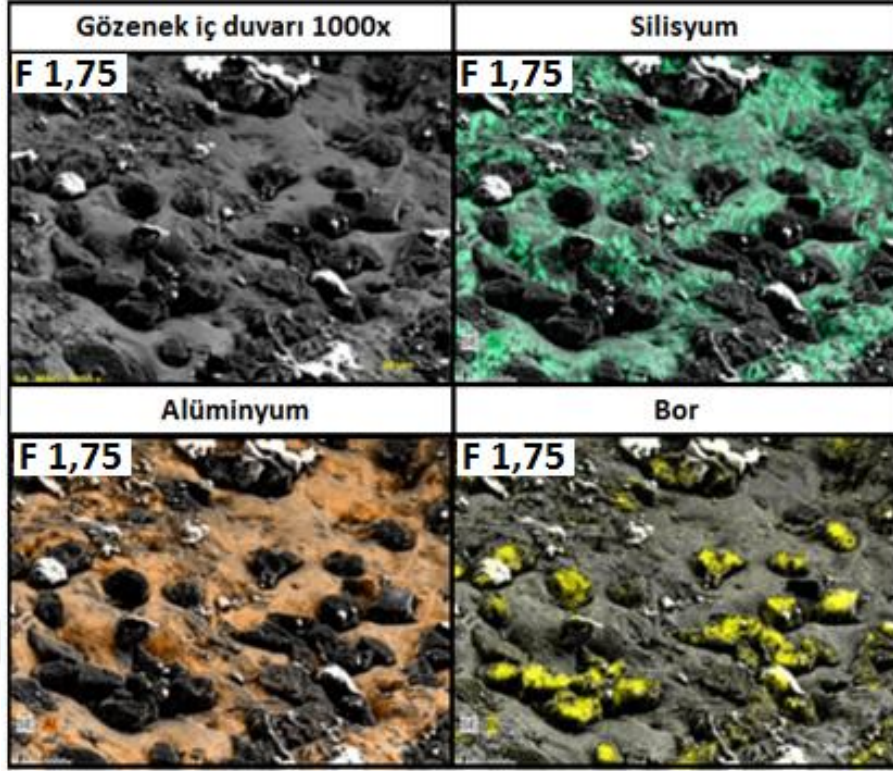
Şekil 5.6. Numuneler üzerinde yapılan nokta EDS analizi sonuçları, a)F1,25 kodlu numune, b)F1,5 kodlu numune, c)F1,75 kodlu numune, d)F2 kodlu numune, e) F2,5 kodlu numune.



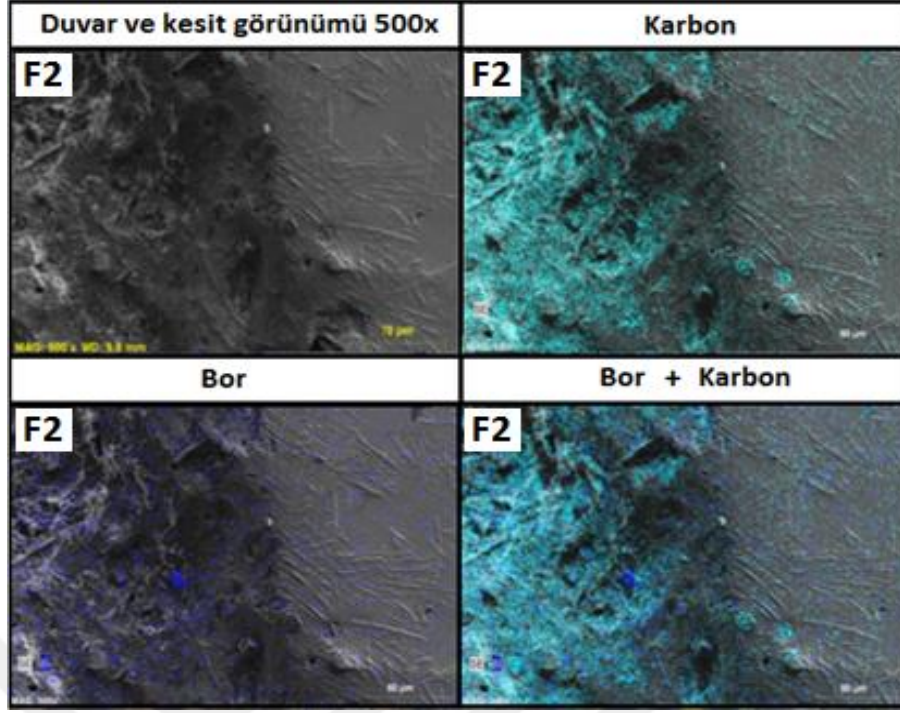
Şekil 5.7. Numuneler üzerinde yapılan nokta EDS analizi sonuçları, a)F3kodlu numune, b)F4 kodlu numune, c)F4,5 kodlu numune, d)F5 kodlu numune.

Kesit görüntüleri üzerinde yapılan analizlere ek olarak gözenek duvarlarından alınan görüntüler de EDS haritalama yöntemi ile incelenmiştir. Bu analiz sonucunda gözenek duvarlarından alınan görüntülerin alüminyum, silisyum, bor ve karbon elementlerince zenginliği değerlendirilmiştir. Örneğin F1,75 ve F2 kodlu numuneden alınan gözenek duvarı görüntüleri üzerinde yapılan EDS analizi sonucunda yapıdaki alüminyum, silisyum, bor ve karbon elementlerinin renkli haritalama metodu kullanılarak

gösterimi Şekil 5.8. ve Şekil 5.9.'da gösterilmektedir. Gözenek duvarlarının bor ve karbon açısından zengin olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun sebebi bor karbür parçacıklarının NaCl yer tutucuların yüzeyine yerleşmeleri ve matris malzemeye ilk temasın buradan gerçekleşmesidir.

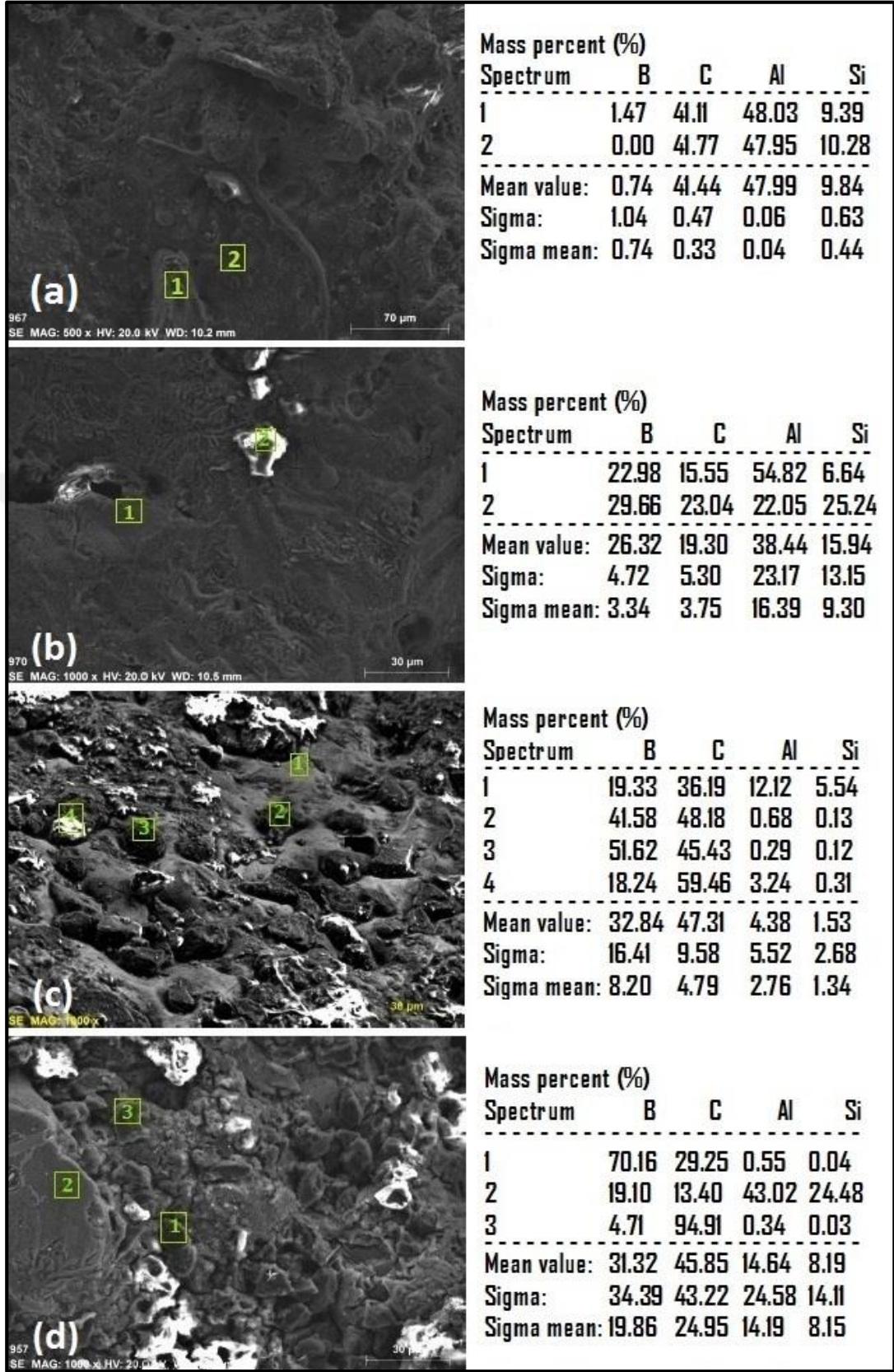


Şekil 5.8. F1,75 kodlu numunenin gözenek duvarlarındaki yapının EDS haritalama analizi sonuçları.



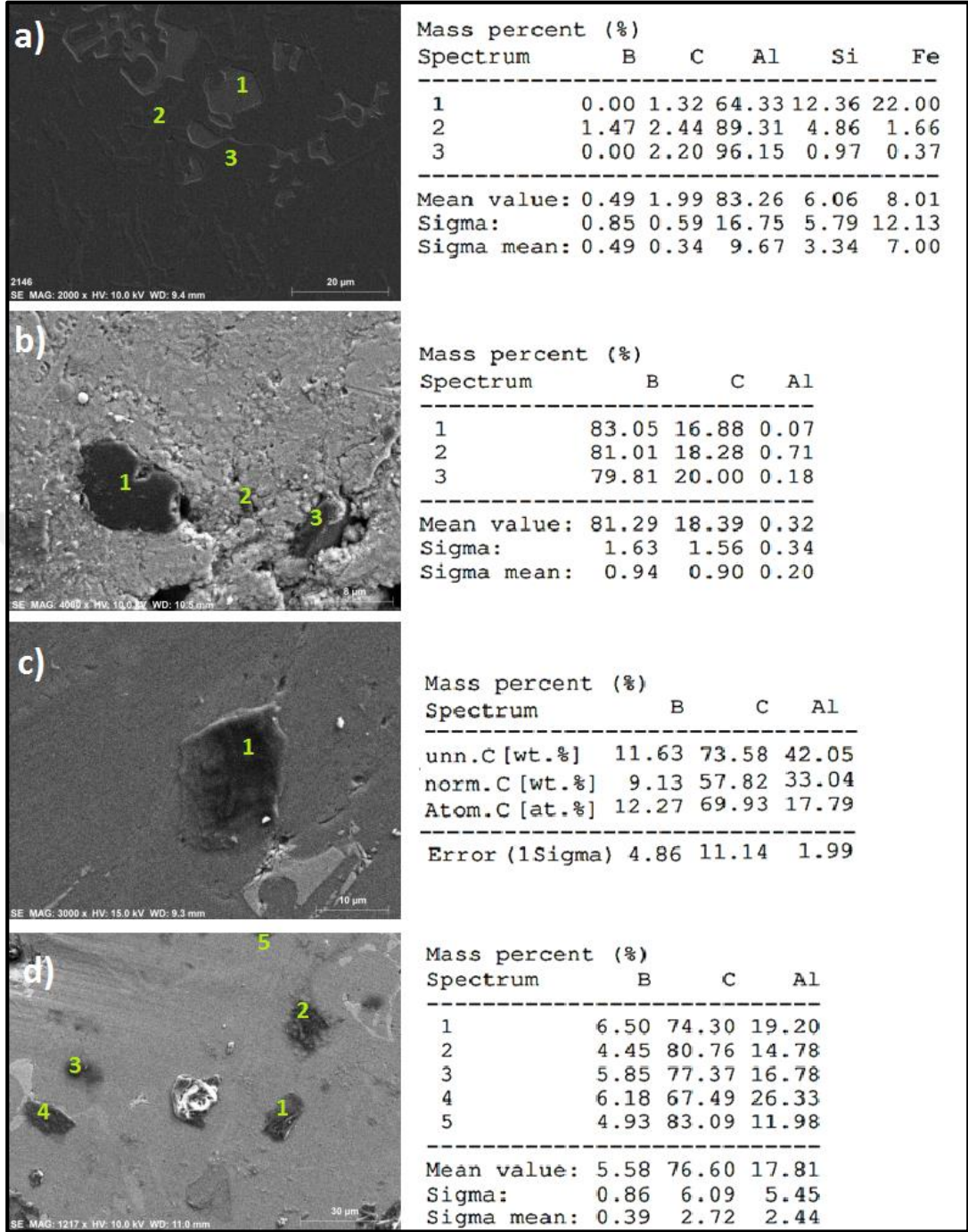
Şekil 5.9. F2 kodlu numunenin gözenek duvarı ve kiriş kesitinin EDS haritalama analizi sonuçları.

