

T.C.  
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



YAPAY YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN ALÜMİNYUM KÖPÜK  
MALZEMEYE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil İbrahim SÜMBÜL

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
Makine Mühendisliği Programı

Temmuz, 2019



T.C.  
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



YAPAY YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN ALÜMİNYUM KÖPÜK  
MALZEMEYE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil İbrahim SÜMBÜL  
(Y1613.080027)

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
Makine Mühendisliği Programı

Tez Danışmanları: Dr. Öğr. Üyesi Lutfiye DAHİL  
İkinci Danışman: Doç. Dr. Mustafa Serhat BAŞPINAR

Temmuz, 2019





T.C.  
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

**Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi**

Enstitümüz Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı Y1613.080027 numaralı öğrencisi **Halil İbrahim SÜMBÜL**'ün "YAPAY YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN ALÜMİNYUM KÖPÜK MALZEMEYE ETKİSİNİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun 02.08.2019 tarih ve 2019/16 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından **ay. b. d. g.** ile Tezli Yüksek Lisans tezi olarak **kabul** edilmiştir.

**Öğretim Üyesi Adı Soyadı**

**İmzası**

**Tez Savunma Tarihi : 18/09/2019**


**1) Tez Danışmanı:** Dr. Öğr. Üyesi Lütfiye DAHİL



**2) Jüri Üyesi :** Prof. Dr. H. Erol AKATA



**3) Jüri Üyesi :** Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ



Not: Öğrencinin Tez savunmasında **Başarılı** olması halinde bu form **imzalanacaktır**. Aksi halde geçersizdir.





*Değerli Aileme,*





## YEMİN METNİ

Yüksek Lisan tezi olarak sunduğum “Yapay Yaşlandırmanın Alüminyum Köpük Malzemelere Etkisinin İncelenmesi” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (18/09/2019)

**Halil İbrahim SÜMBÜL**



## ÖNSÖZ

Değerli bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen ve Afyon Kocatepe Üniversitesi atölyesinde çalışmama imkan sağlayan değerli tez hocalarım Dr. Lütfiye DAHİL ve Doç. Dr. Mustafa Serhat BAŞPINAR'a, ısıtım laboratuvarında bana yardımcı olan Prof. Dr. Alparslan DEMİRURAL ve Doç. Dr. Ramazan Katırcı hocalarıma teşekkür eder saygılarımı sunarım.

**Temmuz 2019**

**Halil İbrahim SÜMBÜL**





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
KISALTMALAR .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
ABSTRACT .....	xxi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>3</b>
<b>3. METALİK KÖPÜKLER .....</b>	<b>5</b>
3.1 Açık Hücreli Metalik Köpükler.....	7
3.2 Kapalı Hücreli Metalik Köpükler.....	7
<b>4. METAL KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>9</b>
4.1 Sıvı Metal Halinden Üretim .....	10
4.1.1 Eriğe gaz enjeksiyonu ile köpük üretimi.....	10
4.1.2 Köpürtücü ajan yardımı ile köpük üretimi.....	13
4.1.3 Gaz–metal ötektik katılaştırma yöntemi (GASAR).....	14
4.1.4 Sıvı metal yolu ile köpükleşebilen öncü üretimi (Formgrip).....	16
4.1.5 Boşluk Tutucu Yöntemi(Vakum Döküm Yöntemi).....	18
4.2 Katı Metal Halinden Üretim.....	18
4.2.1 Toz metalürjisi ile metal köpük üretimi.....	19
4.2.2 Gaz tuzağı yöntemiyle metal köpük üretimi .....	22
4.2.3 Reaksiyon sinterlemesi .....	23
4.2.4 Bulamaç yapının köpüklenmesi(Çamur köpüklendirme yöntemi).....	23
4.2.5 Körük şeklindeki kürelerin sinterlenmesi .....	23
4.3 Metal Buhar Halinden Üretim.....	24
4.3.1 Metal iyon çözeltilisinden köpük üretimi (Depozisyon yöntemi).....	25
<b>5. METALİK KÖPÜKLERİN ÖZELLİKLERİ.....</b>	<b>27</b>
5.1 Elastik Modül .....	30
5.2 Basma Davranışı .....	31
5.3 Enerji Sönümlenmesi .....	33
<b>6. METALİK KÖPÜKLERİN KULLANIM ALANLARI .....</b>	<b>35</b>
6.1 Metalik Köpüklerin Yapısal Uygulamaları .....	35
6.1.1 Otomotiv endüstrisi.....	35
6.1.2 Demiryolu endüstrisi.....	36
6.1.3 Uzay endüstrisi.....	38
6.1.4 İnşaat endüstrisi.....	39
6.1.5 Makine endüstrisi.....	39
6.2 Metalik Köpüklerin Fonksiyonel Uygulamaları .....	39
6.2.1 Isı değiştiriciler .....	39

6.2.2 Susturucular.....	40
6.2.3 Filtrasyon.....	41
6.2.4 Su ayırıcı .....	41
6.2.5 Sprinkler.....	41
6.2.6 Katalizörler.....	41
6.3 Metalik Köpüklerin Dekorasyon ve Sanatsal Uygulamaları .....	41
<b>7. METALİK KÖPÜKLERİN KARAKTERİZASYON METOTLARI .....</b>	<b>43</b>
7.1 Tahribatsız Muayene .....	43
7.1.1 Yoğunluk ölçümleri.....	43
7.1.2 Boya nüfuz ettirme ölçümleri.....	43
7.1.3 X-Işını radyoskopi ve radyografisi.....	43
7.1.4 X-Işını ölçümlü tomografi.....	43
7.1.5 Girdap akım algılama .....	43
7.1.6 Akustik ölçümler .....	44
7.1.7 Titreşimsel analiz .....	44
7.1.8 Gözeneklilik ve geçirgenlik .....	44
7.1.9 Elektriksel ve ısı iletim ölçümleri .....	44
7.1.10 Diğer metotlar .....	44
7.2 Tahribatlı Muayene .....	44
7.2.1 Optik suret analizi .....	44
7.2.2 Mekanik testler.....	45
7.2.3 Korozyon testi .....	45
<b>8. YAPAY YAŞLANDIRMA .....</b>	<b>47</b>
<b>9. MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>51</b>
9.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	51
9.2 Yapay Yaşlandırma .....	58
9.3 Numunelerin Tanıtımı ve Deneylerin Yapılması .....	60
9.4 Numunelere Basma Deneyinin Uygulanması .....	60
9.5 Yüzey Fotoğraflarının İncelenmesi .....	67
<b>10. SONUÇLAR .....</b>	<b>73</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>75</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>79</b>

## KISALTMALAR

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	:Alüminyum Oksit
<b>E*</b>	:Köpük Malzemenin Elastik Modülü
<b>E<sub>s</sub>:</b>	:Hücre Metalinin Elastik Modülü
<b><math>\sigma_{ys}</math></b>	:Köpük Metalin Akma Gerilmesi
<b>CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub></b>	:Kalsiyum Alüminyum Oksit
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	:Kalsiyum Karbonat
<b>CaO</b>	: Kalsiyum Oksit
<b>E</b>	:Elastik Modülü
<b>FeCr</b>	: Ferrokrom
<b>G</b>	:Kesme Modülü
<b>IFAM</b>	:Frounhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü
<b>K</b>	:Kütle Modülü
<b>MMC</b>	: Metal Matris Kompozit
<b>NaCl</b>	: Sodyum Klorür
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>SiC</b>	: Silisyum Karbür
<b>T/M</b>	:Toz Metalurjisi
<b>TiH<sub>2</sub></b>	:Titanyum Hidrür
<b>ZrH<sub>2</sub></b>	:Zirkonyum Hidrür
<b>MgO<sub>2</sub></b>	:Magnezyum Peroksit
<b>p:</b>	:Yoğunluk





## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: Alüminyum'un fiziksel özellikleri .....	5
Çizelge 9.1: Etial 160 malzemesinin içeriği .....	51
Çizelge 9.2: Basma deneyinde kullanılan parametreler .....	61





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1: Alüminyum Köpük .....	6
Şekil 3.2: Açık Hücreli Alüminyum Köpüğün Yapısının SEM Görüntüsü .....	7
Şekil 3.3: Kapalı Hücreli Metalik Köpük .....	8
Şekil 4.1: Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri .....	10
Şekil 4.2: Sıvı Metalden Köpük Üretimi .....	11
Şekil 4.3: Metal Köpük Üretiminde Sınır Şartlar .....	11
Şekil 4.4: Cymat Firması Tarafından Üretilmiş % 10 Yoğunluğa Sahip Köpük .....	12
Şekil 4.5: Köpürtücü Ajan Yardımıyla Metal Köpük Üretiminin Aşamaları .....	13
Şekil 4.6: Gaz-Metal Ötektik Katılaştırma Yöntemiyle Metal Köpük Üretimi .....	15
Şekil 4.7: Gaz-Metal Ötektik Katılaştırma Yöntemiyle Üretilmiş Metal Köpük .....	15
Şekil 4.8: Köpürebilen Öncü Parçaların Hazırlanması .....	16
Şekil 4.9: Formgrip Yöntemi .....	17
Şekil 4.10: Vakum Döküm Yönteminin Aşamaları.....	18
Şekil 4.11: Toz Metalürjisi İle Metal Köpük Üretimi .....	20
Şekil 4.12: Toz Metalürjisi İle Üretilmiş Alüminyum Köpük Dolu Tüp .....	21
Şekil 4.13: Gaz Tuzağı İle Metal Köpük Üretiminin Aşamaları .....	22
Şekil 4.14: Georgia Tech Yöntemi .....	24
Şekil 4.15: Georgia Depozisyon Yöntemiyle Metal Köpük Üretimi .....	25
Şekil 5.1: Elastik-Plastik Köpüklerin Tipik Basma Gerilme-Gerinim Grafiği .....	29
Şekil 5.2: Elastik-Kırılgan Köpüklerin Tipik Basma Gerilme-Gerinim Grafiği .....	29
Şekil 5.3: Sünek ve Gevrek Alüminyum Köpüğün Basmada Gerilim-Gerinim .....	32
Şekil 5.4: Gibson ve Ashby Modeline Göre Kapalı Hücreli Yapı .....	33
Şekil 5.5: İki Farklı Enerji Emicinin Basma Gerilim-Gerinim Eğrisi .....	33
Şekil 5.6: İki Farklı Alüminyum Tipinin Plastik Dayanıma Bağlı Olarak Değişen Gerilim-Gerinim Eğrisi .....	34
Şekil 6.1: Metalik Köpüklerin Otomobillerde Uygulanması .....	36
Şekil 6.2: Çarpışma Kutusu Örneği .....	36
Şekil 6.3: Tren Üzerindeki Tırmanma Önleyici .....	37
Şekil 6.4: Tırmanma Önleyicinin Yapısı .....	37
Şekil 6.5: Ariane 5 Roketinde Kullanılan Alüminyum Köpük Koni Adaptör .....	38
Şekil 6.6: Köpük Metal Isı Değiştirici .....	40
Şekil 6.7: Metal Köpük Susturucu .....	40
Şekil 8.1: Çökeltme sertleşmesinin malzeme yapısına etkileri.....	47
Şekil 8.2: Düzenli bir çökeltinin oluşma safhaları a)Aşırı doymuş katı çözelti.....	49
Şekil 8.3: (a) Al-Cu faz diyagramı ve Al- % 4 Cu alaşımının solüsyona alma, (b) su verme ve yaşlandırma (çökeltme sertleşmesi) safhalarında mikro yapı değişimleri .....	50
Şekil 9.1: Kayaç olarak temin edilmiş olan kaya tuzu.....	52
Şekil 9.2: Kaya tuzunu eleme kullanılan 4,75 mm ve 2 mm ölçüsündeki elekler.....	52
Şekil 9.3: Kalıp .....	53

Şekil 9.4: Tuzun fırına yerleştirilmesi .....	53
Şekil 9.5: Kullanılan ısıtma fırını.....	54
Şekil 9.6: Kalıbın döküm fırınında ısıtılması.....	54
Şekil 9.7: Kalıp sıcaklığının ölçümü.....	55
Şekil 9.8: Kestirilmiş alüminyum malzemeler .....	55
Şekil 9.9: Döküm potası.....	56
Şekil 9.10: İndüksiyon ısıtma cihazı.....	56
Şekil 9.11: Vakum döküm sisteminin elemanları .....	57
Şekil 9.12: Vakum döküm sistemi.....	57
Şekil 9.13: Üretilen alüminyum köpük malzemeler .....	58
Şekil 9.14: Isıl işlem fırını .....	59
Şekil 9.15: Çözeltiye alma işlemi .....	59
Şekil 9.16: Yapay yaşlandırma işlemi ve kullanılan fırın.....	60
Şekil 9.17: Zwick/Roell Z600 basma deneyi test cihazı.....	61
Şekil 9.18: A1 Numunesinin basma eğrisi.....	62
Şekil 9.19: A2 Numunesinin basma eğrisi.....	63
Şekil 9.20: A3 Numunesinin basma eğrisi.....	64
Şekil 9.21: A4 Numunesinin basma eğrisi.....	65
Şekil 9.22: A5 Numunesinin basma eğrisi.....	66
Şekil 9.23: Bütün numunelerin basma eğrisi .....	67
Şekil 9.24: Yüzey fotoğraflarının çekildiği mikroskop .....	68
Şekil 9.25: A1 Numunesinin 200 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları .....	68
Şekil 9.26: A1 Numunesinin 500 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları .....	68
Şekil 9.27: A2 Numunesinin 200 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları .....	69
Şekil 9.28: A2 Numunesinin 500 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları .....	69
Şekil 9.29: A3 Numunesinin 200 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları .....	70
Şekil 9.30: A3 Numunesinin 500 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları .....	70
Şekil 9.31: A4 Numunesinin 200 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları .....	70
Şekil 9.32: A4 Numunesinin 500 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları .....	71
Şekil 9.33: A5 Numunesinin 200 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları .....	71
Şekil 9.34: A5 Numunesinin 500 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları .....	71

## YAPAY YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN ALÜMİNYUM KÖPÜK MALZEMEYE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

