

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında  
Özgür Yasin KESKİN tarafından hazırlanan

AA2024/Al2O3 PARÇACIK TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT KÖPÜKLERİN  
ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

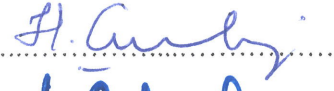
başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 21 / 05 / 2019 gün ve 1805 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI



Üye : Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI



Üye : Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ



Prof. Dr. Asim KADIOĞLU  
Enstitü Müdürü

## ÖNSÖZ

Dünyada artan enerji talebi ve hammadde ihtiyaçları göz önünde bulundurulduğunda yeni mühensilik malzemelerinin geliştirilmesi ve bu ihtiyaçları karşılaması önem arz etmektedir. Mevcut gözenekli yapılar (polimer ve seramik) tüm mühendislik uygulamalarında gereken fiziksel ve mekanik özellikleri karşılayamamakta ve bu durum metal köpükleri ön plana çıkarmaktadır. Metal köpükler; düşük yoğunlukları, yüksek sönümlenme özellikleri, yüksek yüzey alanları ve termal özellikler gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı son yıllarda mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kullanım alanına ve beklenen mekanik ve fiziksel özelliklere bağlı olarak farklı matris malzemeleri ve takviye elemanları ile kompozit metal köpükler üretilmektedir.

Bu çalışmada AA2024 matrisli  $Al_2O_3$  takviyeli metal köpükler köpürtücü ajan ( $TiH_2$ ) kullanılarak toz metalürjisi yöntemi ile üretildi. Farklı sürelerde mekanik alaşımlanan tozların karakterizasyonu yapıldı. Farklı köpürtme süreleri ve farklı takviye oranları ile kompozit metal köpükler üretildi. Köpürtme süresinin gözenek oluşumuna, dağılımına ve metal köpüklerin yoğunluk değerleri üzerine etkisi incelendi. Takviye malzemesi olarak kullanılan  $Al_2O_3$  üç farklı oranda takviye edilmiştir. Takviye miktarının metal köpüklerin gözenek oluşumuna, boyut dağılımına ve sertlik değerlerine etkisi incelenmiştir.

Yüksek lisans çalışmam boyunca desteğini sürdüren, bilgi ve deneyimleri ile önümü açan danışmanım Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI' ya teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarımda yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Doç. Dr. Temel VAROL, Dr. Öğr. Üyesi Fatih ERDEMİR, Öğr.Gör. Özlem CANPOLAT, Arş. Gör. Müslim ÇELEBİ, Arş. Gör. Serdar ÖZKAYA, Arş. Gör. Abdullah Hasan KARABACAK, Metalurji ve Malzeme Yüksek Müh. Mustafa Enis TAŞÇIOĞLU, Metalurji ve Malzeme Yüksek Müh. Kürşat Alp ARPACI, Metalurji ve Malzeme Müh. Mohammed OUIKHALFAN ve çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü' ne teşekkür ederim.

Özgür Yasin KESKİN

Trabzon 2019

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Köpüklerin Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 13/06/2019

Özgür Yasin KESKİN

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLO DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Metal Köpük Üretim Yöntemleri.....	2
1.2.1. Gaz Enjeksiyon Yöntemi.....	3
1.2.2. Metal Köpüklerin Köpürtücü Ajan İlavesi ile Üretimi.....	4
1.2.3. Polimer ya da Wax Şablon Kullanılarak Metal Köpük Üretimi.....	6
1.2.4. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Metal Köpük Üretimi.....	9
1.2.4.1. Köpükleştirici Ajan Kullanımı ile Metal Köpük Üretimi.....	9
1.2.4.2. Harcanabilir Malzeme Kullanımı ile Metal Köpük Üretimi.....	10
1.2.4.3. Yapıda İnert Gaz Kullanarak Metal Köpük Oluşturma.....	11
1.3. Metal Köpüklerin Kullanım Alanları.....	13
1.3.1. Otomotiv Endüstrisi.....	13
1.3.2. Ses Yalıtımı .....	13
1.3.3. Biyomedikal Uygulamalar.....	14
1.3.4. Havacılık ve Uzay Endüstrisi .....	15
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	16
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	18
2.1. Kullanılan Malzemeler .....	20
2.2. Mekanik Alaşımlama.....	24
2.3. Toz Morfolojilerinin İncelenmesi.....	25

2.4.	Faz Analizi.....	26
2.5.	TiH <sub>2</sub> Tozlarının DTA-TG Analizleri .....	26
2.6.	Parçacık Boyut Analizi .....	27
2.7.	Sıcak ve Soğuk Presleme.....	27
2.8.	Metalografik İncelemeler.....	28
2.9.	Gözenek Yapılarının İncelenmesi.....	29
2.10.	Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi .....	29
2.10.1.	Yoğunluk ve Gözeneklilik.....	29
2.11.	Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi.....	30
2.11.1.	Sertlik Testleri .....	30
3.	BULGULAR.....	31
3.1.	Toz Karakterizasyonu .....	31
3.1.1.	Başlangıç Tozlarının Morfolojileri .....	31
3.1.2.	TiH <sub>2</sub> Tozlarının EDS analizi.....	32
3.1.3.	Başlangıç Tozlarının XRD Analizleri .....	33
3.1.4.	TiH <sub>2</sub> tozlarının DTA-TG analizi.....	36
3.1.5.	Mekanik Alaşımlanmış Tozların Morfolojileri .....	37
3.1.6.	Mekanik Alaşımlanmış Tozların XRD Analizleri.....	40
3.2.	Üretilen Metal Köpüklerin Özellikleri.....	45
3.2.1.	Metal köpüklerin EDS analizleri .....	46
3.2.2.	Yoğunluk ve Gözeneklilik.....	50
3.2.3.	Kompozit Metal Köpüklerin Ortalama Gözenek Boyut Analizleri.....	60
3.2.4.	Sertlik Ölçümleri .....	66
4.	İRDELEME .....	70
5.	SONUÇLAR.....	72
6.	ÖNERİLER.....	74
7.	KAYNAKLAR .....	75

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans

ÖZET

AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PARÇACIK TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT  
KÖPÜKLERİN ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Özgür Yasin KESKİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI  
2019, 77 Sayfa

Çalışmada; AA2024/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpükler toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretildi. Matris malzemesi olarak ortalama tane boyutu 110 µm olan AA2024 alaşımı kullanıldı. Takviye malzemesi olarak ortalama tane boyutu 40 µm olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %1, %3 ve %5 oranlarında katıldı. Köpürtücü ajan ilavesi olarak %1 oranında ısıtılma tabii tutulmuş TiH<sub>2</sub> eklendi. Farklı oranlarda takviye ve sabit oranda köpürtücü ajan ilavesi ile oluşturulan karışımlar farklı öğütme sürelerinde gezegen tipi bilyeli değirmende mekanik alaşımlandı. Elde edilen tozlar 500 °C’ de sinterlenerek 625 MPa basınç ile preslendi. Elde edilen numuneler 750 °C sıcaklıkta 5,6,7,8,9,10,12 dakika süre ile açık atmosferde köpürtme işlemine tabii tutuldu. Elde edilen tozların ve numunelerin karakterizasyonu (SEM-EDS, XRD) yapılmış, fiziksel özellikleri (yoğunluk, gözeneklilik , ortalama gözenek boyutları), mekanik özellikleri (sertlik) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en düşük yoğunluk, homojen gözenek dağılımı %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpüklerde elde edilmiştir. artan takviye oranına bağlı olarak sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir.

**Anahtar Kelime:** Toz Metalürjisi, Mekanik Alaşımlama, Metal Köpük, Kompozit



Master Thesis

SUMMARY

PRODUCTION OF AA2024 / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PARTICLE REINFORCED METAL MATRIX COMPOSITE  
FOAMS AND INVESTIGATION OF THEIR PROPERTIES

Özgür Yasin KESKİN

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Science  
Metallurgy and Materials Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI  
2019, 77 Pages

In this study; AA2024 / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced composite metal foams were produced using powder metallurgy method. AA2024 with average grain size 110 µm was used as matrix material. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, reinforcement material, with average grain size 40 µm, was added at %1, %3, and %5. %1 heat treated TiH<sub>2</sub> was added as blowing agent. The mixtures which was formed with different amount of reinforcement addition and fixed amount of blowing agent were mechanically alloyed with planetary type ball mill with different alloying time. The obtained powders were sintered at 500 ° C and pressed with a pressure of 625 MPa. The obtained samples were foamed in an open atmosphere at 750 ° C for 5,6,7,8,9,10,12 minutes. The characterization of the obtained powders and samples (SEM-EDS, XRD), physical properties (density, porosity, average pore size), mechanical properties (hardness) were determined. According to the results obtained, the lowest density, homogeneous pore distribution was obtained from 3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced composite metal foams. With increasing reinforcement rate, increasing hardness values observed.

**Key words:** Powder Metallurgy, Mechanical Alloying, Metal Foam, Composite

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1.1. Açık ve kapalı gözenek köpük yapısı [4, 5].	2
Şekil 1.2. Gaz enjeksiyon yöntemi ile metal köpük üretimi şematik gösterimi [1, 3].	3
Şekil 1.3. Cymat köpüğün mikro yapısı [3].	4
Şekil 1.4. Alporas köpüğün hücre yapısı [3].	5
Şekil 1.5. Köpükleştirici ajan ile ergiyik metal köpükleştirme işlemi [13].	5
Şekil 1.6. Polimer Şablon Kullanımı ile Metal Köpük Oluşturulması Şematik Gösterimi [2, 17].	7
Şekil 1.7. Fiziksel Buhar Çöktürme ile Gözenekli Yapı Oluşturma Şematik Gösterimi [2].	8
Şekil 1.8. Toz Metalurjisi İle Metal Köpük Üretimi [16].	10
Şekil 1.9. Harcanan malzeme kullanımı ile metal köpük üretimi şematik gösterimi [2].	11
Şekil 1.10. İnert gaz kullanımı ile metal köpük üretimi [2].	12
Şekil 1.11. Otomobillerde metal köpüklerin kullanıldığı bölgeler [3].	13
Şekil 1.12. (a) Otoyol köprüsünde ses yalıtımları (b) yarı küre şeklinde ses yalıtım tüpleri [2].	14
Şekil 1.13. Metal köpük implant malzeme	15
Şekil 1.14. Bir rokette kullanılan alüminyum köpükten yapılmış koni biçimindeki prototip [33].	16
Şekil 2.1. Üretim Şeması	19
Şekil 2.2. Elek Ünitesi	21
Şekil 2.3. Bilyeli değirmen, öğütücü kap ve bilyeler	25
Şekil 2.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	25
Şekil 2.5. XRD analiz cihazı	26
Şekil 2.6. DTA-TGA analiz cihazı	27
Şekil 2.7. Parçacık boyut dağılım analiz cihazı	27
Şekil 2.8. Sıcak Pres Makinesi	28

Şekil 2.9.	(a) Kesme (b) Zımparalama ve parlatma cihazı.....	28
Şekil 2.11.	Innovatest Nemesis 9000 model sertlik cihazı.....	30
Şekil 3.1.	Başlangıç tozlarının morfolojileri (a) AA2024, (b) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (c) TiH <sub>2</sub> , (d) ısıtım işlem sonrası TiH <sub>2</sub> tozları.....	31
Şekil 3.2.	Isıtım işlem (a) öncesi, (b) sonrası, TiH <sub>2</sub> tozlarının EDS analizleri.....	32
Şekil 3.3.	Başlangıç tozlarının morfolojileri (a) AA2024, (b) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (c) TiH <sub>2</sub> , (d) ısıtım işlem sonrası TiH <sub>2</sub> tozları.....	34
Şekil 3.4.	(a) normal ve (b) ısıtım işlem görmüş olan TiH <sub>2</sub> tozlarının DTA-TG eğrileri.....	37
Şekil 3.5.	% 1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / % 1 TiH <sub>2</sub> / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların morfolojileri (a) 15 (b) 30 (c) 45 .....	38
Şekil 3.6.	% 3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / % 1 TiH <sub>2</sub> / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların morfolojileri (a) 15 (b) 30 (c) 45 .....	38
Şekil 3.7.	% 5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / % 1 TiH <sub>2</sub> / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların morfolojileri (a) 15 dakika, (b) 30 dakika, (c) 45 dakika .....	39
Şekil 3.8.	% 1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / % 1 TiH <sub>2</sub> / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların XRD grafikleri.....	41
Şekil 3.9.	% 1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / % 1 TiH <sub>2</sub> / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların (111) maksimum pikinde alaşımla nedeni ile meydana gelen kayma.....	41
Şekil 3.10.	% 3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / % 1 TiH <sub>2</sub> / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların (111) maksimum pikinde mekanik alaşımlamaya bağlı olarak meydana gelen kayma.....	42
Şekil 3.11.	% 3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / % 1 TiH <sub>2</sub> / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların (111) maksimum pikinde mekanik alaşımlamaya bağlı olarak meydana gelen kayma.....	43
Şekil 3.12.	% 5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / % 1 TiH <sub>2</sub> / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların (111) maksimum pikindeki kayma.....	44
Şekil 3.13.	% 5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / % 1 TiH <sub>2</sub> / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların (111) maksimum pikindeki kayma.....	44
Şekil 3.14.	(a) Köpürtme işlemi öncesi sinterlenmiş ve köpürtülmüş, (b) Farklı sıcaklıklarda köpürtülmüş (12-10-9-8-7-6-5 dakika) numuneler.....	45
Şekil 3.15.	K12-1-45 numunesine ait EDS analizleri.....	46
Şekil 3.16.	K12-3-45 numunesine ait EDS analizleri.....	47
Şekil 3.17.	K12-5-45 numunesine ait EDS analizleri.....	49
Şekil 3.18.	% 1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen yoğunluk değişimi .....	52

Şekil 3.19. %1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen gözeneklilik değişimi.....	52
Şekil 3.20. %1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen bağıl yoğunluk değişimi .....	53
Şekil 3.21. %3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen yoğunluk değişimi .....	55
Şekil 3.22. %3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen yüzde gözeneklilik değişimi .....	55
Şekil 3.23. %3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen yüzde bağıl yoğunluk değişimi.....	56
Şekil 3.24. %5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen yoğunluk değişimi .....	58
Şekil 3.25. %5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen yüzde gözeneklilik değişimi .....	58
Şekil 3.27. %1-3-5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde takviye oranına bağlı olarak meydana gelen ortalama yoğunluk değişimleri karşılaştırması.....	60
Şekil 3.28. Kompozit metal köpüklerin gözenek boyut ölçümü .....	60
Şekil 3.29. %1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli (a) 15 dakika, (b) 30 dakika ve (c) 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozlardan elde edilen metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen gözenek boyutu değişimi. ....	62
Şekil 3.30. %1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen ortalama gözenek boyutu değişimi.....	62
Şekil 3.31. %3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli (a) 15 dakika, (b) 30 dakika ve (c) 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozlardan elde edilen metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen gözenek boyutu değişimi .....	63
Şekil 3.32. %3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen ortalama gözenek boyutu değişimi .....	64
Şekil 3.33. %5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli (a) 15 dakika, (b) 30 dakika ve (c) 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozlardan elde edilen metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen gözenek boyutu değişimi .....	65
Şekil 3.34. %5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen ortalama gözenek boyutu değişimi.....	66
Şekil 3.35. %1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen sertlik değerindeki değişimi.....	68
Şekil 3.36. %3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12)bağlı olarak meydana gelen sertlik değerindeki değişimi.....	68
Şekil 3.37. %5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen sertlik değerindeki değişimi.....	69

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. AA2024 Tozlarının Kimyasal Bileşimi (%) [40].....	20
Tablo 2.2. AA2024 Tozlarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri [40].....	20
Tablo 2.3. Üretilecek olan %1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviye içeren metal köpüklerin üretim parametreleri.....	22
Tablo 2.4. Üretilecek olan %3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviye içeren metal köpüklerin üretim parametreleri.....	23
Tablo 2.5. Üretilecek olan %5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviye içeren metal köpüklerin üretim parametreleri.....	24
Tablo 3.1. %1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin göreceli yoğunluk, gözeneklilik oranı, deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluk değerleri.....	51
Tablo 3.2. %3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin göreceli yoğunluk, gözeneklilik oranı, deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluk değerleri.....	54
Tablo 3.3. %5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin göreceli yoğunluk, gözeneklilik oranı, deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluk değerleri.....	57
Tablo 3.4. %1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin ortalama gözenek boyut değerleri .....	61
Tablo 3.5. %3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin ortalama gözenek boyut değerleri .....	63
Tablo 3.6. %5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin ortalama gözenek boyut değerleri .....	65
Tablo 3.7. %1-3-5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpüklerin ortalama sertlik değerleri.	67

## SEMBOLLER DİZİNİ

AA2024: Alüminyum 2024 alaşımı

Al: Alüminyum

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Alüminyum oksit

TiH<sub>2</sub>: Titanyum Dihidrür

XRD: X-ışınları difraktometresi

DTA: Diferansiyel Termal Analiz

TGA: Termogravimetrik Analiz

SEM: Taramalı elektron mikroskobu

EDS: Enerji dağılım spektroskopisi

d<sub>50</sub>: Ortalama tane boyutu

HV: Vickers sertlik değeri

nm: Nanometre

µm: Mikrometre

MPa: Mega pascal

# 1. GENEL BİLGİLER

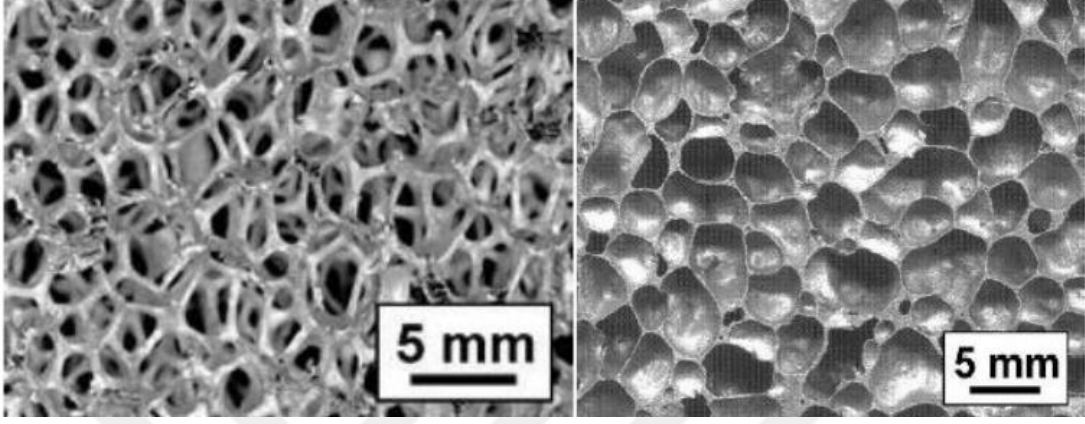
## 1.1. Giriş

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte enerji ve hammadde tüketimi artmakta, buna bağlı olarak daha hafif, daha mukavemetli ve daha az enerji tüketimi sağlayan malzemelere olan ihtiyaç artmaktadır. İnsanlar yüzyıllardır yeni malzemelerin geliştirilmesinde doğadan yararlanmışlardır ve hücreli yapılar bu açıdan büyük önem arz etmektedir. Kemikler, odun yapısı doğada bulunan hücreli yapılara örnek olarak gösterilebilir. Bu yapıların en önemli özellikleri düşük yoğunluklarına karşılık yüksek yüksek rijitlik, fiziksel ve mekanik özellikler sağlamasıdır [1].

Metal köpükler ağaç, kemik gibi doğada hücreli halde bulunan yapılardan esinlenilerek geliştirilmiş gözenekli malzemelerdir. Bu malzemeler yüksek enerji absorpsiyon kapasitesi, düşük yoğunluk, normal bir bulk malzemeye göre daha fazla yüzey alanına sahip olması nedeni ile yüksek ısı iletkenlik, yüksek basma mukavemeti, yalıtım ve akustik özellikleri nedeni ile son yıllarda yoğun ilgi gören malzemeler arasındadır. Özellikle metal köpüklerin yüksek enerji sönümlenme özelliği, alternatif olarak kullanılan gözenekli polimer ve seramik malzemelerden üstün kılmaktadır. Polimerler ile yüksek sıcaklıklara çıkılamamakta, seramikler ile istenilen bası mukavemet değerleri elde edilememektedir. Metal köpükler bu iki özelliği bir arada bulundurması nedeni ile ön plana çıkmaktadır. Günümüzde artan dünya nüfusuna karşılık enerji ve hammadde ihtiyacı da aynı oranda artmaktadır. Buna bağlı olarak daha düşük hammadde miktarı ve enerji tüketimi sağlayabilen mühendislik malzemelerine olan ilgi artmaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde hafif ve dayanımlı ürünler sağlanabilen ve enerji tüketimini azaltan metal köpükler gibi mühendislik malzemelerinin geliştirilmesi ve endüstride kullanımı önem arz etmektedir [2, 3].

Metal köpükler genellikle gözenek yapılarına göre açık ve kapalı hücreli olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 1.1'de açık ve kapalı gözenekli köpük yapıları gösterilmektedir. Açık gözenekli metal köpükler, gözeneklerin birbirleri ile bağlantılı olduğu, gaz ve sıvı akışına izin veren yapılar olarak tanımlanabilirler [4, 5]. Gözeneklerin birbirine bağlı olması nedeni ile yüksek yüzey alanı sağlanmaktadır ve termal, elektriksel uygulamalarda tercih edilmektedir [6]. Ayrıca gözeneklerin birbirlerine bağlı olması nedeni ile diğer malzemelere alternatif olarak filtre malzemesi olarak da kullanılabilir [7]. Kapalı gözenekli metal

köpükler, gözenekleri arasında bağlantı olmayan yapılar olarak tanımlanmaktadır [4]. Açık gözenekli köpüklere göre daha yüksek mukavemet ve rijitlik sağlamaktadır. Bu tip metal köpükler enerji sönmleme, yalıtım, ısı kalkanları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır [2].



Şekil 1.1. Açık ve kapalı gözenek köpük yapısı [4, 5].

Alüminyum, bakır, titanyum, altın, çelik, çinko, gümüş, nikel gibi birçok metal gözenekli yapıda üretilebilmektedir. Titanyum genellikle biyolojik ve kimyasal uygulamalarda, çelik yapısal uygulamalarda, bakır ise yüksek iletkenliği nedeni ile elektriksel ve termal uygulamalarda kullanılmaktadır. Altın, gümüş gibi maliyeti yüksek metallerin kullanıldığı uygulamalar yüksek maliyet gerektirebilir. Kullanılacak malzemenin gözenekli yapıda üretilmesi hammaddenin daha az kullanılması ve buna bağlı olarak maliyetin düşmesi açısından önemlidir [8]. Bu metaller arasında alüminyum ve alüminyum alaşımları son yıllarda, düşük maliyetleri, düşük yoğunlukları, korozyon dirençlerinin yüksek olması, düşük ergime sıcaklığı, endüstride ve günlük hayatta yaygın olarak kullanılması nedeni ile gözenekli yapıda üretimleri ilgi odağı haline gelmiştir. Gözenekli alüminyum yapılar birçok metal köpük üretim yöntemi ile üretilebilmekte ancak en yaygın toz metalürjisi yöntemi ile üretilmektedir [1, 9].

## 1.2. Metal Köpük Üretim Yöntemleri

Metal köpük üretimi için birçok yöntem mevcuttur ancak tüm yöntemler genel anlamda 3 ana başlık altında toplanmaktadır:

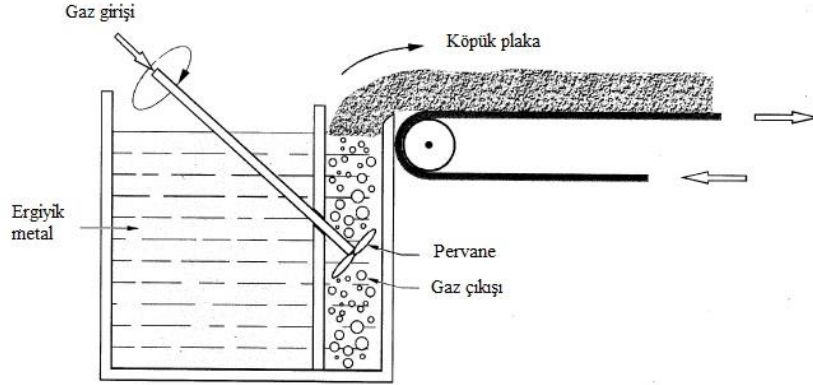
- Sıvı metalden metal köpük yapımı



- Toz metalürjisi ile metal köpük yapımı
- Buhar çöktürme ile metal köpük yapımı [1].