Gözenek duvarlarından alınan görüntüler üzerinde analiz gerçekleştirilen bazı numuneler ve bu numunelerden alınan EDS sonuçları Şekil 5.10. ve Şekil 5.11.'de verilmiştir. Şekil 5.10. infiltrasyon yöntemiyle üretilen numunelerin sonuçlarını içerirken Şekil 5.11. ise karıştırma döküm yöntemiyle üretilen düzenli gözenek yapısına sahip numunelerin nokta EDS analiz sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 5.10. İnfiltasyon yöntemiyle üretilen numunelerin gözenek duvarlarının EDS analizi, a) F0, b) F0,5, c) F1 d) F5.

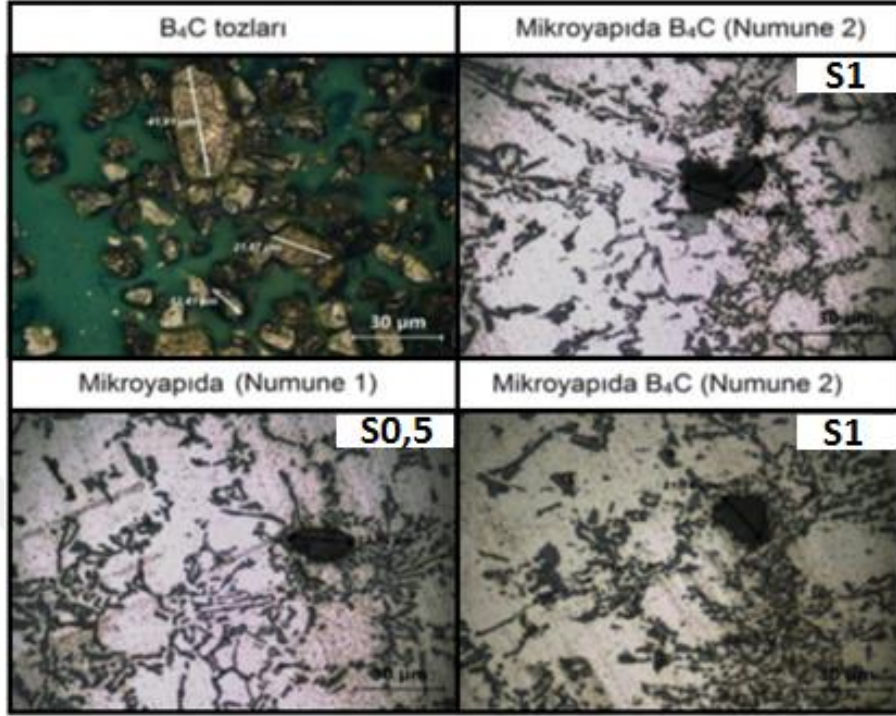




Şekil 5.11. Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen numunelerin giriş kesitlerinin EDS analizi, a) S0, b) S1, c) S0,5, d) S1

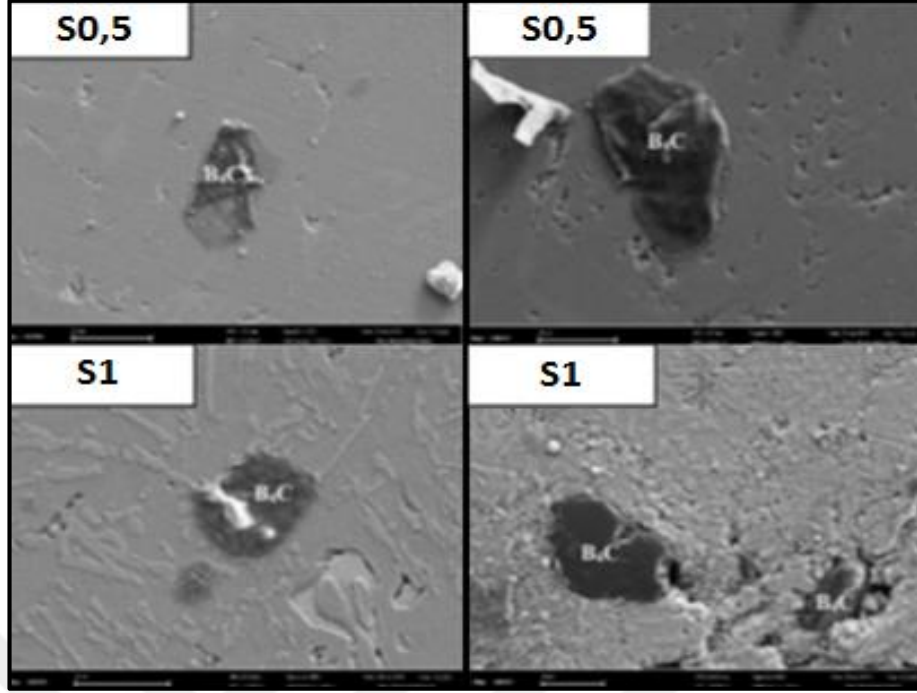
Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen numuneler üzerinde de benzer incelemeler gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikroyapılarında önceden görüntülenmiş ve ölçüleri yaklaşık olarak belirlenmiş olan bor-karbür parçacıklarının mikroyapıda bulunduğu bölgeler incelenmiştir. Numunelerin matris fazlarının mikroyapılarında kayda değer

bir farklılık gözlemlenmemiştir. Şekil 5.12.'de bor-karbür parçacıklarının ve numune mikroyapılarının optik mikroskop görüntüleri gösterilmektedir.

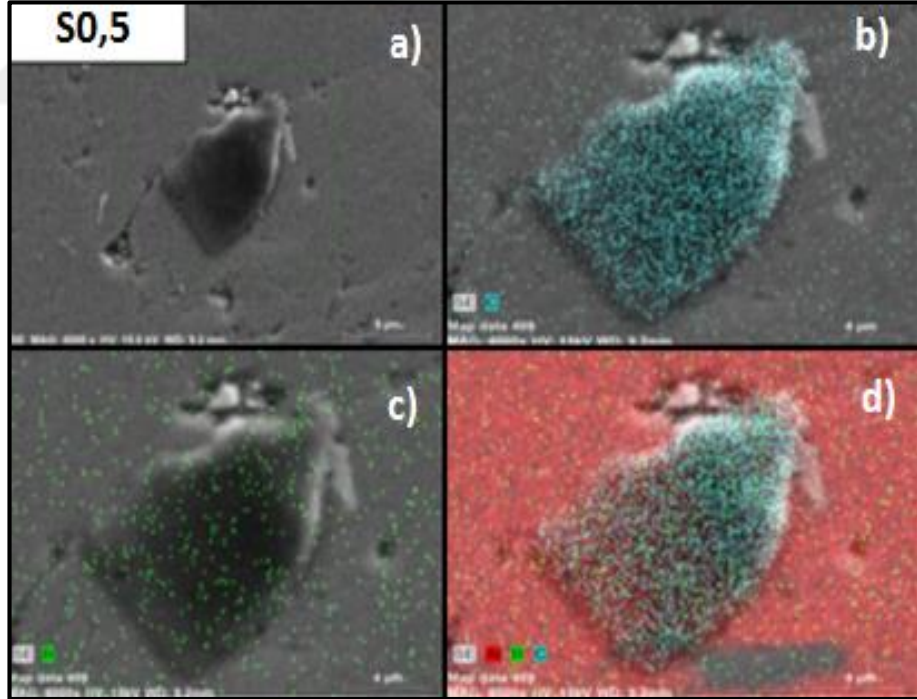


Şekil 5.12. Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen numunelerin mikroyapılarının optik mikroskopla görüntülenmesi.

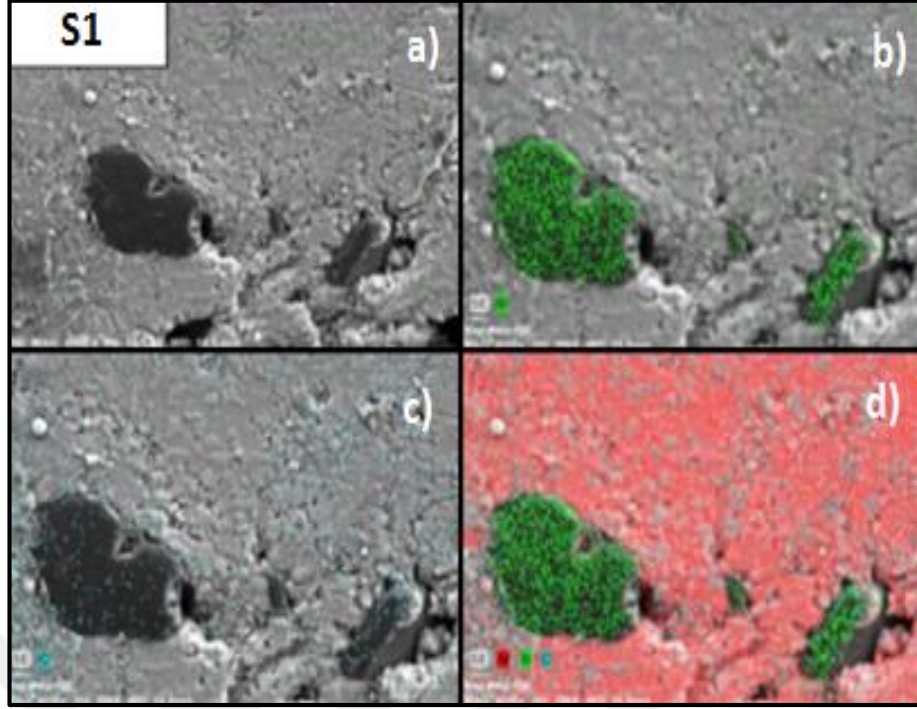
İncelenen numunelerden hazırlanan örnekler optik mikroskop incelemesinin ardından daha hassas ve kaliteli görüntüler elde etmeye olanak sağlayan ve EDS özelliği ile parçacıkların elemental tahmininin yapılmasının mümkün olduğu SEM'de incelenmiştir. Şekil 5.13.'de B<sub>4</sub>C eklenmiş olan numunelerden alınan ve seramik parçacıkların gösterildiği SEM görüntüleri mevcuttur. Bu görüntülerdeki seramik takviye parçacıklarına nokta EDS analizi yapılmış ve içerikleri yaklaşık olarak tahmin edilmiştir. Bunun yanında görüntülere uygulanan EDS analizinde elemental haritalama (mapping) yöntemiyle matris fazı ve takviye parçacıkların kesin bir şekilde farklı oldukları gözlemlenmiştir. Elemental haritalama görüntüleri Şekil 5.14. ve Şekil 5.15'de gösterilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, haritalama yöntemiyle oluşturulan renklerden B<sub>4</sub>C parçacıklarının mikroyapıda açıkça ayrıştırılabildiği görülmüştür.



Şekil 5.13. Karıştırma döküm numunelerinin mikroyapı SEM görüntüleri.

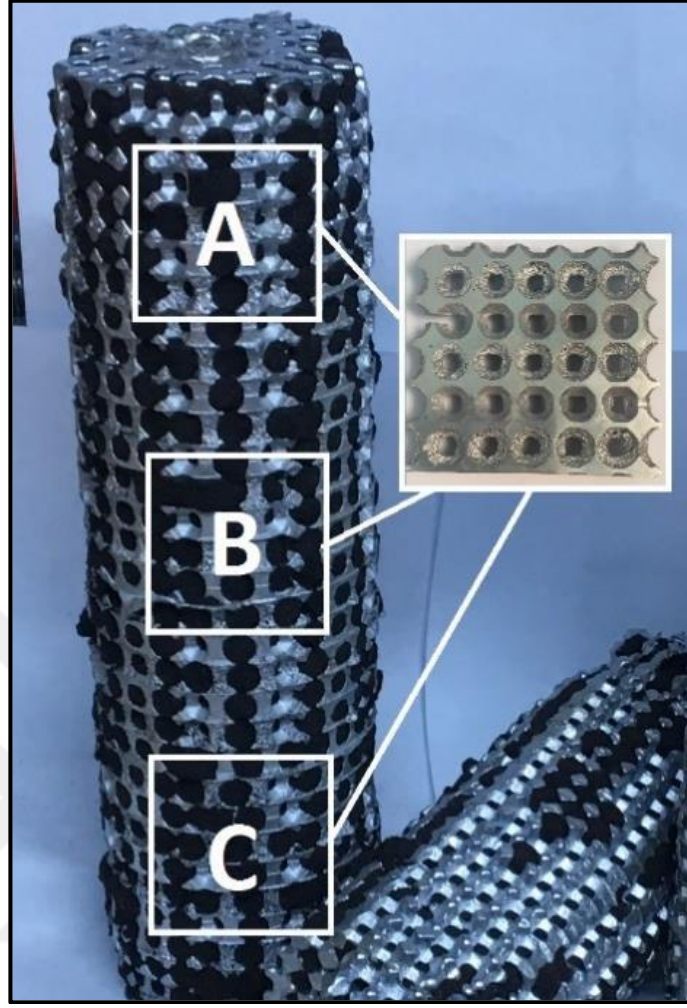


Şekil 5.14. S0,5 kodlu numunenin SEM görüntüleri ve EDS haritalama yöntemi ile analizi, a) Genel görünüm, b) Karbon, c) Bor, d) Alüminyum, Bor ve Karbon.



