

**MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM ESASLI  
METALİK KÖPÜK ÜRETİLEBİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Yasin PELİT**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FENBİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Şubat 2012  
ANKARA**

Yasin PELİT tarafından hazırlanan MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM ESASLI METALİK KÖPÜK ÜRETİLEBİRLİLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet TÜRKER .....

Tez Danışmanı, Metal Eğitimi A.D. Gazi Üniversitesi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet TÜRKER .....

Metal Eğitimi A.D. Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Halil ARIK .....

Metal Eğitimi A.D. Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. İbrahim USLAN .....

Makine Mühendisliği A.D. Gazi Üniversitesi

Tarih:24/02/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU .....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Yasin PELİT

**MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM ESASLI  
METALİK KÖPÜK ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Yasin PELİT**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Şubat 2012**

**ÖZET**

Bu çalışmanın amacı toz metalurjisi (TM) yöntemi ile homojen gözenek yapısına sahip metalik köpük üretim parametrelerinin araştırılmasıdır. Metal matrisli kompozit (MMK) metalik köpük üretiminde matris malzemesi olarak saf alüminyum ve AlSi7 tozu içerisine %0,6 Mg ve köpürtücü madde olarak %0,8-1-1,2 oranında TiH<sub>2</sub> tozu kullanılmıştır. Takviye elamanı olarak da %2, %4, %8 oranlarında SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları kullanılmıştır. Üç boyutlu turbola cihazında 30 dakika süreyle ön karıştırma yapıp tozlar daha sonra Szegvari tipi mekanik alaşımlama (MA) değirmeninde, 350 dev/dak. öğütme hızında 15, 30, 60, 120 dakikalık sürelerde karıştırılmıştır. Mekanik alaşımlama esnasında 10 mm çapında çelik bilye kullanılmış ve toz-bilye oranı 1/10 seçilmiştir. Tozlar 30 mm çapındaki silindirik kalıp içerisinde 450 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan tozlar 550°C'de 2 saat süreyle ön ısıtma işlemi yapıldıktan sonra ekstrüze edilmiştir. Daha sonra 500°C'de 30 dakika ön ısıtma işleminin ardından 5 mm kalınlığında levha haline getirip 690°C ve 710°C'de köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalarda MA süresinin artmasıyla köpük malzemelerin gözenek yapılarında düzensizlik olduğu ve yoğunluklarının arttığı görülmüştür. Yapı içerisindeki TiH<sub>2</sub> miktarı arttıkça köpük malzemenin yoğunluğunun düştüğü ve gözeneklerin yapı içerisinde daha homojen dağıldığı görülmüştür.

**Bilim Kodu** : 710.2.092  
**Anahtar Kelimeler** : Toz Metalurjisi, Metalik Köpük, Metal Matrisli  
Kompozit, Mekanik Alaşımrama.  
**Sayfa Adedi** : 136  
**Tez Yöneticisi** : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

**INVESTIGATION OF PRODUCIBILITY OF ALUMINIUM BASED  
METALLIC FOAM BY MECHANICAL ALLOYING METHOD**

**Master of Science Thesis**

**Yasin PELİT**

**GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
February 2012**

**ABSTRACT**

The aim of this study is to search the production parameters of metallic foam that has homogeneous porous structure. 0,8-1-1,2% TiH<sub>2</sub> powder as a foamer and 0,6% Mg were added into the matrix material of pure aluminium and AlSi7 powder in the production of Metal Matrix Composite (MMC) metallic powder. 2%, 4%, 8% ratios of SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders were used as a reinforcement element. Powders were pre-mixed in three dimensional turbula instrument by 30 minutes and then mixed in Szegvari type Mechanical Alloying (MA) Mill with 350 rev/min milling speed by 15, 30, 60, 120 minutes. Steel balls with a diameter of 10mm were used and 1/10 value is selected as a powder/ball ratio during the mechanical alloying process. Powders were pressed in a die of 30mm. diameter under 450Mpa pressure. Pressed powders were extruded after pre-heating process at 550°C for 2 hours. Later, they became as plate of 5mm thickness after pre-heating process at 500°C by 30 minutes and foaming process was applied at 690°C and 710°C. Experimental studies shown that increasing MA times have increased the densities and disorders were observed in porous structures of powder materials. As the quantity of TiH<sub>2</sub> is increased in the structure, the density of powder material is decreased and porosities are dispersed more homogeneously in the structure.

**Science Code : 710.2.092**

**Key Words : Powder Metallurgy, Metallic Foam, Metal Matrix  
Composite, Mechanical Alloying**

**Pages : 136**

**Adviser : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER**

## TEŞEKKÜR

Tez çalıŐmalarım boyunca bana her tŸrlŸ yardım ve desteği sağlayan, yŸnlendiren danıŐman hocam Prof. Dr. Mehmet TŸRKER'e, Prof. Dr. Yusuf ŖZATALBAŐ'a ve eğitim sŸresince her zaman manevi desteğiyle beni cesaretlendiren değerli hocam Prof. Dr. Adem KURT'a sonsuz ŐŸkranlarımı sunarım.

Deneysel çalıŐmalarım sırasında benden yardımlarını esirgemeyen Ŗęretim GŸrevlisi Hanefi ÇİNİCİ'ye, Ŗęretim GŸrevlisi Ersin BAHÇECİ'ye, Aziz BarıŐ BAŐYİęİT'e Halil KARAKOÇ'a, Ahmet AYATA'ya ve kıymetli dostum İsa ERCAN'a teŐekkŸrŸ bir borç bilirim. SEM çalıŐmalarımnda değerli zamanlarını esirgemedен yardımcı olan Zenzem ALTUNOK ve Elif ARSLAN'a tez yazımı sırasında yardımcı olan kuzenlerim Leyla COŐKUN ve Fadime COŐKUN'a, ayrıca her zaman yanımda olan kardeŐim Veysal PELİT'e ve bŸtŸn aile bireyelerine ayrı ayrı teŐekkŸr ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	IV
ABSTRACT.....	VI
TEŞEKKÜR.....	VIII
İÇİNDEKİLER.....	IX
RESİMLERİN LİSTESİ.....	XIV
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	XVIII
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	XXII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XXIII
1.GİRİŞ.....	1
2. METALİK KÖPÜKLER.....	4
3. METALİK KÖPÜKLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	7
3.1. Ergiyik Metal İçerisine Gaz Enjeksiyon Yöntemi İle Metalik Köpük Üretimi.....	8
3.2. Ergiyik Metal İçerisine Köpürtücü Madde İlavesiyle Köpük Üretimi (ALPORAS yöntemi).....	12
3.3. Formgrip Yöntemiyle Metalik Köpük Üretimi.....	14
3.4. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Köpük Üretimi.....	17
4. METALİK KÖPÜKLERİN KULLANIM VE UYGULAMA ALANLARI.....	23
4.1. Metalik Köpüklerin Yapısal Kullanım Alanları.....	24
4.1.1. Otomotiv endüstrisi.....	24
4.1.2. Hava ve uzay endüstrisi.....	26
4.1.3. İntegral zırh malzemesi olarak metalik köpükler .....	28

**Sayfa**

4.1.4. Hafif yapılar .....	29
4.1.5. Makinelerin dış kısımlarında.....	30
4.1.6. Diğer uygulama alanları.....	31
4.2. Köpük Metallerin Fonksiyonel Uygulamaları.....	31
4.2.1. Isı değiştiriciler.....	31
4.2.2. Ses yalıtımı.....	32
4.2.3. Filtreler.....	33
4.2.4. Metalik köpüklerin fonksiyonel olarak diğer uygulama alanları.....	34
5. MEKANİK ALAŞIMLAMA.....	35
5.1. Tanım Ve Tarihçesi.....	35
5.2. MA Mekanizması.....	35
5.3. MA'nın Avantajları.....	37
5.4. Kullanılan Değirmen Çeşitleri .....	38
5.4.1. Spex tip değirmenler.....	38
5.4.2. Planetary (gezegen hareketli) değirmen.....	39
5.4.3. Szegvari dikey tip değirmenler .....	40
5.4.4. Ticari değirmenler.....	41
5.5. MA İşlem Parametreleri.....	41
5.5.1 Değirmen tipi.....	41
5.5.2 Öğütme kazanı.....	42
5.5.3. Başlangıç toz boyutu.....	42
5.5.4. Öğütücü malzeme.....	42
5.5.5. Bilye-toz oranı.....	42

**Sayfa**

5.5.6. Öğütme atmosferi.....	43
5.5.7 .Öğütme süresi.....	43
5.5.8. Öğütme hızı.....	43
5.5.9. İşlem kontrol kimyasalı.....	44
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	45
6.1. Malzeme ve Yöntemler.....	45
6.1.1. Kullanılan malzemeler.....	45
6.1.2. Tozların karıştırılması.....	46
6.1.3. Karışım tozların MA yapılması.....	47
6.1.4. Tozların preslenmesi.....	47
6.1.5. Preslenmiş tozların sinterlenmesi ve ekstürüzyon yapılması.....	48
6.1.6. Haddeleme ve köpürtme işlemi.....	49
6.2. Karakterizasyon.....	50
6.2.1. Yoğunluk hesabı.....	50
6.2.2. Lineer genişleme.....	51
6.2.3. Gözeneklilik oranı.....	51
6.2.4. Makro ve mikro yapı incelemesi.....	52
7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	53
7.1. MA Süresinin % Lineer Genişlemeye Etkisi.....	53
7.2. MA Süresinin Köpük Yoğunluğuna Etkisi.....	66
7.3. MA Süresinin Gözeneklilik Oranına Etkisi.....	68
7.4. Makro Yapı İncelemesi.....	70

7.4.1. 1. deney grubu (Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%2SiC) köpük makro yapısı.....	70
7.4.2. 2. deney grubu (Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%4SiC) köpük makro yapısı.....	72
7.4.3. 3. deney grubu (Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%8SiC) köpük makro yapısı.....	74
7.4.4. 4. deney grubu (Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2SiC) köpük makro yapısı.....	76
7.4.5. 5. deney grubu (Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%4SiC) köpük makro yapısı.....	78
7.4.6. 6. deney grubu (Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%8SiC) köpük makro yapısı.....	79
7.4.7. 7. deney grubu (Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) köpük makro yapısı.....	81
7.4.8. 8. deney grubu (Al- %0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) köpük makro yapısı.....	83
7.4.9. 9. deney grubu (Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) köpük makro yapısı.....	84
7.4.10. 10. deney grubu (Al-%1TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) köpük makro yapısı.....	86
7.4.11. 11. deney grubu (Al-%1,2TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) köpük makro yapısı.....	87
7.5. Mikro Yapı İncelemesi.....	90
7.5.1. 7. deney grubu (Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) köpük malzemelerin SEM incelemeleri.....	90
7.5.2. 10. deney grubu (Al-%1TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) köpük malzemelerin SEM incelemeleri.....	100
7.5.3. 11. deney grubu (Al-%1,2TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) köpük malzemelerin SEM incelemeleri.....	108

8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	117
KAYNAKLAR.....	118
EKLER.....	122
ÖZGEÇMİŞ.....	135

## RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. a) Açık gözenekli yapıya sahip köpük malzemenin SEM görüntüsü, b) Kapalı gözenek yapısına sahip köpük malzemenin kesit görüntüsü .....	4
Resim 2.2. Farklı tip hücreli metaller a) Alüminyum köpük, b) Bakır lotus yapı, c) Al sünger, d) Açık hücreli nikel yapı, e) Sinterlenmiş bronz tozu, f) T/M yöntemi ile yönlendirilmiş hücreli malzeme.....	6
Resim 3.1. Gaz enjeksiyon yöntemiyle üretilmiş Al köpük malzemeler.....	11
Resim 3.2. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesiyle elde edilen köpük.....	14
Resim 3.3. Farklı koşullarda hazırlanan alüminyum alaşımlı Formgrip köpüklerin enine kesitleri. Gözeneklilik G, hücre boyutu B' dir a) G=%69, B= 1,1 mm b) G = %79, B = 1,9 mm c) G = %88, B= 3,1 mm.....	16
Resim 3.4. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Al esaslı metalik köpük.....	19
Resim 3.5. Köpük evrimi analiz görüntüsü.....	19
Resim 4.1. a) Sandviç köpük panelden (AFS) yapılmış Ariane5 roket konisi b) Alüminyum sandviç yapının detay görünümü .....	27
Resim 4.2. a) Patlama öncesi, b) Patlama anı, c)Alüminyum köpük tabakası kullanarak hafif ayrılmaz kompozit zırh kesit görünümü.....	29
Resim 4.3. a) Alüminyum sandviç köpük (ASF) yapı, b) ASF yapının iç içe geçmiş vinç.....	30
Resim 4.4. Dış çerçevesi metalik köpük takviyeli freze tezgahın görünümü .....	31
Resim 4.5. Köpük metal ısı değiştirici olarak kullanım şekli.....	32
Resim 4.6. Metalik köpüklerin ses yalıtımı olarak viyadükte kullanımı .....	33
Resim 4.7. Farklı gözenek boyutuna sahip alüminyum köpük.....	33
Resim 4.8. a) Köpürtme öncesi saplama kaynağı , b) Köpürtme sonrası genel görüntüleri, c) Birleştirme arayüzey kesit görüntüleri.....	34

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 5.1. Spex tip değirmen.....	38
Resim 5.2. Szegvari dikey tip değirmen.....	40
Resim 6.1. Üç boyutlu karıştırma yapabilen turbula cihazı.....	46
Resim 6.2. Szegvari dikey tip atritör.....	47
Resim 6.3. 220 ton kapasiteli pres .....	48
Resim 6.4. Özel olarak metalik köpük üretimi için tasarlanmış protherm marka fırın.....	49
Resim 6.5. Sartorius cp 2243 marka yoğunluk ölçme cihazı.....	50
Resim 7.1. Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%2SiC toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA .....	71
Resim 7.2. Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%8SiC toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak.. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA .....	73
Resim 7.3. Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%8SiC toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. M c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA .....	75
Resim 7.4. Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2SiC toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA.....	77
Resim 7.5. Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%4SiC toz karışımından elde edilen Köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA.....	79
Resim 7.6. Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%8SiC toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA.....	80
Resim 7.7. Al-%0,8TiH <sub>2</sub> .%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA.....	82

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 7.8. Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA.....	84
Resim 7.9. Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA d) 120 dak. MA.....	85
Resim 7.10. Al-%1TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA.....	87
Resim 7.11. Al-%1,2TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA.....	89
Resim 7.12. 15 dak. MA yapılmış Al-%0,6Mg-%0,8TiH <sub>2</sub> -%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüsü.....	91
Resim 7.13. 30 dak. MA yapılmış Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüsü.....	93
Resim 7.14. 60 dak. MA yapılmış Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri.....	95
Resim 7.15. 120 dak. MA yapılmış Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri.....	98
Resim 7.16. 15 dak. MA yapılmış Al-%1TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri.....	100
Resim 7.17. 30 dak. MA yapılmış Al-%1TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri.....	102
Resim 7.18. 60 dak. MA yapılmış Al-%1TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri.....	104
Resim 7.19. 120 dak. MA yapılmış Al-%1TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri.....	106
Resim 7.20. 15 dak. MA yapılmış Al-%1,2TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri.....	109

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 7.21. 30 dak. MA yapılmış Al-%1,2TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri.....	111
Resim 7.22. 60 dak. MA yapılmış Al-%1,2TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri.....	113
Resim 7.23. 120 dak. MA yapılmış Al-%1,2TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri.....	115

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Metalik köpüklere ait üretim şekilleri ve hücre boyutu.....	7
Şekil 3.2. Metalik köpük üretiminin gruplandırılması.....	8
Şekil 3.3. Tercih edilebilir oran ve boyuttaki parçacıklar.....	9
Şekil 3.4. Sıvı metal içerisine gaz enjekte ederek köpük oluşumu.....	10
Şekil 3.5. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesiyle köpük üretiminin (ALPORAS yöntemi) şematik gösterimi.....	12
Şekil 3.6. İlave edilen kalsiyum (Ca) miktarına bağlı olarak karıştırma süresinin viskoziteye etkisi.....	13
Şekil 3.7. FORMGRIP yöntemi ile son şekle yakın metal köpük parçaların üretim aşamaları.....	15
Şekil 3.8. Toz metalurjisi yöntemi ile köpük üretimi.....	18
Şekil 3.9. TM yönteminde boşlukların oluşma ve büyüme evreleri.....	19
Şekil 3.10. Toz metalurjisi yöntemiyle metalik köpük üretim süreci.....	20
Şekil 3.11. Alüminyum içerisindeki $TiH_2$ 'nin zamana bağlı genişleme davranışı....	21
Şekil 4.1. Metalik köpüklerin kullanım alanları.....	23
Şekil 4.2. Otomotiv alanında yapısal uygulamalar.....	24
Şekil 4.3. Enerji absorbe etmek için kullanılan alüminyum köpük malzemesi a) ön yüzeyde, b) yan çarpmalara karşı .....	25
Şekil 4.4. Audi A8 üzerinde kullanılan yapısal köpük malzemeler.....	26
Şekil 4.5. Metalik köpüklerin savunma alanında sağlamış olduğu avantajlar .....	28
Şekil 5.1. Mekanik alaşımlama mekanizması.....	35
Şekil 5.2. MA esnasında tozlarda zamana bağlı olarak boyut değişimi.....	36
Şekil 5.3. MA ile üretilebilen malzeme çeşitleri.....	37

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.4. Planetary (gezegen hareketli) değirmenin hareket şekli.....	39
Şekil 7.1. Deney sırası guruplarına ait lineer genişleme oranları.....	55
Şekil 7.2. Al-%0,8 TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%2SiC tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme.....	56
Şekil 7.3. Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%4SiC tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme.....	57
Şekil 7.4. Al-%0,8-TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%8SiC tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme.....	58
Şekil 7.5. Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2SiC tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme.....	59
Şekil 7.6. Al-%0,8 TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%4SiC tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme.....	60
Şekil 7.7. Al-%0,8 TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%8SiC tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme.....	61
Şekil 7.8. Al-%0,8 TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg- %7Si- %2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme.....	62
Şekil 7.9. Al-%0,8 TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme.....	63
Şekil 7.10. Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme.....	64
Şekil 7.11. Al-%1TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme.....	65
Şekil 7.12. Al-%1,2TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme.....	65
Şekil 7.13. Deney sırası guruplarına ait yoğunluklar.....	67
Şekil 7.14. Deney sırası guruplarına ait % gözeneklilik oranı.....	69
Şekil 7.15. 7. deneyde 15 dak. MA yapılmış köpük malzeme EDX analizi değeri....	92

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 7.16. 7. deneyde 30 dak. MA yapılmış köpük malzeme EDX analizi değeri....	96
Şekil 7.17. 7. deneyde 30 dak. MA yapılmış köpük malzeme EDX analizi değeri....	96
Şekil 7.18. 7. deneyde 60 dak.MA yapılmış köpük malzeme 1. nokta EDX analizi değeri.....	96
Şekil 7.19. 7. deneyde 60 dak MA yapılmış köpük malzeme 2. nokta EDX analizi değeri.....	96
Şekil 7.20. 7. deneyde 60 dak.MA yapılmış köpük malzeme 3. nokta EDX analizi değeri.....	97
Şekil 7.21. 7. deneyde 120 dak. MA yapılmış köpük malzeme 3. nokta EDX analizi değeri.....	99
Şekil 7.22. 7. deneyde 120 dak. MA yapılmış köpük malzeme 4. nokta EDX analizi değeri.....	99
Şekil 7.23. 10. deneyde 15 dak. MA yapılmış köpük malzeme 2. nokta EDX analizi değeri.....	101
Şekil 7.24. 10. deneyde 30 dak. MA yapılmış köpük malzeme 1. nokta EDX analizi değeri.....	103
Şekil 7.25. 10. deneyde 60 dak. MA yapılmış köpük malzeme 3. nokta EDX analizi değeri.....	105
Şekil 7.26. 10. deneyde 120 dak. MA yapılmış köpük malzeme 1. nokta EDX analizi değeri.....	107
Şekil 7.27. 10. deneyde 120 dak. MA yapılmış köpük malzeme 3. nokta EDX analizi değeri.....	107
Şekil 7.28. 11. deneyde 15 dak. MA yapılmış köpük malzeme 2. bölgenin EDX analizi değeri.....	110
Şekil 7.29. 11. deneyde 15 dak. MA yapılmış köpük malzeme 5. bölgenin EDX analizi değeri.....	110
Şekil 7.30. 11. deneyde 30 dak. MA yapılmış köpük malzeme 3. nokta EDX analizi değeri.....	112
Şekil 7.31. 11. deneyde 30 dak. MA yapılmış köpük malzeme 4. nokta EDX analizi değeri.....	112

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 7.32. 11. deneyde 60 dak. MA yapılmış köpük malzeme 2. nokta EDX analizi değeri.....	114
Şekil 7.33. 11. deneyde 60 dak. MA yapılmış köpük malzeme 4. nokta EDX analizi değeri.....	114
Şekil 7.34. 11. deneyde 120 dak. MA yapılmış köpük malzeme 2. nokta EDX analizi değeri.....	116
Şekil 7.35. 11. deneyde 120 dak. MA yapılmış köpük malzeme 3. nokta EDX analizi değeri.....	116

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Gaz enjeksiyon yöntemiyle üretilmiş köpüklerin avantaj ve dezavantajları.....	11
Çizelge 3.2. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesiyle köpük üretiminin (ALPORAS yöntemi) avantaj ve dezavantajları.....	14
Çizelge 3.3. Formgrip yönteminin avantaj ve dezavantajları.....	17
Çizelge 3.4. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen köpük malzemenin avantaj ve dezavantajları.....	22
Çizelge 6.1. MA işleme tabi tutulacak tozların genel özellikleri .....	45
Çizelge 6.2. Köpük üretimi için belirlenen toz karışım oranları.....	46
Çizelge 6.3. Deneysel çalışmalar.....	49
Çizelge 7.1. MA yapılmış tozlar ve üretilen köpüklere ait lineer genişleme tablosu.	54
Çizelge 7.2. MA yapılmış tozlar ve üretilen köpüklere ait yoğunluklar .....	67
Çizelge 7.3. MA yapılmış tozlar ve üretilen köpüklere ait % gözeneklilik oranı.....	69

**SİMGELER VE KISALTMALAR**

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\rho^*$	Köpük yoğunluğu, g/cm <sup>3</sup>
$m^*$	Köpüğün havadaki ağırlığı, g
$m_s$	Köpüğün su içerisindeki ağırlığı, g
$V^*$	Köpüğün hacmi, cm <sup>3</sup>
$V$	Köpürtme öncesi hacmi, cm <sup>3</sup>
<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
MA	Mekanik alaşımlama
ODS	Oksit dayanımla güçlendirilmiş
TM	Toz metalurjisi
MMC	Metal matrisli kompozit
IFAM	Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü

## 1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişimi ile beraber ihtiyaç duyulan malzeme çeşitliliği de artmaktadır. İnsan ihtiyaçlarını karşılayacak malzemeleri üretmek için araştırmacılar sürekli bir arayış içerisinde. Özellikle metalurji ve malzeme yanı sıra tüm mühendislik dallarının da ihtiyaçlarına cevap verecek ve daha ekonomik yeni malzeme geliştirme çalışmaları günümüzde önem kazanmıştır [1].

Son yıllarda düşük yoğunluklu ve mekanik özellikleri iyi olan malzemelere ihtiyacın artması, araştırmacıları bu özellikleri taşıyan malzemeleri geliştirmeye yönlendirmektedir. Gözenekli malzemeler ise bu konu içerisinde önemli bir yere sahiptir [2]. Metalik köpüklerin veya diğer yüksek gözenekliliğe sahip hücreli malzemelerin enerji sönümlenme kapasitesinin yüksek olması, yüksek rijitlik, düşük yoğunluk, ısı izolasyonu, titreşim azaltma, kimyasal süzme gibi fiziksel ve mekanik özelliklerin birleşimine sahip oldukları bilinmektedir. Metalik köpükler bu özelliklerinden dolayı özellikle hafifliğin ve mukavemetin birlikte olması istenen otomotiv, demir yolu taşımacılığı, gemi yapımı, ağırlıkça hafif konstrüksiyonlar, uçak ve uzay sanayi gibi alanlar alüminyum başta olmak üzere diğer metalik köpüklerin kullanıldığı uygulama alanlarından bazılarıdır [3].

Metalik köpük üretiminde alüminyum, çinko, demir, bakır, nikel, magnezyum ve titanyum gibi metaller ve alaşımları kullanılabilir [4]. Özellikle alüminyum esaslı metalik köpükler, çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen malzemeler olarak oldukça ilgi çekmektedir [5].

Alüminyum esaslı metalik köpük üretmek için 1940'lı yıllardan başlayan pek çok yöntem geliştirilmiş olup, günümüzde birçok şirket ticari olarak alüminyum köpük metal üretmektedir.

Metal köpük teriminin ilk olarak kaydedildiği yıllar 1940'ların başına dayanmaktadır. 1950'lerde ilk açık hücreli metalik köpükler üretilmiştir [6]. Ergiyik

alüminyum sıkıştırılmış kaya tuzu tanecikleri içine dökülmüş, sonra tuzlar çözünerek yapıdan ayrılmış ve açık gözenekler oluşmuştur.

1959'da tamamen farklı bir yöntem keşfedilmiştir. United Aircraft Corporation tarafından patentlenen yöntemde, toz haldeki metal yine toz halde bulunan köpürtücü madde ile karıştırılmıştır. Bu toz karışımı, soğuk olarak sıkıştırılmış ve ekstüre edilmiştir. Elde edilen preform, metalin ergime sıcaklığına ısıtılarak ve köpürtücü madde ayrılarak çözündürülmüştür. Kapalı sistemde ayrılan gazın basıncından yararlanılarak köpük yapı oluşturulmuştur. Metal hidrürler (özellikle titanyum hidrür-TiH<sub>2</sub>) bu yöntemde gaz yapıcı madde olarak kullanılmaktadır.

1960'ların ortalarında Hardy ve Peisker'in patentledikleri yöntemde köpürtücü maddeyi direkt olarak yarı ergiyik haldeki metale eklemiştir. Bu yöntem toz esaslı üretime göre daha ucuz bir maliyete sahiptir. Yeni bir gelişme olarak, viskoziteyi artırmak ve yapıdaki dağılan gazı yakalamak için ergiyik alüminyuma silisli bir malzeme (vermikülit) ilave edilerek köpürtme işlemi gerçekleştirilmiştir [7].

Farklı özelliklere sahip malzemelerin iyi özelliklerini bir araya getirerek üstün özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilir. Üretimdeki bu çeşitlilik üretim yöntemlerine de yansımaktadır. Mekanik alaşımlama (MA) yöntemi ile metalik köpük üretimi bu konuya örnek olarak verilebilir [8]. MA ile metalik köpük üretiminde temel amaç homojen gözenek morfolojisine sahip köpük yapı elde etmektir. Metalik köpükler homojenleştirildikçe mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu bilinmektedir.

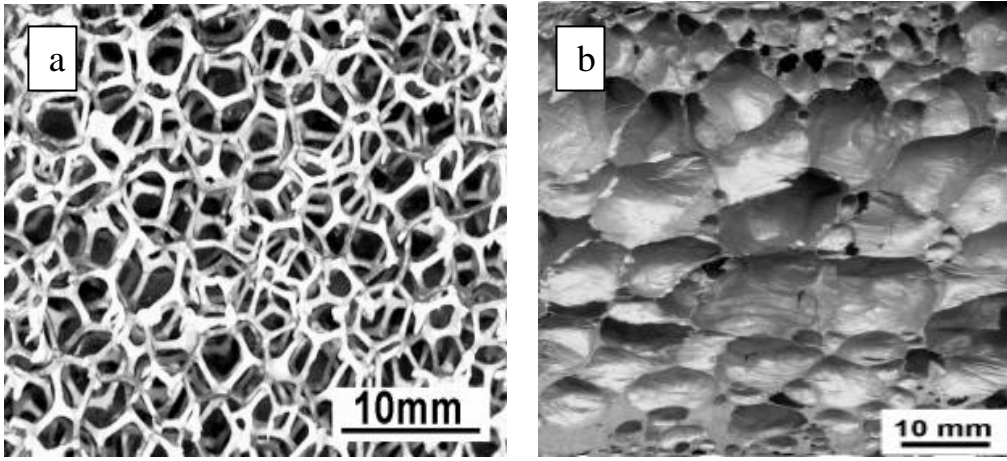
Bu çalışmada kullanılan mekanik alaşımlama 1966 yılında Inco Paul D. Merica araştırma şirketi tarafından ileri teknoloji alanında özellikle uzay sanayinin malzeme ihtiyacını karşılamak amacıyla geliştirilmiş, yeni üretim tekniklerinden biridir. MA yöntemiyle çeşitli oksit dağılımı ile güçlendirilmiş (ODS) alaşımlar, amorf malzemeler ve intermetalik bileşiklerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Mekanik alaşımlama farklı değirmen (yatay, titreşimli, atritör vb.) ve farklı bilyeler (seramik, metal vb.) kullanılarak gerçekleştirilen yüksek enerjili bir kuru veya yaş öğütme tekniği olarak adlandırılır. İşlem sırasında toz-

bilye-cidar çarpışmalarıyla, sürekli olarak oluşan kırılma ve soğuk kaynak sonucu yeni karışımlar ve bunların birleşmesinden çeşitli kompozit toz yapıları meydana gelmektedir. Çarpışmalar ve buna bağlı olarak oluşan katı hal difüzyonu ile alaşımlama gerçekleşmektedir [9].

İyi kalitede köpük metal üretebilmek yüksek maliyet gerektirdiğinden ticari köpük metaller hala sınırlıdır. Dünyada çeşitli üniversitelerde daha düşük maliyette ve yüksek kalitede köpük metal üretebilme çalışmaları devam etmektedir [7]. Bu çalışmada MA yöntemiyle alüminyum esaslı metalik köpük üretimi gerçekleştirilip takviye elemanı oranı MA süresi gibi parametrelerin köpük malzemenin köpürebilme, gözenek yapısı ve dağılımına etkisi incelenmiştir.

## 2. METALİK KÖPÜKLER

Metalik köpükler açık ve kapalı gözenek yapısına sahip olup içerisinde %80 ile %90 oranında gözenek içeren, gaz ve katı halde bulunan maddelerin bileşimidir. Resim 2.1'de açık ve kapalı gözenekli yapıya sahip metalik köpük malzemelerin şekli görülmektedir. Kapalı gözenekli köpüklerde boşluklar gözenek duvarı ile tamamen kapatılmış olup malzeme içerisinde homojen dağılımlı baloncuklar şeklinde yer alır. Açık gözenekli köpüklerde ise gözenekler birbirleri ile bağlantılıdır [6,10].



Resim 2.1. a) Açık gözenekli yapıya sahip köpük malzemenin SEM görüntüsü,  
b) Kapalı gözenek yapısına sahip köpük malzemenin kesit görüntüsü [10]

Metalik köpükler; odun, mercan ve sünger gibi hücreli yapıların bir türüdür. Doğal bir ürün değildir. “köpük” terimi tam anlamı ifade etmemektedir. Köpükten daha ziyade sünger şeklinde açık gözenekli yapı meydana gelir. Bu yüzden genellikle “metalik köpük” şeklinde ifade edilir [11].

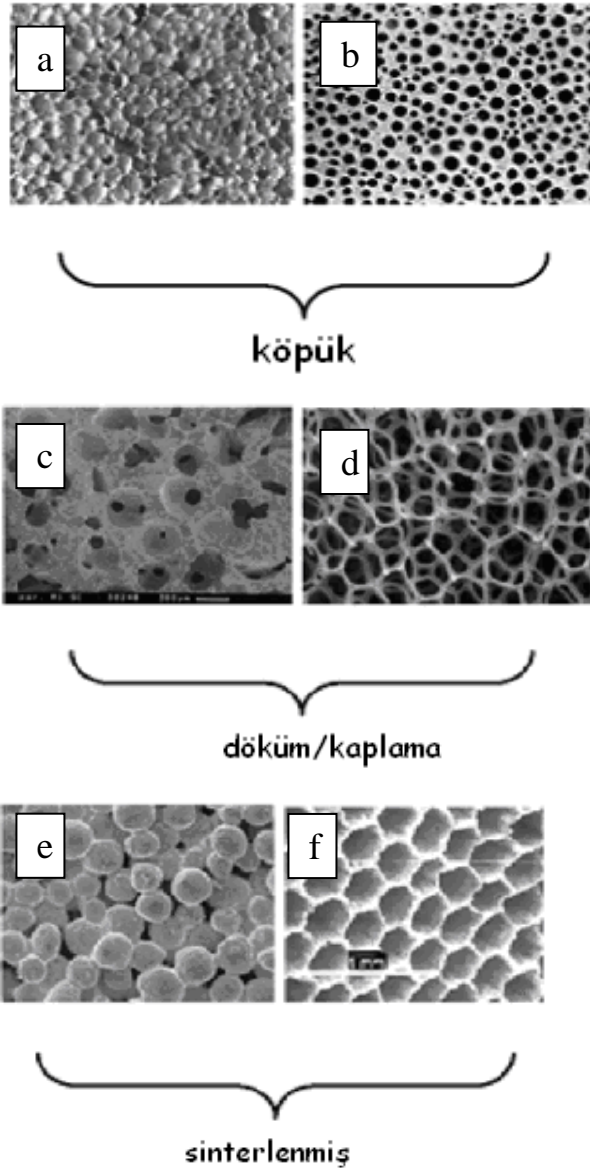
Yüksek gözenekliliğe sahip metalik köpüklerin genel karakteristik özellikleri hücre morfolojisi (açık veya kapalı hücre geometrisi), hücre topolojisi, bağıl yoğunluk, hücre boyutu, hücre şekli, hücre duvarının özelliklerine bağlıdır [12]. Bu özellikler malzemenin fiziksel, mekanik, ısı ve ses yalıtımı özelliklerini doğrudan ilgilendirmektedir.

Metalik köpüklerle ilgili çalışma sadece bilimsel değil aynı zamanda endüstriyel uygulamalarda da faydalı olmuştur. Son zamanlarda düşük yoğunluklu malzemelerin araştırılmasına büyük talep olmuştur. Gözenekli malzemelerin kullanılmasıyla, bazı mühendislik uygulamalarındaki problemler giderilmiştir. Özellikle düşük ağırlık, yüksek mukavemet ve can güvenliğinin önem arz ettiği otomotiv, demiryolu uygulamaları, uzay endüstrisi gibi alanlarda metalik köpüklerin kullanımı özellikle alüminyum köpükle olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır [13].

“Metalik köpük” terimi özellikle son yıllarda oldukça fazla olarak duyulmaya başlanmıştır. Metalik köpüklerin yanı sıra hücreli metal, gözenekli metal, katı köpük metaller, metal süngerler terimleri köpük tanımlamalarında sıkça kullanılmaktadır. Bu terimlerin arasındaki temel farklılık gözenek morfolojisinden kaynaklanmaktadır. Tam anlamıyla metalik köpüklerin ne olduğunu anlayabilmemiz ve ayırt edebilmemiz için bu terimleri tanımlamamız gerekir [6,7].

- *Hücreli Metaller:* En genel kullanılan terimdir. Çeşitli gazların metalik gövde içerisinde dağılarak boşluk oluşturduğu yapıyı kapsamaktadır. Metalik faz, gaz fazı içeren kapalı hücrelerden oluşur.
- *Gözenekli Metaller:* Metal yapı çok sayıda gözenek tarafından oluşmuştur. Gözenekler genellikle küreseldir ve birbirlerinden yalıtılmış halde bulunur.
- *Köpük Metaller (Katı):* Hücreli metallerin özel bir sınıfıdır. Hücreler kapalı, küresel veya çok yüzlü (polihedral) ve her biri birbirinden ince bir filmle ayrılmıştır.
- *Metalik Süngerler:* Hücreli metallerin yapı bilimidir. Genellikle birbirine bağlı gözenekten oluşur.

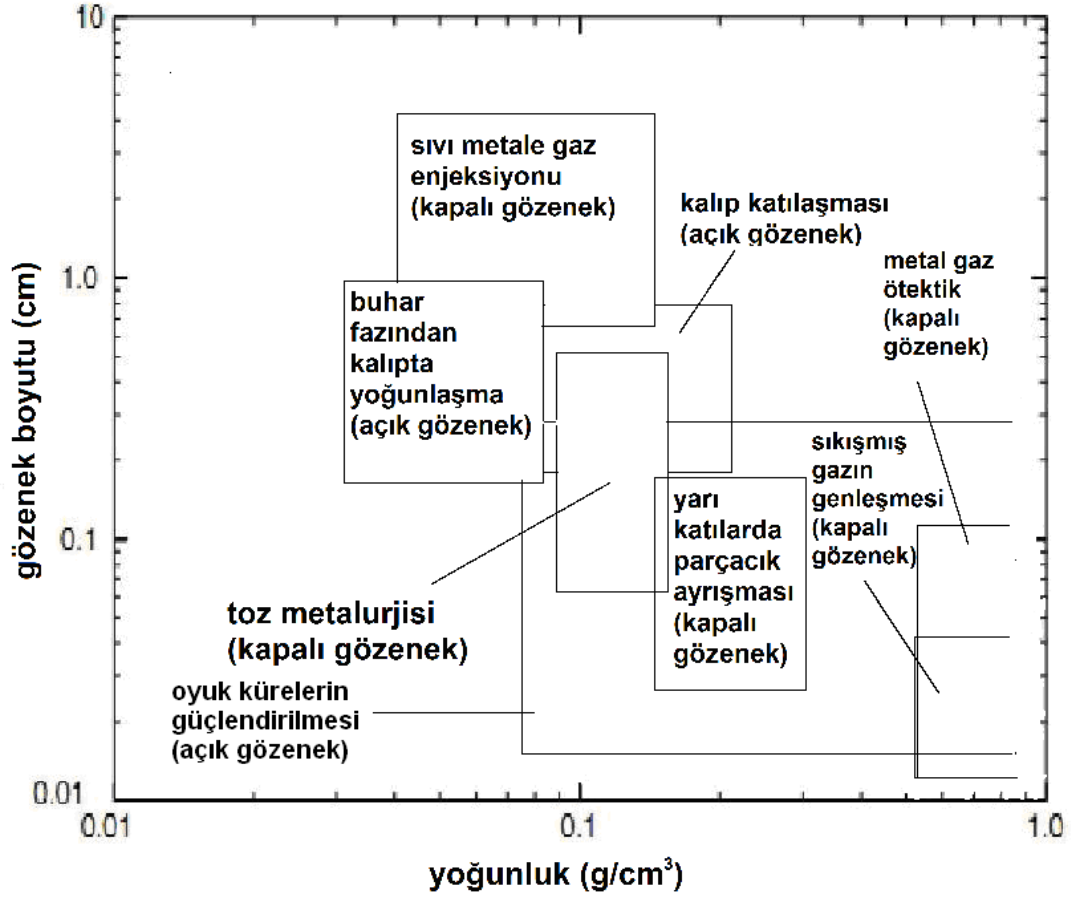
Bu terimler birbirinden bağımsız değildir. Örneğin; köpük metal, gözenekli ve hücreli bir yapıya sahip olmakla beraber sünger metal hücrelere sahip olmak zorunda değildir. Bazen malzemeleri ayırt etmek o kadar kolay değildir. Resim 2.2’de çeşitli gözenekli metal yapıları görülmektedir [14].



Resim 2.2. Farklı tip hücreli metallere a) Alüminyum köpük, b) Bakır lotus yapısı, c) Al sünger, d) Açık hücreli nikel yapısı, e) Sinterlenmiş bronz tozu, f) T/M yöntemi ile yönlendirilmiş hücreli malzeme [15]

### 3. METALİK KÖPÜKLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Köpük malzeme üretimi için birçok malzemedен ve üretim yöntemlerinden bahsedilebilir. Şekil 3.1’de metalik köpüklere ait hücre morfolojisi, hücre boyutu ve üretim şekillerini veren bir şekil görülmektedir.

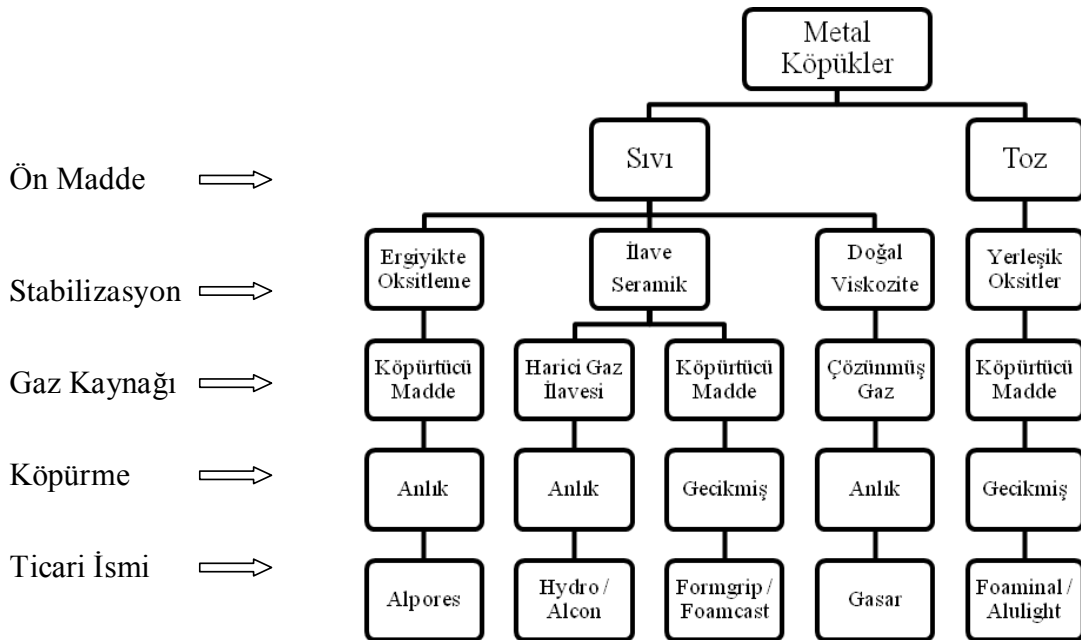


Şekil 3.1. Metalik köpüklere ait üretim şekilleri ve hücre boyutu [16]

Bu kısımda ağırlıklı olarak kapalı gözenek morfolojisine sahip alüminyum metal köpüklerin üretim yöntemlerinden bahsedilecektir. Bu yöntemler;

- Ergiyik metal içerisinde gaz enjeksiyon yöntemi
- Ergiyik metal içerisinde köpürtücü madde ilavesi
- Formgrip yöntemi
- Toz metalurjisi yöntemi

olmak üzere dört başlıkta işlenecektir. Şekil 3.2’de bu yöntemlerle metalik köpük üretim aşamaları genel bir yaklaşımla ayrıca verilmiştir.

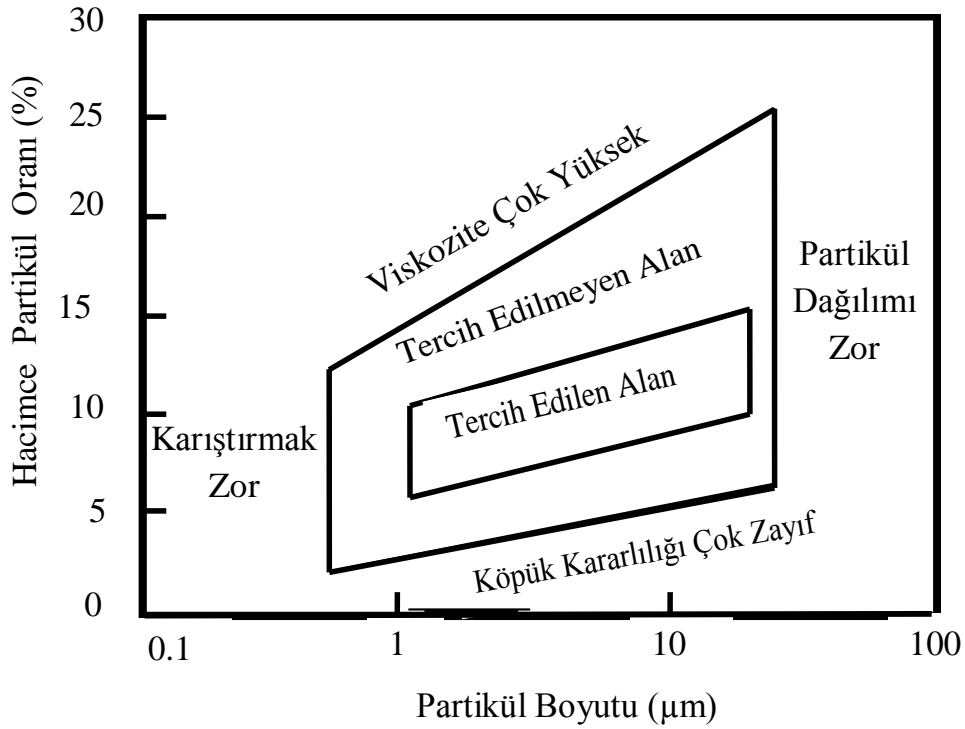


Şekil 3.2. Metalik köpük üretiminin gruplandırılması [17]

### 3.1. Ergiyik Metal İçerisine Gaz Enjeksiyon Yöntemi İle Metalik Köpük Üretimi

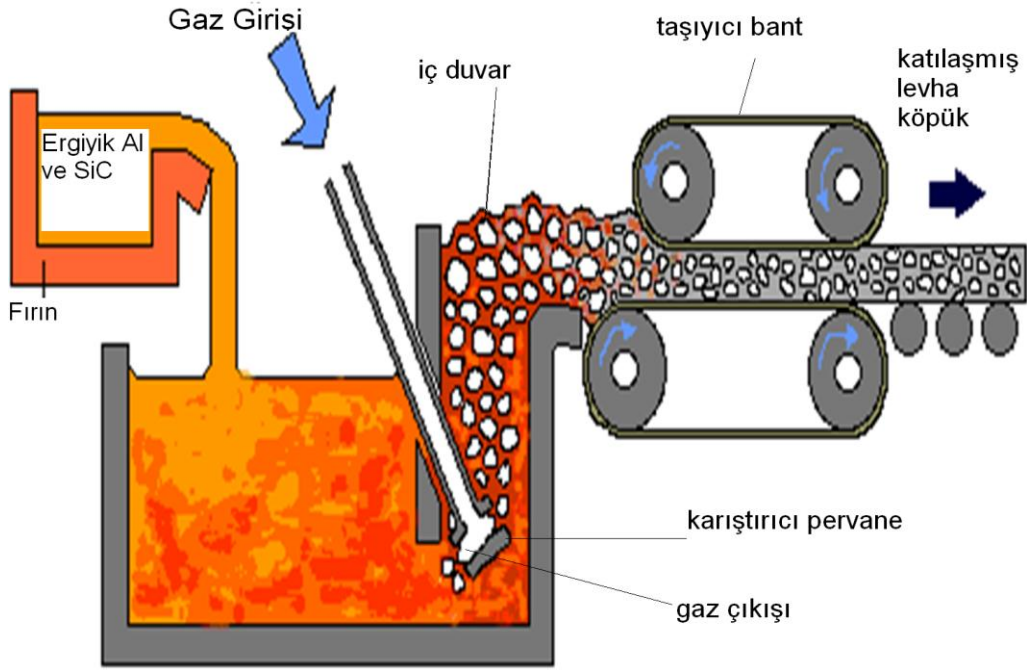
Metalik köpük üretimi için çeşitli teknikler kullanılabilir. Gaz enjeksiyon yöntemiyle 1 m genişliğinde 0,2 m kalınlığında ve 5-20 mm çaplarda kapalı gözenekler üretilebilir. Bu yöntem kullanılarak NORSK-HYORO ve CYMAT firmaları Al alaşımlı köpük üretmişlerdir. Şimdilik Al köpüklerin üretimiyle sınırlı olan bu yöntem, ekonomik bir uygulama yöntemi olup, 0,069-0,54 g/cm<sup>3</sup>'lük yoğunluğa sahiptir Al köpük malzeme üretilebilir [14,16].

Saf sıvı metal içine gaz göndermekle kolayca köpük malzeme meydana gelmez. Baloncuklar genellikle sıvı duvarları drenaj etkisiyle aşağı doğru çok hızlı bir şekilde çeker. Drenaj ergimiş metal köpüklerin zamansal kararsızlığında itici güçlerden biridir. Bu durumun olumsuzluklarını gidermek için matris malzeme sıvı haldeyken yeterince uzun süre kararlı durumda kalan köpük yapıya ihtiyaç vardır. Kararlı köpük üretmek için sıvı metalin viskozitesini yükseltmek gerekir, bu durum ancak sıvı metal içerisine %10-30 arasında  $Al_2O_3$ , SiC vb. parçacıklar katılarak sağlanır. Şekil 3.3'te partikül boyutu ve oranı arasındaki ilişki görülmektedir [16,18].



Şekil 3.3. Tercih edilebilir oran ve boyuttaki parçacıklar [14]

Sıvı metal içerisine gaz göndererek köpük üretirken köpük malzemeye etki eden bazı parametreler vardır. Bu sürece göre, ergiyik metalin viskozitesini artırmak için kullanılan silisyum karbür, alüminyum oksit, magnezyum oksit gibi partikülleri sıvı metal içerisine katılması şematik olarak Şekil 3.4'te gösterilmiştir [14,16,18].



Şekil 3.4. Sıvı metal içerisinde gaz enjekte ederek köpük oluşumu [14]

Bu maddelerin ihtivası ile metal matrisli kompozit (MMC) malzeme üretilip ilk adım atılmış olur. Bu adımla birlikte sıvı metalin karıştırılmasıyla partiküller sıvı içerisinde homojen dağılım sergilemiş olur [14].

Ergiyik metalden köpük oluşumu için, sıvı metal içerisinde hava, azot, argon gazları gönderilir. Gözenekler özel çaplarda ve yapı içerisinde homojen dağılımı için titreşimli ya da döner nozullar kullanılır. Oluşan köpük konveyör kemer yardımıyla yüzeyi hafifçe haddelenir ve soğutulur. Bu yöntemle üretilmiş köpük malzeme Resim 3.1’de görülmektedir [15].



Resim 3.1. Gaz enjeksiyon yöntemiyle üretilmiş Al köpük malzemeler [19]

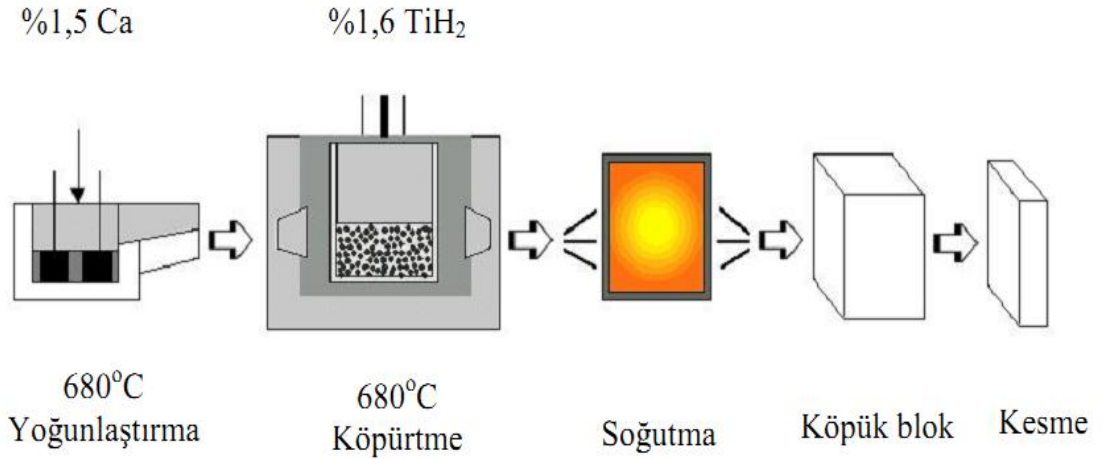
Çizelge 3.1. Gaz enjeksiyon yöntemiyle üretilmiş köpüklerin avantaj ve dezavantajları [7]

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sürekli üretim için çok uygun bir üretim yöntemidir ve büyük miktarda üretim yapılabilir.</li> <li>• Ucuz ve nispeten basit bir işlemdir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gaz dağılımını kontrol etmek zordur ve gözenekler her zaman büyüktür. Gözenek boyutu üzerinde kontrol zordur ve tesadüfi çok büyük gözenekler mukavemeti kötü etkiler.</li> <li>• Sadece levha dökümüne uygundur ve yüzey kesimi düzensizdir.</li> <li>• Önceden seramik parçaların karıştırılması gerekir. Bu bütün alaşımlar için uygun değildir (bazı alaşımlar yeterince viskoz değildir)</li> </ul>

### 3.2. Ergiyik Metal İçerisine Köpürtücü Madde İlavesiyle Köpük Üretimi (ALPORAS Yöntemi)

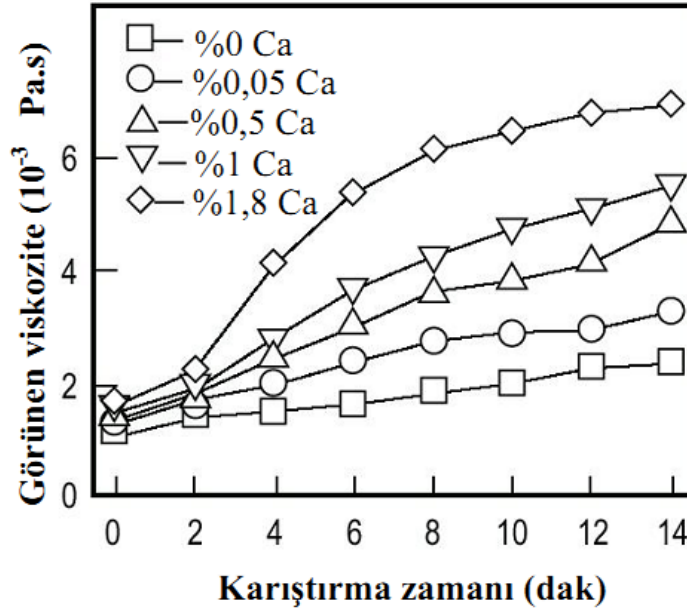
Diğer bir yöntem ise sıvı metal içerisine gaz oluşturabilecek partiküllerin ilavesi ile köpük üretimidir. Shinko wire company, Amogosokive Japonya firmaları 1986 yılından beri bu yöntemle günde 1000 kg köpük ürettiği bilinmektedir [14].