### 1.2.1. Gaz Enjeksiyon Yöntemi

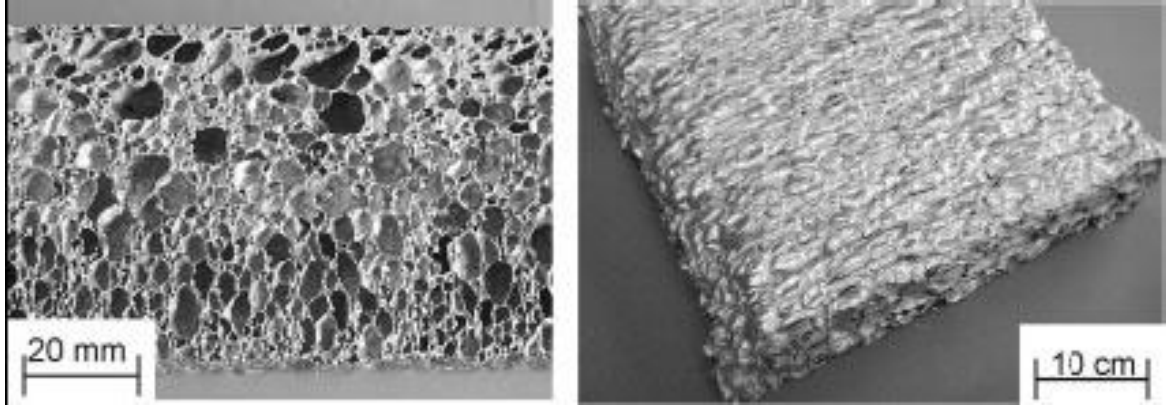
Bu yöntem ilk olarak 1980-1990 yıllarında eş zamanlı ve birbirinden bağımsız olarak Cymat/Alcan, Norsk Hydro firmaları tarafından geliştirilmiştir [3]. Saf bir sıvı metalin içerisine gaz enjekte edilmesi ve bu gazın sıvı metal içerisinde katılaşma tamamlanana muhafaza edilmesi zordur. Bu sorunu gidermek amacı ile sıvı metal içerisine çözünmeyen alüminyum oksit ya da silisyum karbür gibi seramik partiküller ilave edilebilir [1-3, 10]. Bu sayede sıvı metalin viskozitesi artacak, seramik partiküller köpüklere tampon görevi yaparak büyümelerini önleyecek ve bu sayede metal katılaşana kadar gözenekler yapıda muhafaza edilebilecektir [2, 3, 11].



Şekil 1.2. Gaz enjeksiyon yöntemi ile metal köpük üretimi şematik gösterimi [1, 3].

Şekil 1.2' de gaz enjeksiyon yönteminin şematik gösterimi görülmektedir. İlk olarak köpükleştirilecek metal, tampon görevi görecektir olan seramik partiküller ile bir potada ergitilmektedir. Daha sonra sıvı metal içerisine köpük oluşumunu sağlayacak olan nozül ve pervane içeren sistem daldırılmaktadır. Nozül yardımı ile sıvı metal içerisine gaz enjekte edilir. Uçtaki pervane hem ilave gözenek oluşumu sağlamakta hem de oluşturulan baloncukların homojen dağılımını sağlamaktadır [12]. Köpükleşen eriyik metal bir bant yardımı ile çekilerek katı metal köpük oluşturulur [2]. Şekil 1.3'de Cymat firması tarafından

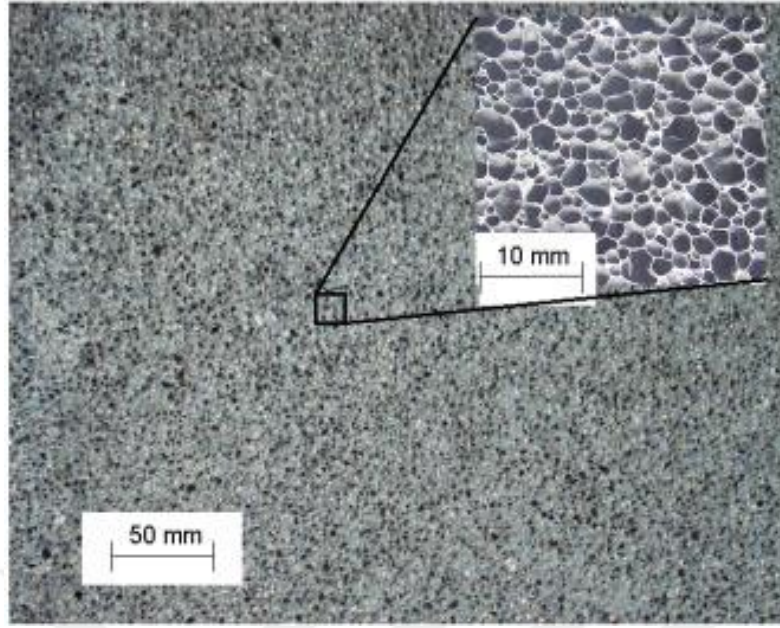
üretilecek bir köpük yapısı gösterilmektedir. Diğer yöntemlere nazaran daha büyük boyutlarda, daha düşük maliyetlerle metal köpükler üretilebilmektedir. Gözenek boyutları kullanılan gazın akış miktarına ve basıncına, kullanılan nozul sayısına ve boyutuna, pervanelerin tasarımına bağlı olarak ayarlanabilir [2, 3, 13]. Kullanılan gazlar üretilecek olan metale göre karbondioksit, oksijen, inert gaz kullanılabilir [2].



Şekil 1.3. Cymat köpüğün mikro yapısı [3].

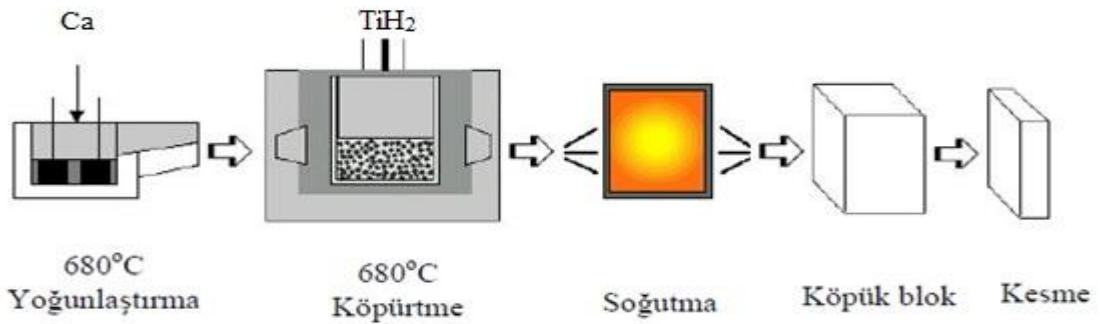
### 1.2.2. Metal Köpüklerin Köpürtücü Ajan İlavesi ile Üretimi

Metal alaşımları, sıcaklık ile birlikte gaz oluşturan köpükleştirici ajanların ilavesi ile de üretilebilmektedir. En yaygın olarak kullanılan köpükleştirici ajan Titanyum Hidrürdür ( $TiH_2$ ).  $TiH_2$ ,  $465^\circ C$ 'nin üzerine ısıtıldıklarında çözünmeye başlarlar ve  $H_2$  gazı oluştururlar. Ergiyik halindeki metal alaşımları içerisinde  $TiH_2$  partikülleri katılarak yüksek miktarda hidrojen gazı hızlı bir şekilde üretilebilmektedir. Soğuyan metal katılarak gözenekli yapı oluşturmaktadır. Bu yöntem ticari olarak 1986 yılında Shinko Wire firması tarafından "Alporas" markası ile alüminyum köpük üretiminde kullanılmaya başlanmıştır [2, 3, 13-15]. Şekil 1.4' de "Alporas" yöntemi ile üretilmiş bir alüminyum köpüğün gözenek yapısı gösterilmektedir. "Alporas" mevcut olan alüminyum köpükler arasında en stabil metal köpük olarak görülmektedir [1].



Şekil 1.4. Alporas köpüğün hücre yapısı [3].

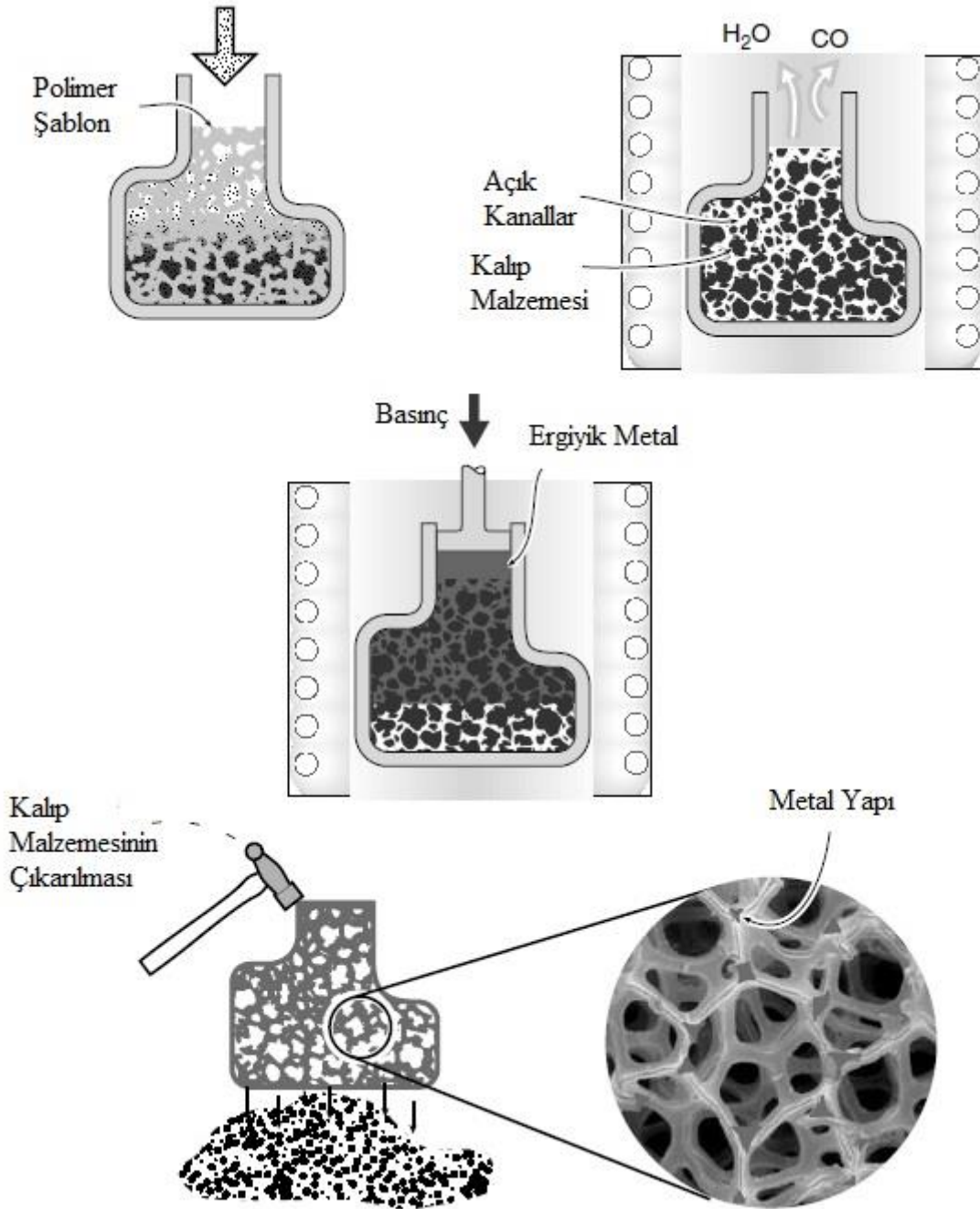
Şekil 1.5’de köpüklüştürücü ajan ile metal köpük üretimi şematik olarak gösterilmektedir. İlk olarak metal alaşımı ergime sıcaklığına ısıtılmakta, kalsiyum partikülleri eklenerek CaO partikülleri oluşturulmaktadır. Bu sayede karışımın viskozitesi artırılmakta ve gözeneklerin stabilizasyonu sağlanmaktadır. Daha sonra  $TiH_2$  partikülleri eklenerek köpükleştirme gerçekleştirilmektedir. Köpüklenen malzeme soğutularak gözenekli yapı elde edilmektedir [2, 3]. İşlem kontrolü basınç, sıcaklık, zaman ayarlamaları ile sağlanabilmektedir. Alternatif olarak farklı metal veya alaşımların üretiminde  $MgCO_3$ ,  $ZrH_2$ ,  $SrCO_3$  kullanılarak hidrojen ve karbondioksit gazları oluşturulması yardımı ile metal köpük üretimi gerçekleştirilebilmektedir [16].



Şekil 1.5. Köpükleştirici ajan ile ergiyik metal köpükleştirme işlemi [13].

### 1.2.3. Polimer ya da Wax Şablon Kullanılarak Metal Köpük Üretimi

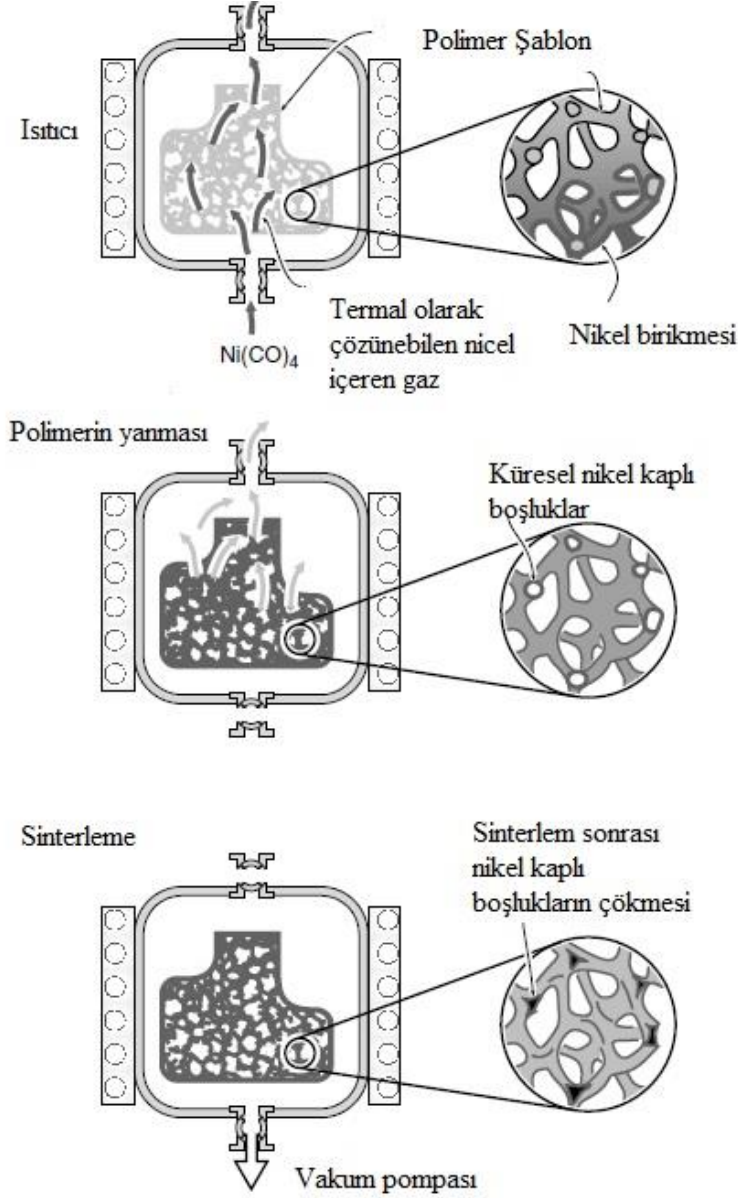
Polimer ya da wax şablonun gözenek oluşturmak için kullanıldığı üretim şeklidir. Şekil 1.6'da üretim şematik resmi gösterilmektedir. Polimer ile istenilen boyutta ve şekilde gözenekler oluşturularak bir kalıp içerisine yerleştirilir. Daha sonra içerisine çamur şeklindeki döküm kumu ya da seramik toz doldurulur ve kalıp, içerisindeki çamur sertleşene kadar ısıtılma işlemi uygulanır. Isıtılma işlemi kademeli yapılarak polimer şablon yapıdan uzaklaştırılır. Elde edilen yapı ergiyik metalin dökülebileceği şekline getirilmiş olur. Ergiyik metal ya da alaşım dökülerek soğumaya bırakılır. Ergiyik metalin tüm şablonu doldurabilmesi için düşük basınç uygulanabilir. Soğuma sonrası kalıp çıkarılır ve bu şekilde polimer şablonun yerini metal almış olur. Kuru haldeki seramik tozları titreşim ya da bir kuvvet etkisi ile metalden ayrılarak gözenekli yapı elde edilir. Metal ergiyik yerine metal tozu kullanılarak da gözenekli yapı elde edilebilir. Ticari olarak ERG DUOCEL metal köpükleri bu şekilde yapılmaktadır. Bu yöntem ile her türlü metal ve alaşımdan gözenekli yapı elde edilebilir [1-3, 17-19].



Şekil 1.6. Polimer Şablon Kullanımı ile Metal Köpük Oluşturulması Şematik Gösterimi [2, 17].

Bu işleme benzer olarak açık gözenekli metal köpükler fiziksel buhar çöktürme ya da elektro kaplama işlemi ile üretilebilmektedir. Şekil 1.7' de metal çöktürme işlemi şematik olarak gösterilmektedir. "INCO" işleminde Nikel Karbonil  $Ni(CO)_4$  polimer şablon üzerine çöktürülerek yüzeyde biriktirme yapılmakta ve daha sonra polimer uzaklaştırılarak metal

gözenekli yapı oluşturulmaktadır. Fiziksel buhar çöktürme işleminin zorlukları nedeni ile işlem nikel, titanyum gibi metaller ile sınırlıdır [2].



Şekil 1.7. Fiziksel Buhar Çöktürme ile Gözenekli Yapı Oluşturma Şematik Gösterimi [2].

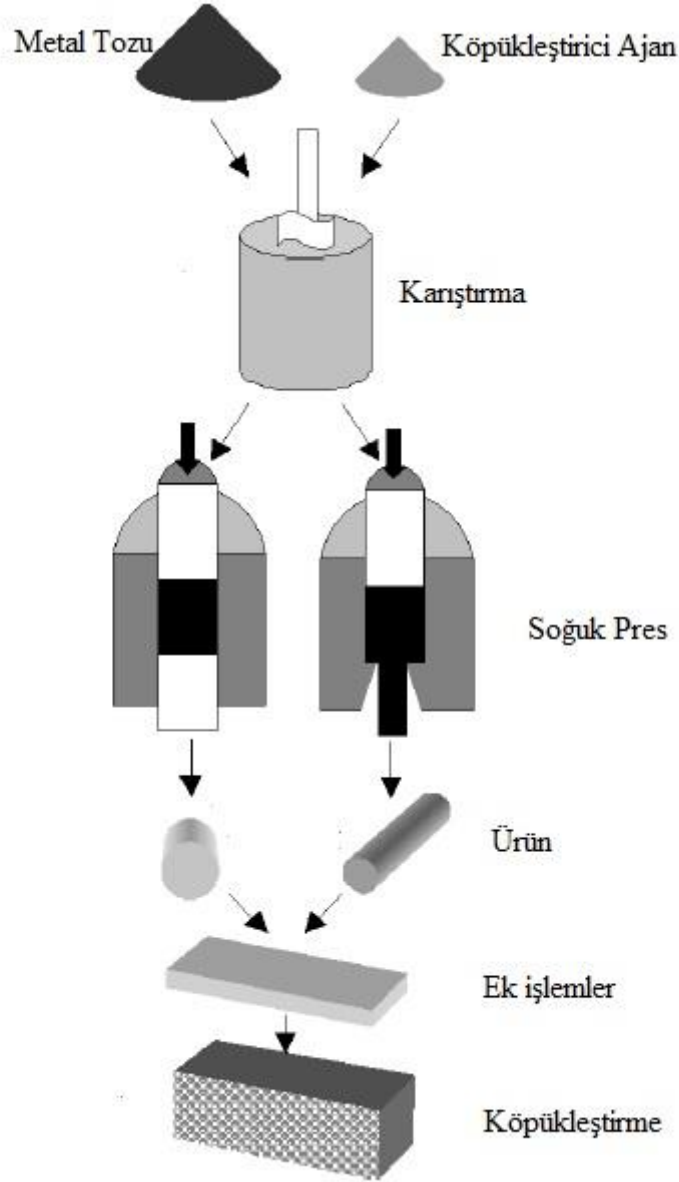
### 1.2.4. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Metal Köpük Üretimi

Metal köpük üretiminde birçok yöntem mevcut olmasına rağmen son yıllarda toz metalürjisi ile köpük üretimi ilgi odağı haline gelmiştir. Bu yöntem Alman Fraunhofer Enstitüsü'nde geliştirilmiştir [3, 20-23].

#### 1.2.4.1. Köpükleştirici Ajan Kullanımı ile Metal Köpük Üretimi

Köpükleştirici ajan ilavesi ile gözenekli yapıların oluşturulduğu üretim şeklidir. Köpükleştirici ajan olarak Magnezyum Hidroksit ( $Mg(OH)_2$ ), Magnezyum Karbonat ( $MgCO_3$ ), Dolomit ( $CaMg(CO_3)_2$ ), Kalsiyum Karbonat ( $CaCO_3$ ) [24], Titanyum Hidrür ( $TiH_2$ ), Çinko Hidrür ( $ZnH_2$ ) [25], Magnezyum Hidrür ( $MgH_2$ ) yaygın olarak kullanılmaktadır [26]. Köpükleştirici ajan seçimindeki önemli kriter, seçilen ajanın ana matris malzemesinin ergime sıcaklığına yakın ve üstündeki sıcaklıklarda gaz oluşturabilir olmasıdır. Düşük sıcaklıkta gaz oluşturması durumunda çatlak oluşumları gözlenebilir [27]. Şekil 1.8' de toz metalürjisi ile köpük üretimi şematik olarak gösterilmektedir. Yöntemde metal tozu ve köpükleştirici ajan belirli oranlarda karıştırılır. Karıştırmanın homojen olması köpüklerin dağılımı ve homojenliği açısından önemlidir [2, 3, 27]. Homojen bir şekilde karıştırılan tozlar daha sonra soğuk izostatik presleme ile preslenir. Soğuk preslemenin amacı köpükleştirici ajanın metal matris içerisine tamamen gömülmesini sağlamak, yapıda kalıntı porozite olmamasını sağlamaktır [3, 16, 27, 28]. Preslenen numune daha fazla yoğunluk elde etmek, poroziteyi minimuma indirmek amacı ile ekstrüzyon gibi ek işlemlerden geçirilebilir. Elde edilen preslenmiş numune daha sonra metalin ergime sıcaklığının üzerine ısıtılarak köpükleştirme gerçekleştirilir [2, 3, 9, 16, 18, 24, 27, 28].





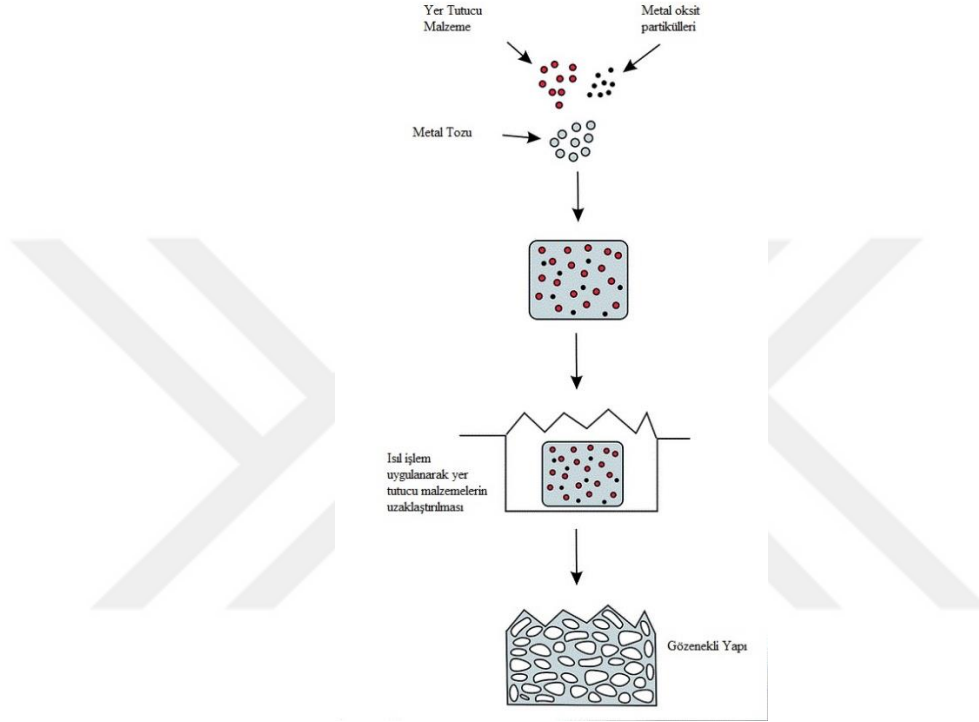
Şekil 1.8. Toz Metalurjisi İle Metal Köpük Üretimi [16].