### ÖZET

Alüminyum köpük malzemeler hafif olmaları, titreşim sönümlenme, mekanik, elektriksel, düşük termal iletkenlik ve kimyasal özelliklerinin iyi olmasından dolayı endüstride çok geniş ve önemli kullanım alanına sahip olan bir malzeme çeşididir. Bu nedenden dolayı alüminyum köpük malzemelerle ilgili çalışmalar birçok alanda hala yapılmaktadır. Bu çalışmada vakum döküm yöntemiyle açık gözenekli alüminyum köpük malzeme üretilmiş ve malzemelere yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Yaşlanma sıcaklığı değiştirilerek çökelti oluşumları ve bunların sayısının çoğalıp çoğalmadığı veya sıcaklığın etkisiyle mukavemet artışındaki etkisini kaybedip kaybetmeyeceği orijinal köpük malzemeye göre incelenmiştir. Köpük malzeme üretiminde alüminyum alaşımı olarak Etial-160 ( $AlSi_8Cu_3Fe$ ) malzemesi kullanılmıştır. Alüminyum köpük (A1) üretildikten sonra yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Bunun için hazırlanan numuneler  $500^{\circ}C$  de yarım saat süreyle fırında ısıtılmış (A2) ve daha sonra ise suda soğutulmuştur. Böylece çözeltiye alma işlemi tamamlanmıştır. Daha sonra  $500+120^{\circ}C$  (A3),  $500+170^{\circ}C$  (A4),  $500+220^{\circ}C$  (A5) sıcaklıklarda 10 saat süreyle ısıtılıp oda sıcaklığında soğutularak yapay yaşlandırma işlemi uygulanan numuneler hazırlanmıştır. Orijinal numune, çözeltiye alma işlemi uygulanan numune ve üç farklı sıcaklıkta yapay yaşlandırma işlemi uygulanan üç adet numune ile birlikte toplamda 5 adet numune incelendi. Bu işlemlerden sonra numuneler basma deneyine tabi tutuldu. Ardından mikroyapı fotoğrafları çekildi. Yapılan incelemelerde yapay yaşlandırma işlemi uygulandığında mukavemet ve tokluk artışı hiçbir işlem yapılmayan A1 numunesine göre A2, A3, A4 ve A5’de artış gerçekleşmiştir. Sıcaklığın artması çökelti artmasını sağlamış, bu da dislokasyonların kaymasını engelleyerek mukavemet artışını sağlamıştır. Yaşlandırma sıcaklığı değiştirilerek işlemler yapıldığından en iyi yaşlandırma sıcaklığının A4 numunesine ait olan  $500^{\circ}C+170^{\circ}C$  olduğu görülmüştür. Yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerde sıcaklık artmasıyla A1 numunesi ile kıyaslandığında tokluk artmakta, fakat A4 numunesi ile A5 kıyaslandığında A5 numunesinde tokluk bir miktar düşmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** *Alüminyum metal köpük, yapay yaşlandırma, yüzey fotoğrafı*



## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ARTIFICIAL AGING ON ALUMINUM FOAM

### ABSTRACT

Aluminum foam materials are light and vibration damping, mechanical, electrical, low thermal conductivity and chemical properties are good because of a wide range of materials that have a wide and important use in the industry. For this reason, studies on aluminum foam materials are still carried out in many areas. In this study, open pore aluminum foam material was produced by vacuum casting method and artificial aging process was applied to the materials. By changing the aging temperature, it was investigated according to the original foam material whether the precipitate formations and their number increased or not, or whether they would lose their effect on strength increase due to the effect of temperature. Etial-160 ( $\text{AlSi}_8\text{Cu}_3\text{Fe}$ ) was used as the aluminum alloy in the production of foam materials. After the production of aluminum foam (A1), artificial aging process was applied. The samples prepared for this purpose were heated in the oven (A2) for half an hour at  $500^\circ\text{C}$  and then cooled in water. Thus, the solution was completed. Afterwards, the samples which were artificial aging process were prepared by heating at  $500 + 120^\circ\text{C}$  (A3),  $500 + 170^\circ\text{C}$  (A4),  $500 + 220^\circ\text{C}$  (A5) for 10 hours and cooling at room temperature. The original sample, the sample treated with solution and three samples with artificial aging at three different temperatures were examined together with a total of 5 samples. The samples were then subjected to compression testing. Then microstructure photos were taken. When the artificial aging process was applied, the increase in strength and toughness increased in A2, A3, A4 and A5 compared to the A1 sample which had no treatment. The increase in temperature caused the precipitation to increase, which prevented the displacement of the dislocations and increased the strength. The best aging temperature was found to be  $500^\circ\text{C} + 170^\circ\text{C}$  for A4 sample. Aging is applied to increase the temperature of the sample with A1 increase compared to the toughness, but the A4 sample with A5 compared to the A5 sample, the amount of toughness decreases.

**Keywords:** *Aluminum metal foam, artificial aging, surface photo*





## 1. GİRİŞ

Köpük metaller başta alüminyum olmak üzere bakır, titanyum, nikel, çelik, çinko gibi metallere oluşabilen, yapısında büyük oranda gözenek adı verilen gaz ile dolu boşluklar içeren yapılardır. Sahip oldukları gözenekler sayesinde, hacim (dolu) malzemelere göre köpük metaller daha üstün özelliklere sahiptirler. Özellikle mukavemet, rijitlik ve düşük ağırlığın mükemmel birleşimine sahip olmaları köpük metallerin en önemli avantajlarıdır [1].

Köpük metaller darbe yönü fark etmeksizin yüksek darbe enerjisini sönümlenme özelliğine sahiptirler. Ses yalıtımında, elektromanyetik koruma ve titreşim sönümlenme özellikleri oldukça iyidir. Köpük metaller, genellikle birbiriyle zıt birçok özelliği yapılarında aynı anda gösterebilirler. Köpük malzemeler doğadaki malzemelere benzer şekilde metallere hücreli mukavemet kazandırarak hem hafif olmakta hem de önemli bir yük taşıma kapasitesine sahip olmaktadır. [1].

Metal köpükler oldukça büyük ve önemli kullanım alanına sahiptirler. Kompakt ısı değiştiricilerinde, ısı kaynaklarında, elektronik aletlerin soğutulmasında, endüstriyel fırınlarda, hava soğutmalı kondenserlerde, kimyasal elektronik reaktörlerde, uçak donanımları vb. yerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum köpükler hafif oldukları için özellikle uçak ve otomobil yapımı başta olmak üzere spordan uzay araçlarında, hafif alaşımları bina yapımında, elektrikli araçlarda, mutfak eşyası yapımında ve buna benzer yerlerde oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir [2].

Günümüzde en hızlı gelişen sektörlerden bazıları otomotiv, uzay ve havacılık sanayidir. Bu sektörlerden beklenen daha az enerji tüketimi ve daha güvenli araçların geliştirilme çabaları, araştırmacıları yeni malzemeler geliştirmeye yönlendirmektedir. Özellikle otomotiv sektörü, oluşabilecek kazalardan minimum hasarla çıkmayı amaçlamaktadır. Dolayısıyla metal köpük

malzemeler hem maliyet hem de ağırlık açısından bu sektörde çok önemli bir yer tutmaktadır [3].

İlk olarak 1948’de Benjamin Sosnik alüminyum ve cıva ile köpük malzeme üretmiştir. Bu iki malzemeyi yüksek basınçta erittikten sonra basıncı kaldırmış ve cıvanın buharlaşması sağlayarak köpük malzeme oluşmuştur [4]. 1950’lerde, metallerin akışkanlıklarını arttırmak kolay köpükleşmeyi sağlaması anlaşılmış ve işlemler güvenli hale gelmiştir. Ergimiş metali oksitleyerek akışkanlık azaltılabiliyordu. 1950’lerde, Amerikan donanması için bir alüminyum köpük malzeme üretilmiştir. Bununla ilgili pilot fabrika kurulmuş. Burada alüminyum köpük malzemelerin olası kullanımları araştırılmıştır [5].

Ayrıca alüminyum haricinde Pb ve Zn gibi diğer metallerin köpükleştirme metotları araştırılmıştır. İlk yıllarda ergimiş maddeye sürekli gaz püskürtme, köpürtücü ajanlar eklenmesi yöntemleri kullanılmıştır. Bu dönemde köpük imalatı için en verimli malzemenin alüminyum olduğu kanısına varılmıştır. 1970’li yıllarda Ethyl şirketi, oldukça iyi kalitede alüminyum köpük üretmiş. Fakat o yıllarda emniyet ve geri dönüşüm konuları da günümüzdeki kadar önemsenmediği için gereken önem verilmemiştir. 1970’li yılların ortalarında konu ile ilgili çalışmaların sayısı azalmıştır. 1980’li yılların sonlarına gelindiğindeyse metal köpük ile ilgili çalışmalar yeniden canlılık kazandı. Shinko Wire şirketi geliştirdikleri yeni yönteme “Alporas” adını verdi. Norsk Hydro ve Alcan şirketleri, yeni bir köpükleştirme işlemi geliştirdiler. [6].

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

7075 Al alaşımından takviyesiz ve değişik takviye oranlarında kapalı hücreli kompozit metal köpük üretilip doğal yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş kapalı hücreli metal köpük üretirken takviye malzemesi olarak SiC kullanıldığında bu malzemenin metal köpük malzemelerin akma dayanımını arttırdığını fakat malzemenin daha kırılgan bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Takviye malzemesi kullanılmadan üretilmiş alüminyum köpük (7075 Al) ile takviye malzemesi kullanılarak üretilen alüminyum köpük (7075 Al/SiC) malzemelere uygulanan yaşlandırma işleminin malzemelerin enerji sönümlenme kapasitesini ve sertliğini arttırdığı tespit edilmiştir [3].

Toz haline getirilmiş saf alüminyumdan takviyesiz ve değişik takviye oranlarında kompozit metalik köpük malzemeler üretilmiştir. Takviye malzemesi olarak FeCr kullanılmıştır. Yapılan incelemelerde takviye malzemesinin oranının artmasıyla numunelerin yoğunluğu azalmıştır [4].

Metal köpükler o malzemenin bağlı yoğunluk, hücre büyüklüğü, hücre şekli ve anizotropi özellikleri ile karakterize edilmektedir. Köpük malzemenin yoğunluk formülü kullanılarak hesaplanır. Yapısını incelemek için ise optik mikroskop, taramalı elektron mikroskopu ve X-ray bilgisayarlı tomografi yöntemleri kullanılmaktadır [7].

Metal köpük malzemelerin üretim yöntemleri, endüstride ve günlük hayatta kullanıldığı yer ve karakterizasyon yöntemleri ile ilgili olarak çalışmalar yapılmıştır. Metal köpük malzemelerin basma deneyi ve sertlik deneyi dışında tahribatsız muayene yöntemleri ile de karakteristik özellikleri belirlenebilmektedir [8].

Al-SiC metal köpük malzemelerin mekanik özellikleri sadece hücre yapısına değil aynı zamanda hücre duvarlarının yapısına da bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Al-SiC köpüklerin hücre yapısındaki değişiklikler malzemenin

akma dayanımı, çökme mekanizması ve malzemenin yoğunluğuna da etki etmektedir [9].

Alüminyum eriğinin köpürtülerek üretilmesi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Köpük malzemeler üretilirken sabit sıcaklık altında fırında 1,10,100 dakika bekletildikten sonra su ve hava ortamında soğutulmuştur. Yapılan incelemelerde gözenek yapısının köpürtme işleminde kullanılan gaz, köpürtme sıcaklığına, partikül yapısına ve matris alaşım düzenine bağlı olduğu gözlemlenmiştir [10].

Metal köpük malzemeler üç farklı yöntemle üretilmiş. Birinci yöntemde NaCl gibi suda çözülen boşluk tutucu malzemeler ve toz metalürjisi yöntemi uygulanmıştır. İkinci yöntemde köpürtücü ajan yöntemi uygulanmış ve son yöntemde ise boşluk tutucu silika jel ve vakum yöntemi uygulanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda toz metalürjisi ile köpük malzeme üretiminde küresel tozlar köpük malzeme içinde homojen bir yapı oluştururken çubuksu tozlar malzeme içinde homojen dağılmadığından zayıf hücre duvarları oluşmasına neden olmuştur. Ergitme yöntemi ile üretilen köpük malzemelerde mermer tozu kullanılmıştır. Mermer tozu oranı %5 iken en fazla gözenek oluşumu görülmüştür. Bu oran %5'in altında ise gözenek oluşumu azalmış, %5'in üzerinde ise gözenek yapılarında bozulmalar meydana gelmiştir. Boşluk tutucu yöntemle üretilen köpük malzemelerde ise bu boşluğu sağlayacak malzeme olarak genişlemiş silika jellerden yararlanılmıştır.. Silika jeller 1000 °C, 1100 °C ve 1200 °C gibi farklı sıcaklık değerlerinde genişletilmiş ve bunlarında malzemenin yoğunluğunu değiştirdiği görülmüştür. 1100 °C sıcaklıkta genişletilmiş silika jellerin yoğunluğunun diğer sıcaklıklarda genişletilmiş jellerin yoğunluğuna göre düşük olduğu gözlemlenmiştir [11].

Toz metalürjisi tekniği ile kapalı hücreli kompozit metal köpük malzemeler üretilmiştir. Numune üretilirken üç tane farklı boyutta küre ile iki farklı malzeme kullanılmıştır. Yapılan incelemeler göstermiştir ki kompozit yapıya sahip olan metalik köpük malzemeler diğer metalik köpük malzemelere göre daha iyi enerji sönümleme kapasitesine ve mukavemet/yoğunluk oranına sahiptir [12].

### 3. METALİK KÖPÜKLER

Metalik köpük üretiminde genellikle alüminyum kullanılmaktadır. Saf alüminyum oldukça hafiftir ve ağırlığı aynı hacimdeki çeliğin üçte biri kadardır. Mukavemeti çeliğin mukavemetinden düşük olmasına rağmen kesit alanı arttırılarak çeliğin mukavemetine eş değerde mukavemet değeri elde edilebilmektedir [13].

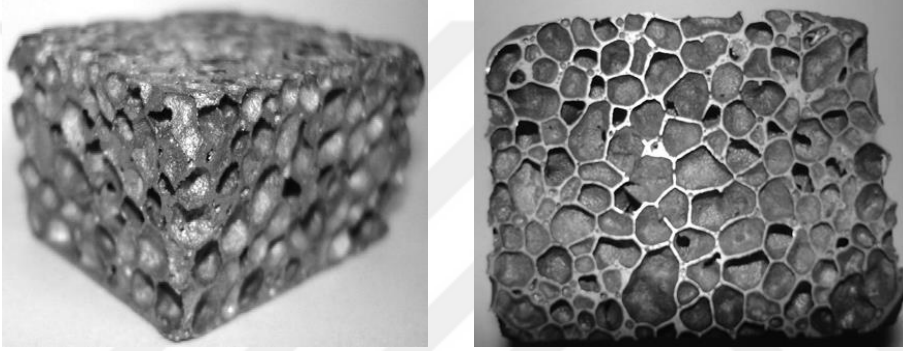
Alüminyum ve alüminyum alaşımları, pekçok önemli teknik özellikleri bünyesinde barındırabildiği ve alaşımlandırıldığında düşük olan özellikleri geliştirilebildiği için demir ve demir alaşımlarından sonra kullanım alanı oldukça geniş olan malzemelerdir [14]. Alüminyumun düşük olan mekanik özellikleri alaşımlandırma ve çeşitli ısıl işlemler yardımıyla iyileştirilmeye çalışılmıştır. Kolay işlenebilmesi, ısı ve elektriği iyi iletmesi, yüksek çekme mukavemetine sahip olması ve kolay dökülebilmesi alüminyumun tercih edilebilirliğini önemli miktarda arttırmaktadır [15]. Tablo 3.1’de Alüminyum’un fiziksel özellikleri görülmektedir.

**Çizelge3.1:** Alüminyum’un fiziksel özellikleri

Kimyasal Sembol	Al
Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26,98 gr/mol
Kristal kafes yapısı	Yüzey Merkezli Kübik Yapı
Yoğunluğu	2.7 gr/cm <sup>3</sup>
Ergime noktası	660 °C
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	150 °C -300 °C
Buharlaştırma noktası	2450 oC
Özgül ısısı	0.224 cal/gr (100 °C)
Elastisite modülü	72x10 <sup>3</sup> MPa
Kayma modülü	27x10 <sup>3</sup> MPa
Çekme mukavemeti	40-90 MPa
Akma mukavemeti	10-30 MPa
Kopma uzaması	% 30-40

Metalik köpükler ise içerisinde gaz boşluklu yapıya sahip gözenekli malzemelerdir. Bu özellik metalik köpüklere mukavemet, hafiflik gibi temel karakteristik özellikler kazandırmaktadır. Bu anlamda doğada bulunan kemik, sünger gibi malzemelere benzemektedir.