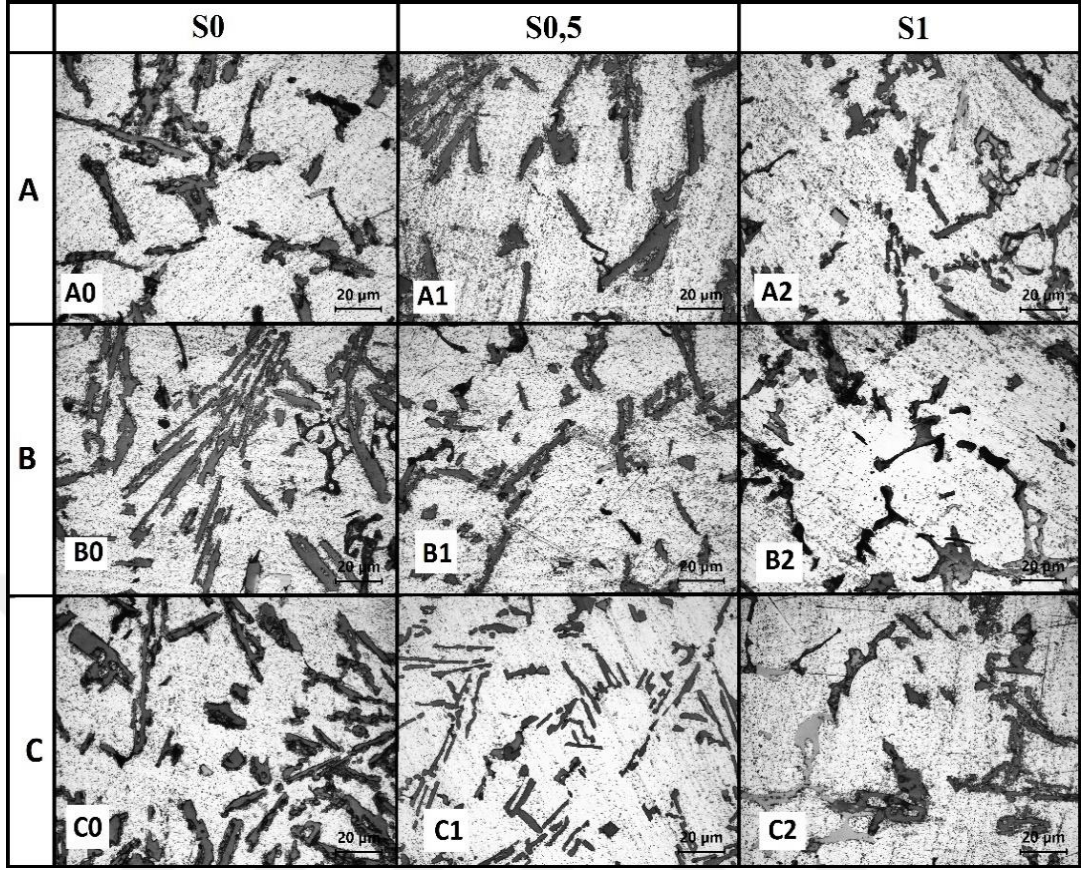
Şekil 5.15. S1 kodlu numunenin SEM görüntüleri ve EDS haritalama yöntemi ile analizi, a) Genel görünüm, b) Bor, c) Karbon, d) Alüminyum, Bor ve Karbon.

Karıştırma dökümle üretilen düzenli gözenek yapısına sahip numuneler üzerinde daha detaylı mikroyapı çalışmaları yapmak amacıyla parçaların 3 farklı bölgesinden mikroyapı numuneleri alınmıştır. Şekil 5.16'da parça üzerinden alınan bölgelerin görüntüsü ve bölgelere özel yapılan harf kodları gösterilmektedir. Buna göre döküm parçasının üst kısmından alınan numuneler A harfi, orta kısımdan alınan numuneler B ve alt kısımdan alınan numuneler de C harfi ile kodlanmıştır.



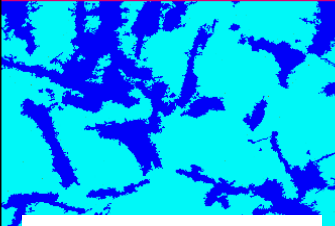
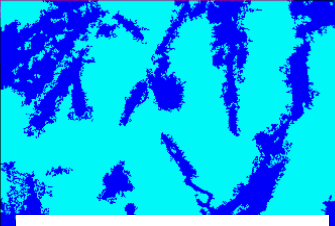
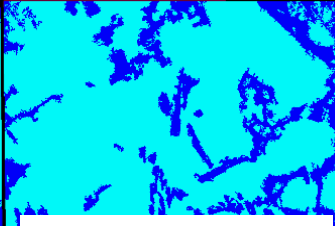
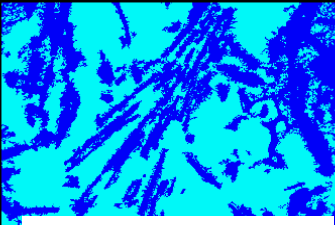
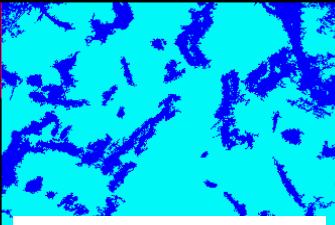
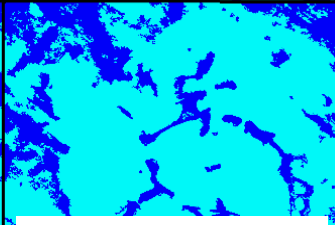
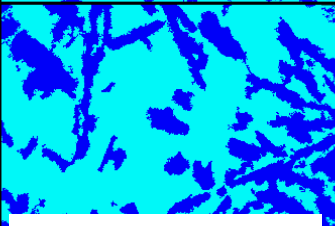
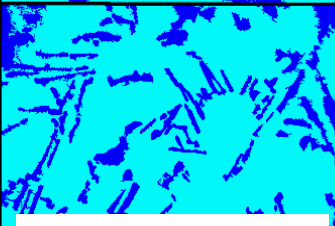
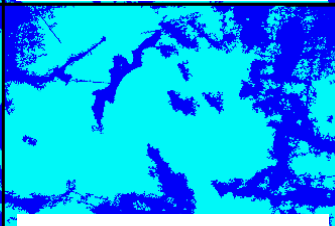
Şekil 5.16. Düzenli yapılı gözenekli malzemelerin farklı bölgelerinden alınan metalografi numuneleri.

İlk olarak parçaların 3 farklı bölgesinden alınan numuneler metalografik işlemlere tabi tutulmuş ve Şekil 5.17’de gösterildiği üzere optik mikroskop yardımıyla mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 5.17. üzerinde farklı bölgelerden alınan ve 1000 kat büyütmedeki görüntüler gösterilmektedir



Şekil 5.17. Optik mikroskop ile farklı bölgelerden alınan mikroyapı görüntüleri.

Daha sonra görüntüler üzerinde Clemex Vision Lite yazılımı ile görüntü işleme yöntemleri kullanılarak matris ve ikincil fazlar ayrıştırılmıştır. Görüntüler üzerinde yazılımda bulunan “Delineate” fonksiyonuyla hatlar keskinleştirilmiş ve “Gray Threshold” fonksiyonu ile de matris ile silisyumca zengin ikincil faz bölgeleri turkuaz ve koyu mavi renklerle ayrıştırılmıştır. Daha sonra “Chord size” fonksiyonu ile fazlar içerisindeki mikro farklılıklar (10 pikselden küçük olanlar) filtrelenmiştir. Analiz sonucu elde edilen mikroyapı görüntüleri Şekil 5.18’te verilmiştir. Ayrışan faz bölgelerinin alanları yüzdeler olarak birbirleriyle kıyaslanmıştır.

	S0	S0,5	S1
A	 A0 Alan (%) 31,921/68,079	 A1 Alan (%) 28,158/71,842	 A2 Alan (%) 24,447/75,553
B	 B0 Alan (%) 39,463/60,537	 B1 Alan (%) 23,043/76,957	 B2 Alan (%) 26,032/73,968
C	 C0 Alan (%) 37,772/62,228	 C1 Alan (%) 21,59/78,41	 C2 Alan (%) 30,022/69,978

Şekil 5.18. Mikroyapıların görüntü işleme yöntemleriyle filtrelenmesi.

Faz yüzdeleri, yine Clemex Vision Lite yazılımı yardımıyla ölçülecek ikincil faz alanının toplam alana bölünmesi yoluyla hesaplanmıştır. Hesaplanan veriler, Şekil 5.18. üzerindeki mavi (koyu) renkle gösterilen ikincil fazların analiz edilen toplam bölge içerisinde kapladıkları alanlar olarak yüzdeler olarak ifade edilmiştir. Bu alan hesaplamalarının 1000 kat büyütmedeki görüntülerde yapılmasının yanısıra, aynı analiz 500 kat büyütmeden alınan görüntüler üzerinde de gerçekleştirilmiş ve her iki büyütmede de alınan sonuçlar Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Tüm faz bölgeleri alan sonuçları.

Numuneler	İkincil Faz Alanı [%] 500x	İkincil Faz Alanı [%] 1000x	Toplam Alan [ $\mu\text{m}^2$ ]
A0	29.602	31.921	2764800000
B0	33.954	39.463	
C0	32.022	37.772	
A1	31.119	28.158	
B1	21.597	23.043	
C1	20.005	21.590	
A2	28.509	24.447	
B2	28.512	26.032	
C2	31.021	30.022	

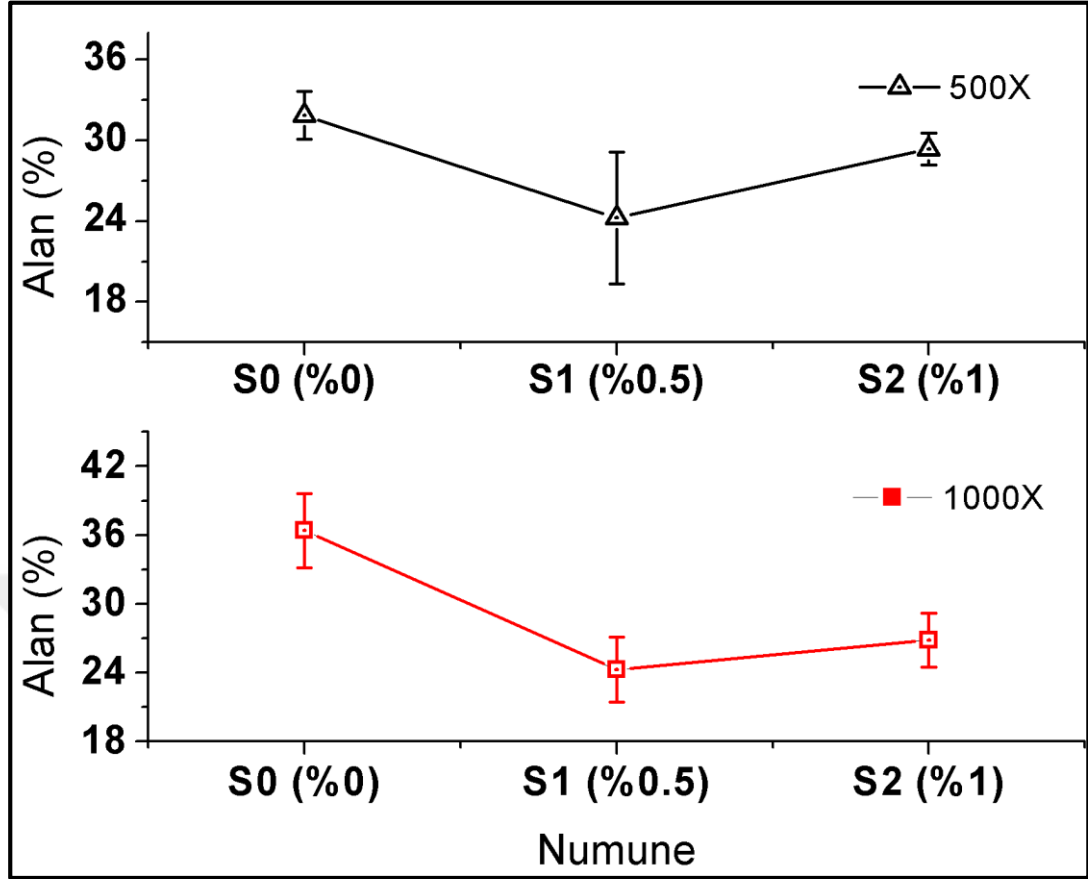
Düzenli gözenek yapısına sahip parçaların 3 farklı bölgesinden alınmış olan faz alanı verilerinin ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanmıştır ve bu veriler Çizelge 5.3.'te ayrıca verilmiştir.

Çizelge 5.3. Faz bölgelerinin alanlarının ortalama değerleri.