#### 1.2.4.2. Harcanabilir Malzeme Kullanımı ile Metal Köpük Üretimi

Metal köpük üretiminde diğer bir yaklaşımda gözenek oluşturmak amacı ile yer tutucu bir malzeme kullanılması esasına dayanır. Gözenek oluşturan malzemenin yapıdan uzaklaşması gerekliliği nedeni ile açık hücre köpük üretimi mümkündür. Şekil 1.9’da bu yöntemin üretim şeması gösterilmektedir. Yer tutan malzeme, metal tozu ve stabilizasyon amacı ile metal oksit partikülleri karıştırılarak düşük seviyede bir ön yükleme gerçekleştirilir. Kullanılan yer tutucu malzemeye bağlı olarak sinterleme öncesi ve ya sonrası ısıl ve ya kimyasal işlemler ile yer tutucu malzeme yapıdan uzaklaştırılır. Eğer yer



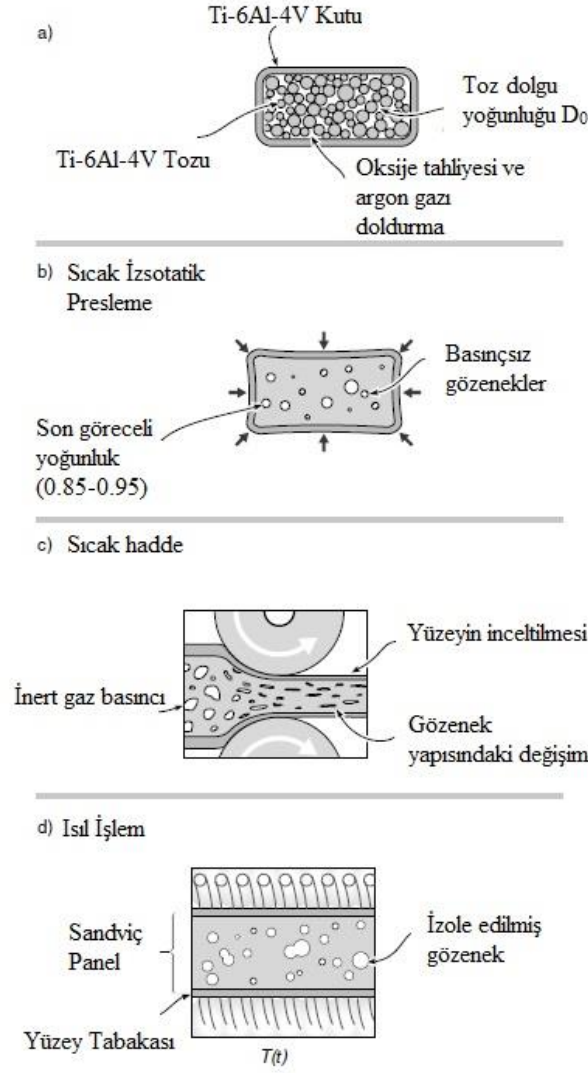
tutucu malzeme EPS, PMMA, PU gibi polimer ise kademeli ısıtılarak ilk olarak yer tutucu malzemenin uzaklaştırılması amacı ile ön ısıtım işlemi uygulanır ve sıcaklık yükseltılarak metal malzemenin sinterlenmesi sağlanır. Eğer malzeme tuz (NaCl) gibi bir malzeme ise sinterleme sonrası kimyasal yolla yapıdan uzaklaştırılır [1-3, 13, 14, 29].



Şekil 1.9. Harcanan malzeme kullanımı ile metal köpük üretimi şematik gösterimi [2].

#### 1.2.4.3. Yapıda İnerit Gaz Kullanarak Metal Köpük Oluşturma

Bu teknik gözenekli yapı oluşturulması amacı ile inerte gazların kullanıldığı bir yöntemdir. Normal koşullarda inerte gazların sıvı metal içerisinde çözünürlüğü çok düşüktür. Ancak toz metalürjisi yöntemi ile inerte gazların yapıda yüksek basınç ile gözenek oluşturması mümkündür. Bu yöntem Boeing firması tarafından Ti-6Al-4V panellerin üretiminde kullanılmıştır. Şekil 1.10' da yöntem şematik olarak gösterilmektedir.



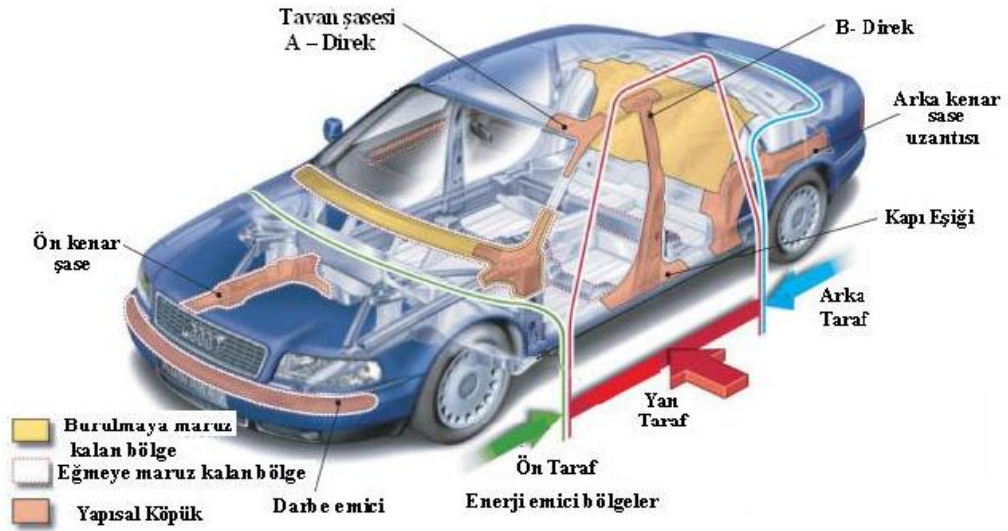
Şekil 1.10. İner gaz kullanımı ile metal köpük üretimi [2].

Yöntemde ilk olarak gözenekli yapıyı oluşturmak için kullanılan aynı malzemeden bir kutu içerisine aynı metal tozu yerleştirilir. Kutunun izolasyonu sağlanarak içerisindeki hava tahliye edilir ve 3-5 atmosfer basıncında argon gazı doldurulur. Sıcak izostatik presleme gerçekleştirilerek boşluk basıncı 8 kat artırılır ve gözenekler oluşturulur. Homojen gözenek dağılımı elde etmek amacı ile sıcak hadde gerçekleştirilir ve bu boşlukların hadde yönünde düzleşmesi ve uzaması ile sonuçlanır. Son olarak 20-30 saat ısıl işlem uygulanarak gözeneklerin büyümesi ve dolayısı ile son yoğunluğun düşmesi sağlanır [2, 3].

### 1.3. Metal Köpüklerin Kullanım Alanları

#### 1.3.1. Otomotiv Endüstrisi

Otomobil güvenliğinde talebin artması otomotiv endüstrisinde daha ağır araçların üretimine neden olmuştur. Bunun sonucunda yakıt tüketiminde ciddi biçimde artış meydana gelmiştir. Bu sorunun aşılması için daha küçük alanlarda daha küçük motorlar denenmiş ancak bu durum motorlarda aşırı ısınmalara neden olmuştur. Ortaya çıkan sorunlara bağlı olarak hafif, yakıt tüketimini azaltan malzemelere olan ihtiyaç artmıştır [1, 14]. Buna bağlı olarak metal köpükler otomotiv endüstrisinde 3 uygulama alanında yerini almıştır [30]. Düşük yoğunluk ile birlikte yüksek sönümlenme özellikleri nedeni ile metal köpüklere olan ilgi giderek artmaktadır. Yüksek sönümlenme özelliği nedeni ile otomobil tampon, kapı gibi kısımlarda dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır [31]. Şekil 1.11’de otomobillerde metal köpüklerin kullanıldığı bölgeler gösterilmektedir [3].

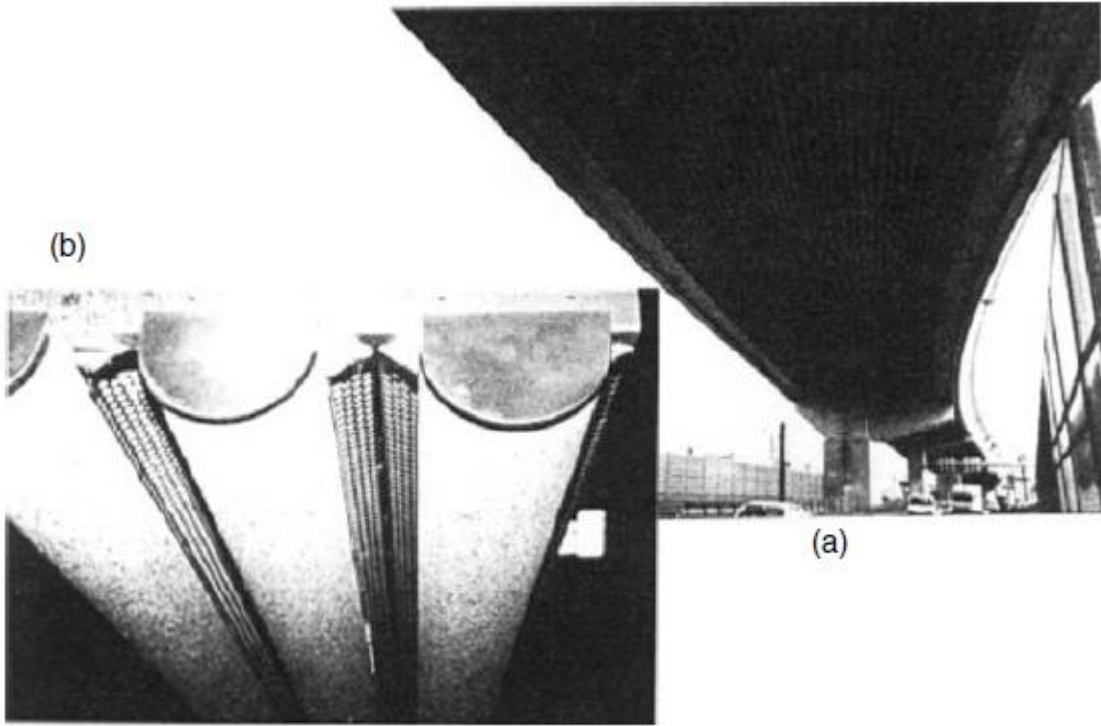


Şekil 1.11. Otomobillerde metal köpüklerin kullanıldığı bölgeler [3].

#### 1.3.2. Ses Yalıtımı

Genellikle ses yalıtımı amacı ile polimer köpükler kullanılmaktadır. Metal köpüklerin elastisite modülleri normal bulk metallere göre daha düşüktür ve kayıp faktörleri daha azdır,

bu sayede titreşimler ve sesler % 99' a kadar soğurulabilir. Ses yalıtımı ve titreşim sönümlenme otomotiv endüstrisinde önemli bir parametredir. Özellikle iş makinelerine gibi araçlarda titreşim ve buna bağlı olarak ses yayılması olabilmektedir. Metal köpüklerin kullanımı ile titreşim önlenmekte ve ses soğurulabilmektedir [1]. Ayrıca metal köpükler köprü ve otoyollarda trafik gürültüsünü azaltmak için kullanılabilir. Şekil 1.12'de otoyol köprüsünde ses yalıtımı görülmektedir. Artan nüfusa karşılık otoyolların gelişmesi ve buna bağlı olarak da ses kirliliğinin artması ses yalıtımı ya da ses kirliliğinin azalmasına olan talebi artırmıştır. İlk olarak Shinko firması ALPORAS metal köpüklerini geliştirmiş ve bunları köprü altlarına ve otoyol kenarlarına ses yalıtım malzemesi olarak kullanmıştır [2].



Şekil 1.12. (a) Otoyol köprüsünde ses yalıtımları (b) yarı küre şeklinde ses yalıtım tüpleri [2].

### 1.3.3. Biyomedikal Uygulamalar

Kemiklerin gözenekli yapısı göz önüne alındığında metal köpükleri ile benzerliği dikkat çekmektedir. Bu açıdan metal köpükler implant uygulamaları açısından önem kazanmaktadır. İmplant malzemeleri değerlendirildiğinde kemiklerin elastisite modülü ile

uyumluluğu, biyo uyumlu olması, hücre büyümesine izin vermesi önemli kriterlerdir. Bilindiđi üzere implant malzemesinin elastik modülünün yüksek olması tüm yükü onun taşımasına neden olmakta, bu durum çevredeki kemiklerin işlevsizleşmesine ve erimesine neden olmaktadır. Bu parametreler doğrultusunda değerlendirildiğinde metal köpükler, normal metallere göre düşük elastisite modülüne sahip, açık gözenekli olarak hücre büyümesine izin veren ve normal bulk metale göre hafif yapılardır [32]. Şekil 1.13' de bazı köpük metal implant malzeme örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 1.13. Metal köpük implant malzeme

#### 1.3.4. Havacılık ve Uzay Endüstrisi

Hafif olmaları ve yalıtım özellikleri nedeni ile metal köpükler uzay ve havacılık sektöründe de bal petek yapıları yerine kullanılmaktadır. Bal petek yapıların maliyeti metal köpük sandviç ve levhalara göre çok yüksek olduğundan alternatif olarak metal köpükler tercih edilmeye başlanmıştır [1, 33].



Şekil 1.14. Bir rokette kullanılan alüminyum köpükten yapılmış koni biçimindeki prototip [33].

#### 1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Kennedy 2002 yılında yaptığı çalışmada, köpük verimliliğini artırmak amacı ile  $TiH_2$  tozlarına ısıtma işlemi uygulanmıştır. Metal köpük oluşturmak amacıyla saf Alüminyum ile sıkıştırılarak prekürsörler elde etmiştir. Normal şartlarda  $495\text{ }^\circ\text{C}$ 'de hidrojen salınımı gerçekleşirken ısıtma işlemi ile hidrojen oluşumunun daha yüksek sıcaklıklarda meydana geldiği gözlemlenmiştir. Saf alüminyum kullanılması nedeniyle prekürsörler hidrojen salınımını yine de engelleyememiştir [34].

S.Elbir ve arkadaşlarının 2003 yılında yaptıkları çalışmada, hacimce %8.6  $SiC$  partikülleri içeren, köpürtücü ajan olarak  $TiH_2$  kullanılan alüminyum metal köpük kompozitlerin köpürme davranışını incelemek amacıyla  $750\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda metal köpük oluşturmuşlardır.  $SiC$  ve  $Al_2O_3$  oksit partikül takviyesinin lineer genişlemeyi arttırdığı, gözenek çeperlerinde duvar görevi görerek, sıvı metal viskozitesini artırdığı gözlemlenmişlerdir. Sonuç olarak seramik ve  $Al_2O_3$  karbür takviye elemanlarının köpürtme verimini artırdığı sonucuna varılmıştır [35].

Feng 2003 yılında gerçekleştirdiği çalışmada metal köpüklerin elektriksel iletkenliği hücre boyutu, hücreler arası çeper kalınlıkları ve çeper uzunluğu açısından incelenmiştir. Toz metalürji ile kapalı gözenek Alüminyum metal köpükler üretilmiştir. Alüminyum metal tozu ve köpürtücü ajan ( $TiH_2$  tozu) karıştırılmıştır. Çalışma sonucunda hücre çapının, metal köpüğün elektrik iletkenliğinde önemli bir etkisi olmadığını gözlemlemiştir [36].

Matijasevic'in 2006 yılında yaptığı çalışmada, takviye eleman ilavesinin ve  $TiH_2$  ön ısıtılmasının etkisini incelemiştir.  $TiH_2$ 'ye havada ortamında ısıtılma işlemi uygulanırsa yüzeyinde bir oksit tabakası meydana gelmektedir. Bu tabaka gözenek oluşumunda tampon görevi görerek gaz salınmasını geciktirmekte, böylece ideal bir şekilde alaşım katı-sıvı ara yüzey oluşumu sağlanarak hidrojen gaz verimi en yüksek seviyeye çıkarılabilmektedir. Bu işlemlerin asıl amacı yeteri kadar kalın oksit tabakasını, minimum hidrojen kaybıyla oluşturmaktır [37].

Esmaelzadeh ve arkadaşları 2007 yılında yaptıkları çalışmalarında farklı köpürtme sıcaklıklarının köpürme verimine etkisi incelemişlerdir. Bu bağlamda. Saf halde Al, Si, SiC ve  $TiH_2$  tozları karıştırılmış, preslenmiş ve 750, 780, 810°C'de köpürtme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, düşük ortalama boyut dağılımına sahip SiC partiküllerinin takviye edilmesi köpüklenme verimini yükseltmiş ve Al-Si köpük oluşumunda tampon görevi görerek stabilitesini arttırmıştır. Böylelikle sıvı metal viskozitesinin arttığı görülmüştür [38].

Dudka ve arkadaşları 2008 yılında gerçekleştirdiği çalışmasında fırın atmosferinin köpürme verimine etkisini incelemişlerdir. Oksijen içeren atmosferde ve inert atmosferinde alüminyum metal köpüklerin köpüklenme verimi incelenmiştir. Köpükler Al (99.95) ve  $TiH_2$  tozlarını karıştırarak ve preslenerek oluşturulmuştur. Sonuç olarak oksijen mevcudiyetinin köpük oluşum sırasında dış yüzeyin oksitlenmesi ile köpürmeyi geciktirdiği ve buna bağlı olarak verimi artırdığı gözlemlenmiştir [39].

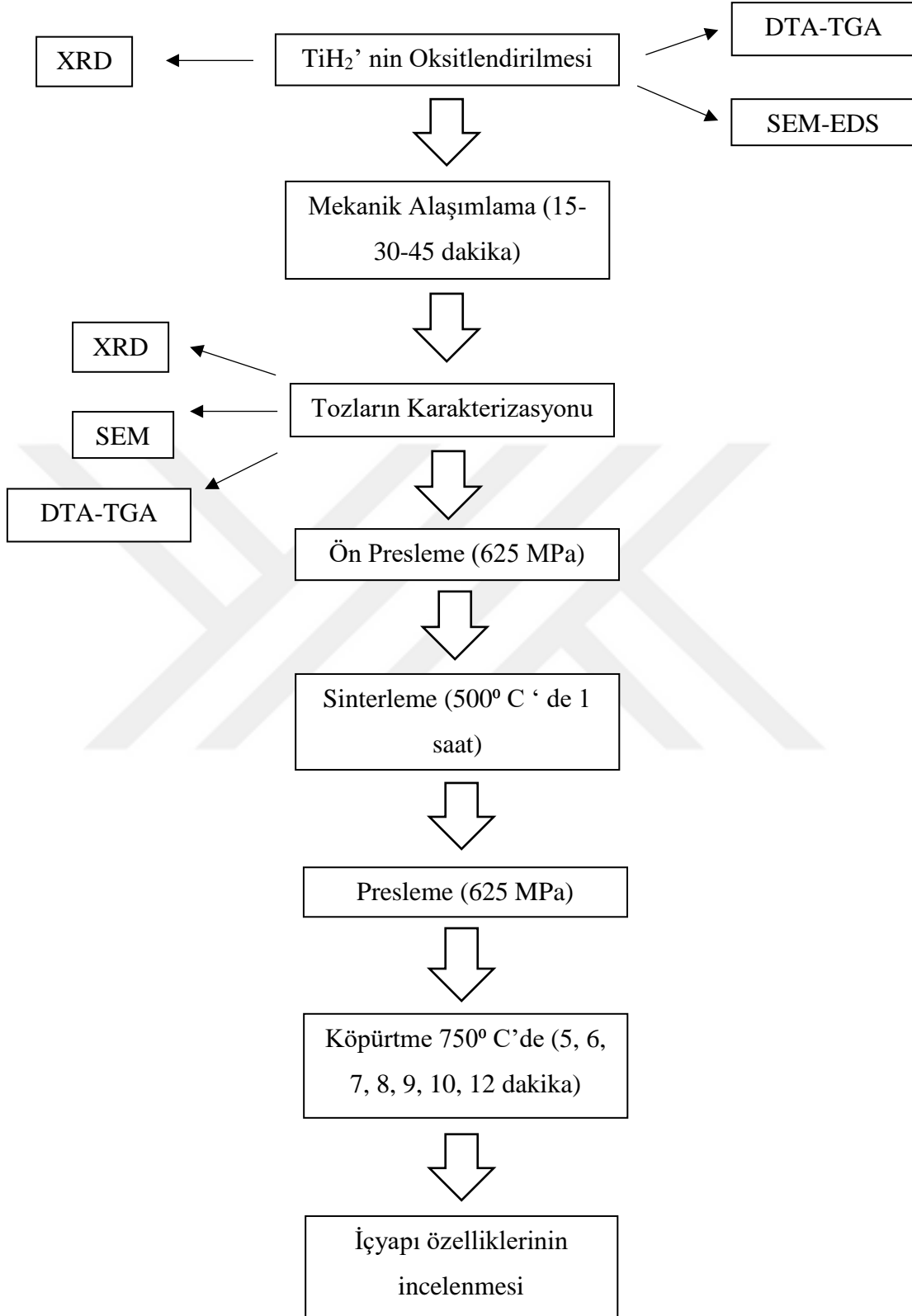
Bu çalışmada matris malzemesi olarak AA2024, takviye malzemesi olarak  $Al_2O_3$  ve köpürtücü ajan olarak  $TiH_2$  kullanılmıştır. Literatürde araştırmalarına bakıldığında  $Al_2O_3$  takviyeli kompozit metal köpük çalışmalarının çok az sayıda olduğu görülmektedir. Çalışmada farklı  $Al_2O_3$  takviye oranına sahip AA2024/ $TiH_2$  tozları farklı sürelerde mekanik alaşımlanarak ve farklı sürelerde köpürtme yapılarak, mekanik alaşımlamanın ve takviye oranının kompozit metal köpüklerin özelliklerine ve köpüklenme verimine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.



## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

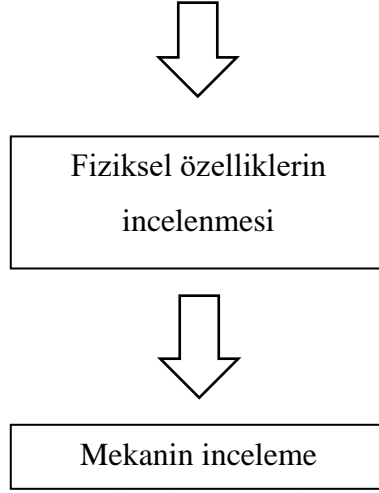
Çalışmada mekanik alaşımlama yöntemi ile farklı kompozisyonlarda AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları üretilmiş, takviye oranlarının ve köpürtme süresinin kompozit metal köpüklerin yoğunluğa, mekanik özelliklere ve gözenek boyutuna olan etkisi araştırılmıştır. Köpürtücü ajan yöntemi esas alınarak TiH<sub>2</sub> gözenek oluşturucu malzeme olarak kullanılmıştır. İlk olarak köpürtme verimliliğini artırmak amacı ile TiH<sub>2</sub> tozlarının fırında 3 saat 560 ° C' de oksitlenmesi sağlanmıştır. Elde edilen TiH<sub>2</sub> tozları ve AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları mekanik alaşımlama ile kompozit tozlar haline getirilmiştir. Takviye malzemesi olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3 farklı oranda (%1, %3, %5) ilave edilmiştir. AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal köpükler 7 farklı köpürtme süresinde (5, 6, 7, 8, 9, 10, 12 dakika) ile üretilmiştir. Üretilen tozlar, X-ışınları difraktometresi (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile karakterize edilmiştir. Karakterize edilen tozlar 625 MPa basınç altında preslenmiş ve sinter fırınında 1 saat bekletildikten sonra tekrar 625 MPa basınç altında sıcak halde preslenmiştir. Elde edilen numuneler daha sonra 750 ° C' de farklı köpürtme sürelerinde (5, 6, 7, 8, 9, 10, 12 dakika) köpürtülerek metal köpükler elde edilmiştir. Üretilen metal köpüklerin yoğunluk, gözeneklilik, sertlik testleri yapılmış içyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.1'de üretim şeması verilmiştir. Köpüklerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi ile ilgili akış diyagramı verilmiştir.





Şekil 2.1. Üretim Şeması

Şekil 2.1'in devamı



## 2.1. Kullanılan Malzemeler

AA2024 ( $2.78 \text{ g/cm}^3$ ) matris malzemesi olarak seçilmiştir. Kullanılan tozlar Gündoğdu Exoterm Sanayinden (GES) temin edilmiş olup ortalama tane boyutu  $110 \mu\text{m}$ ' dir. AA2024 tozlarının kimyasal bileşimi Tablo 4.1 de, fiziksel ve mekanik özellikleri tablo 4.2. de verilmiştir. verilmiştir. Takviye malzemesi olarak  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $3.95 \text{ g/cm}^3$ ) tozları kullanılmıştır. Köpürtücü ajan olarak kullanılan  $\text{TiH}_2$  ( $3.75 \text{ g/cm}^3$ ) kullanılmıştır.

Tablo 2.1. AA2024 Tozlarının Kimyasal Bileşimi (%) [40]

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Ti	Al
4,85	1,78	0,312	0,374	0,385	0,138	0,042	0,005	92,114

Tablo 2.2. AA2024 Tozlarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri [40]

Yoğunluk ( $\text{gr/cm}^3$ )	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (BSD)
2,78	185	75	20	120

AA2024 tozları bir elek sisteminden geçirilerek  $D_{50}$  değeri 110  $\mu\text{m}$  olan tozlar kullanılmıştır. (Şekil 2.2). Köpürtücü ajan olarak kullanılan  $\text{TiH}_2$  tozlarının  $D_{50}$  değeri 4  $\mu\text{m}$ 'dir. Takviye malzemesi olarak kullanılan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tozlarının  $D_{50}$  değeri 40  $\mu\text{m}$  'dir. Takviye, matris ve köpürtücü ajan tozlarının morfolojisi taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir.