Ergiyik içerisine gaz enjekte etmek yerine direkt olarak  $TiH_2$ ,  $ZrH_2$  ve  $CaCO_3$  gibi köpürtücü madde ilave edilerek köpürtme gerçekleştirilir [20]. Ticari adı "ALPORAS" olarak bilinen yöntemin uygulaması Şekil 3.5'te görülmektedir.



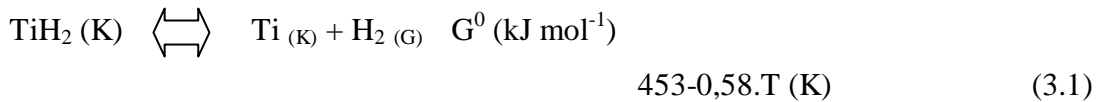
Şekil 3.5. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesiyle köpük üretiminin (ALPORAS yöntemi) şematik gösterimi [14]

Bu yöntemin birinci adımında 680°C' deki sıvı Al içerisine yaklaşık %1,5 Ca eklenerek karıştırılmaktadır. Karıştırma esnasında  $CaO$ ,  $CaAl_2O_4$ , veya  $Al_4Ca$  intermetalik bileşikleri oluşur ve sıvı metalin viskozitesini artırır. Şekil 3.6'da çeşitli oranlarda eklenen Ca'un sıvı metali karıştırma süresine bağlı olarak viskozite üzerindeki etkisi görülmektedir [14].



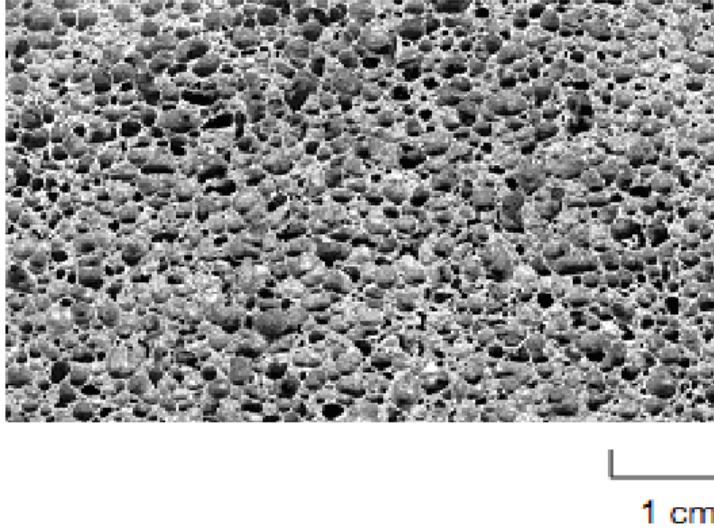
Şekil 3.6. İlave edilen kalsiyum (Ca) miktarına bağlı olarak karıştırma süresinin viskoziteye etkisi [21]

Viskozite istenen değere ulaşıldıktan sonra sıvı metal içerisine genelde %1,6 TiH<sub>2</sub> partikülleri ilave edilir ve hidrojen gazı;



tepkimesi uyarınca açığa çıkar [7].

Sıvı metal hidrojen gazının etkisiyle yavaşça genişlemeye başlar ve kabı doldurur. Sıvı metal kabın şeklini aldıktan sonra yavaşça soğutulur. Resim 3.2’de sürecin parametrelerine uygun homojen bir köpük malzeme görülmektedir. Bu yöntemle üretilen köpük malzemelerin yoğunluğu 0,18 ile 0,24 g/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir [14].



Resim 3.2. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesiyle elde edilen köpük [14]

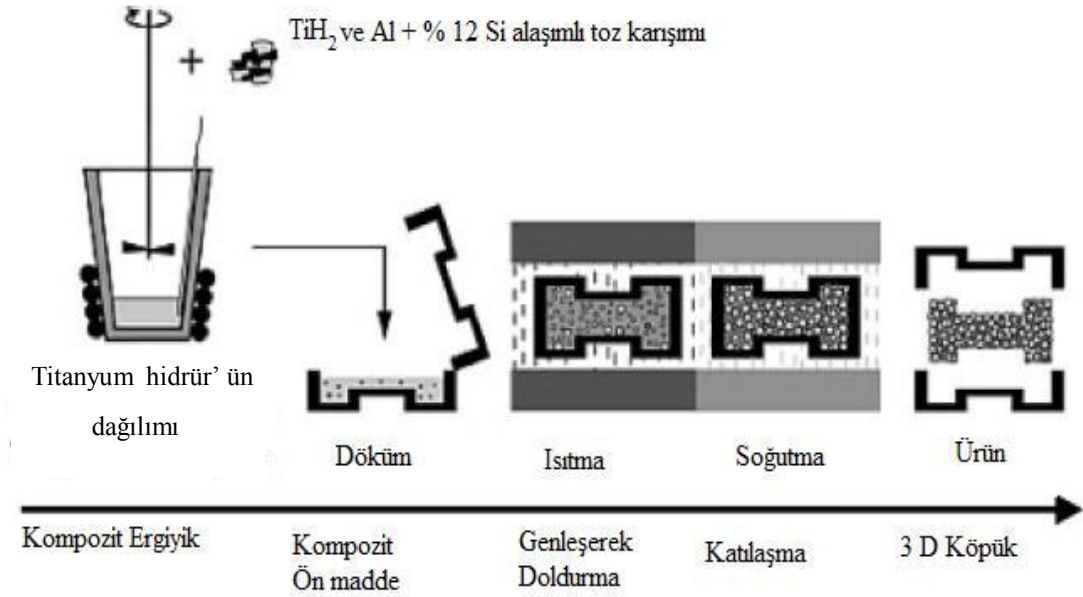
Çizelge 3.2. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesiyle köpük üretiminin (ALPORAS yöntemi) avantaj ve dezavantajları [7]

<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oldukça homojen hücre boyutu. Ergiyik metal içerisine gaz enjeksiyon yönteminden daha homojen köpük yapısı.</li> <li>• Küçük hücreler.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Katkı malzemelerinden dolayı pahalı bir yöntem.</li> <li>• İstenilen son şekilde parça üretilmemesi.</li> </ul>

### 3.3. Formgrip Yöntemiyle Metalik Köpük Üretimi

Formgrip (Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors) yöntemi sıvı ve toz metalurjisi üretim yöntemlerinin bazı olumlu yanlarının birleştirilmesi ile ortaya çıkmıştır. Bu yöntemde toz metalurjisine çok benzer bir yöntemdir. Köpürtücü madde ( $TiH_2$ ) ihtiva eden karışım kalıp içerisinde ısıtılarak köpük elde edilir. Aynı zamanda matris malzemesi ergiyik haldeyken köpürtücü madde ilave edilmesi yönünden de sıvı halden köpük üretimi yöntemlerine de benzemektedir. Sonuçta toz metalurjisinin zahmetli yanlarından (presleme, sinterleme, ekstrüzyon ve haddeleme

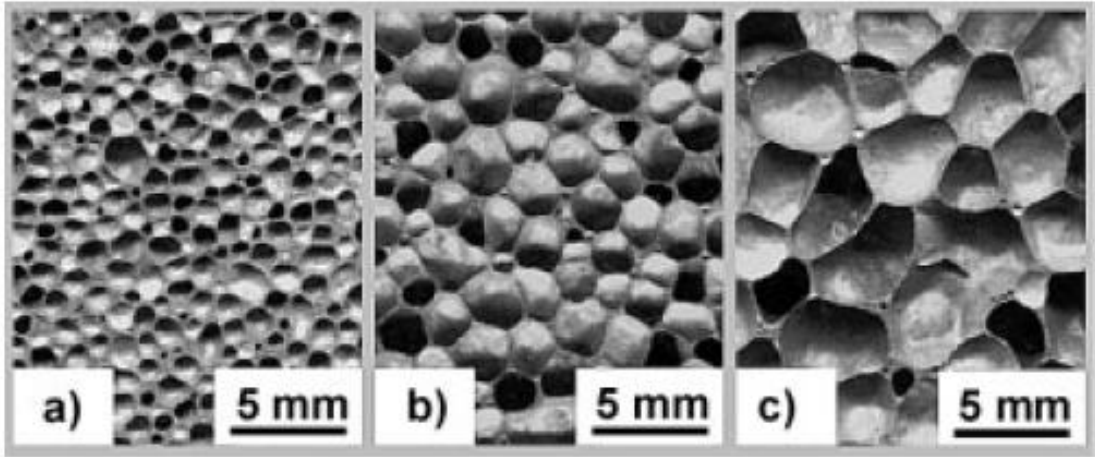
gibi) kurtulmuş olup, hem de toz metalurjisinin avantajlarını (istenen ebatta parça üretimini) sağlamış olmaktadır. Ayrıca diğer sıvı metalurjisi üretimlerinde olduğu gibi süreklilik gerektirmemektedir. İşlem basamakları Şekil 3.7’de verilmiştir [22].



Şekil 3.7. FORMGRIP yöntemi ile son şekle yakın metal köpük parçaların üretim aşamaları [22]

Köpürebilir ön malzeme hazırlamak için; AlSi12 karışımına gaz sağlayıcı olarak toz haldeki TiH<sub>2</sub> ve viskoziteyi kontrol için SiC parçacıkları ilave edilerek mekanik karıştırıcılar ile yüksek hızda (1200 dev/dak gibi) karıştırılır. Kullanılan TiH<sub>2</sub> parçacıklar daha öncesinde ısıl işleme tabi tutularak yüzeylerinde difüzyon bariyeri oluşturulur ve bu sayede ergiyik içerisinde köpürme öncesi reaksiyona girip gaz ayrışması engellenir. Köpürtücü maddeye ısıl işlem olarak iki basamaklı bir termal oksidasyon (400 °C’de 24 h + 500 °C’de 1 h) uygulanır. Bu işlem TiH<sub>2</sub>’ün hidrojen konsantrasyonunu çok az miktarda düşürür. Üretim esnasındaki en önemli nokta köpürtücü maddeden sınırlı miktarda gaz ayrışmasının sağlanmasıdır. Bunun için TiH<sub>2</sub> katılırken, ergiyik düşük sıcaklıkta (T = 620°C) tutulur. Ayrıca katılan SiC parçacıkları ve ön oksitleme ile yüksek bir viskozite elde edilerek köpürtücü madde yavaşlatılabilir [22,23].

Elde edilen karışım bir kalıba dökülerek soğutulur, bu sayede gözenek oluşumu ve büyümesi durdurulmuş olur. Daha sonra kapalı kalıptaki ön malzeme ergime derecesinin üstünde bir sıcaklığa ısıtılır ve sıcaklıkla birlikte  $TiH_2$ 'den ayrılan  $H_2$  gazı ile oluşan köpük kalıbı doldurur. Son olarak oluşan sıvı köpük soğutulur ve üç boyutlu son şekle yakın köpük elde edilir. Elde edilen köpüğün göreceli yoğunluğu  $0,1 - 0,3 \text{ g/cm}^3$  ve hücre boyutu da  $2 - 8 \text{ mm}$  arasındadır. Oluşan köpüğün farklı boyutta gözeneklere sahip görüntüleri Resim 3.3'te verilmiştir. Resimlerde gözenek boyutu arttıkça köpüğün gözenekliliğinin de arttığı açıkça görülmektedir [14,22,23,24].



Resim 3.3. Farklı koşullarda hazırlanan alüminyum alaşımlı Formgrip köpüklerin enine kesitleri. Gözeneklilik  $G$ , hücre boyutu  $B$ 'dir. a)  $G=\%69$ ,  $B= 1,1 \text{ mm}$  b)  $G = \%79$ ,  $B = 1,9 \text{ mm}$  c)  $G = \%88$ ,  $B= 3,1 \text{ mm}$  [23].

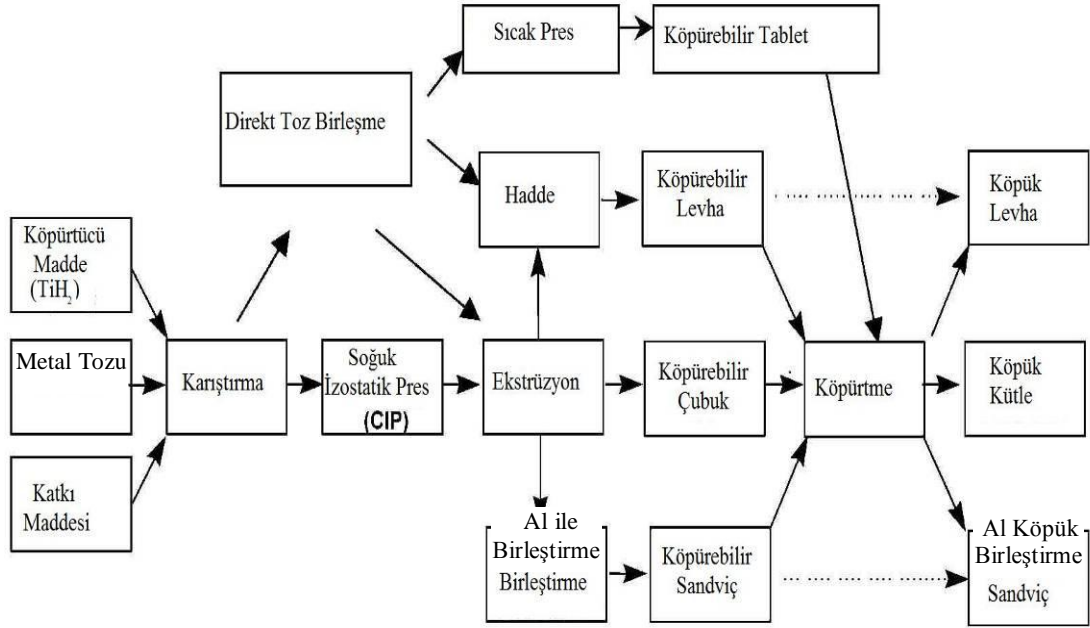
Çizelge 3.3. Formgrip yönteminin avantaj ve dezavantajları [7]

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Homojen gözenek dağılımı iyi ayarlanabilir (ısıtma /soğutma işleminin ve toz köpürtücü maddenin bir fonksiyonu olarak).</li> <li>• ALPORAS köpüğü ile aynı hücre boyutuna sahiptir.</li> <li>• Son ürün şeklinde parçalar dökülebilmektedir.</li> <li>• Bu işlem karmaşık kalıpları doldurmak için kullanılabilir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sınırlı malzemeler kullanılabilir.</li> <li>• Seramik parçacıkların kullanılması zorunludur.</li> <li>• Metal ergime sıcaklığında yeterli derecede viskoz değilse, köpük katılaşmadan önce sönecektir.</li> </ul>

### 3.4. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Köpük Üretimi

Ana fikri kısmen eskiye dayanan bu yöntem, Almanya’da Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü (IFAM) tarafından geliştirilmiştir ve genellikle toz metalurjisi yöntemi olarak adlandırılmıştır. Toz metalurjisi ile metalik köpük üretiminde Alman şirketi Schunk (Giessen) ve küçük ölçekli Honsel (Meschede) ve Avusturya Neuman Alulight (Ranshofen) Alufoam (Markt) isimleri ön plana çıkmaktadır [21]. Bu yöntemin, diğer bahsedilen yöntemlerden temel farkı köpürtülecek malzemenin ergitme yöntemleri kullanılmadan hazırlanmasıdır [24].

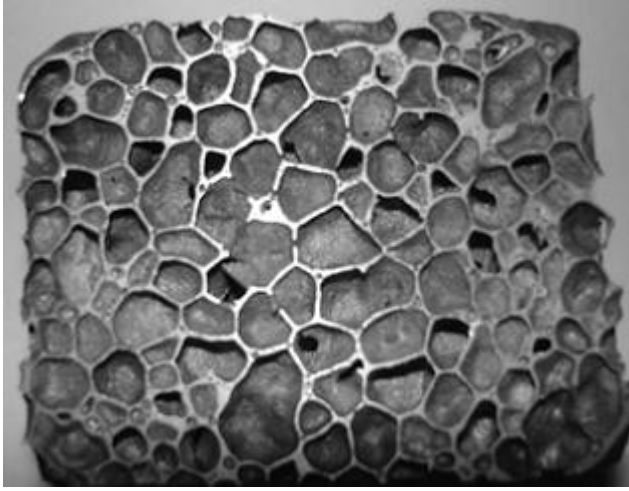
Toz metalurjisi yöntemiyle metalik köpük üretimi hem araştırma hem de endüstriyel kullanım alanlarında giderek artan öneme sahiptir. Toz metalurjisi yöntemiyle metalik köpük üretim yöntemleri özet olarak Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Toz metalurjisi yöntemi ile köpük üretimi [22].

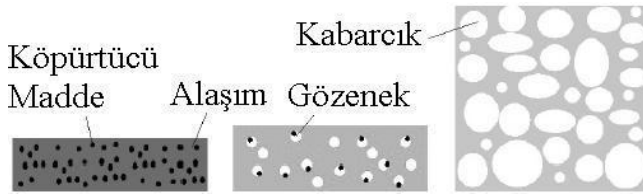
TM yöntemiyle Al esaslı metalik köpük üretimi toz haldeki Al, köpürtücü madde (genellikle  $TiH_2$ ) ve diğer alaşım elementleri homojen bir şekilde karıştırılarak elde edilen karışım tozlarının presleme, sinterleme, ekstrüzyon ve haddeleme gibi işlemlerden geçirilerek elde edilen kompakt yapının ergime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa kadar ısıtılmasıyla devam eder. Sıvı metal içerisinde  $TiH_2$ 'in ayrışmasıyla gözenek çekirdekleri oluşmaya başlar ve zamana bağlı olarak hücresel yapıları oluşturur [25].

Çok yaygın kullanılan bir yöntemdir. İnce levha halinde üretim yapılabildiği gibi, çeşitli geometrik şekil ve formlarda da üretim yapılabilmektedir [26]. Resim 3.4'te TM yöntemiyle üretilmiş Al esaslı metalik köpük şekli görülmektedir.

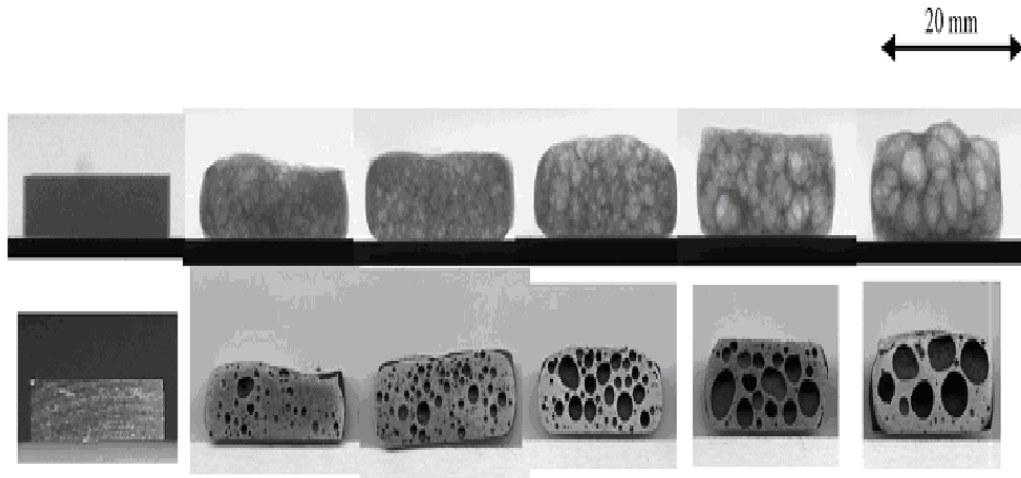


Resim 3.4. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Al esaslı metalik köpük [26]

Köpük preform malzemenin ısı karşısında nasıl değişim gösterdiği Şekil 3.9 ve Resim 3.5'te prensip olarak gösterilmiştir.

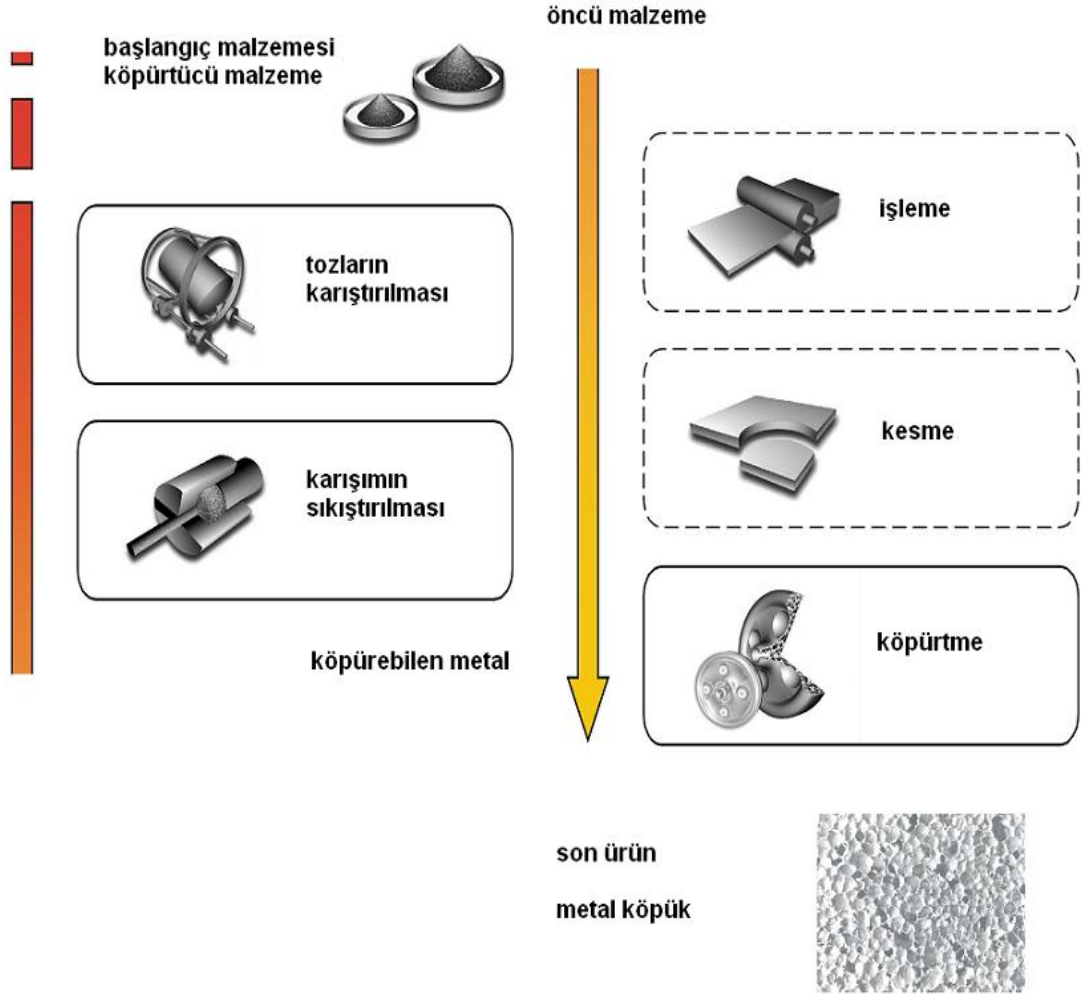


Şekil 3.9. TM yönteminde gözeneklerin oluşma ve büyüme evreleri [27]



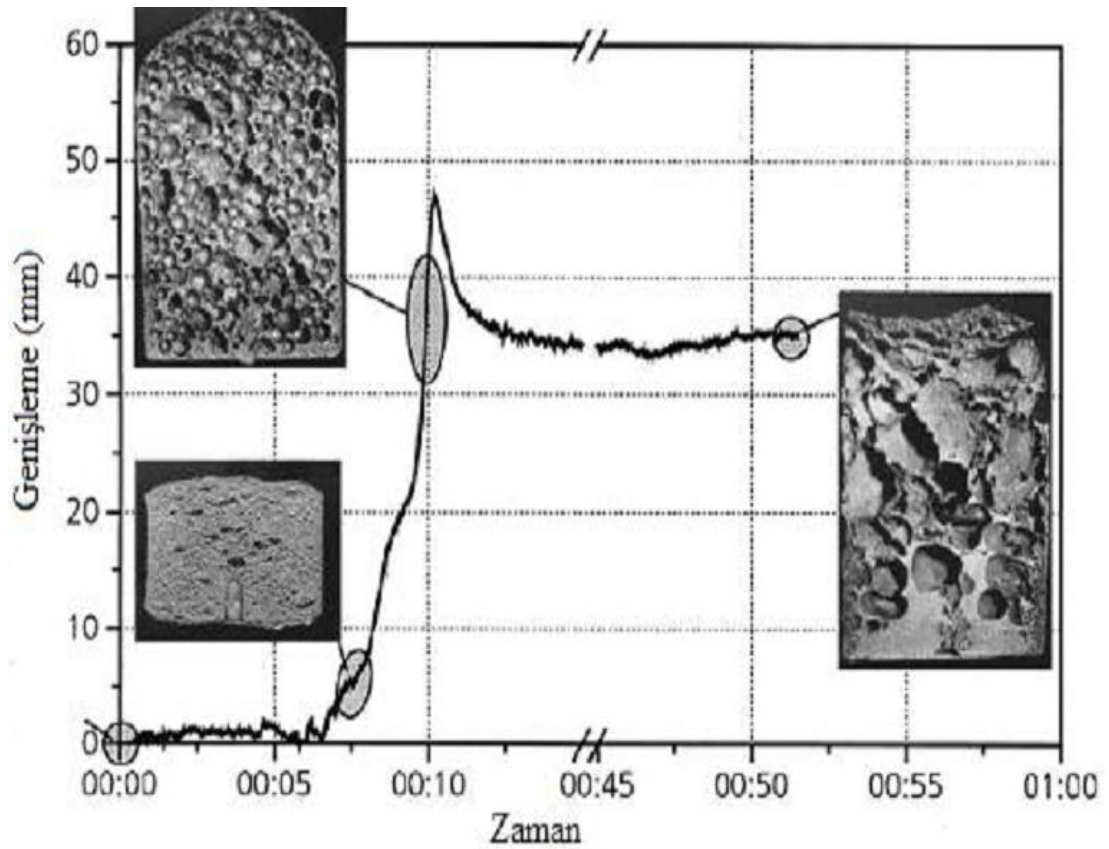
Resim 3.5. Köpük evrimi analiz görüntüsü [28]

Toz metalurjisi yöntemiyle köpük üretiminde sadece Al ve alaşımları değil kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı metaller ve alaşımları da kullanılır [21]. Şekil 3.10'da TM yöntemiyle metalik köpük üretim aşamaları prensip olarak görülmektedir.



Şekil 3.10. Toz metalurjisi yöntemiyle metalik köpük üretim süreci [24]

Toz metalurjisi yöntemiyle metalik köpük üretiminde dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden biri de uygun sıcaklık ve zamandır. Şekil 3.11’de köpürtme aşamasının zamana bağlı olarak değişimini göstermektedir.



Şekil 3.11. Alüminyum içerisindeki  $TiH_2$ 'nin zamana bağlı genişleme davranışı [21]

Çizelge 3.4. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen köpük malzemenin avantaj ve dezavantajları [7]

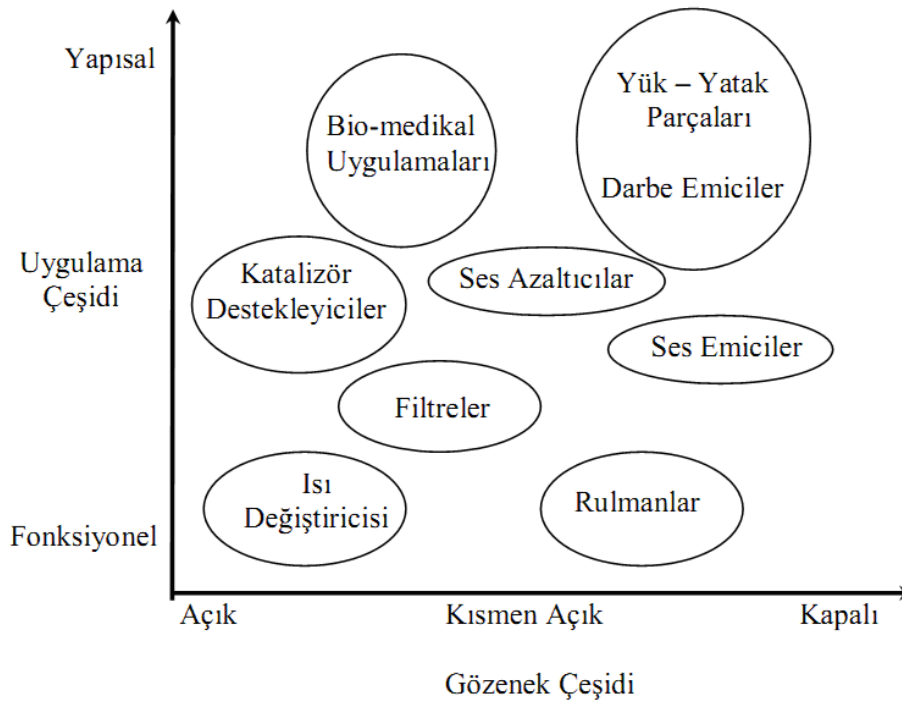
<b>Avantajlar</b>	<b>Problemler</b>	<b>Dezavantajlar</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Nihai ürüne yakın üretim mümkündür.</li><li>• Kompozitler üretilebilir.</li><li>• Alaşım seçiminde esneklik</li><li>• Seramik ve fiberler eklenebilir.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Gözenek yapısının düzensiz</li><li>• İşlem kontrolü geliştirilmeli.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tozların maliyeti yüksek</li><li>• Çok büyük parçaların üretilebilmesi çok zor.</li></ul>

#### 4. METALİK KÖPÜKLERİN KULLANIM VE UYGULAMA ALANLARI

Metalik köpüklerin sahip olduğu üstün mekanik özellikler ile günümüzdeki önemi giderek artmaktadır. Metalik köpükler; yüksek enerji absorbe kabiliyeti, düşük yoğunluk, ısıl izolasyon, elektrik iletkenliği, titreşim azaltma ve kimyasal süzme gibi özelliklerinden dolayı çok çeşitli mühendislik alanlarında kullanılmaktadırlar.

Metalik köpüklerin yapısal kullanım alanları arasında otomotiv, demiryolu ve inşaat endüstrileri, uzay araçları, gemi ve spor malzemeleri yapımı ve biyomedikal uygulamalar; fonksiyonel kullanım alanları arasında ise filtreleme ve ayırma, ısı dönüştürücü, soğutma sistemleri, elektrokimyasal uygulamalar, su arıtma, sıvı muhafaza ve iletimi gibi uygulamalar sayılabilir [29].

Metalik köpüklerin yapısal ve fonksiyonel olarak kullanım alanları Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

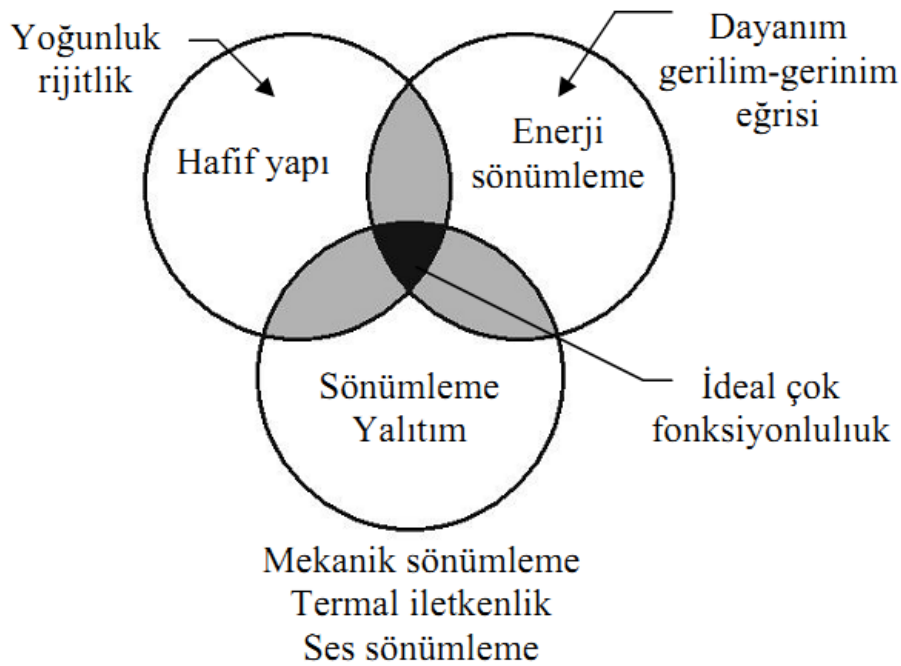


Şekil 4.1. Metalik köpüklerin kullanım alanları [29]

## 4.1. Metalik Köpüklerin Yapısal Kullanım Alanları

### 4.1.1 Otomotiv endüstrisi

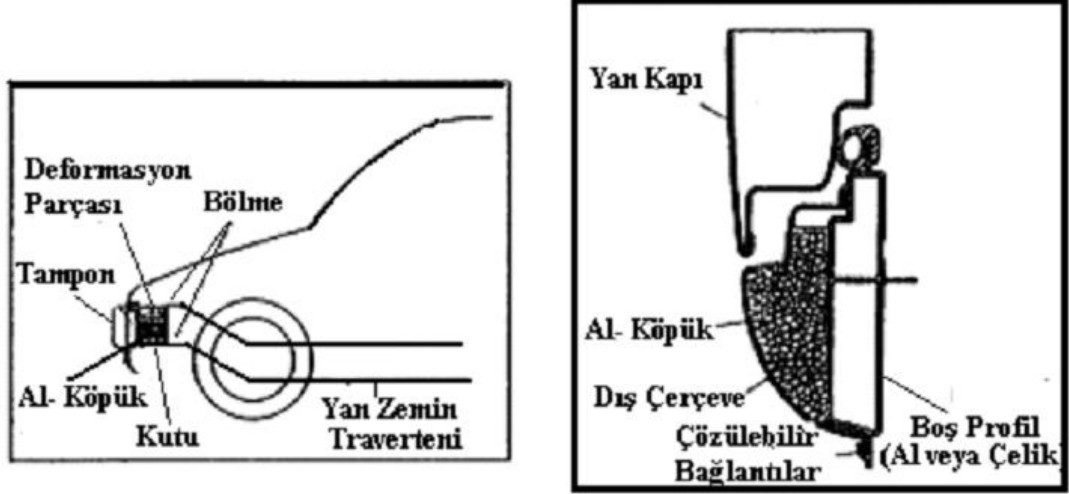
Metalik köpükler hafiflik, enerji emilimi ve sönüm yalıtımı gibi özellikleri bir arada bulunduran malzemelerden olup bu özelliklerinden dolayı otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Metalik köpüklerin bu özellikleri şematik olarak Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Burada daireler üç uygulama alanını, dıştaki kutularda o alandan sorumlu köpük özelliklerinin avantajını göstermektedir. İdeal olanı parçanın üç özelliği de içerebilmesidir (hafif yapı, enerji emilimi ve sönüm özellikleri) üç dairenin kesişimidir [29].



Şekil 4.2. Otomotiv alanında yapısal uygulamalar [29]

Düşük yoğunlukları ve düşük yüklerde nispeten yüksek deformasyon enerjisi sönümleme özellikleri taşıtlar için ağırlığın azaltılması ve sağlamlığın artırılması nedeniyle metalik köpüklere olan ilgi artmaktadır. Otomobillerde güvenliği artırmak amacıyla şase ve tampon arasına yerleştirilen çarpışma kutusunda dolgu malzemesi

olarak kullanılır. Şekil 4.3'te araç üzerinde darbe absorbe etmek için kullanım yerleri görülmektedir [6,29].

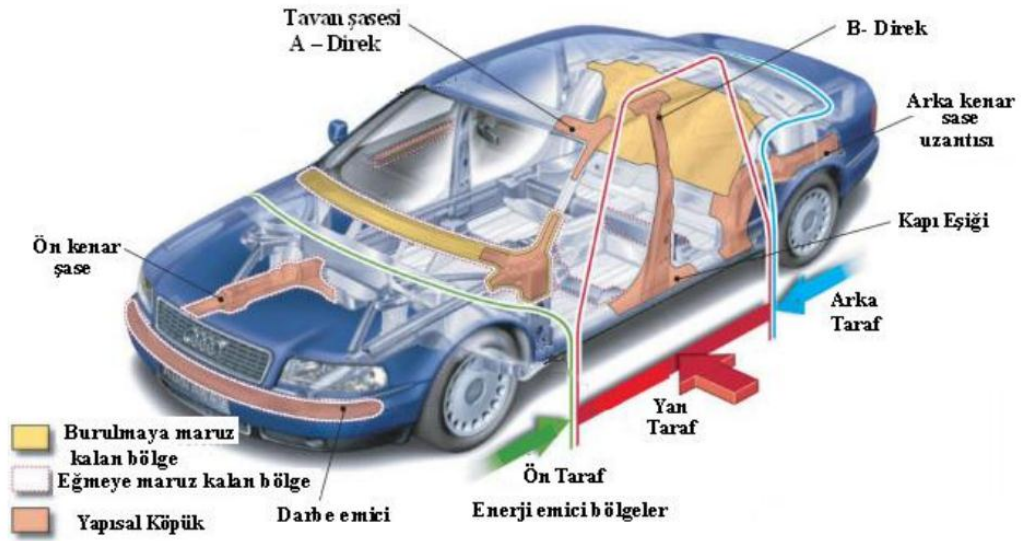


Şelik 4.3. Enerji absorbe etmek için kullanılan alüminyum köpük malzemesi

a) Ön yüzeyde, b) Yan çarpmalara karşı [29]

Kendine has özelliklerinden dolayı metalik köpük malzemeler darbe enerjisini absorbe edici elemanlar olarak düşünülebilir. Köpük tipine, alaşıma ve yoğunluğa bağlı olarak enerji absorbe etme davranışı belirli bir aralıkta değiştirilebilir. Bu özellik, metalik köpük yapıları otomobillerde, kamyonlarda, trenlerde ve tramvaylarda ve diğer uygulama alanlarında rahatlıkla kullanılabilen malzemeler arasında yer almaktadır [29].

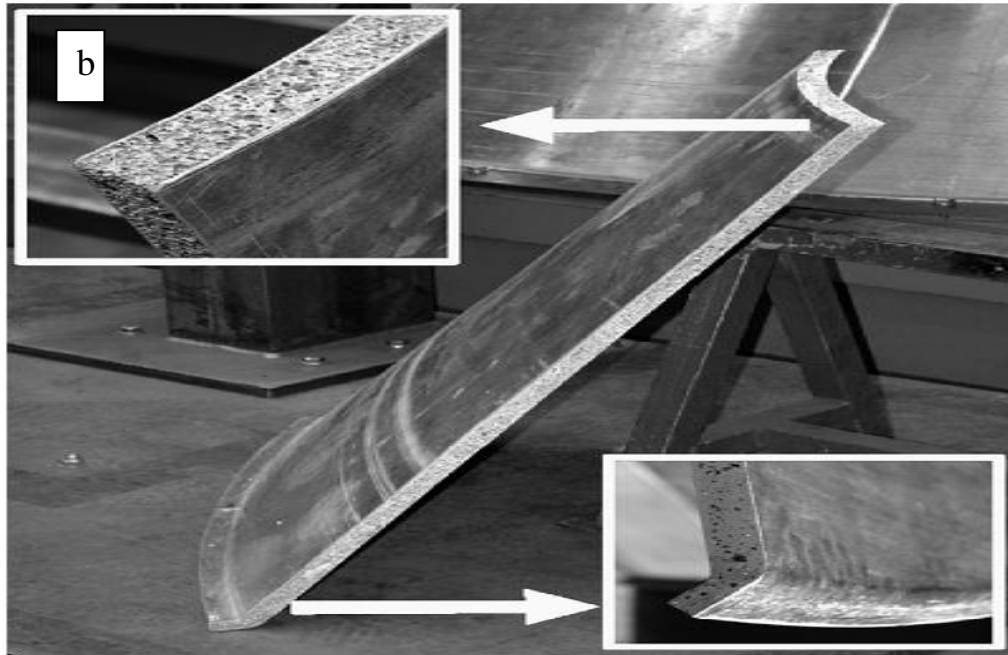
Şekil 4.4'te Audi A8 otomobillerde kullanılan metalik köpüklerin uygulama bölgeleri görülmektedir.



Şekil 4.4. Audi A8 üzerinde kullanılan yapısal köpük malzemeler [30]

#### 4.1.2. Hava ve uzay endüstrisi

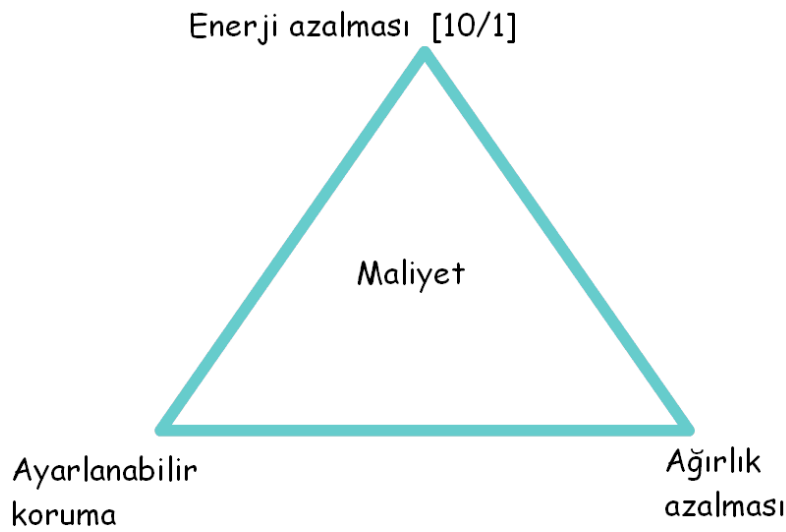
Metalik köpüklerin diğer bir uygulama alanı da rijitlik/yoğunluk oranının önemli olduğu hava ve uzay endüstrisidir. Alüminyum köpükten üretilmiş plaka ve sandviçler aynı özelliklere sahip malzemelerden daha ucuza temin edildiği için tercih edilmektedirler. Boeing alüminyum köpük çekirdekli alüminyum sandviç panelleri helikopter kuyruk çubuklarında kullanım yolları geliştirmiştir. Helikopter üreticileri alüminyum köpük metalleri bazı başka parçaların yerine kullanmayı denemektedirler [6,29]. Resim 4.1 a) ve b)'de Ariane 5 roketinin köpük malzemedan yapılmış kısmı görülmektedir.



Resim 4.1. a) Sandviç köpük panelden (AFS) yapılmış Ariane 5 roket konisi  
b) Alüminyum sandviç yapının detay görünümü [31]

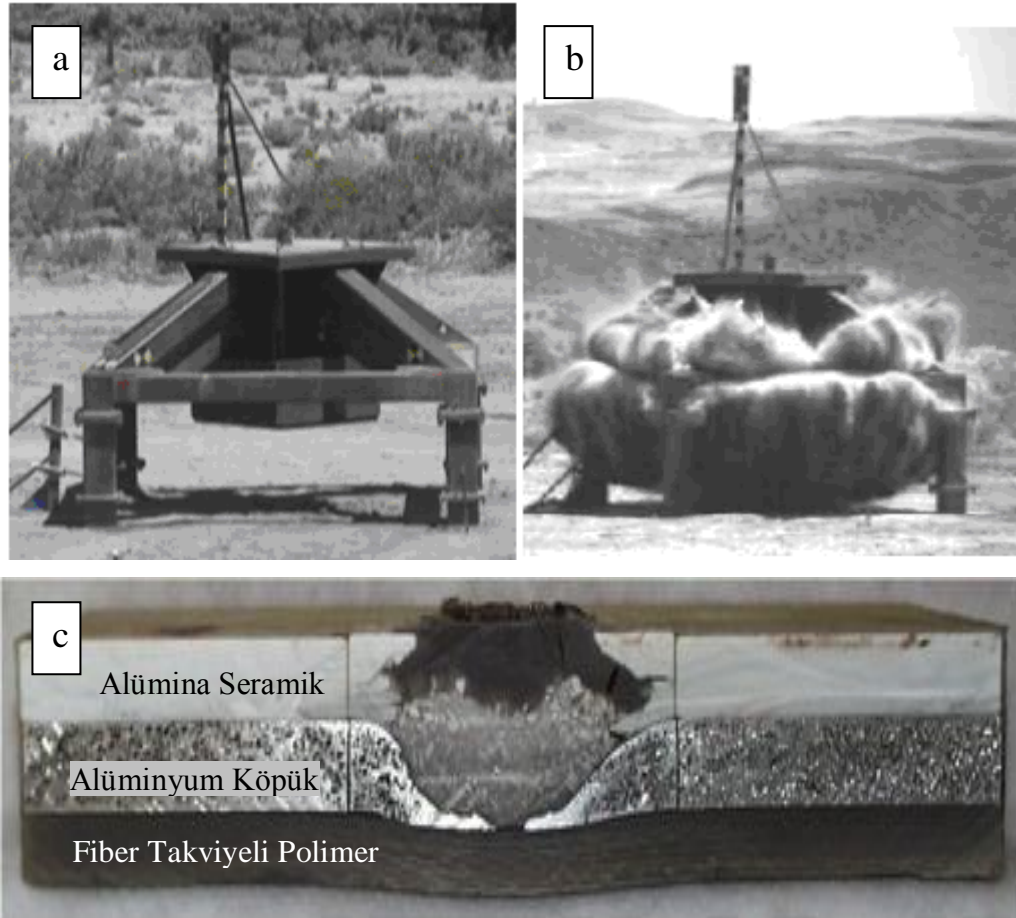
### 4.1.3. İntegral zırh malzemesi olarak metalik köpükler

Metalik köpüklerin en dikkat çekici özelliği enerji absorbe edebilme, düşük ağırlık, ayarlanabilir koruma ve bunların yanı sıra sağlamış olduğu düşük maliyettir. Şekil 4.5'te sayılan bu özelliklerin bir arada bulunduran üçgen verilmiştir.



Şekil 4.5. Metalik köpüklerin savunma alanında sağlamış olduğu avantajlar [19]

Zırh malzemelerinin imalatının temel amacı, maruz kalınan enerjiyi sönmüleyerek ya da direnç göstererek can kayıplarına engel olmaktır. Bu bağlamda integral zırh malzemesi geliştirilmesinde metalik köpükler gerekli potansiyele sahiptir. Resim 4.2 a'da Ceymat firmasının yapmış olduğu integral zırh malzemesinin patlama öncesi, b'de patlama esnasındaki, c'de ise seramik-köpük-polimerlerden oluşan integral zırh malzemesinin test sonrası görüntüsü verilmiştir. Yapılan araştırmalara göre Al köpüklerin dinamik deformasyonu tamamen yoğunlaşana kadar dağıtmayı sürdürmektedir. Yani aradaki köpük malzeme tamamen yoğunlaşana kadar darbe yükünü dağıtır ve daha sonra alt tabakaya aktarır. Bu aktarma köpüğün kalınlığıyla lineer bir ilişki içerisinde. Bu tasarım daha hafif ve hasar toleransı daha yüksek ileri nesil zırhlı araçlar için bir basamak teşkil etmektedir [20]. Gazi Üniversitesi'nde Prof. Dr. Mehmet TÜRKER tarafından yürütülen, TÜBİTAK ve MSB destekli 107A016 nolu "Patlama etkisine karşı koruyucu zırh geliştirilmesi" projesi başarı ile tamamlanmıştır.



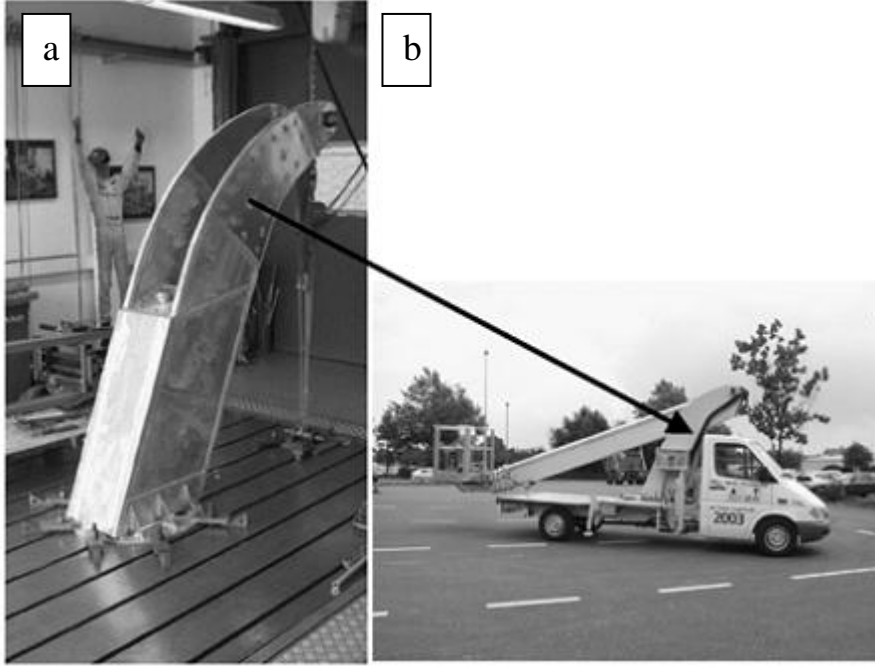
Resim 4.2. a) Patlama öncesi, b) Patlama anı, c) Alüminyum köpük tabakası kullanarak hafif ayrılmaz kompozit zırh kesit görünümü [19,32]

#### 4.1.4. Hafif yapılar

Hafif ve sağlam alüminyum sandviç yapılar otomobil ağırlıklarını azaltmak için yapılan çalışmalara oldukça yardımcı olmuştur. 3 boyutlu bu sandviç paneller otomobillerde orijinal çelik panellerden yaklaşık olarak 8 kat daha sağlam olup, %25 daha hafiftir [29].

Alüminyum sandviç paneller alüminyum yüzey plakaların köpük malzemenin giydirilmesi ile oluşturulur. Daha sonra plaka, köpürtücü maddenin etkin olması için ısıtılır. Bu köpük çekirdek yapı kalınlığının yaklaşık %400 genişlemesine ve %80

gözeneklilikte bir yapıya neden olur. Teupen firması (Gronau, Germany) çalışma platformunu iç içe geçen kollarla kaldırma sistemine farklı bir tasarım geliştirmiştir. Resim 4.3 a'da sandviç yapı ve b'de vinçlerdeki kullanım yeri görülmektedir [20,29].