Numune	500x büyütme		1000x büyütme	
	Alan [%]	Standart sapma	Alan [%]	Standart sapma
S0	31.859	1.780	36.385	3.231
S1	24.240	4.907	24.264	2.817
S2	29.347	1.183	26.834	2.346

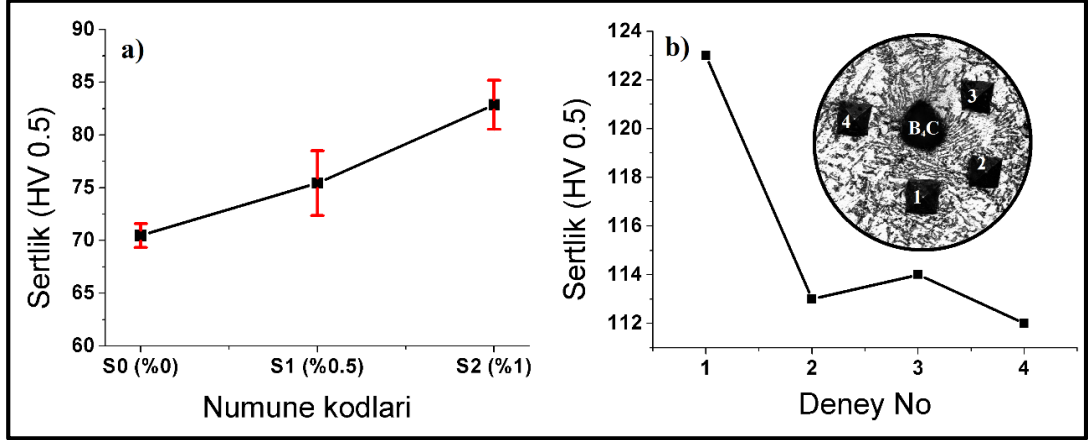
Şekil 5.19. üzerinde numunelerin mikroyapılarının analiz edilmesiyle elde edilen faz alanlarının sonuç grafikleri gösterilmektedir. Hem 500X hem de 1000X büyütmedeki sonuçlar incelendiğinde, B<sub>4</sub>C parçacıkların %0,5 oranında eklendiği S0,5 kodlu numunelerde ikincil fazların alanlarının en düşük değerlere sahip oldukları görülmektedir. İkincil fazların boyutlarının incelendiği ve sivrileştiği benzer durum, infiltrasyonla üretilen numunelerden elde edilen mikroyapılar üzerinde de Şekil 5.2-7 üzerinde görülmektedir. Mazahery vd. [44], Kalaiselvan vd. [48], Sajjadi vd. [49] ve Kumar vd. [52] gibi araştırmacıların yaptıkları çalışmada sert seramik parçacıkların takviyesinin malzemede tane inceltici etki meydana getirdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca bu sonuçlara ek olarak sert seramik parçacıklar plastik deformasyon sırasında dislokasyon hareketini engelleyerek deformasyona karşı direnç oluşturdukları ve böylece sertlik ve dayanımda artışın meydana gelebileceği bilinmektedir [51, 54]. Bu anlamda B<sub>4</sub>C takviyesinin tane inceltici etkisi literatürdeki bu çalışmalarla uyum göstermektedir.





Şekil 5.19. Faz bölgelerinin alanlarının karşılaştırılması.

Benzer şekilde sertlik sonuçları da Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Sertlik ölçümleri sonucunda B<sub>4</sub>C takviyesinin artmasıyla sertlikte bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Bu artışın sebepleri sert seramik parçacıkların yapıda çekirdekleştirici etki oluşturarak, taneleri inceltmesi ve dislokasyon hareketlerine engel olacak bir bariyer gibi davranması olabileceği bildirilmiştir [51, 54]. B<sub>4</sub>C parçacığın çevresinde ölçülen sertlik değerleri, malzemelerin matris bölgelerinden alınan sonuçlara göre daha yüksek ölçülmüştür ve bu durum Şekil 5.20.b'de gösterilmektedir. Şekil 5.20.a ise numunelerden alınan genel sertlik sonuçlarının ortalamalarını ve bu ortalamalardan olan sapma değerlerini içermektedir.

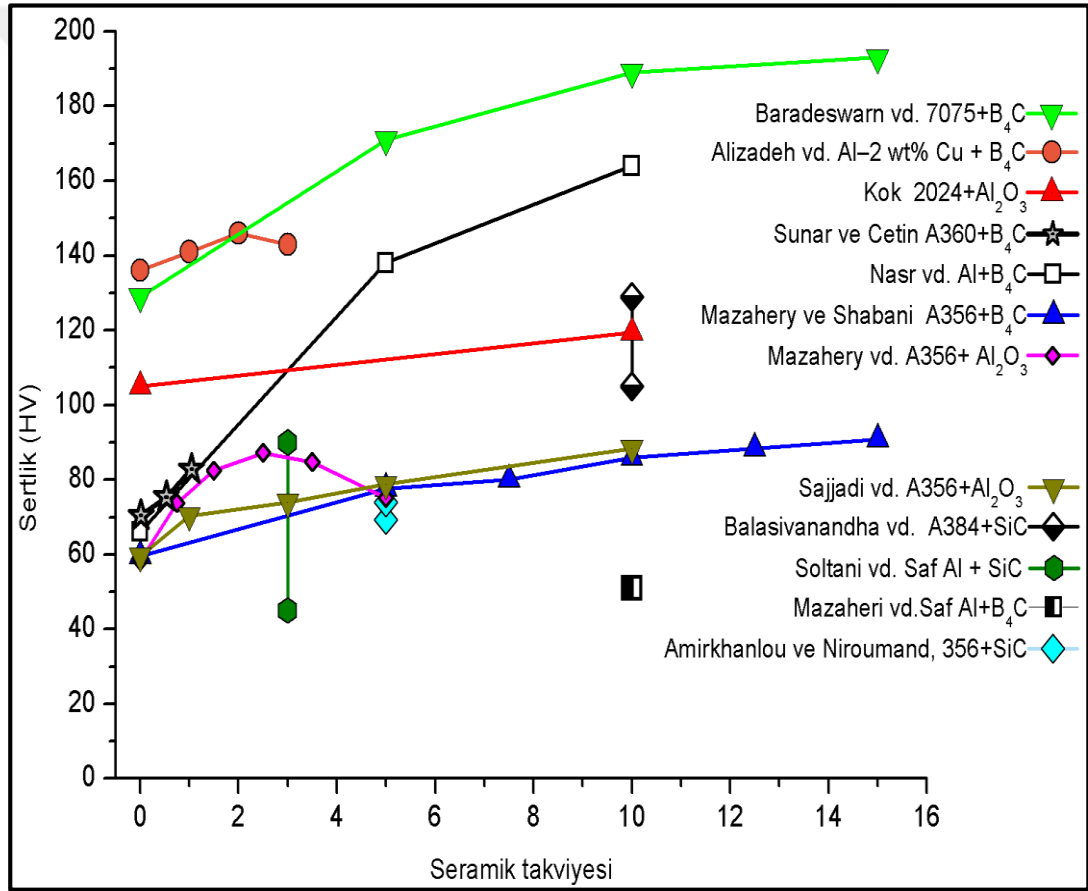


Şekil 5.20. Sertlik değerlerinin grafik halinde gösterimi, a) numunelerin ortalama sertlikleri, b) B<sub>4</sub>C parçacıklarının çevresinden alınan sertlik sonuçları.

Sert seramik parçacıkların yapı içerisinde çekirdekleyici görev yaparak veya tane sınırlarının büyümesini engelleyerek daha iyi bir tane yapısının oluşmasını sağladıkları bilinmektedir [48, 49, 52]. Bunun yanında sert parçacıkların dislokasyon hareketini engelledikleri veya dislokasyonları matris fazı boyunca hareket ettirmek için gerekli olan gerilme değerlerini yükselttiklerini ve bunun sonucunda mekanik özelliklerde bir artışın meydana geldiği de bazı çalışmalarda bildirilmiştir [46, 50].

Şekil 5.20.'den görüleceği üzere, takviye oranı arttıkça sertlik artmıştır. Sertlik artışının matris içerisine takviye edilen B<sub>4</sub>C seramik partiküllerinin dağılımından kaynaklandığı ve matris içerisinde dağılmış olan seramik parçacıkların çevresinde dislokasyon hareketinin engellenmesiyle meydana gelen gerilme (birim şekil değiştirme) enerjisinin artmasından kaynaklıdır. Benzer sonuçlar literatürdeki bazı çalışmalarda bildirilmiştir [48, 51, 54]. Dislokasyonların takviye parçacığı kesmeye çalışarak takviye elemanı etrafında dislokasyon halkası oluşturması olarak da tanımlanan "Orowan" mekanizmasının etkin olmasıyla dayanımın ve sertliğin arttığı da bazı çalışmalar sonucunda ifade edilmiştir [46, 49]. Plastik matris malzeme ve elastik takviye parçacıklar arasındaki birim şekil değişiminden kaynaklı bir çalışma sertleşmesinin gerçekleşmesi ve bunun da sertliği artırmasının olası olabileceği ifade edilmiştir [46]. Ayrıca B<sub>4</sub>C partiküllerinin ilavesiyle mukavemetteki artışın, yükün matristen takviyeye transfer edilmesinden dolayı olabileceği öne sürülmüştür [48, 49].

Alüminyum ile  $B_4C$  malzemelerin fiziksel özelliklerinden olan termal genleşme katsayıları arasında bir uyumsuzluk mevcuttur. Alüminyum ve  $B_4C$  için termal genleşme katsayıları sırasıyla,  $21 \times 10^{-6}/^{\circ}C$  ve  $5 \times 10^{-6}/^{\circ}C$  olarak bilinmektedir [50, 67]. Bu özellik farklılığı sebebiyle, katılaşma sırasında hızlı soğumadan kaynaklı oluşan iç gerilmeler ve dislokasyon yığılmalarının meydana geldiği ve bunun da malzemelerin dayanımını ve sertliğini arttırmaktadır [48–50, 69]. Literatürdeki bazı çalışmalarda farklı oranlarda  $B_4C$ , SiC ve  $Al_2O_3$  gibi parçacıkların ilavesinin, alüminyum matrisli kompozitlerin sertlikleri üzerindeki etkileri Şekil 5.21’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.21. Farklı oranlarda  $B_4C$ , SiC ve  $Al_2O_3$  gibi seramik parçacıkların alüminyum matrisli kompozitlerin sertlik özelliklerine etkisi [44, 45, 86, 46, 47, 49, 50, 53, 54, 69, 85].

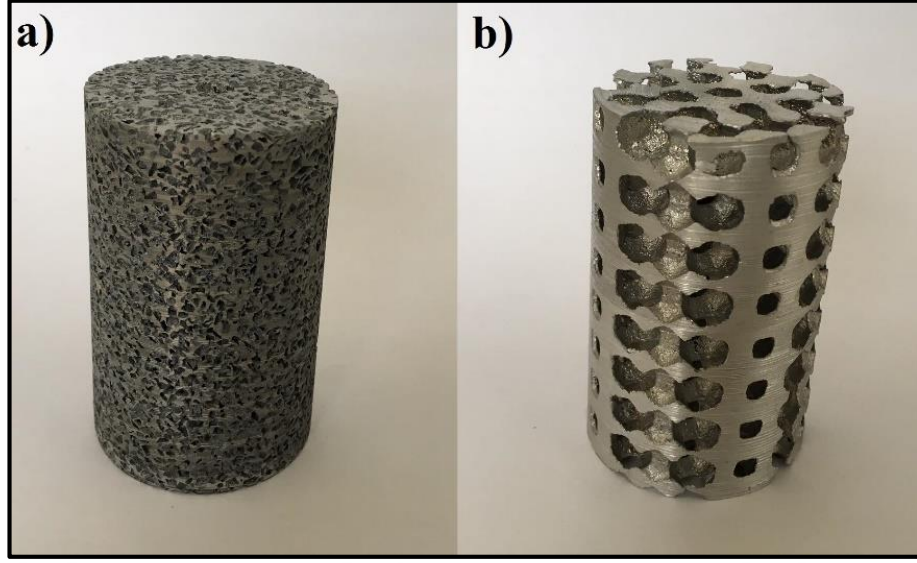
Şekil 5.21. incelendiğinde seramik ilavesinin sertliği arttırdığı görülmektedir. Yapılan çalışmalarda kullanılan matris malzemeleri ve takviye parçacıkları farklı olduğu için sertlik değerleri farklı ölçeklerde görülmektedir. Ayrıca takviye parçacıklarının

boyutları da oldukça önemli bir parametredir ve tüm bu özellikleri doğrudan etkiler. Fakat bu grafiği değerlendirmemizin amacı, seramik parçacık takviyesinin sertlik üzerindeki olumlu etkilerini vurgulamaktır. Bu çalışmada elde edilen sertlik sonuçları da Şekil 5.21'deki grafik üzerine yerleştirilmiştir. Bor karbür ilave oranının artmasıyla sertlikte bir artış meydana geldiği tespit edilmiş ve deneysel sonuçların literatürdeki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür.

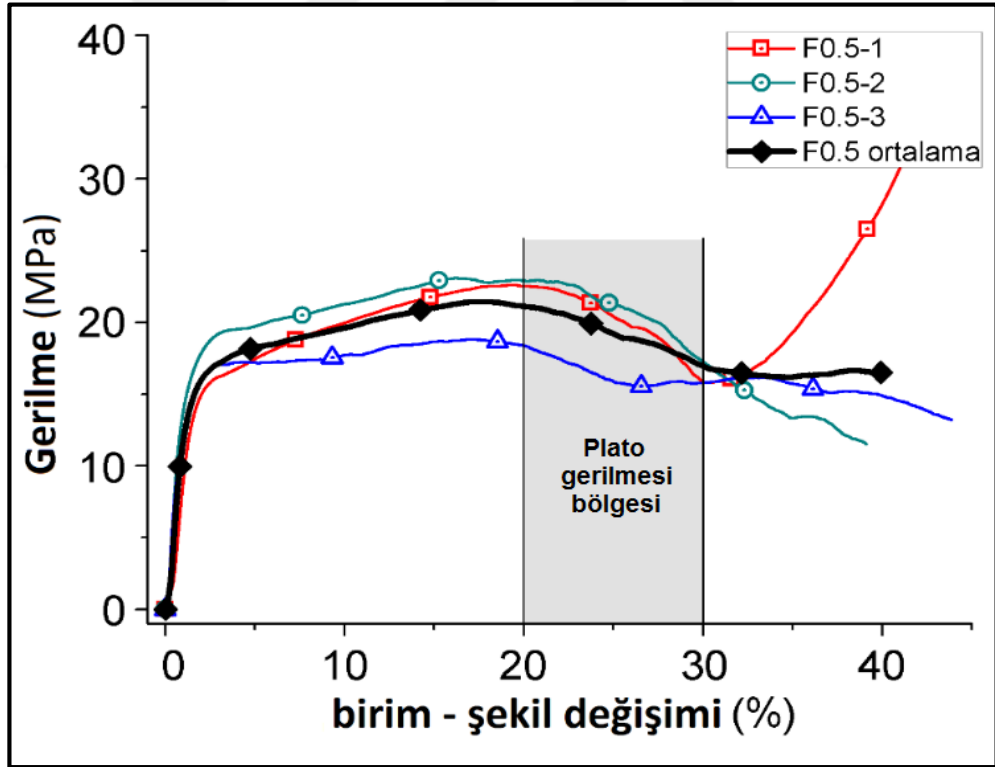
### **5.3. MEKANİK ÖZELLİKLER**

Her bir seri için üç farklı basma testi gerçekleştirilmiştir. Numune boyutları ve basma testi parametreleri ISO13314 gözenekli ve hücreli metal malzemelerin basma testleri standartına [78] uygun olarak seçilmiştir. Uygulanan testlerde alınan gerilme birim şekil değiştirme eğrilerinin ortalamaları alınarak bir ortalama grafik çizilmiştir. Uygun şekle getirmek amacıyla tornalama işlemiyle işlenen ve hazırlanan basma numuneleri Şekil 5.22'de gösterilmiştir.