Şekil 2.2. Elek Ünitesi

Bu kapsamda üretilecek tüm metal köpüklerin bileşimleri, köpürtme süreleri ve mekanik alaşımlama süreleri tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Üretilen %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye içeren metal köpüklerin üretim parametreleri

<b>Numune Kodu</b>	<b>Köpürtme Süresi (Dakika)</b>	<b>Takviye oranı (% ağırlıkça Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	<b>TiH<sub>2</sub> oranı (% ağırlık)</b>	<b>Mekanik Alaşım (Dakika)</b>
K5-1-15	5	1	1	15
K6-1-15	6	1	1	15
K7-1-15	7	1	1	15
K8-1-15	8	1	1	15
K9-1-15	9	1	1	15
K10-1-15	10	1	1	15
K12-1-15	12	1	1	15
K5-1-30	5	1	1	15
K6-1-30	6	1	1	30
K7-1-30	7	1	1	30
K8-1-30	8	1	1	30
K9-1-30	9	1	1	30
K10-1-30	10	1	1	30
K12-1-30	12	1	1	30
K5-1-45	5	1	1	45
K6-1-45	6	1	1	45
K7-1-45	7	1	1	45
K8-1-45	8	1	1	45
K9-1-45	9	1	1	45
K10-1-45	10	1	1	45
K12-1-45	12	1	1	45

Tablo 2.4. Üretilecek olan %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye içeren metal köpüklerin üretim parametreleri

<b>Numune Kodu</b>	<b>Köpürtme Süresi (Dakika)</b>	<b>Takviye oranı (% ağırlıkça Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	<b>TiH<sub>2</sub> oranı (% ağırlık)</b>	<b>Mekanik Alaşımlama (Dakika)</b>
K5-3-15	5	3	1	15
K6-3-15	6	3	1	15
K7-3-15	7	3	1	15
K8-3-15	8	3	1	15
K9-3-15	9	3	1	15
K10-3-15	10	3	1	15
K12-3-15	12	3	1	15
K5-3-30	5	3	1	15
K6-3-30	6	3	1	30
K7-3-30	7	3	1	30
K8-3-30	8	3	1	30
K9-3-30	9	3	1	30
K10-3-30	10	3	1	30
K12-3-30	12	3	1	30
K5-3-45	5	3	1	45
K6-3-45	6	3	1	45
K7-3-45	7	3	1	45
K8-3-45	8	3	1	45
K9-3-45	9	3	1	45
K10-3-45	10	3	1	45
K12-3-45	12	3	1	45

Tablo 2.5. Üretilecek olan %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye içeren metal köpüklerin üretim parametreleri

Numune Kodu	Köpürtme Süresi (Dakika)	Takviye oranı (% ağırlıkça Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	TiH <sub>2</sub> oranı (% ağırlık)	Mekanik Alaşımlama (Dakika)
K5-5-15	5	5	1	15
K6-5-15	6	5	1	15
K7-5-15	7	5	1	15
K8-5-15	8	5	1	15
K9-5-15	9	5	1	15
K10-5-15	10	5	1	15
K12-5-15	12	5	1	15
K5-5-30	5	5	1	15
K6-5-30	6	5	1	30
K7-5-30	7	5	1	30
K8-5-30	8	5	1	30
K9-5-30	9	5	1	30
K10-5-30	10	5	1	30
K12-5-30	12	5	1	30
K5-5-45	5	5	1	45
K6-5-45	6	5	1	45
K7-5-45	7	5	1	45
K8-5-45	8	5	1	45
K9-5-45	9	5	1	45
K10-5-45	10	5	1	45
K12-5-45	12	5	1	45

## 2.2. Mekanik Alaşımlama

Metal tozlarının mekanik alaşımlama işlemi 300 dv/dak ile 15, 30, 45 dakika süre ile gezegen tipi bilyeli öğütücüde gerçekleştirilmiştir. İşlem Retsch PM100 marka öğütücüde tungsten karbür kap ve bilyeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bilye : toz oranı 5:1 olarak seçilmiş ve her bir numune üretimi için 12 gram toz kullanılmıştır. Böylelikle takviye

malzemesinin ve köpürtücü ajanın yapıda homojen dağılması gerçekleştirilmiştir. Öğütücü kap ve bilyeler şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Bilyeli değirmen, öğütücü kap ve bilyeler

### 2.3. Toz Morfolojilerinin İncelenmesi

Başlangıç tozlarının ve oksitlendirilmiş  $TiH_2$  tozlarının morfolojilerinin incelenmesi taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. İnceleme ile oksitlendirilmiş  $TiH_2$  tozlarının ve takviye oranının etkisi araştırılmıştır.



Şekil 2.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

## 2.4. Faz Analizi

Başlangıç tozlarının ve mekanik alaşımlanmış tozların faz analizleri Rigaku marka X ışını difraktometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

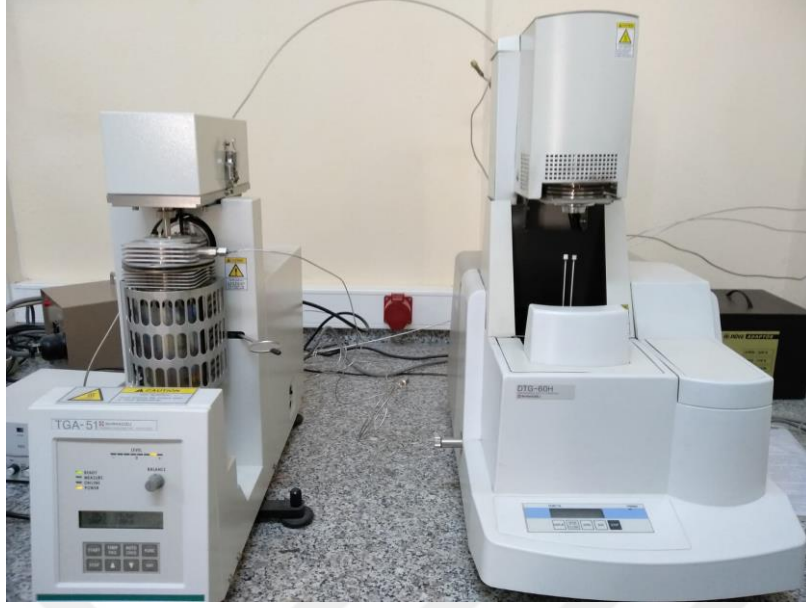


Şekil 2.5. XRD analiz cihazı

## 2.5. TiH<sub>2</sub> Tozlarının DTA-TG Analizleri

Isıl işlem görmüş ve normal durumdaki TiH<sub>2</sub> tozlarının DTA-TGA analizleri ısıtılma işleminin etkisini görmek amacıyla Shimadzu marka DTA-TGA cihazı ile 10 °C/dakika hızla 1000 °C'de hava ortamında gerçekleştirilmiştir.





Şekil 2.6. DTA-TGA analiz cihazı

## 2.6. Parçacık Boyut Analizi

Başlangıç tozlarının parçacık boyut dağılım analizi lazer parçacık boyut ölçüm cihazı ile (Malvern Instruments<sup>TM</sup> Mastersizer 2000e) (Şekil 2.7) saf su ortamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.7. Parçacık boyut dağılım analiz cihazı

## 2.7. Sıcak ve Soğuk Presleme

Mekanik Alaşımlanan tozlar ilk olarak 625 MPa basınç altında soğuk halde ön preslenmiştir. Ön preslenen numuneler 500 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile sinterlenmiş ve tek

eksenli preste tekrar 625 MPa basınç altında sıcak preslenmiştir. Kullanılan pres ve haznesi şekil 2.8’ de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Sıcak Pres Makinesi

## 2.8. Metalografik İncelemeler

Mekanik alaşımlama ile elde edilen  $Al_2O_3$  takviyeli metal köpüklerden mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi amacı ile numuneler kesilmiştir. İç yapıların incelenmesi, sertlik ölçümleri ve ortalama gözenek boyutunun belirlenmesi için zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.9).

Zımparalama işlemi 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 numaralı zımpara kâğıtları kullanılarak kademeli yapılmış ve parlatma işlemi için alümina parlatma sıvısı kullanılmıştır.



Şekil 2.9. (a) Kesme (b) Zımparalama ve parlatma cihazı.

## 2.9. Gözenek Yapılarının İncelenmesi

Şekil 2.10' da gösterilen Zeiss marka stereo mikroskopta elde edilen numunelerin gözenek yapıları incelenmiş ve ortalama gözenek boyutları belirlenmiştir.



Şekil 2.10.Stereo mikroskop

## 2.10. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

### 2.10.1. Yoğunluk ve Gözeneklilik

Metal köpüklerin geometrileri yoğunluk ölçüm teknikleri için uygun olmadığından yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibi ile ölçülmüştür. Ölçülen değerlerin sağlamsı yapılması amacı ile numunelerin orta kısımlarından aynı boyutta dikdörtgen şeklinde parçalar alınarak ölçümler tekrarlanmıştır. Aynı ölçülerdeki bulk malzemenin de yoğunluğu referans alınarak gözeneklilik ölçülmüştür.

Yoğunluk :

$$\rho = \frac{W_1}{W_1 - W_2}$$

Gözeneklilik ;

%Gözenek =  $1 - \left( \frac{\text{Deneysel Yoğunluk}}{\text{Teorik Yoğunluk}} \right) \times 100$  formülü ile hesaplanmıştır.

## 2.11. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

### 2.11.1. Sertlik Testleri

Üretilen metal köpüklerin sertlik ölçümleri Innovatest Nemesis 9000 marka sertlik cihazı ile Vickers sertlik ölçümü yapılmıştır. (Şekil 2 . 1 1 ). 3 N yük 15 sn. uygulanmıştır. Ölçümlerde kesilen numunelerin iç kısmı kullanılmış ve her biri için ayrı ayrı yedi kez ölçüm yapılmış en küçük ve en büyük değerler elenerek, kalan beş değerın ortalaması alınmıştır.



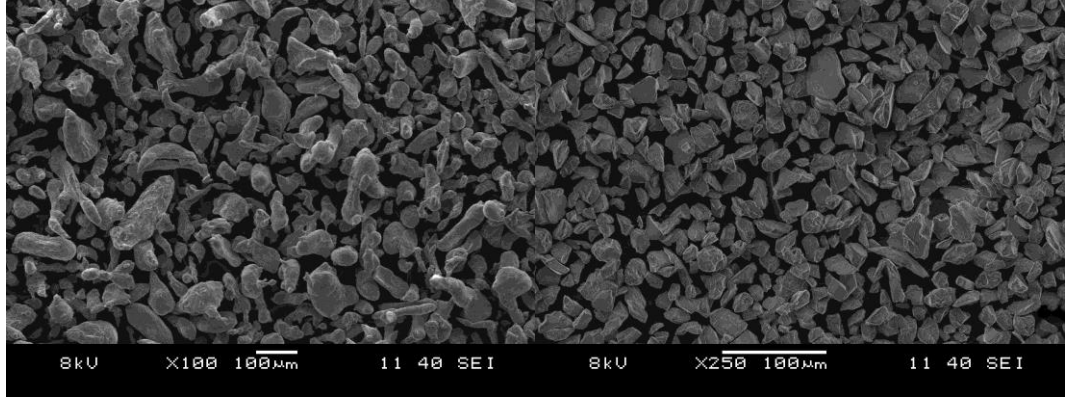
Şekil 2.11. Innovatest Nemesis 9000 model sertlik cihazı

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Toz Karakterizasyonu

##### 3.1.1. Başlangıç Tozlarının Morfolojileri

Başlangıç malzemesi olarak kullanılan AA 2024,  $TiH_2$ ,  $Al_2O_3$  tozlarının SEM görüntüleri şekil 3.1 'de verilmektedir. Görüldüğü gibi ana matris malzemesi olan AA 2024 tozlarının başlangıç morfolojisi düzensiz ve yumru şeklindedir. (Şekil 3.1. (a)). Şekil 3.1. (b)'de takviye olarak kullanılan  $Al_2O_3$  tozlarının çok köşeli ve düzensiz şekilli oldukları görülmektedir. Şekil 3.1. (c) ve (d)'de sırası ile sırasıyla  $TiH_2$  normal ve ısıtılmış işlem görmüş  $TiH_2$  tozları verilmiştir. Isıtılmış tozların ısıtılmamış tozlara oranla daha parlak oldukları, ayrıca toz boyutlarında ısıtılmış sonucunda büyüme ve homojenite artmış görülmektedir.

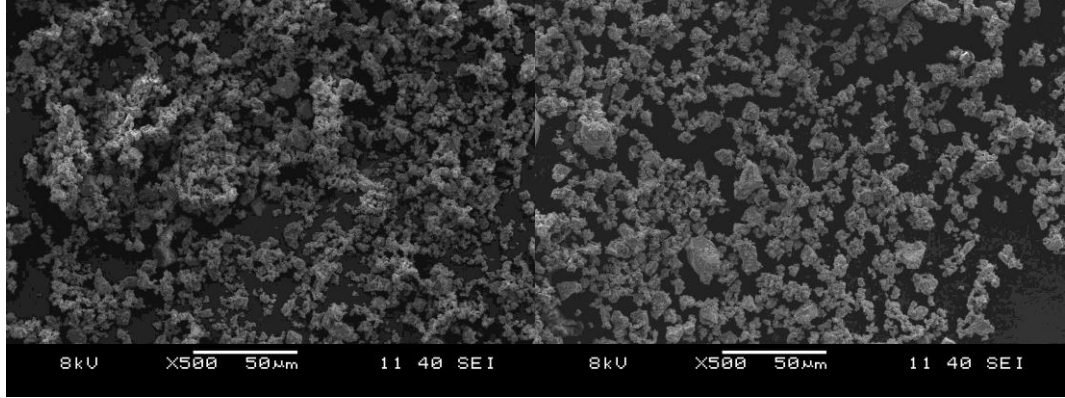


(a)

(b)

Şekil 3.1. Başlangıç tozlarının morfolojileri (a) AA2024, (b)  $Al_2O_3$ , (c)  $TiH_2$ , (d) ısıtılmış sonrası  $TiH_2$  tozları

Şekil 3.1'in devamı



(c)

(d)

### 3.1.2. TiH<sub>2</sub> Tozlarının EDS analizi

Köpürtücü ajan TiH<sub>2</sub>' nin köpüklenme verimini artırmak amacı ile oksitlendirilmiş olan TiH<sub>2</sub> tozlarının EDS analizleri verilmiştir. EDS analizlerine göre ısıl işlem uygulanmamış TiH<sub>2</sub> tozlarında eser miktarda oksijen olduğu tespit edilirken, ısıl işlem uygulanmış tozlarda yüksek oranda oksijen içerdiği görülmüştür.

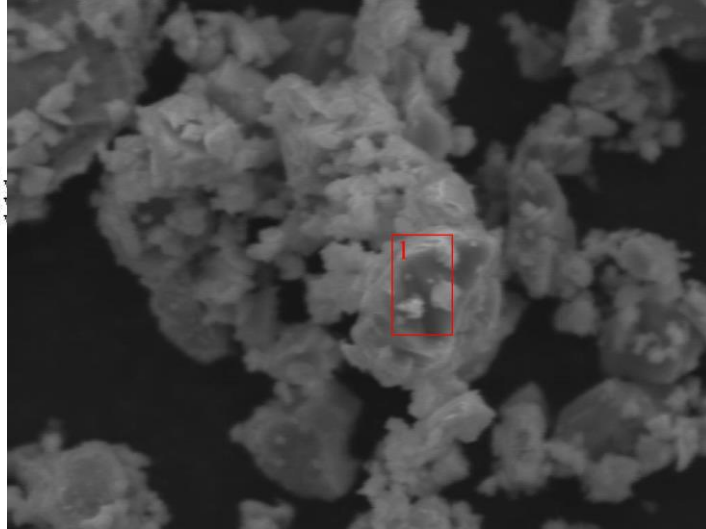
Component	Mole Conc.	Conc.	
Ti	99.138	99.710	wt.%
O	0.862	0.290	wt.%
	100.000	100.000	wt.%

El.	Line	Intensity (cps)	Error 2-sig	Conc
O	Ka	0.05	0.066	0.290
Ti	Ka	261.06	4.570	99.710
				100.000

kV	20.0
Takeoff Angle	35.0°
Elapsed Livetime	50.0



(a)

Şekil 3.2. Isıl işlem (a) öncesi, (b) sonrası, TiH<sub>2</sub> tozlarının EDS analizleri



Şekil 3.2'nin devamı

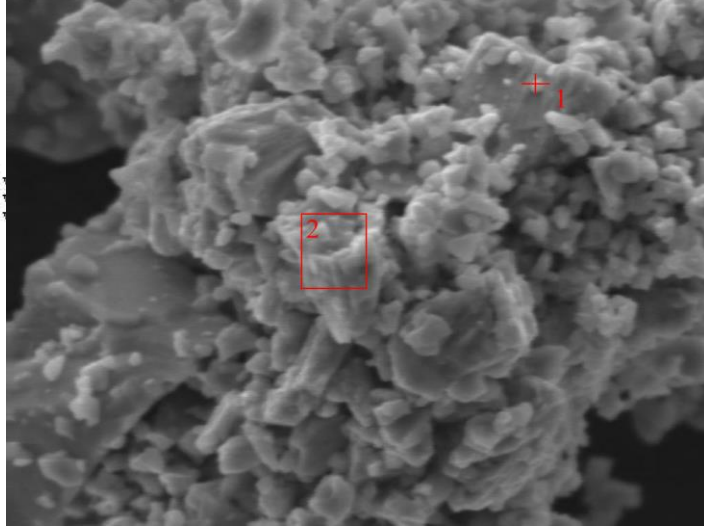
Component	Mole Conc.	Conc.	
Ti	41.105	67.617	wt.%
O	58.895	32.383	wt.%
	100.000	100.000	wt.%

El.	Line	Intensity (cts)	Error 2-sig	Conc
O	K $\alpha$	11.55	0.961	32.383
Ti	K $\alpha$	223.69	4.230	67.617
				100.000

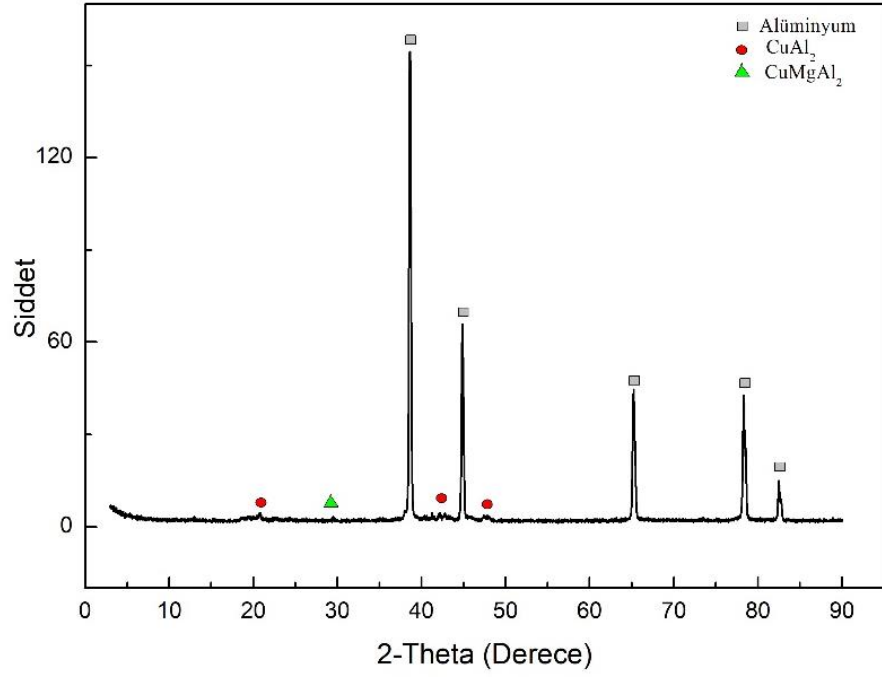
kV	20.0
Takeoff Angle	35.0°
Elapsed Livetime	50.0



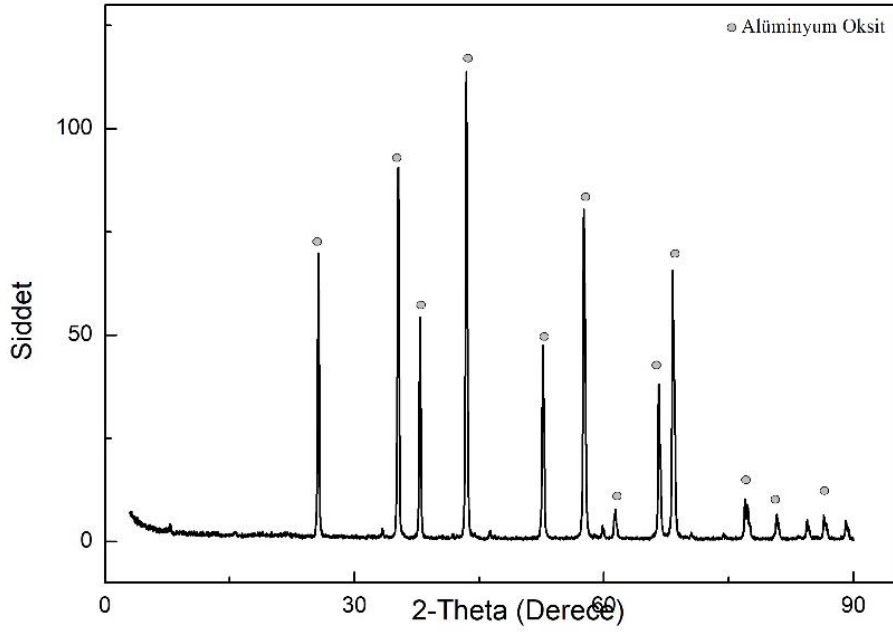
(b)

### 3.1.3. Başlangıç Tozlarının XRD Analizleri

Saf haldeki AA 2024, TiH<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve ısıtılmış TiH<sub>2</sub> tozlarının kristal yapıları Rigaku marka X-ışını cihazı ile analiz edilmiş ve şekil 3.3. ((a) AA2024, (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (c) Normal TiH<sub>2</sub> ve (d) ısıtılmış TiH<sub>2</sub> tozları) 'de verilmiştir. Şekil 3.3. (c) TiH<sub>2</sub> ve (d) ısıtılmış TiH<sub>2</sub> tozlarının XRD grafikleri karşılaştırıldığında ısıtılmış TiH<sub>2</sub> tozlarının oksitlendiği ve bu ürünlerin Titanyum oksit bileşikleri olduğu görülmüştür (Şekil 3.3.(d)).



(a)

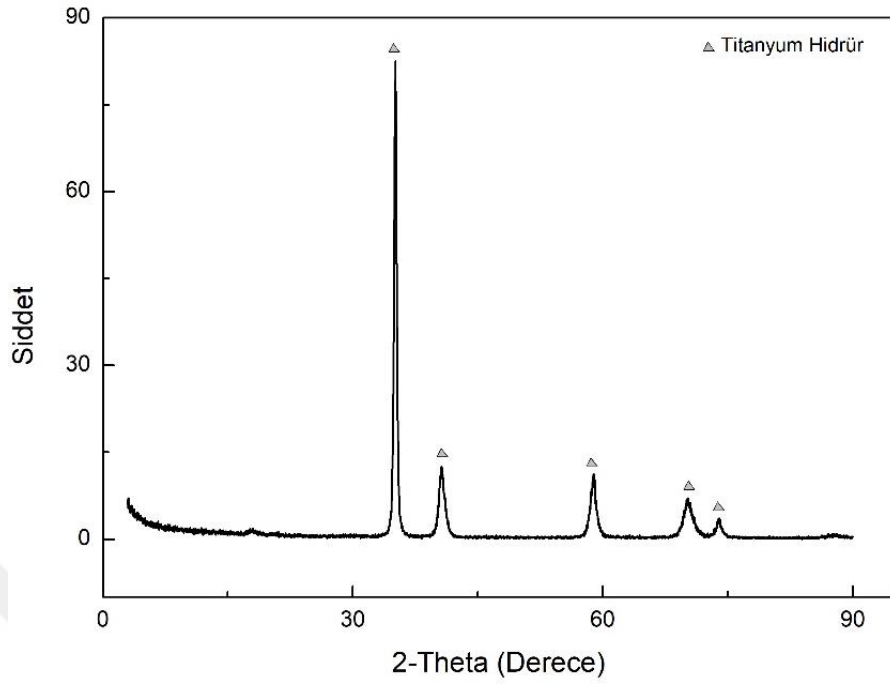


(b)

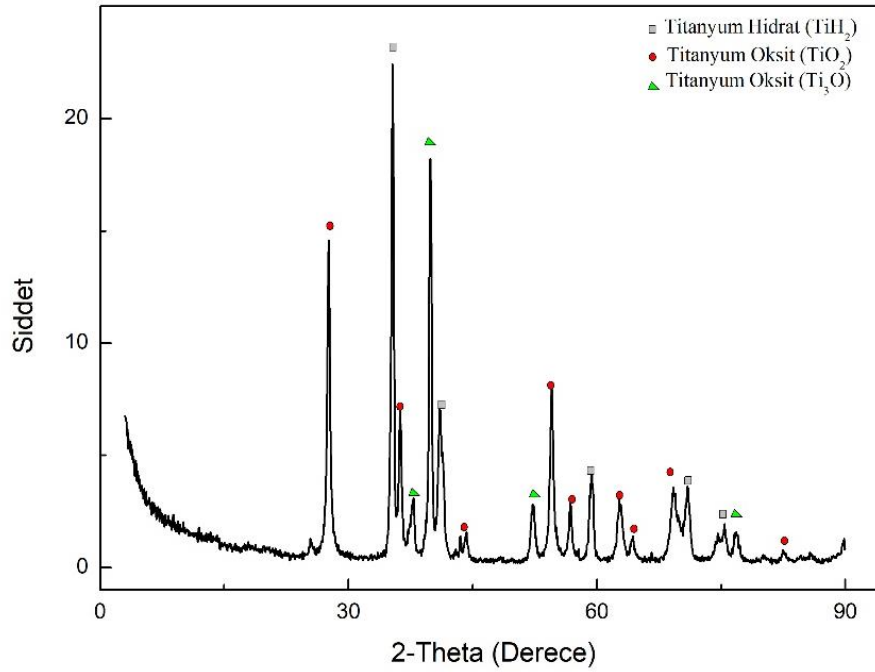
Şekil 3.3. Başlangıç tozlarının morfolojileri (a) AA2024, (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (c) TiH<sub>2</sub>, (d) ısıtılma işlem sonrası TiH<sub>2</sub> tozları.