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi genel olarak metalik köpüklerin gözenek yoğunluğu %80-%90 oranında olup, gaz ve katı haldeki maddelerin birleşmesinden oluşmaktadır. Gözenekli yapı şeklini alabilmesi için değişik fonksiyonel malzemelerin kullanılması gerekir. Özellikle Şekil 2.1’de ki gibi üretiminde gözeneklerin homojen dağılması ve yeteri kadar gaz kabarcığının oluşturulması amaçlanır [16].



**Şekil 3.1:** Alüminyum Köpük [17]

Metalik köpükler, düşük yoğunluklu ve alışılmadık dışı özelliklere sahip malzemelerdir. Bu malzemeler hafif olup enerji sönümlenme ve termal iletkenlik bakımında iyi bir potansiyele sahip olmakla birlikte aynı zamanda ucuzdurlar [7]. Bu özellikler metal köpüklerin endüstride özellikle otomotiv, tren, uçak, uzay gibi sektörlerde gittikçe daha çok kullanılan malzeme olmasına neden olmuştur.

Metalik köpüklerin daha iyi anlaşılabilmesi için bazı terimlerin doğru şekilde tanımlanması gerekmektedir.

**Hücreli Metal:** Yapısında gaz boşlukları bulunduran metalik yapıların genel adıdır.

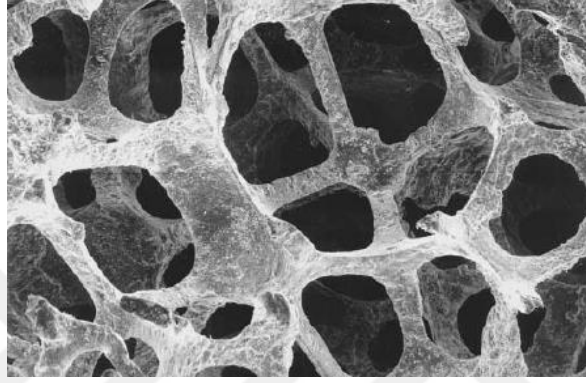
**Gözenekli Metal:** Gözenekler birbirlerinden metal duvarlarla ayrılmıştır ve yuvarlak bir yapıya sahiptirler.

**Katı Metal Köpük:** Sıvı metal köpükten meydana gelen; hücrelerin kapalı ve yuvarlak olduğu malzemelerdir.

**Metal Süngerler:** Yapısı birbirine bağlı gözeneklerden oluşmaktadır.

### 3.1 Açık Hücreli Metalik Köpükler

Açık hücreli metal köpüklerde hücreler arasında yüzeyleri bulunmaz ve yapıları tel kafes biçimindedir [18]. Yapısı kapalı hücreli köpüklerde olduğu gibi %80-90 oranında gözeneklerden oluşmaktadır. Açık hücreli bir alüminyum köpük metal Şekil 3.2’de görülmektedir.



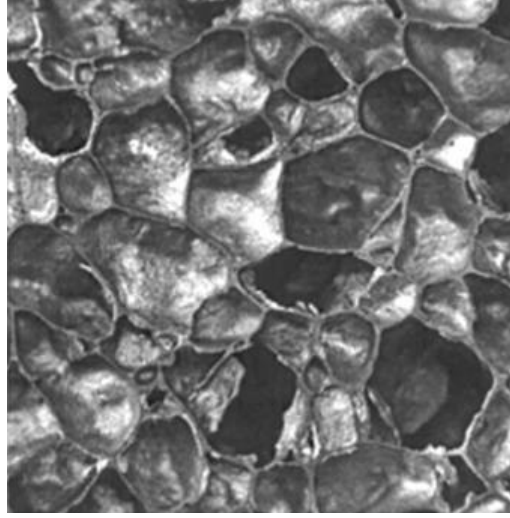
**Şekil 3.2:** Açık Hücreli Alüminyum Köpüğün Yapısının SEM Görüntüsü [21]

Açık hücreli köpüklerin ısı iletkenlik katsayıları gözenekler arasındaki boşluklar ve yüzey alanının büyüklüğünden dolayı oldukça yüksektir. Açık hücreli köpükler yüksek gaz ve ısı geçirgenliğine sahiptir. Kapalı hücreli köpük malzemelerle karşılaştırıldığında mekanik özellikleri daha düşük olduğundan fonksiyonel amaçlı kullanılırlar [19,20].

Filtreler, katalizör destekler, ısı değiştiriciler, akışkan sönümlenme kanalları, biyomedikal protezler, içten soğutmalı şekil hafızalı aktüatörler, hava pilleri ve koruyucu geçirgen zar süzgeçleri ve kılıflarını kapsayan güncel uygulamalar ve önerilenler açık hücreli metalik köpüklerle üretilmesi uygundur [22].

### 3.2 Kapalı Hücreli Metalik Köpükler

Kapalı hücreli metal köpüklerde ise Şekil 3.3’te görüldüğü gibi hücreleri birbirinden ayıran hücre yüzeyleri arasında herhangi bir temas söz konusu değildir. Gözenek şekilleri küresel olup ve birbirlerinden bağımsız haldedir. Bu malzemelerin yapısındaki gaz metal içerisinde tutulmaktadır ve ince bir filmle birbirinden ayrılmış durumdadır [18].



**Şekil 3.3:** Kapalı Hücreli Metalik Köpük [23]

Kapalı gözenekli metalik köpüklerin açık gözenekli köpüklere göre darbeleri ve sesleri daha iyi sönümlerler. Bunun yanında daha iyi mukavemet ve rijitlik özelliğini yapılarında barındırdıklarından yapısal amaçlı ihtiyaçlar için tercih edilirler[20].



#### 4. METAL KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Hücresele metalik malzemelerin birçok üretim yöntemi vardır. Bazı yöntemler akışkan veya polimer sıvıların köpürtülmesinde kullanılan tekniklere benzerdir. Diğer yöntemler metallerin karakteristik özelliklerinin avantajlarını alacak şekilde tasarlanmıştır. Bunlar metalin işlendiği duruma göre dört grupta sınıflandırılabilirler [4].

- Sıvı metalden,
- Toz formdaki katı metalden,
- Metal buharı veya gaz metalik bileşiklerden,
- Metal iyon çözeltisinden

Hücreli yapının sıvı metalden elde edildiği sıvı hal köpüklendirmesi yönteminde, sıvı metali doğrudan köpüklendirmek ve bu sürecin bitiminde sistemden uzaklaştırarak yerinde boşluk bırakacak olan katı yer tutucuların etrafına dökmek veya polimer köpük kullanarak köpüklendirmek gibi dolaylı yöntemler izlenir. Bir diğer yöntem ise gaz çıkarıcı malzemeler içeren metal toz paketini eritmektir [4].

Metal köpükler toz metalürjisi yoluyla da üretilebilirler. Bu yöntemde metal tozu tüm süreç boyunca katı halde kalır ve sinterleme yoluyla rijit bir yapıya kavuşur. Sadece sıvı hal durumunda yüzey gerilmesi kapalı gözenek oluşumuna sebep olur. Bu durumun tersine katı hal sinterlemesi ile üretilen gözenekli metaller, tozlar arasında oluşan boyunlarla birbirine bağlanan, açık morfolojide az çok küresel gözeneklerden oluşur [8]. Şekil 4.1' de mevcutta kullanılmakta olan metal köpük üretim yöntemleri görülmektedir.



**Şekil 4.1:** Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri [8]

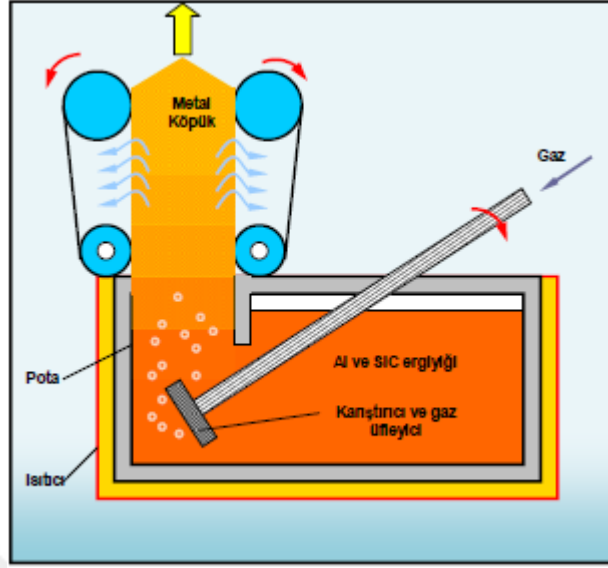
#### 4.1 Sıvı Metal Halinden Üretim

##### 4.1.1 Eriğe gaz enjeksiyonu ile köpük üretimi

Ergiyik metal içerisinde doğrudan gaz baloncukları yaratılarak köpük malzeme elde edilebilir. Gaz baloncukları yüksek yoğunluklu sıvı içerisindeki normal şartlar altında kaldırma kuvveti sebebiyle hızlı bir şekilde yüzeye çıkmaya çalışırlar. Ergiyik metalin viskozitesi artırılarak bu yükseliş engellenir. Bu işlem ince taneli seramik tozlarının ya da alaşım elementlerinin ergiyik yapıya katılmasıyla sağlanabilir [24].

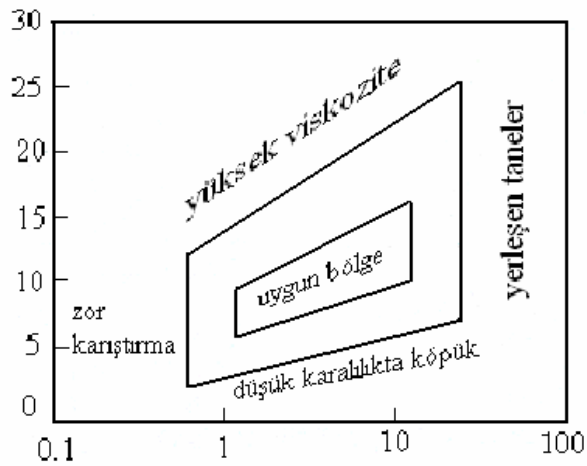
Al ve Al-alaşımaları için bahsedebileceğimiz ilk üretim şekli Hydro Aluminum (Norveç) ve Cymat Aluminum (Kanada) firmalarının güncel bir şekilde kullandıkları yöntemdir [24’]. Bu yöntemin ilk aşamasında, SiC(Silisyum Karbür), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Alüminyum Oksit)veya MgO<sub>2</sub> (Magnezyum Peroksit) tozları viskoziteyi arttırmak için eriyiğe karıştırılır. Eriyiğe karıştırılan bu parçacıkların eriyik tarafından hem tam ıslatılabilmesi hem de tam olarak karışmasını sağlamak için özel bir teknik kullanılır. Bir sonraki aşamada metal matris kompozite özel bir nozül yardımıyla gaz ilave edilir. Bu sayede gaz kabarcıkları eriyik içinde hem ince hem de homojen olarak dağıtılmış olur. Takviye taneciklerin eriyikte olması oluşan köpükleri kararlı hale getirir. Son olarak

üretileen malzeme taşıma sistemiyle alınarak soğutulup ve katı hale getirilir [8]. Şekil 4.2’de sıvı metalden köpük üretiminin şeması görülmektedir.



Şekil 4.2: Sıvı Metalden Köpük Üretimi [25]

Takviye parçacıklarının ortalama boyutları 5-20  $\mu\text{m}$ 'dir ve hacimsel oranı genellikle % 10-20 aralığındadır. Bunlar deneysel olarak uygulanır. Herhangi bir problem çıkmaması için parçacığın hacmi ve boyutunun düzgün seçilmesi gerekmektedir. Şekil 4.3'te bu problemle ilgili olarak sınır şartlar gösterilmektedir. Parçacıkların hücre duvarı üzerinde yığılması, köpüklerin kararlı hale getirmektedir [4].



Şekil 4.3: Metal Köpük Üretiminde Sınır Şartlar [9]

Bu yöntemle üretilmiş alüminyum köpüğün yoğunluğu  $0,069 \text{ g/cm}^3$  ile  $0,54 \text{ g/cm}^3$  arasında değişmekte, ortalama gözenek ebatları 3-25 mm ve gözenek duvar kalınlığı 50-85  $\mu\text{m}$  arasında bulunmaktadır. Gaz akışı, nozül titreşim frekansı, pervane hızı ve diğer parametrelerin ayarlanmasıyla ortalama gözenek ebatları, ortalama gözenek duvar kalınlığı ve köpük yoğunluğu değiştirilebilir [26]. Şekil 4.4'te Cymat firmasının ürettiği  $90 \times 90 \times 50 \text{ mm}^3$  ölçüsünde metal köpük bulunmaktadır.



**Şekil 4.4:** Cymat Firması Tarafından Üretilmiş % 10 Yoğunluğa Sahip Köpük [27]

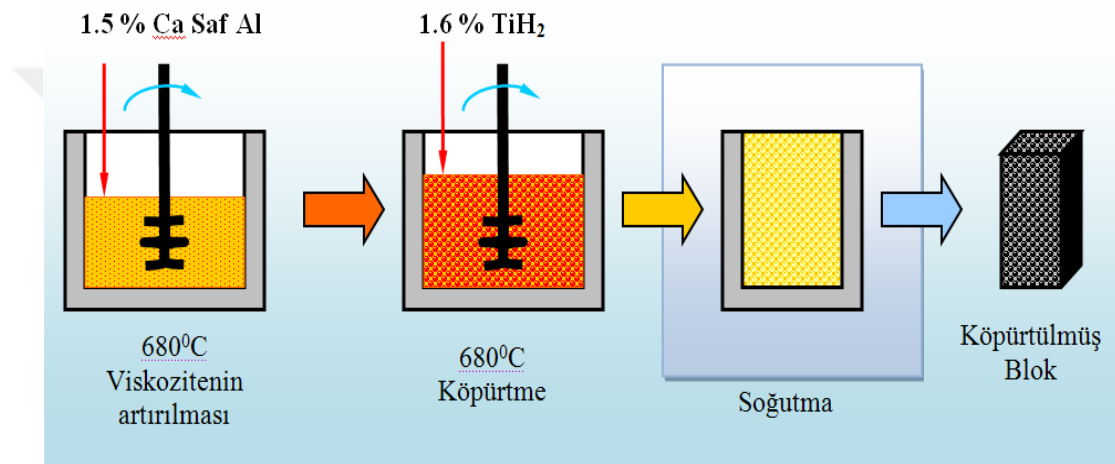
Doğrudan köpürtme sürecinin avantajları büyük hacme sahip köpüklerin seri üretilmesi ve yoğunluğunun düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple MMC (Metal Matris Kompozit) köpükler, diğer hücreli metallere göre belki biraz daha ucuz olabilirler [25].

Köpürtülen malzeme ister döküm makinesinden çıktığı gibi, ister kapalı dış yüzeye sahip halde ya da köpürtme sonrası gerekli formda kesilerek kullanılabilirler. Yüksek içerikli seramik parçacığa sahip olmaları bu köpüklerin işlenmesinde problemler yaratabilir [10]. Kompleks parçaları üretme imkanı yoktur. Bunun yanında potanın sıcaklığı sabit olmalıdır. Sıcaklı sabit tutulmazsa ya gaz kabarcıklarını oluşması güçleşir ya da kabarcıklar olması gerekenden daha çabuk ve büyük olurlar. Ergiyik metal içerisine ilave edilen dengeleyici partiküller, metalik köpükte kırılabilirlik gibi istenmeyen bazı sonuçlara sebep olabilir. Viskozitenin düşük tutulabilmesi için, köpürtme işleminde sıcaklığı

ergime sıcaklığına çok yakın tutmak gerekir. Ayrıca taşıma bantlarının sebep olduğu kayma kuvveti gözeneklerin uzamasına sebep olabilir [28].