%0,5 B<sub>4</sub>C eklenmiş olan F0,5 kodlu numune serisi üzerinde gerçekleştirilen üç basma testi sonuç grafiği ve bu sonuçlardan elde edilen ortalama grafik Şekil 5.23'de gösterilmektedir. Şekil 5.23. üzerinde gösterilen kırmızı, yeşil ve mavi eğriler (kare, daire ve üçgen sembollerle de sembolize edilmiştir) sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü deney sonuçlarını ifade etmektedir. Siyah renkli ve eşkenar dörtgen ile sembolize edilen eğri ise üç testin ortalaması olarak F0,5 serisinin ortalama grafiğini ifade etmektedir.



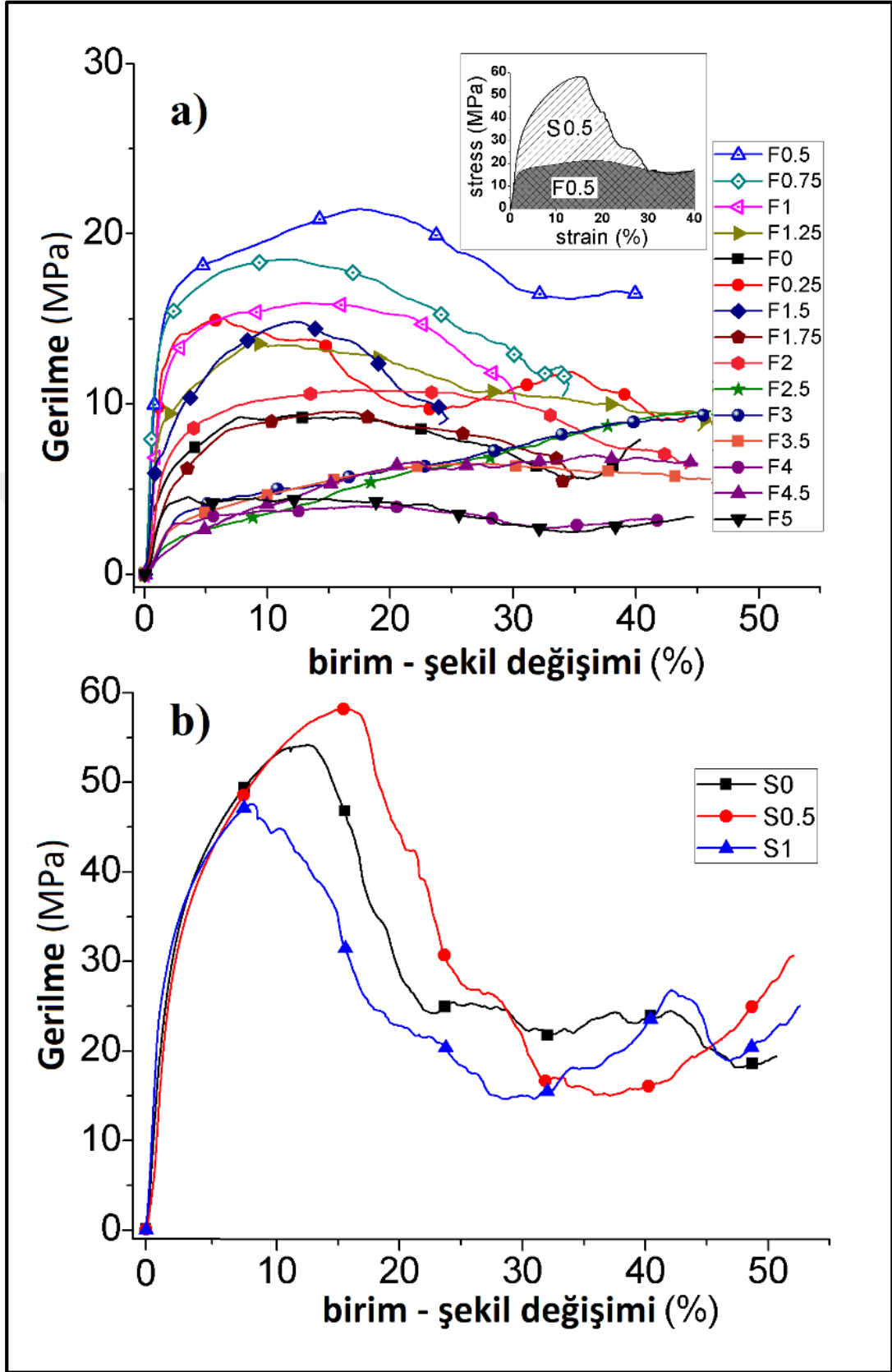
Şekil 5.22. Basma testleri için hazırlanan numuneler, a) infiltrasyonla üretilmiş düzensiz gözenek yapısına sahip numune, b) karıştırma dökümle üretilmiş düzenli gözenek yapısına sahip numune.



Şekil 5.23. Ortalama basma gerilme-birim şekil değişirme eğrisinin elde edilmesi ve plato gerilmesi bölgesinin gösterimi.

Bu çalışmada testleri gerçekleştirilen düzensiz ve düzenli gözenek yapısına sahip tüm numunelerin basma testleri sonucunda elde edilen ortalama gerilme birim şekil

değiştirme eğrileri Şekil 5.24.'te verilmiştir. Şekil 5.24.a'da infiltrasyon yöntemiyle üretilen ve düzensiz gözenek yapısına sahip numunelerin ortalama gerilme-birim Şekil değiştirme eğrileri gösterilirken, Şekil 5.24.b'de ise karıştırma döküm yöntemiyle üretilmiş düzenli gözenek yapısına sahip numunelerin gerilme-birim Şekil değiştirme eğrileri görülmektedir. İnfiltasyonla üretilen numunelerden, düşük gözeneklilik oranına sahip olan numuneler, daha yüksek gözenekliliğe sahip numunelere göre daha yüksek basma dayanımı özellikleri göstermiştir. Fakat basma dayanımındaki bu artış sadece gözeneklilik ile oluşacak seviyede değildir. Yang vd. [87], çalışmalarında gözenekliliğin artmasıyla plato gerilmesi değerinin düştüğünü bildirmişlerdir. Gzeneklilikte meydana gelen %10'luk bir artış plato gerilmesinde yaklaşık %36 oranında düşüşe sebep olmuştur [87]. Basma dayanımının yüksek hacim oranlarında eklenen alümina parçacıklarının ilavesiyle düştüğünü bildirilmiştir [88].



Şekil 5.24. a) Düzensiz gözenek yapısına sahip numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi, b) Düzenli gözenek yapısına sahip numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.

Gözenekli ve hücreli metal malzemelerin basma testleri standartına göre (ISO13314) bu tür malzemelere uygulanan basma testleri sonucunda; plato gerilmesi, ilk maksimum basma gerilmesi, elastik eğim ve sönümlenen enerji değerleri gibi çıktılar elde edilebilir [78]. Plato gerilmesi, gözenekli malzemelerin mekanik testleri ile ilgili standartta belirtilen şekliyle; %20 ve %30'luk birim şekil değişim aralığı bölgesinde kalan basma gerilmesi değerlerinin aritmetik ortalaması olarak ifade edilir ve Şekil 5.23. üzerinde bu bölge gösterilmektedir. Ortalama plato gerilmesi de benzer olarak ortalama basma gerilmesi eğrisinin %20-30 birim şekil değiştirme aralığında kalan basma gerilmesi değerlerinin aritmetik ortalaması olarak hesaplanır. İlgili standarta göre bir diğer parametre ise ilk maksimum basma gerilmesi değeridir. Bu değer gerilme-birim şekil değiştirme eğrisindeki basma gerilmesi değerinin düşmeye başlamadan önceki ilk en yüksek değeri temsil eder. Sönümlenen enerji değeri gerilme birim şekil değiştirme eğrisi altında kalan alan olarak ifade edilir. Elastik eğim ise ilgili standarta göre plato gerilmesi değerinin yüzde yirmisinden ve yüzde yetmişinden basma eğrisine doğru X-eksenine paralel çizilen çizgilerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde kestiği noktaların birleştirilmesi ile elde edilen doğrunun eğimi olarak hesaplanır [78]. Elastik eğim ilgili standarta göre gözeneğe bağımlı rijitliği temsil eder ve malzemenin elastiklik modülü değildir. Çizelge 5.4'de bu çalışmada test edilen tüm numunelerin ilk maksimum basma gerilmesi, ortalama plato gerilmesi ve sönümlenen enerji değerleri gösterilmektedir.

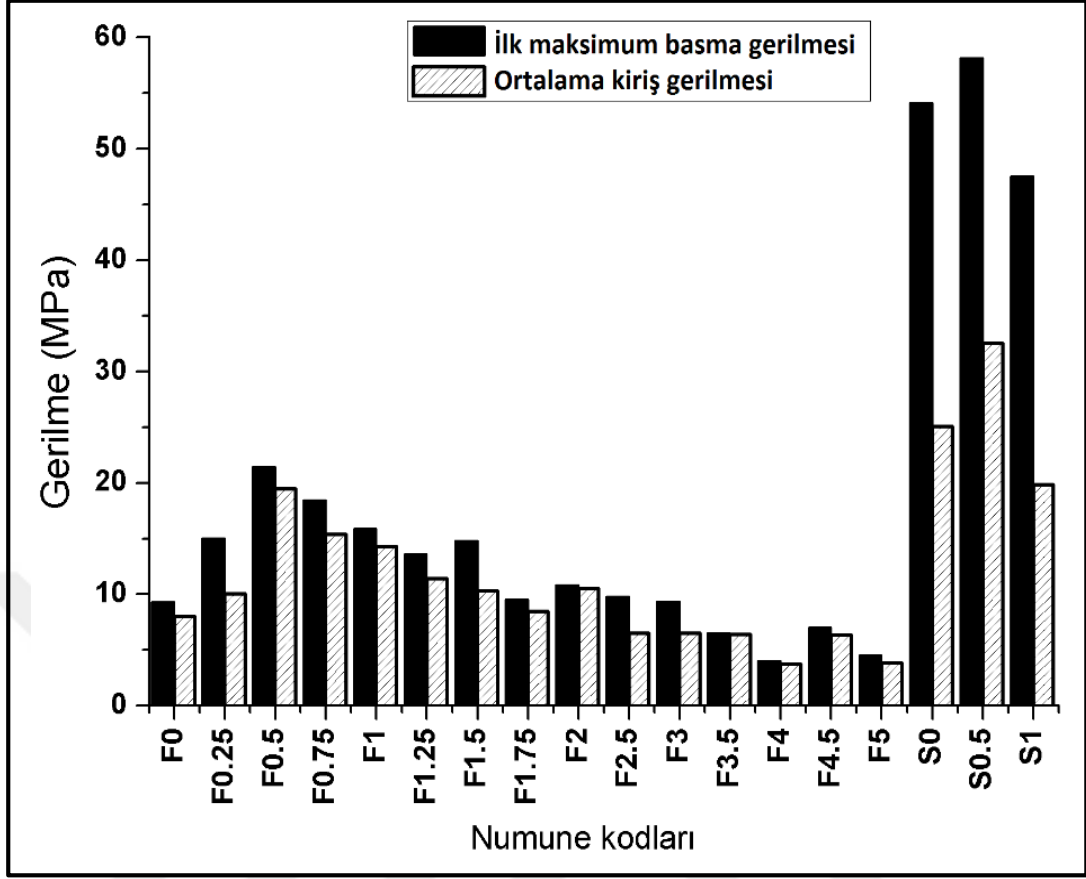
Şekil 5.24'deki basma testi sonuçları incelendiğinde, düzenli gözenek yapısına sahip numunelerin infiltrasyonla üretilen düzensiz gözenek yapısına sahip numunelere göre kaydadeğer ölçüde daha iyi basma özellikleri gösterdiği tespit edilmiştir. İnfiltrasyon yöntemiyle elde edilen numuneler kendi aralarında kıyaslandığında, F0,5 kodlu numunenin en iyi basma dayanımı ve enerji sönümlenme değerlerini gösterdiği tespit edilmiştir. F0,5 kodlu numune 21.430 MPa değerinde ilk maksimum basma dayanımının yanında 19.426 MPa plato gerilmesi değeri göstermiştir. Bu değerler infiltrasyon yöntemiyle elde edilen numunelerden alınan en yüksek basma testi sonuç değerleri olarak ölçülmüştür. Şekil 5.25'te de çubuk grafik şeklinde gösterilen sonuçlar da incelendiğinde; infiltrasyon yöntemi ile üretilen numunelerin basma özelliklerindeki iyileşmelerin F0,5 kodlu numuneden sonraki numunelerde azalma eğilime geçtiği görülmektedir. En düşük basma değeri özellikleri F4 kodlu numuneden



elde edilmiştir. Bazı çalışma sonuçlarına göre, yer tutucu yöntemiyle üretilen metal köpüklerde, takviye parçacıklarının oranının artmasının belirli bir orandan sonra mekanik özelliklere etkisinin olmadığı ve basma özelliklerinde azalmaya sebep olduğu ifade edilmiştir [88, 89].