Şekil 3.3'ün devamı



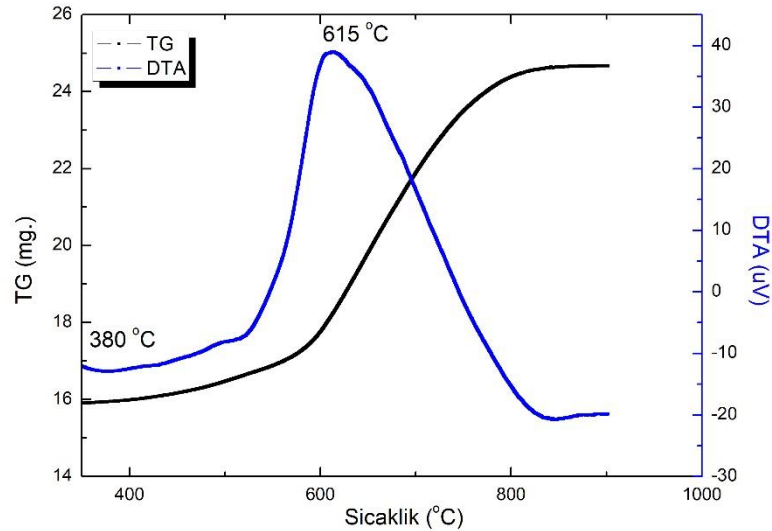
(c)



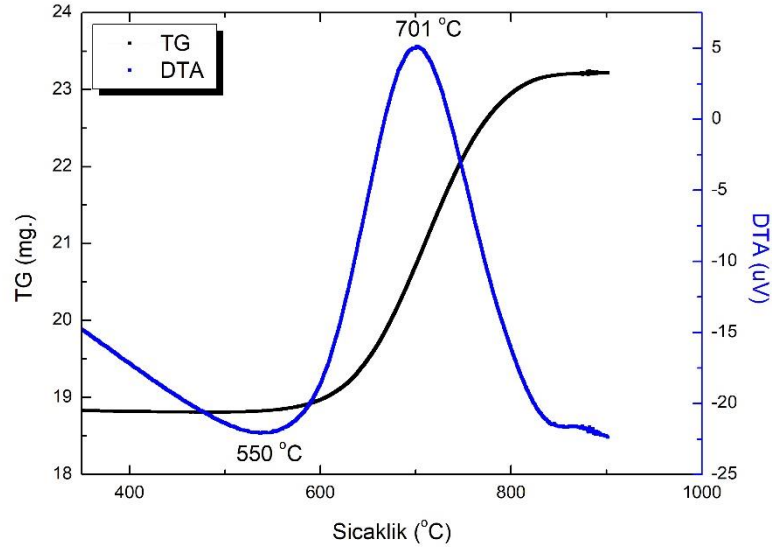
(d)

### 3.1.4. TiH<sub>2</sub> Tozlarının DTA-TG Analizi

Şekil 3.4’de (a) normal ve (b) Isıl işlem görmüş olan TiH<sub>2</sub> tozlarının DTA-TG eğrileri verilmektedir. Şekil 3.4 (a)’da görüldüğü üzere normal TiH<sub>2</sub> tozları 380 °C’den sonra bozunmaya başlamakta ve 615 °C’ de bozunmanın tamamlandığı görülmektedir. Ağırlıktaki artış bozunma sonucu hidrojen yerine bağlanan oksijenden kaynaklıdır. Şekil 3.4 (b)’de ısıl işlem görmüş TiH<sub>2</sub> tozlarının DTA-TG eğrisi verilmektedir. Şekil 3.4 (b)’de görüldüğü üzere 550 °C’ den sonra kalan TiH<sub>2</sub> tozları bozunmaya başladığı, 700 °C’ de bozunmanın tamamlandığı görülmekte ve yüzeydeki tozların oksitlenmesinden dolayı ağırlık artışı meydana gelmektedir. B. Matijasevic-Lux ve arkadaşları TiH<sub>2</sub> tozunun köpüklenme verimini artırmak için yaptıkları çalışmalarında, ısıl işlem süresine bağlı olarak TiH<sub>2</sub> tozunun bozunma sıcaklığında değişim gösterdiğini ve buna bağlı olarak köpükleştirme sıcaklığında değişimler olabileceğini ortaya koymuştur [37]. Isıl işlem ile köpürtücü ajanın bozunma sıcaklığı geciktirildiği DTA-TG eğrilerinden görülmektedir. 700 °C sonrasında ortaya çıkan gaz nedeni ile meydana gelen gözenekler çok küçük olup, büyütülmeleri amacı ile 750 °C köpükleştirme sıcaklığı olarak seçilmiştir.



(a)

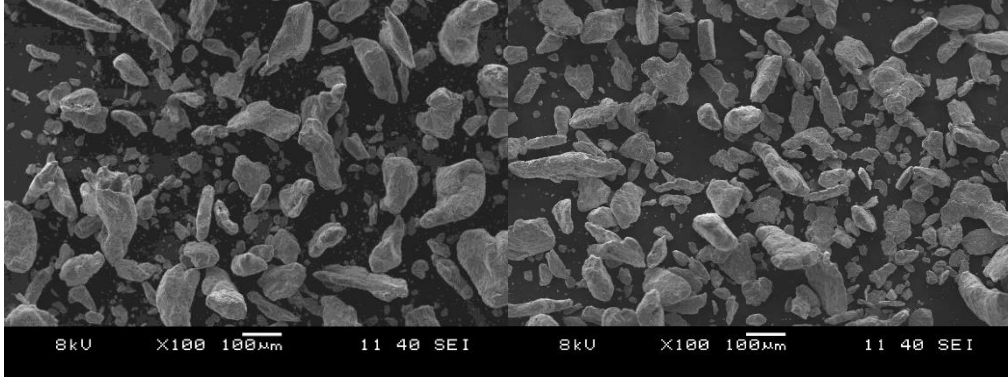


(b)

Şekil 3.4. (a) normal ve (b) Isıl işlem görmüş olan  $TiH_2$  tozlarının DTA-TG eğrileri

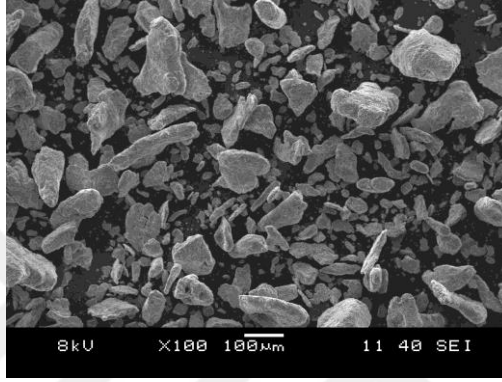
### 3.1.5. Mekanik Alaşımlanmış Tozların Morfolojileri

Mekanik alaşımlamada mekanik alaşımlanma süresinin artışıyla toz morfolojilerinde değişimler meydana gelmiştir. Takviyesiz alüminyum tozları düzensiz ve yumru şekilli iken alaşımlama süresi arttıkça toz partikül boyutlarında artış ve şekillerinde değişimler meydana gelmiştir. Tüm kompozit toz karışım numunelerinde alaşımlama süresi ile yukarıdaki gibi benzer toz karakteristikleri ve morfoloji değişimleri gözlenmiştir. Şekil 3.5-3.6 ve 3.7'de sırası ile %1-3 ve 5  $Al_2O_3$  takviyeli farklı sürelerde mekanik alaşımlamaya tabi tutulmuş tozların morfolojileri verilmiştir. Görüldüğü üzere 15 dakikalık mekanik alaşımlama sonrası tozlarda; takviye malzemesinin öğütme etkisi ile tozlar arasında sürtünmeye bağlı olarak soğuk kaynak mekanizması etkin olup toz boyutlarında artış meydana gelmiştir. 30 dakikalık mekanik alaşımlama sonrası toz boyutlarında değişim meydana gelirken şekil değişimi yaşanmamıştır. 45 dakikalık mekanik alaşımlama sonucunda daha küçük boyutlu tozlar elde edilmiştir(Şekil 3.6.).



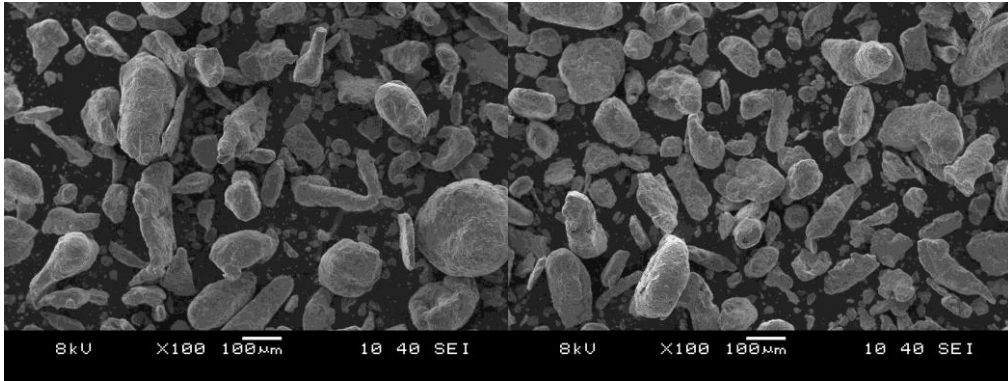
(a)

(b)



(c)

Şekil 3.5. %1  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / %1  $\text{TiH}_2$  / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların morfolojileri (a) 15 (b) 30 (c) 45

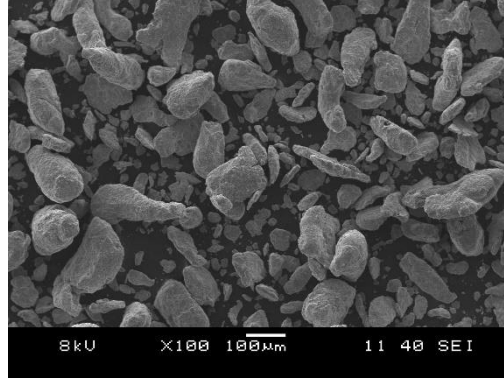


(a)

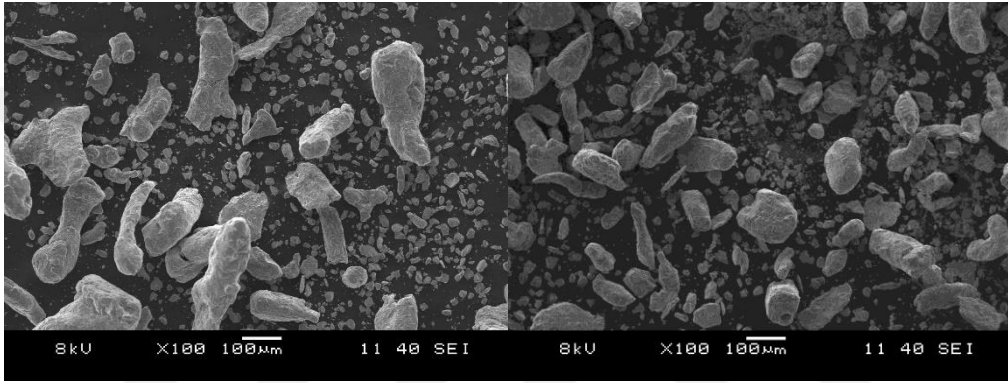
(b)

Şekil 3.6. %3  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / %1  $\text{TiH}_2$  / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların morfolojileri (a) 15 (b) 30 (c) 45

Şekil 3.6'nın devamı

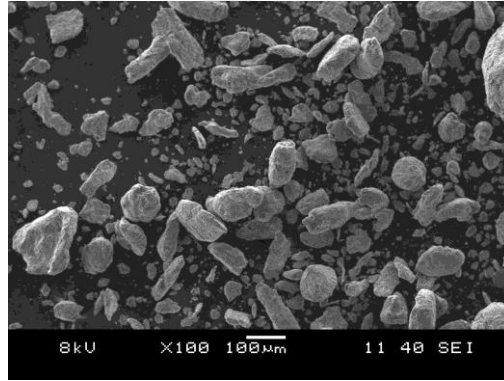


(c)



(a)

(b)

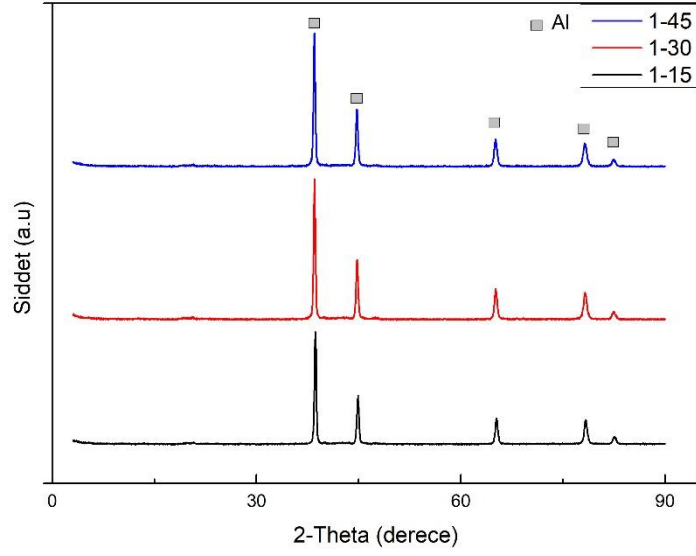


(c)

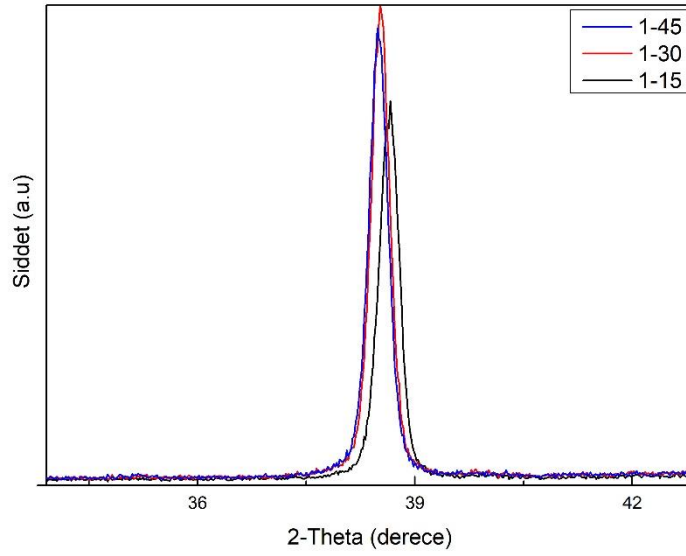
Şekil 3.7. %5  $Al_2O_3$  / %1  $TiH_2$  / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların morfolojileri (a) 15 dakika, (b) 30 dakika, (c) 45 dakika

### 3.1.6. Mekanik Alaşımlanmış Tozların XRD Analizleri

Şekil 3.8 'da %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış kompozit metal köpüklerin XRD grafiği verilmiştir. Şekil 3.8 'da alüminyum alaşımının mekanik alaşımlama sonrası karakteristik pikleri göstermiştir (JCPDS kart numarası 01-089-4037). Ancak alümina veya titanyum hidrüre dair belirgin bir pik görülmemektedir. Bunun nedeni katkı miktarının düşük oranlarda olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak görüldüğü gibi mekanik alaşımlama ile birlikte alaşımlanmamış AA2024'e göre pik şiddetlerinde değişim ve ana pik açısında kayma ve farklı mekanik alaşımlama sürelerine bağlı olarak pik açılarında değişim görülmektedir. Şekil 3.9'da (111) ana pikinde meydana gelen kayma ve şiddetteki değişim gösterilmektedir. Görüldüğü gibi artan mekanik alaşımlama süresi ile pik şiddeti bir miktar artmış ancak difraksiyon açısında azalma görülmüştür. R. DALMIŞ ve arkadaşları mekanik alaşımlamanın grafit – bor karbür takviyeli hibrit ZA- nano kompozitlerde etkisini araştırmışlardır [41]. Yapılan çalışmalar sonucunda artan mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak matris malzemesinin ana pikinin difraksiyon açısında değişime ve piklerde genişlemeye neden olduğunu göstermiştir. Bu durum mekanik alaşımlama ile takviye malzemelerinin matris malzemesinin kristal yapısında değişime neden olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde bu çalışmada elde edilen tozlar değerlendirildiğinde artan süre ile ana pik açısında kayma meydana geldiği ve bu kaymanın kristal kafes sabitindeki değişimden dolayı meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 3.8 'da farklı sürelerde (15-30 ve 45 dakika) mekanik alaşımlanmış, %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli tozların XRD grafiği verilmiştir. (111) ana pikine yakından bakıldığında ( Şekil 3.9 ) pik açısında artan mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak azalma olduğu görülmektedir. Bu durum kafes parametresinde mekanik alaşımlamadan kaynaklı olarak değişim meydana geldiğini göstermektedir.

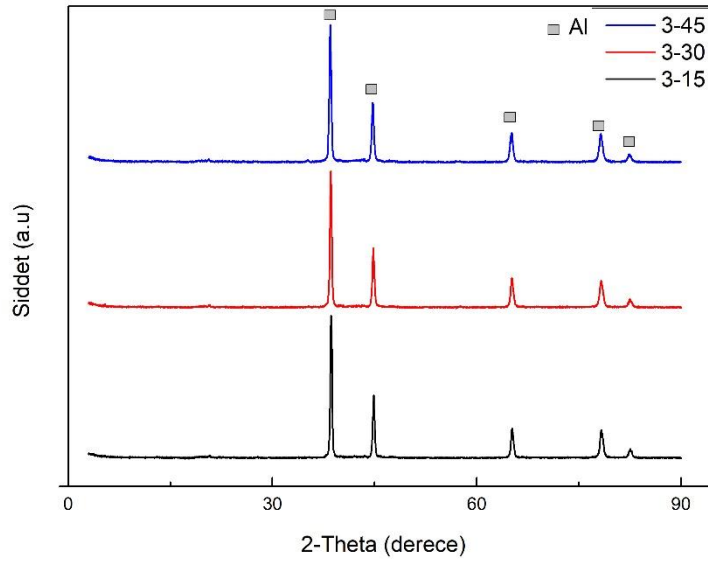


Şekil 3.8. %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / %1 TiH<sub>2</sub> / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların XRD grafikleri



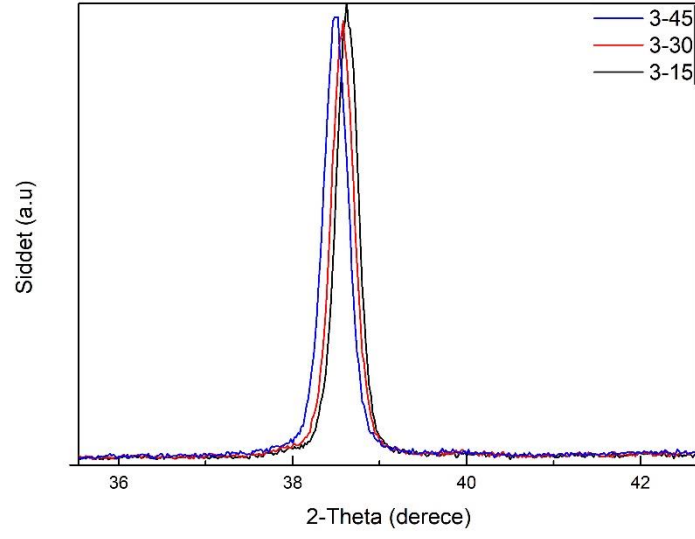
Şekil 3.9. %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / %1 TiH<sub>2</sub> / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların (111) maksimum pikinde alaşımla nedeni ile meydana gelen kayma

Şekil 3.10.'de %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpüklerin XRD grafiği verilmiştir. %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpüklere göre artan takviye oranına rağmen takviye elemanlarına ait herhangi bir pik görülmemekte ancak ana pike yakından bakıldığında ( Şekil 3.11 ) pik açısında artan mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak azalma olduğu görülmektedir. Bu durum kafes parametresinde mekanik alaşımlamadan kaynaklı olarak değişim meydana geldiğini göstermektedir.



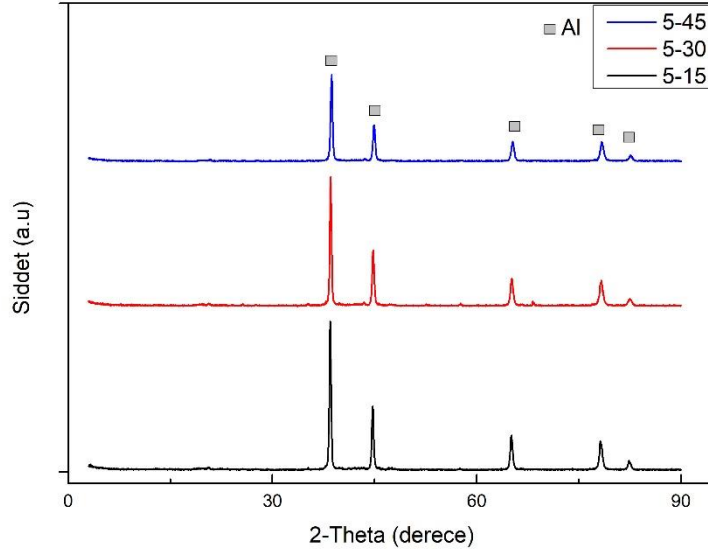
Şekil 3.10. %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / %1 TiH<sub>2</sub> / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların (111) maksimum pikinde mekanik alaşımlamaya bağlı olarak meydana gelen kayma



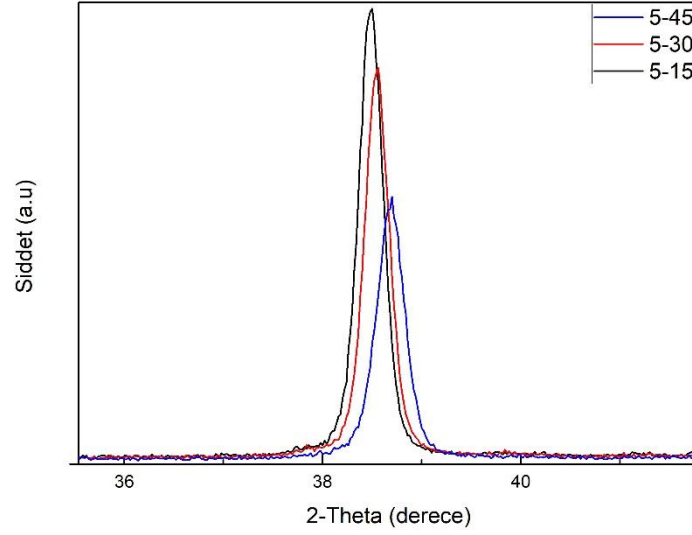


Şekil 3.11. %3  $Al_2O_3$  / %1  $TiH_2$  / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların (111) maksimum pikinde mekanik alaşımlamaya bağlı olarak meydana gelen kayma

Şekil 3.12.'de %5  $Al_2O_3$  takviyeli kompozit metal köpüklerin XRD grafiği verilmiştir. Artan takviye oranına rağmen takviye elemanlarına ait herhangi bir pik görülmemekte ancak artan mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak piklerde genişleme ve difraksiyon açısında artış görülmektedir. Bu durum mekanik alaşımlama etkisi ile kafes sabitindeki değişimi göstermektedir ( Şekil 3.13. )



Şekil 3.12. %5  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / %1  $\text{TiH}_2$  / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların (111) maksimum pikindeki kayma



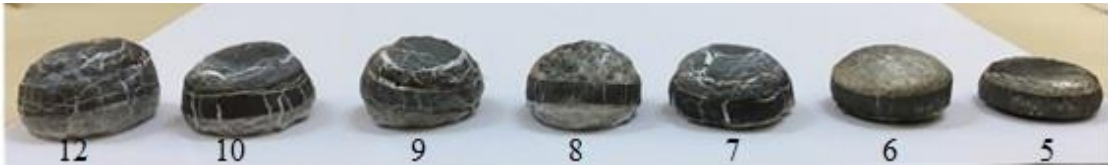
Şekil 3.13. %5  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / %1  $\text{TiH}_2$  / AA 2024 kompozisyonuna sahip 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozların (111) maksimum pikindeki kayma

### 3.2. Üretilen Metal Köpüklerin Özellikleri

Üretilen numunelerin sinterlenmiş halleri ve köpük haline getirilmiş halleri şekil 3.14 (a) ve (b) 'de gösterilmiştir. Şekil 3.14. (b)'de farklı köpürtme sürelerinde (12-10-9-8-7-6-5 dakika) elde edilen kompozit metal köpüklerin değişen süre ile hacimlerindeki değişim gösterilmiştir.



(a)

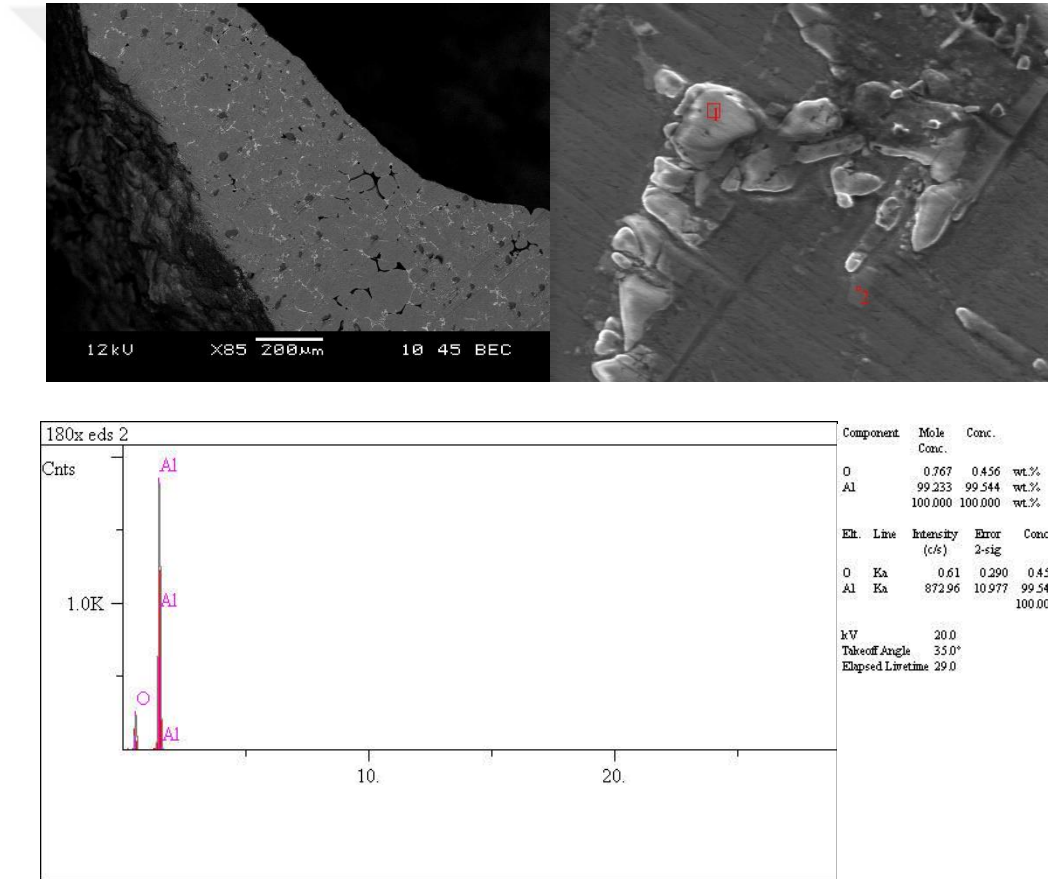


(b)

Şekil 3.14. (a) Köpürtme işlemi öncesi sinterlenmiş ve köpürtülmüş, (b) Farklı sıcaklıklarda köpürtülmüş (12-10-9-8-7-6-5 dakika) numuneler.