#### 4.1.2 Köpürtücü ajan yardımı ile köpük üretimi

Ergiyikleri doğrudan köpürtmek için bir diğer yöntemde, içine gaz enjekte etmek yerine köpürtücü ajan eklemektir. Köpürtücü ajan sıcaklık etkisi altında ayrışır ve sonra ise gaz salarak köpürtme işlemi gerçekleşir. Şekil 4.5'te köpürtücü ajan yardımıyla metal köpük üretiminin aşamaları görülmektedir [8]. Bu yöntem literatürde "ALPORAS" adı ile de anılmaktadır.



**Şekil 4.5:** Köpürtücü Ajan Yardımıyla Metal Köpük Üretiminin Aşamaları [8]

Bu yöntemde, 680 °C’de kalsiyum metal, alüminyum ergiyik içerisine katılır. Ergiyik içerisine katıldıktan sonra birkaç dakika boyunca karıştırılır. Esas köpük üretimi için genellikle % 1,5-3 ağırlıkça kalsiyum katılır. Viskozite beklenen değere ulaşıldıktan sonra, sıcak kıvamlı sıvı içerisine ağırlıkça % 1,6 oranında TiH<sub>2</sub> (Titanyum Hidrür) köpürtücü ajan hidrojen gazına katılır [8]. Köpürtücü ajan olarak TiH<sub>2</sub> yerine CaCO<sub>3</sub> da (Kalsiyum Karbonat) kullanılabilir [10]. Sonra ergiyik yavaşça genişlemeye başlar ve sabit basınç altında köpürtme yapılan kabı doldurur. Köpürme işlemi bittikten sonra ergiyik fırından dışarı alınır ve soğutularak katılaştırılır [29].

Köpürtücü madde ilavesiyle metalik köpük üretimi genellikle alüminyum ve alaşımlarında kullanılır. Yüksek ergime derecesine sahip metallerde, hidrojen ayrışması düşük sıcaklıklarda gerçekleştiğinden bazı problemlerle

karşılaşılabilir [28]. Bu metodun köpük demir, çelikler ve nikel bazlı alaşımlar için kullanılmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Köpürme süreci genellikle gözenek boyutu ve hacimsel yüzdesine göre gaz emülsiyonu, kuru periyot ve yaş periyodu olmak üzere üç periyoda ayrılmaktadır. Birinci periyot olan gaz emülsiyon periyodu köpürmenin başlangıcıdır ve ergiyikteki gözeneklerin hacmi ve boyutları küçüktür. Kuru periyoda genellikle gözenek yüzeyleri yeterince geniştikten sonra ulaşılır. Kuru periyot boyunca köpük hücresel bir yapıdadır. Yapı zamanla zayıflamaya başlar. Karıştırmada küçük bir değişiklik, köpürtücü ajanın bozunması, gözenek gelişimi, gözenek parçalanması, gözenek birleşmesi ve sıcaklık dalgalanması bu yapıyı değiştirebileceğinden köpürtme deneyleri her zaman tekrarlanabilir değildir. Köpürtücü ajandan gelen gazın gelişimi erigiyik içinde köpük yapı oluşumunu geliştirip, çökmeyi önlediğinden ergiyiğin köpürmesi süresince kuru köpük periyodunda yapı dağılımı dikkate alınmalıdır. Alüminyum köpük üretiminde yeterli hacimsel gaz oranı ve homojen hücre yapısının bir arada olması kuru periyotta bir çelişki yarattığından köpüğün çökmesini ve kaymasını önlemek için köpürtücü ajan tamamen tükenmeden soğutma sürecinin bitirilmesi gereklidir [30].

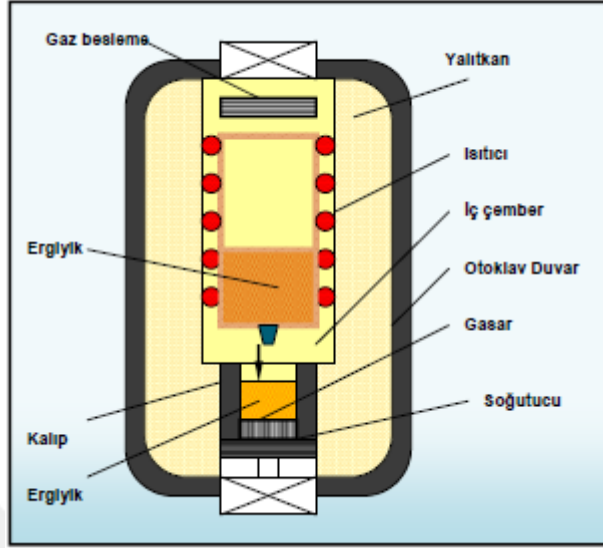
Yaş periyotta ergiyik içindeki gözenekler daha büyüktür ve köpük makro boyuttadır. Gaz büyük bir hacimsel oranı kaplar. Yaş köpükte hücreler yaklaşık olarak küreseldir ve rastgele dizilimlerle birbirlerini sararlar. Yapılarında bulunan büyük miktardaki sıvı içerik hücreler arasında tampon görevi gördüğünden pozisyonları kolaylıkla bozulabilir [30].

#### **4.1.3 Gaz–metal ötektik katılaştırma yöntemi (GASAR)**

Bu yöntem, bazı sıvı metal formlarını ötektik sistemde hidrojen gazı ile köpürtmek için kullanılmaktadır [7].

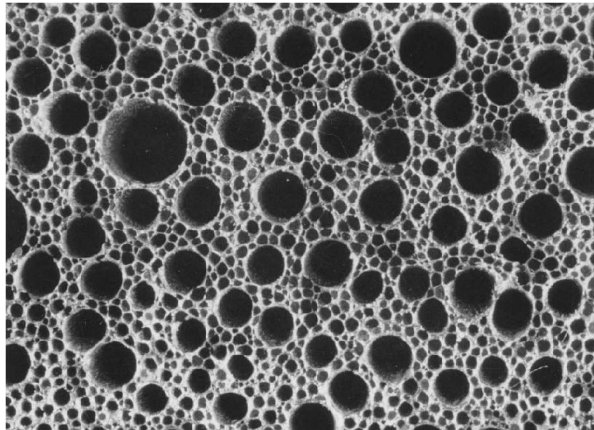
GASAR yönteminde, metal üst kısımdaki tank içerisinde 50 bar ve üzerinde ergitilerek, ergiyiğin homojen şekilde hidrojen gazı ile yüklenmesi sağlanır. Hidrojen gazı metali bozunmaya uğratarak, sıvı durumdaki metal içerisinde gaz kabarcıkları oluşturur. Dışarıdan uygulanan basıncın arttırılmasıyla sıvı metal içerisindeki hidrojen gazının çözme etkisi arttırılır. Sıvı durumdaki metal, tankın soğutulmuş olan tabanından yukarı doğru ilerleyerek katılaştır. Düzeneyin

hemen hemen her kısmı kontrol edilebilen basınç altındaki gaz ile sarılmıştır. Tipik katılma hızı 0,05 mm/sn' den 5 mm/sn kadardır. GASAR yönteminin Şekil 4.6' da şematik olarak gösterilmiştir [31, 28].



**Şekil 4.6:** Gaz-Metal Ötektik Katılaştırma Yöntemiyle Metal Köpük Üretimi [8]

Bu yöntemle üretilen metalik köpüklerin gözenekleri katılaşmaya paralel olarak şekillenir ve genel olarak küresel şekillidir. Gözenek şekli ve ebatları, kullanılan metal ve alaşımların kimyasal kompozisyonuna, eriyik sıcaklığına, gaz basıncı ve soğutma yönü ile kontrol edilebilir. Kullanılan yöntem ile köpük üretiminde Al, Ni, Cu, Fe, Mg ve çeşitli alaşımlar kullanılmıştır. Gözenek çapları 10 µm ile 10 mm arasında, gözeneklilik oranı ise % 5-75 arasındadır [8]. Şekil 4.7' de görüldüğü gibi GASAR yöntemiyle üretilmiş metal köpüklerin gözenek tipi genellikle yuvarlak ve homojen dağılımlıdır [17].

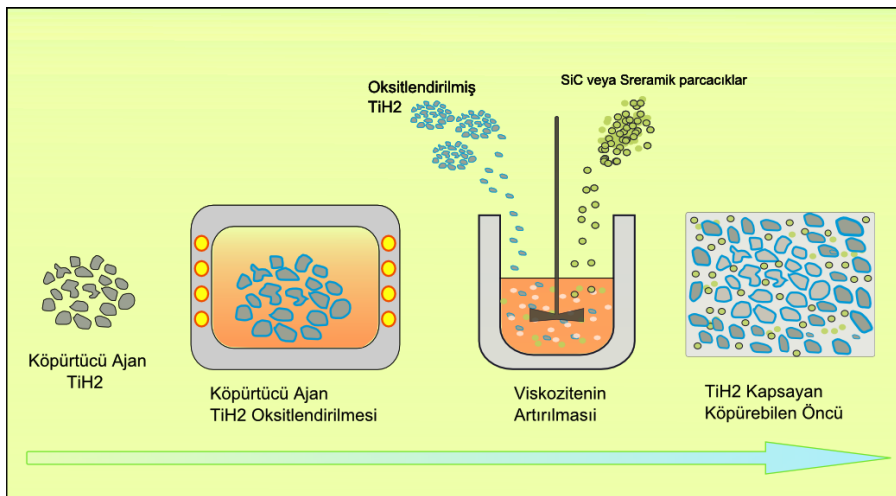


**Şekil 4.7:** Gaz-Metal Ötektik Katılaştırma Yöntemiyle Üretilmiş Metal Köpük [32]

GASAR yönteminin işlem değişkeni çok olduğundan gözenek yapısının kontrolü ve optimizasyonu zorlaşmaktadır. Bu da bazı güvenlik sorunları oluşturmaktadır [11]. Bu sebeplerden dolayı bu malzemelerle üretilmiş ürünler pahalıdır. Fakat buna rağmen GASAR malzemeler ilk yüksek gözenekli malzemeler arasında yer almıştır. Bu malzemeler laboratuvar ile sınırlı kalmış ve henüz ticarileşmemiştir [7].

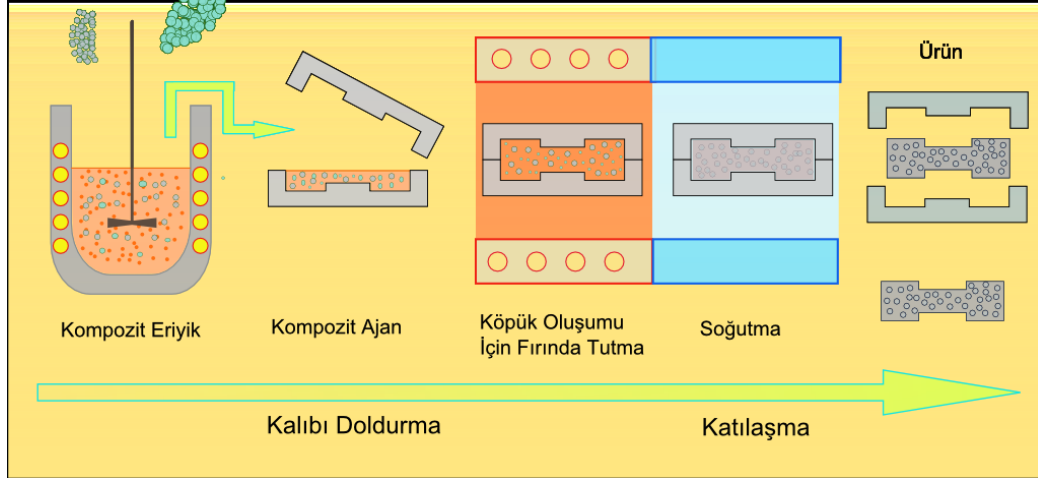
#### 4.1.4 Sıvı metal yolu ile köpükleşebilen öncü üretimi (Formgrip)

Bu metot toz metalürjisi ve ergitme yöntemlerinden esinlenerek ortaya çıkmıştır. Şekil 4.8 ve 4.9’da Formgrip yönteminin aşamaları gösterilmektedir. İlk olarak  $TiH_2$  ( $\sim 30 \mu m$ ) tozları atmosfer ortamında ısıl işleme tutulmaktadır. Böylece yüzeyde titanyum oksit bir film tabakası oluşturulur. Oluşan tabaka çözünmeyi geciktirici bir bariyer rolü oynar. Daha sonra ısıl işleme tabii tutulan  $TiH_2$  tozları  $Al\%12Si$  ( $\sim 150 \mu m$ ) tozları ile ağırlıkça 1/4 oranında karıştırılır. Ardından karışım tozları yaklaşık  $620 \text{ }^\circ C$ ’ de eriyik hale getirilmiş ve yavaş yavaş soğutulmuş  $Al\%9Si/SiCp$  kompozit içerisine ilave edilir. Bu işlem sırasında parçacıkların eriyik içerisinde homojen olarak dağılımını sağlamak için bir mekanik karıştırıcı kullanılır. İşlemin ikinci aşamasında ise köpürmeye hazır malzemeler grafit bir kalıp içerisinde yerleştirilerek fırınlama işlemine tabii tutulur. Böylelikle titanyum hidrürün hidrojen gazı salıp çözünmesi ile yapıda gaz baloncuklarının oluşumu sağlanır. Daha sonra soğuma işlemi ile köpük yapı elde edilir [22].



Şekil 4.8: Köpürebilen Öncü Parçaların Hazırlanması [3]





**Şekil 4.9:** Formgrip Yöntemi [3]

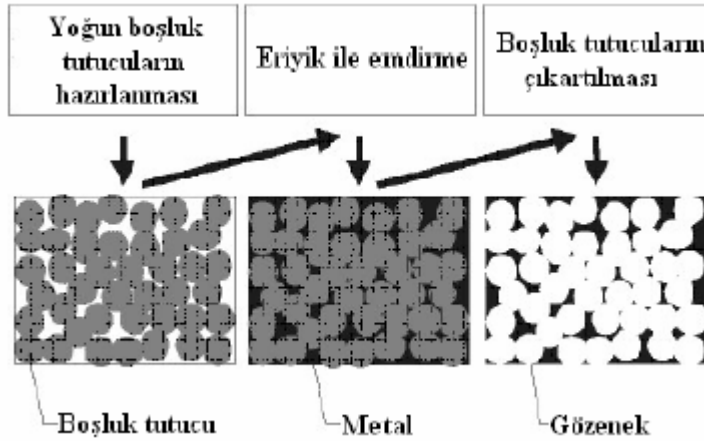
Formgrip yönteminin avantajları [3];

- Hücrelerin homojenliği ve boyut kontrolü yapılabilmektedir.
- Alporas köpüğü ile aynı boyuta sahiptir.
- Mamul üretim yapılabilmektedir.
- Bu işlem karmaşık kalıpları doldurmak için kullanılabilir.