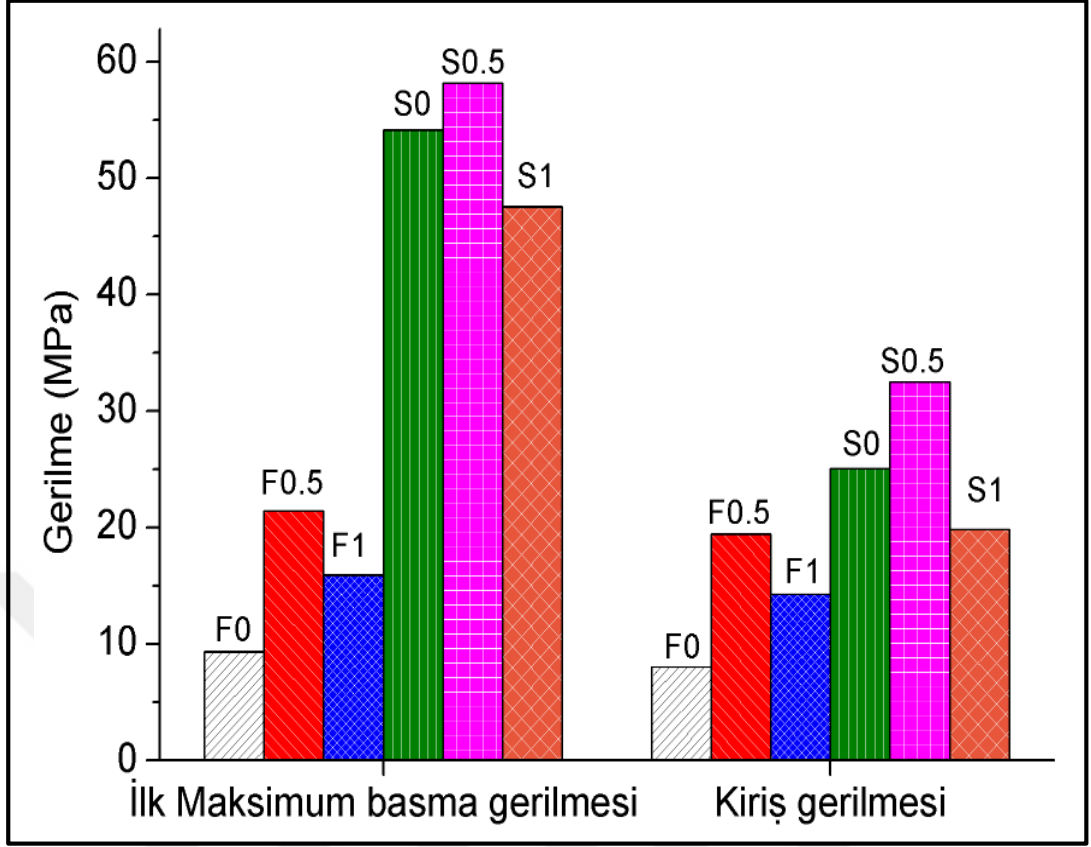
Çizelge 5.4. Basma testi sonuç değerlerinin tablo üzerinde gösterimi.

Numune Kodları	İlk maksimum basma gerilmesi [%]	Ortalama plato gerilmesi [%]	Sönümlenen enerji [MJ/m <sup>3</sup> ]
F0	9.326	8.005	3.107
F0,25	15.029	9.990	5.938
F0,5	21.430	19.426	7.310
F0,75	18.486	15.358	5.017
F1	15.922	14.257	3.938
F1,25	13.606	11.356	5.129
F1,5	14.835	10.264	2.628
F1,75	9.549	8.440	2.815
F2	10.823	10.520	3.908
F2,5	9.811	6.486	2.176
F3	9.397	6.456	2.939
F3,5	6.508	6.392	2.525
F4	4.020	3.715	1.397
F4,5	7.019	6.343	2.422
F5	4.519	3.837	1.602
S0	54.123	25.061	15.625
S0,5	58.164	32.502	15.967
S1	47.533	19.812	13.728



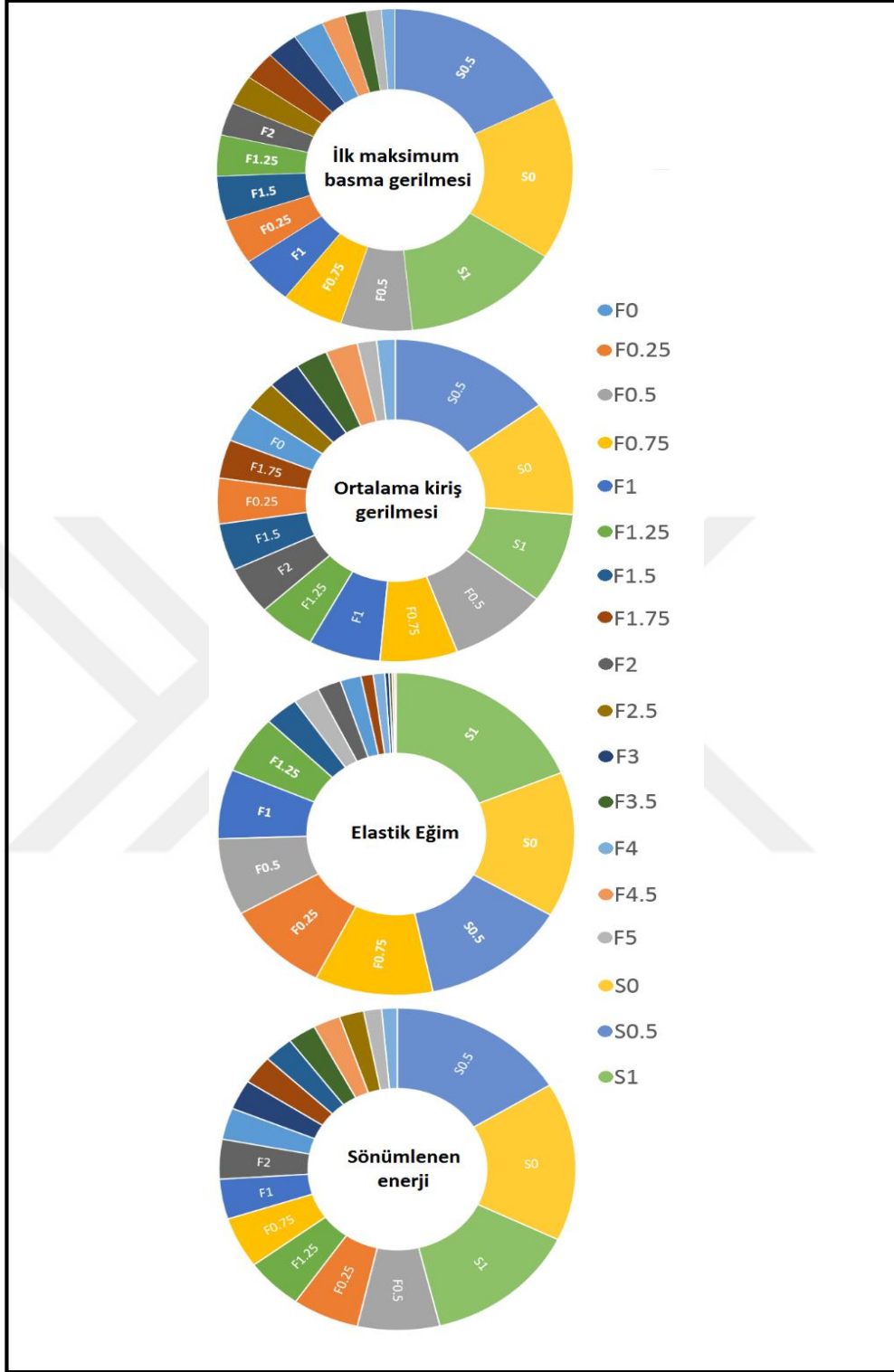
Şekil 5.25. Ortalama basma gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesi ve plato gerilmesi bölgesinin gösterimi.

Karıştırma döküm yöntemiyle elde edilen numunelerin basma sonuçları incelendiğinde, en iyi basma değerleri S0,5 kodlu numuneden elde edilmiştir. Çizelge 5.4'te her iki üretim yöntemi karşılaştırıldığında, karıştırma döküm yöntemiyle üretilen S0,5 kodlu numune 58.164 MPa ilk maksimum basma gerilmesi, 32.502 MPa plato gerilmesi ve 15.967 MJ/m<sup>3</sup> enerji sönümlene değerlerine sahipken, infiltrasyon yöntemiyle üretilen F0,5 kodlu numune 21.430 MPa ilk maksimum basma gerilmesi, 19.426 MPa plato gerilmesi ve 7.310 MJ/m<sup>3</sup> enerji sönümlene değerlere sahiptir. S0,5 kodlu numunenin, F0,5 kodlu numuneden %171 daha yüksek ilk maksimum basma gerilmesi, %67 daha yüksek plato gerilmesi ve bunların yanında %118 daha yüksek enerji sönümlene kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.26'da hem infiltrasyon hem de karıştırmalı döküm yöntemleri ile üretilmiş olunan numune serilerinin ilk maksimum basma gerilmeleri ve plato gerilmeleri çubuk grafik şeklinde gösterilmektedir.



Şekil 5.26. Her iki üretim yöntemiyle üretilen numune serilerinin ilk maksimum basma gerilmesi ve plato gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması olarak gösterimi.

Her iki üretim yöntemiyle üretilen metal köpük numuneler kıyaslandığında, %0,5 B<sub>4</sub>C ilaveli numuneler kendi numune grupları arasında en yüksek basma özelliklerine sahiptir. Bu ilave oranından sonra basma özelliklerinde bir düşüş meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca bu çalışmada üretilen tüm numunelerin basma testi sonucunda elde edilen, ilk maksimum basma gerilmesi, ortalama plato gerilmesi, enerji sönümlenme kapasitesi ve elastik eğim gibi özellikler de Şekil 5.27. üzerinde her biri 360 derece karşılaştırmalı daire grafik üzerinde gösterilmiştir.



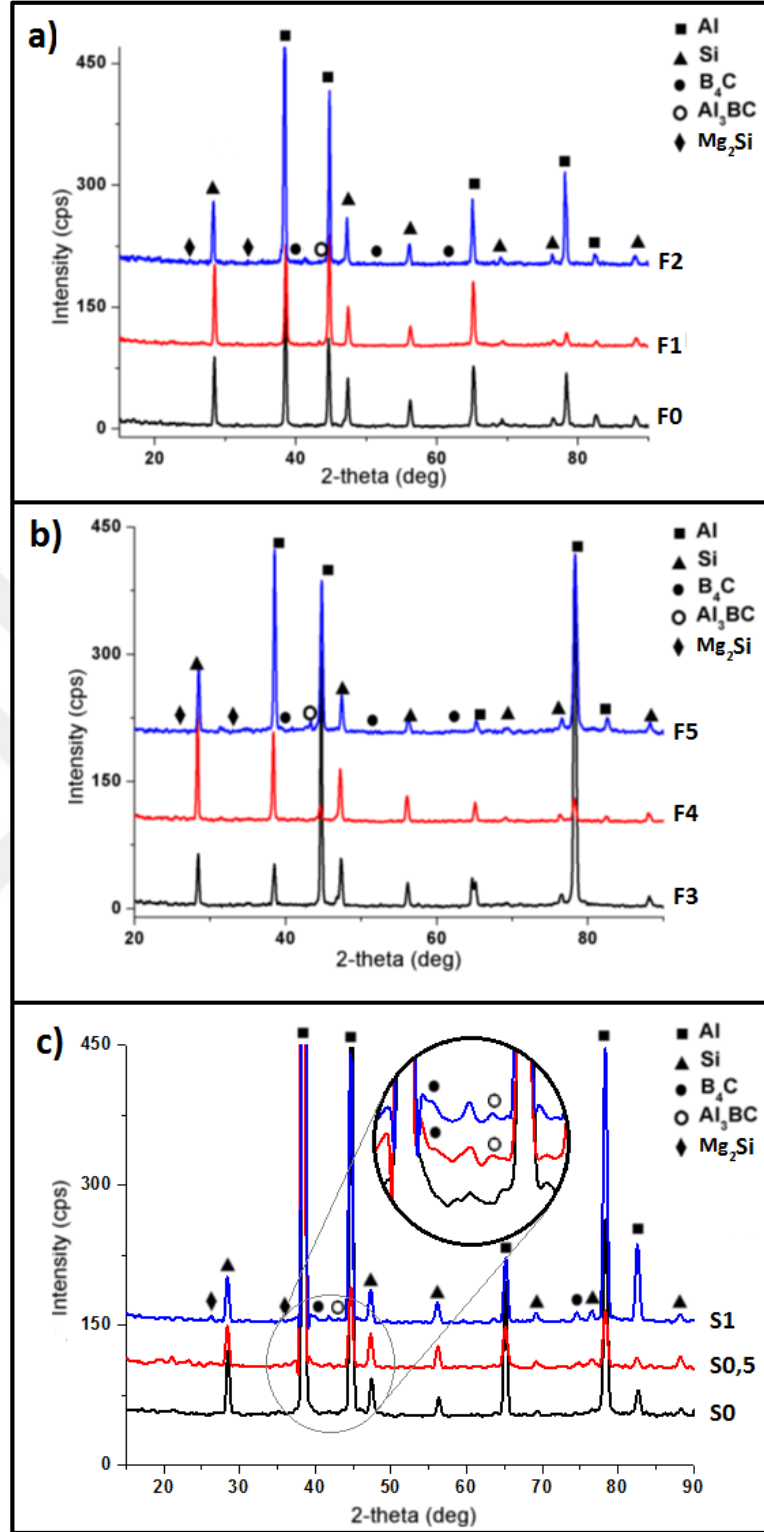
Şekil 5.27. Ortalama basma gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesi ve plato gerilmesi bölgesinin gösterimi.

Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen ve düzenli gözenek yapısına sahip ağırlıkça en yüksek bor karbür eklenen numune olan S1 kodlu numunenin basma özellikleri diğer

karıştırma döküm numunelerine oranla daha düşük elde edilmiştir. Bunun sebepleri bu malzemeye eklenen bor karbür oranının yüksek olmasından dolayı malzemenin gevrekleşmesi veya parçacıkların topaklanması ve iç yapıda meydana gelen mikro gözenekler olabilir. Şekil 5.15. incelendiğinde S1 kodlu numunedeki bor karbür parçacığının etrafında ve matriste mikro gözeneklerin oluştuğu görülmektedir. Karıştırma döküm yönteminde oluşan bu gözeneklerin sertlik ve dayanıma olumsuz etkilerinin olduğu bildirilmiştir [52]. Elastik eğim değerleri incelendiğinde S1 numunesinin elastik eğiminin diğer tüm numunelerden daha yüksek bir değer gösterdiği görülmektedir. Elastik eğim gözenekliliğe bağlı bir rijitlik değeri olarak tanımlandığından S1 kodlu numunenin daha rijit bir yapıda olduğu söylenebilir.

#### **5.4. XRD KIRINIM DESENİ ANALİZİ**

Numunelerin içyapısındaki olası bileşenlerin ve intermetaliklerin mevcudiyetini analiz etmek için X-ray kırınım spektrometresi (XRD) cihazı kullanılmıştır. Kullanılan cihazla ilgili bazı bilgiler ve teknik özellikler Bölüm 4.3'te ayrıntılı olarak verilmiştir. Numuneler 3°/min hızında taranmış ve 2 theta (Bragg angle) 10° ve 90° aralığında kırınım desenleri elde edilmiştir. Kırınım desenleri incelendiğinde A360 alanında mevcut bulunan alüminyum ve silisyum fazının haricinde, B<sub>4</sub>C (bor-karbür), Al<sub>3</sub>BC ve Mg<sub>2</sub>Si pikleri gözlemlenmiştir. Özellikle düzenli gözenek yapısına sahip numunelerden alınan kırınım eğrisinde B<sub>4</sub>C ve Al<sub>3</sub>BC piklerinin şiddeti ilave oranı arttıkça arttığı görülmüştür. Elde edilen kırınım deseni grafikleri Şekil 5.28'de verilmiştir. Literatürde bor karbür parçalarının takviye edildiği alüminyum matrisli kompozitler üzerinde yapılan XRD analizleri sonucunda B<sub>4</sub>C, Al-C, Al-B, Al-BC, Mg<sub>2</sub>Si gibi intermetaliklerin bulunduğu bilinmektedir [46, 48, 50, 83, 90]. Bu çalışmadan elde edilen X-ışını kırınım eğrilerindeki B<sub>4</sub>C ve Al<sub>3</sub>BC pikleri ile literatürdeki sonuçlar örtüşmektedir [46, 85]. Şekil 5.28'e göre B<sub>4</sub>C ilave oranının artmasıyla B<sub>4</sub>C ve Al<sub>3</sub>BC piklerinde az miktarda da olsa artışlar meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 5.28. Köpük numunelerden alınan XRD kırınım deseni analizi grafikleri, a) F0, F1 ve F2 numunelerin grafiği, b) F3, F4 ve F5 numunelerin grafiği, c) S0, S0,5 ve S1 numunelerin grafiği.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR

İnfiltrasyon ve karıştırma döküm yöntemleriyle A360 alüminyum alaşımına ağırlıkça farklı oranlarda bor karbür ( $B_4C$ ) parçacıkları ilave edilerek düzenli ve düzensiz gözenek şekillerine sahip metal köpük numuneler üretilmiştir. Üretilen malzemelerin mikroyapıları optik mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş, sertlik ve basma dayanımlarının belirlenmesi amacıyla da deneyler yapılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmalardan aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir;

1. İnfiltrasyon yöntemiyle, A360 döküm alaşımı ve NaCl yer tutucu malzemeler kullanılarak %0,25-%5 aralığında çeşitli ağırlık oranlarında  $B_4C$  parçacıkları ilave edilmiş düzensiz gözenek yapısına sahip açık gözenekli alüminyum metal köpükler başarıyla üretilmiştir. Üretilen numunelerdeki gözenekler, belirli sabit bir şekle sahip olmamakla beraber matris içerisinde homojen bir dağılım sergilemektedir.
2. İnfiltrasyon yöntemiyle elde edilen metal köpüklerin gözeneklilik oranları ortalama yaklaşık %65-70 aralığındadır. Bor karbür ilavesinin malzemelerin gözenekliliği üzerinde karmaşık bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.
3. İnfiltrasyon yöntemiyle üretilen metal köpük numunelerin mikroyapılarında  $B_4C$  parçacıklarının ağırlıkla gözenek duvarlarında ve gözenek duvarlarına yakın kesitlerde bulunduğu tespit edilmiştir.
4. İnfiltrasyon yöntemiyle üretilen metal köpük numunelerin basma testleri sonucunda en iyi basma dayanımı özelliğini 21.43 MPa ilk maksimum basma gerilmesiyle %0,5 oranında  $B_4C$  ilave edilmiş olan numune göstermiştir.

5. Karıştırma döküm yöntemiyle, A360 döküm alaşımına ağırlıkça %0, 0.5 ve %1 oranında B<sub>4</sub>C ilave edilerek düzenli gözenek yapısına sahip alüminyum matrisli kompozit köpük malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin gözeneklerinin sabit bir geometride olduğu ve düzenli bir dağılım sergilediği tespit edilmiştir.
6. Karıştırma dökümle elde edilen metal köpüklerin gözeneklilik oranları ortalama %60 değerindedir.
7. Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen metal köpük numunelerin mikroyapısındaki B<sub>4</sub>C parçacıklarının matris içerisinde düzgün dağıldığı gözlemlenmiştir.
8. Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen numunelerin sertliği B<sub>4</sub>C parçacıklarının ilave edilmesiyle ve ilave oranının artmasıyla artış göstermiştir.
9. Karıştırma döküm yöntemiyle üretilen numunelerin basma testleri sonucunda, en iyi basma dayanımı, ilk maksimum basma gerilmesi olarak %0,5 oranında B<sub>4</sub>C ilave edilmiş olan numunede, 58.164 MPa olarak tespit edilmiştir. Ağırlıkça %1 B<sub>4</sub>C ilave edilmesi basma dayanımı üzerinde olumsuz bir etki göstermiştir.
10. Her iki yöntemle üretilen açık gözenekli düzenli ve düzensiz gözenek yapısında sahip numunelerin X-ışını kırınımı analizi sonuçlarında, B<sub>4</sub>C (bor-karbür), Al<sub>3</sub>BC ve Mg<sub>2</sub>Si pikleri tespit edilmiştir.



## KAYNAKLAR

1. Gibson, L.J. and Ashby, M. F., "Cellular Solids", *Cambridge University Press*, Cambridge, (1997).
2. Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W. and Wadley, H. N. G., "Metal Foams: A Design Guide: A Design Guide", *Butterworth-Heinemann*, Boston MA, 251 (2000).
3. Banhart, J., "Light-metal foams - History of innovation and technological challenges", *Advanced Engineering Materials*, 15 (3): 82–111 (2013).
4. Banhart, J., "Metallic foams: Challenges and opportunities", *Eurofoam2000*, 13–20 (2000).
5. Elliott, J. C., "Method of producing metal foam", *United States Patent*, (1956).
6. Elliott, J. C., "Metal foaming process", *United States Patent*, (1961).
7. Pashak, J. F., Leontis, T. E., "The effect of zirconium on the properties of extruded magnesium-rare earth metal alloys", *Trans. Met. Soc. AIME*, (1960).
8. Mukherjee, M., "Evolution of Metal Foams during Solidification", *TU Berlin*, Ph. D. Thesis, Berlin (2009).
9. Akiyama, S., Ueno, H., Imagawa, K., Kitahara, A., Nagata, S., Morimoto, K., Nishikawa, T. and Itoh, M., "Foamed Metal and Method of Producing Same", *United States Patent*, 20 (1987).
10. Jin, I., Kenney, L. D. and Sang, H., "Method of producing lightweight foamed metal", *United States Patent*, (1990).
11. Shapovalov, V. I., "Method for manufacturing porous articles", *United States Patent*, (1993).
12. Baumeister, J., "A method for producing porous metallic materials having anisotropic thermal and electrical conductivities", *German Patent*, (1991).
13. Gergely, V. and Clyne, B., "The FORMGRIP process: Foaming of reinforced metals by gas release in precursors", *Advanced Engineering Materials*, 2 (4): 175–178 (2000).
14. Leitmeier, D., Degischer, H. P. and Flankl, H. J., "Development of a foaming process for particulate reinforced aluminum melts", *Advanced Engineering Materials*, 4 (10): 735–740 (2002).

15. Amirah, A. H., Nurulakmal, M. S. and Anasyida, A. S., "The effect of space holder content and decomposition methods in fabrication of aluminum foams by powder metallurgy method using carbamide space holder", *The 2nd International Conference On Functional Materials And Metallurgy*, 1756 (2016).
16. Asavavisithchai, S. and Opa, A., "Effect of tic particles on foamability and compressive properties of aluminium foams", *Chiang Mai Journal Of Science*, 37 (2): 213–221 (2010).
17. Avalor, M., Lehmkus, D., Peroni, L., Pleiteit, H., Schmiechen, P., Belingardi, G. and Busse, M., "AlSi7 metallic foams—aspects of material modelling for crash analysis", *International Journal Of Crashworthiness*, 14 (3): 269–285 (2009).
18. Zhao, Y. Y., "Stochastic Modelling of Removability of NaCl in Sintering and Dissolution Process to Produce Al Foams", *Journal Of Porous Materials*, 10 (2): 105–111 (2003).
19. Kim, A., Cho, S. S. and Lee, H. J., "Foaming behaviour of Al–Si–Cu–Mg alloys", *Materials Science And Technology*, 20 (12): 1615–1620 (2004).
20. Matijasevic, B. and Banhart, J., "Improvement of aluminium foam technology by tailoring of blowing agent", *Scripta Materialia*, 54 (4): 503–508 (2006).
21. Dudka, A., Garcia-Moreno, F., Wanderka, N. and Banhart, J., "Structure and distribution of oxides in aluminium foam", *Acta Materialia*, 56 (15): 3990–4001 (2008).
22. Körner, C., Arnold, M. and Singer, R. F., "Metal foam stabilization by oxide network particles", *Materials Science And Engineering A*, 396 (1–2): 28–40 (2005).
23. Mukherjee, M., Garcia-Moreno, F. and Banhart, J., "Solidification of metal foams", *Acta Materialia*, 58 (19): 6358–6370 (2010).
24. Çinici, H., "Toz metalurjisi yöntemi ile Al esaslı parçacık takviyeli sandviç metalik köpük üretimi ve mekanik özelliklerinin hesaplanması", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi, Ankara (2012).
25. Aida, S. F., Hijrah, M. N., Amirah, A. H., Zuhailawati, H. and Anasyida, A. S., "Effect of NaCl as a Space Holder in Producing Open Cell A356 Aluminium Foam by Gravity Die Casting Process", *Procedia Chemistry*, 19234–240 (2016).
26. Cao, Z., Yu, Y., Li, M. and Luo, H., "Cell Structure Evolution of Aluminum Foams Under Reduced Pressure Foaming", *Metallurgical And Materials Transactions A: Physical Metallurgy And Materials Science*, 47 (9): 4378–4381 (2016).