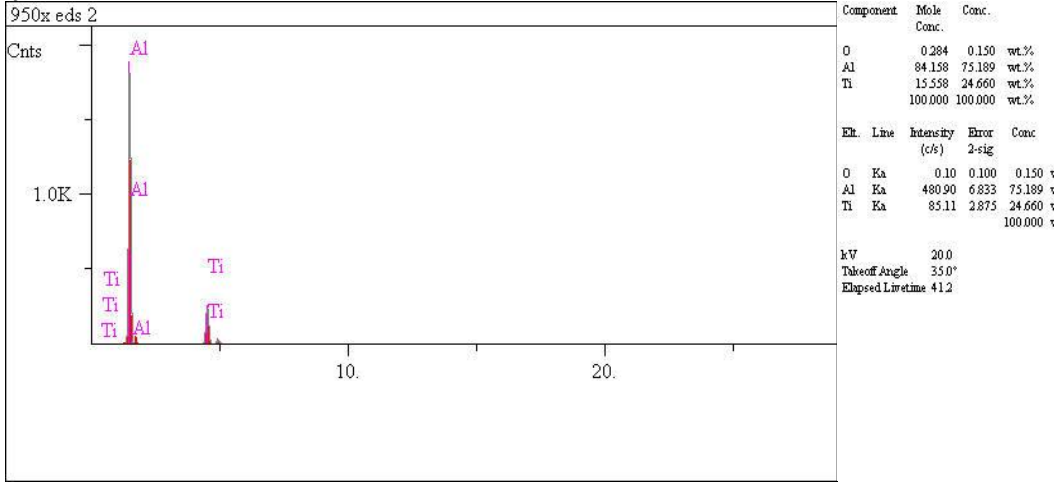
### 3.2.1. Metal Köpüklerin EDS Analizleri

%1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli K12-1-45 numunesine ait EDS analizleri Şekil 3.15’ de verilmiştir. Analizler 2 gözenek arasında meydana gelen duvarlarda yapılmıştır. Yapılan analizler çeperlerde olması beklenen oksitlerin ve farklı yapıların dağılımlarının incelenmesi amacı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda duvarlarda yoğun olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülleri görülmektedir. Ayrıca düşük miktarda Titanyum-Alüminyum intermetalik bileşiğin olduğu gözlenmektedir. Şekil 3.16 ve 3.17’de sırası ile %3 ve %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli K12-1-45 ve K12-3-45 numunelerine ait EDS analizleri verilmektedir.

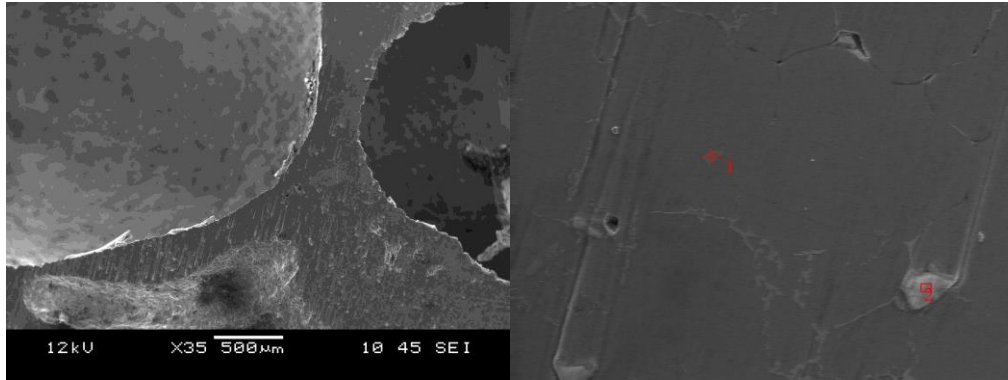


Şekil 3.15. K12-1-45 numunesine ait EDS analizleri

Şekil 3.15'in devamı

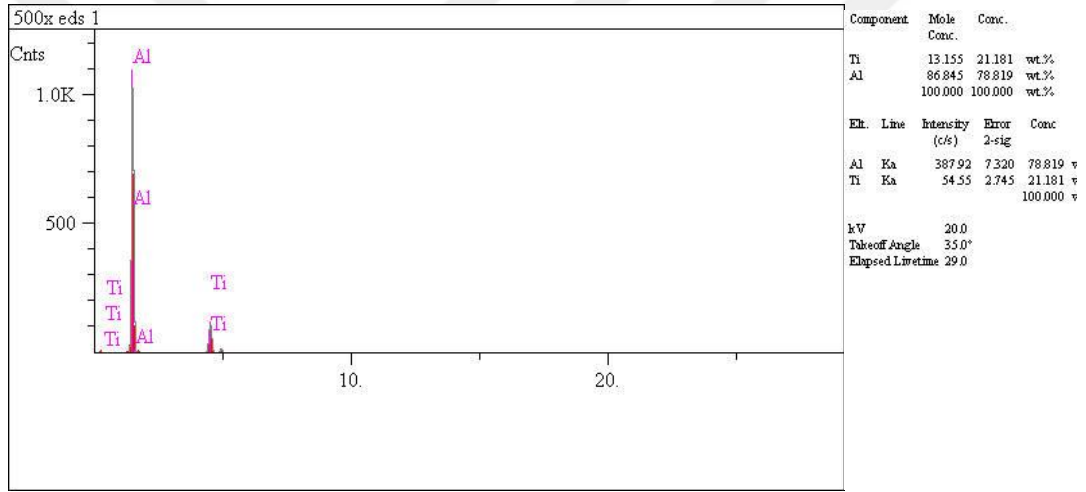
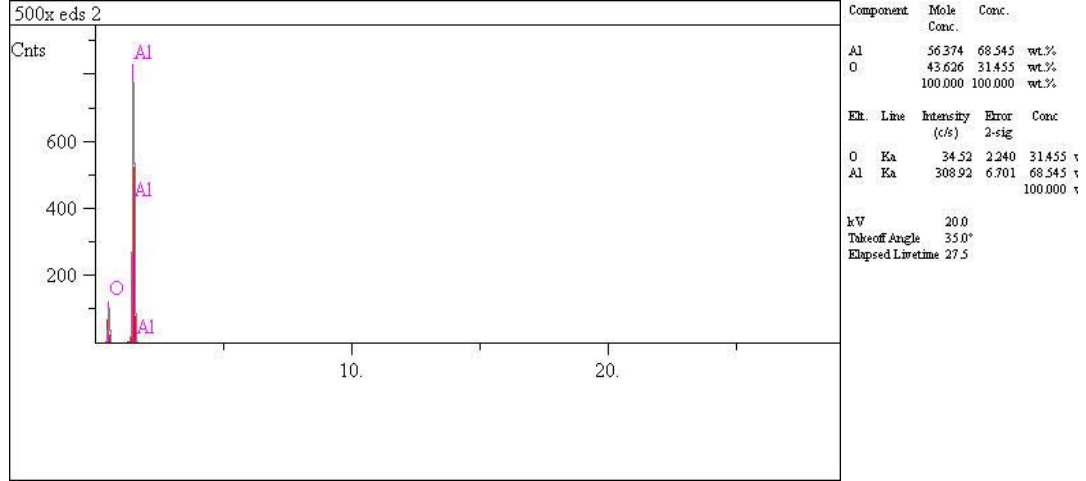


%3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli K12-3-45 numunesine ait EDS analizleri Şekil 3.17' de verilmiştir. Analizler iki gözenek arasında meydana gelen duvardan alınmıştır. Beyaz olarak görülen bölgelerden yapılan analizlerde bu bölgelerin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olduğu görülmektedir. Diğer taraftan matris malzemesi dışında yine Ti-Al intermetalik bileşiğinin olduğu gözlenmektedir. S. ELBİR ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarında köpürtücü ajan olarak TiH<sub>2</sub>, takviye malzemesi olarak SiC kullanmışlar ve alüminyum kompozit metal köpük üretmişlerdir [35]. Çalışmada, köpüklenme sonrası hidrojen gazının uzaklaşması ile birlikte Titanyumun, Alüminyum ile intermetalik bileşik oluşturduğu gösterilmiştir.

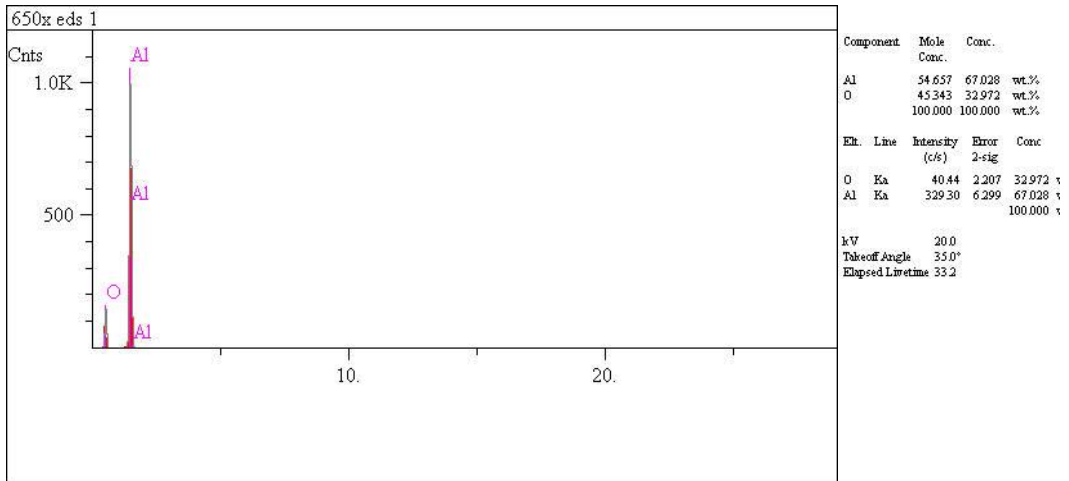
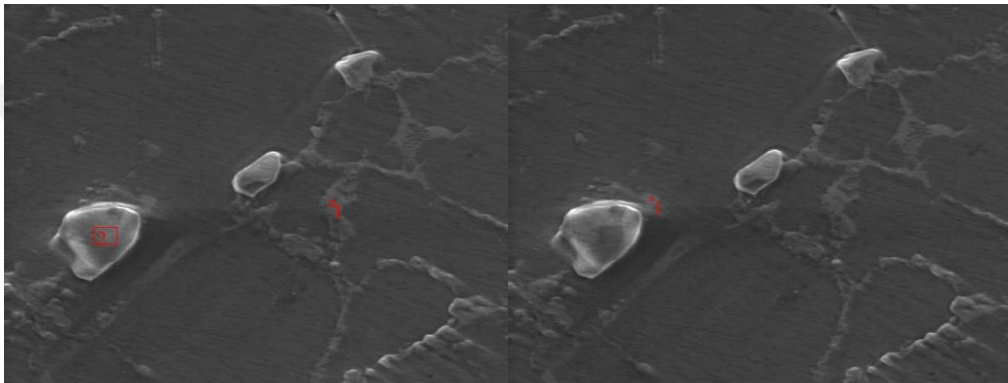
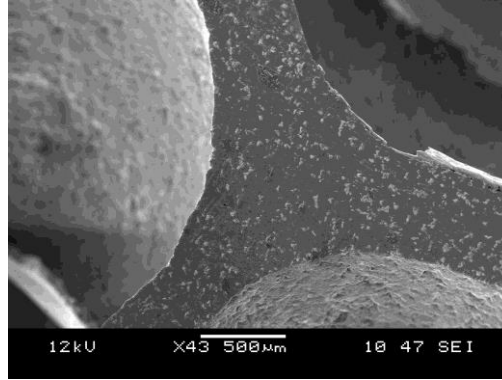


Şekil 3.16. K12-3-45 numunesine ait EDS analizleri

Şekil 3.16'nın devamı

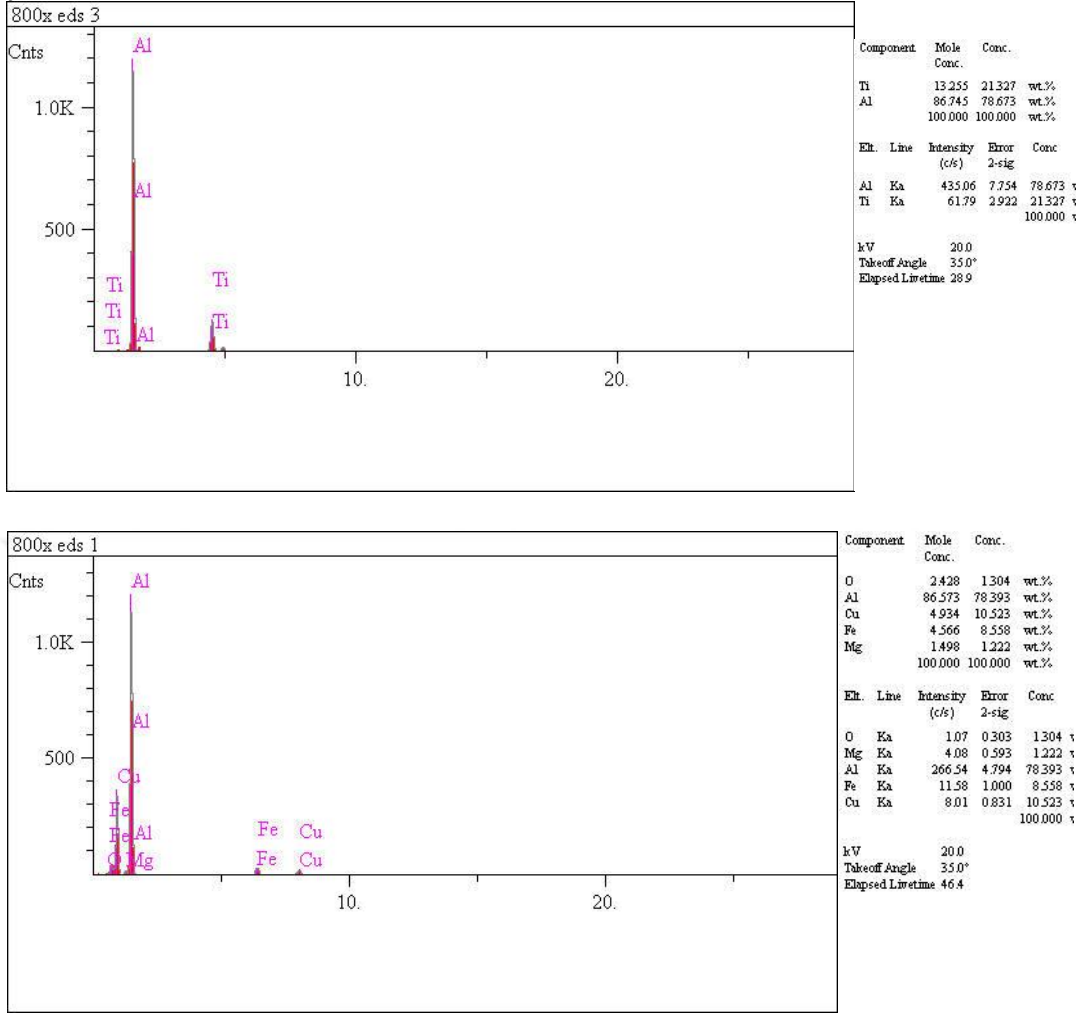


%5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli K12-5-45 numunesine ait EDS analizleri Şekil 3.18' de verilmiştir. Analizler 2 gözenek arasında meydana gelen duvardan alınmıştır. Diğer numunelerde olduğu gibi çeperlerde yoğun bir şekilde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> görülmekte ve ayrıca yine Ti-Al intermetalik bileşiğine rastlanmıştır.



Şekil 3.17. K12-5-45 numunesine ait EDS analizleri

Şekil 3.17'nin devamı



### 3.2.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik

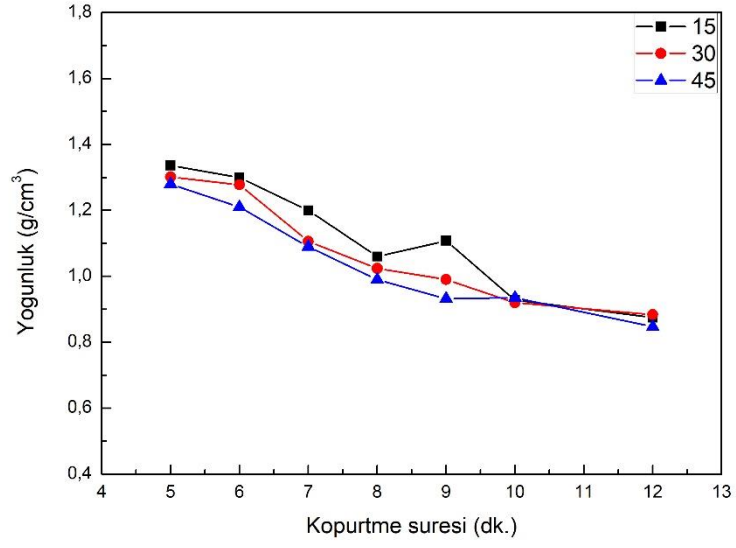
Köpüklenme verimliliği metal köpüklerin yoğunluklarının, gözenek miktarlarının ve gözenek dağılımlarının bir ölçüsü olarak tanımlanabilir. Metal köpüklerin özelliklerini belirleyen bu parametreler arasında yoğunluk önemli bir parametredir ve yoğunluğu 1'in altında olan malzemeler metal köpük olarak değerlendirilmektedir [2]. Tablo 6.1.'de %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin göreceli yoğunluk, gözeneklilik oranı, deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluk değerleri verilmiştir. Şekil 3.18. , 3.19 ve 3.20'de sırası ile yoğunluk, gözeneklilik ve bağıl yoğunluk değerleri verilmektedir. Şekil 3.18.'da 15-30-45 dakika mekanik alaşımlanmış aynı kompozisyondaki tozlardan elde edilen metal köpüklerin yoğunluk değerleri karşılaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi artan köpürtme süresi ile yoğunluk değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozlardan yapılmış köpüklerde en düşük yoğunluk değeri elde edilmiştir (K10-1-15). 3.19. ' da



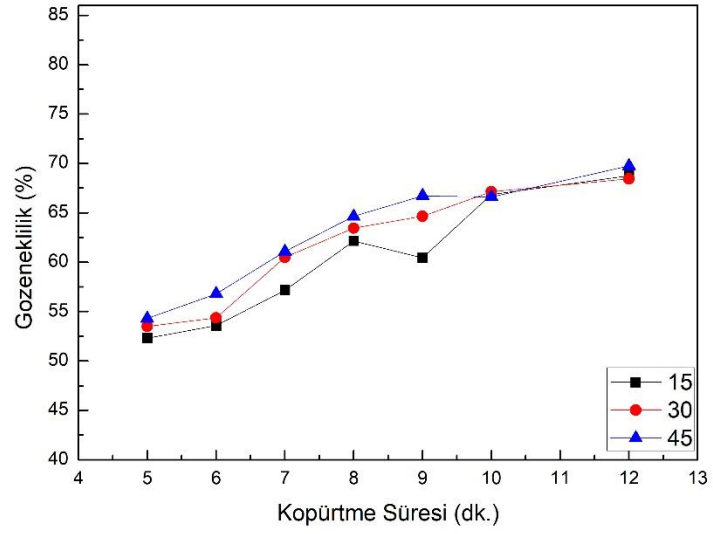
köpürtme süresine bağlı olarak gözeneklilik miktarında meydana gelen değişimler verilmiştir. Artan köpürtme süresi ile gözeneklilik miktarı artmaktadır ve bu durum yoğunluk düşüşü ile tutarlılık göstermektedir. 3.20' de metal köpüklerin artan köpürtme süresi ile bağlı yoğunluğundaki değişim gösterilmiştir. Tüm numunelerde artan köpürtme süresi ile bağlı yoğunluk yaklaşık olarak %30 'a kadar düşüş göstermektedir.

Tablo 3.1. %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin göreceli yoğunluk, gözeneklilik oranı, deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluk değerleri

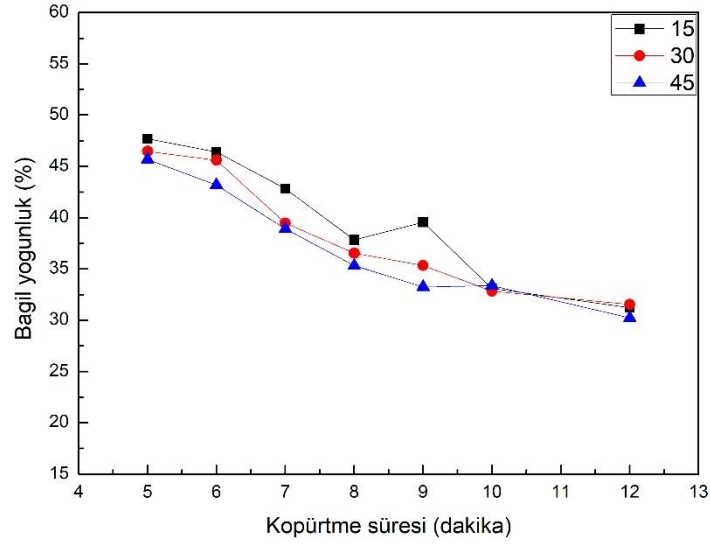
Numune Kodu	Göreceli Yoğunluk(%)	Gözeneklilik Oranı (%)	Deneysel Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Teorik Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
K5-1-15	47,69144	52,30856	1,33603	2,8014
K6-1-15	46,40537	53,59463	1,3	2,8014
K7-1-15	42,83572	57,16428	1,2	2,8014
K8-1-15	37,84022	62,15978	1,06006	2,8014
K9-1-15	39,55465	60,44535	1,10808	2,8014
K10-1-15	33,12679	66,87321	0,92801	2,8014
K12-1-15	31,23338	68,76662	0,87497	2,8014
K5-1-30	46,47376	53,52624	1,30192	2,8014
K6-1-30	45,61805	54,38195	1,27794	2,8014
K7-1-30	39,48126	60,51874	1,10603	2,8014
K8-1-30	36,55215	63,44785	1,02397	2,8014
K9-1-30	35,33947	64,66053	0,99	2,8014
K10-1-30	32,84072	67,15928	0,92	2,8014
K12-1-30	31,55465	68,44535	0,88397	2,8014
K5-1-45	45,69144	54,30856	1,28	2,8014
K6-1-45	43,19269	56,80731	1,21	2,8014
K7-1-45	38,90912	61,09088	1,09	2,8014
K8-1-45	35,33697	64,66303	0,98993	2,8014
K9-1-45	33,26608	66,73392	0,93192	2,8014
K10-1-45	33,37617	66,62383	0,935	2,8014
K12-1-45	30,23338	69,76662	0,84696	2,8014



Şekil 3.18. %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen yoğunluk değişimi



Şekil 3.19. %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen gözeneklilik değişimi

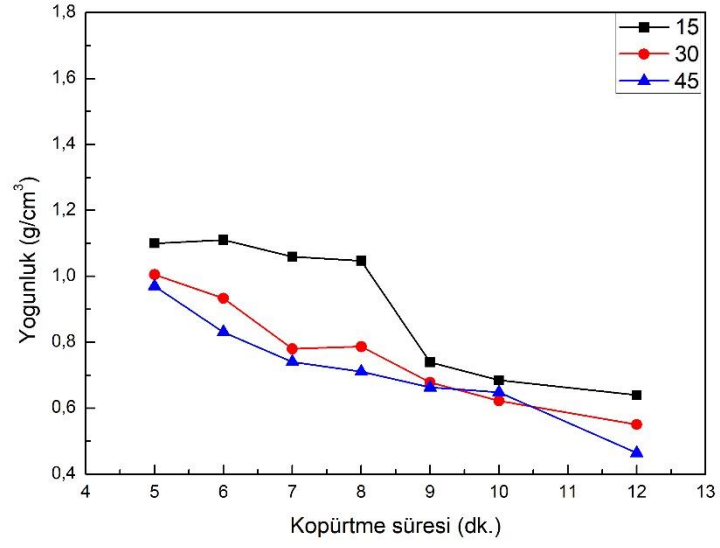


Şekil 3.20. %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen bağıl yoğunluk değişimi

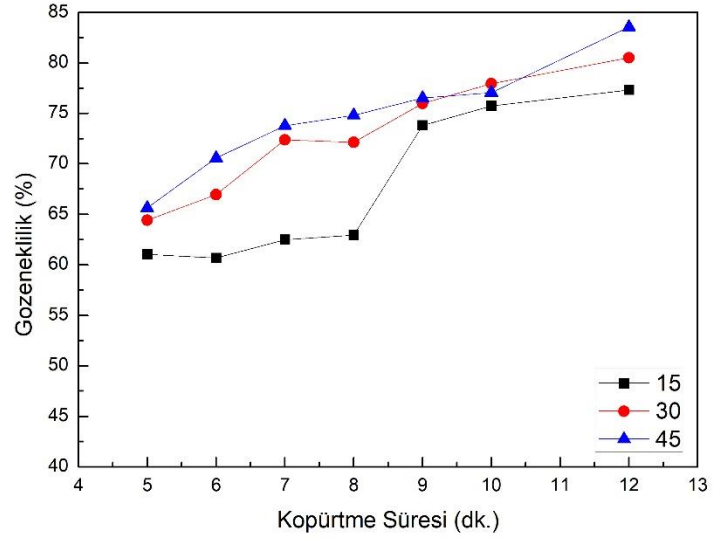
Tablo 6.2. 'de %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin göreceli yoğunluk, gözeneklilik oranı, deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluk değerleri verilmiştir. Şekil 3.21, 3.22, 3.23' de sırası ile yoğunluk, gözeneklilik ve bağıl yoğunluklarındaki değişim verilmiştir. Şekil 3.21 'de görüldüğü gibi artan köpürtme süresi ile yoğunluk tüm numunelerde ciddi ölçüde düşüş göstermiştir ve neredeyse tüm numunelerin yoğunlukları birin altında ve ya yaklaşık olarak birdir. En düşük yoğunluk %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde olduğu gibi 45 dakika mekanik alaşımlanmış köpüklerde elde edilmiştir. Şekil 3.22 'de metal köpüklerin gözeneklilik oranları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi artan süre ile gözeneklilik oranı artmakta ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozlarda en yüksek gözeneklilik oranı elde edilmiştir. Şekil 3.23 bağıl yoğunluk değerlerini göstermekte ve tüm numunelerin bağıl yoğunlukları % 30 altında ve ya yaklaşık olarak % 30 'dur.