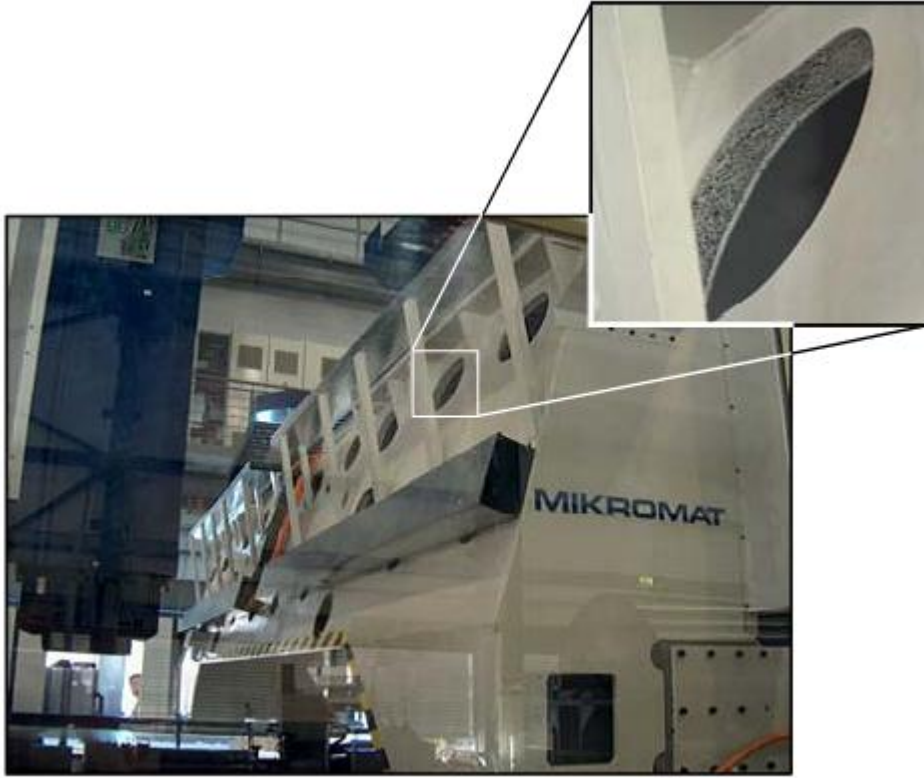


Resim 4.3. a) Alüminyum sandviç köpük (ASF) yapı b) ASF yapının iç içe geçmiş vinç [15]

#### 4.1.5. Makinelerin dış kısımlarında

Günümüz teknolojisinde büyük freze tezgâhları üretilmektedir ve bu tezgâhlar hafif yapıda olmaları istenmektedir. Bu istekli karşılamak amacıyla dış bileşenleri geniş, hafif, statik yapılar kullanılmaya başlamıştır. Sandviç köpüklerin özelliklerinden yararlanılarak freze tezgâhının çapraz kirişleri de metalik köpüklerden yapılmıştır.

Resim 4.4'da  $1,179 \times 1,82 \text{ mm}^2$  alanında köpük panellerden üretilen freze tezgâhı görülmektedir [33].



Resim 4.4. Dış çerçevesi metalik köpük takviyeli freze tezgahın görünümü [33]

#### 4.1.6. Diğer uygulama alanları

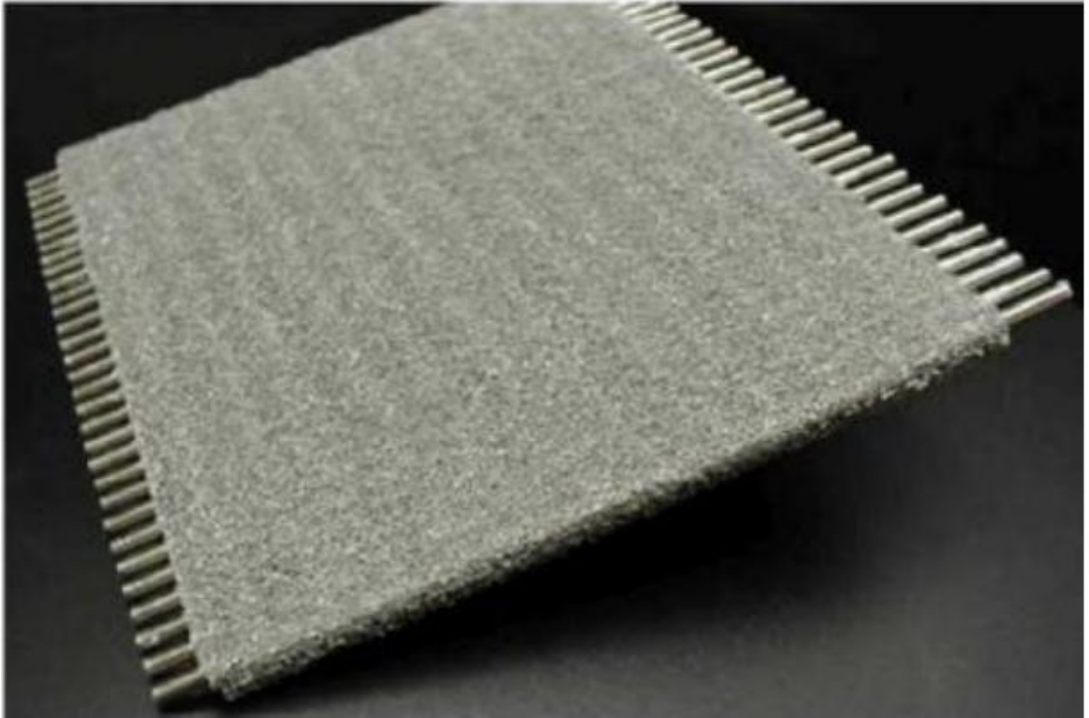
Metalik köpükler otomotiv endüstrisi, uçak-uzay endüstrisi ve makine imalatı alanları dışında gemi yapımı, inşaat endüstrisi, biyomedikal gereçler, spor ekipmanları gibi birçok alanda kullanılmaktadır [2,6,20].

### 4.2. Köpük Metallerin Fonksiyonel Uygulamaları

#### 4.2.1. Isı değiştiriciler

Son yıllarda metalik köpüklerle ilgili çalışmaların hızlanmasıyla birlikte, kullanım alanlarındaki çeşitlilik de artmaktadır. Metalik köpükler açık veya kapalı hücreli olmasına göre kullanım alanlarında değişiklik göstermektedir. Korozyon direnci, yüksek termal iletkenliği gibi özelliklerinden dolayı açık hücreli alüminyum ve bakır bazlı köpük metaller ısı değiştirici olarak kullanılabilirler. Kapalı hücreli köpük

metaller ise düşük termal iletkenliklerinden dolayı termal kalkan olarak kullanılır. Bu uygulamaya örnek olarak, mikro gözenekli ve kompakt ısı değiştiricilerde, elektronik aletlerin soğutmasında, endüstriyel fırınlarda, hava soğutmali kondansatörlerde, kimyasal elektronik reaktörler ve kütle transferi yöntemleri verilebilir. Metal köpük matrisi içine gömülmüş tüplerden oluşturulan gelişmiş yüksek sıcaklık radyatörü Resim 4.5'te görülmektedir [6].



Resim 4.5. Köpük metal ısı değiştirici olarak kullanım şekli [29]

#### 4.2.2. Ses yalıtımı

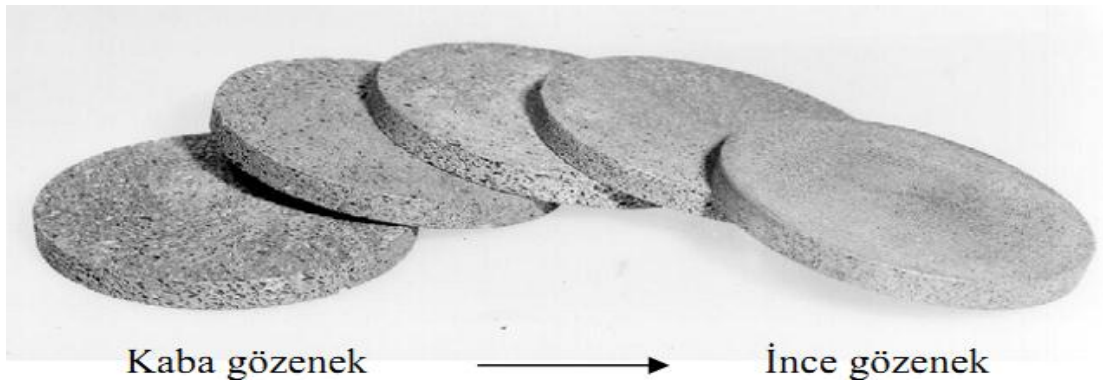
ALPORAS köpükler büyük bir gürültü emme katsayısına sahip malzemelerdir. Resim 4.6'da görüldüğü gibi gürültülü bir otopanın yüksek viyadükün alt kısmına yerleştirilmiştir ve gürültü oranında büyük bir azalma olduğu ve buna bağlı olarak çevrede yaşayanların gürültü şikayetleri azaldığı belirtilmiştir [34].



Resim 4.6. Metalik köpüklerin ses yalıtımı olarak viyadükte kullanımı [34]

### 4.2.3. Filtreler

Katı parçacıkları gaz veya sıvıdan veya iki sıvıyı birbirinden ayırmak için, büyük depo hacminden dolayı açık hücreli alüminyum köpük metaller kullanılabilir. Resim 4.7'de filtrelerde kullanılan köpük malzemeler görülmektedir.

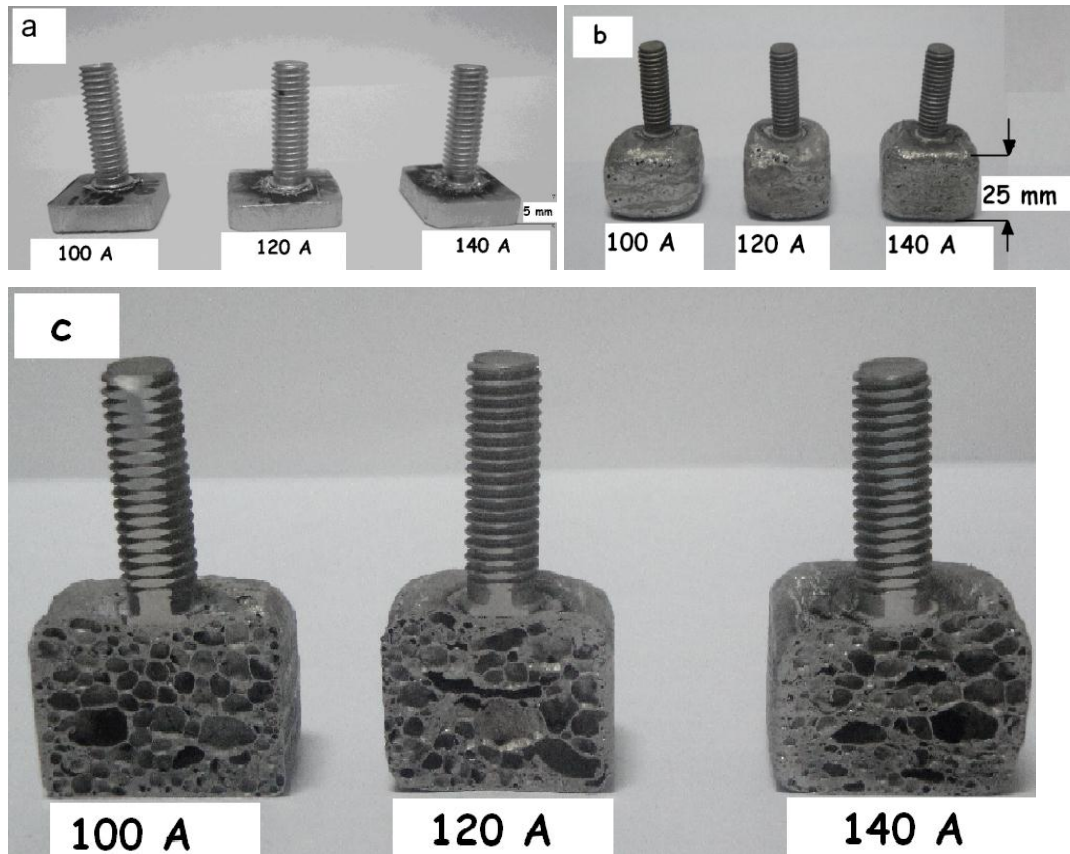


Resim 4.7. Farklı gözenek boyutuna sahip alüminyum köpük [49]

#### 4.2.4. Metalik köpüklerin fonksiyonel olarak diğer uygulama alanları

Açık gözenekli metalik köpükler susturucular, filtreler, basınç azaltma, yağlama yatağı, alev perdesi, buharlaşma soğutması ve ısı değiştirici olarak da kullanılmaktadır [2].

Metalik köpüklerin kullanım kolaylığını sağlamak amacıyla çeşitli yöntemler de geliştirilmiştir. Resim 4.8'de de görüldüğü gibi köpük malzeme üzerine salpama kaynağı yaparak malzemenin kullanım kolaylığını artırmak bu konuya örnek olarak verilebilir.



Resim 4.8. a) Köpürtme öncesi salpama kaynağı, b) Köpürtme sonrası genel görünümleri, c) Birleştirme arayüzey kesit görünümleri [35]

## 5. MEKANİK ALAŞIMLAMA

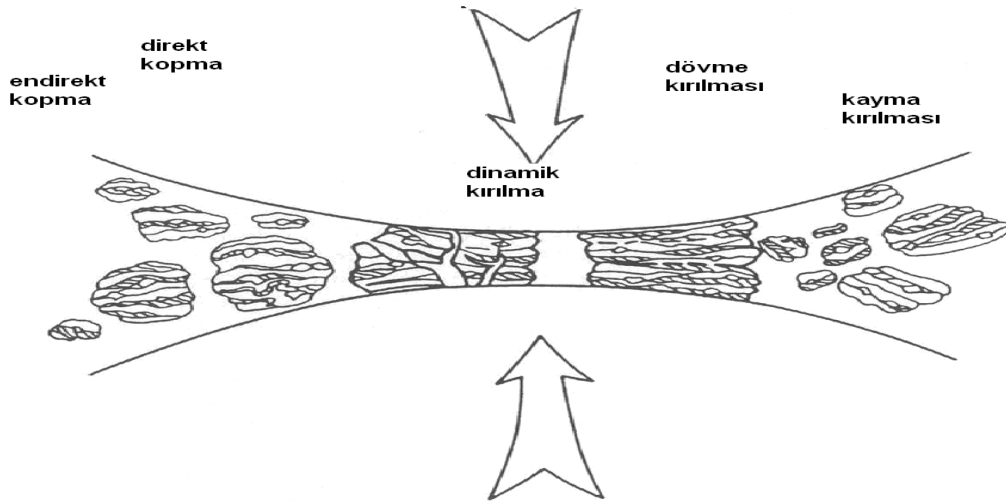
### 5.1. Tanım ve Tarihçesi

Mekanik alaşımlama (MA) yüksek enerjili bilyeli değirmende son derece homojen ve ince mikro yapılar elde etmek amacıyla toz parçacıklarının kuru, yaş, yüksek enerjili, bilyeli ve/veya çubuklu öğütme işlemleri ile soğuk kaynaklanması, kırılması ve tekrar kaynaklanmasını içeren bir toz metalurjisi (TM) tekniğidir [36,37].

Bu metot ilk olarak oksit dağılımı ile sertleştirilmiş (ODS) nikel ve demir esaslı malzemelerin ticari olarak üretilmesi için International Nickel Company Paul D. Merice araştırma laboratuvarında 1966'lı yıllarda gaz türbini uygulamaları için geliştirilmiştir [36].

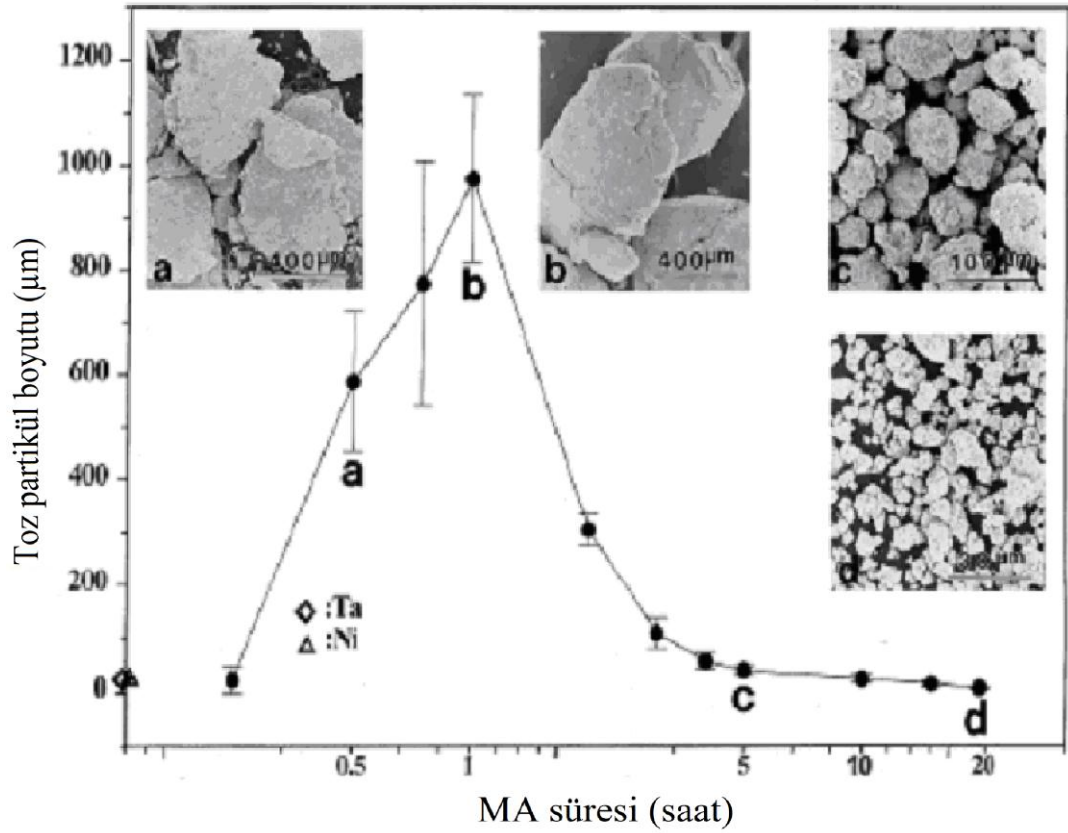
### 5.2. MA Mekanizması

Toz partikülleri yüksek enerjili MA esnasında düzleşme, kırılma ve yeniden kaynaklanırlar. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi iki çelik biye çarpışırken arasında çok sayıda tozu sıkıştırır. Plastik deformasyona uğramış tozlar yeni yüzeyler oluşturur ve parçacıkların birbiriyle kaynaklanmasına imkan sağlar [38].



Şekil 5.1. Mekanik alaşımlama mekanizması [9]

Kaynaklanma parçacık boyutunda artışa neden olur. Başlangıç tozları sünek-sünek veya sünek-gevrek malzemeler kullanılmışsa partiküller kaynaklanarak büyüme eğilimlidir. Bu aşamada partiküller başlangıç tozlarının çeşitli kombinasyonlarının katmanlı yapı özelliklerine sahiptir. MA işleminde artan süreyle deformasyon devam eder ve parçacıklar sertleşerek kırılmaya başlar. Kırılan parçacıklar bu mekanizma tarafından üretilir. Eğer sistemde tozlar üzerinde aglomerasyon etkisi yoksa parçacık boyutunda daha da azalma gözlenir. Sistemde bu aşamada soğuk kaynak üzerinde kırılma eğilimi yüksektir. Bilyelerin çarpışma etkisinin devamıyla parçacıkların boyutunda oldukça fazla incelme olur. Sonuç olarak tabakalar arası boşluk azalır ve bir parçadaki tabaka sayısı artar. Şekil 5.2’de görüldüğü gibi artan MA süresine bağlı olarak lameller arası mesafe küçülür ve nano metre boyutuna iner. Son aşamada her partikül bütün başlangıç malzemelerini büyük oranda içermektedir. Nano boyutta malzemelerin üretimi için MA yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [37,38].

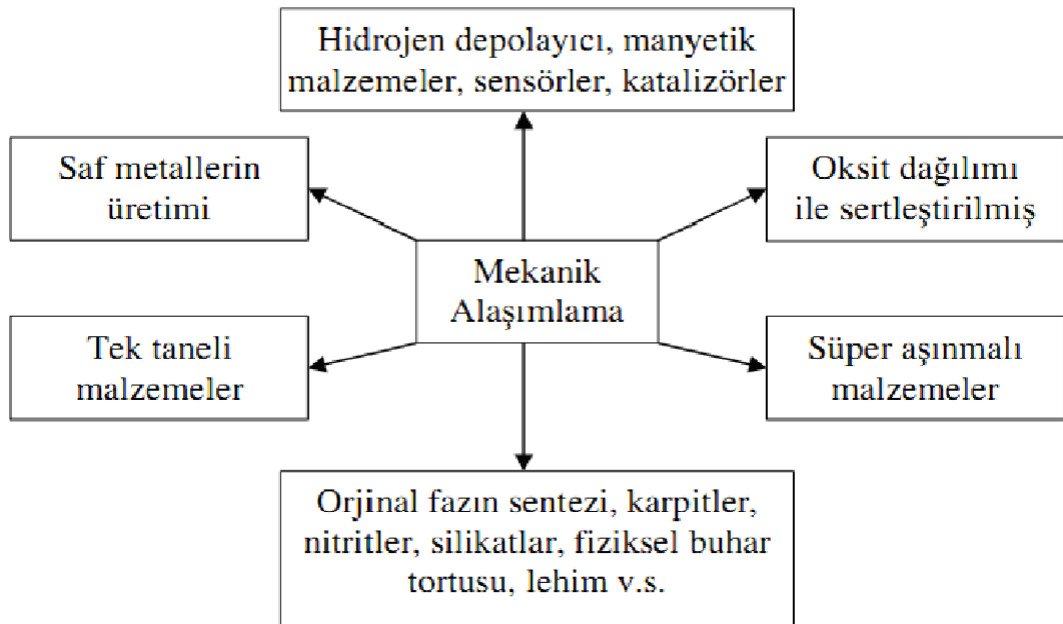


Şekil 5.2. MA esnasında tozlarda zamana bağlı olarak boyut değişimi [38]

### 5.3. MA'nın Avantajları

- Normal üretim teknikleri (ergitme ve döküm) ile üretilmesi zor olan parçaların üretilebilmesi,
- Süper korozyon dirençli alaşımları üretilebilmesi,
- Oldukça farklı ergime noktalarına sahip malzemelerden intermetalikler oluşturulabilmesi,
- Üretilen kompozit tozların yapısında homojenlik elde edilmesi,
- Karmaşık şekilli ve hassas toleranslar dahilinde parça üretilebilmesi,
- Ergime derecesine yakın sıcaklıklarda çalışabilen malzemeler üretilebilmesi bu yöntemin avantajları olarak kabul edilmektedir [39]

Şekil 5.3'te MA işlemi yapılarak üretilen malzemeler ve kullanım alanlarını veren şekil verilmiştir.

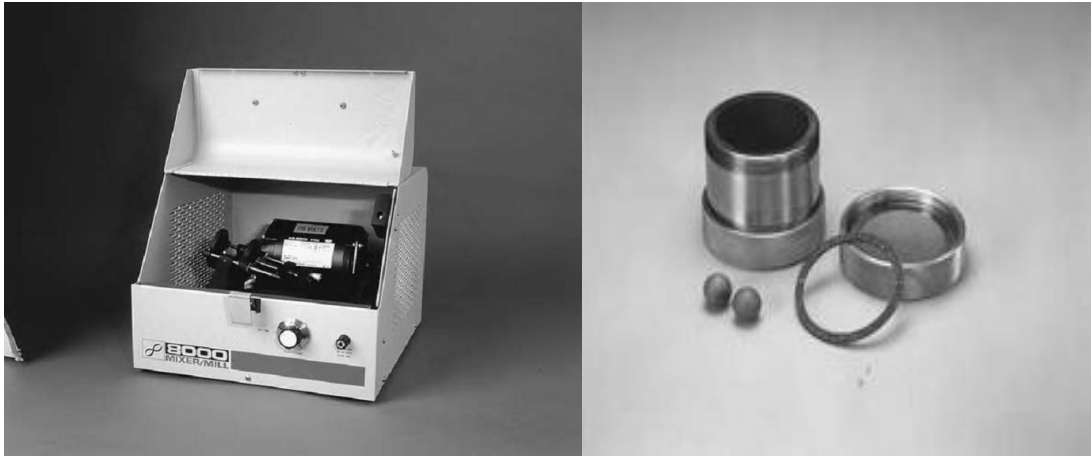


Şekil 5.3. MA ile üretilebilen malzeme çeşitleri [38]

## 5.4. Kullanılan Değirmen Çeşitleri

### 5.4.1. Spex tip değirmenler

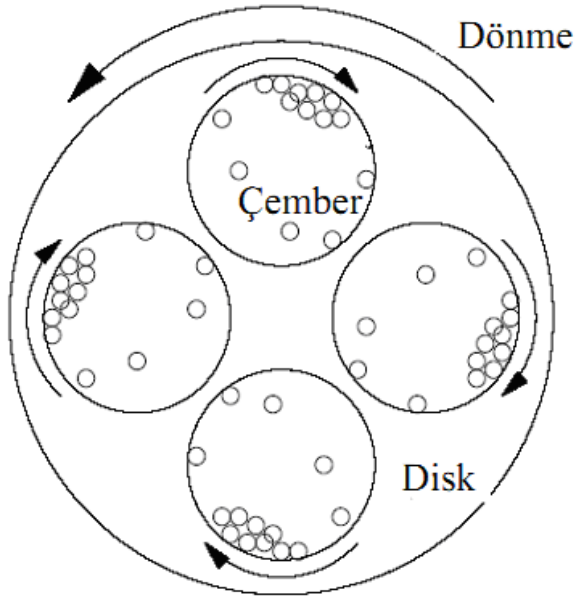
SPEX tip değirmenler genelde araştırma amaçlı kullanılmaktadır ve 10 g toz bu yöntemle MA yapılabilmektedir. Bu değirmen, öğütme bilyeleri ve öğütmek üzere konulan tozları dakikada binlerce kez sallayarak öğütme işlemi gerçekleştirilir. Değirmen kollarının kabı sallama işlemi ileri-geri ve yanıl hareketlerle sonsuz ( $\infty$ ) işaretine benzeyen hareket eksenli izler. Kap içerisindeki tozlar bilyeler arasında ve bilye-kap yüzeyi arasında sürekli bir öğütme etkisiyle MA yapılır. Makinenin genliğı yaklaşık 5 cm, hareket hızı 1200 dev/dak. ve bilye hızı yaklaşık 5 m/sn'dir ve tozlara etki eden kuvvet çok yüksektir. Bu değirmenler yüksek enerjili değirmenler kategorisinde sınıflandırılır [1,38,40]. Resim 5.1'de Spex tip değirmen şekli görülmektedir.



Resim 5.1. Spex tip değirmen [38]

#### 5.4.2. Planetary (gezegen hareketli) değirmen

MA'da kullanılan diğerk bir değirmen çeşidi de planetary (gezegen hareketli) değirmenleridir. Bu değirmenler genelde deneysel kullanım amacıyla kullanılırlar ve bir seferde birkaç yüz gram tozu öğütebilirler. Planetary değirmenleri MA esnasında gezegen hareketine benzer hareket yaptıklarından ismine planetary (gezegen hareketli) değirmenler denmiştir. Bu değirmenler özel bir döner disk üzerine yerleştirilen haznelardan oluşmaktadır. Şekil 5.4'te de görüldüğü gibi hazneler diskin hareket yönüne ters yönde ve kendi eksenini etrafında hareket etmektedir. Haznelerin kendi eksenini etrafında dönmesi ile bilye ve tozlar merkez kaç kuvveti etkisiyle hazne çeperine sıvanır, döner disk ise haznenin dönüş yönüne ters yönde dönmesiyle hazne etrafına sıvanan toz ve bilyeleri harekete geçirerek alaşımlama mekanizması çalışmaya başlar [9,38].



Şekil 5.4. Planetary (gezegen hareketli) değirmenin hareket şekli [41]

### 5.4.3. Szegvari dikey tip değirmenler

SZEGVARI dikey tip değirmenler, bir defada büyük miktarlarda toz öğütebilecek değirmenlerdir. Szegvari tip değirmenlerin öğütme gücü, orta derecelerdeki hızlara sahip Spex ve Planetary değirmenlerden daha küçüktür. Deneysel ve ticari olarak farklı boyutlarda atritörler vardır [38].

Szegvari Atritörler basit bir çalışma sistemine sahiptir. Toz sabit bir tanka öğütücü bilyelerle beraber konur. Karıştırma şaft ve kollar tarafından harekete geçirilir ve istenilen hızlarda döner. Tozlara öğütme esnasında değişik türden kuvvetler etki eder. Tozlar bilye-bilye, bilye-kazan yüzeyi, bilye-karıştırıcı kollar arasında kalarak MA mekanizması çalışır. Sistem çalışırken sürtünmelerden kaynaklanan ısıyı engellemek için soğutma suyu ve tozların oksitlenmesini engellemek için koruyucu atmosfer kullanılır. Resim 5.6’de Szegvari değirmene ait görüntüsü görülmektedir.



Resim 5.2. Szegvari dikey tip değirmen

#### 5.4.4. Ticari değirmenler

Ticari değirmenler laboratuvar çalışmaları için kullanılan değirmenlerden daha büyük kapasitelere sahip değirmenlerdir. Bir defada yüzlerce kilogram malzemeyi öğütebilirler. Değirmenin enerjisindeki (dönme hızı) arttıkça öğütme zamanı azalır.

MA sürecinde ticari bir değirmen birkaç gün öğütme yaparken, bu süre atritör değirmende birkaç saat, spex'te ise birkaç dakika olabilir.

Son yıllarda özel amaçlar için değirmenlerin birçok farklı tasarımı geliştirildi. Bunlar arasında çubuk değirmen, titreşimli değirmenler gibi [38].

#### 5.5. MA İşlem Parametreleri

- Değirmen tipi
- Öğütme kazanı
- Başlangıç toz boyutu
- Öğütücü malzeme
- Bilye-toz oranı
- Öğütme atmosferi
- Öğütme süresi
- Öğütme hızı
- İşlem kontrol elemanları [37]

##### 5.5.1 Değirmen tipi

MA yapmak için çeşitli türlerde değirmenler bulunmaktadır. Bu değirmenler kapasitelerine, işlem hızlarına ve öğütme sıcaklığını değiştirerek işlemi kontrol etme ve tozların kirlenmesini azaltma kabiliyetine göre farklılıklar gösterirler. Toz çeşidine, toz miktarına ve gerekli olan son içeriğine bağlı olarak, uygun bir değirmen seçilebilir. Üretilecek malzemenin aktif ve reaktiflik durumuna göre koruyucu ortam

seçimi de çok önemlidir [9,37]. Bütün bu değişiklikler değirmen her değirmen çeşidinde farklılık gösterir.

### **5.5.2 Öğütme kazanı**

MA'da yüksek hızda dönen karıştırıcı kollar haznenin ve karıştırıcı kolların aşınmasına neden olmaktadır. Bu durum ise tozun kirlenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle öğütme haznesinin sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş kromlu çelik, temperlenmiş çelik, paslanmaz çelik ve rulman çeliği kullanılmaktadır [37,42].

### **5.5.3. Başlangıç toz boyutu**

MA işleminde, başlangıç tozları 1 µm ile 200 µm arasında değişen boyutlarda, saf veya alaşım tozları kullanılır. Toz boyutu mekanik alaşımlamadaki en önemli parametrelerden biridir. Toz boyutu arttıkça MA süresi de artmaktadır. Bu durumda aşırı kirlenme ortaya çıkar ve bu durum ise yapı içerisinde istenmeyen farklı fazların ortaya çıkmasına neden olur [43].

### **5.5.4. Öğütücü malzeme**

Öğütme ortamı sert ve aşınmaya dayanıklı olan malzemeler olan takım çelikleri, temperlenmiş çelikler, paslanmaz çelikler, tungsten karbür, zirkonyum oksit, cam, çakmak taşı gibi bilyeler kullanılır [9,37]. İri bilyeler öğütme gücünü artırır fakat bilyeler arası boşluk arttığından yeteri miktarda toz bilyeler arasında sıkışmaz bu durumu engellemek için geniş bilye dağılımı kullanılır.

### **5.5.5. Bilye-toz oranı**

Bilye/toz oranı öğütme işleminin önemli bir değişkenidir. Bu oran birçok araştırmacı tarafından 1/1 oranı ile 220/1 oranına kadar çeşitli oranlarda kullanılmıştır. Spex tip

değirmenlerde genelde 10/1 oranında, büyük kapasiteli atritör benzeri bir değirmende 50/1 ile 100/1 oranlarında değişmektedir. Bu oranın artması alaşımlama zamanını azaltırken tozların kirlenmesi gibi olumsuz etkileri hızlandırmaktadır [9,38].

### **5.5.6. Öğütme atmosferi**

Normal hava ortamında metal tozların öğütülmesi malzemelerin kirlenmesine neden olur. Bu durumu engellemek amacıyla öğütme işlemi ya vakum ortamında ya da argon, helyum gibi gazlar gönderilerek toz partiküllerin oksitlenmesi engellenir.

Özel amaçlar için öğütme sırasında farklı atmosferlerde kullanılmıştır. Nitrür oluşturmak için azot ve amonyak yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrojen gazı ise hidrid üretmek amacıyla kullanılmaktadır [9].

### **5.5.7. Öğütme süresi**

Kullanılan değirmen tipine bağlı olarak en önemli işlem parametrelerindendir. Gerekli olan MA öğütme süresi kullanılan değirmen tipine, öğütme yoğunluğuna, bilye toz oranına öğütme sıcaklığına, tozların kaynaklanma-kırılma eğilimine bağlı olarak değişir. Kullanılan bu parametreler her bir toz parametresi için ayrı ayrı belirlenir. Toz gereğinden fazla öğütülürse istenmeyen fazların oluşacağı ve kirlenmelerin artacağı unutulmamalıdır [9,43].

### **5.5.8. Öğütme hızı**

Yüksek devirli çalışan değirmenlerde toz enerji girişi daha fazla olur. Bu yüzden değirmen dizaynında çalışabileceği maksimum devir sınırı göz önünde bulundurulur. Örneğin, geleneksel bilyeli değirmende dönme hızı artışı bilyelerin hareket hızını artırır ve belli bir hızın üzerinde, bilyelerle kabın duvarına yapışarak çarpma kuvveti ile aşağı düşmeyecektir. Bu yüzden, maksimum hızda, maksimum çarpma enerjisini üretmek amacıyla bilyelerin maksimum yükseklikten aşağı düşmesi için kritik hız değerinin biraz altında olmalıdır. Bir diğer hususta öğütme hızı ortamın sıcaklığını

etkilemektedir. Farklı tür değirmenlerde açığa çıkan sıcaklıkta sıcaklık değışiklik göstermektedir. Sıcaklığın olumsuz etkilerinden kaçınmak için sistemin tümüne soğutma sıvısı veya gazı kullanılabilir [9,36].

#### **5.5.9. İşlem kontrol kimyasalı**

Mekanik alaşımlama esnasında tane boyutunu küçültmek, ya da kontrol edebilmek amacıyla çeşitli işlem kontrol elemanları kullanılmaktadır. Metal olmayan (organik) bu maddelerin ilavesi öğütme davranışını önemli derecede etkiler. Böyle malzemeler tanelerin yüzeylerinde film oluşturarak soğuk kaynaklaşmayı kontrol altına alır, tane büyümesini ve safsızlıkların topaklaşmasını önler. İşlem kontrol elemanları olarak çeşitli yağlar, sabunlar, alkoller ve bazı asitler (stearik asit gibi) yaygın şekilde kullanılmaktadır [43].

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 6.1. Malzeme ve Yöntemler

#### 6.1.1. Kullanılan malzemeler

Metalik köpük üretiminde ECKA firması tarafından üretilen AS 91/S kodlu %99,7 saflıktaki alüminyum tozları, Atlantic Equipment Engineers firmasından temin edilen %99,9 saflıktaki silisyum tozları ve Magnezyum ve Metal Tozları Endüstri A.Ş.'nden temin edilen tozları %99,9 saflıkta magnezyum tozları kullanılmıştır. Köpürtücü madde olarak Aldrich firmasından temin edilen %98 saflıktaki TiH<sub>2</sub> tozları kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak ise Aldour firmasından temin edilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiC tozları kullanılmıştır. Metalik köpük üretmek için kullanılan tozlar ve genel özellikleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. MA işlemine tabi tutulacak tozların genel özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Ergime derecesi (°C)	Toz Boyutu (µm)
Al	2,7	660	<160
Si	2,33	1410	<10
Mg	1,74	650	<10
TiH <sub>2</sub>	3,91	<400	<45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,97	2040	<12
SiC	3,1	2730	<8

Yukarda belirtilen tozlar Çizelge 6.2'de verilen oranlarda 1/10000 g hassasiyetinde Precisa marka hassas terazi kullanılarak hazırlanmıştır.

Çizelge 6.2. Köpük üretimi için belirlenen toz karışım oranları

Deney Sırası	Al (%)	Si (%)	SiC (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	TiH <sub>2</sub> (%)	Mg (%)
1	96,6		2			
2	94,6		4		0,8	0,6
3	92,6		8			
4	89,6		2			
5	87,6	7	4		0,8	0,6
6	85,6		8			
7	89,6			2		
8	87,6	7		4	0,8	0,6
9	85,6			8		
10	89,4				1	
11	89,2	7		2	1,2	0,6

### 6.1.2. Tozların karıştırılması

Mekanik alaşımlama yapmadan önce Çizelge 6.2’de verilen oranlarda karıştırılan tozlar üç boyutlu karıştırma yapabilen turbula cihazında 30 dakika süreyle homojen karışım elde etmek amacıyla karıştırıldı. Resim 6.1’de turbula cihazı görülmektedir.



Resim 6.1. Üç boyutlu karıştırma yapabilen turbula cihazı.

### 6.1.3. Karışım tozların MA yapılması

MA işlemi Szegvari dikey tip atritörde, argon atmosfer koruması altında, Ø10 mm'lik çelik bilye kullanılarak, 1/10 toz bilye oranında, 15 dakika, 30 dakika, 60 dakika ve 120 dakikalık sürelerde, 350 dev/dak. hızda yapılmıştır. Resim 6.2'de Szegvari tip atritör görülmektedir. MA işlemi esnasında Al tozun hem hazne çeperine hem de bilyelere hızlı bir şekilde sıvandığı görülmüştür. Bu sıvanmayı engellemek için %1 oranında çinko stearat tozu kullanılmıştır.



Resim 6.2. Szegvari dikey tip atritör

### 6.1.4. Tozların preslenmesi

Mekanik alaşımlanmış tozların preslenmesi 30 mm çapındaki kalıp içerisinde tek yönlü olarak 450 MPa basınç altında yapılmıştır. Resim 6.3'te 220 ton kapasiteli pres görülmektedir.



Resim 6.3. 220 ton kapasiteli pres

#### 6.1.5. Preslenmiş tozların sinterlenmesi ve ekstrüzyon yapılması

Sinterleme işlemi öncesinde MA esnasında kullanılan çinko stereat tozları 300°C 'de buharlaştırılarak yapıdan uzaklaştırılmıştır. Daha sonra 530°C'de 2 saat süreyle sinterleme işlemi yapılmıştır. İşlemin akabinde 30 mm çapındaki blok numunelere 1/3 oranında ekstrüzyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ekstrüzyon işlemi 10 mm çapındaki malzemeyi silindir yüzeylerden 3 aşamada geçirilerek 5 mm'lik levha haline getirilmiştir. Bütün ısıl işlemler özel olarak tasarlanmış Proterm marka fırında gerçekleştirilmiştir. Fırın Resim 6.4'te görülmektedir.



Resim 6.4. Özel olarak metalik köpük üretimi için tasarlanmış protherm marka fırın

### 6.1.6. Haddelme ve köpürtme işlemi

Ekstrüzyon edilmiş numuneler haddelme işlemi için 500°C’de 30 dakika süreyle ısıtılmış ve 10 mm çapındaki numuneler haddelenerek 5 mm kalınlığında köpürtmeye hazır (preform) numuneler hazırlanmıştır. Köpürtme işlemi silisyumlu malzemelerde 690°C ve 7 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Silisyum içermeyen numuneler ise 710°C’de 10 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler Çizelge 6.3’te görülmektedir.

Çizelge 6.3. Deneysel çalışmalar

Malzeme	MA Süresi (dak.)	Köpürtme Sıcaklığı (°C)	Köpürtme Süresi (dak.)
Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%2SiC	15, 30, 60, 120	710	10
Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%4SiC			
Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%8SiC			
Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2SiC	15, 30, 60, 120	690	7
Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%4SiC			
Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%8SiC			
Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15, 30, 60, 120	690	7
Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Al-%1TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15, 30, 60, 120	690	7
Al-%1,2TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			

## 6.2 Karakterizasyon

### 6.2.1. Yoğunluk hesabı

Köpük malzemelerin yoğunluğunu belirlemek amacıyla Arşimet prensibi esasına göre ölçümler yapılmıştır. Ölçüm için 0,0001 g hassasiyetinde Sartorius cp 2243 marka yoğunluk ölçme cihazı kullanılmıştır. Resim 6.5'te yoğunluk ölçmede kullanılan cihaz görülmektedir. Yoğunluğu belirlemek için numunenin serbest haldeki ağırlığı ve yoğunluğu bilinen bir sıvı (su) içerisindeki ağırlığı ölçülmüştür. İlk ölçüm ile numunenin ağırlığı ve ikinci ölçüm ile kullanılan sıvıya oranla hacmi belirlenerek bu sonuçların oranlamasıyla da yoğunluk değeri belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde ölçüm sıvısı olarak su kullanılmıştır. Arşimet prensibine göre yoğunluk aşağıdaki formüle göre hesaplanır.



Resim 6.5. Sartorius cp 2243 marka yoğunluk ölçme cihazı

$$V^* = m^* - m_s \quad (6.1)$$

$$\rho^* = \frac{m^*}{V^*} \quad (6.2)$$

Bu eşitliklerde;

$V^*$ : Köpüğün hacmi,

$m^*$  : Köpüğün havadaki ağırlığı,

$m_s$ : köpüğün su içerisindeki ağırlığı,

$\rho^*$  : Köpüğün yoğunluğunu ifade etmektedir.

### 6.2.2. Lineer genişleme

$$\text{Lineer Genişleme ( LG )} = \left( \frac{V^*}{V} - 1 \right) \times 100 \quad (6.3)$$

Lineer genişleme oranı ise Eş. 6.3'te verilen formüle göre yapılmıştır.

Bu formülde;

$V^*$ : Köpüğün hacmi,

$V$ : Köpürtme öncesi numunenin ilk hacmini ifade etmektedir.

### 6.2.3. Gözeneklilik oranı

Gözeneklilik oranı ise Eş. 6.4'te verilen formüle göre yapılmıştır.

$$\text{Gözeneklilik oranı} = \left( 1 - \frac{V}{V^*} \right) \times 100 \quad (6.4)$$

Bu formülde;

$V^*$ : Köpüğün hacmi

$V$ : Köpürtme öncesi numunenin ilk hacmini ifade etmektedir.

#### **6.2.4. Makro ve mikro yapı incelemesi**

Yoğunlukları ve lineer genişlemeleri hesaplanan numuneler makro yapı incelemesi yapmak amacıyla ortadan ikiye kesilip, 400'lük zımparayla su ortamında zımparalanmış ve dijital fotoğraf makinesiyle görüntüleri alınarak MA süresinin gözenek dağılımına etkisi incelenmiştir. Daha sonra bu numuneler 600- 800-1000-1200'lük zımparalarda su altında zımparalandıktan sonra keçelerde 3 µm' lik elmas pasta kullanılarak parlatma yapılmıştır. Üretilen metalik köpüklerin gözenek duvarlarında dağılmış partikül parçacıkların matris malzeme ile ara yüzeyleri JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

Bu çalışmada yapılan bütün deneyler ve metalografik incelemeler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

## 7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Mekanik alaşımlanmış tozlardan homojen dağılımlı köpük üretimi için tozlar 30 dakika süreyle üç eksenli karıştırma yapabilen turbula cihazında karıştırılmıştır. Daha sonra Szegvari tip mekanik alaşımlama cihazında, 1/10 toz bilye oranında ve argon atmosferi altında, 350 dev/dak. hızda, 15, 30, 60, 120 dakika sürelerde MA yapılmıştır. MA yapılmış tozlar 450 MPa basınç altında kalıp içerisinde tek yönlü olarak preslenmiştir. Preslenen tozlar 550°C sıcaklıkta ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra 500°C’ de haddelenerek köpürmeye hazır levha şeklinde numuneler elde edilmiştir. Si içerikli malzemeler 690°C’de 7 dakika süreyle ve Si içermeyen malzemeler ise 710°C’de 10 dakika köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Köpük malzemeler lineer genişleme, yoğunluk, gözeneklilik oranı, mikro ve makro boyutta incelemeler yapılmıştır.

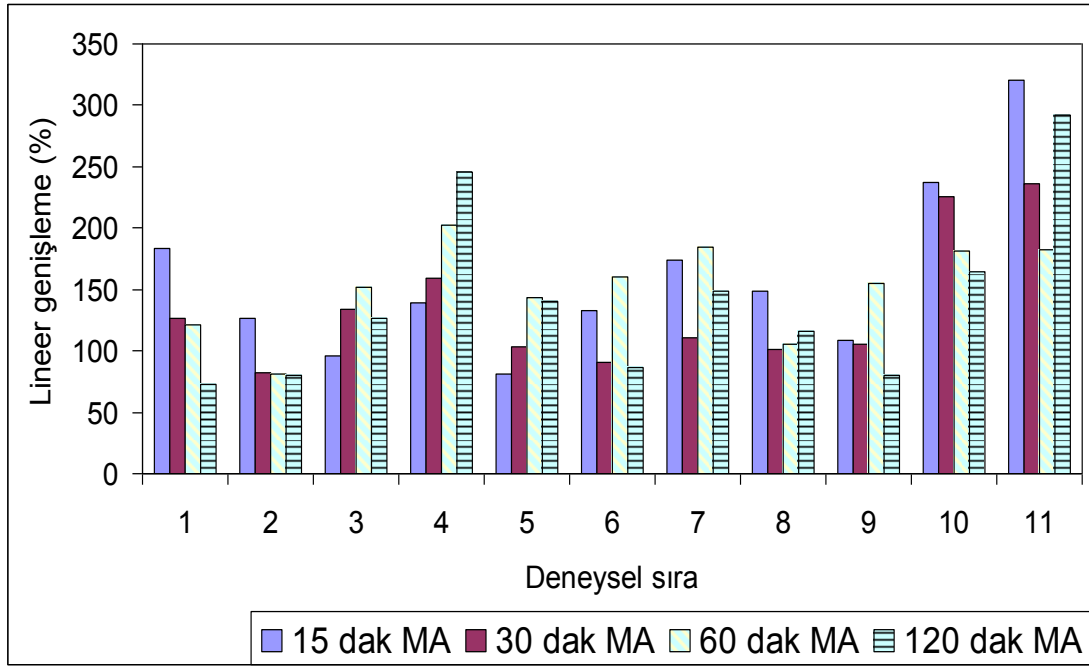
### 7.1. MA Süresinin % Lineer Genişlemeye Etkisi

Çizelge 7.1’de deney sırasına göre 15, 30, 60, 120 dakikalık MA işlemine tabi tutulmuş tozlar ve bu tozlardan elde edilen köpük malzemelerin lineer genişleme oranları görülmektedir. Tabloya genel olarak bakıldığında MA süresi artışıyla lineer genişlemede bir azalma ve TiH<sub>2</sub> miktarının artışıyla da lineer genişlemede bir artış olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.1. MA yapılmış tozlar ve üretilen köpüklere ait lineer genişleme tablosu

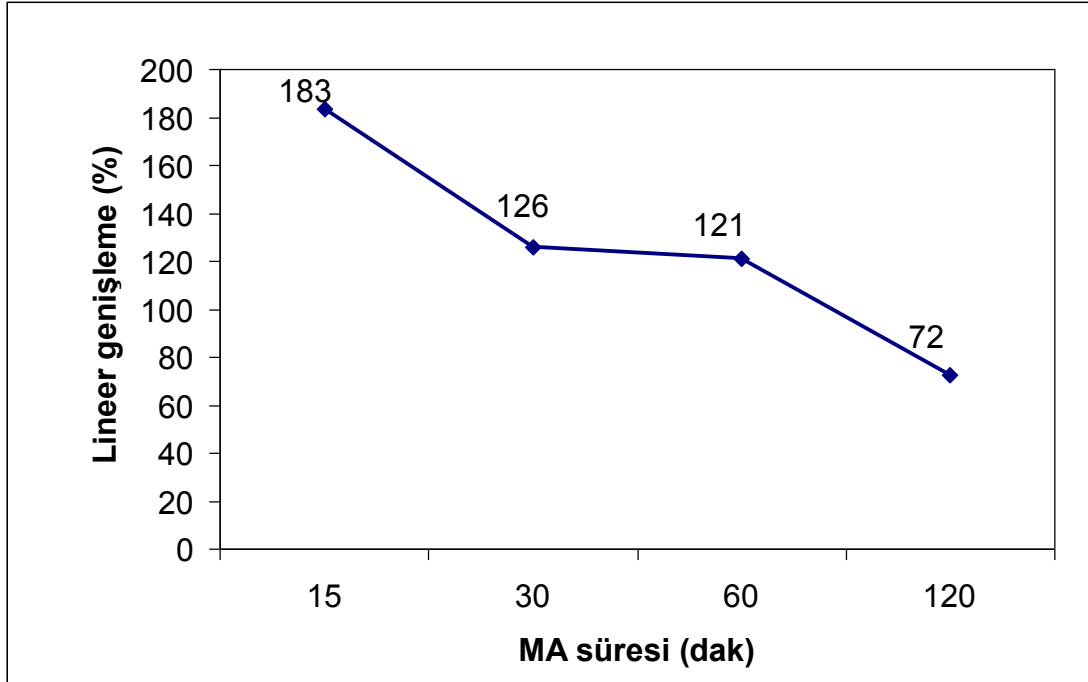
Deney Sırası	Malzeme		MA Süresine Bağlı % Lineer Genişleme			
			15 dak.	30 dak.	60 dak.	120 dak.
1	Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-	%2SiC	183	126	121	72
2		%4SiC	127	82	81	80
3		%8SiC	96	134	152	127
4	Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si	%2SiC	139	159	202	246
5		%4SiC	81	103	143	140
6		%8SiC	133	91	161	87
7	Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si	%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	174	111	185	148
8		%4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	149	101	106	116
9		%8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	108	106	155	80
10	Al-%1TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si	%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	237	225	182	165
11	Al-%1,2TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si		320	237	183	292

Şekil 7.1’de her bir deney sırasına ait tozlardan elde edilen köpük malzemelerin % lineer genişlemeleri çubuk grafik halinde verilmiştir. Yapılan deneyler kendi içerisinde aşağıda değerlendirilmiştir.