Formgrip yönteminin dezavantajları [3];

- Sınırlı malzemeler için kullanılabilir.
- Seramik parçacıklarının homojen dağılımı zorunludur.
- Metal ergitme sıcaklığında yeteri derecede viskoz değilse, köpük katılaşmadan önce söner.
- Isıl işlem görmüş  $TiH_2$  tozlarının köpük oluşturma kabiliyeti azalır.

#### 4.1.5 Boşluk Tutucu Yöntemi(Vakum Döküm Yöntemi)



Şekil 4.10: Vakum Döküm Yönteminin Aşamaları[33]

Köpük metaller inorganik hatta organik tanecikler veya küreler etrafına sıvı metal dökümü yoluyla üretilebilir. Tanecikler ya dökümden sonra metalik ürün olarak kalmakta ya da uygun bir çözücü veya asitle liç edilerek çıkarılmaktadır[34]. Şekil 4.10'da vakum döküm yönteminin aşamaları gözükmektedir. Boşluk tutucu malzeme olarak çözülebilen tuzlar (NaCl), genişleyen kil tanecikler, kum paletler, köpük cam küreler veya alüminyum oksit boş küreler kullanılmaktadır. Fakat genellikle daha ucuz ve kolay erişilebildiği için NaCl tercih edilir.

Sistem temel olarak; vakum pompası, vakum ölçer, vakum haznesi, kalıp ve kalıbın oturduğu tabladan oluşmaktadır. Bu üretim yönteminde ergiyik halde bulunan metal kalıbın içinde ısıtılmış halde bulunan boşluk tutucu malzemenin üzerine dökülür. Daha sonra ise ergiyik halde kalıbın içine dökülmüş olan metalin boşluk tutucu içinde soğumadan ilerleyebilmesi için vakum pompası çalıştırılır ve böylece köpük malzeme üretilmiş olur. Köpük malzeme üretildikten sonra içinde bulunan boşluk tutucu malzeme liç işlemi veya ısıtma işlemleri çıkarılabilmektedir.

#### 4.2 Katı Metal Halinden Üretim

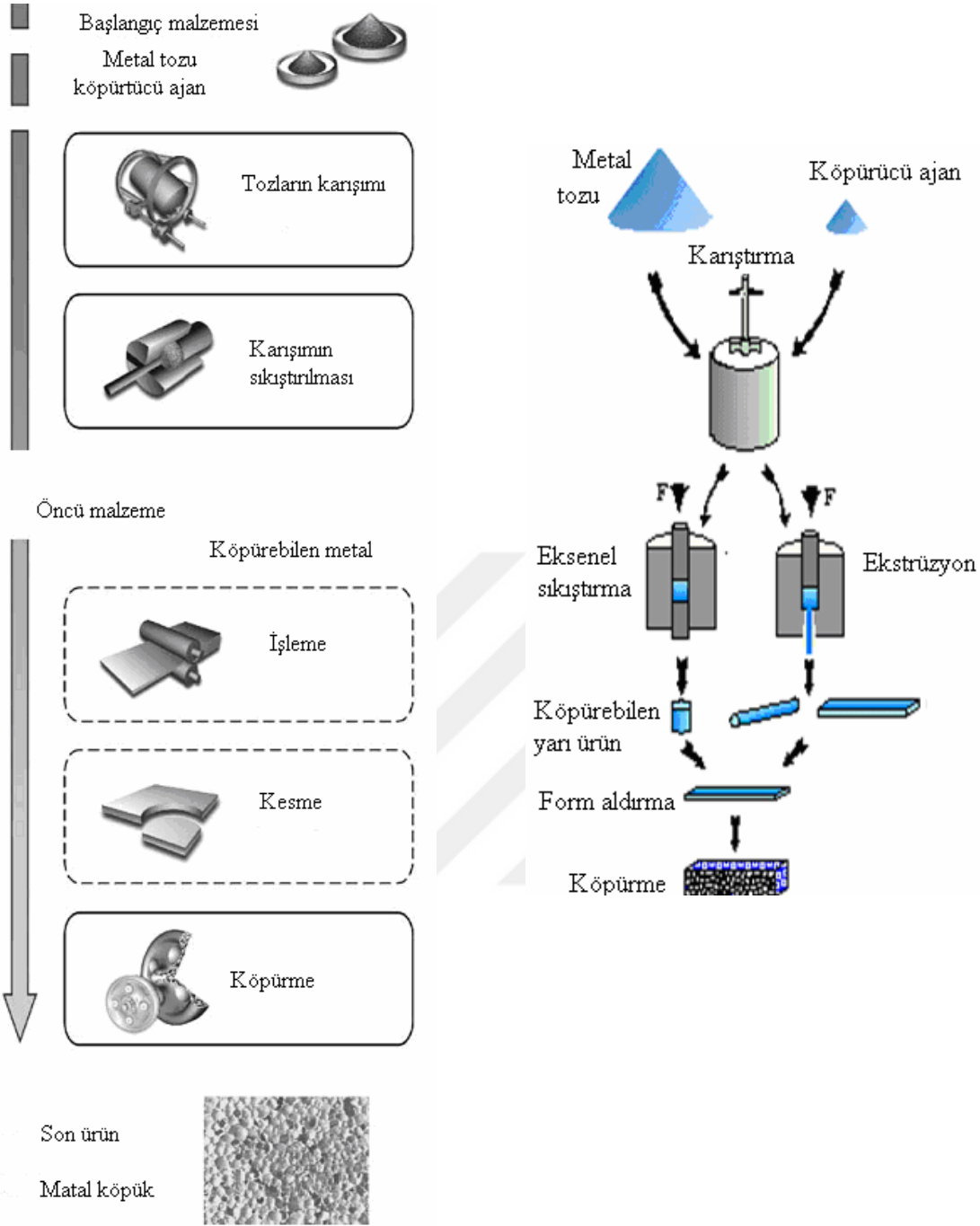
Gözenekli metal yapımında erimiş metal yerine toz metalde kullanılabilir. Günümüzde toz metalürjisi yöntemiyle gözenekli metal elde etmek için sinterlenmiş dağınık hacimli tozlar veya lifler kullanılmaktadır. Metal tozu

sıkıştırarak içine gaz hapsedme, boşluk tutucu astar malzeme veya içi boş küre yöntemleri kullanılarak istenen gözeneklilikte metal köpük üretilebilir [8].

#### **4.2.1 Toz metalürjisi ile metal köpük üretimi**

ALULIGHT ve FOAMINAL olarak bilinen toz metalürjisiyle üretilen köpük metal üretim metotları Fraunhofer-Institut (Bremen) tarafından patentlenmiş ve Almanya'da geliştirilmiştir. Toz Metalürjisi (T/M) yöntemi, metal köpüklerin üretimi için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir ve bu alanda yoğun çalışmalar yapılmaktadır [8]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarla sadece köpüklerin ve köpük bileşenlerinin kaliteli bir şekilde üretilmesine olanak sağlayan düzeye getirilmiştir. Bu yöntemin başlangıç malzemeleri metal tozlar olduğundan “toz metalürjisi” adıyla bilinir [4].

Üretim süreci metal tozları - alaşım tozları ile köpürtücü madde tozları karıştırılması ile başlar ve daha sonra bu tozlar sıkıştırılarak bir blok hale getirilir. Sıkıştırma işleminde köpürtücü maddenin metal matris içine gömülü olmasını sağlar. Sıkıştırma sonrası elde edilen bu blok numuneler, köpürebilir öncü malzemelerdir. Köpürebilir malzeme ısıtıldığı üzerindeki basınç azalır ve köpürtücü madde ayrışarak gaz kabarcıkları meydana getirir. Bu olay Şekil 4.11'de görüldüğü gibidir. Köpürebilir öncü malzeme fırın içerisinde ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa ısıtılırken yapı içerisindeki köpürtücü madde genellikle  $TiH_2$  ayrışarak  $(Ti-H_2)$  hidrojen gazı açığa çıkarır yapı içerisinde hapsolan hidrojen gazları ise gözeneklerin oluşmasını sağlar. Sıcaklığın artmasıyla ve gözenek boyutları da belli bir noktaya kadar artarak devam eder. Yeterince köpüren malzeme soğutulurken kararlı hale gelmesi sağlanır bu sayede metalik köpük malzeme elde edilmiş olur [36].



**Şekil 4.11:** Toz Metalürjisi İle Metal Köpük Üretimi [31]

Titanyum hidrür ( $TiH_2$ ) köpürtücü ajan olarak kullanılmaktadır. Özellikler Alüminyum ve alüminyum alaşımları için tercih edilmektedir. Alüminyum malzemeler için kullanım oranı %0,6-1 arasındadır [37"].  $ZrH_2$  ve  $HfH_2$  de köpürtücü ajan olarak kullanılmakta fakat maliyeti yüksek olduğundan çok tercih edilmemektedir [38"]. Kullanılan bu yöntem sadece Al ve alaşımlarının yanında Kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı alaşımları içinde uygun köpürtücü madde ve yöntem parametreleri seçilerek köpürtme yapılabilir. Son

zamanlarda bu yöntem ile düşük karbonlu çelik tozları da köpürtülmektedir [12]. Köpüklendirme işleminde en çok saf alüminyum ve onun işlenmiş alaşımları kullanılır. Düşük ergime noktaları ve iyi köpürme özelliklerinden dolayı  $AlSi_7Mg$  ve  $AlSi_2$  gibi bazı döküm alaşımları da sık sık köpüklendirme için sık kullanılır [17]. Şekil 4.12’de Frounhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü tarafında toz metalürjisi ile üretilmiş örnek malzemeler bulunmaktadır.



**Şekil 4.12:** Toz Metalürjisi İle Üretilmiş Alüminyum Köpük Dolu Tüp [39”]

Toz metalürjisi ile köpük metal üretiminin avantaj ve dezavantajları şu şekildedir [32].

Avantajları;

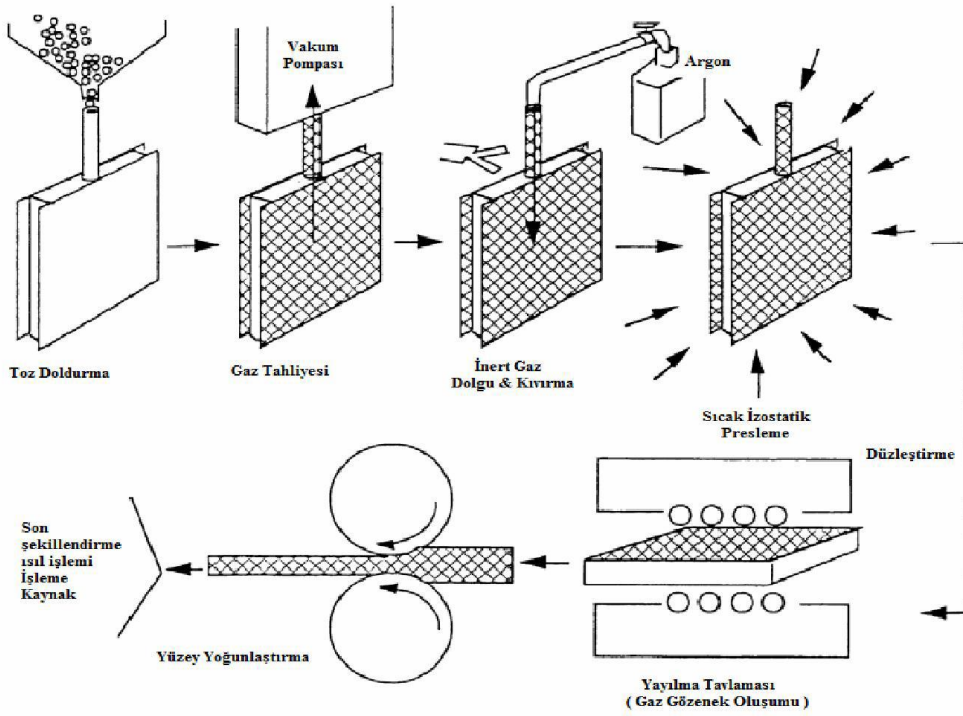
- Nihai ürüne yakın parça üretimi mümkündür.
- Bu metotla kompozit köpükler üretilebilir.
- Alaşım seçiminde esneklik vardır.
- Kararlaştırıcı ek malzemelere ihtiyaç yoktur.
- Köpüğe seramik ve fiber malzemeler eklenebilir.

Dezavantajları;

- Kullanılan tozların maliyeti yüksektir.
- Çok büyük parçaların üretilebilmesi zordur.

#### 4.2.2 Gaz tuzağı yöntemiyle metal köpük üretimi

Şekil 4.13’de gaz tuzağı yönteminin şematik gösterimi bulunmaktadır. Köpük metaller köpük yapıcı toz kullanmadan ve metal eritilmeden üretilebilir. Bunun için tozlar öncü malzeme sıkıştırılır. Sıkıştırma sırasında gazın malzeme içine hapsolmesi sağlanır. Daha sonra öncü malzeme ısıtılıp, hapsolan gazın oluşturduğu iç basınçtan dolayı metal genişmesi sağlanır. Katı hal sürünmesi sonucu gözenekli yapı oluşur [32].



Şekil 4.13: Gaz Tuzağı İle Metal Köpük Üretim Aşamaları [8]

Öncelikle Titanyum tozları bir kalıba doldurularak kalıp içindeki gaz tahliye edilir ve içeri 3-5 atm arası argon gazı üflenir. Kalıp kapatılarak ve izostatik sıcak preslenerek yapının yoğunluğu artırılır. Argon gazı kalıp içinde homojen olarak gözeneklerin arasına dağılır, yüksek iç basınç taşımaya rağmen gaz miktarı hacmin % 2’den daha azını kaplar. Genellikle malzeme, içindeki alaşımın erime sıcaklığının 0.6 katında 6-24 saat arası tavllanır. Tavlama esnasında gaz gözenekleri yavaşça genişler. %20-40 oranında birbirinden bağımsız gözeneklere sahip yapı elde edilir. Gözenek çapları 10 ile 100  $\mu$  m arasındadır. Teorik hesaplamalarda gaz hapsedme tekniğinde gözeneklilik

miktarı %50'yi geçmemektedir. Oluşan köpüğün bağıl yoğunluğu külçe titanyumun %66'sı kadardır [8].

#### **4.2.3 Reaksiyon sinterlemesi**

Ti+Al, Fe+Al veya Ti+Si gibi metal tozu karışımlarından reaksiyon sinterlenmesi yöntemiyle gözenekli yapı elde edilebilir. Gözenekli yapı oluşmasının nedeni, çoklu bileşenli sistemlerdeki bileşenlerin değişik difüzyon katsayılarına sahip olmalarıdır [32].