Tablo 3.2. %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin göreceli yoğunluk, gözeneklilik oranı, deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluk değerleri

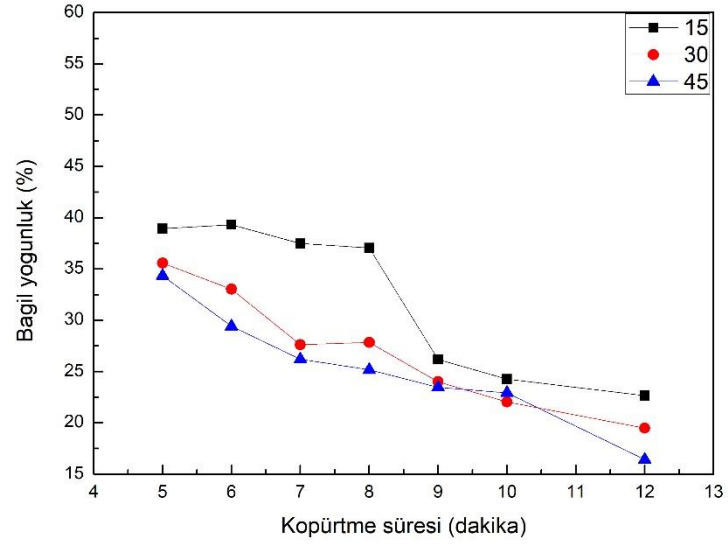
<b>Numune Kodu</b>	<b>Bağıl Yoğunluk (%)</b>	<b>Gözeneklilik Oranı (%)</b>	<b>Deneysel Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Teorik Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>
K5-3-15	38,95299	61,04701	1,10034	2,8248
K6-3-15	39,32016	60,67984	1,11072	2,8248
K7-3-15	37,49533	62,50467	1,05917	2,8248
K8-3-15	37,06386	62,93614	1,04698	2,8248
K9-3-15	26,18946	73,81054	0,7398	2,8248
K10-3-15	24,25658	75,74342	0,6852	2,8248
K12-3-15	22,66709	77,33291	0,6403	2,8248
K5-3-30	35,5868	64,4132	1,00526	2,8248
K6-3-30	33,04701	66,95299	0,93351	2,8248
K7-3-30	27,61965	72,38035	0,7802	2,8248
K8-3-30	27,8567	72,1433	0,7869	2,8248
K9-3-30	24,00878	75,99122	0,6782	2,8248
K10-3-30	22,03951	77,96049	0,62257	2,8248
K12-3-30	19,48612	80,51388	0,55044	2,8248
K5-3-45	34,34579	65,65421	0,9702	2,8248
K6-3-45	29,41476	70,58524	0,83091	2,8248
K7-3-45	26,20617	73,79383	0,74027	2,8248
K8-3-45	25,17077	74,82923	0,71102	2,8248
K9-3-45	23,46913	76,53087	0,66296	2,8248
K10-3-45	22,93812	77,06188	0,64796	2,8248
K12-3-45	16,43005	83,56995	0,46412	2,8248



Şekil 3.21. %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen yoğunluk değişimi



Şekil 3.22. %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen yüzde gözeneklilik değişimi

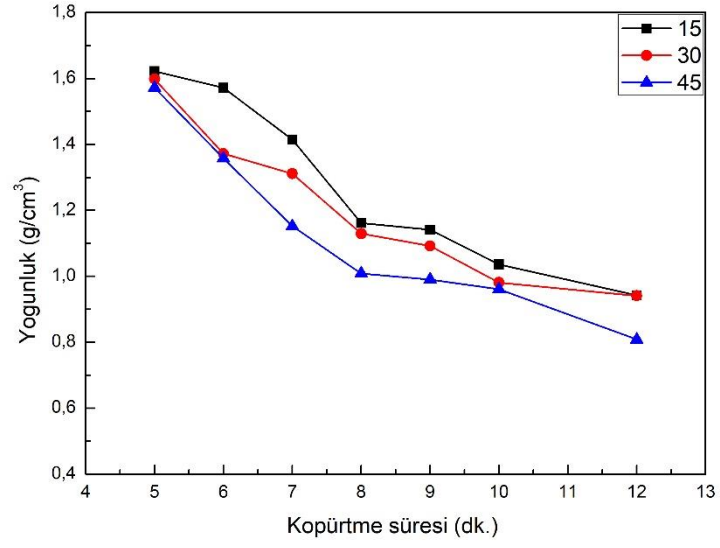


Şekil 3.23. %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen yüzde bağıl yoğunluk değişimi

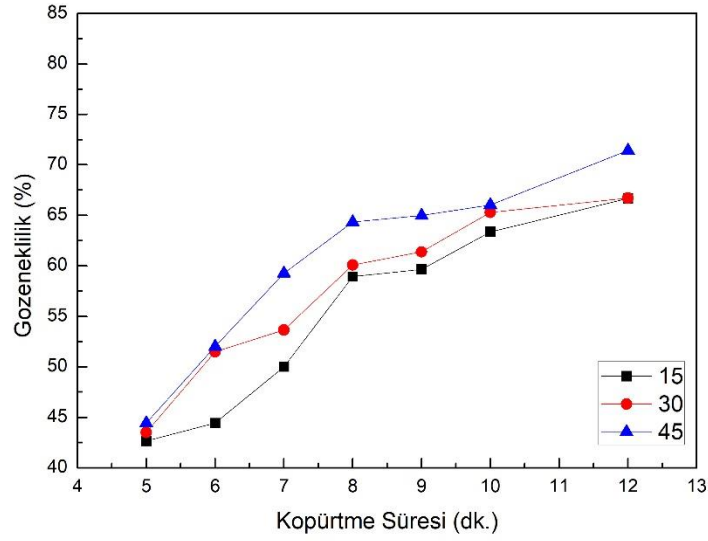
Tablo 3.3. %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin göreceli yoğunluk, gözeneklilik oranı, deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluk değerleri

Numune Kodu	Bağıl Yoğunluk (%)	Gözeneklilik Oranı (%)	Deneysel Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Teorik Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
K5-5-15	57,34919	42,65081	1,62264	2,8294
K6-5-15	55,57916	44,42084	1,57256	2,8294
K7-5-15	49,99519	50,00481	1,41456	2,8294
K8-5-15	41,06485	58,93515	1,16189	2,8294
K9-5-15	40,33871	59,66129	1,14134	2,8294
K10-5-15	36,6307	63,3693	1,03643	2,8294
K12-5-15	33,32059	66,67941	0,94277	2,8294
K5-5-30	56,49136	43,50864	1,59837	2,8294
K6-5-30	48,49901	51,50099	1,37223	2,8294
K7-5-30	46,35684	53,64316	1,31162	2,8294
K8-5-30	39,92268	60,07732	1,12957	2,8294
K9-5-30	38,61314	61,38686	1,09252	2,8294
K10-5-30	34,69272	65,30728	0,9816	2,8294
K12-5-30	33,27669	66,72331	0,94153	2,8294
K5-5-45	55,57916	44,42084	1,57256	2,8294
K6-5-45	47,99519	52,00481	1,35798	2,8294
K7-5-45	40,72897	59,27103	1,15239	2,8294
K8-5-45	35,66695	64,33305	1,00916	2,8294
K9-5-45	35,00283	64,99717	0,99037	2,8294
K10-5-45	33,98471	66,01529	0,96156	2,8294
K12-5-45	28,56868	71,43132	0,80832	2,8294

Tablo 6.3. ‘ de %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin göreceli yoğunluk, gözeneklilik oranı, deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluk değerleri verilmiştir. Şekil 3.24, 3.25, 3.26’ de sırası ile yoğunluk, gözeneklilik ve bağıl yoğunluklarındaki değişim verilmiştir. Şekil 3.24 ‘ de görüldüğü gibi artan köpürtme süresi ile numunelerin yoğunluğunda düşüş görülmektedir. En düşük yoğunluk değeri yine 45 dakika mekanik alaşımlanmış köpüklerde elde edilmiştir. Şekil 3.25 ‘ de metal köpüklerin gözeneklilik oranları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi artan süre ile gözeneklilik oranı artmaktadır ve en yüksek gözeneklilik 45 dakikalık numunelerden elde edilmiştir. Şekil 3.26 bağıl yoğunluk değerlerini göstermekte ve artan köpürtme süresine bağlı olarak numunelerin bağıl yoğunlukları yaklaşık olarak % 30 olmuştur.

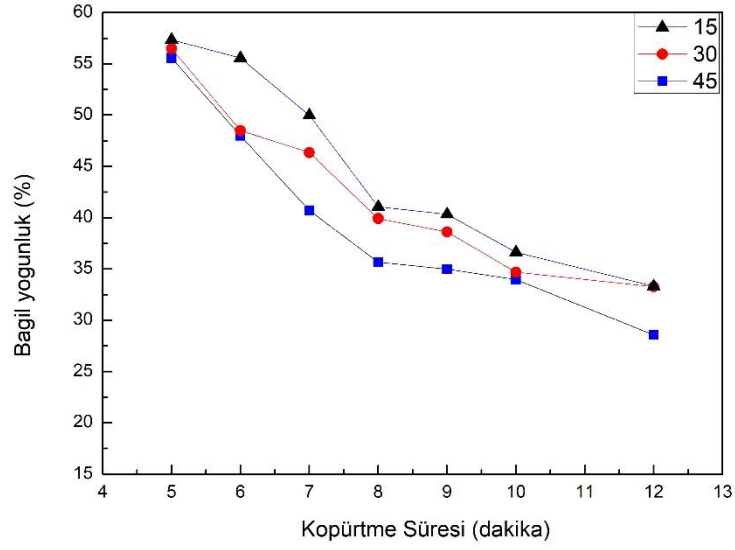


Şekil 3.24. %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen yoğunluk değişimi



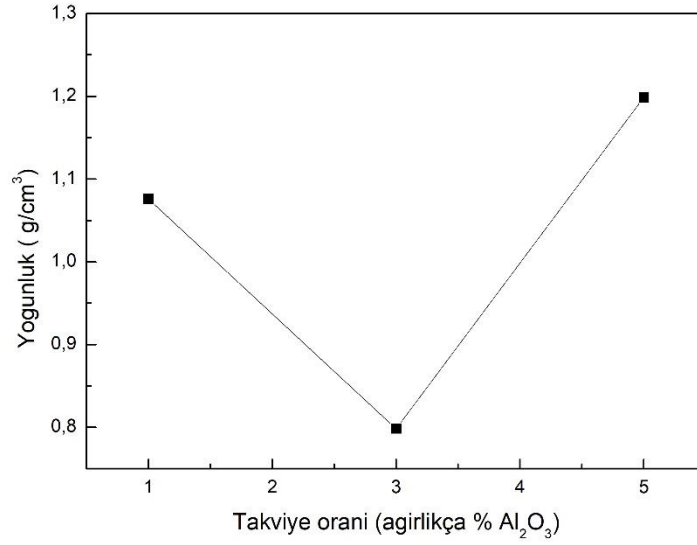
Şekil 3.25. %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen yüzde gözeneklilik değişimi





Şekil 3.26. %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme süresine bağlı olarak meydana gelen yüzde bağıl yoğunluk değişimi.

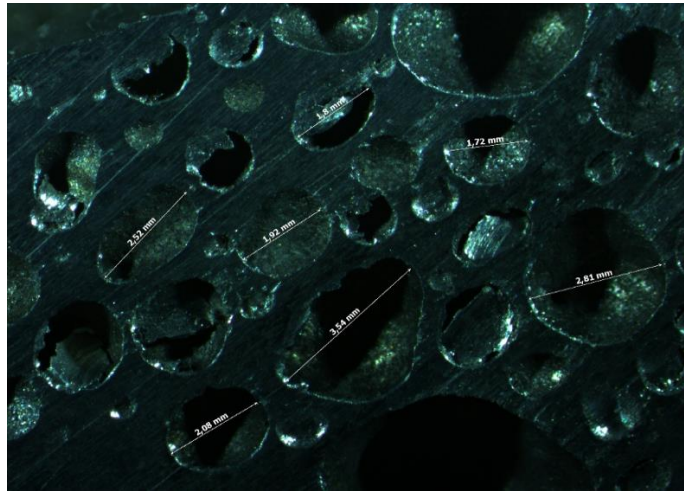
Şekil 3.27’de takviye oranına bağlı olarak ortalama yoğunluk değerleri karşılaştırılmıştır. En düşük yoğunluk değerleri %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpüklerde görülmüştür. Daha sonra %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpükler gelmekte ve en yüksek değerler %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde görülmüştür.



Şekil 3.27. %1-3-5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde takviye oranına bağlı olarak meydana gelen ortalama yoğunluk değişimleri karşılaştırması.

### 3.2.3. Kompozit Metal Köpüklerin Ortalama Gözenek Boyut Analizleri

Hazırlanan kompozit metal köpüklerin ortalama gözenek boyutları optik mikroskopta gözeneklerin boyutları ölçülerek hesaplanmıştır. Şekil 3.28’de ölçümlerin nasıl yapıldığı gösterilmektedir.

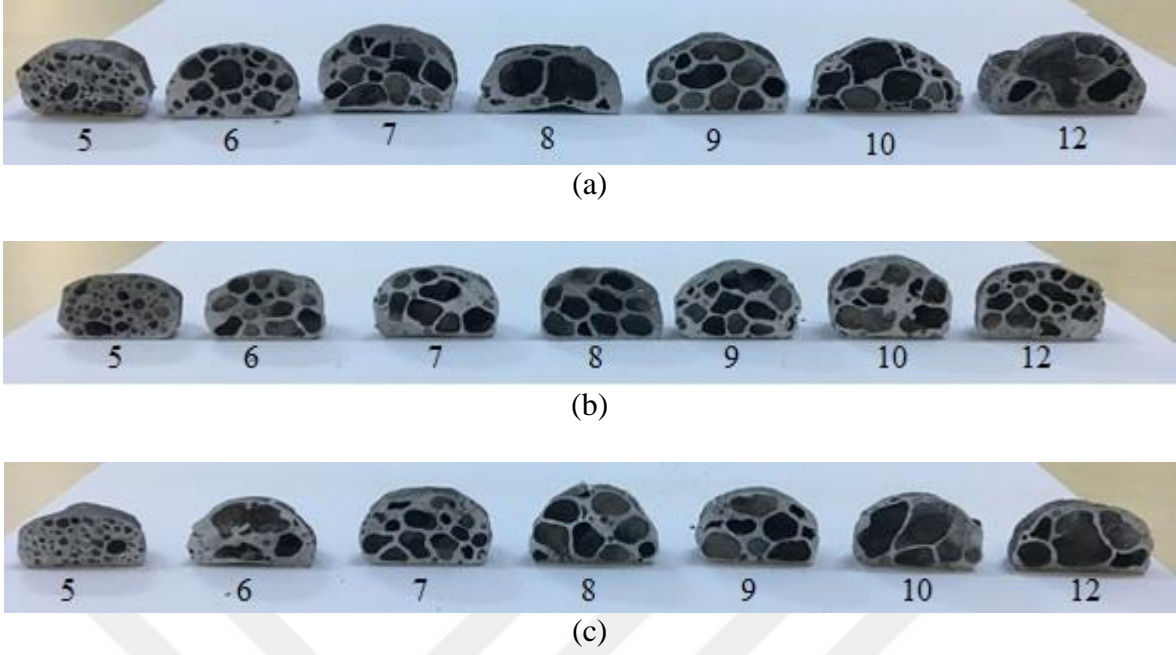


Şekil 3.28. Kompozit metal köpüklerin gözenek boyut ölçümü

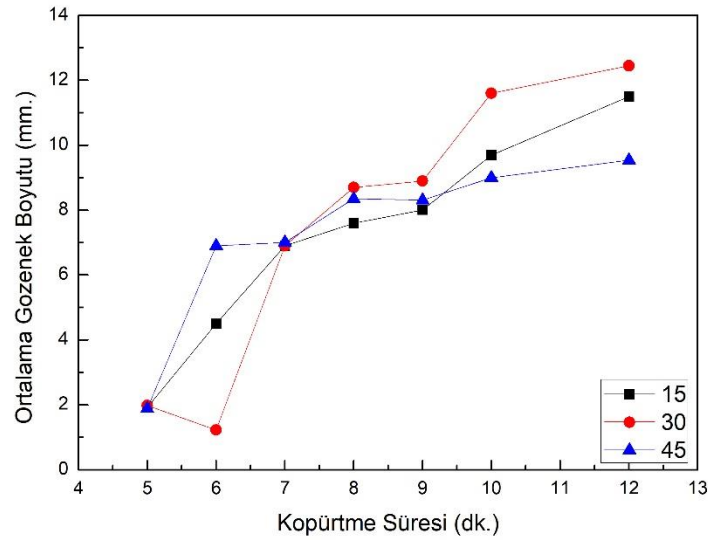
Tablo 6.4’de %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin ortalama gözenek boyut değişimleri değişen köpürtme süresine bağlı olarak verilmiştir. Şekil 3.29’da %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozlardan elde edilen ve farklı sürelerde (5,6,7,8,9,10,12 dakika) köpürtme işlemi gerçekleştirilmiş kompozit metal köpüklerin görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde net bir şekilde görüldüğü gibi 5 dakika köpürtme ile elde edilen numunelerde gözenek miktarı fazla, ancak küçük ve ana metalin yüzey alanı fazladır. Artan köpürtme süresi birlikte gözenek oluşumları daha homojen bir hale gelmekte, gözenekler arası çeperler incelmekte, ancak birleşmeler artmaktadır. 10 ve 12 dakika köpürtme sonucu elde edilen köpüklerde gözenek birleşmeleri gittikçe artmış ve çok büyük gözenek oluşumları gözlenmiştir. Bu durum, oluşacak olan gözenekler arasına takviye olması ve gözenekler arasında birleşmeyi önlemesi amacı ile takviye edilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının yetersiz olduğu, gözeneklerin birleşmesini önleyemediğini göstermektedir. Şekil 3.30’da ortalama gözenek boyut değişimi grafik üzerinde farklı mekanik alaşımlama ve farklı köpürtme sürelerine bağlı olarak verilmiştir.

Tablo 3.4. %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin ortalama gözenek boyut değerleri

Numune Kodu	Ortalama Gözenek Boyutu (mm.)	Numune Kodu	Ortalama Gözenek Boyutu (mm.)	Numune Kodu	Ortalama Gözenek Boyutu (mm.)
K5-1-15	1,92	K5-1-30	1,98	K5-1-45	1,89
K6-1-15	4,5	K6-1-30	1,23	K6-1-45	6,9
K7-1-15	6,9	K7-1-30	6,9	K7-1-45	7,01
K8-1-15	7,6	K8-1-30	8,7	K8-1-45	8,35
K9-1-15	8,01	K9-1-30	8,9	K9-1-45	8,31
K10-1-15	9,7	K10-3-30	11,6	K10-1-45	9
K12-1-15	11,5	K12-3-30	12,45	K12-1-45	9,54



Şekil 3.29. %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli (a) 15 dakika, (b) 30 dakika ve (c) 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozlardan elde edilen metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen gözenek boyutu değişimi.



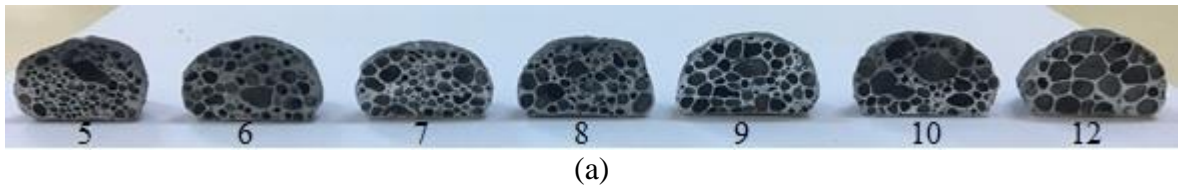
Şekil 3.30. %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen ortalama gözenek boyutu değişimi.

Tablo 6.5’de %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin ortalama gözenek boyut değişimleri değişen köpürtme süresine bağlı olarak verilmiştir. Şekil 3.31’de %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli 15-30

ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozlardan elde edilen ve farklı sürelerde (5,6,7,8,9,10,12 dakika) köpürtme işlemi gerçekleştirilmiş kompozit metal köpüklerin görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde görüldüğü üzere en düşük köpürtme süresinde dahi gözenek miktarı fazla ve gözenekler arası çeperler incedir. Artan köpürtme süresine bağlı olarak gözenek miktarı artmış ancak birleşmeler 10 ve 12 dakika köpürtme sonucu elde edilen köpüklerde görülmüştür. Uzun köpürtme sürelerine rağmen 10 ve 12 dakika köpürtme ile elde edilen numunelerde dahi gözenek dağılımı homojendir. Şekil 3.32’de ortalama gözenek boyut değişimi grafik üzerinde farklı mekanik alaşımlama ve farklı köpürtme sürelerine bağlı olarak verilmiştir.

Tablo 3.5. %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin ortalama gözenek boyut değerleri

Numune Kodu	Ortalama Gözenek Boyutu (mm.)	Numune Kodu	Ortalama Gözenek Boyutu (mm.)	Numune Kodu	Ortalama Gözenek Boyutu (mm.)
K5-3-15	5,92	K5-3-30	2,41	K5-3-45	3,835
K6-3-15	6	K6-3-30	6,9	K6-3-45	6,28
K7-3-15	6,87	K7-3-30	7,7	K7-3-45	5,24
K8-3-15	5,29	K8-3-30	6,48	K8-3-45	6,98
K9-3-15	7,72	K9-3-30	9,12	K9-3-45	6,05
K10-3-15	7,299	K10-3-30	8,96	K10-3-45	8,18
K12-3-15	7,29	K12-3-30	13,66	K12-3-45	9,038



Şekil 3.31. %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli (a) 15 dakika, (b) 30 dakika ve (c) 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozlardan elde edilen metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen gözenek boyutu değişimi

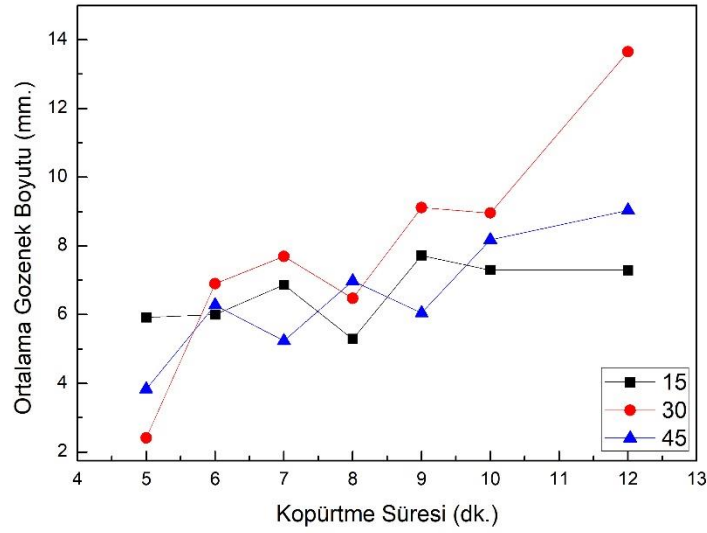
Şekil 3.31'in devamı



(b)



(c)



Şekil 3.32. %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen ortalama gözenek boyutu değişimi

Tablo 6.6'da %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin ortalama gözenek boyut değişimleri değişen köpürtme süresine bağlı olarak verilmiştir. Şekil 3.33'de %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli 15-30 ve 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozlardan elde edilen ve farklı sürelerde (5,6,7,8,9,10,12 dakika) köpürtme işlemi gerçekleştirilmiş kompozit metal köpüklerin görüntüleri verilmiştir. 5 ve 6 dakika köpürtme ile elde edilen numunelerden istenildiği gibi sonuçlar alınamamış, artan süre ile birlikte gözeneklilik artmıştır. En homojen dağılım 8 ve 9 dakika köpürtülen numunelerde elde edilmiş, 10 ve 12 dakika köpürtülen numunelerde gözenek birleşmeleri görülmüştür. Ancak %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli köpükler ile karşılaştırıldığında gözeneklerin birleşmesi sonucu oluşan çok büyük boyutlara sahip gözenekler

görülmemektedir. Şekil 3.34'da ortalama gözenek boyut değişimi grafiksel olarak verilmiştir.