27. Shorowordi, K. M., Laoui, T., Haseeb, A. S. M. A., Celis, J. P. and Froyen, L., "Microstructure and interface characteristics of B<sub>4</sub>C, SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced Al matrix composites: A comparative study", *Journal Of Materials Processing Technology*, 142 (3): 738–743 (2003).
28. Gaillard, C., Despois, J. F. and Mortensen, A., "Processing of NaCl powders of controlled size and shape for the microstructural tailoring of aluminium foams", *Materials Science And Engineering A*, 374 (1–2): 250–262 (2004).
29. Goodall, R., Despois, J. F., Marmottant, A., Salvo, L. and Mortensen, A., "The effect of preform processing on replicated aluminium foam structure and mechanical properties", *Scripta Materialia*, 54 (12): 2069–2073 (2006).
30. Despois, J. F., Marmottant, A., Salvo, L. and Mortensen, A., "Influence of the infiltration pressure on the structure and properties of replicated aluminium foams", *Materials Science And Engineering A*, 462 (1–2): 68–75 (2007).
31. Mukherjee, M., Garcia-Moreno, F. and Banhart, J., "Defect generation during solidification of aluminium foams", *Scripta Materialia*, 63 (2): 235–238 (2010).
32. Malachevsky, M. T., Mathevon, C., Yawny, A. and D'Ovidio, C., "Submicrometre ceramic particles addition in AlSi<sub>6</sub>Cu<sub>4</sub> foams", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 51 (4): 456–461 (2012).
33. Fischer, S. F., Schüler, P., Fleck, C. and Bührig-Polaczek, A., "Influence of the casting and mould temperatures on the (micro)structure and compression behaviour of investment-cast open-pore aluminium foams", *Acta Materialia*, 61 (14): 5152–5161 (2013).
34. Juarez-Hernandez, A. Benavides-Trevino, R. Barceinas-sanchez, O. Hernandez-Rodriguez, M. Almaguer, R., "Study of process parameters on aluminium foam formation in the Al-6Si-3Mg alloy", *Metalurgija*, 53 (2): 218–220 (2014).
35. Suarez, M. A., Figueroa, I. A., Gonzalez, G., Lara-Rodriguez, G. A., Novelo-Peralta, O., Alfonso, I. and Calvo, I. J., "Production of Al-Cu-Fe metallic foams without foaming agents or space holders", *Journal Of Alloys And Compounds*, 585318–324 (2014).
36. Aly, S. P., Arif, A. F. M., Al-Athel, K. S., Mostaghimi, J. and Zubair, S. M., "Performance of open pore metal foam heat sinks fabricated with thermally sprayed interface", *Applied Thermal Engineering*, 105411–424 (2016).
37. Campana, F. and Pilone, D., "Effect of wall microstructure and morphometric parameters on the crush behaviour of Al alloy foams", *Materials Science And Engineering A*, 479 (1–2): 58–64 (2008).
38. Campana, F. and Pilone, D., "Effect of heat treatments on the mechanical behaviour of aluminium alloy foams", *Scripta Materialia*, 60 (8): 679–682 (2009).

39. Kala, H., Mer, K. K. S. and Kumar, S., "A Review on Mechanical and Tribological Behaviors of Stir Cast Aluminum Matrix Composites.", *Procedia Materials Science*, 6:1951–1960 (2014).
40. Viala, J. C., Bouix, J., Gonzalez, G. and Esnouf, C., "Chemical reactivity of aluminium with boron carbide", *Journal Of Materials Science*, 32 (17): 4559–4573 (1997).
41. Toptan, F., "Alüminyum Matrisli B4C Partükül Takviyeli Aşınma Direnci Yüksek Kompozit Malzeme Üretimi", *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi, İstanbul (2011).
42. Kennedy, A. R., "The microstructure and mechanical properties of Al-Si-B4C metal matrix composites", *Journal Of Materials Science*, 7317–323 (2002).
43. Cambroner, L. E. G., Sánchez, E., Ruiz-Roman, J. M. and Ruiz-Prieto, J. M., "Mechanical characterisation of AA7015 aluminium alloy reinforced with ceramics", *Journal Of Materials Processing Technology*, 143–144 (1): 378–383 (2003).
44. Mazahery, A., Abdizadeh, H. and Baharvandi, H. R., "Development of high-performance A356/nano-Al2O3 composites", *Materials Science And Engineering A*, 518 (1–2): 61–64 (2009).
45. Baradeswaran, A. and Elaya Perumal, A., "Influence of B4C on the tribological and mechanical properties of Al 7075-B4C composites", *Composites Part B: Engineering*, 54 (1): 146–152 (2013).
46. Mazaheri, Y., Meratian, M., Emadi, R. and Najarian, A. R., "Comparison of microstructural and mechanical properties of Al-TiC, Al-B 4C and Al-TiC-B 4C composites prepared by casting techniques", *Materials Science And Engineering A*, 560278–287 (2013).
47. Prabu, S. B., Karunamoorthy, L., Kathiresan, S. and Mohan, B., "Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite", *Journal Of Materials Processing Technology*, 171 (2): 268–273 (2006).
48. Kalaiselvan, K., Murugan, N. and Parameswaran, S., "Production and characterization of AA6061-B4C stir cast composite", *Materials And Design*, 32 (7): 4004–4009 (2011).
49. Sajjadi, S. A., Ezatpour, H. R. and Beygi, H., "Microstructure and mechanical properties of Al-Al2O3 micro and nano composites fabricated by stir casting", *Materials Science And Engineering A*, 528 (29–30): 8765–8771 (2011).
50. Mazahery, A. and Shabani, M. O., "The enhancement of wear properties of squeeze-cast A356 composites reinforced with B4C particulates", *International Journal Of Materials Research*, 103 (7): 847–852 (2012).

51. Alizadeh, A., Taheri-Nassaj, E. and Hajizamani, M., "Hot Extrusion Process Effect on Mechanical Behavior of Stir Cast Al Based Composites Reinforced with Mechanically Milled B 4C Nanoparticles", *Journal Of Materials Science And Technology*, 27 (12): 1113–1119 (2011).
52. Kumar, A., Lal, S. and Kumar, S., "Fabrication and characterization of A359/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>metal matrix composite using electromagnetic stir casting method", *Journal Of Materials Research And Technology*, 2 (3): 250–254 (2013).
53. Kok, M., "Production and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites", *Journal Of Materials Processing Technology*, 161 (3): 381–387 (2005).
54. Soltani, S., Azari Khosroshahi, R., Taherzadeh Mousavian, R., Jiang, Z. Y., Fadavi Boostani, A. and Brabazon, D., "Stir casting process for manufacture of Al–SiC composites", *Rare Metals*, 36 (7): 581–590 (2017).
55. Banhart, J., "Foam Metal : The Recipe", *Europhysics News*, 3017–20 (1999).
56. García-Moreno, F., "Commercial applications of metal foams: Their properties and production", *Materials*, 9 (2): 20–24 (2016).
57. Banhart, J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", *Progress In Materials Science*, 46 (6): 559–632 (2001).
58. Davies, G. J., Zhen, S., "Metallic foams: their production, properties and applications", *Journal Of Materials Science*, 18 (7): 1899–1911 (1983).
59. Lefebvre, L. P., Banhart, J. and Dunand, D. C., "Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments", *Advanced Engineering Materials*, 10 (9): 775–787 (2008).
60. Báez–Pimiento, S., Hernández–Rojas, M. E. and Palomar–Pardavé, M. E., "Processing and Characterization of Open–Cell Aluminum Foams Obtained through Infiltration Processes", *Procedia Materials Science*, 954–61 (2015).
61. Eisenmann, M., "Metal powder technologies and applications", ASM Handbook, *ASM International*, 2551 (1998) .
62. Martin, L., R., "Integral porous-core metal bodies and in situ method of manufacture thereof", *United States patent*, 595–599 (1985).
63. Schwartz, D. S., Shih, D. S., Evans, A.G. and Wadley, H. N. G., "Development and scale-up of the low density core process for Ti-64", *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 521(1998).
64. Hurysz, K. M., Clark, J. L., Nagel, A. R., Hardwicke, C. U., Lee, K. J., Cochran., J. K. and T.H. Sanders, J., "Steel and titanium hollow sphere foams", *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 198–201 (1998).

65. Conde, Y., Despois, J. F., Goodall, R., Marmottant, A., Salvo, L., Marchi, C. S. and Mortensen, A., "Replication processing of highly porous materials", *Advanced Engineering Materials*, 8 (9): 795–803 (2006).
66. Fabrizio, Q., Boschetto, A., Rovatti, L. and Santo, L., "Replication casting of open-cell AlSi7Mg0.3 foams", *Materials Letters*, 65 (17–18): 2558–2561 (2011).
67. Haynes, W. M., "CRC Handbook of Chemistry and Physics", *CRC Press LLC*, Boca Raton, 1–5 (2016).
68. Kearney, A. L., "Properties of Cast Aluminum Alloys", ASM Handbook, *ASM International*, 889–896 (1990).
69. Amir Khanlou, S. and Niroumand, B., "Synthesis and characterization of 356-SiCp composites by stir casting and compocasting methods", *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China (English Edition)*, 20788–793 (2010).
70. Hashmi, J., "The production of metal matrix composites using the stir casting technique", *Dublin City University*, Ph. D. Thesis, Dublin, (1999).
71. Wang, Q. Z., Cui, C. X., Liu, S. J., and Zhao, L. C., "Open-celled porous Cu prepared by replication of NaCl space-holders", *Materials Science And Engineering A*, 527 (4–5): 1275–1278 (2010).
72. Liu, J. A., Gao, F., Rao, Y. Q., Wu, C. L., and Liu, Y., "Compressive Properties of Aluminum Foams Produced by Replication Route using Spheroidal Calcium Chloride as Space Holder J.", *The Japan Institute Of Metals And Materials*, 1–6 (2015).
73. Internet: KBU Laboratuvarları, "Optik Mikroskop", <https://lab.karabuk.edu.tr/cihaz.aspx?val=35> .
74. Internet: KBU Laboratuvarları, "Vickers Sertlik Cihazı", <https://lab.karabuk.edu.tr/cihaz.aspx?val=43> .
75. Internet: KBU Demir Çelik Enstitüsü, "SEM Laboratuvarı", <http://dce.karabuk.edu.tr/icerikGoster.aspx?K=S&id=1091&BA=index.aspx> .
76. Internet: KBU Demir Çelik Enstitüsü, "XRD-XRF Laboratuvarı", <http://dce.karabuk.edu.tr/icerikGoster.aspx?K=S&id=1096&BA=index.aspx> .
77. Internet: KBU Demir Çelik Enstitüsü, "Statik Test Laboratuvarı", <http://dce.karabuk.edu.tr/icerikGoster.aspx?K=S&id=1090&BA=index.aspx> .
78. Standard, I., "ISO 13314 Mechanical testing of metals, ductility testing, compression test for porous and cellular metals", *International Organization For Standardization*, 1–7 (2011).

79. Rovner, L. H. and Hopkins, G. R., "Ceramic materials for fusion", *Nuclear Technology*, 29 (3): 274–302 (1976).
80. Ammiraju, S., Madhusudhan, R., Narender, K., Rao, K. G. K. and Krishna, N. G., "Thermophysical properties of rubidium and lithium halides by  $\gamma$ -ray attenuation technique", *High Temperature*, 52 (5): 640–653 (2014).
81. İrizalp, S. G., Aksoy, U., Ersenbil, E., Saklakoğlu, N., "A360 alüminyum alaşımına Mg ilavesinin malzeme yapısındaki sertlik dağılımına etkisinin incelenmesi", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, 2 (2): 87–94 (2011).
82. Vončina, M., Kores, S., Mrvar, P. and Medved, J., "Effect of Ce on solidification and mechanical properties of A360 alloy", *Journal Of Alloys And Compounds*, 509 (27): 7349–7355 (2011).
83. Sun, Y. and Ahlatci, H., "Mechanical and wear behaviors of Al-12Si-XMg composites reinforced with in situ Mg<sub>2</sub>Si particles", *Materials And Design*, 32 (5): 2983–2987 (2011).
84. Culliton, D., Betts, A. J. and Kennedy, D., "Impact of intermetallic precipitates on the tribological and/or corrosion performance of cast aluminium alloys: A short review", *International Journal Of Cast Metals Research*, 26 (2): 65–71 (2013).
85. Sunar, T. and Cetin, M., "An Experimental Study on Boron Carbide Reinforced Open Cell Aluminum Foams Produced via Infiltration Technique", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8 (6): 3640–3645 (2018).
86. Isfahani, N. M. J., Payami, F., Asadabad, M. A., and Shokri, A. A., "Investigation of the effect of boron carbide nanoparticles on the structural, electrical and mechanical properties of Al-B<sub>4</sub>C nanocomposites", *Journal Of Alloys And Compounds*, 7971348–1358 (2019).
87. Yang, X., Hu, Q., Du, J., Song, H., Zou, T., Sha, J., He, C. and Zhao, N., "Compression fatigue properties of open-cell aluminum foams fabricated by space-holder method", *International Journal Of Fatigue*, 121 (October 2018): 272–280 (2019).
88. Salvo, C., Aguilar, C., Lascano, S., Pérez, L., López, M. and Mangalaraja, R. V., "The effect of alumina particles on the microstructural and mechanical properties of copper foams fabricated by space-holder method", *Materials Research Express*, 5 (5): (2018).
89. Moradi, M. R., Moloodi, A. and Habibolahzadeh, A., "Fabrication of Nano-composite Al-B<sub>4</sub>C Foam via Powder Metallurgy-space Holder Technique", *Procedia Materials Science*, 11 (2000): 553–559 (2015).
90. Jojith, R. and Radhika, N., "Enhancement of Mechanical and Sliding Wear Properties of Functionally Graded Al-12Si-Cu Composites", *Materials Research Express*, 60–22 (2019).

## ÖZGEÇMİŞ

Talha SUNAR 1990 yılında İzmit’te doğdu; ilk ve orta öğrenimini Gölcük’te tamamladı. Gölcük Anadolu Denizcilik Meslek Lisesi, Gemi Makineleri Bölümü’nden mezun oldu. 2008 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Mekatronik Eğitimi Bölümü’nde lisans öğrenimine başladı. Lisans öğreniminin son yılında, Erasmus kapsamında İtalya’nın L’Aquila Üniversitesinde eğitim gördü ve 2012 yılında mezun oldu. 2015 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı’ndan “Karbon-fiber takviyeli kompozit malzemelerin talaşlı imalatının sonlu elemanlar simülasyonu” başlıklı yüksek lisans çalışması ile mezun oldu. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı ve halen aynı yerde görevine devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi  
İmalat Mühendisliği Bölümü, Üretim Metalürjisi Laboratuvarı  
Balıklar kayası Mevkii / KARABÜK  
E-posta : [talhasunar@gmail.com](mailto:talhasunar@gmail.com)