#### **4.2.4 Bulamaç yapının köpüklenmesi(Çamur köpüklendirme yöntemi)**

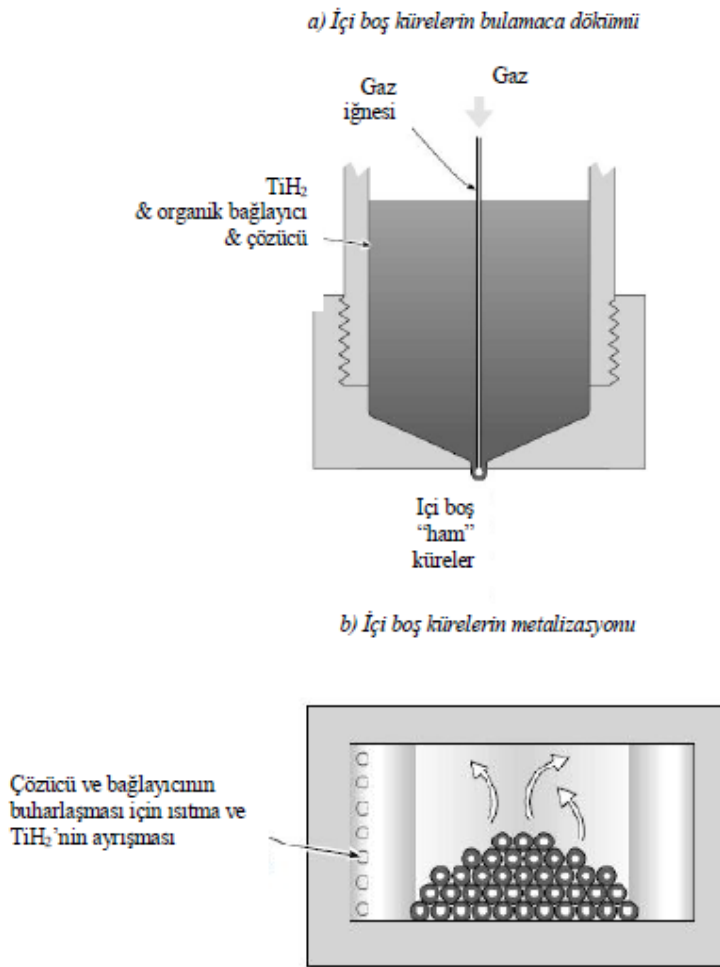
Literatürde; polimer emdirme ve replika yöntemi olarak da bilinmektedir [40"]. Köpük metaller, metal tozları, köpük yapıcı tozlar ve bazı reaktif katkılardan hazırlanan çamurdan üretilebilir. Hazırlanan bulamaç bir kalıba dökülür, karıştırılır ve yüksek sıcaklıkta bekletilir. Katkıların ve köpük yapıcı tozun etkisi altında çamur viskoz hale döner, gaz çıkararak genişler. Yeterli stabilizasyon sağlanmış ise çamur genişlemiş halde tamamen kuruyana kadar bekletilir, sonra sinterlenir. Köpükler, alüminyum tozları, köpük yapıcı olarak ortofosforik asit ile alüminyum hidroksit veya hidrolitik asit kullanılarak üretilebilir. Çamur köpüklendirme, açık gözenekli köpük metal yapımında alternatif yöntem olarak kullanılabilir [8].

#### **4.2.5 Körük şeklindeki kürelerin sinterlenmesi**

İçi boş küreler (200  $\mu$  m-10mm çapı, 1  $\mu$  m-1mm duvar kalınlığında), dağıtılmış parçacıklar, bir bağlayıcı, film bir stabilize edici öncü ve titreşen gaz içsel jet içerisinden geçirilirken eş eksenel bir nozulun dışsal jet içerisindeki sürekli bir sıvı fazı içeren bir bulamacın enjekte edilmesi ile yapılabilir. Bulamaç malzemesi silindirden içi boş küreler şeklinde, yüzey gerilimi ve hidrostatik kuvvetler altında periyodik olarak ısıtılan nozuldan ayrılır. Bunlar, sıvı ve uçucu malzemelerin çıkarılmasıyla sertleştirilir. İçi boş ham mikro kürecikler bu yolla ağırlıklı olarak, dağıtılmış parçacıklar ve bağlayıcılar oluşturularak hazırlanmıştır. Potansiyel olarak daha ucuz olan içi boş küreler elde etme yolu, atomize edilmiş gaz ile rutin olarak üretilmiş tozdan onları ayırmaktadır [41].

Diğer bir yöntemde içi boş küreler “atomizasyon” çamuru yardımıyla üretilip, paslanmaz çelik gözenekli yapılar(gözeneklilik seviyesi %80-87) üretmek için Georgia Teknoloji Enstitüsü’ nde istihdam edilmiştir. Küreler, çözücülerini çıkarmak ve bağlayıcıyı buharlaştırmak için ısıtılmış, uzun bir damla kulesinde onların uçması esnasında buharlaşması ile sertleştirilmiştir. Son bir ısıl işleme metal hidrat, içi boş metal küreler bırakarak ayrılmıştır [7,41]. Şekil 4.14’de üretim yöntemlerinin aşamaları görülmektedir.

#### *İÇİ BOŞ KÜRESEL TOZ SENTEZİ*



Şekil 4.14: Georgia Tech Yöntemi [7]

### 4.3 Metal Buhar Halinden Üretim

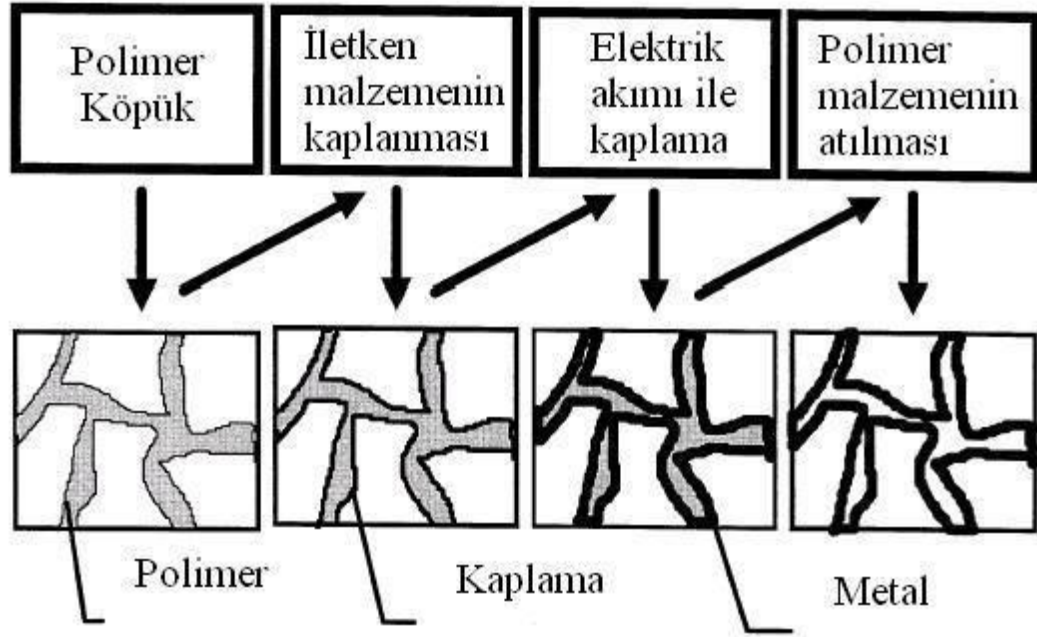
Metalik köpük malzemeler gaz halindeki metallere veya gaz halindeki metalik parçalardan üretilir. Üretim başlangıcında köpük yapının geometrisini tanımlayabilecek katı bir öncü yapıya ihtiyaç vardır. Poliüretan



köpüğü ya da kafes şeklindeki polimer malzemelerin öncü yapıları örnek olarak kullanılabilir. İşlemin devamında kullanılacak metal buharı bir vakum çemberinde oluşturulur ve öncü malzemenin üzerine yoğunlaştırma amaçlı gönderilir. Yoğuşmuş metal polimer öncü malzemenin dış yüzeyini kaplar. Buharın yoğunluğu ve oluşma zamanı ile tanımlanabilen belirli bir kalınlıkta film tabakası oluşur [24].

#### 4.3.1 Metal iyon çözeltisinden köpük üretimi (Depozisyon yöntemi)

Depozisyon yöntemi metallerin iyon halinden başlamaktadır (elektrolit sıvı içerisindeki iyonlar örnek gösterilebilir). Metal yapı elektrik kuvvetiyle açık hücreler şeklinde polimerik köpük malzeme üzerine çöker [24]. Şekil 4.15'te depozisyon yönteminin şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 4.15: Georgia Depozisyon Yöntemiyle Metal Köpük Üretimi [42]

Bu yöntem için polimer köpük malzemenin elektriksel iletken olması gerekmektedir. İletkenlik, polimer köpük malzemeyi elektrik iletkenliği bulunan bir bulamaç içerisinde daldırarak sağlanır [42].



## 5. METALİK KÖPÜKLERİN ÖZELLİKLERİ

Düşük yoğunluklu köpüksü metaller iki yönden mühendislik uygulamaları için önemlidir:

1) Elastiklik modülü ve akma dayanımlarının yüksek olması sayesinde, dış yüzeyleri metalle kaplanarak düşük ağırlıklı imal edilebilmektedirler.

2) Sabit basma gerilimi uygulandığında yığılma özelliğinin iyi olmasından dolayı çarpışma ve darbelerde enerji absorbe kapasiteleri yüksek olduğundan rahatlıkla kullanılabilirler [43].

Metalik köpük yapılar, polimer esaslı olanlarla karşılaştırıldığında daha katı, sıcaklık değişimlerinde iç yapısı daha stabil, ısıl mukavemeti yüksek ve toksin etkili gaz üretmeyen yapılardır. Bunlar tamamen geri dönüşümler kazanılabilen malzemelerdir ve çevreye zararlı değildirler. Hafif yapılar olması, darbe ve titreşimi sönmüleyebilmeleri ve elektromanyetik koruma özelliği göstermeleri avantajlarından bazılarıdır. Bunun yanında önemli termal özelliklere de sahiptir [44].

Ergime noktaları yaklaşık olarak üretimde kullanılan metal alaşımlarıyla aynıdır. Bunun yanında malzemenin yüzeyi genellikle oksit tabakasıyla kaplıdır. Sahip olduğu oksit tabakasından dolayı ergime noktası yüksektir. Oksit tabakası gözenek sayısının artmasına neden olur. Oksit tabakasının kalınlığı arttırılırsa ergime sıcaklığı artar [44].

Özgül ısıları oldukça düşüktür. Bundan dolayı bu özelliğın istendiğı uygulamalarda kullanılan bir malzemedir. Isıl şok dirençleri normal bir içyapıya sahip malzemeyle kıyaslandığında daha yüksek, ısı iletimi ise ondan daha azdır [44].

Metal köpüklerin mekanik özellikleri hücre çeşidine, şekline, boyutuna, homojenliğe, yüzey alanı ve nispi yoğunluğa ve bilhassa orantılı olarak yoğunluğa bağlıdır. Yoğunluk ile mekanik ve fiziksel özellikler arasında

oldukça yakın bir ilişki vardır. Bu bağımlılık aşağıdaki güç yasası (power-law) fonksiyonuna uyar [45].

$$K=K_0(p/p_e)^m \quad (5.1)$$

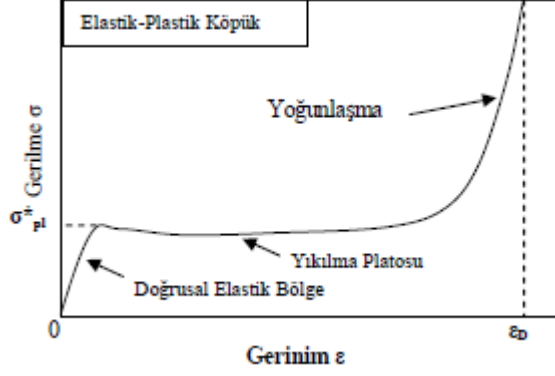
Burada (K); köpük metalin özelliği, (p) ise yoğunluğudur. (K<sub>0</sub>) ve (p<sub>e</sub>), yığmsal (bulk) alüminyum alaşımıyla ilgili özelliklerdir. Katsayı (m), genellikle 1,5-1,7 arasında bulunur [45].

Metal köpükler üç düzeyde karakterize edilebilir. Birinci düzeyde, gözeneklilik niteliği tamamen göz ardı edilerek, yığmsal bir mühendislik malzemesi olarak düşünülebilirler. İlgilenilen malzeme özellikleri, işleme sertleşmesi ve plastik yıkılma altındaki köpüklerin davranışları kadar iyi, rijitlik, dayanıklılık, sertlik ve yoğunluktur. Bu parametrelerin verilen köpük çeşidi için tekrarlanabilir olması önemlidir [4].

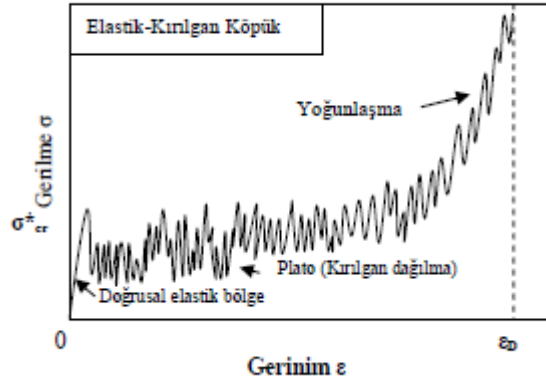
İkinci düzeyde, metal köpükler hücrelerin topluluğu olarak görülebilirler. İlgilenilen özellikler; tipik bir örnek içerisinde hücre boyut aralığı ve dağılımını, hücre şeklini, hangi hücrelerin birbirleriyle düzenli bağlantı halinde olduğunu, kalınlığı, uzunluğu, düzenli biçimde olmasını, hücre yüzeylerinin kesitsel profilini içerir. Köpüklerin mekanik özelliklerine en uygun hale getirmeye bakış ile birlikte, hücre yapısının bu görünüşü ve yoğun malzeme özellikleri arasındaki ilişkiyi keşfetmeye yönelik yeni çalışmalar bulunmaktadır [4].

Üçüncü düzeyde; köpük oluşturan metalin mikro yapısı önemli olmakla birlikte, fazların dağılımı da önemli olabilir. Metal köpük üretimi, ayrıca mekanik performansı etkileyebilecek, katkı veya kararlaştırıcı ya da yüzey aktif madde rolü oynayan çok iyi ayrılmış katı fazlar oluşturulmasını gerektirebilir. Mikro yapı ile yığın özellikleri arasındaki ilişki nispeten daha az bilinmektedir [46].

Bütün köpüklerin yığılma değerlerinde "doğrusal elastik" özelliğe sahiptir. Bu bölgenin eğimi elastiklik modülünü (E\*) verir. Gerinim arttırıldığında, gerilme-gerinim grafiğinde uzun bir "yıkılma platosu" gözlenir ve bu bölgeyi sabit gerinimde gerilmenin oldukça dik şekilde arttığı "yoğunlaşma" bölgesi izler. Bu durum Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de grafik üstünde gösterilmiştir [47].



**Şekil 5.1:** Elastik-Plastik Köpüklerin Tipik Basma Gerilme-Gerinim Grafiği [43]



**Şekil 5.2:** Elastik-Kırılgan Köpüklerin Tipik Basma Gerilme-Gerinim Grafiği [43]

Lineer elastik bölgede deformasyon, hücre duvarlarının bükülmesi veya genişlemesiyle kontrol edilmektedir. Bu bölge, birkaç deformasyon mekanizmasından oluşan (elastik bükülme, gevrek kırılma veya deformasyonun yoğunlaşması) çökme bölgesiyle sona ermektedir. Bu bölgede bir alandaki hücrelerin çökmesiyle oluşan yerel deformasyon, çökmeyen bölgelere doğru ilerleyerek devam etmektedir. Deformasyonun belirli bir bölgede yoğunlaşması ve deforme olmayan bölgelere doğru ilerlemesi sebebiyle bu bölgedeki gerilmelerde düşme ve yükselme gözlenmektedir. Çökme bölgesi sabit veya birim şekil değişim miktarı ile artan bir plato gerilmesinde gerçekleşmektedir. Kritik bir birim şekil değişim miktarından sonra hücre duvarlarının tamamen çökmesi ile yoğunlaşma bölgesi başlamaktadır. Bu bölgede gerilme artarak yoğun alüminyum (Al) metalinin gerilmesine ulaşmaktadır [4].