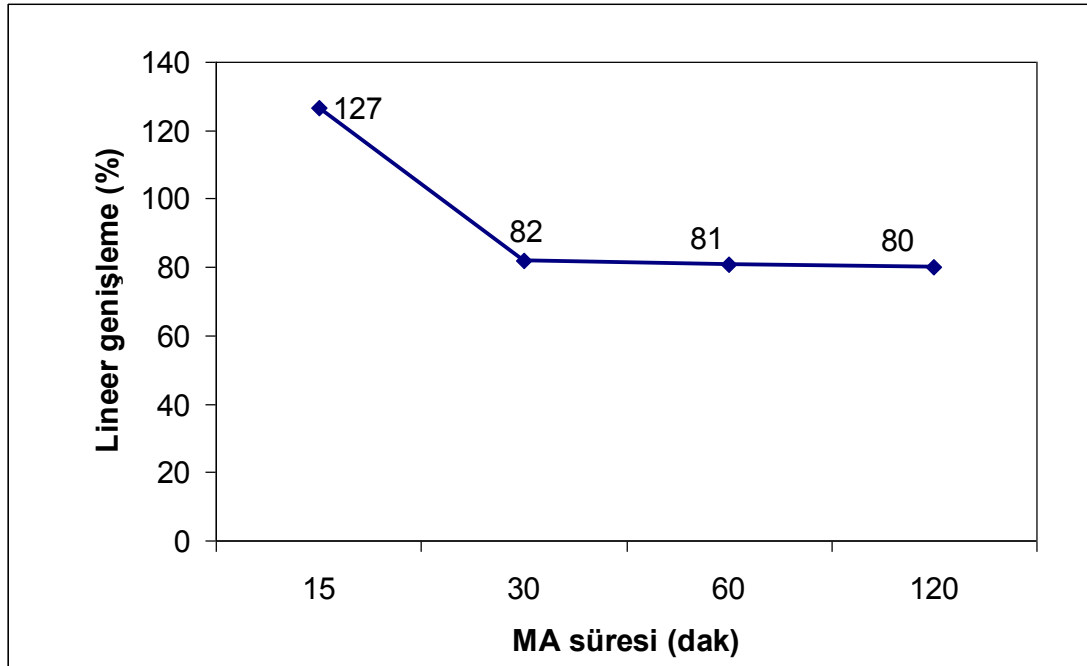
Şekil 7.1. Deney sırası gruplarına ait lineer genişleme oranları

1. deney sırası Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%2SiC toz oranlarından oluşmaktadır. Bu tozlara ait köpük malzemelerin lineer genişlemesi Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de verilmiştir. Burada 15 dakika MA yapılmış tozlara ait köpük malzemenin %183’lük genişlemeye sahip olduğu görülmektedir. MA süresini 30 dakikaya getirdiğimizde ise köpük malzemenin lineer genişlemesi %126 olduğu Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de görülmektedir. Aynı şekillerde MA süresi sırasıyla 60 ve 120 dakikaya çıktığında lineer genişlemeleri de %121 ve %72’lik değerlere düştüğü görülmektedir. Köpük malzemelerin lineer genişlemesindeki bu azalma toz karışımı içerisindeki TiH<sub>2</sub>’de meydana gelen bozulmalar ve özellikle de alaşımlama sırasında ortaya çıkan kirlenmelerin sebep olduğu düşünülmektedir. Bu kirlenmelerin TiH<sub>2</sub>’nin ayrışma sıcaklığını artırmasından dolayı lineer genişleme oranı düşük olmuştur. Uzun ve Türker [44] yaptıkları çalışmada küresel şekilli metalik köpük üretmek amacıyla toz malzemeler içerisine değişik oranlarda SiC tozları kullanmışlar ve %2 SiC ilave ettikleri köpük malzemenin lineer genişlemesinin yaklaşık %400 olarak tespit ettiklerini belirtmişlerdir. MA esnasında kirlenmeler ve TiH<sub>2</sub>’deki bozulmalar MA işleminin doğal bir sonucu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.2. Al-0,8 TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-2SiC tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme

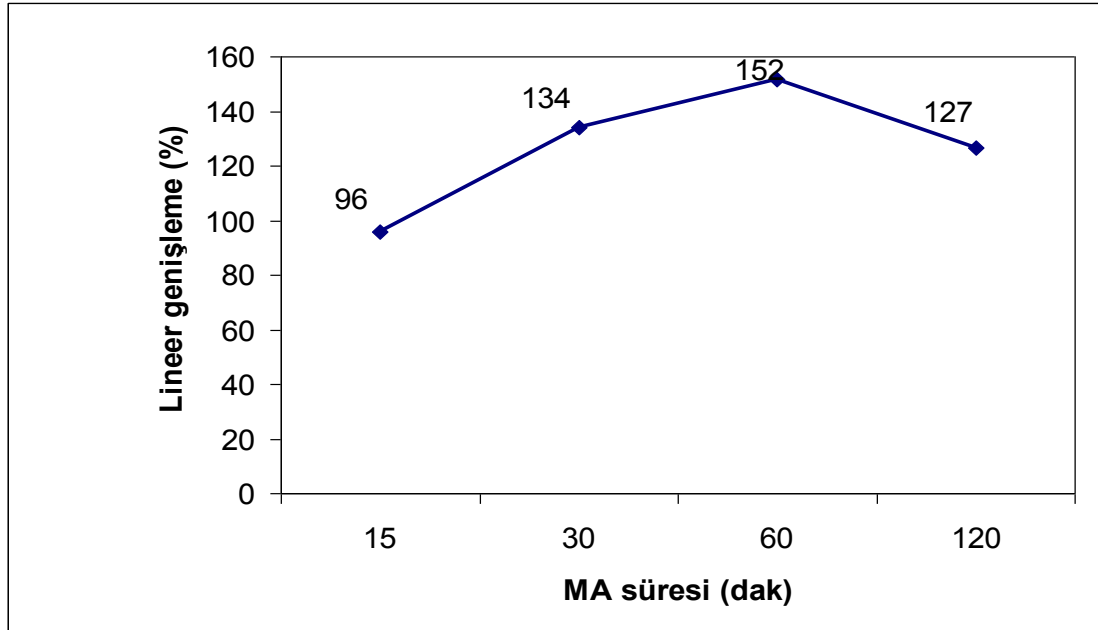
Al-0,8TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-4SiC tozları MA işlemine tabi tutularak elde edilen metalik köpüklerin lineer genişleme oranına ait grafik Şekil 7.3'te verilmiştir. SiC oranının %2'den %4'e çıkarılması köpük malzemenin lineer genişlemesinde kısmen olumsuz etki göstermiştir. MA süresi 15 dakika olarak yapılan tozlardan elde edilen köpük malzemenin lineer genişlemesi %127 olarak hesaplanmıştır. Mekanik alaşımlama süresini 30 dakika, 60 dakika ve 120 dakika yapıldığında ise lineer genişlemedeki değerler düşerek sırasıyla %82, %81, %80 olarak elde edildiği görülmektedir. Şekle baktığımızda 15 dakikalık MA'dan sonra lineer genişlemede hızlı bir düşüş ve diğer MA sürelerinde ise lineer genişlemenin kısmen aynı kaldığı görülmektedir. MA esnasında yapıda kirlenmeler ve TiH<sub>2</sub>'deki bozulmalar ilk 15 dakika içerisinde çok hızlı bir şekilde gösterdiği diğer sürelerde ise bunun fazla bir etkisi olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 7.3. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%4SiC tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme

SiC miktarı %8'e çıktığında %2SiC ve %4SiC'lü malzemelerden farklı bir lineer genişleme meydana geldiği Şekil 7.4'te görülmektedir. 15 dakika MA işleminde lineer genişleme oranı %96 olduğu ve 1. ve 2. deneylerle de kıyaslandığında en düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Burada SiC miktarının artışı malzemenin köpürme oranı üzerinde olumsuz etki ettiği ve istenilen değerden uzaklaştığı görülmektedir. MA süreleri artırıldığında köpük malzemelerin lineer genişlemesinde de bir artış olduğu görülmektedir. Bu değerler 30 dakika MA'da %134'e çıktığı, MA süresi 60 dakikada ise %152'lik değer ile en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. Aynı şekilde 120 dakikalık MA'da ise lineer genişlemede belirli oranda azalarak %127'ye düştüğü görülmektedir. 1., 2. ve 3. deneylerde 120 dakikalık MA işlemine tabii tutulmuş tozlardan elde edilen köpük malzemelerin lineer genişlemelerine bakıldığında sürekli bir artış olduğu Şekil 7.1'den de görülmektedir. Ancak Al esaslı köpük malzemeler için bu lineer genişleme oranları yeterli seviyede değildir. Uzun ve Türker [44] yaptıkları çalışmada SiC oranındaki artışın % 8'den sonrası köpük için fazla olduğunu ve aşırı oranda SiC'ün, köpürme esnasında gözenek duvarlarında meydana getirdiği dayanım artışının, köpürme sırasında

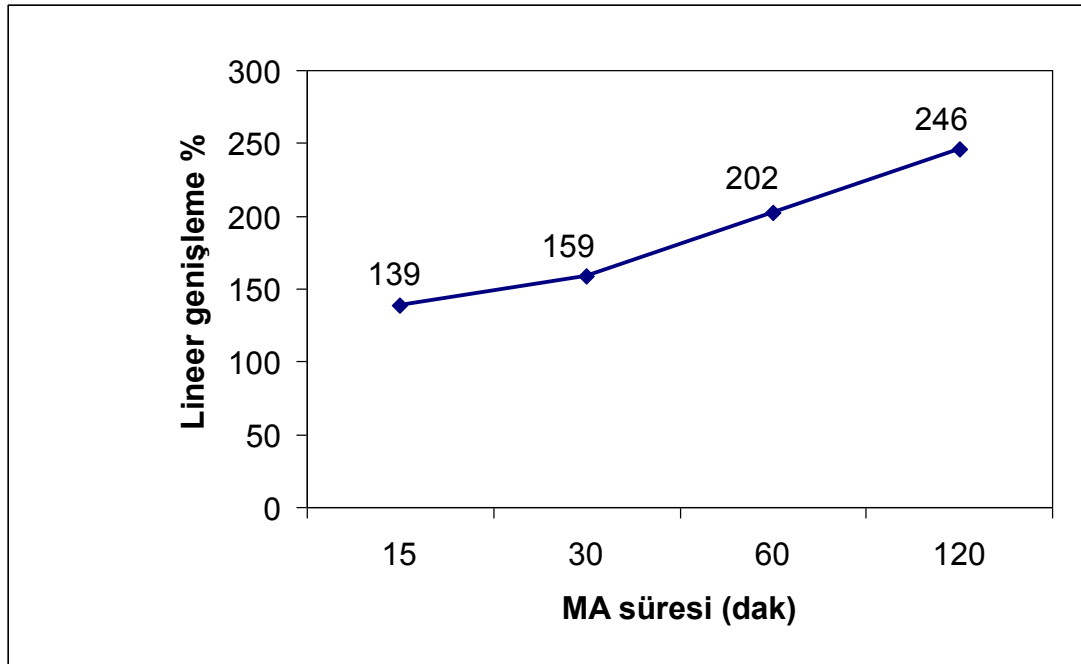
ayrışan hidrojen gazının genişmeyi sağlamak üzere hücre duvarlarında oluşturduğu basıncı aşarak köpürmeyi engellediğini belirtmişlerdir. Burada ise MA süresinin artışı ile birlikte SiC oranındaki artış köpük malzeme üzerinde benzer sonuçlar meydana getirdiği düşünülmektedir.



Şekil 7.4. Al-0,8-TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-8SiC tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme

Malzemelerde hem homojen gözenek yapısını hem de uygun lineer genişleme ve gözeneklilik oranını elde etmek için değişik parametreler denenmiştir. Bundan sonraki deneylerde ise toz karışımı içerisinde Si ilave edilip çalışmalara devam edilmiştir. Uzun ve Gökmen [45] yaptıkları çalışmada Al tozları içerisinde %2-4-8-12-16 Si ilave ettiklerini ve %8 Si'lu köpük malzemenin lineer genişlemesi %287'lik değer ile en yüksek lineer genişlemeye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Esmaelzadeh ve arkadaşları [46] ise yaptıkları çalışmada AlSi7 toz karışımını ve bu karışımın içerisinde %3 SiC ilave ederek elde ettikleri köpük malzemelerin lineer genişlemesini yaklaşık %500 olarak hesapladıklarını belirtmiştir. Şekil 7.5'e incelendiğinde Si ilavesinin köpük malzemenin lineer genişleme üzerindeki etkisi görülmektedir. İlk üç deneyden daha verimli sonuçlar alındığı bu kısımda söylenebilir. Şekil 7.5'te 15 dakika MA yapılmış tozlara ait köpük malzemenin lineer genişlemesi %139 ve MA süresinin artmasıyla lineer genişlemedeki bu değerlerin de attığı görülmektedir. MA

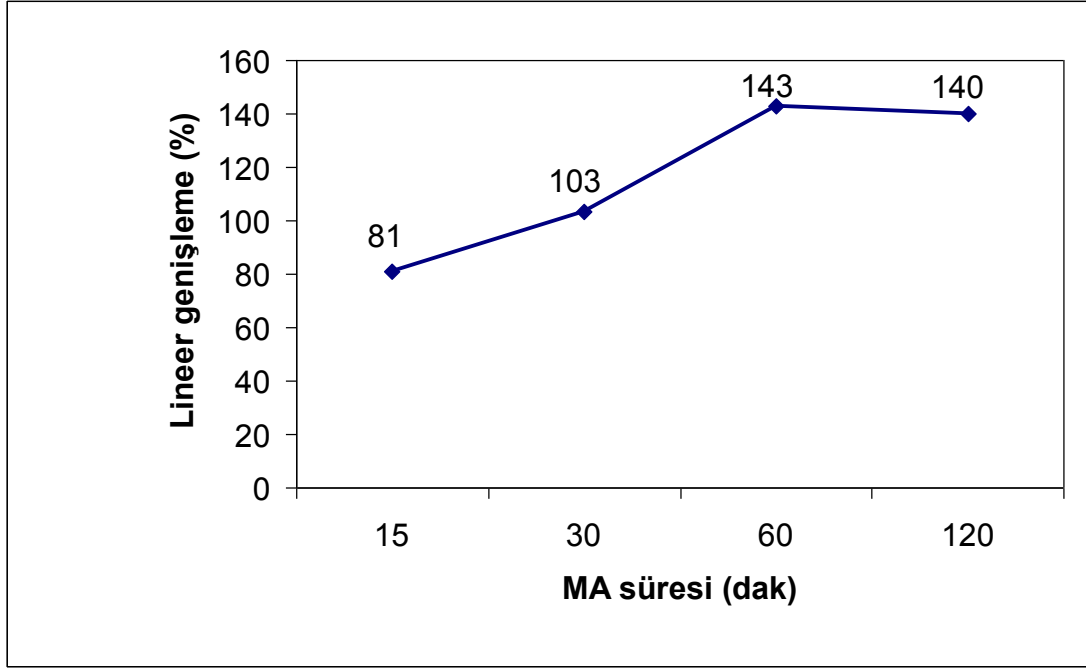
süresi 30-60-120 dakikaya getirildiğinde lineer genişleme sırasıyla %159- %202- %246'lık değerler aldığı aynı şekilde görülmektedir. Si ilavesinin Al malzemede ötektik noktayı aşağı çektiği, akışkanlığı artırdığı ve buna bağlı olarak daha iyi köpürme gerçekleştiği söylenebilir. MA süresi de bu malzemede daha homojen toz karışımı sağladığı ve buna bağlı olarak da lineer genişlemede bir artış olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.5. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2SiC tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme

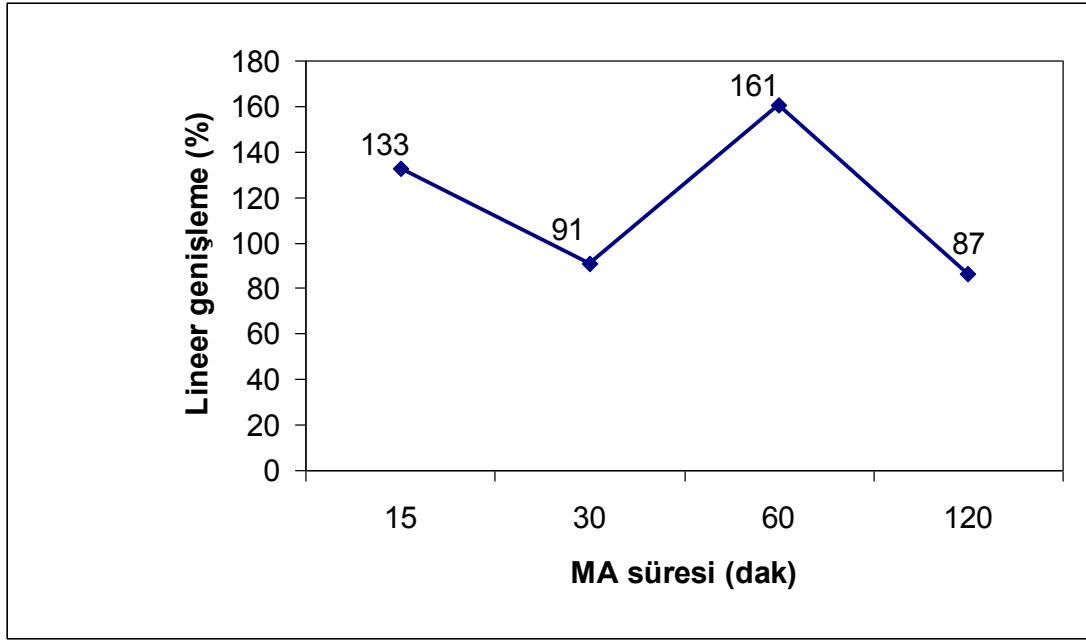
Şekil 7.6'da ise Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%4SiC tozların 15-30-60-120 dakikalık MA yapıldıktan sonra elde edilen köpük malzemelerin lineer genişlemesi görülmektedir. Bu malzemelere ait lineer genişlemelerin ise sırasıyla %81-%103-%143-%140'lık değerlerde olduğu görülmektedir. Köpük malzemelerin lineer genişlemedeki küçük farklılıklar fazla önem arz etmemektedir, aynı ortamda köpürtme işlemi gerçekleştirilmiş aynı özelliklerdeki malzemelerde de bu farklılıklar görülmektedir. Bu malzemede de MA süresindeki artışa paralel olarak 60 dakikaya kadar bir artış, daha sonra küçük bir azalma görülmüştür. Uzun alaşımlama süresi

kontanimasyona sebep olduğu için 120 dakikada düşme görülmüştür. Bu düşüşte SiC partikülleri de önemli rol oynamaktadır.



Şekil 7.6. Al-%0,8 TiH<sub>2</sub>,-%0,6Mg-%7Si-%4SiC tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme

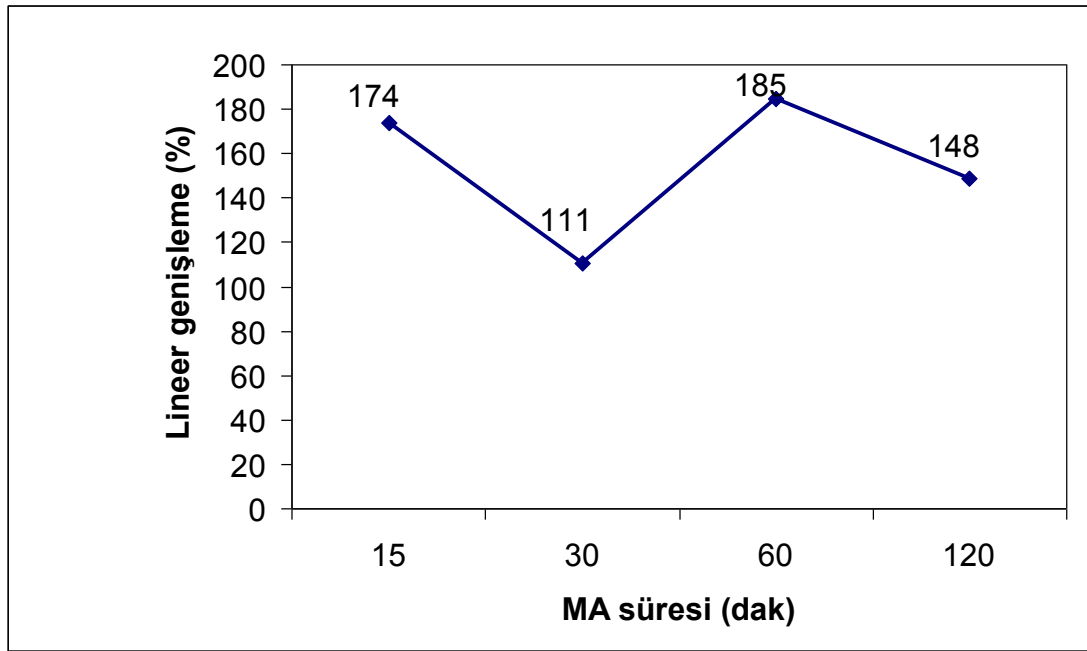
SiC oranı %4'ten %8'e çıkartıldığında köpük malzemenin lineer genişlemesinde dalgalanmalar olduğu Şekil 7.7'de görülmektedir. Burada 15 dakikalık MA yapılmış tozlara ait köpük malzemeler %133 genişlediği, MA süresi 30 dakika olduğunda lineer genişleme hızlı bir düşüşle %91 değerine gerilediği görülmektedir. Aynı şekil üzerinden devam edecek olursak MA süresi 60 dakikada %161, 120 dakikada ise %87 olduğu görülmektedir. Şekil 7.1'de 4.-5.-6. deney guruplarına bakılacak olursa MA süresinin artışıyla lineer genişlemede belirgin şekilde azalma olduğu görülmektedir.



Şekil 7.7. Al-%0,8 TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%8SiC tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme

Bundan sonraki deneysel çalışmalarda takviye elemanı olarak %2-4-8 oranlarında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılmıştır. MA süreleri ve buna bağlı olarak köpük malzemelerin lineer genişlemesi Şekil 7.8’de görülmektedir. Burada 15 dakika MA yapılmış numunenin %174 lineer genişlemeye sahip olduğu görülmektedir. Karışım tozları 30 dakika MA yapıldığında ise köpük malzemenin lineer genişlemesinin belirgin bir şekilde azalarak %111’e gerilediği görülmektedir. MA süresi artırılıp 60 dakikaya çıkarıldığında ise köpük malzemenin lineer genişlemesi %185’e çıkmıştır. 120 dakika MA yapılmış tozlardan elde edilen köpük malzemenin lineer genişlemesinde tekrar bir düşüş olduğu ve %148’e gerilediği görülmektedir. Lineer genişlemedeki bu değişimlerin muhtemel sebebi MA süresine bağlı olarak değişen toz tane boyutu, özellikleri ve bileşimlerindeki farklılık olduğu düşünülmektedir. MA esnasında tozlar deformasyon, soğuk kaynak ve kırılma mekanizmaları etki etmektedir. Arık ve arkadaşları [47] yaptıkları çalışmada, MA için kullandıkları Al ve Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> tozlarını 0,5- 1- 2,5 ve 7,5 saat MA yapmışlar ve 0,5 saatlik MA’da ortalama toz boyutunun 150 µm’den 82 µm’ye düştüğünü, 1 saatlik MA’da ise ortamın ısısından kaynaklanarak toz boyutunda hızlı büyüme göstererek 172 µm’ye çıktığını ve 2,5 saatlik MA’da ise toz boyutunun 53 µm’ye düştüğünü belirtmişlerdir. Değişen toz

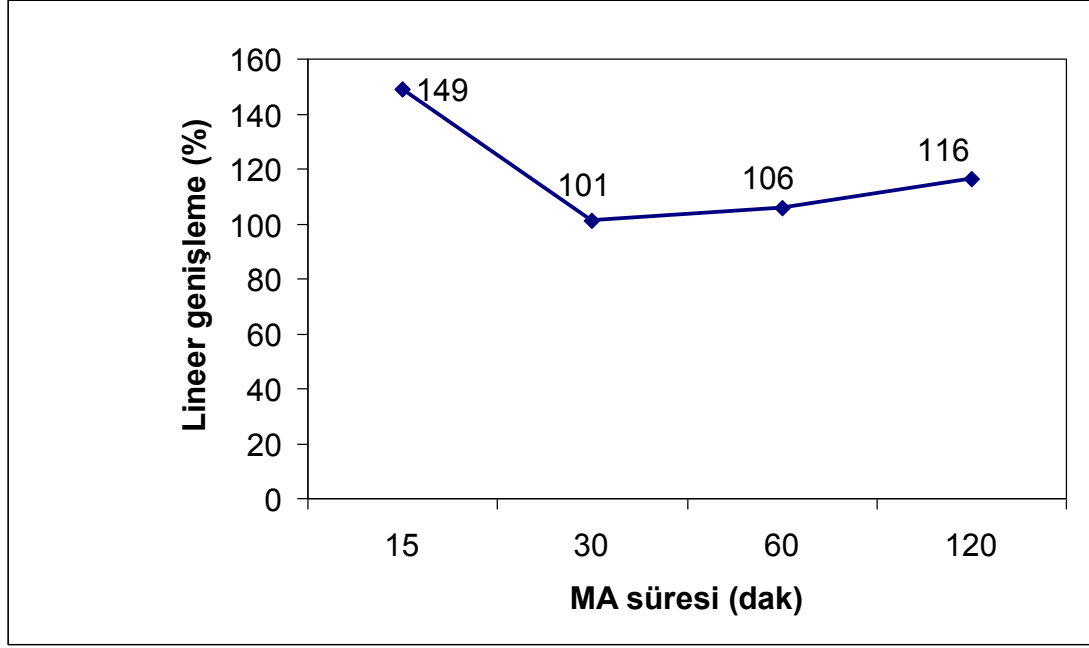
boyutları ve sertliği presleme sonrası elde edilen blok numunenin gözeneklilik oranını etkilemektedir. Numunelerdeki gözeneklilik oranı, köpürme esnasında köpürtücü maddeden ayrılan hidrojen gazının kaçmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla MA süresine bağlı olarak değişen toz boyutunun lineer genişlemeyi etkilediği düşünülmektedir. Tozlar belirli bir sertliğe ulaştığında presleme problemi oluşmaktadır. Bu malzemelerde hem gözenek fazla hem de çatlak fazla olmakta ve bu da köpürtmeyi olumsuz etkilemektedir.



Şekil 7.8. Al-%0,8 TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg- %7Si- %2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme

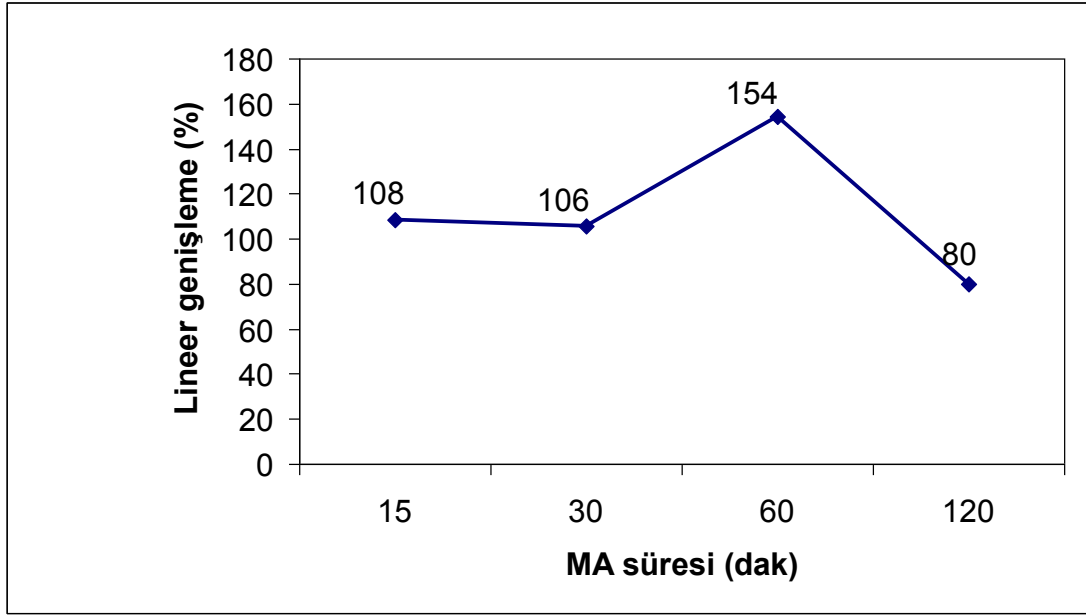
Kullanılan takviye elamanı oranı %2'den %4'e çıkarıldığında köpük malzemelerin lineer genişlemelerinde azalmalar olduğu Şekil 7.9'da görülmektedir. MA süresine bağlı olarak elde edilen köpük malzemelerdeki lineer genişleme oranları sırasıyla %149 - %101 - %106 - %116 olarak bulunmuştur. Buradaki lineer genişlemeler ile Şekil 7.3'teki değişim benzerlik göstermektedir. Sarıtaş ve arkadaşları [48] bütün mekanik toz üretim tekniklerinde olduğu gibi mekanik alaşımlamada da kirlilik sorunu oluşabileceğini belirtmişlerdir. Burada lineer genişlemedeki azalmanın malzemedeki kirlenmelerden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Bunlara

ilave olarak artan takviye oranları belli bir değerden sonra köpürtmeyi olumsuz yönde etkilemektedir.



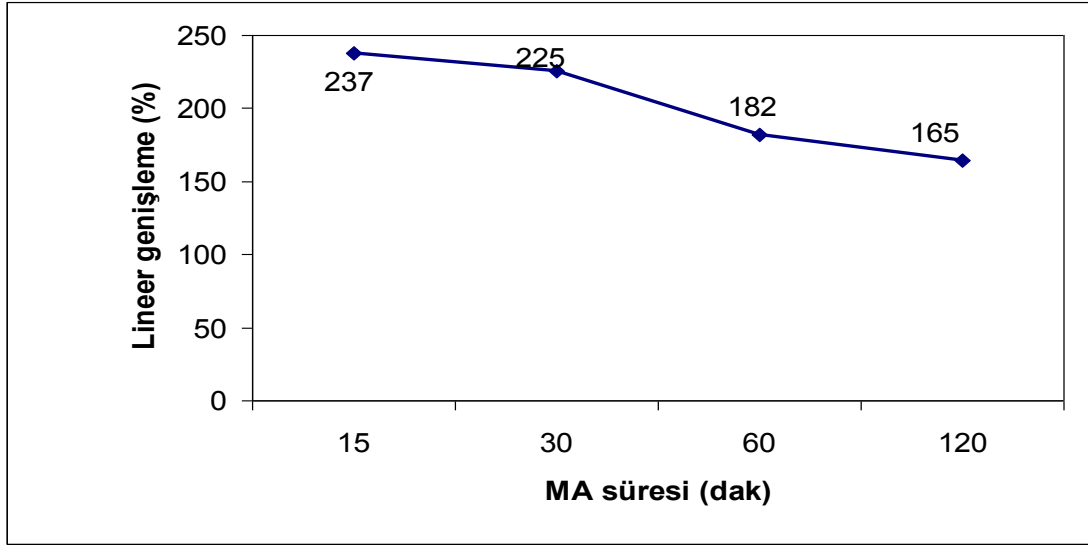
Şekil 7.9. Al-0,8 TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-7Si-4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme

Şekil 7.10'da 15 dakika MA yapılmış tozların köpürtülmesiyle elde edilen lineer genişlemenin %108'lik genişlemeye sahip olduğu görülmektedir. Tozlar 30 dakika MA yapıldığında ise lineer genişlemede fazla bir değişiklik meydana gelmediği ve %106 olduğu görülmektedir. Aynı şekilde MA süresi 60 dakikaya çıkarıldığında ise lineer genişlemede belirgin bir oranda artış olduğu ve %154'lük değere çıktığı görülmektedir. 120 dakika MA'da ise köpüğün lineer genişlemesi grup içerisinde en düşük değere gerilediği ve %80 olduğu görülmektedir. Takviye elemanı olarak kullanılan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı arttıkça köpük malzemelerin lineer genişlemelerinde kısmen bir azalma olduğu Tablo 7.1 ve Şekil 7.1'de de görülmektedir. Ancak burada MA süresinde ve takviye elemanı oranındaki artışla lineer genişlemelerdeki azalmaların muhtemel sebepleri köpük oluşumu esnasında takviye elemanın sınırlayıcı kuvvet olarak etki etmesi, viskozitenin artması, TiH<sub>2</sub>'deki bozulmalar ve yapı içerisindeki kirlenmeler etki ettiği düşünölmektedir.



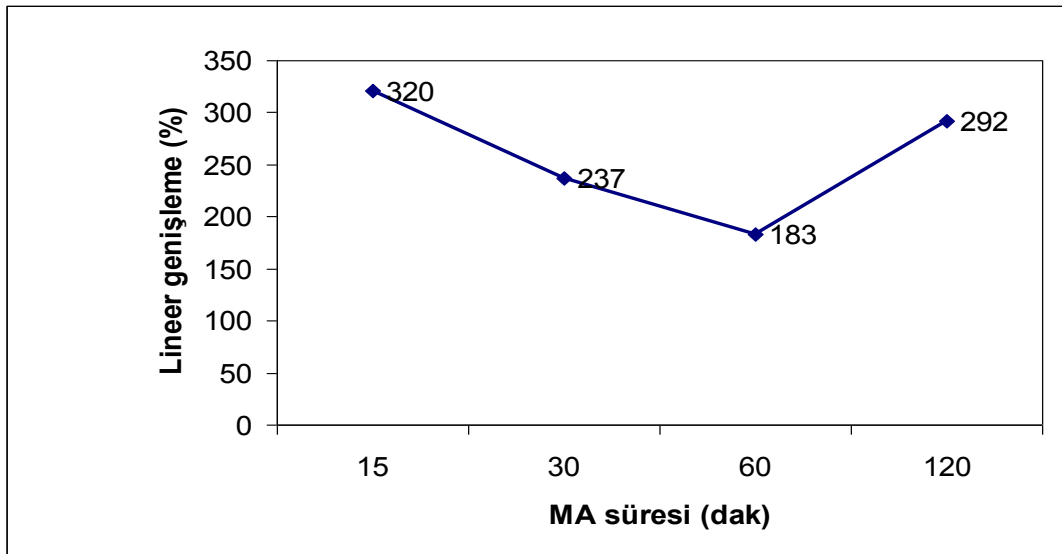
Şekil 7.10. Al-0,8TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-7Si-8Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme

Yapılan bu deneysel çalışmalar içerisinde homojen gözenek yapısına sahip köpük malzemeler %2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli malzemeler olduğu tespit edilmiştir. Ancak malzemelerin lineer genişlemeleri, yoğunlukları ve gözeneklilik oranları yeterli düzeyde olmadıkları için bundan sonraki çalışmalarda %2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli malzemelerde TiH<sub>2</sub> miktarını %1 ve %1,2'ye çıkarılarak iki ayrı grupta deneysel çalışma yapılmıştır. MA yapılmış Al-1TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-7Si-2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemelerin Şekil 7.11'de verilen lineer genişlemeleri incelendiğinde, fark edilir bir artış olduğu görülmektedir. 15 dakikalık MA yapılmış tozlardan elde edilen köpük malzemelerin lineer genişlemesi %237 olduğu görülmektedir. 30 dakika MA lineer genişlemede fazla bir değişiklik gözlenmezken 60 ve 120 dakika MA'larda lineer genişleme sırasıyla %182 ve %165 olarak hesap edilmiştir. Türker [26] yaptığı çalışmada 690°C'de değişik oranlarda köpürtücü madde içeren köpük malzemeler üretmiş ve %1 TiH<sub>2</sub> içeren malzemenin lineer genişlemesini yaklaşık %400 olarak hesapladığını belirtmiştir.



Şekil 7.11. Al-%1TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme

Son deney gurubu olarak ise Al-%1,2 TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımı belirtilen sürelerde MA işlemi yapıp köpürtme gerçekleştirilmiş ve köpük malzemelerin lineer genişlemeleri Şekil 7.12’de verilmiştir. Burada 15 dakika MA ile elde edilen köpük malzemelerin lineer genişlemesinin tüm deney gurupları içerisinde en yüksek seviyede olduğu Şekil 7.1’den de açıkça görülmektedir.



Şekil 7.12. Al-%1,2TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait MA süresine bağlı lineer genişleme

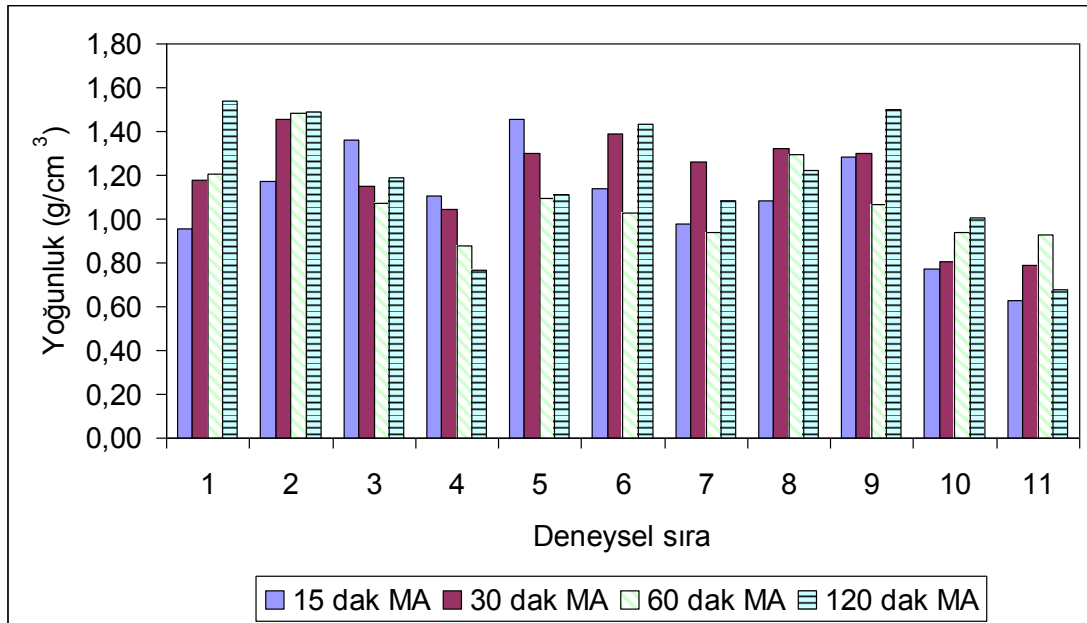
## 7.2. MA Süresinin Köpük Yoğunluğuna Etkisi

Köpük malzemelerin karakterizasyonunda kullanılan analizlerin başında lineer genişleme, yoğunluk ve gözeneklilik oranının hesaplanması gelir. Bu yöntemler birbirleriyle bağıntılı olduklarından bundan sonraki çalışmalarda yani yoğunluk ve gözeneklilik oranı hesaplamalarından elde edilen grafikler Ekler kısmında verilmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilen yoğunluk değerlendirmesi Çizelge 7.2 ve Şekil 7.13 üzerinden yapılacaktır.

Çizelge 7.2 ve Şekil 7.13 incelendiğinde ilk üç deney gruplarında Al- %0,8TiH<sub>2</sub>- %0,6Mg- %2-4-8 SiC toz karışımı kullanılmış ve karışım içerisindeki takviye elemanının artmasıyla köpük malzemenin yoğunluğunda göreceli bir artış görülmüştür. 4., 5. ve 6. deneylerde Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%2-4-8 SiC takviye elemanlı toz karışımına %7Si ilave edilmiştir. Si ilave edilen numunelerin yoğunluğunda önemli bir değişimler olmadığı aynı zamanda MA süresinin artmasıyla yoğunlukta göreceli olarak azalmalar olduğu görülmektedir. Bu durumun 4. deney sırasındaki malzemelerde daha belirgin olduğu Çizelge 7.2 ve Şekil 7.13'te görülmektedir. %7 Si ilavesi malzemelerin yoğunluğu üzerinde olumlu etki meydana getirmiştir. 7., 8. ve 9. deneylerde ise Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2-4-8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> karışım tozları 15 dakika, 30 dakika, 60 dakika ve 120 dakika MA işlemleri yapıp köpürtülmüştür. Burada en düşük yoğunluğa sahip köpük malzeme %2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli 15 dakika mekanik alaşımlanmış toz malzemelere ait köpükler olup 0,98 g/cm<sup>3</sup> olduğu Tablo 7.2'de görülmektedir. 7. 8. ve 9. deney gruplarında hem takviye elemanı olarak kullanılan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün hem de MA süresinin artmasıyla köpük malzemelerin yoğunluğunda artış olduğu görülmektedir. İlk dokuz deneye ek olarak yapılan 10. ve 11. deneyler ise 7. deneyden elde edilen homojen hücre dağılımına sahip köpük malzemelerin yoğunluğunu düşürmek amacıyla %1-1,2 TiH<sub>2</sub> kullanılmıştır. Çizelge 7.2 ve Şekil 7.13'ten de görüldüğü gibi 10. ve 11. deneylerde en düşük yoğunluk 15 dakika MA yapılmış %1,2 TiH<sub>2</sub> karışımli tozlara ait köpük malzeme olup 0,63 g/cm<sup>3</sup> değerinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.2. MA yapılmış tozlar ve üretilen köpüklere ait yoğunlukları

Deney sırası	Malzeme		MA süresine bağlı köpük yoğunlukları ( g/cm <sup>3</sup> )			
			15 dak.	30 dak.	60 dak.	120 dak.
1	Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg	%2SiC	0,96	1,18	1,20	1,54
2		%4SiC	1,17	1,46	1,48	1,49
3		%8SiC	1,36	1,15	1,07	1,19
4	Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si	%2SiC	1,10	1,05	0,88	0,77
5		%4SiC	1,45	1,30	1,09	1,11
6		%8SiC	1,14	1,39	1,03	1,43
7	Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si	%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,98	1,26	0,94	1,08
8		%4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,08	1,32	1,29	1,22
9		%8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,28	1,30	1,06	1,50
10	Al-%1TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-	%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,77	0,80	0,93	1
11	Al-%1,2TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si		0,63	0,79	0,93	0,68



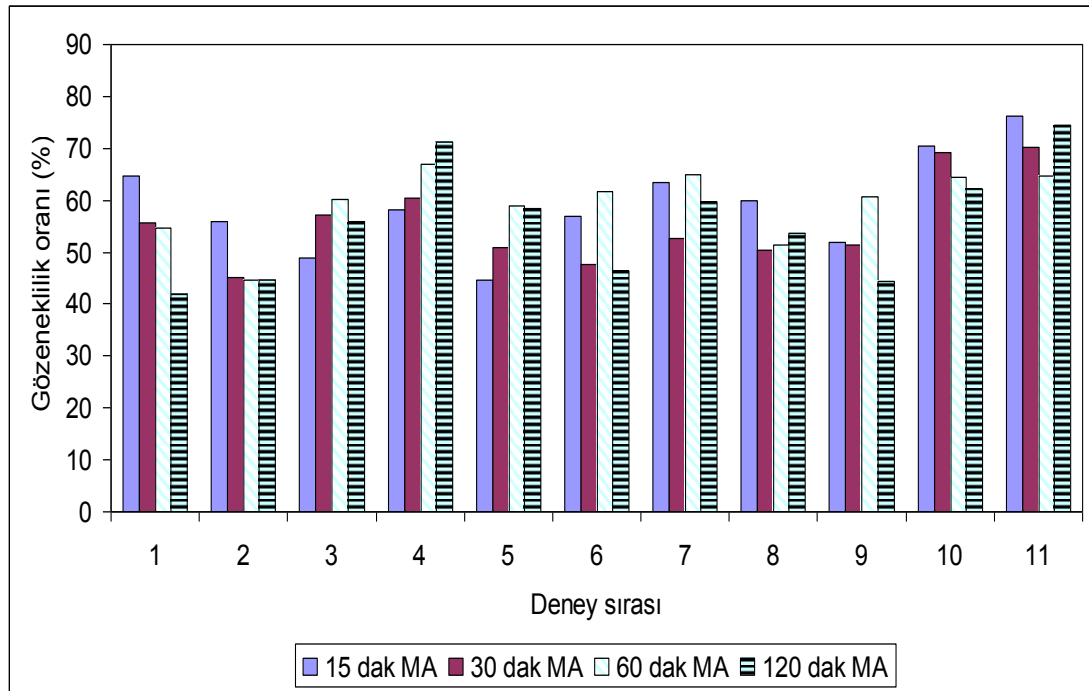
Şekil 7.13. Deney sırası gruplarına ait yoğunluklar

### 7.3. MA Süresinin Gözeneklik Oranına Etkisi

Yapılan deneysel çalışmalar içerisinde köpük malzemelerin gözeneklilik oranları Çizelge 7.3 ve Şekil 7.14'te verilmiştir. Malzemelerin gözenek oranlarına genel olarak bakıldığında en düşük %42 ve en yüksek ise %76 olduğu görülmektedir. Malzemelerin bu kadar geniş aralıkta gözenek oranlarına sahip olması her köpük malzemenin köpürtme parametrelerinin farklılığından kaynaklanmaktadır. Çizelge 7.3 incelendiğinde köpük malzemelerin içerisindeki  $TiH_2$  miktarının artmasıyla gözeneklilik oranında artış ve takviye elamanı artışıyla da gözenek oranında azalma olduğu görülmektedir. MA süresi malzemeler üzerinde kısmen olumsuz etki ettiği de yine aynı şekillerden görülmektedir. Yapılan çalışmalar içerisinde optimum özelliklere sahip malzeme grubu olarak ise 11. deney sırasındaki ve 15 dakika MA yapılmış tozlara ait köpük malzemeler olduğu Çizelge 7.3 ve Şekil 7.14'te görülmektedir. Ancak malzemelerin gözenek oranlarının yüksek olması o malzeme için en iyi özelliklere sahip malzemedir denemez, hücrelerin yapı içerisindeki dağılımları ve şekilleri köpük malzemeler için önemli bir özelliktir. Kullanım alanına göre malzemelerin değişik gözenek oranlarına sahip olabilir. Mekanik özelliklerin önemli olduğu durumlarda düşük gözenek miktarı tercih edilirken, yalıtımın önemli olduğu durumlarda yüksek gözenekli köpükler tercih edilmiştir.

Çizelge 7.3. MA yapılmış tozlar ve üretilen köpüklere ait % gözeneklilik oranı

Deney no	Malzeme		MA süresine bağlı % gözeneklilik oranı			
			15 dak.	30 dak.	60 dak.	120 dak.
1	Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg	%2SiC	65	56	55	42
2		%4SiC	56	45	45	45
3		%8SiC	49	57	60	56
4	Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si	%2SiC	58	60	67	71
5		%4SiC	45	51	59	58
6		%8SiC	57	48	62	46
7	Al-%0,8TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si	%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63	53	65	60
8		%4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	50	51	54
9		%8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	52	51	61	44
10	Al-%1TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		70	69	64	62
11	Al-%1,2TiH <sub>2</sub> -%0,6Mg-%7Si-%2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		76	70	65	75



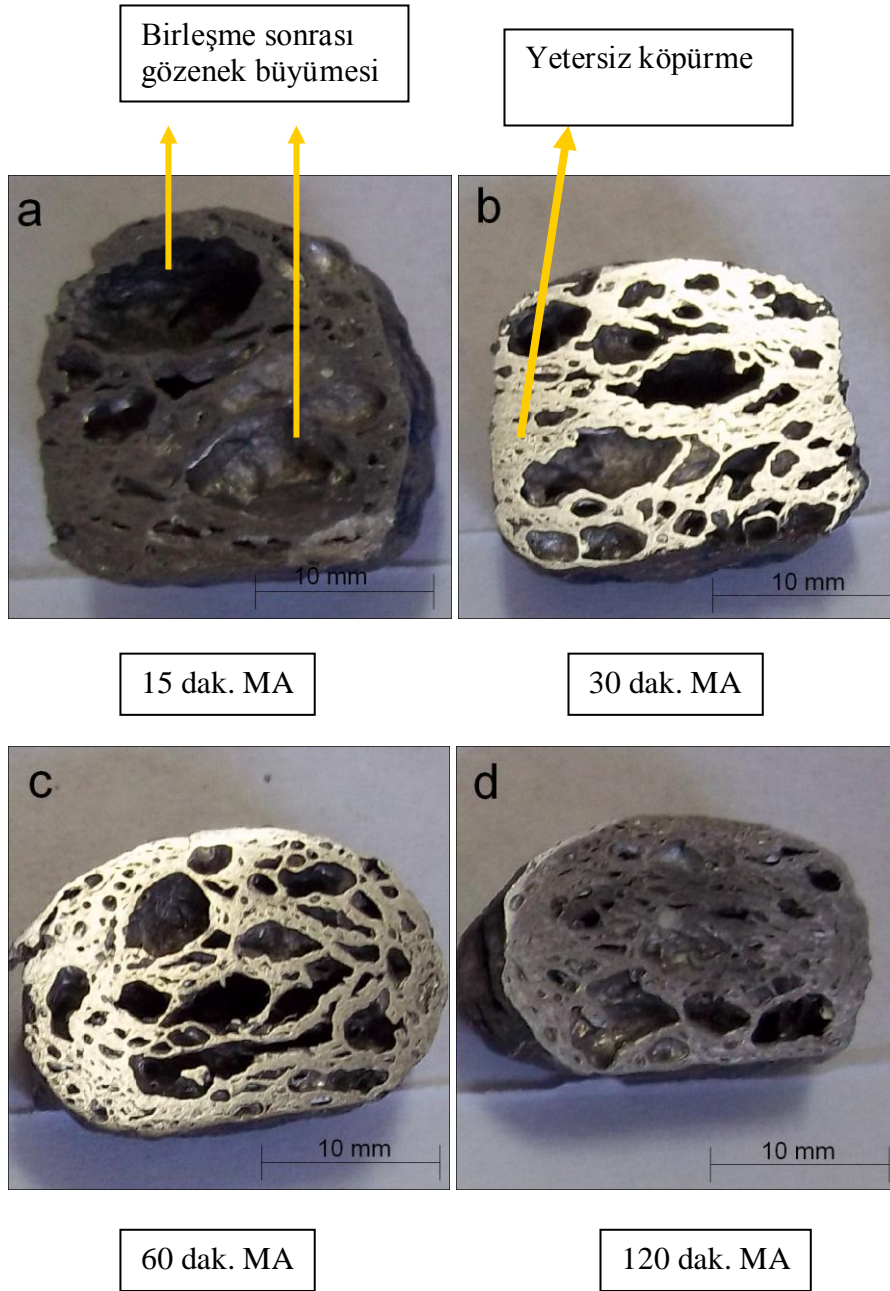
Şekil 7.14. Deney sırası guruplarına ait % gözeneklilik oranı

## 7.4. Makro Yapı İncelemesi

Çalışmaların bu kısmında 15 dakika, 30 dakika, 60 dakika, 120 dakika MA yapılmış takviye elemanlı tozlara ait köpük malzemelerin makro gözenek yapısı incelenmiştir. Makro gözenek boyutuna etki eden temel parametreler toz karışım oranları, MA süresi, köpürtücü madde miktarı, sıcaklık gibi değişkenler etkin rol oynamaktadır.

### 7.4.1 1. deney grubu (Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%2SiC) köpük makro yapısı

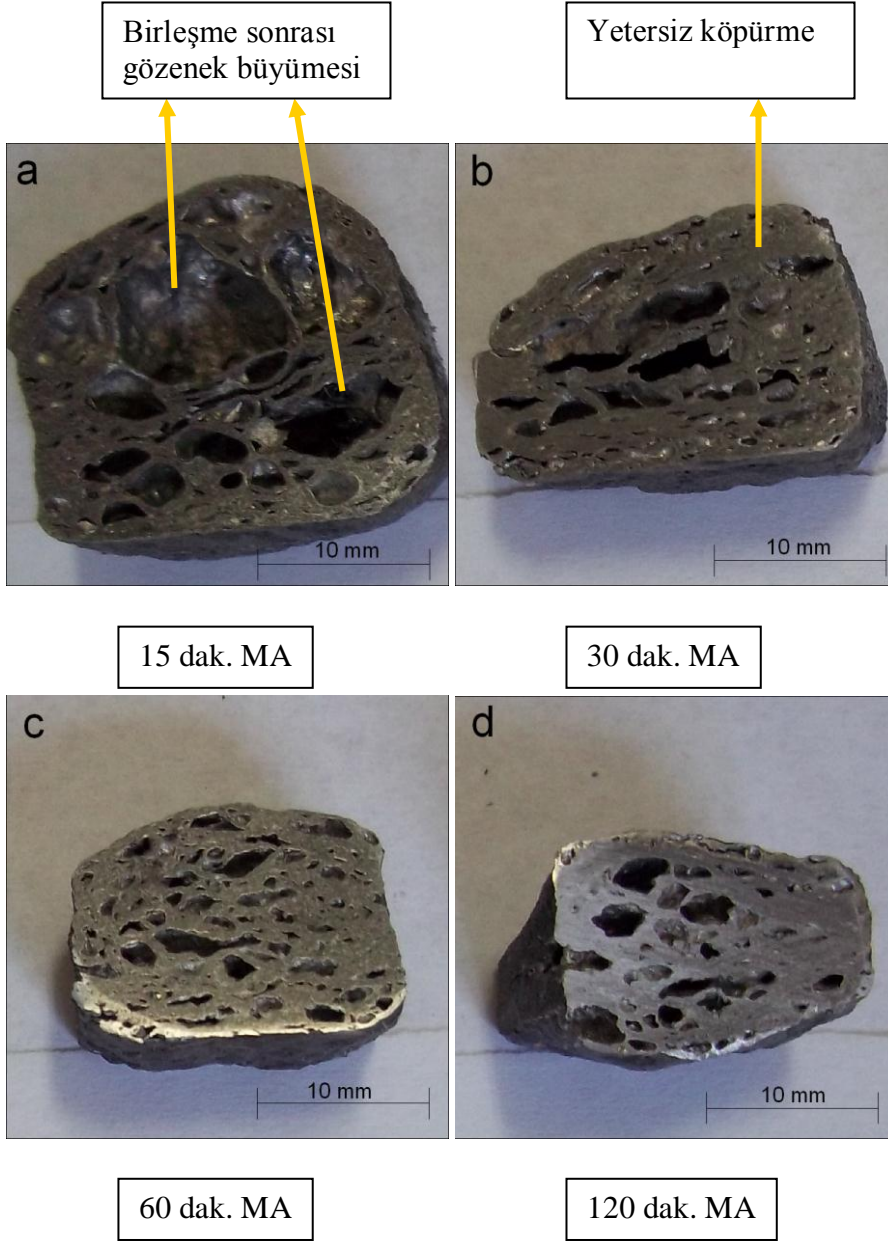
Resim 7.1'de Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%2SiC toz karışımının 15-30-60-120 dakika MA işlemine tabi tutup 710°C'de ve 10 dakikada köpürtülen malzemelerin kesit fotoğrafları görülmektedir. Burada MA süresinin artışıyla malzemelerin gözeneklerinde belirgin bir şekilde küçülme olduğu ve yetersiz köpürme meydana geldiği görülmektedir. Gözeneklerin homojen dağıldığı ancak 30 ve 60 dakika MA işlemi yapılarak elde edilen köpüklerin gözeneklerinde yönlenme meydana geldiği 120 dakika MA işleminde bu yönlenmenin daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca bu süre sonunda oluşan gözeneklerin de küçük olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum muhtemelen tozların MA işlemine bağlı olarak sertliğinin artması ve buna bağlı olarak köpürtme işlemini zorlaştırdığı düşünülmektedir. Resim 7.1 a'da aynı tozlara ait 15 dakika MA ile elde edilmiş köpük malzeme görülmektedir. Burada köpürme esnasında hücrelerin birleşerek iri gözenekler oluşturduğu görülmektedir. Resim 7.1 b incelendiğinde ise gözeneklerin uzadığı ve yer yer gözenekleşmelerin oluşumunu tamamlamadığı görülmektedir. Resim 7.1 c incelendiğinde burada diğerlerine nazaran gözeneklerde daha homojen bir dağılım sergilediği fakat gözenekleşmenin yetersiz olduğu görülmektedir. Burada toz malzemelere uygulanan MA süresi arttıkça gözenek boyutunda azalmalar olduğunu ve bunun malzeme içerisindeki TiH<sub>2</sub> yeteri seviyede gaz basıncı sağlayamadığı söylenebilir.