Tablo 3.6. %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerin ortalama gözenek boyut değerleri

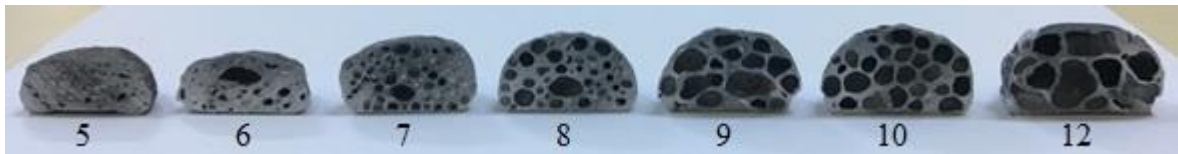
Numune Kodu	Ortalama Gözenek Boyutu (mm.)	Numune Kodu	Ortalama Gözenek Boyutu (mm.)	Numune Kodu	Ortalama Gözenek Boyutu (mm.)
K5-5-15	1,38	K5-5-30	1,14	K5-5-45	1,77
K6-5-15	1,96	K6-5-30	2,54	K6-5-45	1,26
K7-5-15	2,44	K7-5-30	3,48	K7-5-45	1,35
K8-5-15	4,04	K8-5-30	5,3	K8-5-45	3,8
K9-5-15	6,24	K9-5-30	6,04	K9-5-45	4,3
K10-5-15	6,35	K10-5-30	6,9	K10-5-45	7,9
K12-5-15	8,31	K12-5-30	8,7	K12-5-45	9,2



(a)



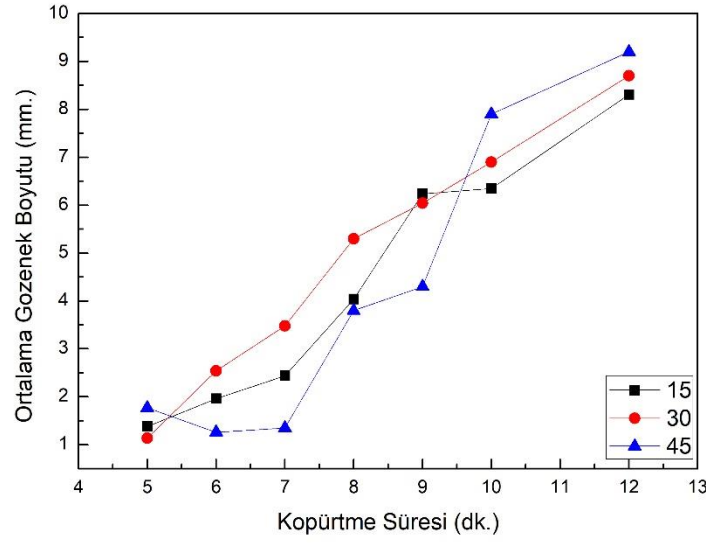
(b)



(c)

Şekil 3.33. %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli (a) 15 dakika, (b) 30 dakika ve (c) 45 dakika mekanik alaşımlanmış tozlardan elde edilen metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen gözenek boyutu değişimi





Şekil 3.34. %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen ortalama gözenek boyutu değişimi.

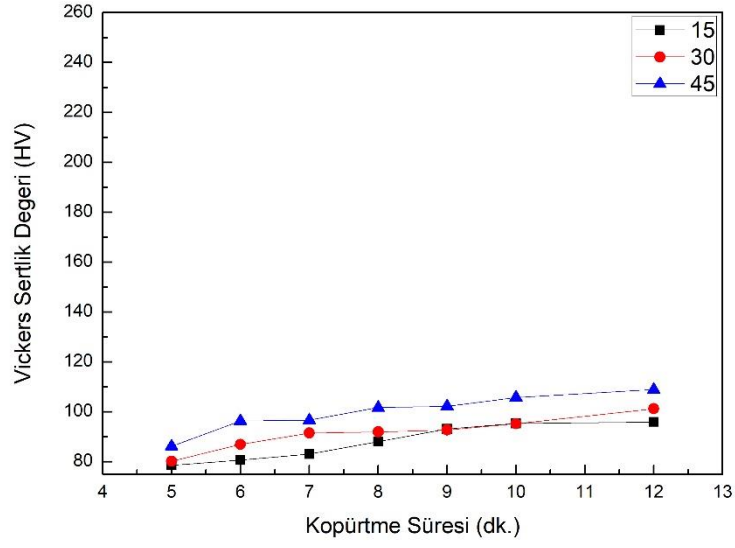
### 3.2.4. Sertlik Ölçümleri

Numunelere Vickers sertlik testi uygulanmıştır. Tablo 6.7’de %1-3-5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpüklerin sertlik değerleri verilmiştir. Artan takviye oranına bağlı olarak sertlik oranında artış görülmüştür. Şekil 3.35, 3.36, 3.37’ da %1-3-5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpüklerin köpürtme süresine bağlı olarak sertlik değerlerindeki değişim verilmiştir. Mekanik alaşımlama sürelerine bağlı olarak değerlendirildiğinde tüm numunelerde 45 dakika mekanik alaşımlanmış numunelerde en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir.

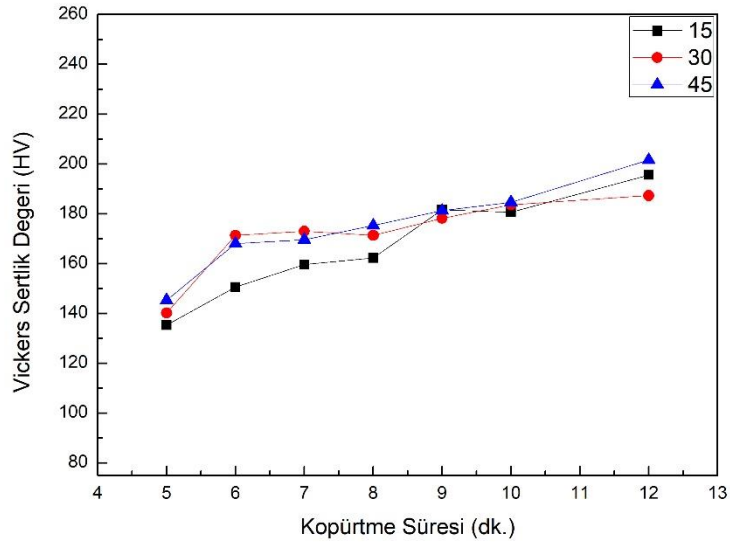


Tablo 3.7. % 1-3-5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpüklerin ortalama sertlik değerleri

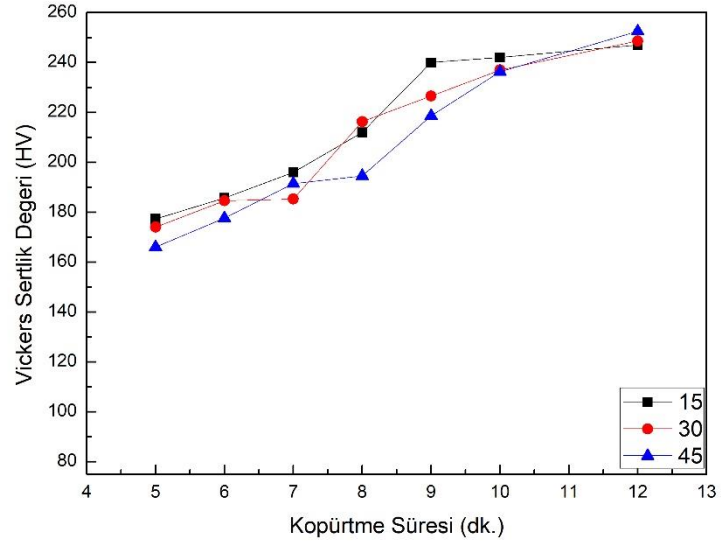
Numune Kodu	Sertlik Değeri (HV)	Numune Kodu	Sertlik Değeri (HV)	Numune Kodu	Sertlik Değeri (HV)
K-0	73,4	K-0	73,4	K-0	73,4
K5-1-15	78,6	K5-3-15	135,3	K5-5-15	177,3
K6-1-15	80,64	K6-3-15	150,6	K6-5-15	185,7
K7-1-15	83,1	K7-3-15	159,6	K7-5-15	196
K8-1-15	88,09	K8-3-15	162,3	K8-5-15	212
K9-1-15	93,15	K9-3-15	181,6	K9-5-15	240
K10-1-15	95,29	K10-3-15	180,6	K10-5-15	242
K12-1-15	95,94	K12-3-15	195,6	K12-5-15	247
K5-1-30	80,2	K5-3-30	140,2	K5-5-30	174
K6-1-30	86,93	K6-3-30	171,3	K6-5-30	184,6
K7-1-30	91,5	K7-3-30	173	K7-5-30	185,3
K8-1-30	91,96	K8-3-30	171,3	K8-5-30	216,3
K9-1-30	92,73	K9-3-30	178,2	K9-5-30	226,6
K10-1-30	95,2	K10-3-30	183,6	K10-5-30	237
K12-1-30	101,24	K12-3-30	187,3	K12-5-30	248,6
K5-1-45	86,16	K5-3-45	145,3	K5-5-45	166
K6-1-45	96,3	K6-3-45	168	K6-5-45	177,6
K7-1-45	96,6	K7-3-45	169,6	K7-5-45	191,5
K8-1-45	101,7	K8-3-45	175,3	K8-5-45	194,6
K9-1-45	102,23	K9-3-45	181,3	K9-5-45	218,6
K10-1-45	105,78	K10-3-45	184,6	K10-5-45	236,3
K12-1-45	108,85	K12-3-45	201,6	K12-5-45	252,5



Şekil 3.35. %1  $Al_2O_3$  takviyeli metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen sertlik değerindeki değişimi.



Şekil 3.36. %3  $Al_2O_3$  takviyeli metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12)bağlı olarak meydana gelen sertlik değerindeki değişimi.



Şekil 3.37. %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklerde köpürtme sürelerine (5,6,7,8,9,10,12) bağlı olarak meydana gelen sertlik değerindeki değişimi.

#### 4.İRDELEME

Köpüklenme verimini artırmak amacı ile  $TiH_2$  tozlarına ısıtıl işlem uygulanmış ve dekompozisyon sıcaklığı daha yüksek sıcaklıklara çıkarılarak, geciktirilmiştir. Böylece matris malzemesinin ergime sıcaklığının üzerine çıkılarak katı-sıvı faz aralığında oluşan gazların daha rahat hareket etmesi sağlanmıştır. Ayrıca yüzeylerinde ısıtıl işlem sonucu oluşan oksit partikülleri ve takviye malzemesi oluşan gözenekler arasındaki çeperlerde birikerek gözeneklerin birleşmesini önlemişleridir. Bahsedilen oksit yapılar ısıtıl işlem görmüş  $TiH_2$  tozlarından alınan XRD analizinde net bir şekilde görülmekte, EDS analizleri ile desteklenmektedir.

Mekanik alaşımlanmış tozların SEM görüntülerine bakıldığında ilk olarak ilk olarak birleşmeler görülmektedir. Artan süreye bağlı olarak toz boyutlarında düşüşler meydana gelmektedir. Bu durum takviye malzemesinin matris malzemesi içerisine gömülmesi ve kırılma davranışı kolaylaştırması ile açıklanmaktadır [42, 43]. Mekanik alaşımlama sonucu elde edilen tozların XRD analizlerinde takviye elemanları net bir şekilde görülmemekle birlikte matris malzemesinin ana pikine bakıldığında, takviye eleman oranına bağlı olarak pik açısında kaymalar olduğu görülmektedir. Bu durum takviye elemanlarının kristal yapıda meydana getirdiği değişimler nedeni ile kafes parametresinde değişim olduğunu göstermektedir. Takviye oranındaki artışa bağlı olarak pik açısındaki değişim giderek artmakta, şiddet giderek azalmaktadır.

Üretilen numunelerin gözenekleri arasındaki duvarlarından alınan EDS sonuçlarına göre duvarlarda takviye elemanı yoğun olarak bulunmaktadır. Ayrıca  $TiH_2$ ' nin bozunması sonucu oluşan Titanyum, Alüminyum ile intermetalik bileşik oluşturmuştur.

Yapılan yoğunluk ölçümlerine göre en düşük yoğunluklar %3  $Al_2O_3$  takviyeli numunelerden elde edilmiştir. Artan köpürtme süresine bağlı olarak yoğunluk değerleri düşmektedir. Gözeneklilik açısından değerlendirildiğinde aynı şekilde %3  $Al_2O_3$  takviyeli numuneler en yüksek değerleri göstermektedir. Aynı şekilde artan köpürtme süresine bağlı olarak gözeneklilik oranında da artışlar meydana gelmektedir. Bütün numunelerde artan köpüklenme süresine bağlı olarak bağıl yoğunlukta da azalma görülmüş ve %3  $Al_2O_3$  takviyeli numunelerde en düşük bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir.

Numunelerden mikroskop üzerinden alınan gözenek boyutlarına ve verilen görsellere bakıldığında bütün numunelerde düşük köpürtme sürelerinde gözenek boyutlarının yetersiz olduğu, artan köpürtme süreleri ile gözenek boyutlarının arttığı, ancak aynı zamanda artan

köpürtme süresine bağı olarak gözeneklerde birleşmeler olduğu görülmektedir. %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli köpüklere bakıldığında düşük köpürtme sürelerinde dahi birleşmelerin olduğu artan köpürtme süresi ile çok büyük gözenekler oluştuğu gözlenmektedir. %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metal köpüklere bakıldığında homojen ve küçük boyut dağılımına sahip gözeneklere sahip olduğu görülmektedir. Artan köpürtme süresi ile birleşmeler meydana gelmiş ancak büyük boyutlara ulaşmamıştır. %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli köpükler incelendiğinde artan köpüklenme süresi ile homojen dağılımlar görülmekte ancak 10 ve 12 dakikalık köpürtme sürelerinde birleşmeler artmaktadır. Bütün numuneler değerlendirildiğinde %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli köpüklerde takviye malzemesinin gözenek birleşmelerini önlemede yetersiz kaldığı görülmektedir. %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli köpüklerde de gözenek miktarı ve metal oranına açısından değerlendirildiğinde metal yüzey alanının fazla olduğu görülmektedir. Gözenek boyutları ve homojen dağılım açısından değerlendirildiğinde en iyi kompozit metal köpüklerin %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli köpükler olduğu görülmektedir.

Ölçülen sertlik değerlerine bakıldığında artan takviye oranına bağı olarak sertlik değerlerinde artış gözlenmektedir. Bütün numunelerde 45 dakikalık mekanik alaşımlama sonrası elde edilen tozlardan yapılan numunelerde en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada AA2024 alaşımı matris malzemesi, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye malzemesi ve TiH<sub>2</sub> köpürtücü ajan olarak kullanılarak kompozit metal köpükler farklı sürelerde mekanik alaşımlama yapılarak elde edilen tozlardan üretilmiş ve farklı sürelerde köpürtme gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Takviye miktarının ve mekanik alaşımlama süresinin ve köpürtme süresinin metal köpük hücre yapısına, köpüklenme verimine ve mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Köpüklenme verimini artırmak amacı ile TiH<sub>2</sub> tozlarına ısıl işlem yapılmış ve XRD, EDS sonuçlarına göre istenildiği gibi oksit partikülleri elde edilmiştir.
2. DTA-TGA sonuçlarına göre TiH<sub>2</sub> tozlarına uygulanan ısıl işlem ile hidrojen gazının yapıdan uzaklaştırılması geciktirilmiştir.
3. Mekanik alaşımlama ile 15 dakikalık öğüme sonrasında soğuk birleşme ile boyut artışı, 30-45 dakikalık öğütme sonrasında toz boyutunun azaldığı gözlenmiştir.
4. Elde edilen metal köpüklerin gözenekleri arasında oluşan duvarları incelendiğinde istenildiği gibi çeperlerde yoğun bir şekilde takviye elemanın varlığı gözlenmektedir.
5. Bütün numunelerde istenildiği gibi yoğunluk düşüşleri gözlenmiş ve en düşük yoğunluk değerleri 9-10 ve 12 dakikalık köpürtme sonucu elde edilen numunelerden alınmıştır. Yoğunluk değerleri takviye oranına bağlı olarak değerlendirildiğinde en düşük yoğunluk değerleri %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpüklerden elde edilmiştir.
6. Bütün numunelerde gözeneklilik oranı artan köpürtme süresine bağlı olarak artmış ve en yüksek gözeneklilik değerleri %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpüklerden elde edilmiştir.
7. Gözenek yapıları incelendiğinde bütün numunelerde artan köpürtme süresine bağlı olarak gözeneklerde birleşmeler olduğu görülmüştür. Ortalama gözenek boyutlarına

bakıldığında %1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpüklerin ortalama gözenek boyutlarının diğerlerine göre yüksek olduğu görülmektedir. Gözenek yapıları incelendiğinde düşük köpürtme sürelerinde dahi birleşmelerin yoğun olduğu görülmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde takviye elemanının gözenek birleşmelerini önleyebilecek miktarda olmadığı gözlenmektedir. %3 ve %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpükler gözenek yapıları açısından değerlendirildiğinde %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpüklerin gözenek yapılarının homojen dağılımlı olduğu ve birleşmelerin az olduğu görülmektedir.

8. Sertlik değerleri artan takviye oranına bağlı olarak artmaktadır.
9. Yapılan bütün analizler açısından değerlendirildiğinde %3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit metal köpükler en verimli olarak üretilen köpüklerdir.

## 6. ÖNERİLER

1. Farklı sinterleme sıcaklıkları denenerek gözenek oluşumuna etkisi incelenebilir.
2. Sinterleme süresinin gözenek yapılarına etkisi incelenebilir.
3. Presleme yükü değiştirilerek köpüklenme verimi incelenebilir.
4. Farklı takviye malzemeleri ile mekanik özellikleri iyileştirilebilir.
5. Basma, eğme ve enerji sönümlenme testleri yapılarak kompozit metal köpüklerin mekanik özellikleri karakterize edilebilir.





## 7. KAYNAKLAR

1. Banhart, J., Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams, Progress In Materials Science, 46,6 (2001) 559-632.
2. Ashby, Michael F and Evans, Tony and Fleck, Norman A and Hutchinson, JW and Wadley, HNG and Gibson, LJ, Metal Foams: a Design Guide (2000) Elsevier.
3. Degischer, H.-P. and B. Kriszt, Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications, (2002), Wiley-vch Weinheim.
4. Han, X.-H., et al., A Review of Metal Foam and Metal Matrix Composites for Heat Exchangers and Heat Sinks, Heat Transfer Engineering, 33,12 (2012) 991-1009.
5. Azzi, W.E., A Systematic Study on the Mechanical and Thermal Properties of Open Cell Metal Foams for Aerospace Applications, (2004).
6. Bastawros, A.-F. and A. Evans, Characterisation of Open-Cell Aluminum Alloy Foams as Heat Sinks for High Power Electronic Devices, ASME, 356 (1997) 1-6.
7. Koltsakis, G., et al., Development of Metal Foam Based Aftertreatment System on a Diesel Passenger Car, (2008), SAE Technical Paper.
8. Chung, D., Materials for Thermal Conduction, Applied thermal engineering, 21,16 (2001) 1593-1605.
9. Güven, Ş.Y., Toz Metalurjisi ve Metalik Köpükler, SDU Teknik Bilimler Dergisi, 1.2 (2011).
10. Asavavisithchai, S. and A.R. Kennedy, In-situ Oxide Stabilization Development of Aluminum Foams in Powder Metallurgical Route, High Temperature Materials and Processes, 30,1-2 (2011) 113-120.
11. Wang, N., et al., Compressive Performance and Deformation Mechanism of the Dynamic Gas Injection Aluminum Foams, Materials Characterization, 147 (2019) 11-20.
12. Jin, I., L.D. Kenny, and H. Sang, Stabilized Metal Foam Body, 1992, Google Patents.
13. Banhart, J., Manufacturing Routes for Metallic Foams, Jom, Springer, 52,12 (2000) 22-27.
14. Banhart, J., Metal foams: Production and Stability, Advanced Engineering Materials, 8,9 (2006) 781-794.
15. Idris, M., T. Vodenitcharova, and M. Hoffman, Mechanical Behaviour and Energy Absorption of Closed-cell Aluminium Foam Panels in Uniaxial Compression, Materials Science and Engineering: A, 517,1-2 (2009) 37-45.

16. Srivastava, V. and K. Sahoo, Processing, Stabilization and Applications of Metallic Foams, Materials Science-Poland, 25,3 (2007) 733-753.
17. Çağlar, S.İ., Alüminyum Esaslı Kompozit Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne, 2009.
18. Banhart, J. and J. Baumeister, Production methods for metallic foams, MRS Online Proceedings Library Archive, 521 (1998).
19. Yagci, C. and O. Keles, Fabrication and Characterization of Open Cell Aluminum Foams by Polymer Replication Method, Light Metals, (2019) 209-215.
20. Baumeister, J. and J. Schrader, German Patent No. 1990, DE.
21. Baumeister, J. and H. Schrader, Methods for Manufacturing Foamable Metal Bodies, 1992, Google Patents.
22. Baumeister, J. and H. Schrader, Methods for Manufacturing Foamable Metal Body and Use the Same, German Patent DE, 4101630 (1991) 12.
23. Duan, X., et al., The Preparation Methods and Application of Aluminum Foam, Light Metals, (2019) 501-504.
24. Park, C. and S. Nutt, PM Synthesis and Properties of Steel Foams, Materials Science and Engineering: A, 288,1 (2000) 111-118.
25. Von Zeppelin, F., et al., Desorption of Hydrogen From Blowing Agents Used For Foaming Metals, Composites Science and Technology, 63,16 (2003) 2293-2300.
26. Irretier, A. and J. Banhart, Lead and Lead Alloy Foams, Acta Materialia, 53,18 (2005) 4903-4917.
27. Duarte, I. and M. Oliveira, Aluminium Alloy Foams: Production and Properties, Powder Metallurgy, (2012)
28. Körner, C. and R.F. Singer, Processing of Metal Foams, Challenges and Opportunities, Advanced Engineering Materials, 2,4 (2000) 159-165.
29. Yang, X., et al., Compression Fatigue Properties of Open-Cell Aluminum Foams Fabricated By Space-Holder Method, International Journal of Fatigue, 121 (2019) 272-280.
30. Yavuz, İ., Metalik Köpük Malzemeler ve Uygulama Alanları, Electronic Journal of Vehicle Technologies (EJVT), 2,1 (2010) 49-58.
31. Çinicı, H., Toz Metalürjisi Yöntemi İle Alüminyum Esaslı Metalik Köpük Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, (2004) 12-24.

32. Guden, M., et al., Metals Foams For Biomedical Applications: Processing And Mechanical Properties, Biomaterials, (2004) 257-266.
33. Banhart, J. and H.W. Seeliger, Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications, Advanced Engineering Materials, 10,9 (2008) 793-802.
34. Kennedy, A., The Effect of TiH<sub>2</sub> Heat Treatment on Gas Release and Foaming In Al–TiH<sub>2</sub> Preforms, Scripta Materialia, 47,11 (2002) 763-767.
35. Elbir, S., et al., Sic-Particulate Aluminum Composite Foams Produced by Powder Compacts: Foaming and Compression Behavior, Journal of Materials Science, 38,23 (2003) 4745-4755.
36. Feng, Y., et al., The Microstructure And Electrical Conductivity of Aluminum Alloy Foams, Materials Chemistry and Physics, 78,1 (2003) 196-201.
37. Matijasevic-Lux, B., et al., Modification of Titanium Hydride For Improved Aluminium Foam Manufacture, Acta Materialia, 54,7 (2006) 1887-1900.
38. Esmaeelzadeh, S. and A. Simchi, Foamability and Compressive Properties Of AlSi7–3 Vol.% Sic–0.5 Wt.% TiH<sub>2</sub> Powder Compact, Materials Letters, 62,10-11 (2008) 1561-1564.
39. Dudka, A., et al., Structure and Distribution of Oxides In Aluminium Foam, Acta Materialia, 56,15(2008) 3990-4001.
40. Zolotarevsky, V.S., N.A. Belov, and M.V. Glazoff, Casting aluminum alloys, vol. 12., Elsevier Amsterdam, 2007
41. Dalmis, R., et al., The Effect of Mechanical Milling on Graphite–Boron Carbide Hybrid Reinforced ZA27 Nanocomposites, Arabian Journal for Science and Engineering, 43,3 (2018) 1113-1124.
42. Varol, T. and A. Canakci, Effect Of Particle Size and Ratio of B<sub>4</sub>C Reinforcement on Properties And Morphology of Nanocrystalline Al2024-B<sub>4</sub>C Composite Powders, Powder Technology, 246 (2013)462-472.
43. Alizadeh, A. and E. Taheri-Nassaj, Mechanical Properties and Wear Behavior of Al–2 Wt.% Cu Alloy Composites Reinforced by B<sub>4</sub>C Nanoparticles and Fabricated by Mechanical Milling and Hot Extrusion, Materials characterization, 67 (2012)119-128.

## ÖZGEÇMİŞ

Özgür Yasin KESKİN 1991 yılında Erzurum’da doğdu. 2015 yılın Karadeniz Teknik Üniversite Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Lisans eğitimden sonra yüksek lisans eğitimine başladı. 2018 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atandı ve halen devam etmektedir. Yüksek lisans eğitimi süresince uluslararası sempozyumlarda sunulmuş 5 adet bildirisi bulunmaktadır.