Alüminyum köpüklerin basma altındaki davranışları; yoğunluğa, hücre geometrisine ve yapıldıkları metalin akma gerilmesine bağlı olarak

değişmektedir [11]. Çökme veya plato gerilmesi yoğunluğun artması ile yükselmektedir. Benzer şekilde yapıldıkları metalin akma gerilmesinin artmasıyla köpükteki gerilmelerin yükselmesi beklenmektedir [48].

## 5.1 Elastik Modül

Yapısal malzemelerin en önemli özelliklerinden biri, bir dizi modül ile tanımlanan lineer elastik davranıştır. İzotropik malzemelerin lineer elastik karşılıklarını karakterize etmek için iki modüle gerek vardır. Bunlar; Young's modülü E ve kesme modülü G'dir. Bazı köpükler üretim işlemlerinden dolayı izotropik değildirler. Bu nedenle lineer elastik davranışı belirlemek için ikiden daha fazla modüle ihtiyaç vardır [22].

İzotropik durumda ve bazı kapalı hücreli metalik köpüklerin daha az veya daha fazla izotropik olması nedeniyle Denklem 5.2 de bulunan Elastik modülü (E), kesme modülü (G), kütle modülü (K) ve elastik Poisson oranı ( $\nu$ ) arasındaki ilişki iyi bilinmelidir [11].

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (5.2)$$

Yapının, hücreli malzeme veya köpük olması durumunda "modül" ifadesinin kullanılması genelde uygun değildir. Çünkü köpük, iskelete benzer bir yapıdır ve "sertlik" kullanılmalıdır. Ancak, bir süreklilik olarak malzemenin yeni bir sınıfı şu an olağan bir şekilde dikkate alınmalıdır. Bundan dolayı genel malzeme özellikleri onları karakterize etmek için kullanılır. Hücreli bir yapı sabit bir Young's modülüne sahip değildir. Bu hücreli yapının mimarisine bağlıdır [22].

Hücrelerin kapalı veya açık olmasına göre doğrusal bölgedeki elastik davranış değişebilmektedir [43]. Asby ve Gibson tarafından kapalı hücreli köpük malzemeler için elastik modül değerini bulabilmek için Denklem 5.3'teki eşitlik bulunmuştur.

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 P \quad (5.3)$$

Bu eşitlikte  $E^*$  köpük malzemenin elastik modülünü ifade ederken,  $E_s$  hücre metalinin elastik modülünü ifade etmektedir.  $C_1$ 'in değeri izotropik kapalı

hücreli köpükler için 1/3, bal peteği yapısı için 1 olarak hesaplanmıştır [48]. Denklem 5.3'teki  $p$  nispi yoğunluğu ifade eder. Nispi yoğunluk ise Denklem 5.4'teki bulunmaktadır.

$$p = \frac{p^*}{p_s} \quad (5.4)$$

Bu denklemdeki  $p^*$  köpük malzemenin yoğunluğu,  $p_s$  ise hücre metalinin yoğunluğudur.

Kapalı hücreli köpüklerde, hücre yüzeyleri gerildiğinde köşelerde bükülmeler meydana gelir. Bu nedenle elastiklik modülü eşitliği, yüzey gerilmesi ve kenar bükülmesiyle ilgilidir. Burada  $\phi$ , gözenek duvarlarındaki katı oranını (Alulight köpüğü için 0,92-0,94) ifade eder [23].

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \phi^2 p^2 + C_1 (1 - \phi^2) \cdot p \quad (5.5)$$

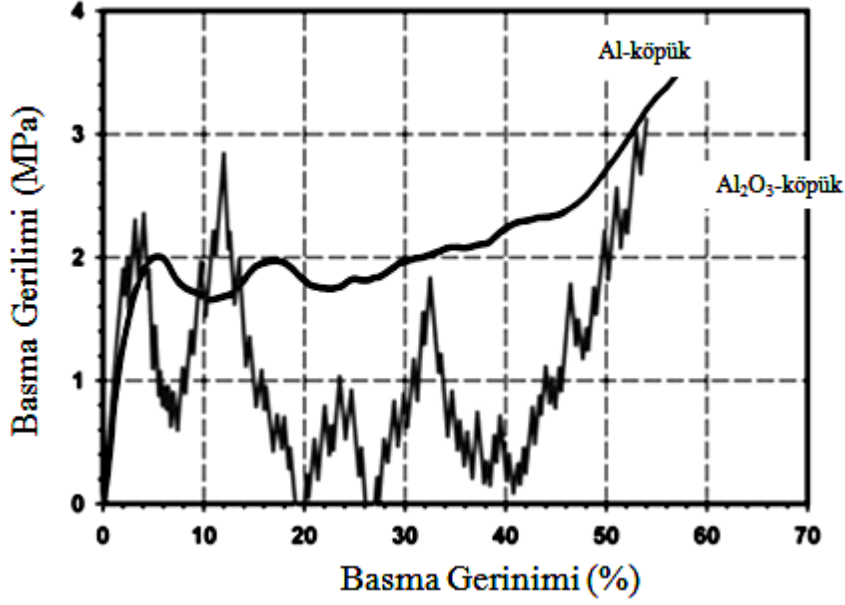
Endüstride imal edilen düşük yoğunluklu kapalı hücreli alüminyum köpüklerin deneysel elastiklik modülleri teorik hesaplanandan oldukça düşüktür. Bu durum hücre köşelerinin hücre duvarlarından daha kalın olmasındandır. Bunun sebebi yüzeydeki gerilmelerin sıvı metali hücrenin köşelerine doğru çekmesindedir [48]. Denklem 5.6'da deney ile tespit edilmiş olan modül verileri gösterilmektedir.

$$\frac{E^*}{E_s} = Cp^n \quad (5.6)$$

Alüminyum köpükler için  $n$  değeri 1,5-2dir.  $C$  ise yüksek kalitedeki köpükler için 3, düşük kalitedeki köpükler için ise 0,5 olarak alınır. Gözenekler eğildiğinde, gözenek kenarında delik oluştuğunda ya da homojen olmayan gözenekler alüminyum köpüklerin mekanik özelliklerini olumsuz etkiler [43].

## 5.2 Basma Davranışı

Şekil 5.3' de hücreli yapıya sahip metallerin basma testi gösterilmiştir. Gerilim-gerinim eğrisinde plato bölgesi oldukça farklıdır. Burada geniş bir alan dışında neredeyse eşittir. Bu özellik hücreli metalleri ilginç kılar. Malzemenin hangi köpükten imal edildiyse deformasyon özellikleri farklılık gösterebilir [11].



**Şekil 5.3:** Sünek ve Gevrek Alüminyum Köpüğün Basmada Gerilim-Gerinim [11]

Enerji absorbe etme kapasitesi plato gerilmesine bağlıdır. Bu durumda plato gerilmesinin denklemi aşağıdaki gibidir. Burada  $C$ , geometriye bağlı sabit,  $\sigma_{ys}$  ise köpük metalinin akma gerilmesidir [48].

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_{ys}} = C_2 \left( \frac{p^*}{p_{ys}} \right)^{3/2} \quad (5.7)$$

Hücre genişlemesinin hücre duvarı bükülmesiyle eş zamanlı oluşması durumunda ise, aşağıdaki denklem 5.8'deki gibi kullanılabilir.  $C_2$  geometriye bağlı sabittir ve yaklaşık 0,3 olarak alınabilir [23].

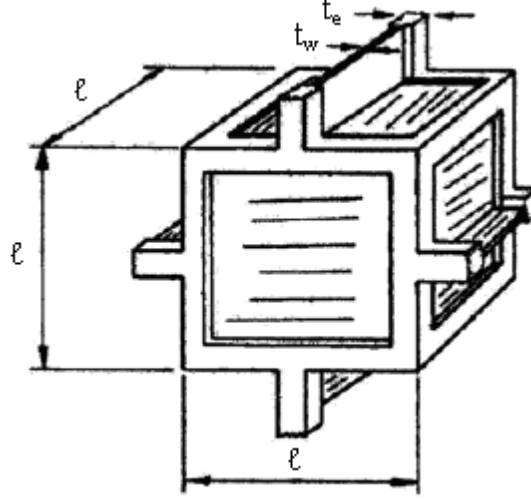
$$\frac{\sigma^*}{\sigma_{ys}} = C_2 \left( \Phi \frac{p^*}{p_{ys}} \right)^{3/2} + C_2^{-1} (1 - \Phi) \frac{p^*}{p_{ys}} \quad (5.8)$$

Gibson ve Ashby, köpükleri yeniden modellemişlerdir. Buna göre plato gerilmesi hücrenin boyutuna( $l$ ), duvarına( $t_w$ ) ve kalınlığına bağlıdır.

$$\frac{\sigma^* p_1}{\sigma_{ys}} = B_1 \left( \frac{t_e}{l} \right)^3 + B_2 \left( \frac{t_w}{l} \right) \quad (5.9)$$

Bu kesin bir tasarım için yetersiz olmakla birlikte iyi bir tahmin sunabilir.

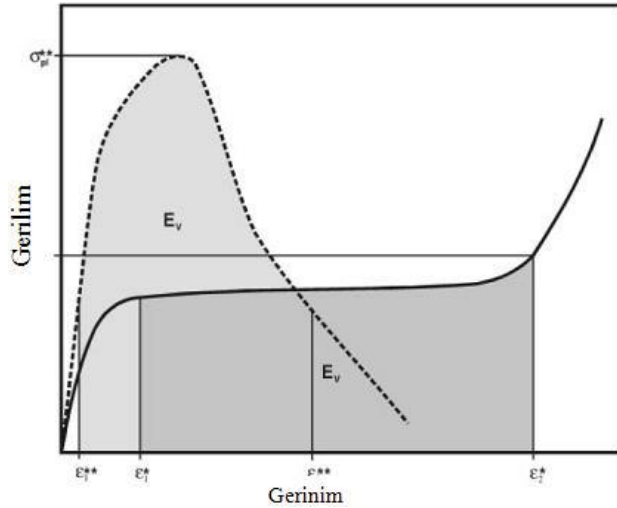




**Şekil 5.4:** Gibson ve Ashby Modeline Göre Kapalı Hücreli Yapı [4]

### 5.3 Enerji Sönümlemesi

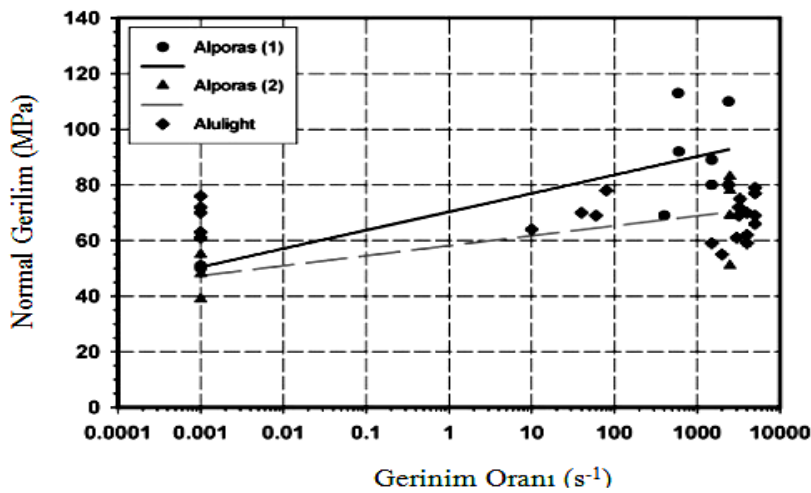
Hüresel metaller, geniş plato sistemine sahip olduklarından enerji absorbe etme kapasiteleri oldukça iyidir. Kinetik enerjinin absorbe edilebilmesi için kuvvetlerin belirli bir değeri aşmaması gerekmektedir. Dolayısıyla Şekil 5.5'te görüldüğü gibi enerjinin absorbe edilmesinde sadece enerji absorpsiyon kapasitesi yeterli değildir. Bunda malzemenin gerinim-gerilim eğrisi de önemli bir etkiye sahiptir [22].



**Şekil 5.5:** İki Farklı Enerji Emicinin Basma Gerilim-Gerinim Eğrisi [22].

Taşıma sistemlerinde darbe emici olarak kullanılan hüresel metaller için yalnızca enerji absorpsiyon kapasitesi önemli değil aynı zamanda darbe davranışı da önemlidir. Kaza durumlarında oluşabilen yüksek deformasyon

oranları, köpüğün mekaniksel özelliklerini değiştirebilir. Bunlar iki noktada dikkate alınmalıdır: Hücre kenarlarının ve duvarlarının eylemsizlik kütlesi ve kapalı hücreli bir köpüğün hücreleri içindeki gaz basıncı ve gaz akışı. Her iki etki de akış gerilimini arttırabilir. Bu nedenle, gerinim oranının artması ile köpüğün plato gerilimi de artar. Bu durum, akış geriliminin artmasının önemli olmadığı açık hücreli yapılarda daha yüksek oranlarda gözlemlenir. Yapısal elementlerin eylemsizlik kütlesi akış geriliminde hiçbir katkı sağlamaz. Bu durum, metal köpüklerin bir kısmının gerilim-gerinime bağıllık göstermesi nedeniyle, kapalı hücreli köpüklerde farklıdır. Gerçek kapalı hücreli metalik köpükler genelde, sıklıkla üretim işleminde ortaya çıkan hücre duvarlarındaki bazı başlangıç hataları içermesi nedeniyle tamamen kapalı hücreli yapılar değildirler. Hatalara ek olarak, hücre duvarları yırtılması deformasyon işlemi esnasında oluşur. Bu hatalardan dolayı hücreler arasındaki gaz akışı, gerinim oranına bağlıdır. Böylece, hücreler içindeki gaz basıncı yüksek hızlı deformasyon esnasında akış geriliminin de katkısıyla artar. Deformasyon bantlarındaki bölgesel gerinim nedeniyle, bölgesel gerinim oranı ilk küresel olarak ölçülmüş değerden çok daha yüksektir. Dolayısıyla, gerinim oranı etkisi ile artacaktır. Alüminyum köpüklerdeki araştırmalar Şekil 5.6'da gösterildiği gibi, gerinim oranı 10<sup>-3</sup>'den 10<sup>3</sup>'e arttığında plato gerilimi %20–90 arasında artış göstermiştir. Gerinim oranı etkisi genellikle köpükten yapılan alaşım ve hücre morfolojisi tarafından kontrol edilmektedir [22].