Resim 7.1. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%2SiC toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA

#### **7.4.2. 2. deney grubu (Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%4SiC) köpük makro yapısı**

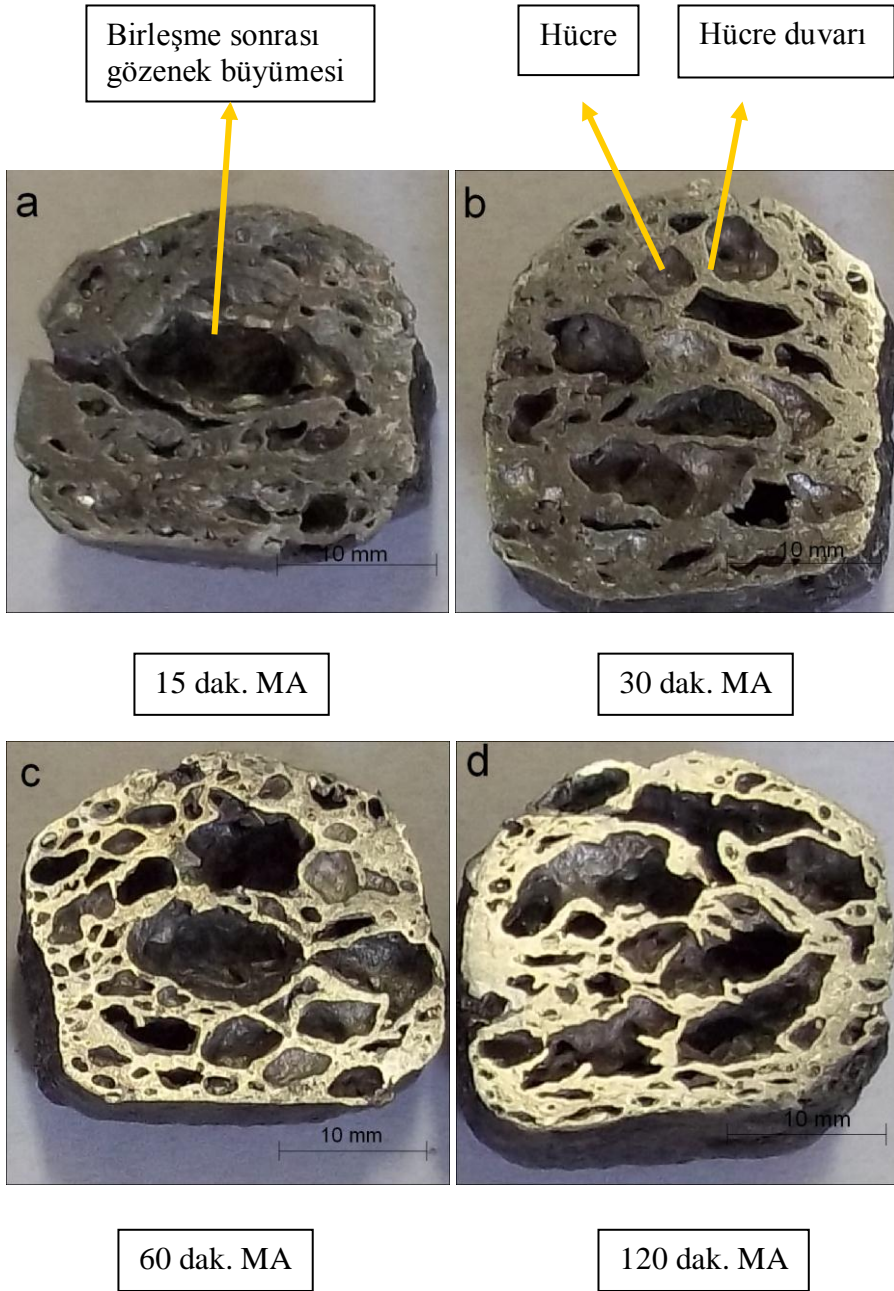
SiC miktarının %4'e artışıyla malzemelerdeki gözenek oluşumunun MA süresine bağlı resimleri Resim 7.2'de görülmektedir. Burada kısa süreli MA yapılmış tozların köpürtülmesi esnasında hücre birleşmelerinin daha aktif olduğu Resim 7.2 a'da görülmektedir. Resim 7.2 b, c, d'de ise gözeneklerin yeterli seviyede büyümeden kaldığı görülmektedir. Burada gözenek dağılımının ve köpürmenin yetersiz olması TiH<sub>2</sub>'nin sert toz parçacıkları arasında yeteri gaz basıncını sağlayamadığı düşünülmektedir.



Resim 7.2. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%4SiC toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA

### 7.4.3. 3. deney grubu (Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%8SiC) köpük makro yapısı

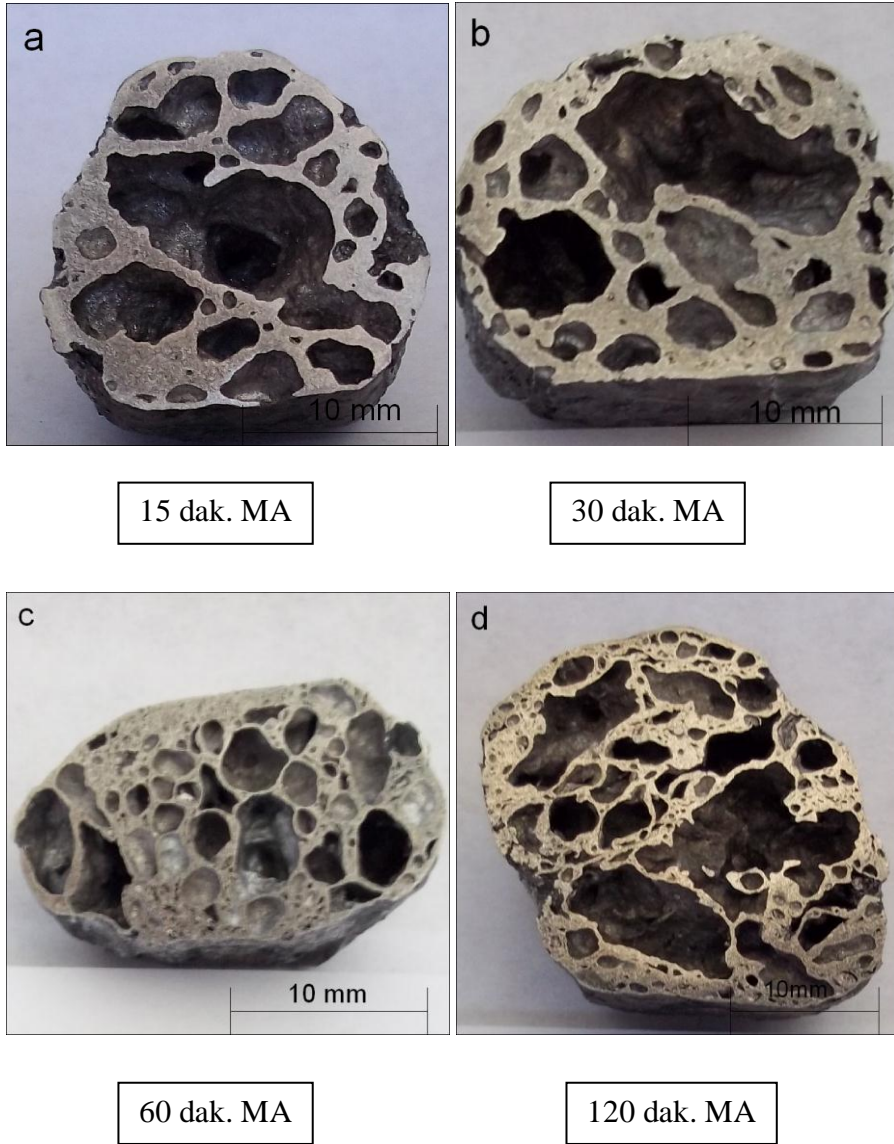
Toz karışım içerisinde %8 SiC ilave edildiğinde gözenek oluşumunda farklılıklar olduğu Resim 7.3'te görülmektedir. Burada MA süresinin artması köpürmede herhangi bir olumsuz etki göstermezken, kısa süreli MA gözenek oluşumunu engellediği görülmektedir. Bu da hücre duvarlarında biriken sert ve katı parçacıkların iç basıncı yenerek gözenek büyümelerini engellemesinden kaynaklanmaktadır. Resim 7.3 a incelendiğinde burada malzemenin ortasında hücre birleşmesi sonucu büyük bir gözenek meydana geldiği görülmektedir. Aynı malzemenin kenarlarında ise gözenek oluşumu yetersiz kalmıştır. Burada oluşan çatlak ve hatalardan yapıdan ayrılan hidrojen gazının uzaklaşması da gözenek oluşumunu engellemesi muhtemeldir. MA süresi 30 dakikada ise hücre sayısı az, hücre duvarı kalın bir yapı meydana gelmiştir. Resim 7.3 c'de ise yine hücre birleşmesinin olduğu, hücre sayısının arttığını ve gözeneklerin daha geniş yapıya ulaştığı görülmektedir. Resim 7.3 d incelendiğinde hücrelerin girintili çıkıntılı bir hal aldığı görülmektedir. Buna hücre oluşumunda malzemenin yüzey gerilimini etkileyen kuvvetlerin dengesiz dağılımı etki ettiği düşünülmektedir.



Resim 7.3. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%8SiC toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA

#### 7.4.4. 4. deney grubu (Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2SiC) köpük makro yapısı

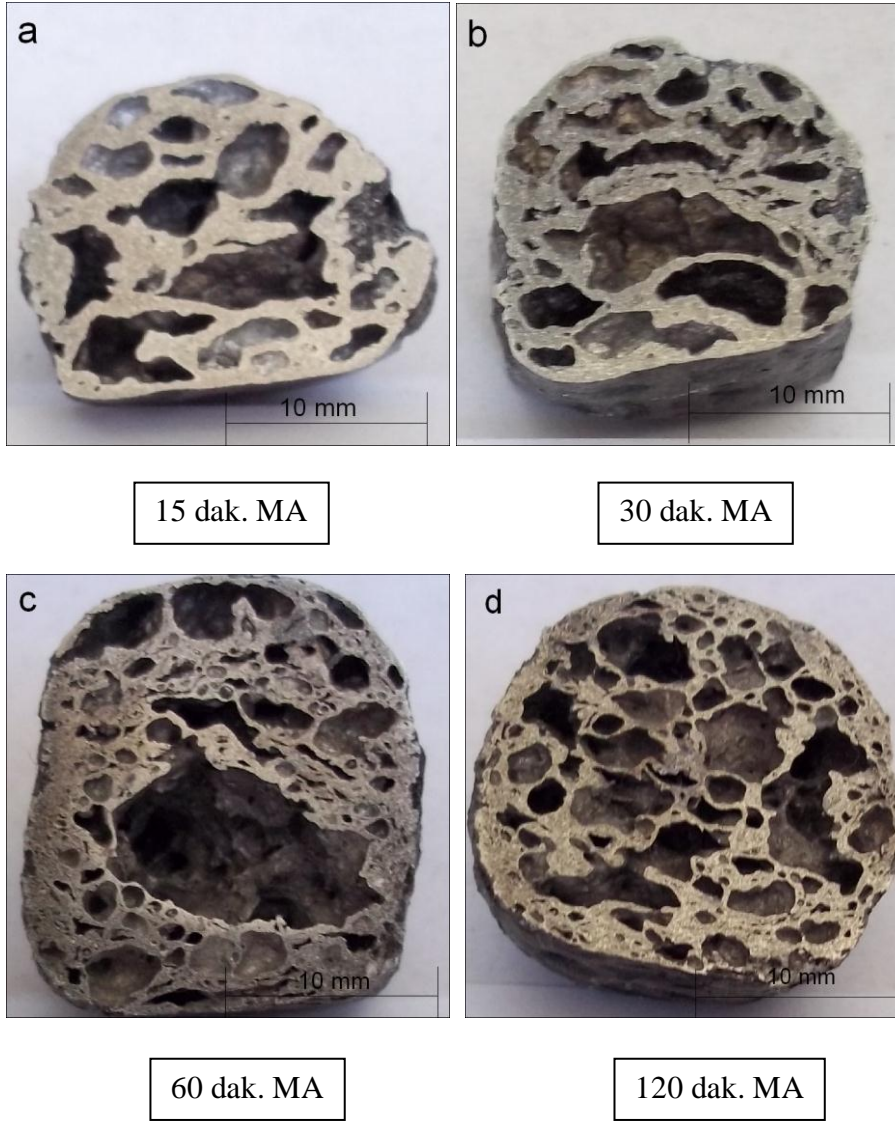
Deneysel çalışmalarda toz karışımı içerisinde %7Si ilave edildiğinde köpük malzemelerin gözeneklerinde daha homojen dağılım olduğu görülmüştür. Al içerisinde Si ilavesi malzemenin ötektik noktasını düşürdüğünden malzemenin hem köpürme süresi hem de köpürme sıcaklığı düşmektedir. Uzun ve Gökmen [45] yaptıkları çalışmada Al toz içerisinde değişik oranlarda Si ilave ettiklerini ve %8Si ilave edilen malzemenin gözenek dağılımının daha homojen olduğunu belirtmişlerdir. %7Si içeren malzemeler ile Si içermeyen malzemeler kıyaslandığında bu husus daha açık bir şekilde görülmektedir. Resim 7.4'e bakıldığında 15-30-120 dakika MA yapılmış tozlara ait köpük malzemelerde hücre birleşmelerinin olduğu ve 60 dakika MA'da ise köpük malzemelerin hücre dağılımında daha dengeli bir yapı oluştuğu görülmektedir. Resim 7.4 a ve b'de hücre yapıları kısmen benzerlik göstermektedir. Her iki malzemenin de ortasında hücre birleşmeleri olduğu görülmektedir. Burada hücrelerin az sayıda olması ve hücre duvar kalınlığının artırdığı da dikkat çekmektedir. Aynı resimde c ve d incelendiğinde, bu malzemelerde hücre sayısının artması hücre duvar kalınlığını incelttiği görülmektedir. Ayrıca bu malzeme grubu içerisinde en homojen gözenek dağılımına sahip malzemenin 60 dakika MA yapılmış tozlara ait köpük malzemeler olduğu Resim 7.4 c'de görülmektedir.



Resim 7.4. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2SiC toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA

#### **7.4.5. 5. deney grubu (Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%4SiC) köpük makro yapısı**

Resim 7.5'te MA süresi arttıkça köpük malzemelerde gözenekleşme oranı arttığı hücre duvar kalınlığının azaldığı görülmektedir. Bu deneyde kullanılan malzemeler diğer malzeme gruplarından biraz daha farklılık gösterdiği ve 120 dakika MA ile elde edilen köpük malzemelerin gözenek dağılımında daha homojen bir yapı olduğu ve gözenek yapısının karmaşık şekilli olduğu görülmektedir. Resim 7.5 a'da hücre duvarlarında girinti çıkıntılar hakim olduğu ve hücre duvar kalınlığının diğerlerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı resimde b incelendiğinde hücrelerin enine uzadığı ve yer yer birleşmelerin olduğu görülmektedir. Resim 7.5 c ve d incelendiğinde ise gözenekleşmenin arttığını hücre duvarları ise girinti ve çıkıntılarının olduğu görülmektedir.

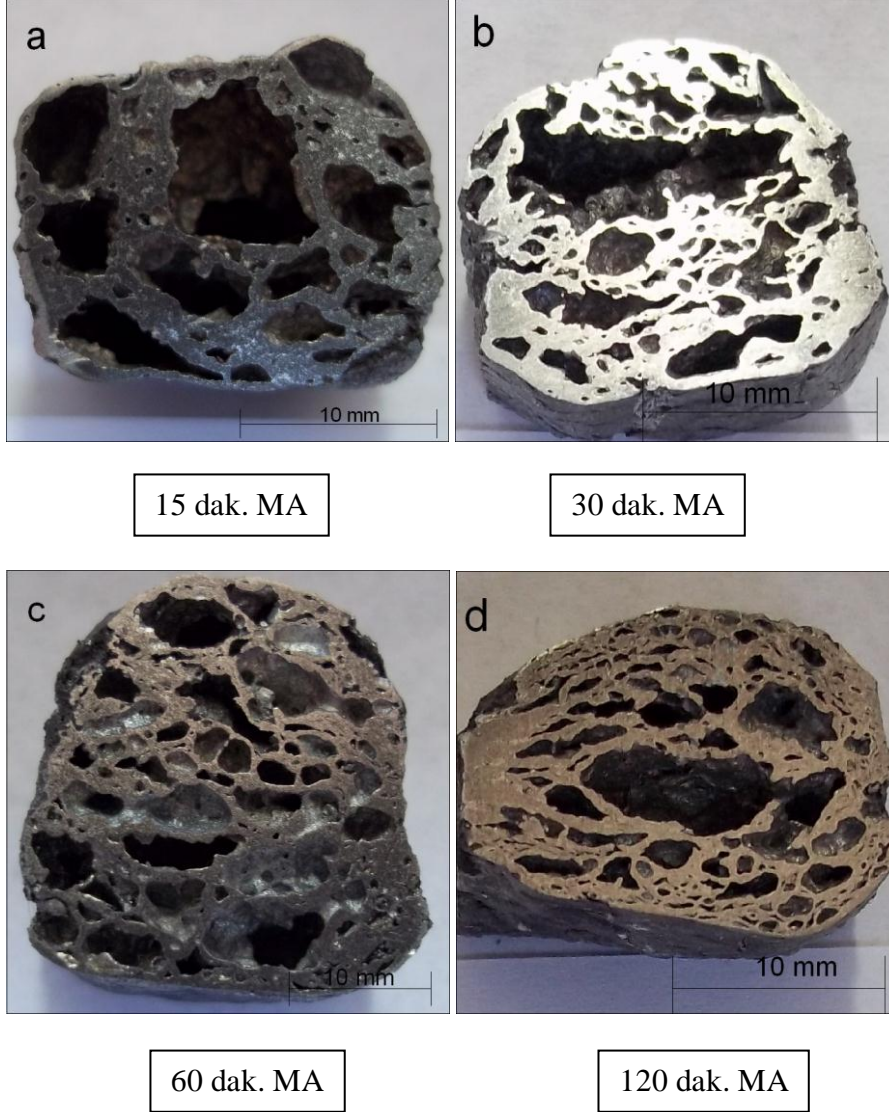


Resim 7.5. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%4SiC toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA

#### 7.4.6. 6. deney grubu (Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%8SiC) köpük makro yapısı

SiC miktarının artması köpük malzeme üzerinde olumsuz etki yaptığı bilinmektedir. Burada da SiC miktarının artışı, malzeme üzerinde viskozitenin artmasına ve TiH<sub>2</sub>'den ayrılan hidrojen basıncının bu durum karşısında yetersiz kaldığı

düşünülmektedir. Bu malzemelere ait görüntüler Resim 7.6'da görülmektedir. Bu malzeme grubu üzerinde fazla durulmaması gerektiği resimlerden de anlaşılmaktadır.

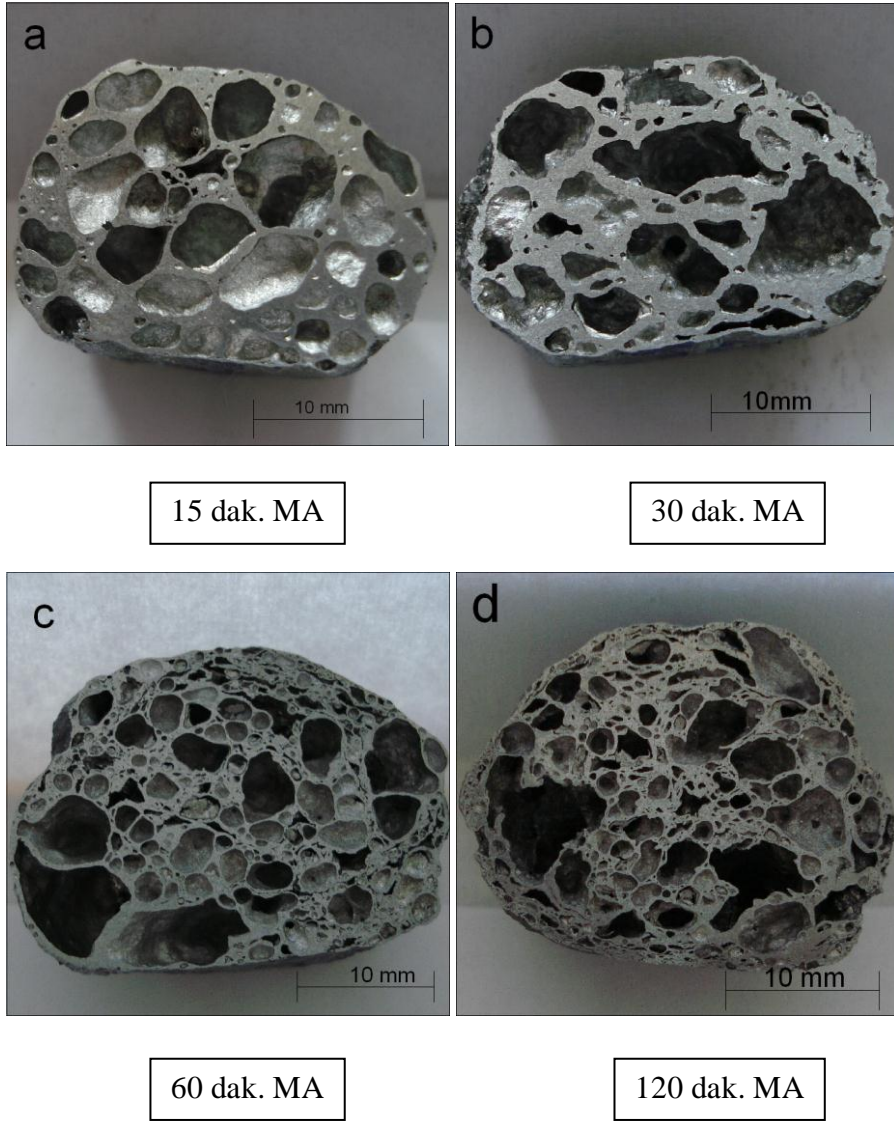


Resim 7.6. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%8SiC toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA

#### 7.4.7. 7. deney grubu (Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) köpük makro yapısı

Bu deney grubunda homojen dağılımlı gözenekler elde edilmiştir. Ancak köpük malzemenin yoğunluk ve lineer genişmesi yeteri seviyede olmadıkları için içerisindeki köpürtücü madde (TiH<sub>2</sub>) miktarı artırılarak 10. ve 11. deneyler yapılmıştır.

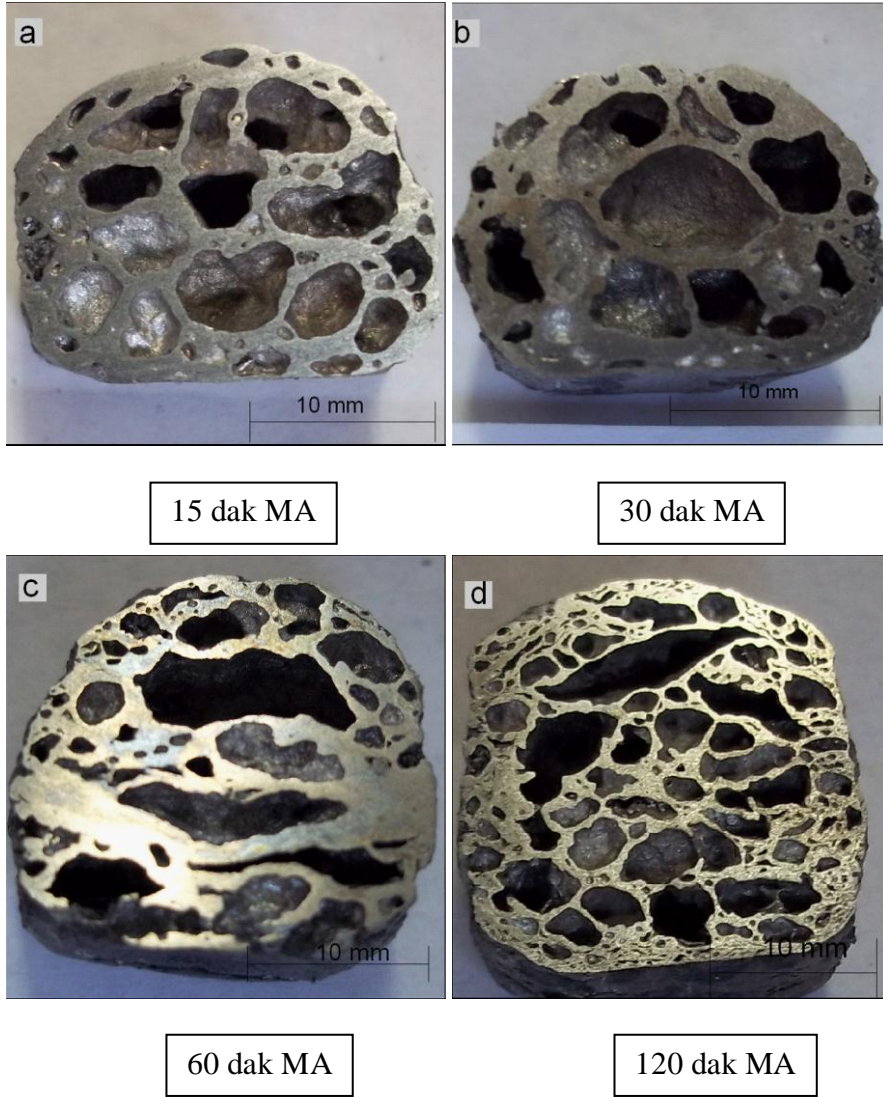
15 dakika, 30 dakika, 60 dakika, 120 dakika MA yapılmış %2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye elemanlı tozlara ait köpük malzemelerin makro gözenek yapısı Resim 7.7'de görülmektedir. Resim 7.7 a incelendiğinde, köpük malzemenin gözenekleri kısmen iri ve hücre duvarlarının ise kalın olduğu görülmektedir. Burada gözenekler yapı üzerinde homojen bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Resim 7.7 b incelendiğinde malzemenin gözenek yapısında homojen dağılım olmadığı, gözeneklerin iri olduğu, gözeneklerde yönelme olduğu ve hücre duvarlarında girinti ve çıkıntılar hakim olduğu görülmektedir. Malzemedeki bu hızlı değişimin nedeni MA esnasındaki toz tane boyutundaki değişimler, kirlenmeler, TiH<sub>2</sub> tozlarındaki çözünmelerin ve belirli bir kısmının ise atriör çeperine yapışmasının etkili olduğu düşünülmektedir. 60 dakikalık MA yapılmış tozlardan elde edilen köpük yapı Resim 7.7 c'de görülmektedir. Burada malzemenin gözenek sayısında göreceli olarak bir artış, gözenek boyutlarında küçülmeler ve hücre duvarında incelmeye olduğu görülmektedir. Asavavisithchai ve arkadaşları [26] kompakt malzeme ısıtmaya başladığında TiH<sub>2</sub>'deki ayrışmalar ilk önce çekirdek gözenekleri ve bu çekirdek gözenekleri birleşerek hücre yapısını oluşturduğunu belirtmiştir. Burada gözeneklerin kısmen küçük ve çok sayıda olması yüzey gerilim kuvvetlerinin ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye elemanının hücre çekirdeklerin büyüterek birleştirmesinde sınırlayıcı kuvvet olarak etki ettiği düşünülmektedir. Resim 7.7 d incelendiğinde, köpük malzemelerde istenen homojen dağılımlı gözenek yapısından uzaklaştığı görülmektedir. Gözenekler bazı bölgelerde iri yapıda, bazı bölgelerde ise küçük olduğu görülmektedir.



Resim 7.7. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA

#### **7.4.8 8. deney grubu (Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%4Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) köpük makro yapısı**

Takviye elemanı olarak kullanılan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı %2'den %4'e çıkartıldığında ise 7. deney grubuna benzer gözenek yapısı sergilediği fakat hücrelerin daha karmaşık yapıda olduğu Resim 7.8'de görülmektedir. Resim 7.8 a ve b incelendiğinde, iri gözenekli ve kalın hücre duvarından oluşan bir yapı meydana geldiği görülmektedir. Aynı resimde c'yi incelediğimizde, gözeneklerin enine uzadığı ve kimi yerde de gözenekleşmenin tam olmadığı görülmektedir. Resim 7.8 d'de ise gözenekleşmenin diğerlerine göre daha iyi olduğu fakat hücre duvarlarındaki girinti çıkıntılar ve hücre birleşmeleri bu durumu biraz engellediği görülmektedir.

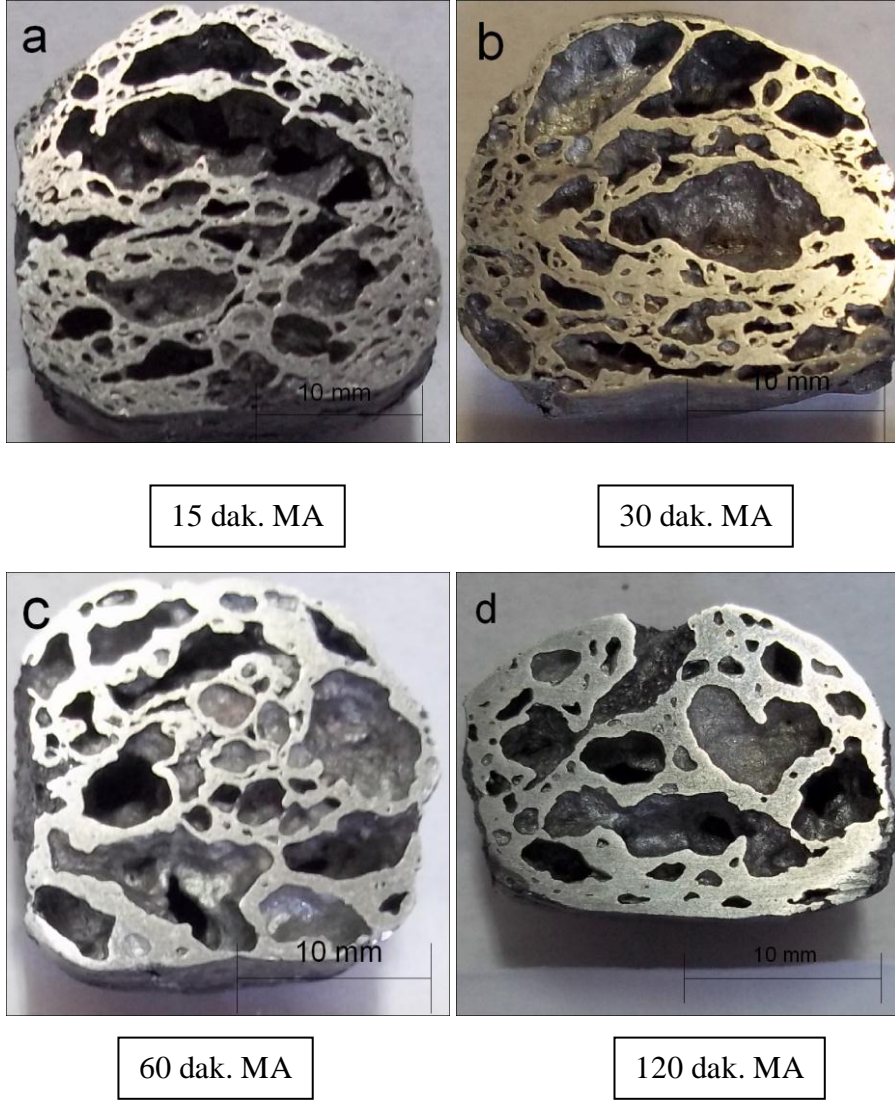


Resim 7.8.  $\text{Al-}0,8\text{TiH}_2\text{-}0,6\text{Mg-}7\text{Si-}4\text{Al}_2\text{O}_3$  toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA

#### 7.4.9 9. deney grubu ( $\text{Al-}0,8\text{TiH}_2\text{-}0,6\text{Mg-}7\text{Si-}8\text{Al}_2\text{O}_3$ ) köpük makro yapısı

$\text{Al-}0,8\text{TiH}_2\text{-}0,6\text{Mg-}7\text{Si-}8\text{Al}_2\text{O}_3$  toz karışımını 15-30-60-120 dakika MA yapıldığında elde edilen köpük malzemeler Resim 7.9'da görülmektedir. Yapı içerisindeki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  miktarının artması köpük malzemelerin gözenek dağılımına olumsuz etki ettiği görülmektedir. Resimlere genel olarak bakıldığında hücre

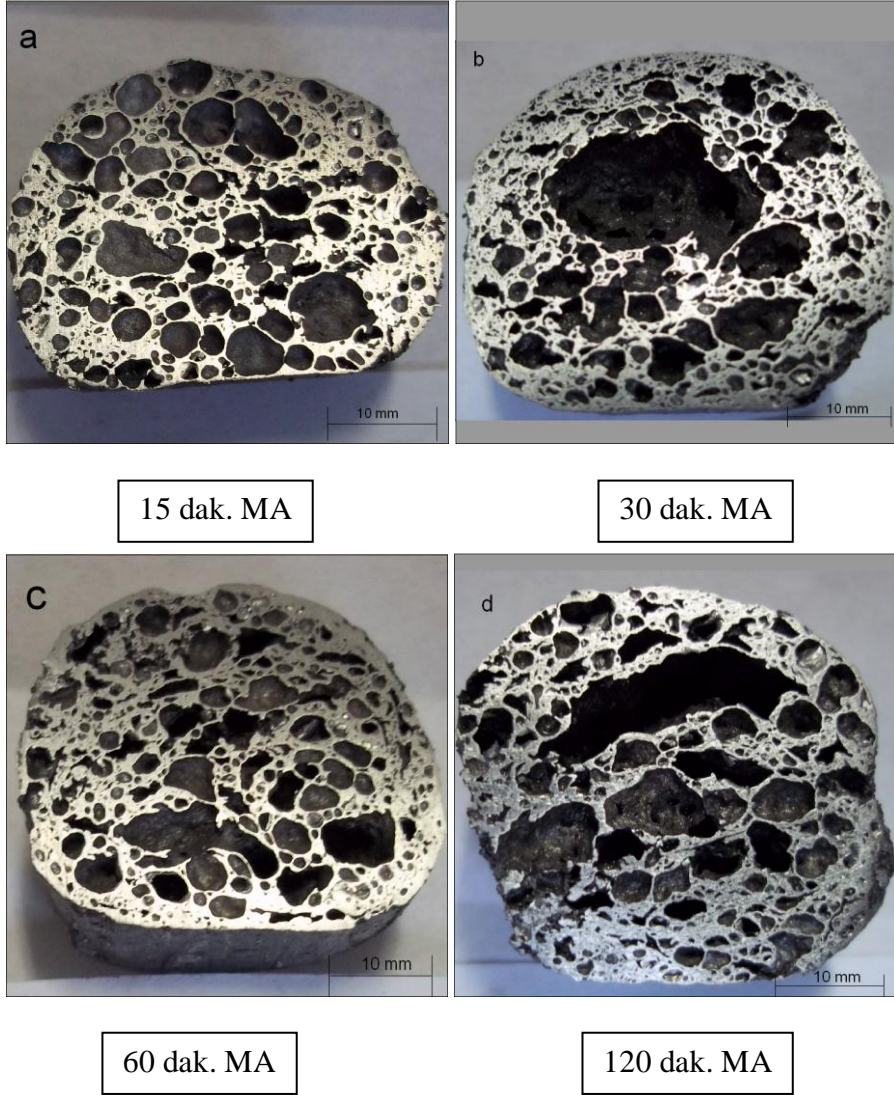
duvarlarının girintili çıkıntılı olduğu homojen gözenek yapısından uzaklaştığı görülmektedir. Bu duruma yapı içerisindeki  $Al_2O_3$  miktarının viskoziteyi olumsuz etkilediği ve takviye elemanının gözeneklerin küreselleşmesine engel olduğu düşünülmektedir.



Resim 7.9.  $Al$ -%0,8 $TiH_2$ -%0,6 $Mg$ -%7 $Si$ -%8 $Al_2O_3$  toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA

#### 7.4.10. 10. deney grubu (Al-%1TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) köpük makro yapısı

Toz karışımı içerisindeki TiH<sub>2</sub> miktarının %0,8'den %1'e çıkarılması, açığa çıkan H<sub>2</sub> gaz miktarının artışına sebep olmaktadır. Ayrışan gazın artması malzemelerin lineer genişlemesini arttırmakta ve yoğunluklarını düşürmektedir. Bu durum Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de görülmektedir. Malzemelerin yoğunluğunda istenilen değerlere yaklaşılmaması homojen gözeneklilik için yeterli değildir. Köpük malzemenin hem yoğunluğu istenilen değerlerde, hem de gözenekler yapı içerisinde homojen dağılımlı olmalıdır. Resim 7.10 incelendiğinde gözeneklerin yapı içerisinde %0,8 TiH<sub>2</sub> ihtiva eden köpük malzemeye göre kısmen homojen dağılımlı olduğu görülmektedir. Resim 7.10 a incelendiğinde gözeneklerin küresele yakın ve homojen dağılımlı oldukları görülmektedir. MA süresinin 15 dakika kadar kısa süreli olması yapılan deneylerde fazla olumsuz etki etmediği, fakat literatür çalışmalarında da belirtildiği gibi MA yapılmadan elde edilen köpük malzemelerle kıyaslandığında az da olsa olumsuz etkilediği fark edilmektedir. Türker [26] yaptığı çalışmada TiH<sub>2</sub> miktarını %1 ve köpürtme sıcaklığını 690 °C olarak seçtiğinde köpük malzemenin yoğunluğunu yaklaşık 0,6 g/cm<sup>3</sup> olarak hesaplandığını, yine aynı çalışmada %1 TiH<sub>2</sub> içeren köpük malzemenin daha homojen gözenek yapıda olduğunu belirtmiştir. Resim 7.10 b incelendiğinde ise köpük malzemenin ortasında gözenek birleşmesinin meydana geldiği ve kenarlarında ise gözeneklerin yeteri seviyede büyümedikleri görülmektedir. Aynı resimde c'ye baktığımızda ise hücrelerin büyüme eğilimli olduğu fakat hücre duvarlarında girinti ve çıkıntıların oluştuğu fark edilmektedir. Resim 7.10 d'de ise köpük malzemenin ortasında gözenek birleşmelerin ve alt kısmında ise yetersiz gözenekleşmenin olduğu dikkat çekmektedir. Bu bölge muhtemelen drenaj etkisinden kaynaklanmaktadır. Yapılan bu çalışmaya genel olarak bakacak olursak malzemelerdeki gözenekleşme oranının fazla olması hücre duvarını incelttiği görülmektedir. Bunun sebebi fazla TiH<sub>2</sub> ilavesi ile daha fazla H<sub>2</sub> açığa çıkmakta, bu da daha yuvarlak gözenek ve daha ince duvar olmasına sebep olmaktadır.

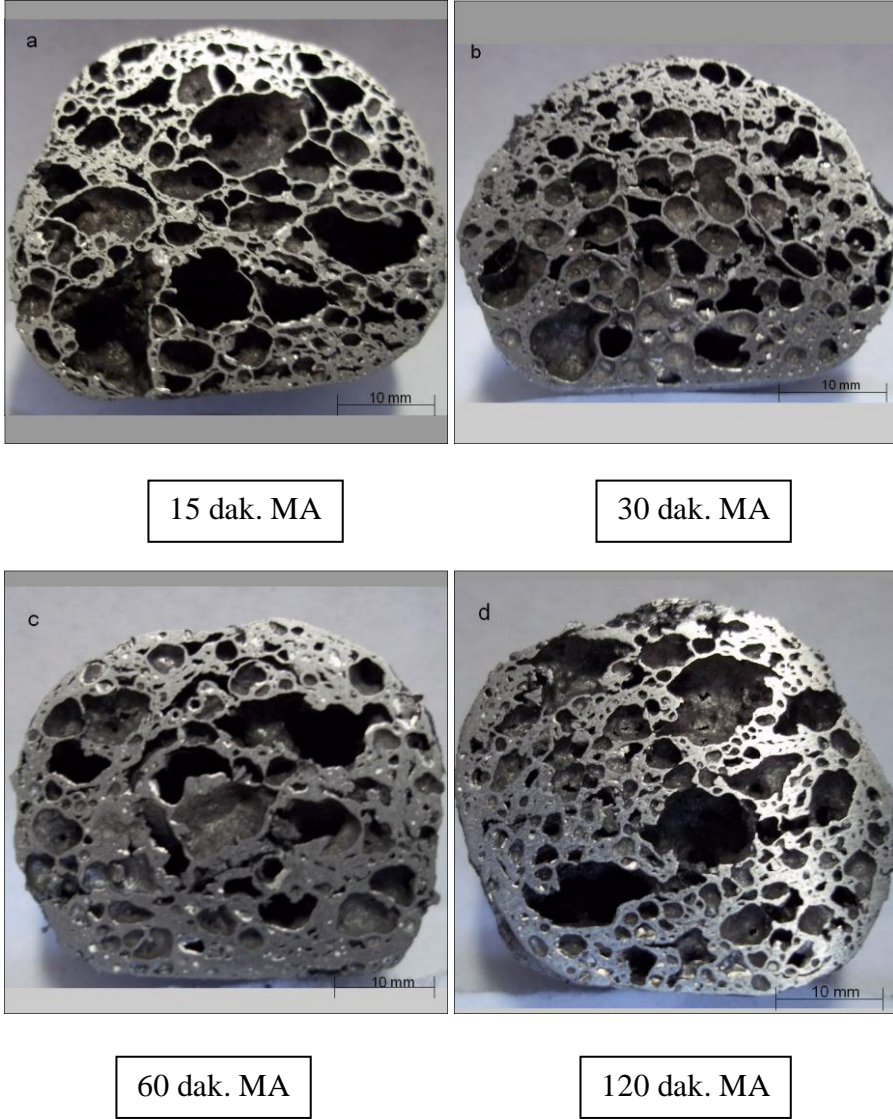


Resim 7.10. Al-%1TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA

#### 7.4.11. 11. deney grubu (Al-%1,2TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) köpük makro yapısı

Deneysel çalışmaların son kısmını mekanik alaşımlanmış Al-%1,2TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımından elde edilen köpük malzemeler oluşturmaktadır. Resim 7.11'e baktığımızda %1 TiH<sub>2</sub> ilaveli köpük malzemelere yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. 15 dakika MA yapılmış %1 TiH<sub>2</sub>'lü köpük malzeme ile 30

dakika MA yapılmış %1,2 TiH<sub>2</sub>'lü köpük malzemelerin gözenek yapıları birbirine benzediği Resim 7.10 a ve Resim 7.11 b'de görülmektedir. Resim 7.11 a incelendiğinde gözenekleşmenin iyi olduğunu ancak, gözeneklerin yer yer birleşerek büyüdüğü görülmektedir. Aynı resimde hücre duvarlarında ise ince ve girintili çıkıntılı yapıda olduğu görülmektedir. Burada gözeneklerin büyüyerek birleşmesine TiH<sub>2</sub>'den ayrılan hidrojenin yapmış olduğu gaz basıncının fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Resim 7.11 b incelendiğinde homojen gözenek dağılımına sahip bir yapı olduğu görülmektedir. MA süresinin artışıyla TiH<sub>2</sub> meydana gelen bozunmaların bunu dengelediği düşünülmektedir. Resim 7.11 c ve d incelendiğinde ise benzer yapılar olduğu görülmektedir. Burada ise köpük malzemelerin kenar ve alt kısımlarında yetersiz köpürme ve orta kısımlarda ise gözeneklerin birleşerek irileştiği görülmektedir.



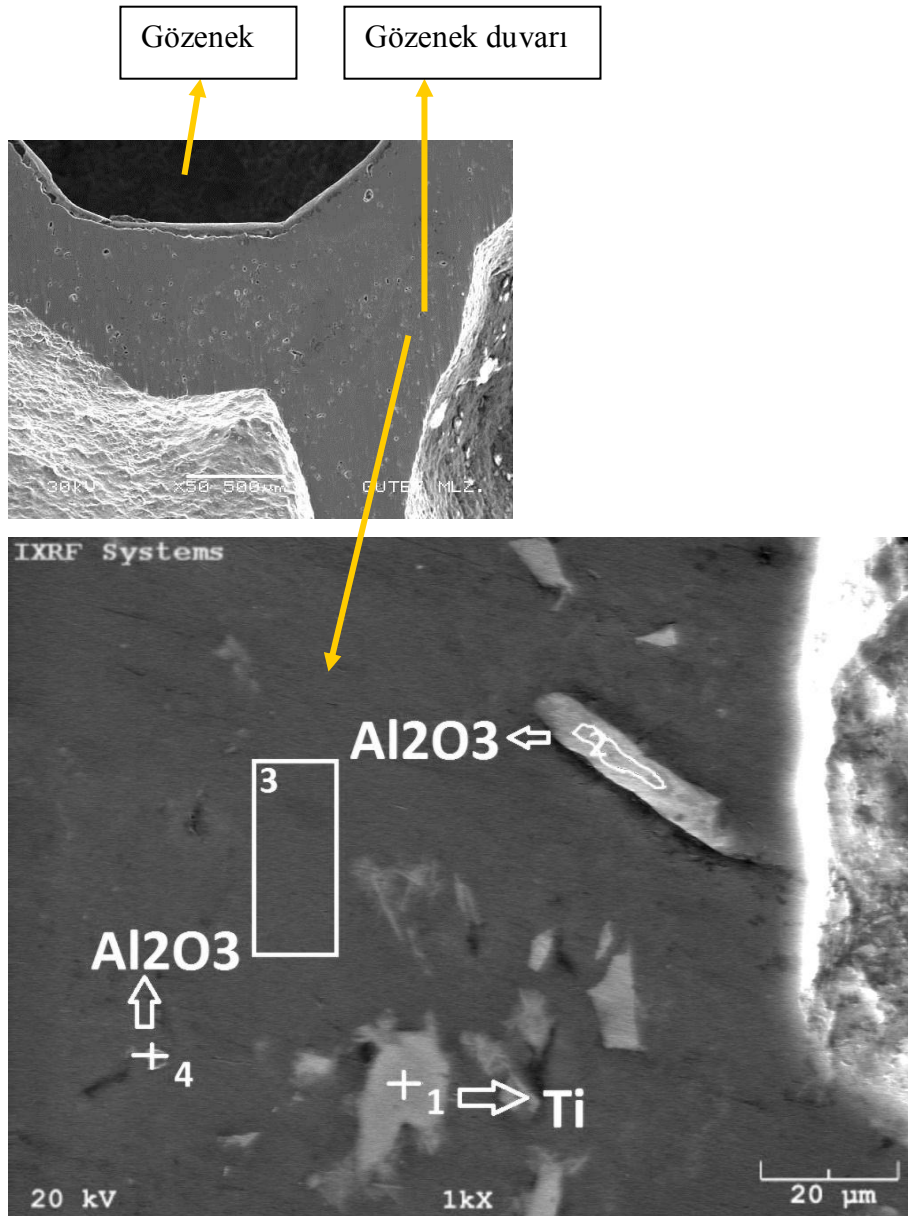
Resim 7.11. Al-%1,2TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımından elde edilen köpük malzemelerin makro görünümü a) 15 dak. MA, b) 30 dak. MA, c) 60 dak. MA, d) 120 dak. MA

## **7.5. Mikro Yapı İncelemesi**

Yapılan SEM çalışmalarında numunelere ait hücre duvarının 50, 150, 500, ve 1000 kat büyütme alınmış ve 1000 kat büyütmede ise uygun görülen bölgelerden EDX incelemeleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre değerlendirmeleri yapılmıştır.

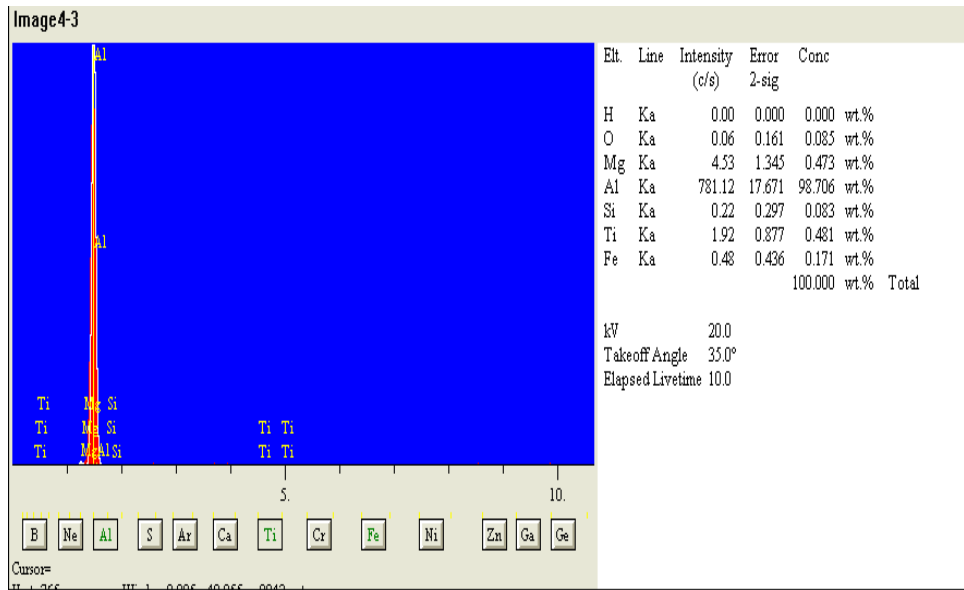
### **7.5.1 7. deney grubu (Al-%0,6Mg-%0,8TiH<sub>2</sub>-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) köpük malzemelerin SEM incelemeleri**

Resim 7.12 incelendiğinde 7. deneyde 15 dakika MA yapılmış tozlardan elde edilen köpük malzemelerin 50 ve 1000 kat büyütmeyle elde edilmiş SEM görüntüleri ve EDX analizleri verilmiştir. 1000 kat büyütme resim incelendiğinde yapı içerisinde takviye elemanlarının dağılımları görülmektedir. Burada takviye elemanının bazı bölgelerde hücre çeperinden uzaklaşıp hücre duvarı içerisinde homojen olmayan bir dağılım gösterdiği görülmektedir.



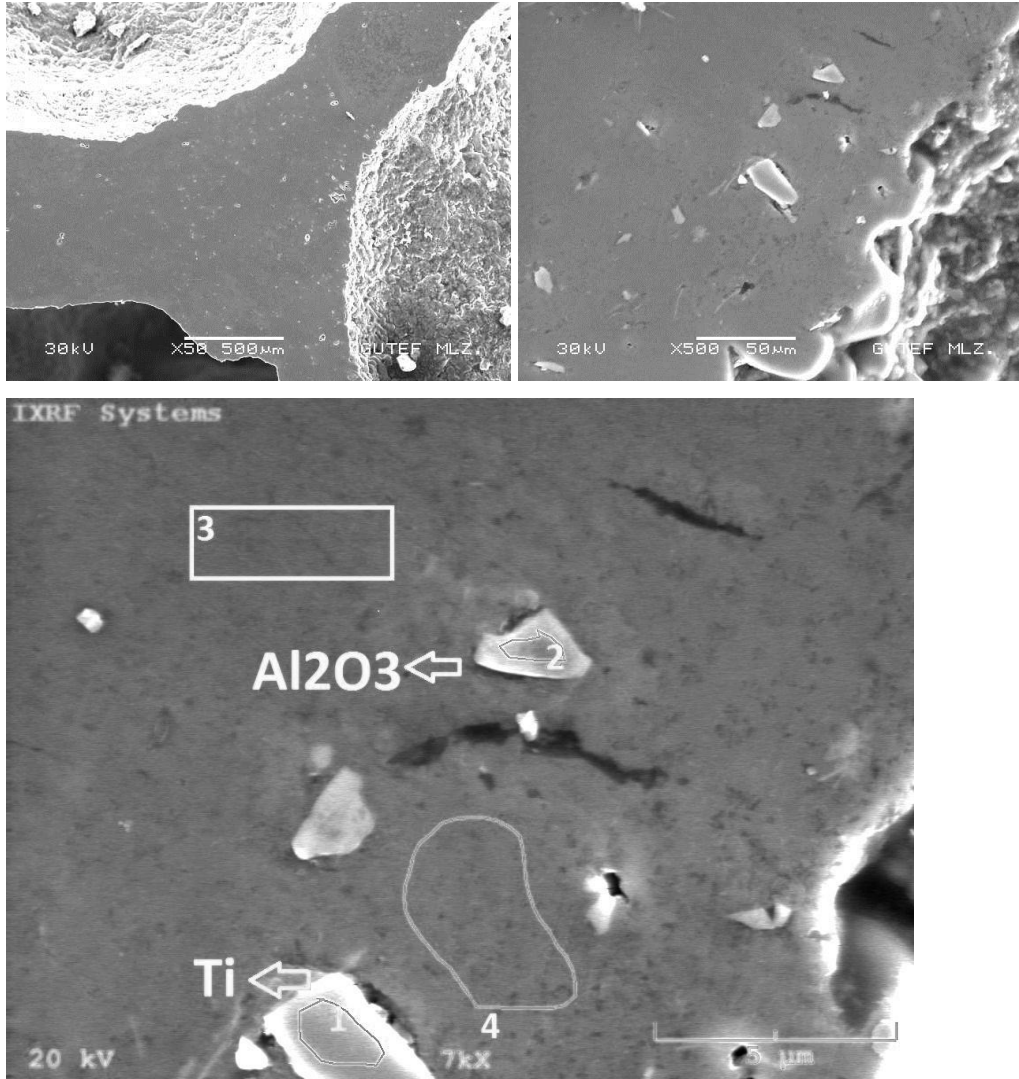
Resim 7.12. 15 dak. MA yapılmış Al-%0,6Mg-%0,8TiH<sub>2</sub>-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüsü

Resim 7.12'deki 3. noktanın EDX analizi Şekil 7.15'te verilmiştir. Burada yapı içerisindeki elementlere bakıldığında %0,17 oranında Fe dikkat çekmektedir. MA cihazının karıştırıcı kollarının ve bilyelerin aşınması sonucu yapı içerisine Fe elementinin kirletici etki gösterdiği düşünülmektedir. Karışım içerisine %7 Si ilave edilmesine rağmen 3. bölgede %0,08'lük Si olması 15 dakikalık MA'da bazı topaklanmalara neden olduğu düşünülmektedir.



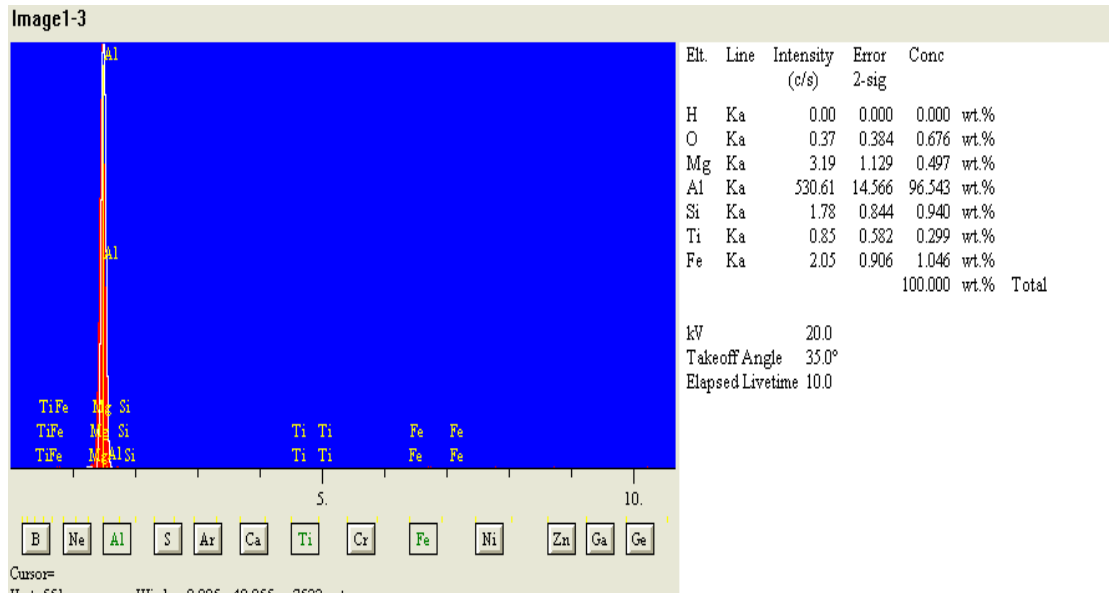
Şekil 7.15. 7. deneyde 15 dak. MA yapılmış köpük malzeme EDX analizi değeri

Resim 7.13'te 30 dakika MA yapılmış Al-%0,6Mg-%0,8TiH<sub>2</sub>-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemelerin 50, 500, ve 1000 kat büyümedeki SEM ve EDX resimleri görülmektedir. 500 kat büyütülmüş resime dikkatli bakıldığında takviye elemanının hücre çeperine yakın bölgelerde olduğu görülmektedir. 1000 kat büyütme resme baktığımızda ise hücre duvarı üzerinde küçük gözenekleşmelerin oluştuğunu ancak yeterince büyümediği için büyük gözeneklere dahil olmadan kaldığı görülmektedir. Burada matris malzemesi ile partiküller arasındaki boşlukların bölgeye sıkışmış TiH<sub>2</sub>'den ayrılan gazlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

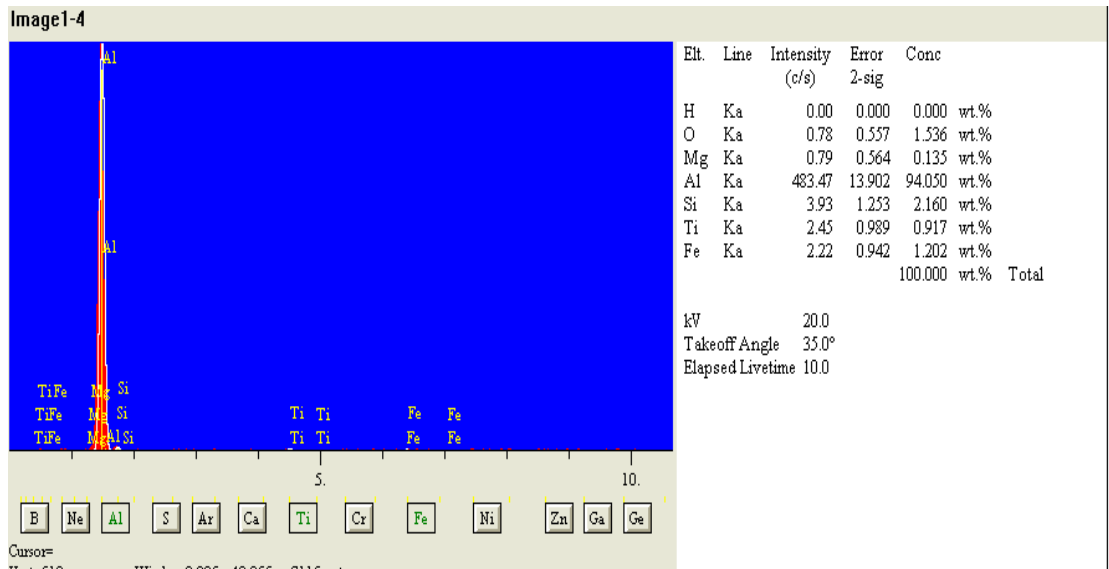


Resim 7.13. 30 dak. MA yapılmış Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüsü

Resim 7.13'teki EDX görüntülerinde 3. ve 4. bölgelere ait analiz değerleri Şekil 7.16 ve Şekil 7.17'de verilmiştir. Analiz değerlerine bakıldığında iki bölge arasında farklar dikkat çekmektedir. İki bölge arasındaki oksijen miktarlarına bakıldığında 3. bölge 4. bölgeden yaklaşık 3 kat daha fazla oksijen içermektedir. Aynı zamanda 15 dakika MA yapılarak elde edilen köpükteki oksijen miktarına bakıldığında MA süresinin artması Al tozunda oksitlenmelere neden olduğu görülmektedir.

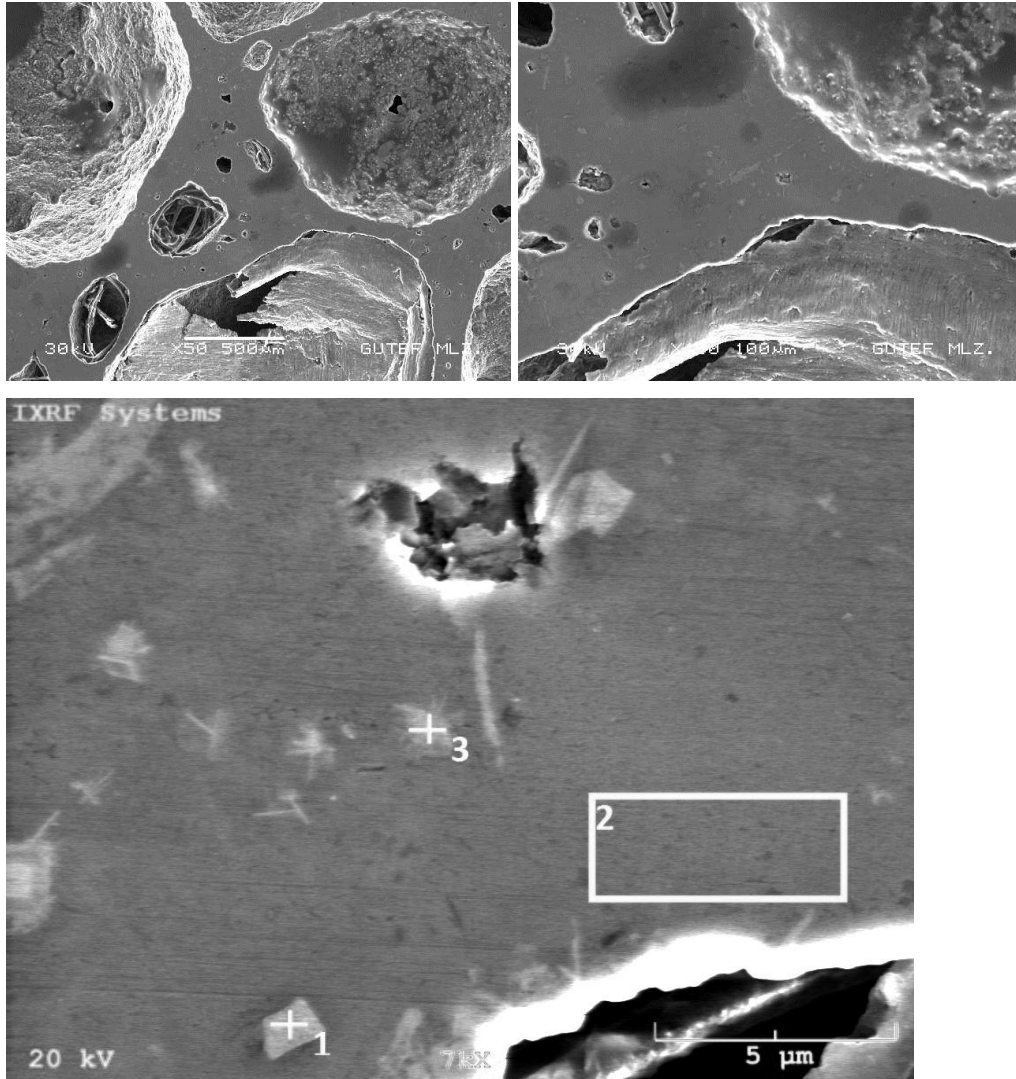


Şekil 7.16. 7. deneyde 30 dak. MA yapılmış köpük malzeme EDX analizi değeri



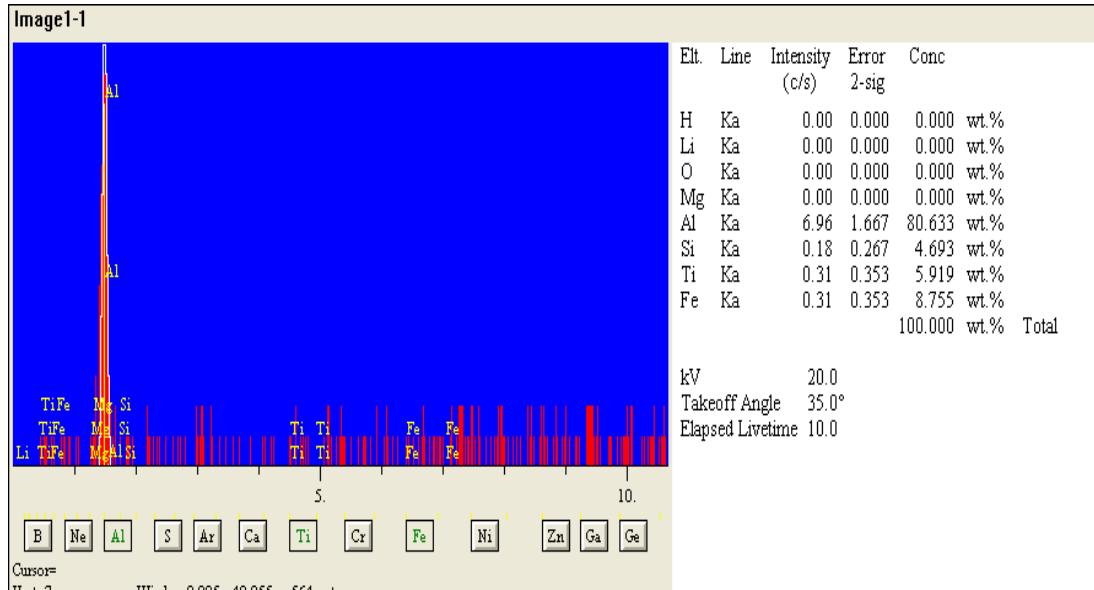
Şekil 7.17. 7. deneyde 30 dak. MA yapılmış köpük malzeme EDX analizi değeri

7. deneyde 60 dakika MA yapılmış tozlara ait 50, 150, 1000 kat büyütme görüntüleri Resim 7.14'te görülmektedir. 50 kat büyütme resim incelendiğinde hücre duvarlarında incelmelerin olduğunu ve hücre duvarında irili ufaklı gözeneklerin oluşumu görülmektedir. Burada hücrelerin birleşmelerine engel olan durumların başında  $TiH_2$ 'den ayrılan  $H_2$  gazının yeteri basınç oluşturamaması ve sıvı metalin viskozitesinin yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

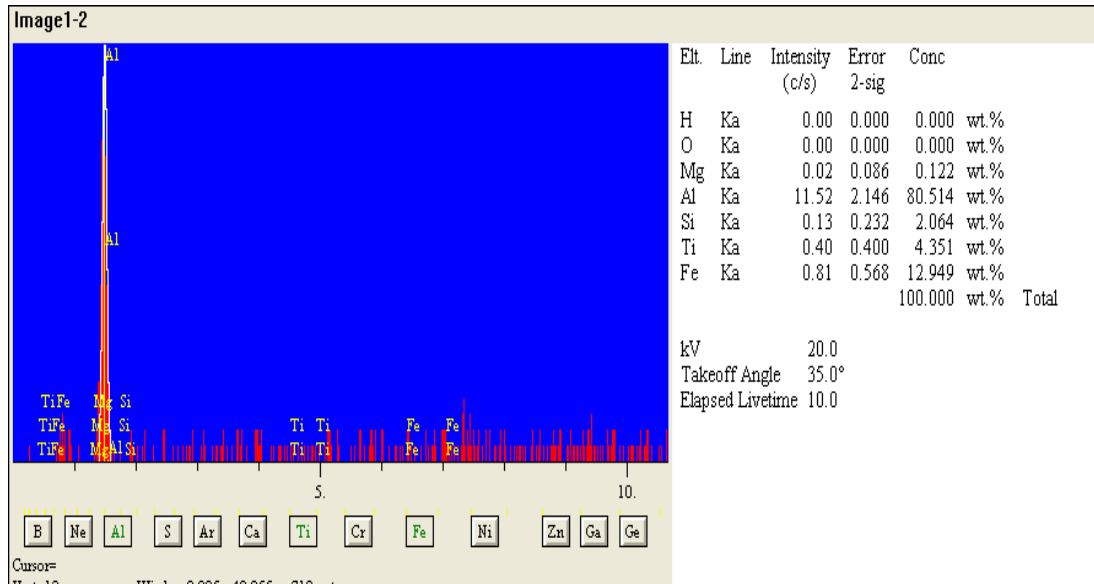


Resim 7.14. 60 dak. MA yapılmış  $\text{Al-}0,8\text{TiH}_2\text{-}0,6\text{Mg-}7\text{Si-}2\text{Al}_2\text{O}_3$  tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri

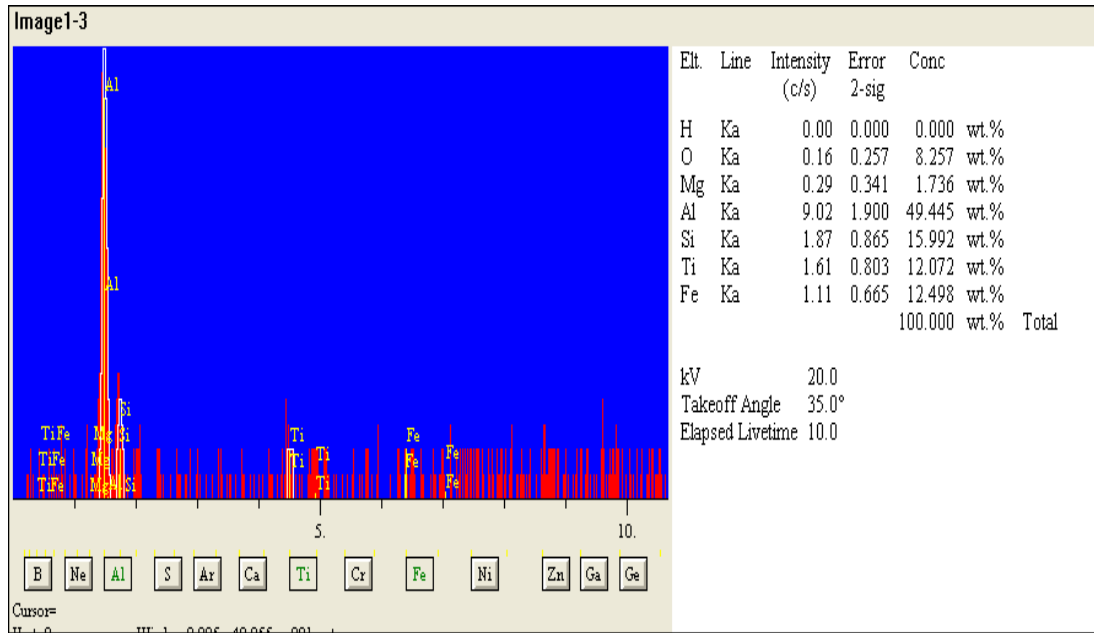
Resim 7.14'te 1. ve 3. noktalara ait EDX analizleri incelendiğinde Şekil 7.18'den de anlaşılacağı gibi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 7.20'deki EDX analiz sonucuna bakıldığında ise bu bölgede değişik elementlerin topaklandığı görülmektedir. MA süresinin artmasıyla yapı içerisindeki kirletici elementlerin de arttığı Şekil 7.19'dan da anlaşılmaktadır.



Şekil 7.18. 7. deneyde 60 dak. MA yapılmış köpük malzeme 1. nokta EDX analizi değeri

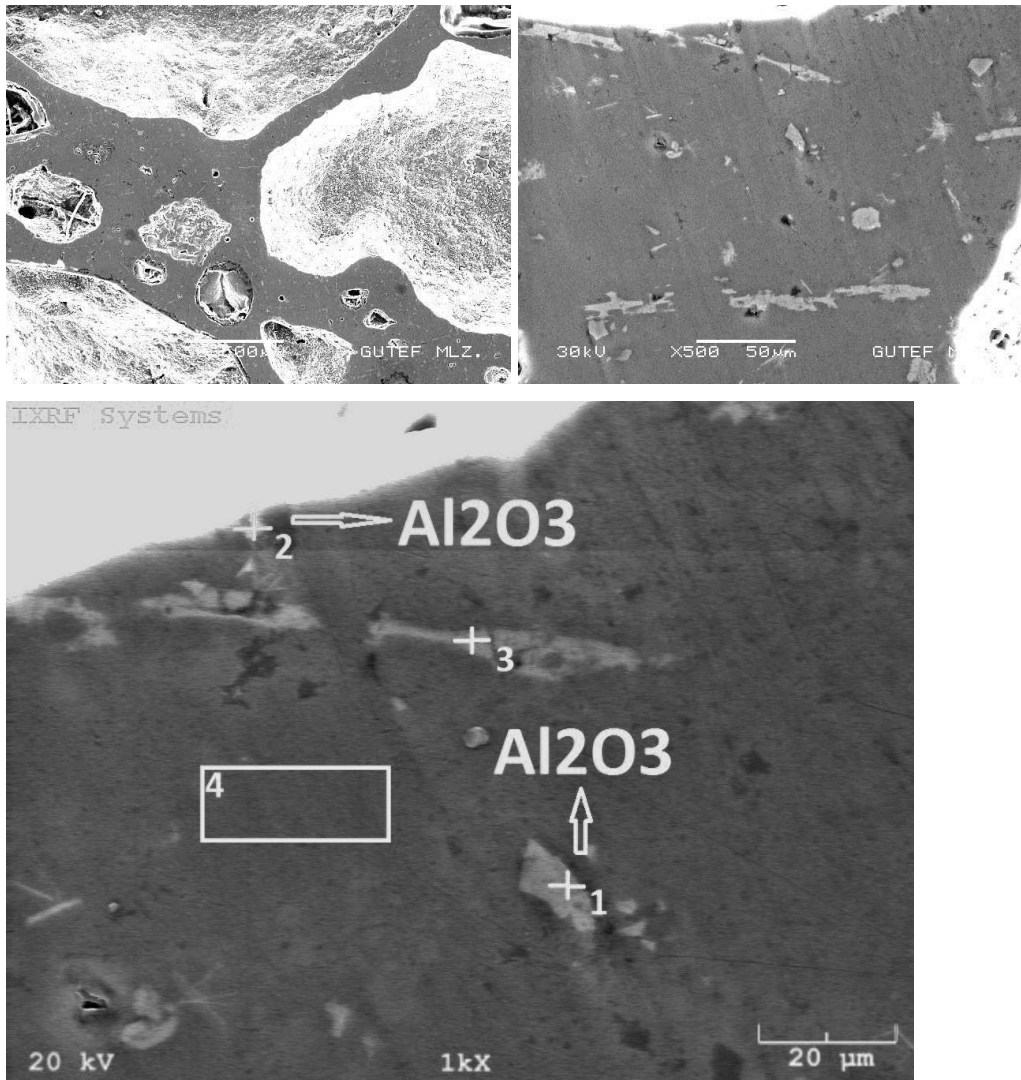


Şekil 7.19. 7. deneyde 60 dak. MA yapılmış köpük malzeme 2. nokta EDX analizi değeri



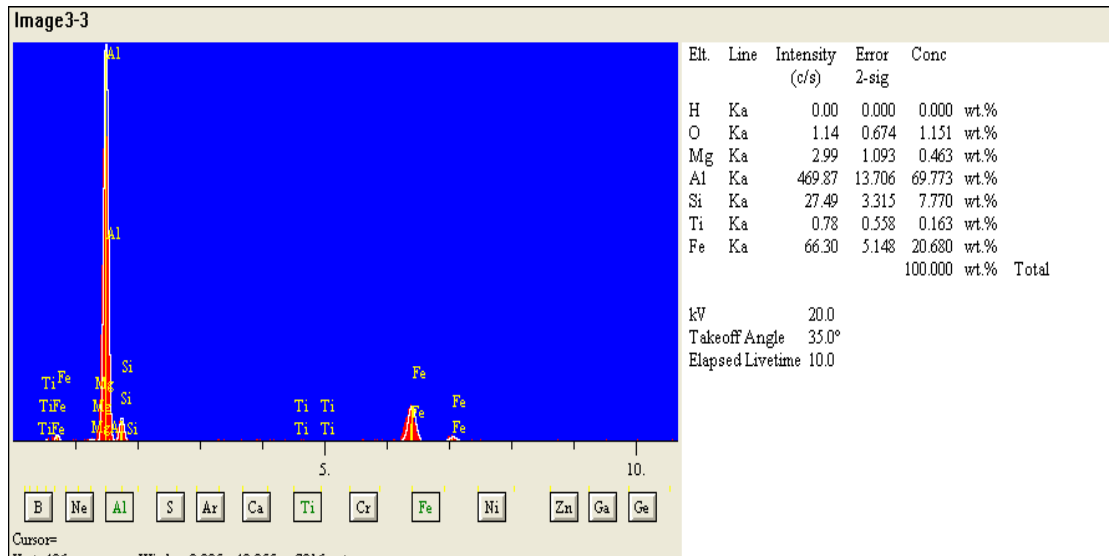
Şekil 7.20. 7. deneyde 60 dak. MA yapılmış köpük malzeme 3. nokta EDX analizi değeri

Resim 7.15'e bakıldığında 120 dakika MA yapılmış tozlardan elde edilen köpük malzemenin hücre yapısı görülmektedir. Burada hücre duvarı üzerinde gözenekleşmelerin olduğu ve gözeneklerin irili ufaklı olduğu görülmektedir. Gözenek duvarında bir incelme olduğu ve girinti çıkıntılarının hakim olduğu görülmektedir. Bu duruma malzemenin köpürme esnasında yüzey gerilimi kuvvetlerinin dengesiz bir etki ettiği düşünülmektedir.

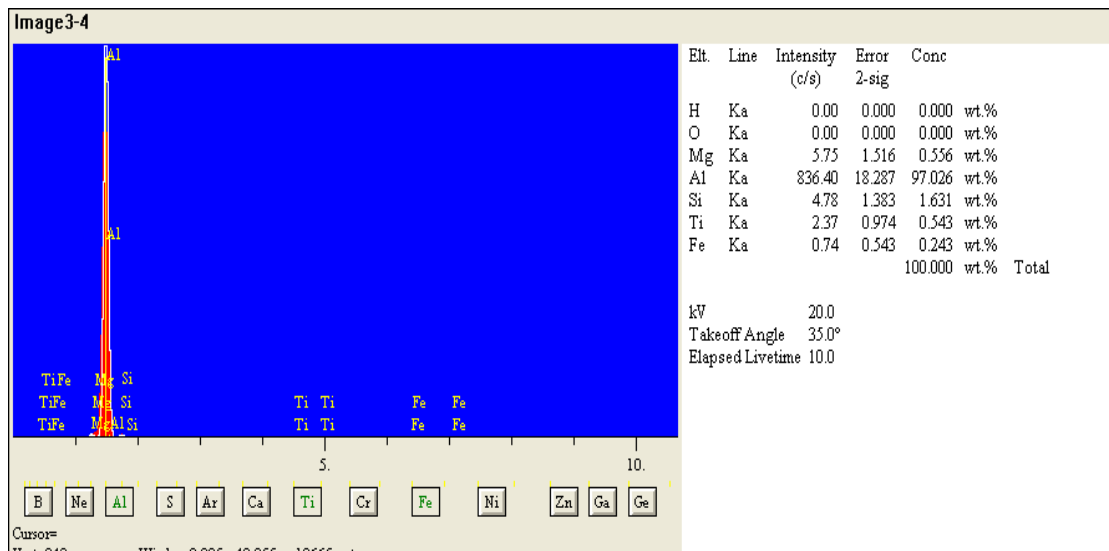


Resim 7.15. 120 dak. MA yapılmış Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri

Resim 7.15'teki 3 ve 4 numaralı bölgelerin EDX analiz değerleri incelendiğinde matris malzeme içerisindeki demirin 60 dakika MA yapılmış tozlardan elde edilen köpük malzemeye göre azaldığı Şekil 7.21'de görülmektedir. Ancak yapıda kirletici eleman olarak bulunan demirin belirli bölgelerde toplandığı Resim 7.15'teki 3 numaralı noktanın EDX analiz değeri olan Şekil 7.22'den anlaşılmaktadır.



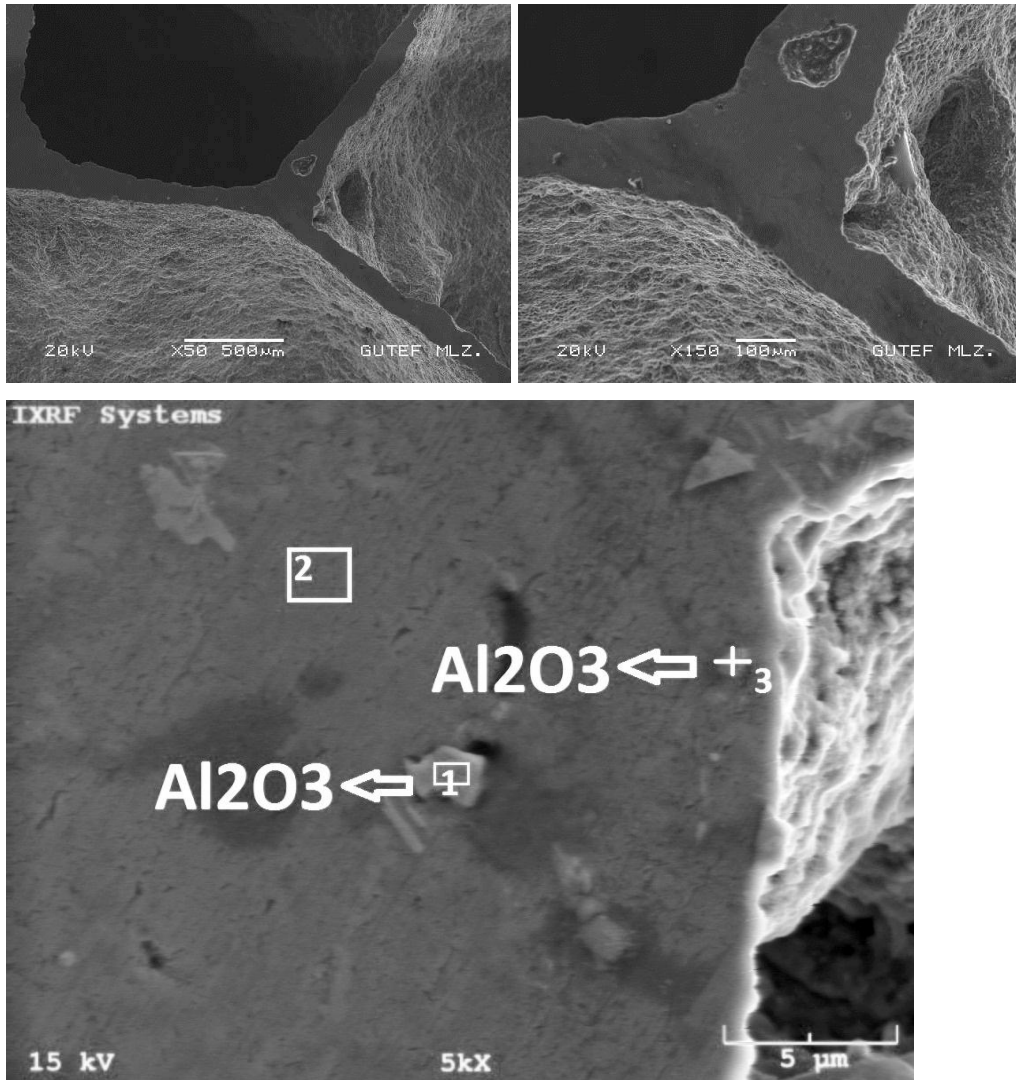
Şekil 7.21. 7. deneyde 120 dak. MA yapılmış köpük malzeme 3. nokta EDX analizi değeri



Şekil 7.22. 7. deneyde 120 dak. MA yapılmış köpük malzeme 4. nokta EDX analizi değeri

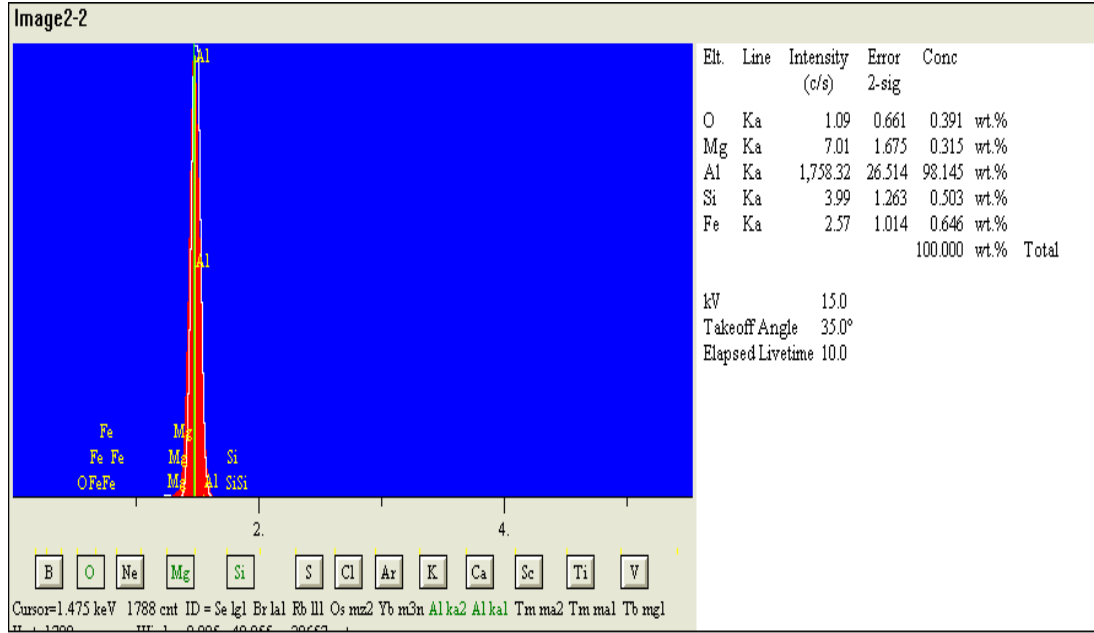
### 7.5.2 10. deney grubu (Al-%1TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) köpük malzemelerin SEM incelemeleri

Toz karışımı içerisindeki TiH<sub>2</sub> miktarı %1 ve MA süresi 15 dakika yapıldığında köpük malzemelerin lineer genişlemelerinde artış olduğunu Çizelge 7.1'de görülmektedir. Resim 7.16 incelendiğinde %0,8 TiH<sub>2</sub> ilave edilen malzemeye göre gözenek duvarında incelmeler olduğu ve homojen gözenek yapısını koruduğu görülmektedir. Aynı resimde EDX değerleri incelendiğinde ise takviye elemanını yapı içerisinde homojen dağılım gösterdiği görülmektedir.



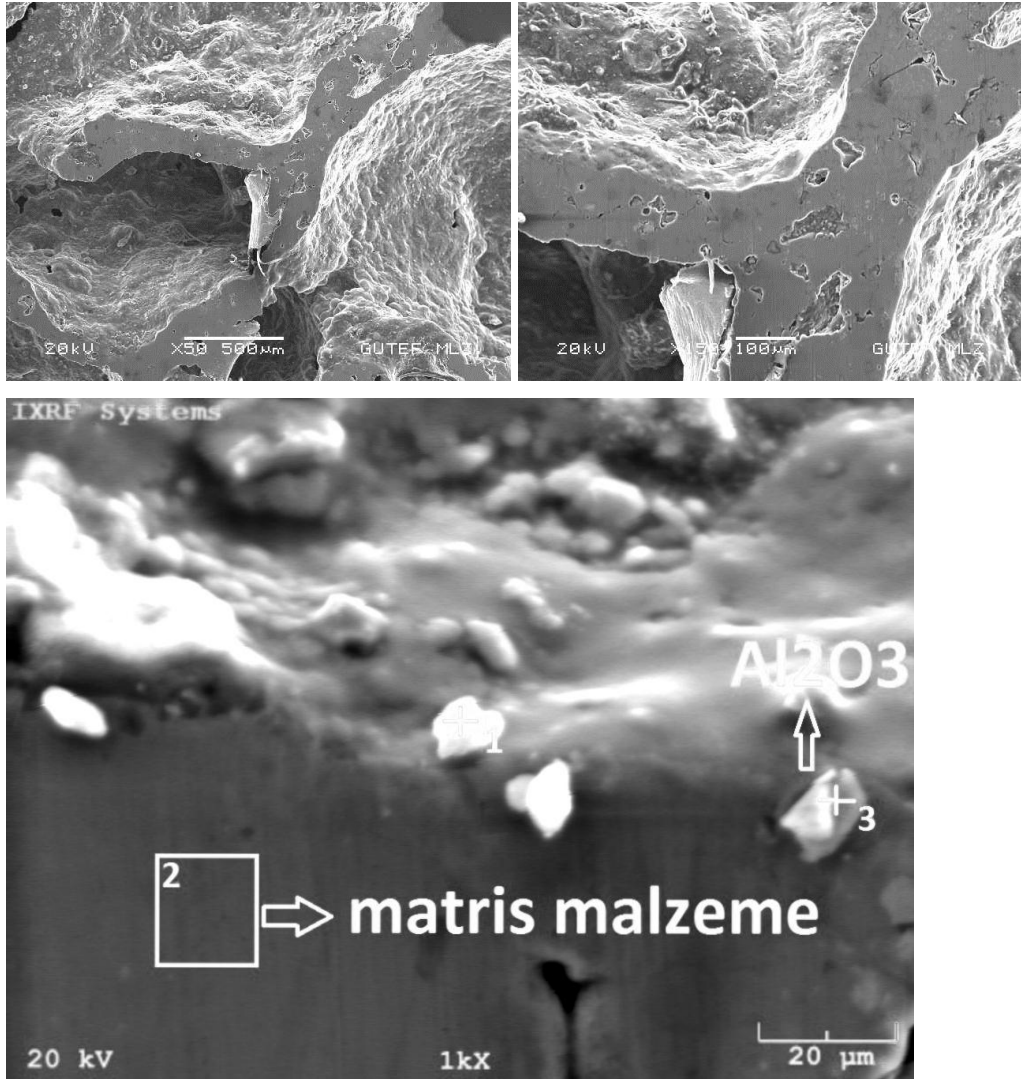
Resim 7.16. 15 dak. MA yapılmış Al-%1TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri

Resim 7.16'daki 2. noktanın EDX analiz değeri Şekil 7.23'te verilmiştir. Burada malzemede küçük kirlenmeler olsa da bu mekanik alaşımlama işleminin doğal bir sonucu olduğu bilinmektedir. Buradaki kirlenmeler ise yapıyı fazla etkilemediği düşünülmektedir.



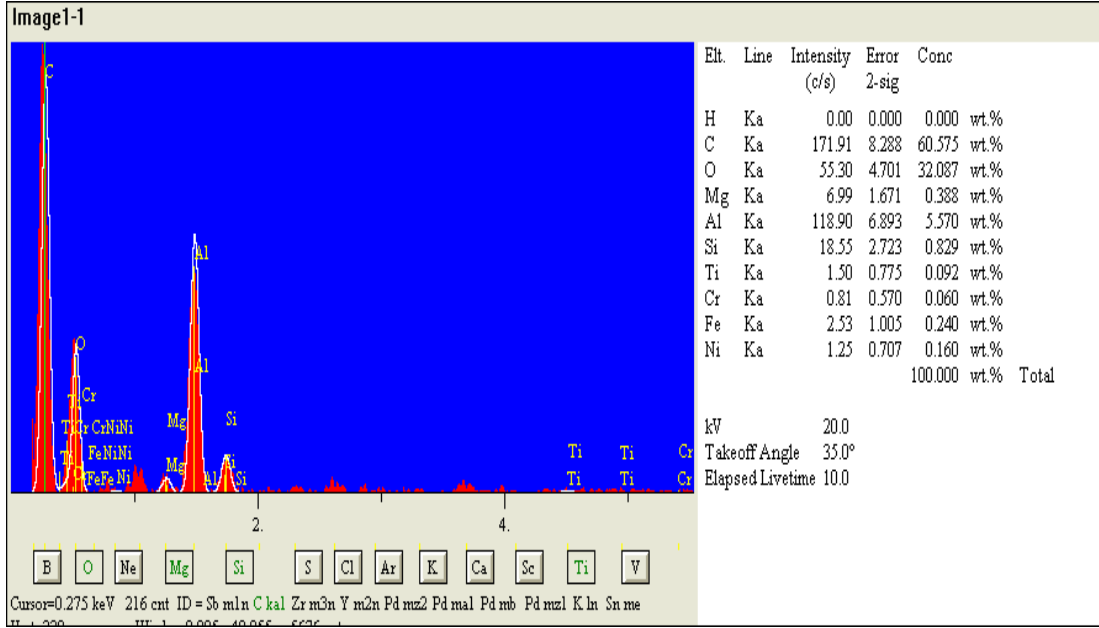
Şekil 7.23. 10. deneyde 15 dak. MA yapılmış köpük malzeme 2. nokta EDX analizi değeri

Aynı karışım malzemesinin MA süresi 30 dakika yapıldığında ise köpük malzemeye ait SEM görüntüleri Resim 7.17'de görülmektedir. Burada 50 kat büyütme resme baktığımızda köpük malzemenin gözenek duvarında incelmelerin olduğu ve bunun yanı sıra girinti çıkıntıların hakim olduğu görülmektedir. Aynı resimde 150 kat büyütme resme baktığımızda ise gözenek duvarı üzerinde küçük gözeneklerin olduğu görülmektedir. Burada küçük gözeneklerin büyük gözeneklerle birleşmeden kalmaları sıvı malzemenin viskozitesinin 15 dakika MA'ya göre daha yüksek olduğu ve bu durumda gözeneklerin birleşmeden hücre duvarında kalmalarına neden olduğu düşünülmektedir.



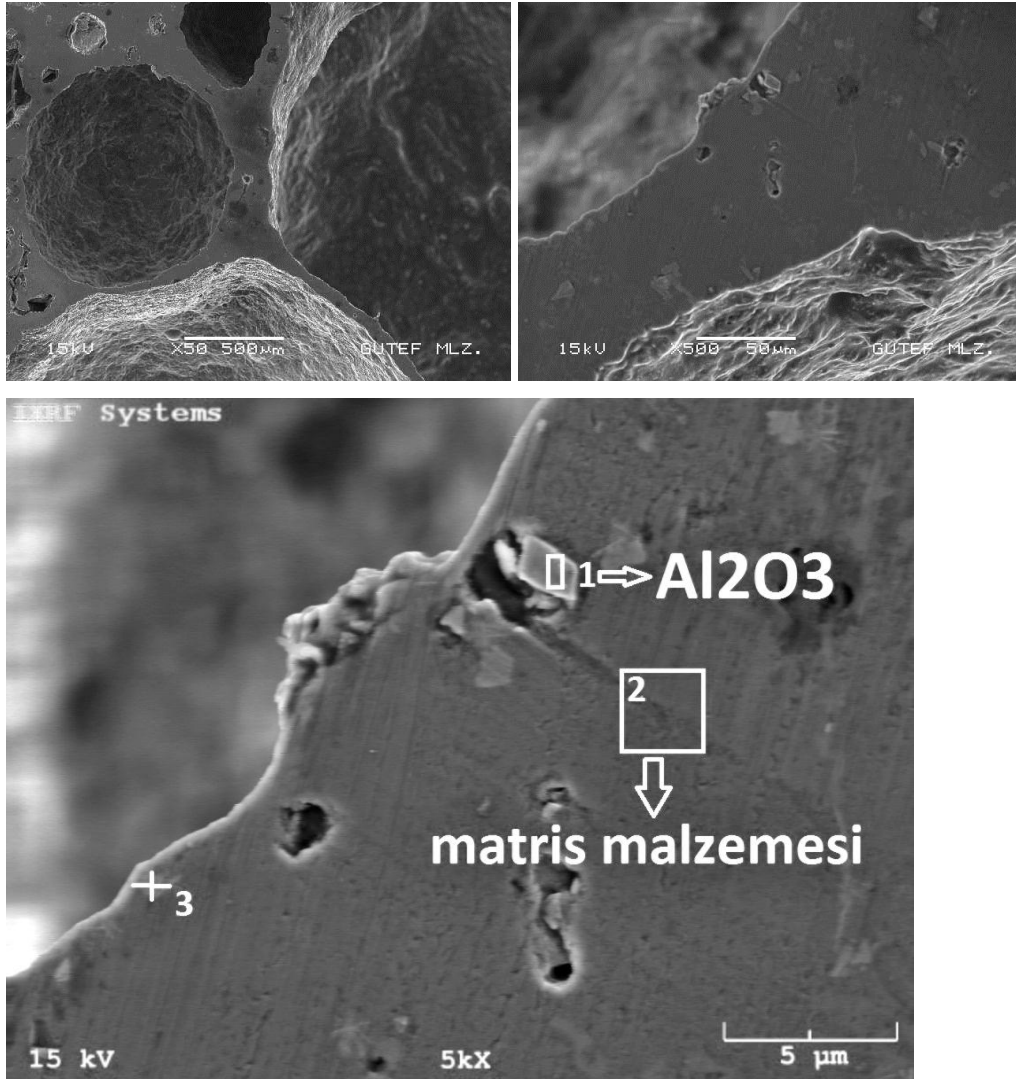
Resim 7.17. 30 dak. MA yapılmış Al-%1TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri

Şekil 7.24'te 1. noktaya ait EDX analiz değeri görülmektedir. Burada karbon elementinin yapı içerisine kalıp malzemede kullanılan yağlayıcıdan karıştığı düşünülmektedir.



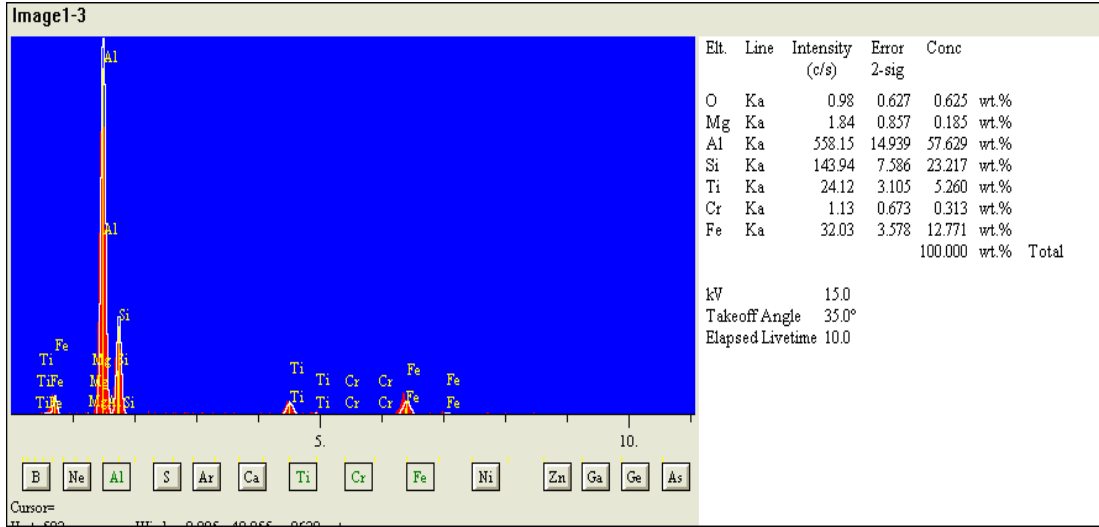
Şekil 7.24. 10. deneyde 30 dak. MA yapılmış köpük malzeme 1. nokta EDX analizi değeri

Al-%1TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımı 60 dakika MA yapıp köpürtülmesiyle elde edilen köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri Resim 7.18'de görülmektedir. Burada malzemelerin küresel gözenek yapıya sahip küçük oranlı büyütmelemlerden görülmektedir. 500 kat büyütmelemlerinde ise takviye elemanının yapı içerisinde homojen dağılım sergilediği görülmektedir.



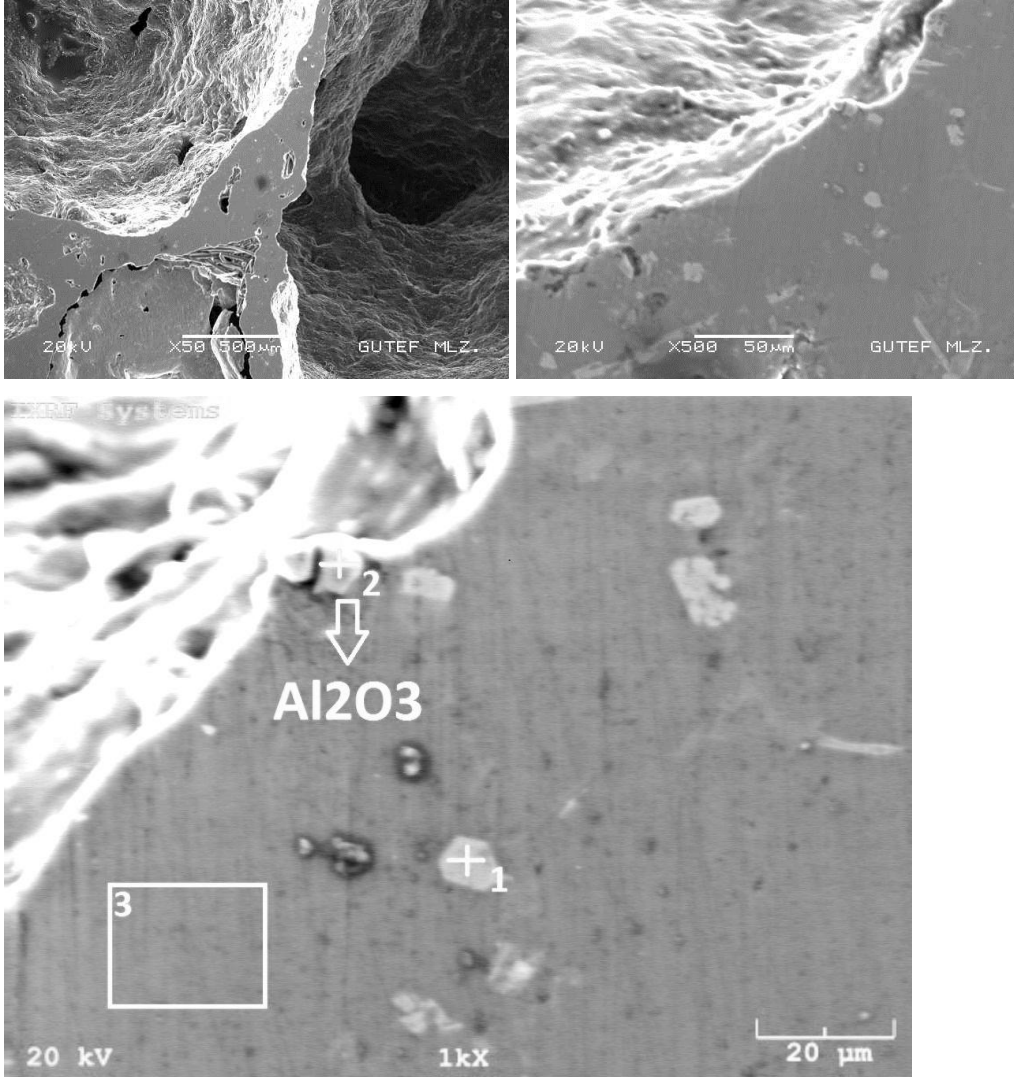
Resim 7.18. 60 dak. MA yapılmış Al-%1TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri

Resim 7.18'deki 3. noktaya ait analiz değerleri Şekil 7.25'te EDX görüntüsünde verilmiştir. Burada Si elementinin MA süresinin artmasıyla matris malzemesi içerisinde homojen dağılım sergilemediği ve belirli noktalarda yığılma yaptığı görülmektedir. Bu noktadaki EDX analiz sonuçlarında yapı içerisindeki %12'lik Fe dikkat çekmektedir. Bunun ise MA süresine bağlı olarak karıştırıcı kolların ve kazan çeperinin aşınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



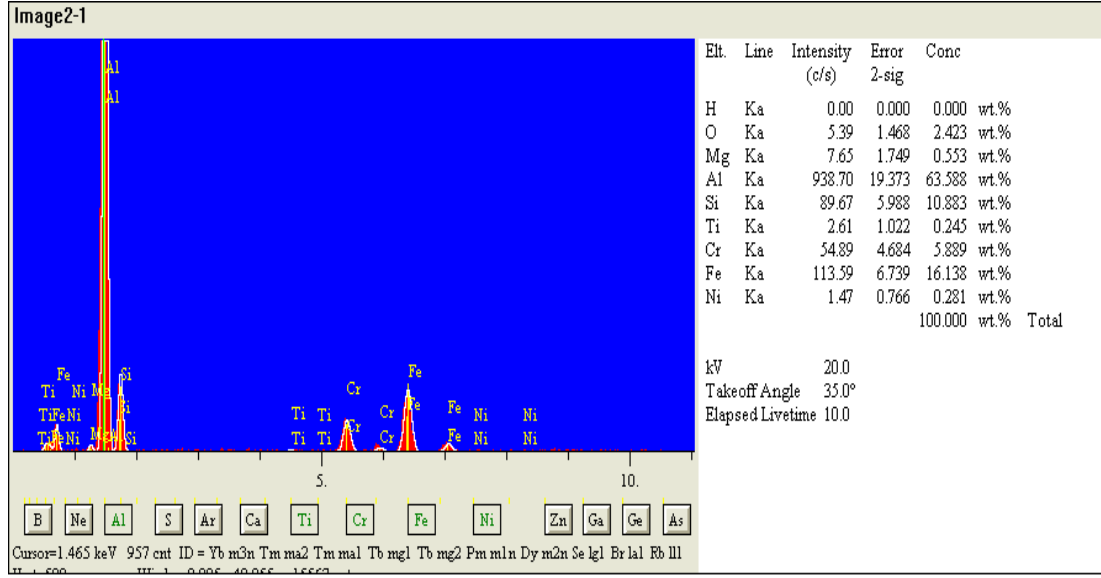
Şekil 7.25. 10. deneyde 60 dak. MA yapılmış köpük malzeme 3. nokta EDX analizi değeri

Aynı tozların MA süresi 120 dakika yapıldığında elde edilen köpük malzemelere ait SEM ve EDX analiz görüntüleri Resim 7.19’da verilmiştir. Burada 50 kat büyütme resim incelendiğinde gözenek duvarında incelmeler ve kalınlaşmaların olduğu görülmektedir. Gözenek duvarlarında incelmeler hücrelerin birleşme eğilimli olduğunu göstermektedir. 500 kat büyütme resim incelendiğinde ise gözenek duvarında takviye elemanının dengeli bir şekilde dağıldığı görülmektedir.



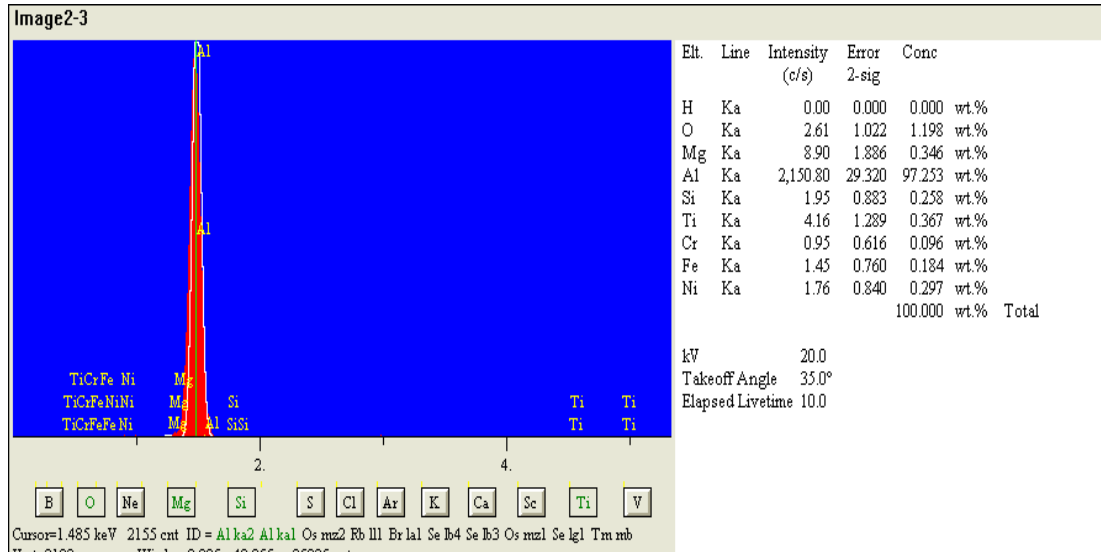
Resim 7.19. 120 dak. MA yapılmış  $\text{Al-}1\text{TiH}_2\text{-}0,6\text{Mg-}7\text{Si-}2\text{Al}_2\text{O}_3$  tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri

Köpük malzemelerin EDX analiz değerleri Resim 7.19'daki noktaların sonuçları Şekil 7.26'da verilmiştir. Burada 1. nokta analiz değerleri incelendiğinde Fe esaslı malzemenin ağırlıklı olması, bölgenin analizi sırasında çevreden alınan piklerden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7.26. 10. deneyde 120 dak. MA yapılmış köpük malzeme 1. nokta EDX analizi değeri

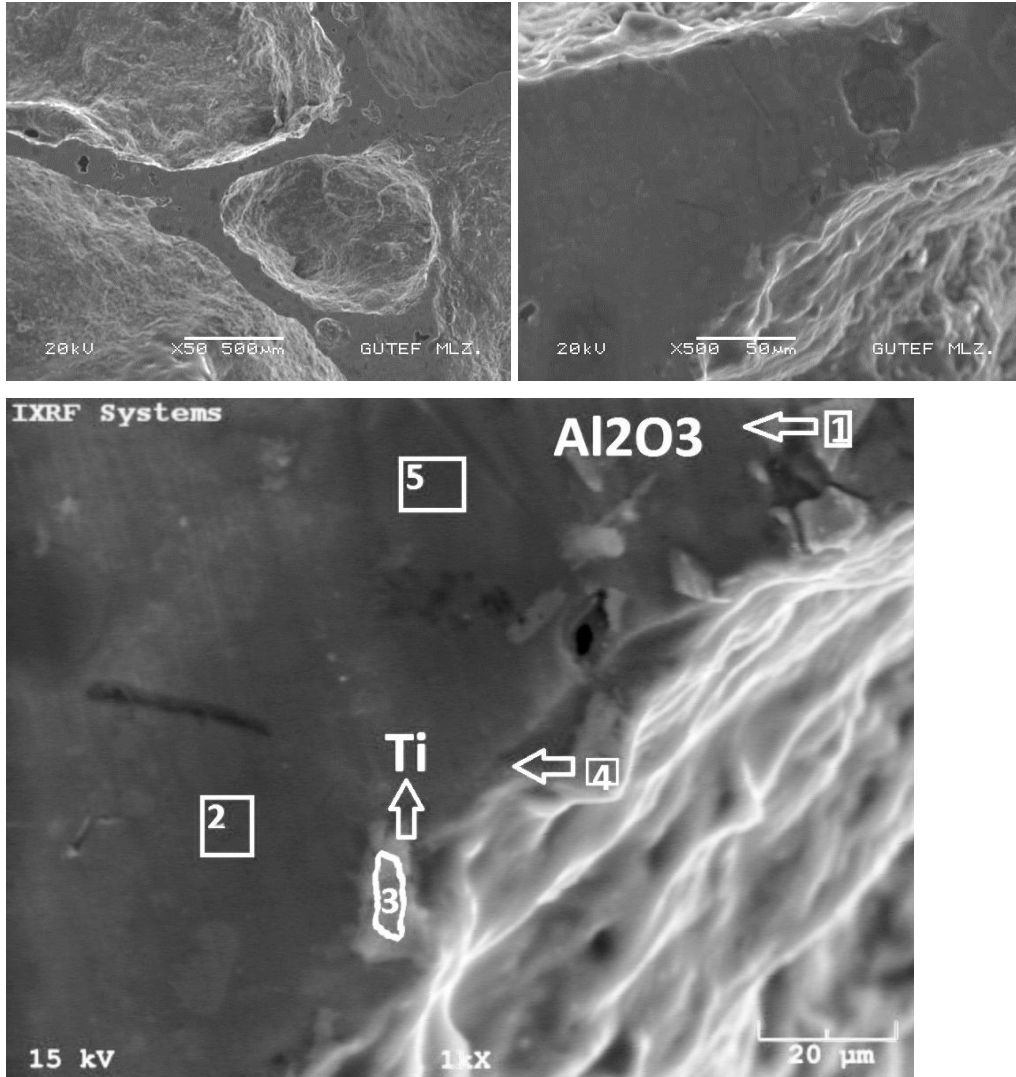
Şekil 7.27’de 3. nokta incelendiğinde matris malzemesi içerisinde oksitlenmesinin fazla olduğu görülmektedir. Ancak diğer kirlenici malzemelerin belirli noktalarda toplanmış olması matris malzemenin daha fazla kirlenmesini engellediği düşünülmektedir.



Şekil 7.27. 10. deneyde 120 dak. MA yapılmış köpük malzeme 3. nokta EDX analizi değeri

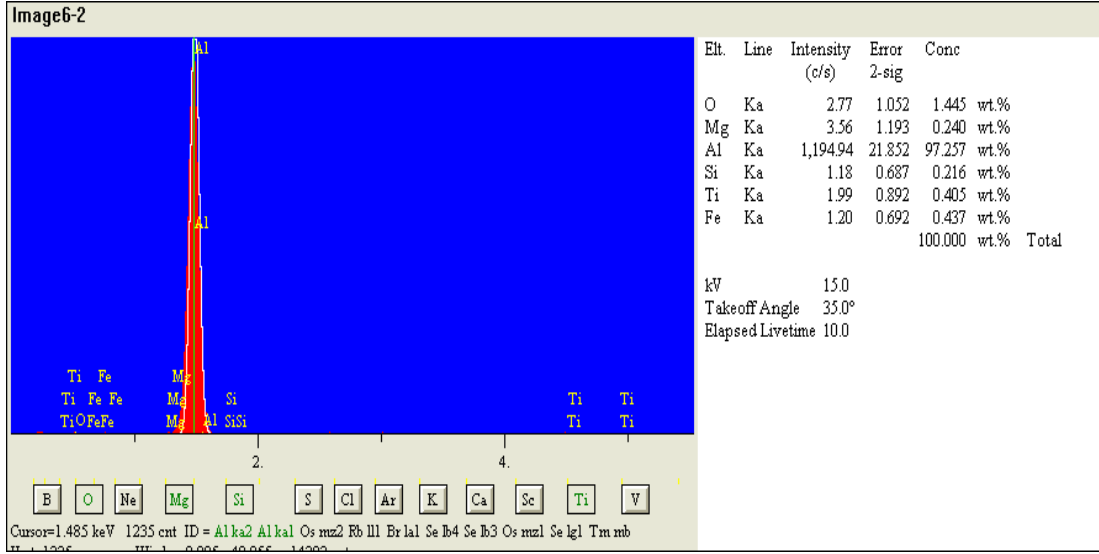
### 7.5.3 11. deney grubu (Al-%1,2TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) köpük malzemelerin SEM incelemeleri

Son deney grubu olan Al-%1,2TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımını 15, 30, 60, 120 dakika MA yapıp köpük malzeme üretilmiştir. Üretilen köpük malzemelerin SEM ve EDX analiz sonuçları incelenmiştir. 15 dakika MA yapılmış tozlara ait köpüklerin SEM ve EDX analiz görüntüleri Resim 7.20’de verilmiştir. Burada 50 kat büyütme resim incelendiğinde hücre duvarlarında incelmeler ve küçük çaplarda gözenekler görülmektedir. Resim 500 kat büyütüldüğünde ise hücre çeperine yakın bölgelerde takviye elemanının yoğunlaştığı görülmektedir. Yapı içerisinde çözünen TiH<sub>2</sub>’den ayrılan Ti elementine burada daha sık rastlandığı 1000 kat büyütme EDX görüntüsünde görülmektedir. Burada köpük malzemenin beklenen homojen gözenek yapısından biraz uzak kaldığı görülmektedir.

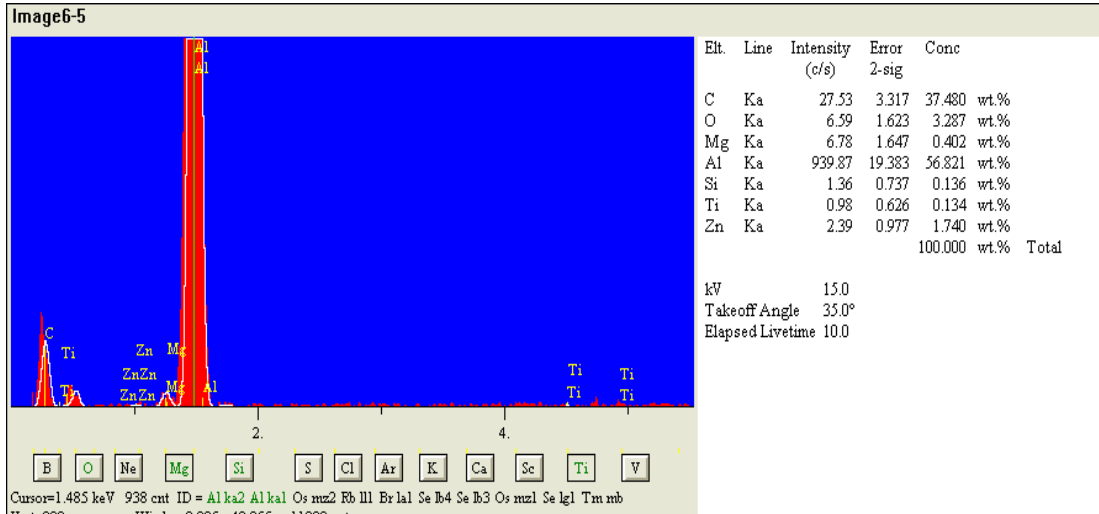


Resim 7.20. 15 dak. MA yapılmış Al-%1,2TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri

Hücre duvarı üzerinden alınan iki farklı alanın EDX analiz değerleri incelendiğinde iki numaralı bölgede oksitlenmelerin olduğu ancak matris malzemesinde fazla bir değişiklik olmadığı Şekil 7.28’de görülmektedir. 5 numaralı bölgenin EDX analiz değerlerine baktığımızda ise yapı içerisinde %37 C olduğu Şekil 7.29 görülmektedir. İki farklı bölgenin bu kadar farklılık göstermesi MA esnasında belirli elementlerin belirli bölgelerde toplandığı düşünülmektedir.



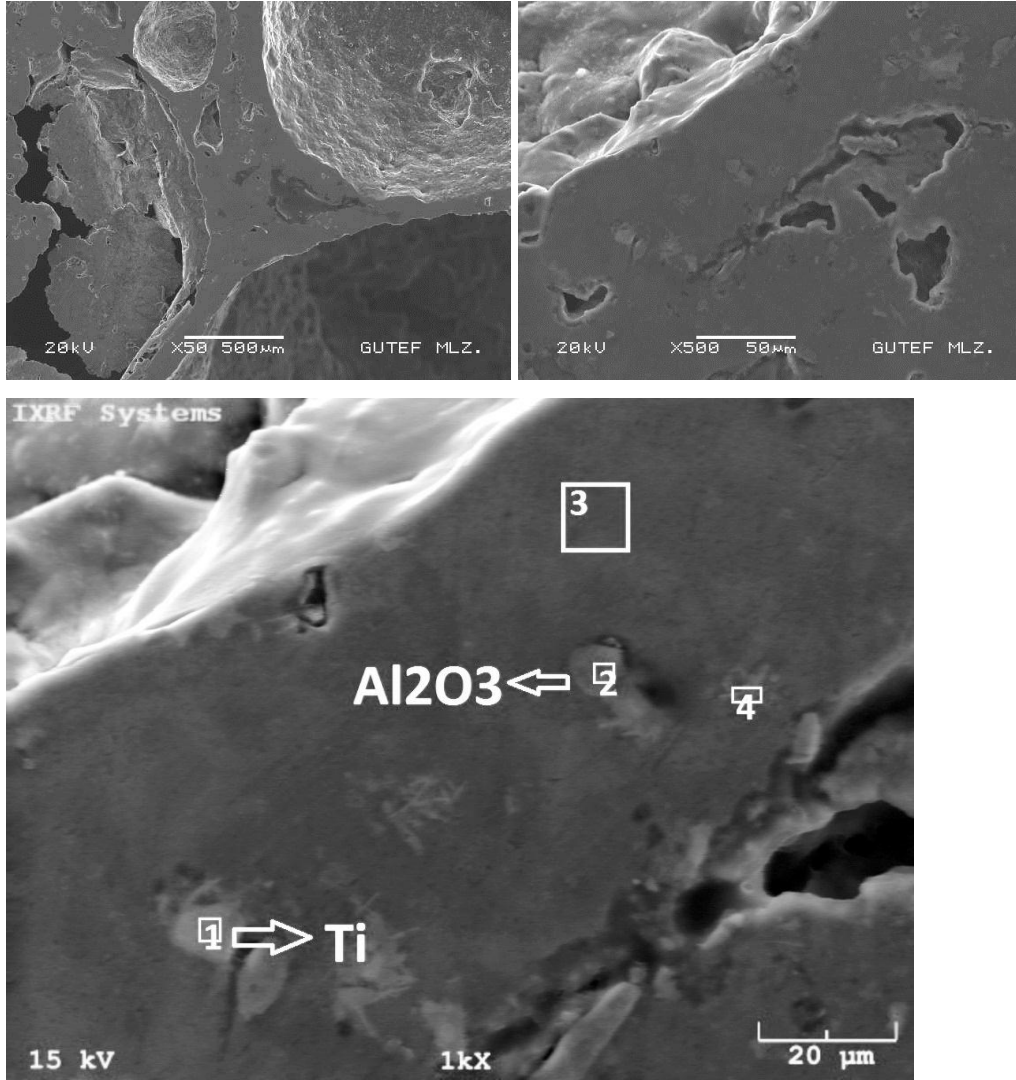
Şekil 7.28. 11. deneyde 15 dak. MA yapılmış köpük malzeme 2. bölgenin EDX analizi değeri



Şekil 7.29. 11. deneyde 15 dak. MA yapılmış köpük malzeme 5. bölgenin EDX analizi değeri

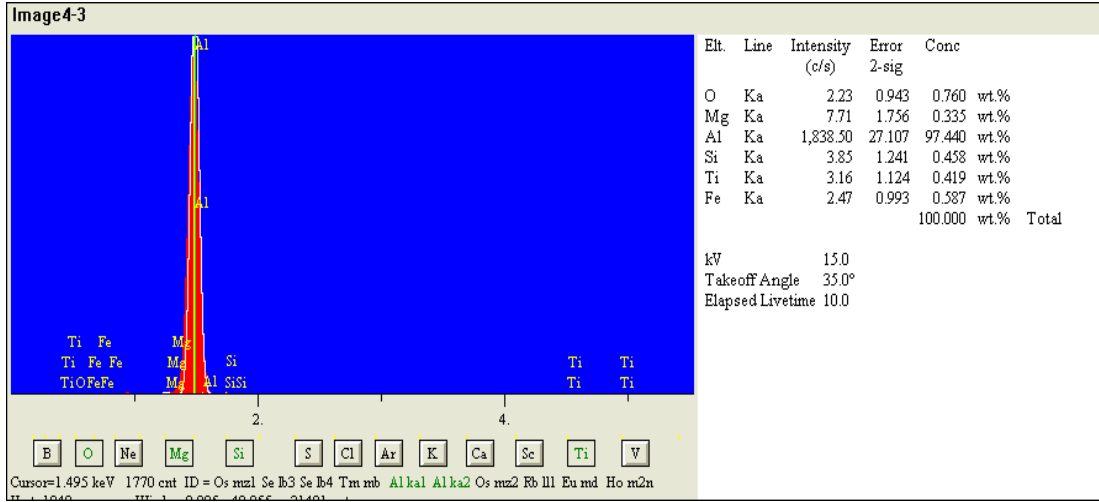
11. deneyde MA süresi 30 dakika yapıldığında köpük malzemelerin gözenek yapısı ve hücre duvarı SEM ve EDX görüntüleri Resim 7.21'de görülmektedir. Burada 50 kat büyütme resim incelendiğinde gözeneklerin küresel yapıya yakın olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Resim 7.11 b incelendiğinde ise gözeneklerin yapı içerisinde homojen dağılım sergilediği görülmektedir. Köpük malzemelerde istenen gözenek yapısı küresel ve homojen dağılımlı olması gerektiği bilinmektedir. Burada

yakalanan küresel ve homojen gözenek yapısı bu malzemenin imalatta da kullanılabileceği düşünülmektedir.

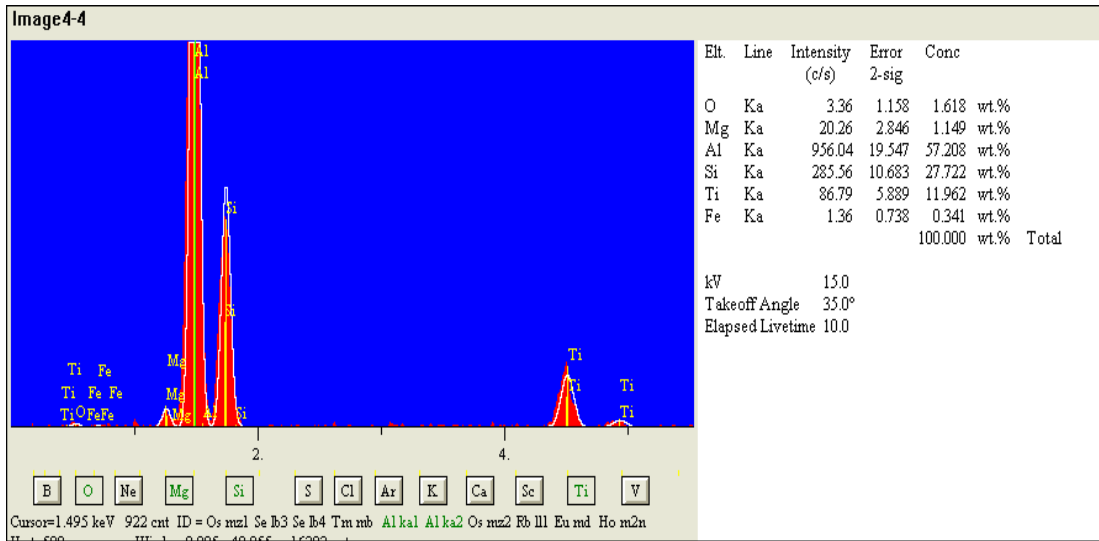


Resim 7.21. 30 dak. MA yapılmış Al-%1,2TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri

Resim 7.32'deki EDX analiz görüntülerine ait değerler Şekil 7.30'da verilmiştir. Burada 3. bölgenin analiz değerleri incelendiğinde 3 numaralı bölgede matris malzemenin %97 Al içerdiği görülmektedir. Toz karışımı içerisindeki %7 Si burada görülmemektedir. Ancak 4. bölge analiz değerleri incelendiğinde silisyumun buralarda biriktiği Şekil 7.31'de görülmektedir.



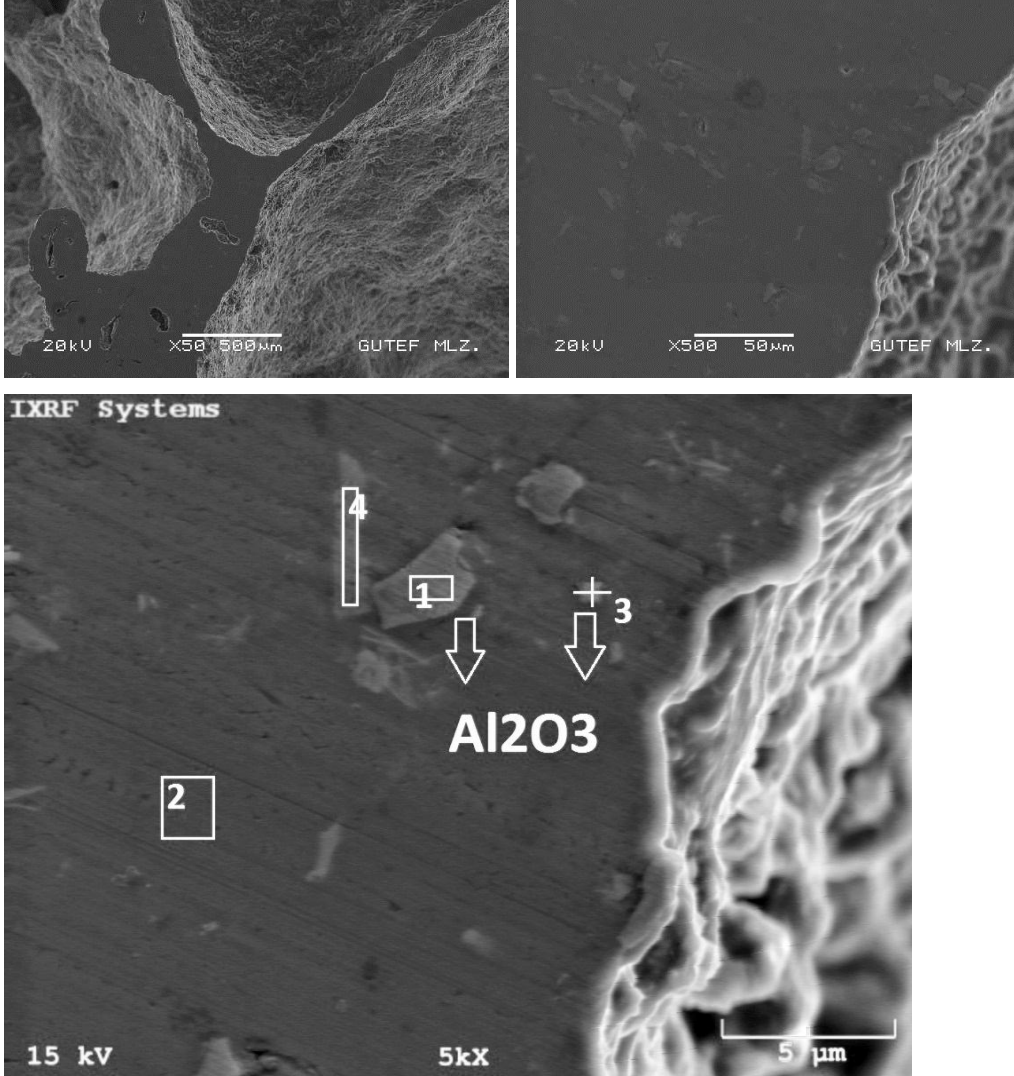
Şekil 7.30. 11. deneyde 30 dak. MA yapılmış köpük malzeme 3. nokta EDX analizi değeri



Şekil 7.31. 11. deneyde 30 dak. MA yapılmış köpük malzeme 4. nokta EDX analizi değeri

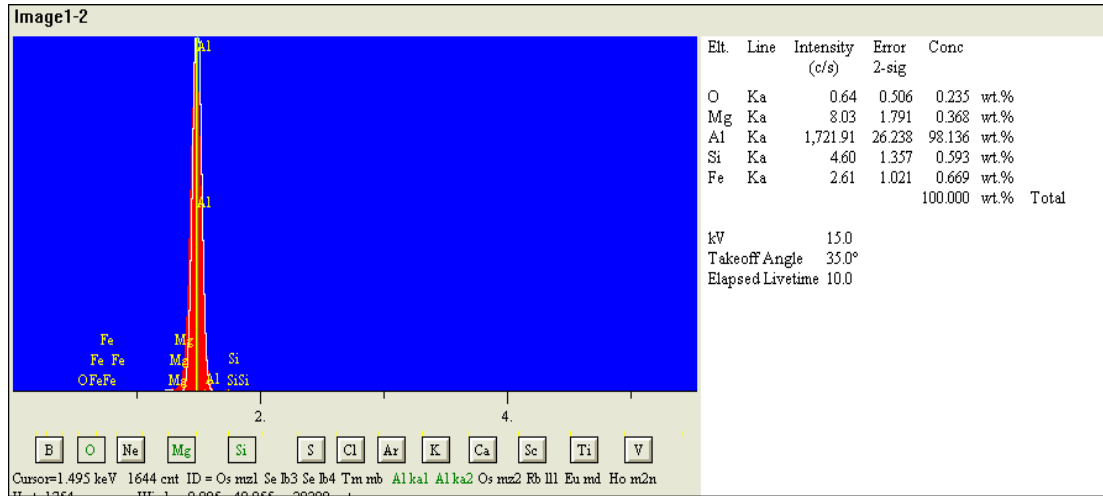
MA süresi aynı toz malzemeler için 60 dakika yapıldığında karışımdan elde edilen köpük malzemelerin SEM ve EDX analiz görüntüleri Resim 7.22'de görülmektedir. Burada 50 kat büyütme resim incelendiğinde gözenek duvarlarının kalınlığında incelmeler ve kalınlaşmaların olduğu dikkat çekmektedir. Kapalı sistemlerde gaz basıncı bütün yüzeye eşit miktarda uygulanmaktadır. Buna karşı gözenek duvarındaki değişik kalınlıklar malzemenin köpürme esnasında yüzey gerilimindeki

değişimden kaynaklandığı düşünülmektedir. 500 kat büyütme resim incelendiğinde ise yapı içerisindeki takviye elemanın dağılımı görülmektedir. Burada MA süresine bağlı olarak takviye elemanının yapı içerisinde homojen dağılım sergilediği söylenebilir. Bu da muhtemelen uzun süreli MA işleminden kaynaklanmaktadır.

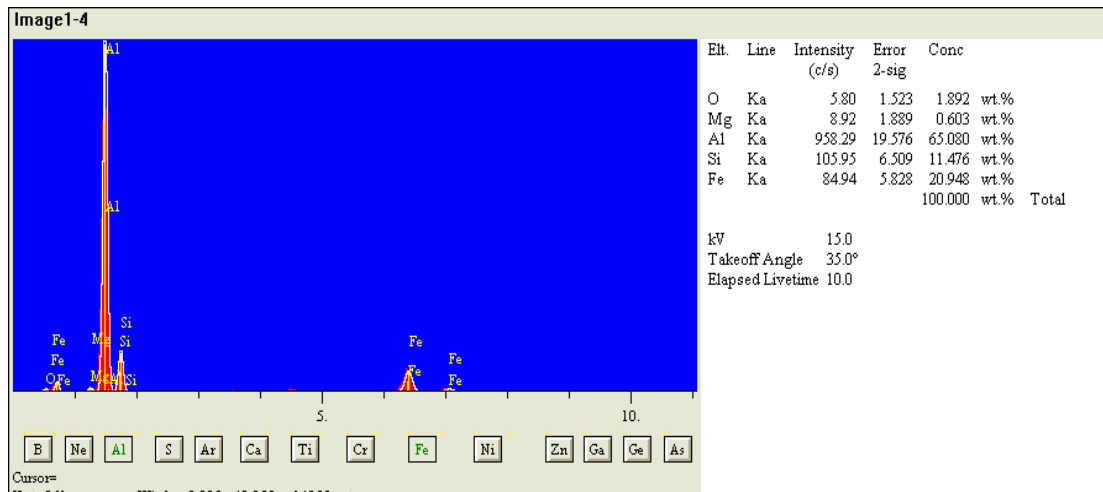


Resim 7.22. 60 dak. MA yapılmış Al-%1,2TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri

Resim 7.23'teki 2 numaralı bölgenin EDX analiz değerleri Şekil 7.32'de verilmiştir. Burada toz karışımına eklenen %7Si yaklaşık %0,6 civarında olduğu dikkat çekmektedir. Buna karşın Şekil 7.33'te 4 numaralı bölgeye ait EDX analiz değerleri görülmektedir. Burada ise Silisyumun yapı içerisindeki artışı ve ayrıca MA esnasında karıştırıcı kollardan yapı içerisine karışan Fe elementiyle bir alaşım oluşturduğu dikkat çekmektedir.

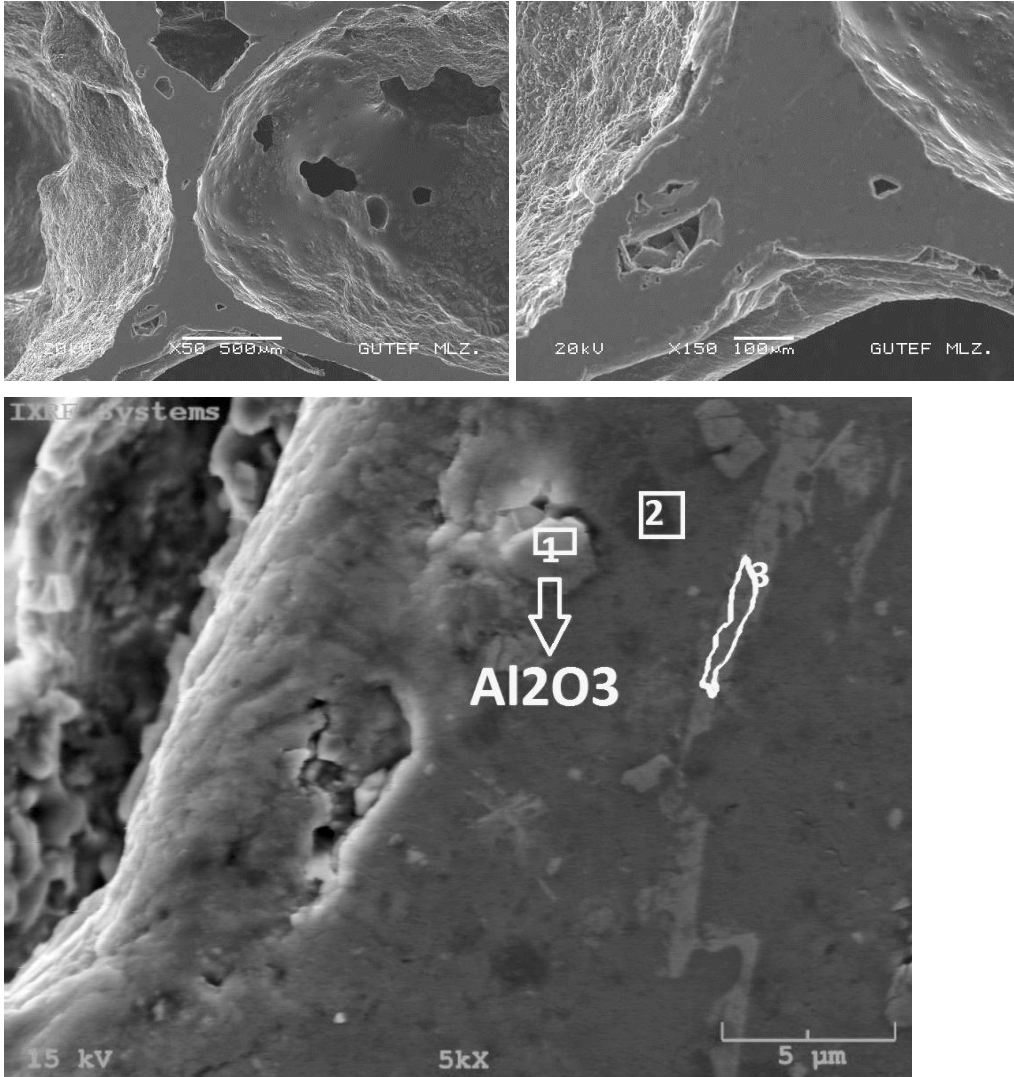


Şekil 7.32. 11. deneyde 60 dak. MA yapılmış köpük malzeme 2. nokta EDX analizi değeri



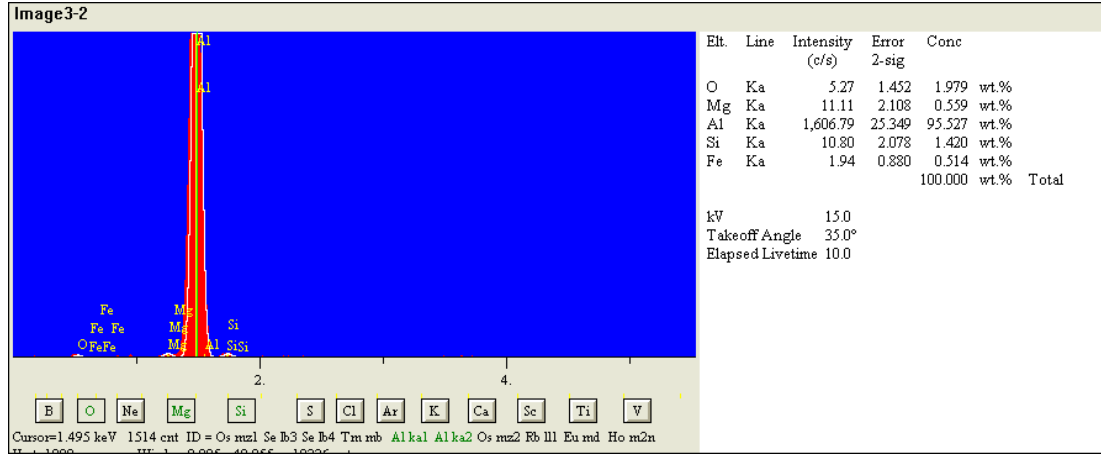
Şekil 7.33. 11. deneyde 60 dak. MA yapılmış köpük malzeme 4. nokta EDX analizi değeri

Aynı şartlarda MA süresi 120 dakika yapıldığında köpük malzemedeki değişimler Resim 7.23'te görülmektedir. Burada 50 kat büyütme resim incelendiğinde gözenek duvarındaki incelmeler sonucu gözeneklerin birleştikleri görülmektedir. 150 kat büyütme resimde ise gözenek duvarı üzerinde küçük gözenekleşmelerin olduğu görülmektedir. Gözenekleşme bir anda birçok yerde başlamakta ve hangisinin içerisinde  $H_2$  ayrışması fazla ise o baskın olmaktadır ve büyümektedir. Sonradan  $TiH_2$ 'den ayrılmaya çalışan  $H_2$  ise küçük gözenek şeklinde gözenek duvarında kaldığı düşünülmektedir.

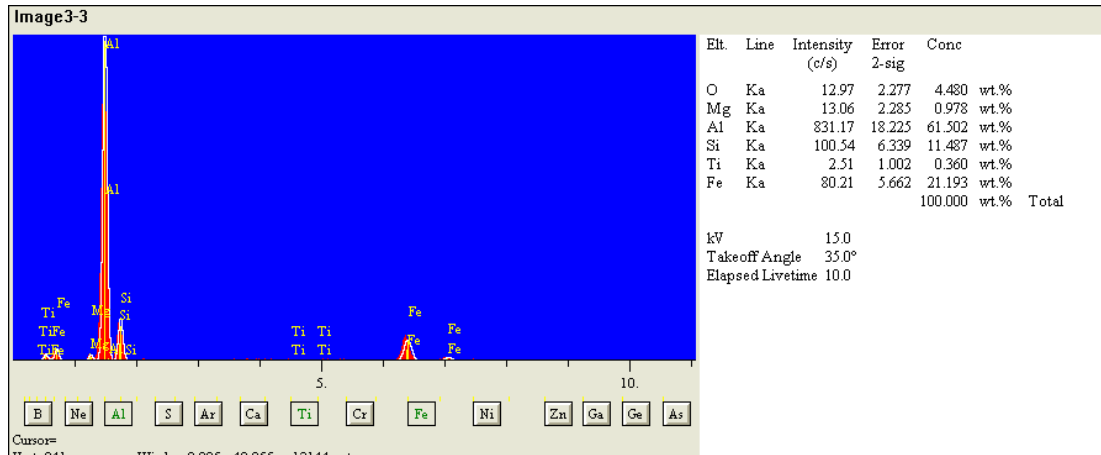


Resim 7.23. 120 dak. MA yapılmış  $Al-1,2TiH_2-0,6Mg-7Si-2Al_2O_3$  tozlara ait köpük malzemenin SEM ve EDX görüntüleri

MA süresinin artmasıyla matris malzemesinin oksitlendiği Şekil 7.34'te görülmektedir.



Şekil 7.34. 11. deneyde 120 dak. MA yapılmış köpük malzeme 2. nokta EDX analizi değeri



Şekil 7.35. 11. deneyde 120 dak. MA yapılmış köpük malzeme 3. nokta EDX analizi değeri

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yapı içerisinde homojen  $TiH_2$  dağılımını sağlamak ve homojen gözenek yapısına sahip köpük malzeme üretmek amacıyla MA yöntemi kullanılmıştır. İlk çalışmalarda homojen gözenek yapısına sahip köpük malzeme üretim parametreleri belirlenmiştir. Bu yöntemle elde edilen köpük malzemenin yoğunluğunun diğer (MA yöntemi kullanılmadan elde edilen) yöntemlerde elde edilen köpük yoğunluğundan daha büyük olduğu için sonraki çalışmalarda köpürtücü madde miktarı artırılıp köpük malzemeler üretilmiştir. MA süresinin köpük malzeme üzerindeki etkileri incelenerek aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir:

1. Si ilave edilmeden elde edilen köpük malzemelerde yeterli seviyede köpürme sağlanmadığı,
2. Takviye elemanı olarak kullanılan  $Al_2O_3$ 'ün SiC'e göre gözenek dağılımını daha homojen yaptığı,
3. %2  $Al_2O_3$ 'ün gözenek dağılımı üzerinde diğerlerine göre daha etkili olduğu,
4.  $TiH_2$ 'nin artmasıyla köpük malzemenin yoğunluğunda azalma olduğu ve küresel gözenek yapısı oluştuğu,
5. MA süresi arttıkça matris malzemesinin kirlendiği görülmüştür, bu da köpük malzeme özelliklerini olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir.
6. Maliyet göz önüne alındığında bu yöntemle köpük üretiminin diğer toz metalurjisi yöntemlerden daha pahalı olduğu söylenebilir. Ancak kısa süreli MA yöntemlerinin (15 dak.'dan daha az) hem maliyet açısından, hem de homojen gözenek dağılımı açısından faydalı olacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Karabulut, H., “Toz Metalurjisi Yöntemiyle  $Al_2O_3$ , SiC ve  $B_4C$  Takviyeli Al Matrisli Kompozit Üretiminde Mekanik Alaşımlama Süresinin Kompozit Özelliklerine Etkisi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, Ocak (2011).
2. Uzun, A., “TM Yöntemi İle Alüminyum Esaslı Küresel Şekilli Metalik Köpük Üretimi Ve Üretim Parametrelerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, Haziran, (2009).
3. Türker, M., Çinici, H., “TM Yöntemi İle Üretilen Al Esaslı Metalik Köpüğe Deformasyon Miktarının Etkisinin Araştırılması”, *13. Uluslararası Metalurji Ve Malzeme Kongresi*, 854-860, İstanbul, (2006).
4. Türker, M., Çinici, H., Günebakmaz, S., Gülen, H., “TM İle Üretilen Al Esaslı Metalik Köpükte Bor Oksit İlavesinin Köpürmeye Etkisinin Araştırılması”, *13. Uluslararası Metalurji Ve Malzeme Kongresi*, 910-918, İstanbul, (2006).
5. Çinici, H., “Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Esaslı Metalik Köpük Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara Ocak (2004).
6. Polat, B., D., KELEŞ, Ö., TAPTIK, Y., “Metalik Köpükler Alüminyum Metalik Köpük Ve Üretim Yöntemleri” *Metal Dünyası*, Temmuz, (2010).
7. Özer, G., “Alüminyum Esaslı Köpük Metal Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2005).
8. Pelit, Y., Türker, M., “Mekanik Alaşımlanmış  $Al_2O_3$  Takviyeli AlSi7Mg0,6 Esaslı Tozlardan Metalik Köpük Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi”, *6. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı Ve Sergisi*, 776-780 Ankara, (2011).
9. Bostan, B., “Alüminyum Karbon Tozlarından Mekanik Alaşımlama Ve Sonrası İşlemlerle  $Al_4C_3$  Sentezlenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara, (2003).
10. Amjad, S., “Thermal Conductivity And Noise Attenuation In Aluminium Foams”, *MsC Thesis*, Cambridge, (2001).
11. Ma, L., He, D., “Cellular Structure Controllable Aluminium Foams Produced By High Pressure Infiltration Process” *Scripta Materialia*, 41(7): 785-789, (1999).
12. Saira A., Wolfson C., “Thermal Conductivity And Noise Attenuation In Aluminium Foams”, University Of Cambridge, *MsC Thesis*, Cambridge, October (2001).

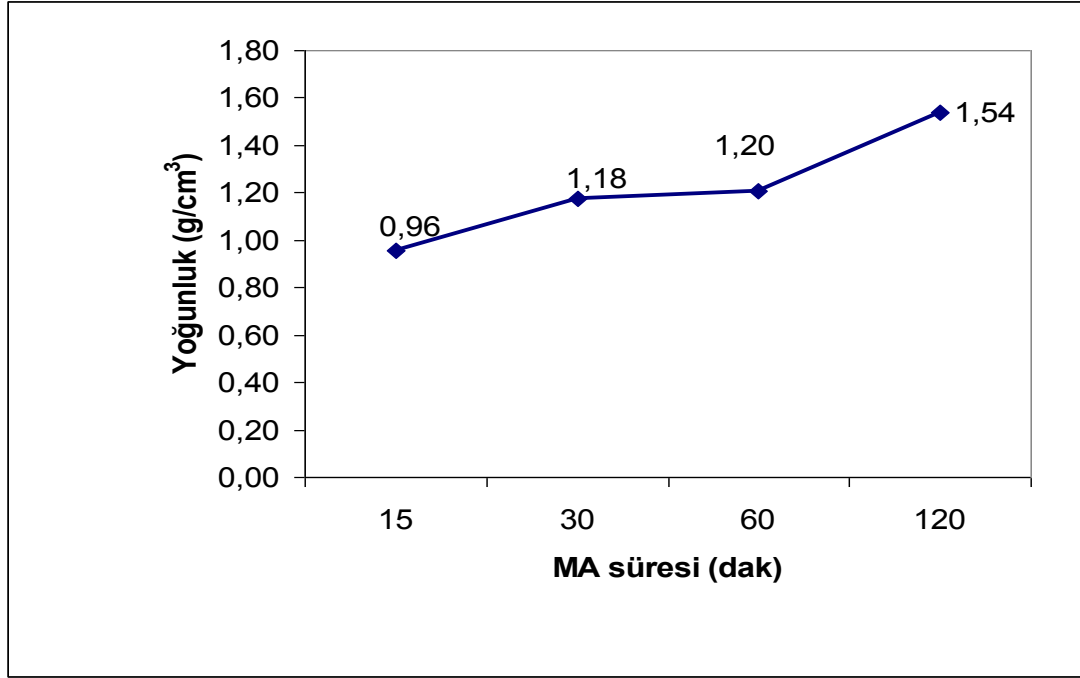
13. Eliot, J.C., *US patent*, 2,751,289 (1956).
14. Banhart, J., “Manufacturing Routes For Metallic Foams”, *Overview Solidification Science*, 22-27, December (2000).
15. Banhart, J., “Aluminium Foams For Lighter Vehicles”, *Int. J. Vehicle Design*, Vol. 37, Nos. 2/3, Germany (2005).
16. Ashby, M.F., Evans, A., G., Fleck, N., A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G., “Metal Foams: A Design Guide”, *Butterworth-Heinemann*, Boston, (2000).
17. Banhart, J., Weaire, D., “On The Road Again - Metal Foams Find Favor” *Physics Today*, 55: 37-42 (2002).
18. Brunke, O., Hamann A., Cox, S.J., Odenbach, S., “Expremetal And Numerical Analylsis Of The Drenage Of Al Foams”, *Journal of Phisics: Condensed Matter*, 6353-6362, (2005).
19. [www.cymat.com/PDFs/Cymat%20Investor%20Presentation%20Jan%2011.pdf](http://www.cymat.com/PDFs/Cymat%20Investor%20Presentation%20Jan%2011.pdf)
20. Türker, M., Metalik Köpükler Ve Kullanım Alanları, *Metal Dünyası*, Temmuz, (2010)
21. Banhart, J., “Manufacture, Characterisation And Application Of Cellular Metals And Metal Foams”, *Progress In Materials Science*, 46 559–632, (2001).
22. Gergely, V., Clyne, B., “The Formgrip Process:Foaming Of Reinforced Metals By Gas Release In Precursors”, *Advanced Engineering Materials*, 4: 175-178 (2000)
23. Korner, C., Singer, R. F., , Degischer H.P., Kriszt B., “Foaming Processes For Al”, *Handbook Of Cellular Metals. Wiley-Vch Verlag Gmbh*, Weinheim 8-14 (2002).
24. H. Demirtaş, “Toz Metalurjisi Yöntemi İle Alüminyum Esaslı Köpük Sandviç Yapı Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2010).
25. Asavavisithchai, S., Kennedy, A.R., “The Effect Of Mg Addition On The Stability Of Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Foams Made By A Powder Metallurgy Route”, *Scripta Materialia*, 54 1331–1334 (2006).
26. Türker, M., “Toz Metalurjisi Yöntemi İle Alüminyum Köpük Üretimi”, 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (Iats’09)*, 1-6, Türkiye, (2009).

27. Banhart, J., “Metal Foams: Production And Stability”, *Advanced Engineering Materials*, 8: 781-794 (2006).
28. G. Garc´ıa-Moreno, F., Banhart, J., “Foaming Of Blowing Agent-Free Aluminium Powder Compacts, Colloids And Surfaces A: Physicochem” *Eng. Aspects* 309 264–269 (2007).
29. Yavuz, İ., “Metalik Köpük Malzemeler Ve Uygulama Alanları”, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 2, No: 1*, (49-58) (2010).
30. Degischer, H.-P., Kriszt, B., “Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications”, *Wiley- Vch*, pp. 299-312, (2002).
31. Schwingela, D., Seeliger, H.W., Vecchionacci, C., Alwesc, D., Dittrich, J., “Aluminium Foam Sandwich Structures For Space Applications”, *Science Direct, Acta Astronautica 61*, 326 – 330 (2007).
32. Schaeffler, P., Rajner, W., “Production, Properties, And Applications Of Alulight Closed-Cell Aluminum Foams”, *The Fifth International Workshop On Advanced Manufacturing Technologies*, pp. 1-6, London, Canada, (2005).
33. Neugebauer, R., Hipke, T., Hohlfeld, J., Thümmel, R., “Highly Damped Machine Tools With Metal Foam”, *International Conference Advanced Metallic Materials*, Slovakia, (2003).
34. Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., Kitahara, A., “Alporas Aluminum Foam: Production Process, Properties, And Applications”, *Advanced Engineering Materials*, 2, No. 4, 179-183, (2000).
35. Pelit, Y., Ayata, A., Kurt, A., Türker, M., “Toz Metal Al Köpük Malzemelerin Köpürtme Öncesi Saplama Kaynağı ile Birleştirilmesi”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11)*, 132-135, Elazığ, May (2011).
36. Dörtbölük, C., “Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmesi Ve Karakterizasyonu”, Bilim Uzmanlık Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, Eylül (2006).
37. Erdem, M., Türker, M., “Farklı Sürelerde Mekanik Alaşımlanan Nikel Esaslı Süperalaşım Tozun Karakterizasyonu”, *6. International Powder Metallurgy Conference & Exhibition*, 717-726, Ankara, (2011).
38. Suryanarayana, C., “Mechanical Alloying And Milling”, *Marcel Dekker*, 33-82, ABD (2003).
39. Kaya, H., “Spex Tipi Mekanik Alaşımlama Cihazının Tasarımı, İmalatı Ve Öğütme Kabiliyetinin İncelenmesi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (Iats’09)*, 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye (2009).

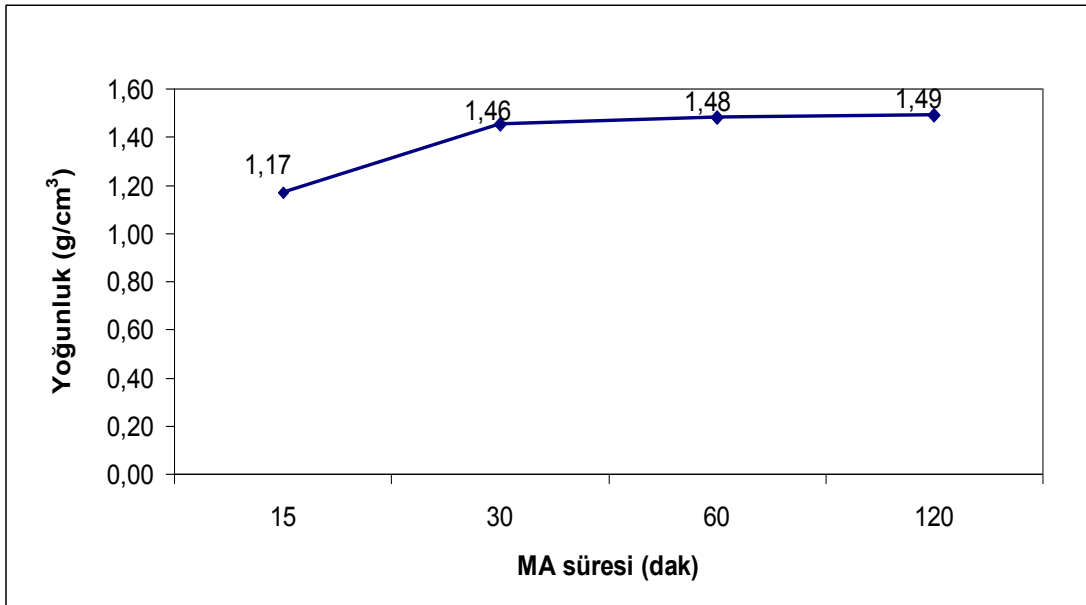
40. Aksöz, S., Özdemir, T., Bostan, B., “AA 2014 Alüminyum Alaşım Tozlarında Ma Ve Spex Yöntemleri Kullanılarak Karbon İlavesi Ve Özelliklerinin Araştırılması”, **6. International Powder Metallurgy Conference & Exhibition**, 826-830, Ankara, (2011).
41. Başoğlu, M., “Mekanik Alaşımlama Yönteminin  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  Süperiletkenin Yapısı Üzerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, (2007).
42. Di, L., M., Bakker, H. J., “Phase transformation of the compound  $V_3Ga$  induced by mechanical grinding”, *Phys. C: Condens. Matter*, 3: 3427-3432 (1991).
43. Güler, Ö., “Oksit Takviyeli Bakır Kompozitin Mekanik Alaşımlama Yöntemi İle Üretilmesi Ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, (2006).
44. Uzun, A., Türker, M., “Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen Alüminyum Esaslı Küresel Şekli Metalik Köpükte SiC İlavesinin Köpürmeye Etkisi, **5.Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı**, 808-814, Ankara, (2008).
45. Uzun, A., Gökmen U., Türker, M., “Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen Alüminyum Esaslı Metalik Köpükte Si İlavesinin Köpürmeye Etkisi”, **5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (İats'09)**, 13-15, Karabük, Mayıs (2009).
46. S. Esmaeelzadeh A., A. Simchi A,B., D. Lehnhus C., “Effect Of Ceramic Particle Addition On The Foaming Behavior, Cell Structure And Mechanical Properties Of P/M AlSi7 Foam”, *Materials Science And Engineering A* **424**, 290–299 (2006).
47. Arık, H., Türker, M., Sarıtaş, S., “Mekanik Alaşımlama İle Alüminyum Matrisli Alüminyum Karbür ( $Al_4C_3$ ) Kompozit Malzeme Üretimi” **2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı**, 433-440, Ankara, (1999).
48. Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., “Toz Metalurjisi Ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri“, **Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları**, 05, Ankara, (2007).
49. Banhart, J., “Properties and applications of cast aluminium sponges”, **1st International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures (MetFoam'99)**, Bremen, Germany, 159-162 (1999).

**EKLER**

EK-1 Deney sonucu elde edilen yoğunluğun MA süresine bağlı değişim grafiği

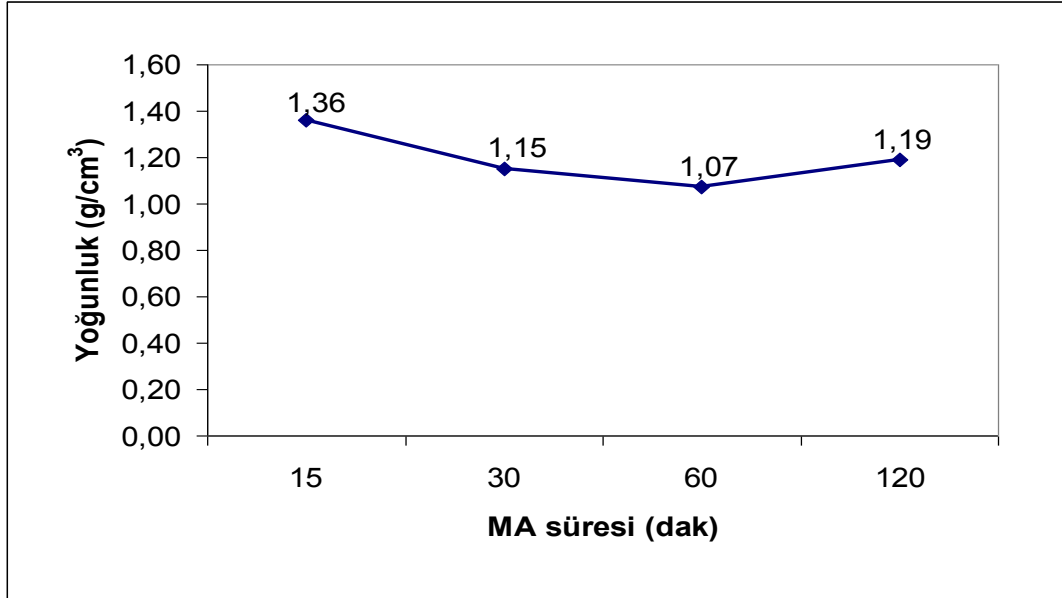


Şekil 1.1. Al-0,8TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-2SiC toz karışımını MA süresine bağlı yoğunluk değişimi

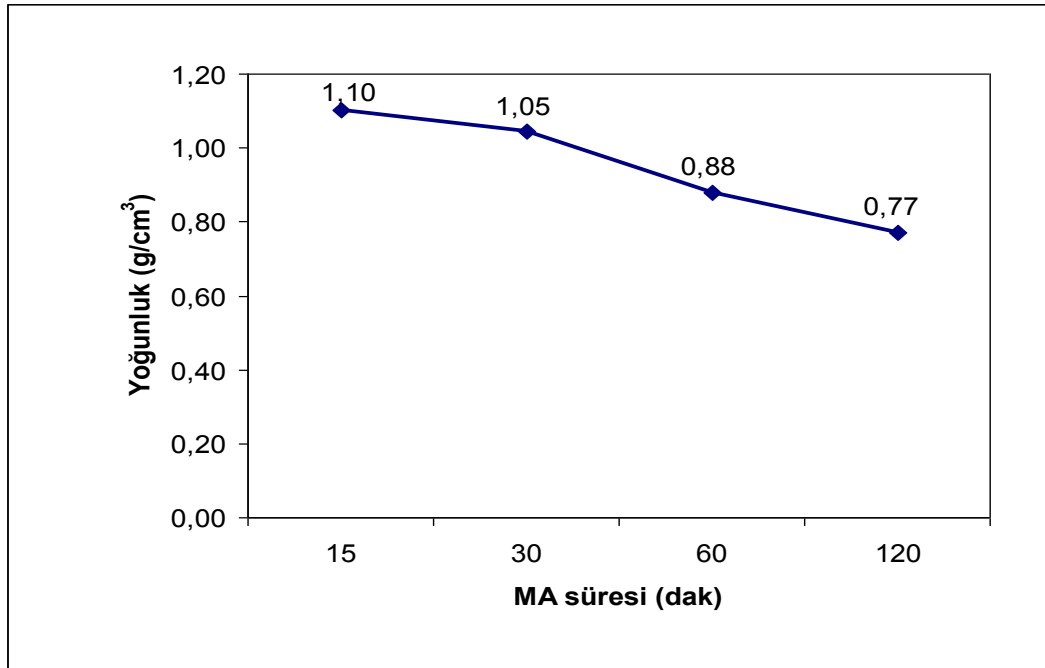


Şekil 1.2. Al-0,8TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-4SiC toz karışımını MA süresine bağlı yoğunluk değişimi

EK-1 (Devam) Deney sonucu elde edilen yoğunluğun MA süresine bağlı değişim grafiği

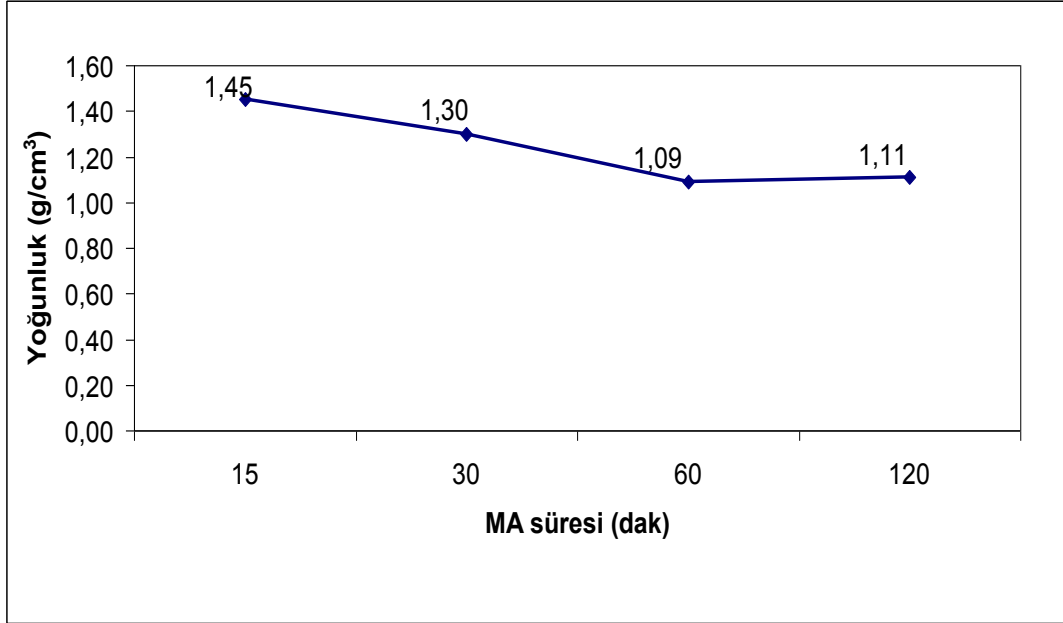


Şekil 1.3. Al-0,8TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-8SiC toz karışımını MA süresine bağlı yoğunluk değişimi

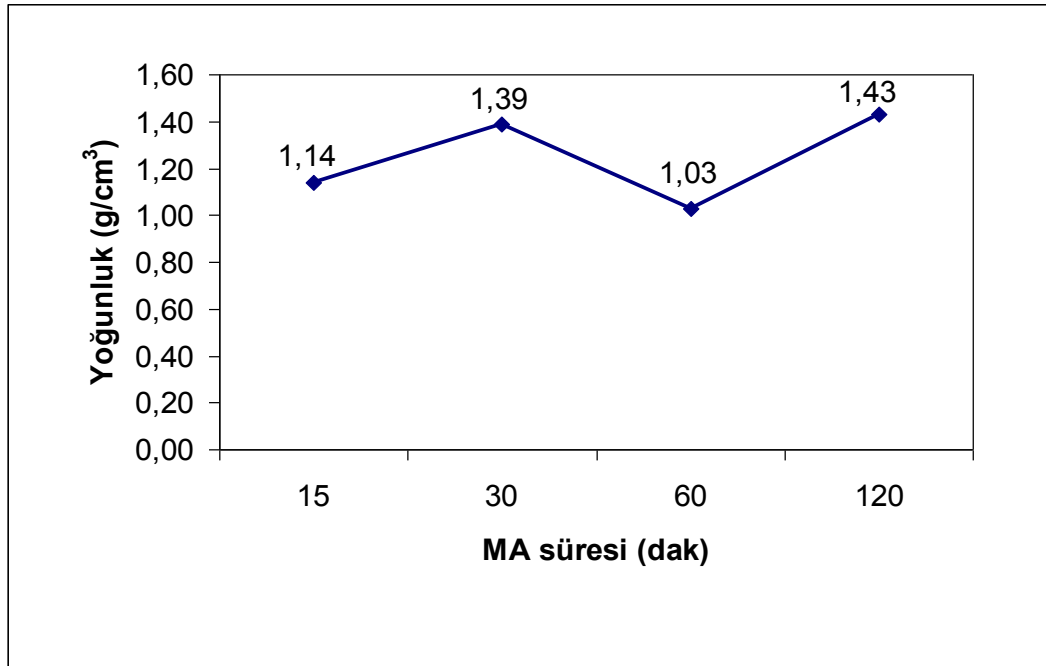


Şekil 1.4. Al-0,8TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-7Si-2SiC toz karışımını MA süresine bağlı yoğunluk değişimi

EK-1 (Devam) Deney sonucu elde edilen yoğunluğun MA süresine bağlı değişim grafiği

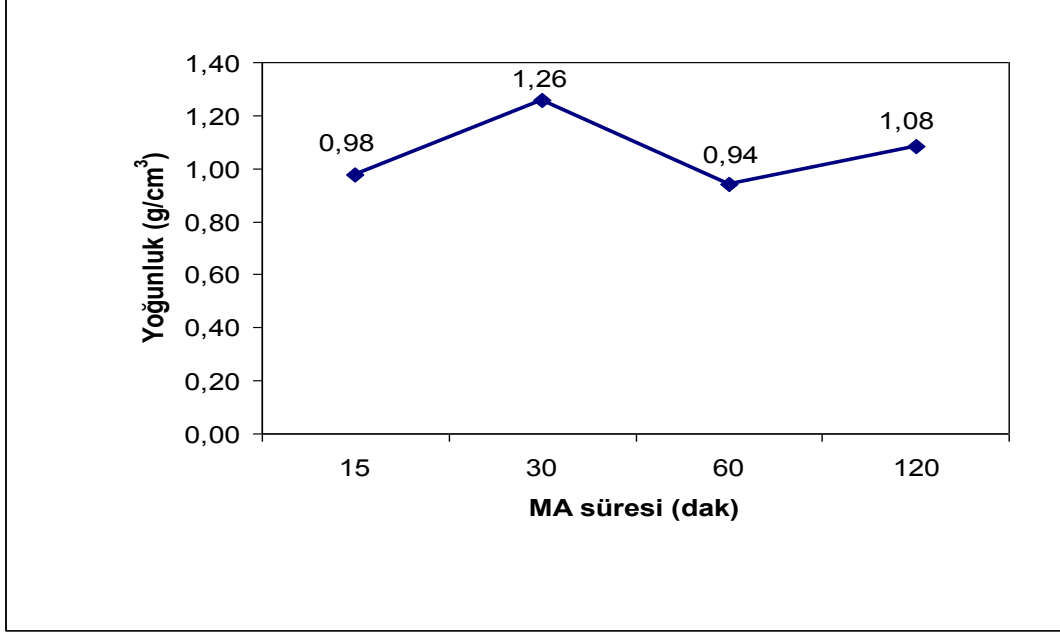


Şekil 1.5. Al-0,8TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-7Si-4SiC toz karışımını MA süresine bağlı yoğunluk değişimi

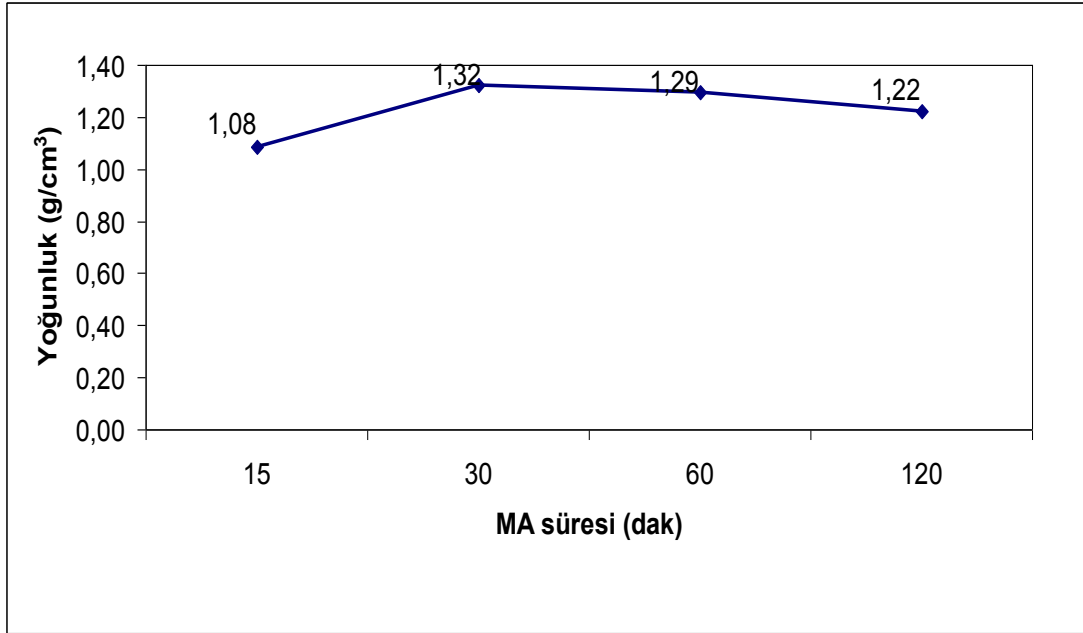


Şekil 1.6. Al-0,8TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-7Si-8SiC toz karışımını MA süresine bağlı yoğunluk değişim

EK-1 (Devam) Deney sonucu elde edilen yoğunluğun MA süresine bağlı değişim grafiği

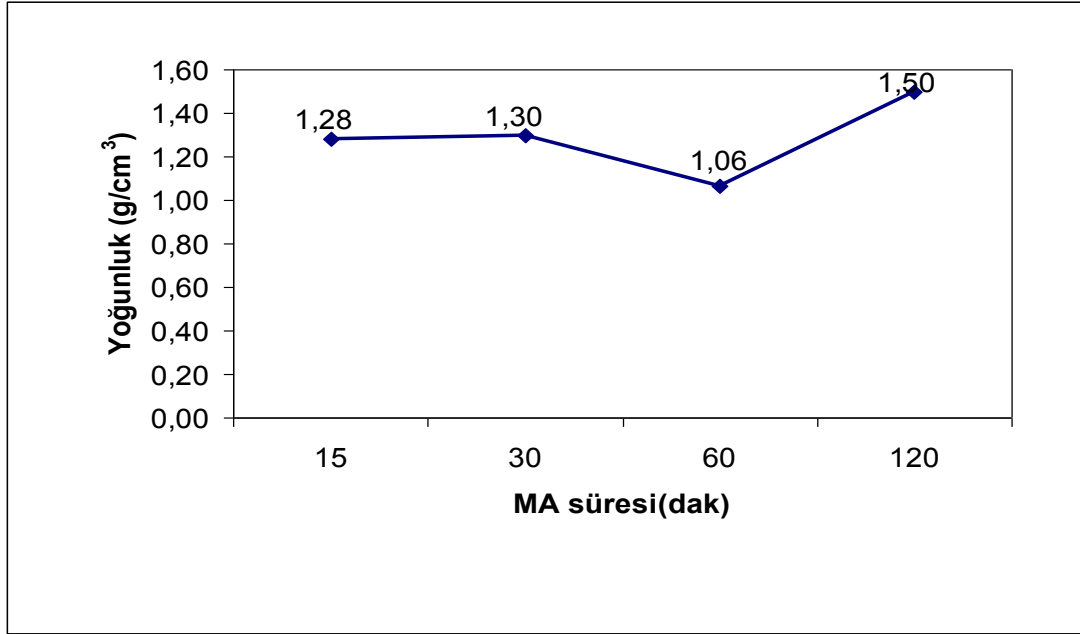


Şekil 1.7. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımını MA süresine bağlı yoğunluk değişim

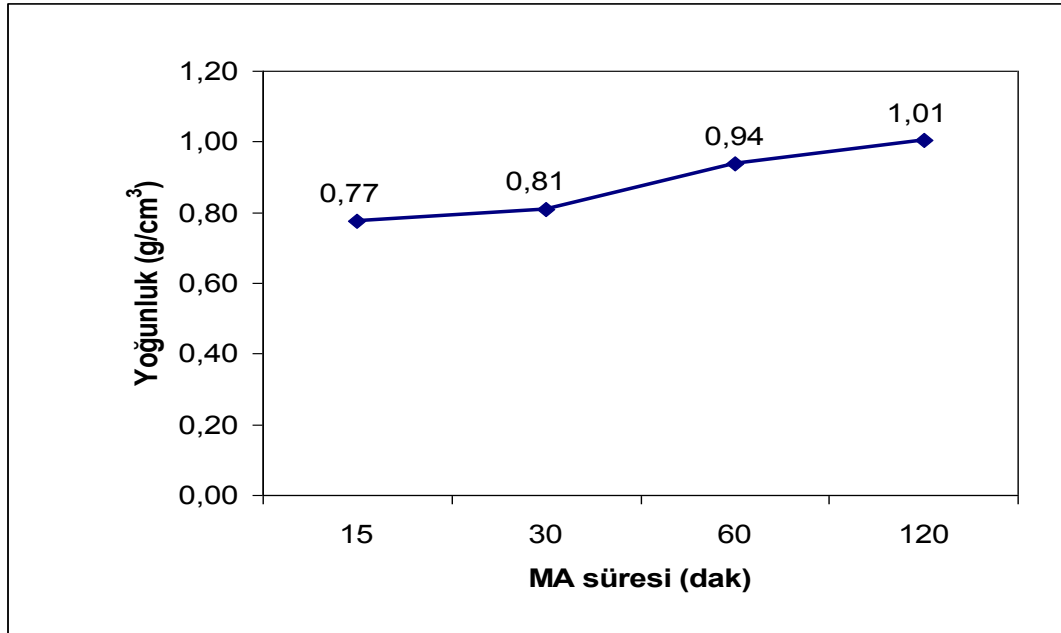


Şekil 1.8. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımını MA süresine bağlı yoğunluk değişim

EK-1 (Devam) Deney sonucu elde edilen yoğunluğun MA süresine bağlı değişim grafiği

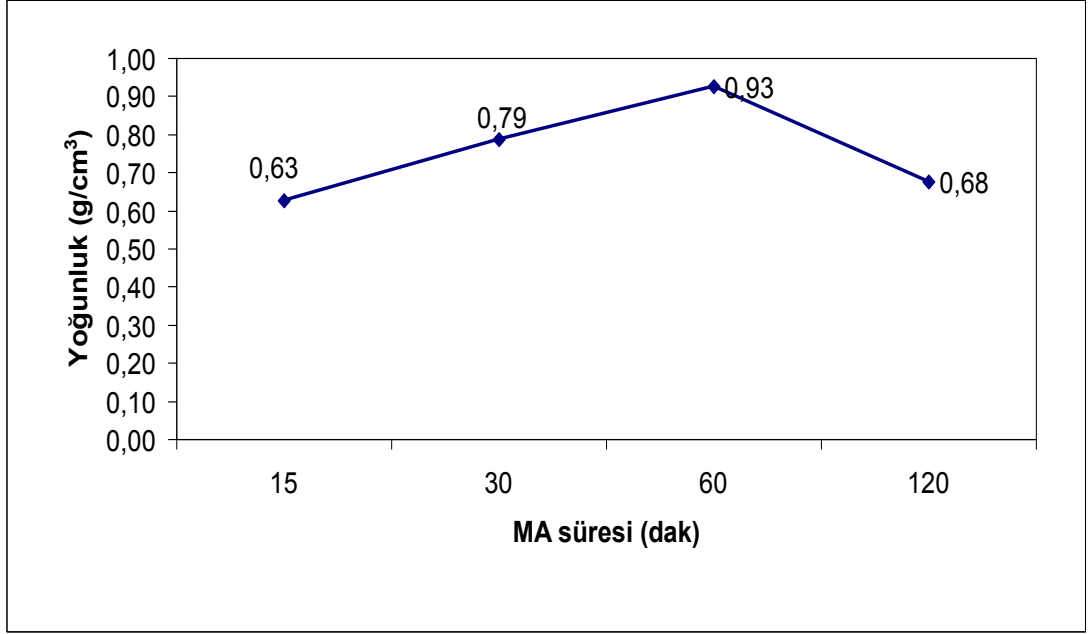


Şekil 1.9. Al-0,8TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-7Si-8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımını MA süresine bağlı yoğunluk değişim



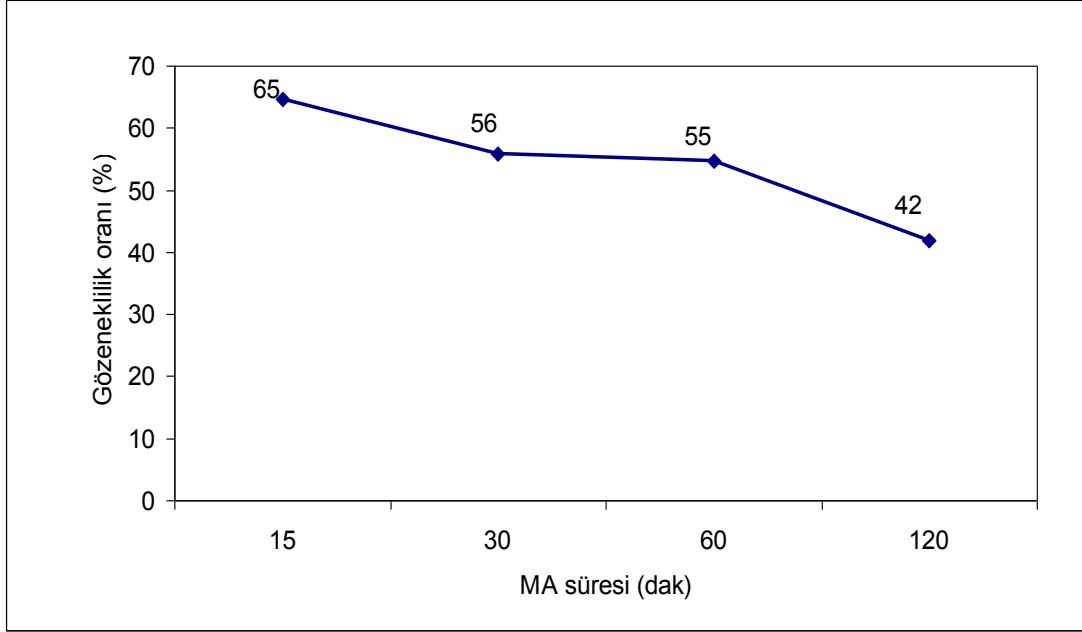
Şekil 1.10. Al-1TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-7Si-2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımını MA süresine bağlı yoğunluk değişim

EK-1 (Devam) Deney sonucu elde edilen yoğunluğun MA süresine bağlı değişim grafiği

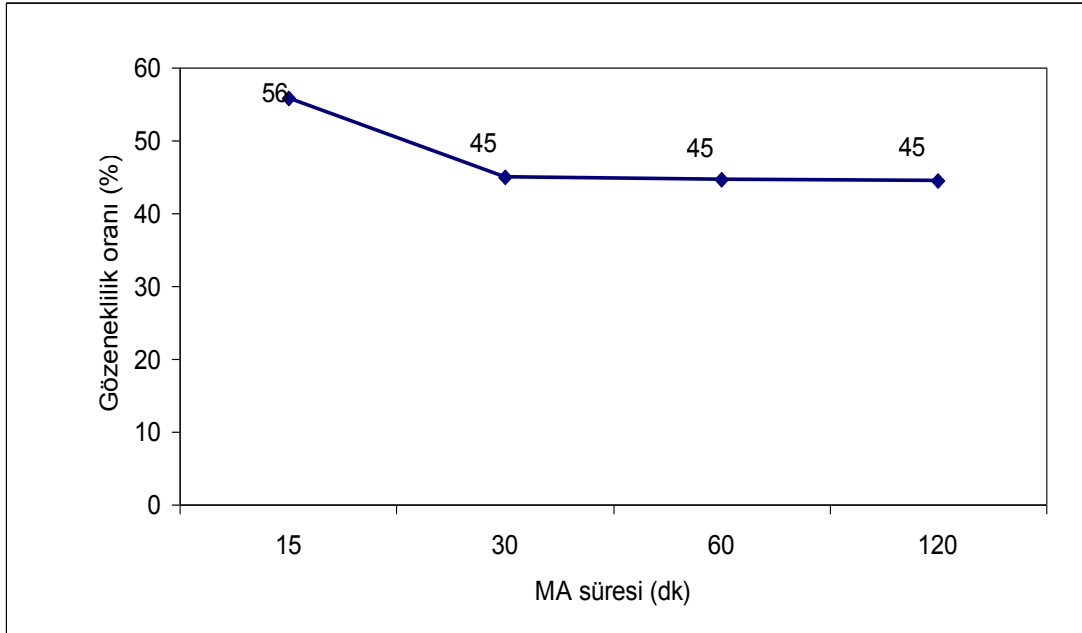


Şekil 1.11. Al-%1,2 TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımını MA süresine bağlı yoğunluk değişim

EK-2. Deney sonucu elde edilen % gözeneklilik oranının MA süresine bağlı değişim grafikleri

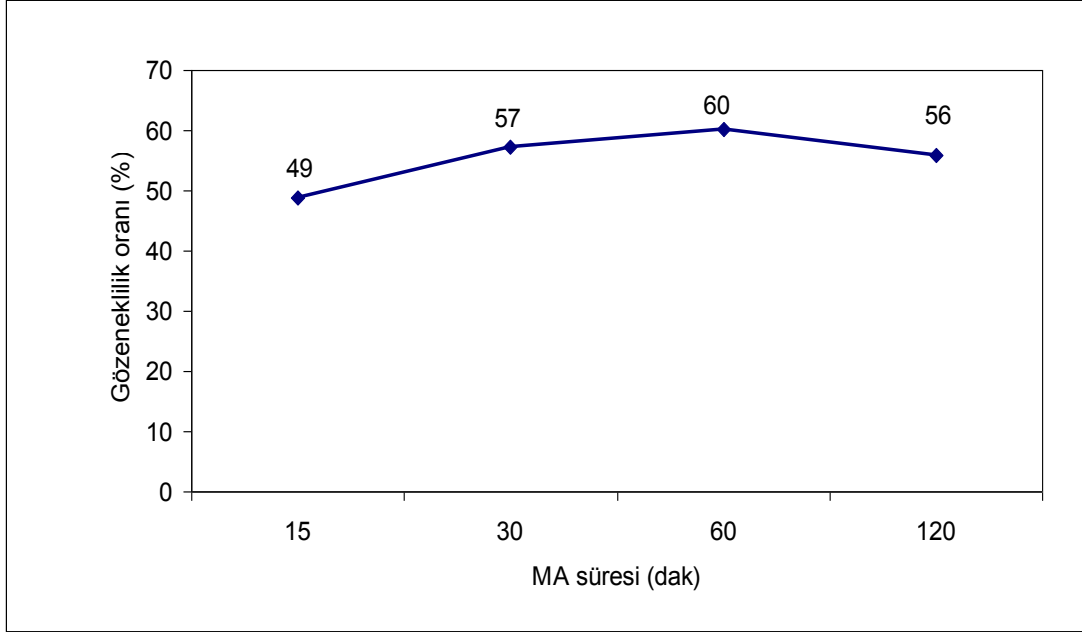


Şekil 2.1. Al-0,8TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-2SiC toz karışımını MA süresine bağlı % gözeneklilik oranı

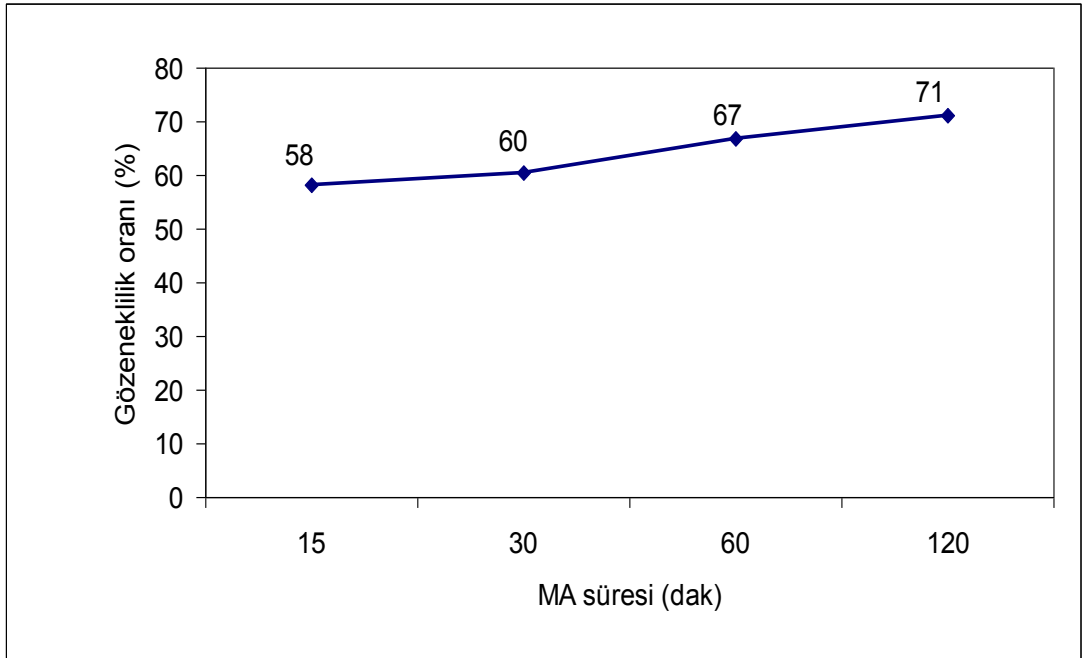


Şekil 2.2. Al-0,8TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-4SiC toz karışımını MA süresine bağlı % gözeneklilik oranı

EK-2 (Devam) Deney sonucu elde edilen % gözeneklilik oranının MA süresine bağlı değişim grafikleri

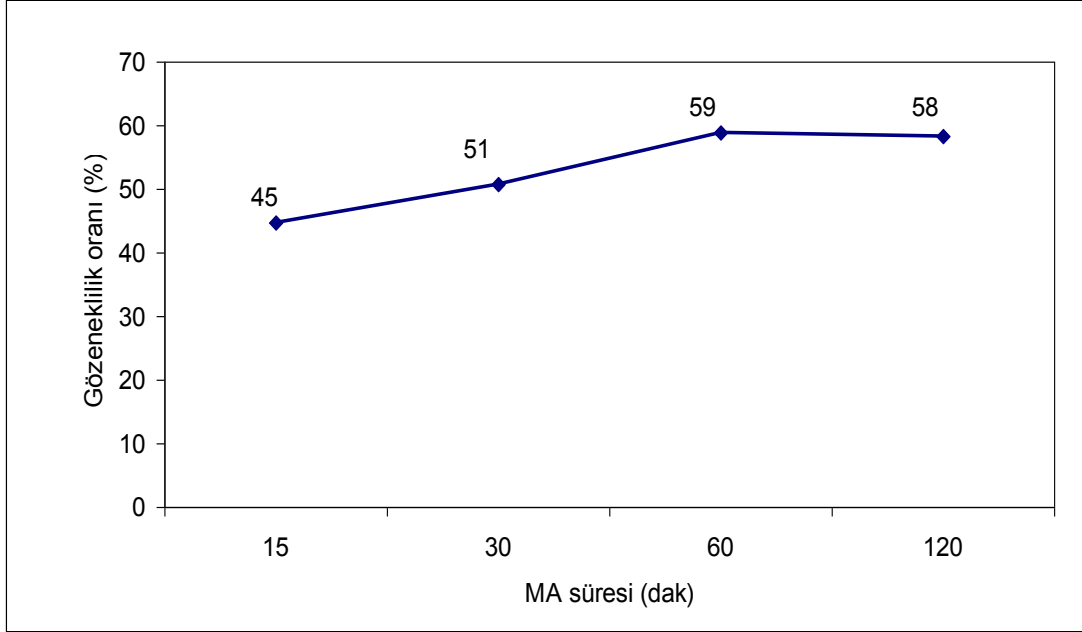


Şekil 2.3. Al-0,8TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-8SiC toz karışımını MA süresine bağlı % gözeneklilik oranı

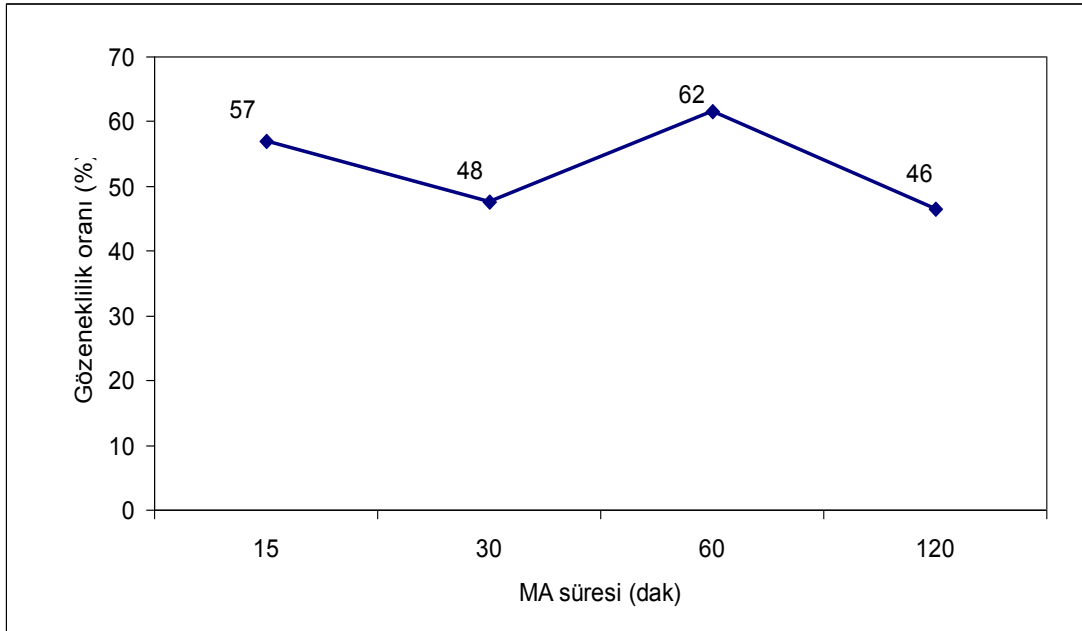


Şekil 2.4. Al-0,8TiH<sub>2</sub>-0,6Mg-7Si-2SiC toz karışımını MA süresine bağlı % gözeneklilik oranı

EK-2 (Devam) Deney sonucu elde edilen % gözeneklilik oranının MA süresine bağlı değişim grafikleri

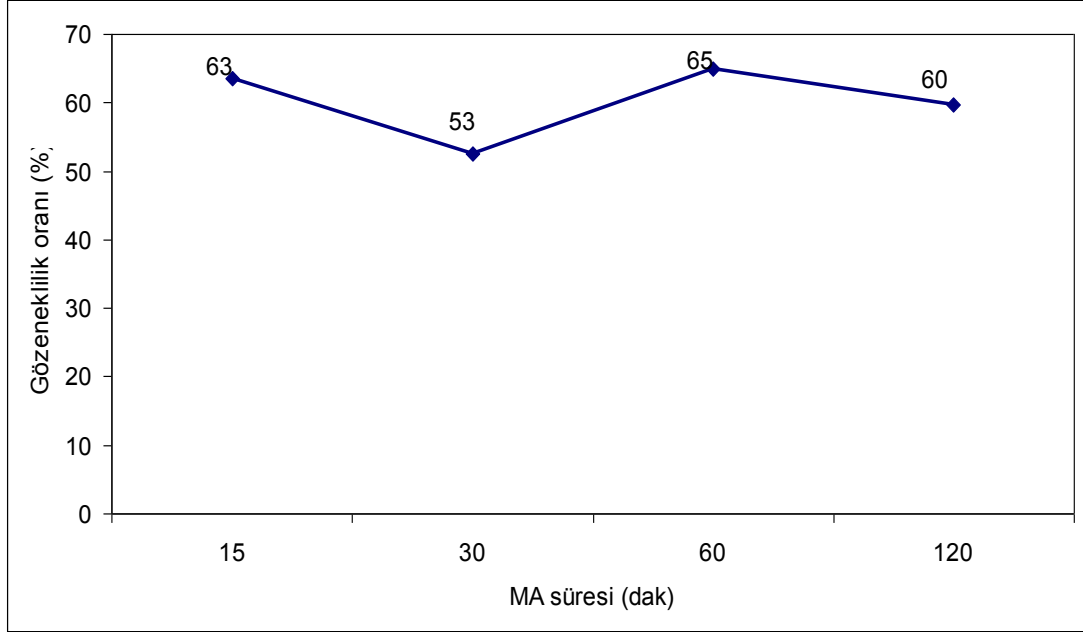


Şekil 2.5. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%4SiC toz karışımını MA süresine bağlı % gözeneklilik oranı

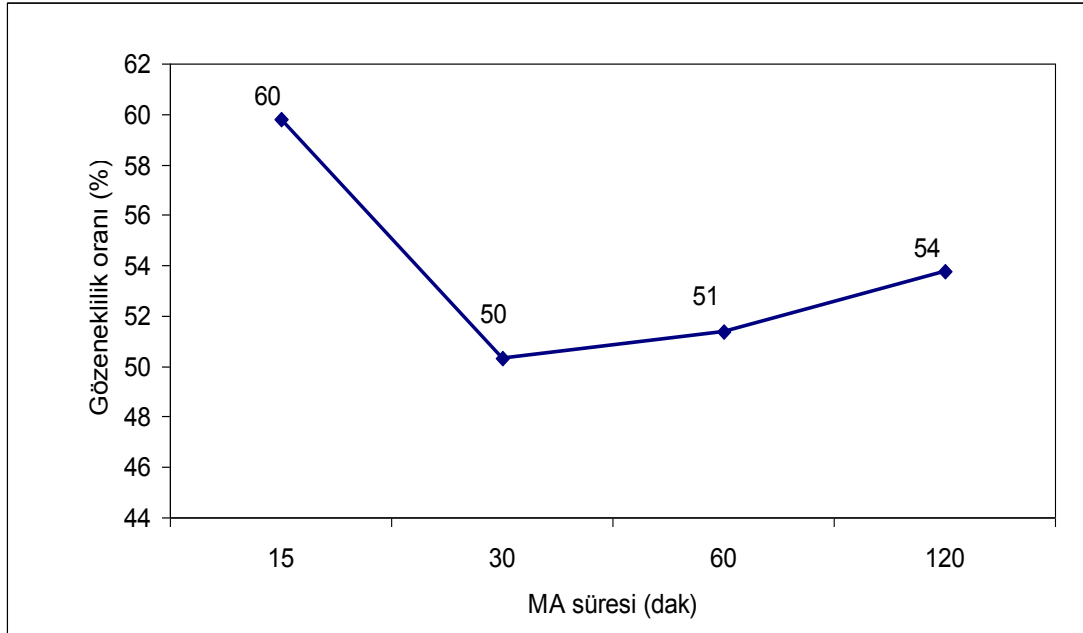


Şekil 2.6. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%8SiC toz karışımını MA süresine bağlı % gözeneklilik oranı

EK-2 (Devam) Deney sonucu elde edilen % gözeneklilik oranının MA süresine bağlı değişim grafikleri

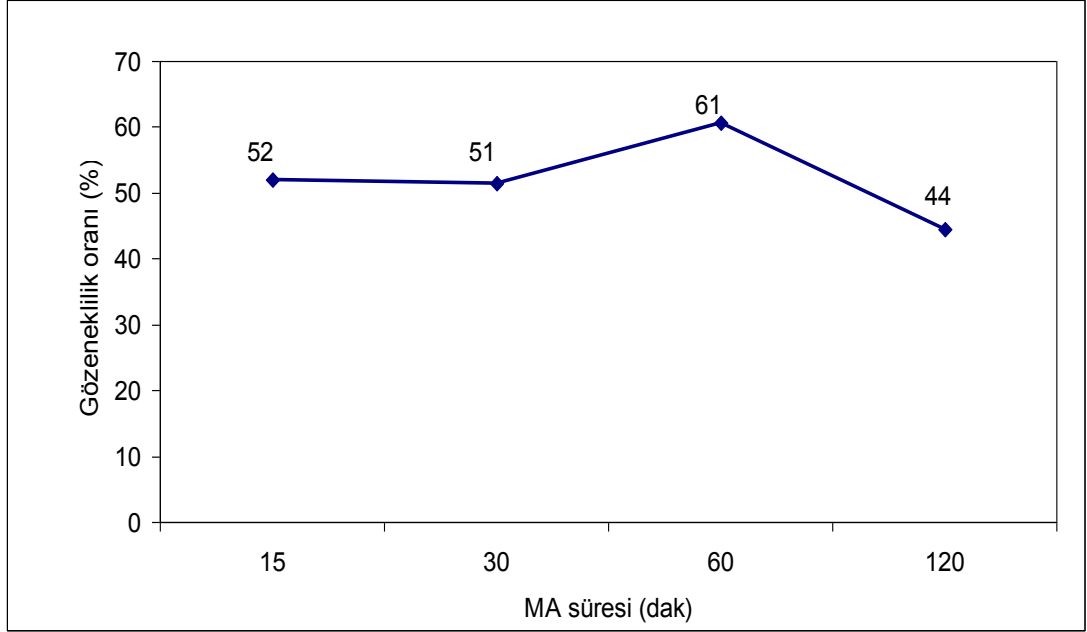


Şekil 2.7. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımını MA süresine bağlı % gözeneklilik oranı

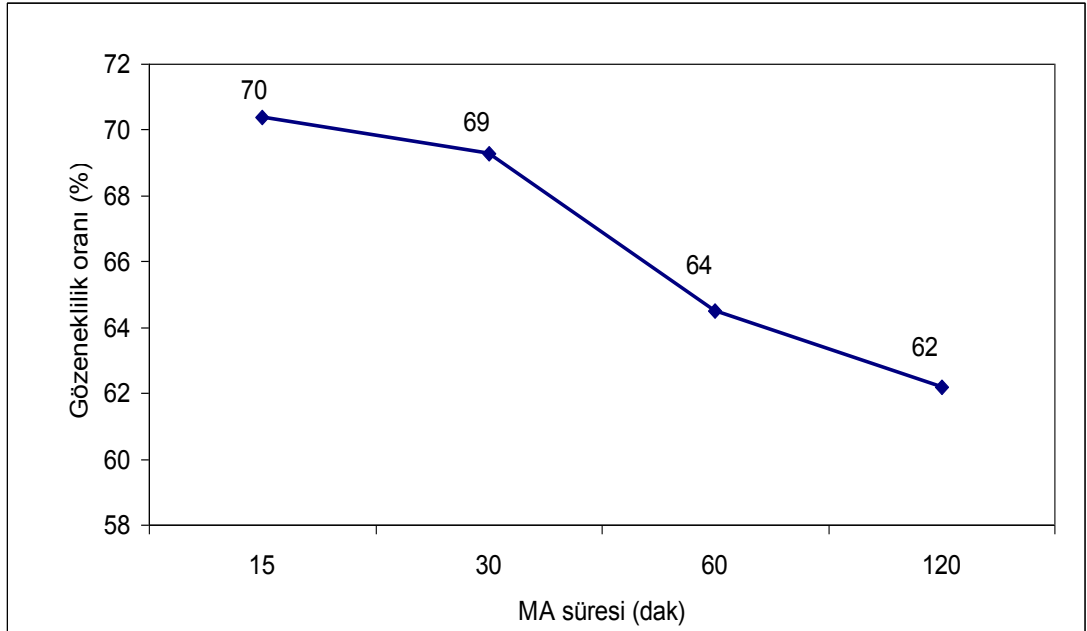


Şekil 2.8. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%4Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımını MA süresine bağlı % gözeneklilik oranı

EK-2 (Devam) Deney sonucu elde edilen % gözeneklilik oranının MA süresine bağlı değişim grafikleri

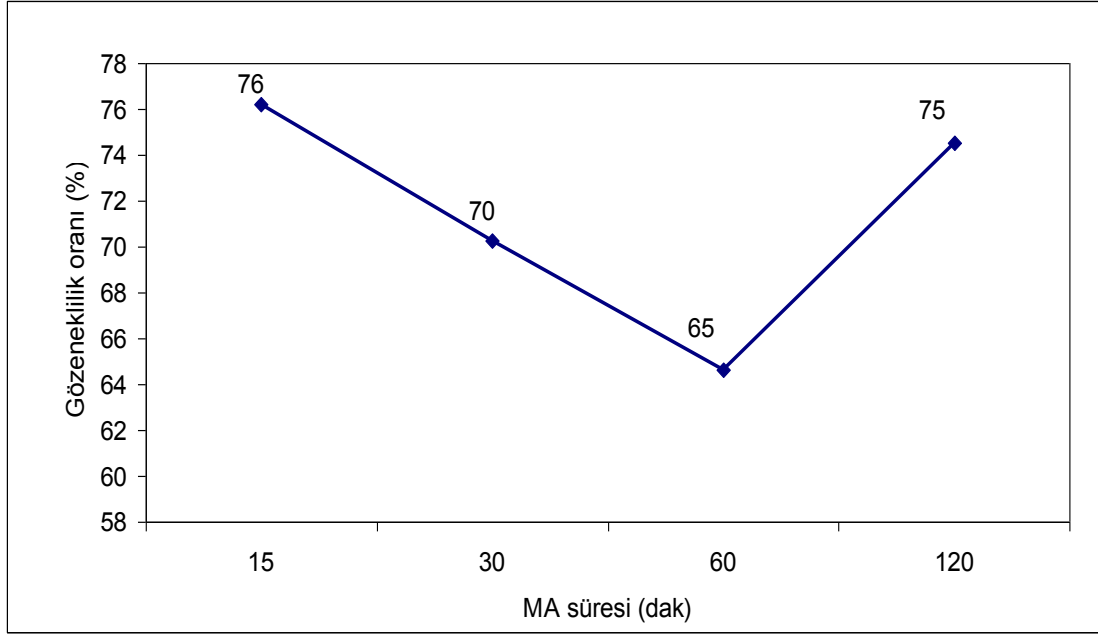


Şekil 2.9. Al-%0,8TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%8Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımını MA süresine bağlı % gözeneklilik oranı



Şekil 2.10. Al-%1TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımını MA süresine bağlı % gözeneklilik oranı

EK-2 (Devam) Deney sonucu elde edilen % gözeneklilik oranının MA süresine bağlı değişim grafikleri



Şekil 2.11. Al-%1,2TiH<sub>2</sub>-%0,6Mg-%7Si-%2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımını MA süresine bağlı % gözeneklilik oranı

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : PELİT, Yasin  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1981 Çorum  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0 (539) 4814383  
 e-mail : yasinpelit@gmail.com.

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Fırat Üniversitesi /Metal Eğitimi	2005
Lise	Alaca Çok Programlı Meslek Lisesi/Elektrik	1998

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-2008	Kızılırmak Döküm Mak. AŞ.	Bakım Amiri
2008-2009	MEKSA	Gazaltı Kaynak Eğitmeni
2009-2010	Gazi Üniversitesi	TÜBİTAK Projesi
2010-	Türk Traktör	Üretim Personeli

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayımlar

1. Pelit, Y., Türker, M., “Mekanik Alaşımlanmış  $Al_2O_3$  Takviyeli  $AlSi7Mg0,6$  Esaslı Tozlardan Metalik Köpük Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi”, **6. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı Ve Sergisi**, Ankara, (2011).

2. Pelit.Y., Ayata.A., Kurt.A., Türker.M., “Toz Metal Al Köpük Malzemelerin Köpürtme Öncesi Saplama Kaynağı ile Birleştirilmesi”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, (2011).

### **Hobiler**

Gezi, Futbol, Teknoloji, Bilgisayar,