**Şekil 5.6:** İki Farklı Alüminyum Tipinin Plastik Dayanıma Bağlı Olarak Değişen Gerilim-Gerinim Eğrisi [22].

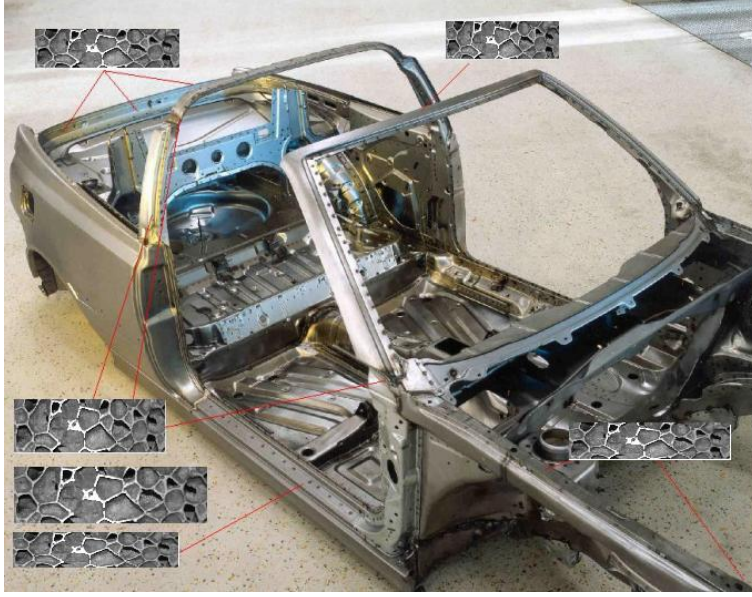
## **6. METALİK KÖPÜKLERİN KULLANIM ALANLARI**

Köpük metaller sahip oldukları avantajlar sayesinde endüstride pek çok alanda kullanılmaktadır. Köpük metallerin açık ya da kapalı hücre yapısına sahip olmalarına göre kullanıldığı alanlar değişkenlik göstermektedir. Köpük metallerin kullanım alanlarını, hücre çeşidi ve uygulama alanlarına göre (yapısal ve fonksiyonel) sınıflandırabiliriz [8].

### **6.1 Metalik Köpüklerin Yapısal Uygulamaları**

#### **6.1.1 Otomotiv endüstrisi**

Otomobil endüstrisinde güvenlik konusunun her geçen gün ön plana çıkması, gün geçtikçe daha ağır araçların üretilmesine neden olmuştur. Bu da az yakıt tüketen araçlara olan talebi artırmıştır. Bu amaçla özellikle Avrupa ve Japonya'da kısa araçlar üretilmektedir. Ancak bu tasarım yolcuların rahat hareket etmesini engellemektedir. Bu olumsuzluğu gidermek için denenen daha küçük boyuta sahip motorlarda ise bu sefer parçalar birbirine çok yakın olduğundan ısınma problemi ve çarpışma noktasına yakınlaşmadan kaynaklı yaşanacak tehlikeyi artırmıştır. Birçok yapılan çalışmanın sonucunda varılan ortak nokta akustik emisyonları azaltmak olmuştur. Bu da ses emicilerinin kullanımına önem katmıştır. Metal köpüklerin hafif olması, enerji ve ısıyı soğurma özelliklerin iyi olması nedeniyle bu sorunların çözümünde kullanmak için iyi bir çözüm olabilir [26]. Şekil 6.1'de metalik köpüklerin otomobil gövdesinde kullanıldığı bölgeler görülmektedir.



**Şekil 6.1:** Metalik Köpüklerin Otomobillerde Uygulanması [17]

Otomobil endüstrisinde metalik köpük malzemeler, araç gövdesinde çarpma darbelerindeki kinetik enerjiyi sönmölemek ve yolcuların yaralanma riskini minimuma indirmek için düşünölmüştür. Bunun sonucunda çarpışma kutuları yapılmıştır. Çarpışma kutuları tamponla ön korkuluk arasında bulunmaktadır. Bu kutular 20 km/s ve daha düşük hızlı çarpışmalarda bütün darbeyi absorbe ederek deforme olurlar ve aracın gövdesinde meydana gelebilecek daha büyük bir hasarı önlerler [31]. Şekil 6.2’de örnek olarak hazırlanmış bir çarpışma kutusu bulunmaktadır.



**Şekil 6.2:** Çarpışma Kutusu Örneği [22]

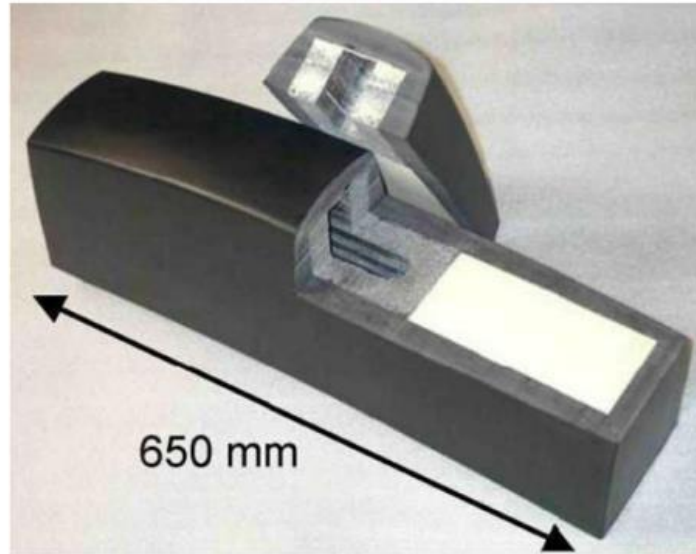
### 6.1.2 Demiryolu endüstrisi

Otomotiv endüstrisine ait üç ana uygulama alanı için geçerli kurallar demiryolu ekipmanı metal köpük uygulamaları içinde geçerlidir. Kentsel alanlarda işletilen

hafif demiryolu araçlarında, enerji absorbe konusu önemlidir. Japon trenleri çarpışma anında enerji absorbesini iyileştirmek için 2.3 metre yükseklikte “Alporas” köpük bloklar ile donatılmışlardır. Köpürtülmüş düşük ağırlıklı elemanların demiryolu taşıtlarındaki avantajları arabalar ile aynıdır; ana fark demiryolu vagonlarında daha büyük boyutlu yapılar kullanılabilir [8]. Şekil 6.3’te raylı sistem aracındaki alüminyum köpük yapıya sahip tırmanma önleyici gösterilmiştir. Şekil 6.4’te ise yapısı gösterilmektedir.



**Şekil 6.3:** Tren Üzerindeki Tırmanma Önleyici



**Şekil 6.4:** Tırmanma Önleyicinin Yapısı

### 6.1.3 Uzay endüstrisi

Köpük metallerin ve hafif yapıların hava-uzay endüstrisindeki kullanımı otomotiv endüstrisindeki ile benzerlik göstermektedir. Uzay endüstrisinde kullanılan petek şeklindeki yapıların maliyeti, alüminyum köpük levhalara veya metal köpük sandviç panellere oranla daha yüksektir. Amerika’da Boeing firması, alüminyum köpük çekirdekli alüminyum sandviç panelleri helikopter kuyruk çubuklarında kullanmaktadır [8].



**Şekil 6.5:** Ariane 5 Raketinde Kullanılan Alüminyum Köpük Koni Adaptör [49]

Başta metalik köpükler olmak üzere hafif metallerin uzay endüstrisinde kullanımları teknolojiye paralel olarak hızla artmaktadır. Uzay ve havacılık endüstrisinde metalik köpük sandviç yapılar yüksek performans sergileyen malzemeler haline gelmişlerdir. Avrupalı “Ariane 5” roketinde (Şekil 6.5), raketin taşıma (yük) kapasitesini destekleyen, 2 tane koni biçimli adaptör kullanılmaktadır. Son zamanlarda bu adaptörler alüminyum petek şeklinde sarmal yapılardan yapılmaktadır ve işleme maliyeti çok yüksek olmaktadır. Bu koni biçimli ve pahalı adaptörü daha ucuz ve kolay elde edilen Alüminyum köpük sandviçler ile değiştirmek amaçlanmıştır [49].

#### **6.1.4 İnşaat endüstrisi**

Alüminyum köpük ve köpük paneller hafiflik ve ivmelenmenin çok önemli olduğu asansörlerde kullanılabilir. Ayrıca, yangın duvarları ve yangın çıkışları, zayıf ısı iletkenliği ve yangın direnci olan alüminyum köpük malzemelerle yapılmaktadır [8].

Metal köpüklerin diğ er uygulama alanı ise, inşaatta beton kolon ile duvarlar arasında sıkıştırılmasıdır. Duvar ile beton arasındaki boşluğ un doldurulması için köpük malzeme boşluk içerisine yerleştirilmiş ve bölgesel olarak ısıtılmıştır. Isıtma süresince köpük malzeme genişlemiş ve beton kolon ile duvar arası dolmuştur [28].

#### **6.1.5 Makine endüstrisi**

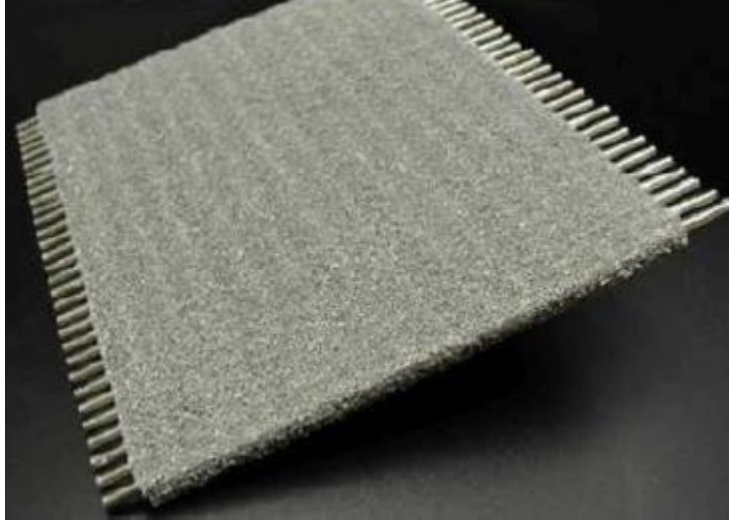
Makine yapımında metalik köpüklerin bazı ilginç uygulamaları vardır. Halen geleneksel metallerden yapılan akslar, rulolar ve platformların malzemeleri, azaltılmış ataleti ve gelişmiş sönümlenme kabiliyeti olan yoğun köpürtülmüş parçalarla veya iç i köpük dolu sütunlar ile değiştirilebilir. Bu gibi bileşenler sabit sondaj, freze makineleri ve baskı makineleri de kullanılabilir. Delmeye veya öğütmeye yarayan küçük el aletlerinin gövdeleri bu malzemelerden yapılabilir. Alüminyum köpük malzemeler aynı zamanda teleskop aynalarını desteklemek için kullanılır [8].

### **6.2 Metalik Köpüklerin Fonksiyonel Uygulamaları**

#### **6.2.1 Isı değıştiriciler**

1. Açık hücreli alüminyum köpükler ve bakır bazlı köpük malzemeler korozyon direnci ve yüksek termal iletkenliğ e sahip olduklarından ısı değıştiricisi olarak kullanılabilirler. Kapalı hücreli köpük metal düşük termal iletkenliğ e sahip olduklarından termal koruyucu olarak kullanılabilirler [8]. Ş ekil 6.6'da yapısında metal köpük matris yapıya sahip olan tüplerden oluşturulmuş yüksek sıcaklıklarda çalışabilene bir radyatör bulunmaktadır.





**Şekil 6.6:** Köpük Metal Isı Değişirici [7]

### 6.2.2 Susturucular

Kompresör ve pnömatik aletlerde egzoz gürültüsünü ve mekanik titreşimleri azaltmak için metal köpükten yapılmış uygun susturucular kullanılabilir [29]. Şekil 6.7’de metal köpükten üretilmiş susturucular görülmektedir.



**Şekil 6.7:** Metal Köpük Susturucu [22]



### **6.2.3 Filtrasyon**

Sıvı içerisindeki fiber ya da katı parçacıkları birbirinden ayırmak ya da gaz içerisinde bulunan katı ya da sıvı parçacıkları ayırmak için filtreler kullanılmaktadır. Açık hücreli alüminyum köpükler; bu işlem için kullanılmaktadır [22].

### **6.2.4 Su ayırıcı**

Su, açık hücreli köpük metal içerisinde akıtılarak suda çözünmüş istenmeyen iyon konsantrasyonu azaltılabilir [8].

### **6.2.5 Sprinkler**

Sprinkler bazı uygulamalarda gazın sıvı içerisine gerekli olduğu miktarda homojen olarak alınmasını sağlar. Örnek, gazlı meşrubatların içine karbondioksit katılması [8].

### **6.2.6 Katalizörler**

Açık hücreli köpükler, süneklik ve ara yüzey genişliğine bağlı termal iletkenliklerinden dolayı katalizör olarak kullanılırlar Katalizin verimliliği; kataliz ile ara yüzey genişliğine bağlıdır [22].

## **6.3 Metalik Köpüklerin Dekorasyon ve Sanatsal Uygulamaları**

Alüminyum köpükler süslü mobilyalar, saatler, lambalar gibi alanlarda kullanım olanağı bulmuştur. Eğer sandalye ve masalar alüminyum köpüklerden üretilirse, mekanik özellikleri oldukça iyi bir hale gelecektir. Yüksek fiyatlı hoparlör sistemleri alüminyum köpük metallere yapılabilir. Alüminyum köpük kullanımı sadece yüksek sağlamlık ve mekanik özellikler sağlamaz aynı zamanda geleneksel eşyalara göre daha çekicidir [8].



## **7. METALİK KÖPÜKLERİN KARAKTERİZASYON METOTLARI**

Hücresele metalleri karakterize etmek için tahribatlı ve tahribatsız olmak üzere iki tane genel muayene yöntemi mevcuttur [5].

### **7.1 Tahribatsız Muayene**

#### **7.1.1 Yoğunluk ölçümleri**

Gözenekli bir malzemenin yoğunluğunu ölçmek için arşimed prensibi kullanılmaktadır. Malzeme tartılır ve belirli bir yoğunluğa sahip sıvı içerisinde yüzdürülür. Malzemenin dış yüzeyi kapalı değilse sıvının nüfuz etmesini engellemek için dışı polimer film tabakasıyla kaplanır [5].

#### **7.1.2 Boya nüfuz ettirme ölçümleri**

Sıvı kimyasal incelenecek köpüğe uygulanır. Kimyasal delikler ve çatlaklar tarafından emilir. Yüzey temizlendikten sonra, kimyasal maddenin tutulduğu yerlerde renk değiştiren renklendirici ilaç uygulanır. Böylece kusur oluşan bölgeler görsel olarak incelenebilir [5].

#### **7.1.3 X-Işını radyoskopi ve radyografisi**

Hücresele metallere basit X-ışını soğurma teknikleri ile incelenebilir [5].

#### **7.1.4 X-Işını ölçümlü tomografi**

X-Işını Ölçümlü Tomografi ile 3 boyutlu yoğunluk dağılımları incelenebilir. Genellikle kaynak ve detektörü numune etrafında döndürerek, numunelerin X-Işını suretleri çok yönlü olarak alınabilir [5].

#### **7.1.5 Girdap akım algılama**

Köpükler; çoklu frekans elektriksel empedans ölçümleri yapılarak, rölatif yoğunluk ve hücre boyutlarıyla karakterize edilir. Girdap akımları sadece bazı geometrik faktörlere ve frekansa bağlı değildir, köpük özelliklerine de bağlıdır.

Gözenekliliğin çıkış sinyalinde belirgin bir etkisi olduğu gösterilebilir. Bu metot, uygun kalibrasyondan sonra numunenin lokal yoğunluk ve diğer gözenek özelliklerinin ölçümü için kullanılabilir [5].

#### **7.1.6 Akustik ölçümler**

Gözenekli ortamların ses emme özellikleri genellikle çabuk ve kesin ölçüm sağlayan bir empedans tüpünde yapılır [5].

#### **7.1.7 Titreşimsel analiz**

Malzemelerin Young modülü ve kayıp faktörü titreşimsel analizle belirlenebilir. En basit teknik, uzun dikdörtgenel dairesel kesitli ya da ince dörtgenel tabaka olarak üretilen malzemenin titreşime zorlanmasıdır [5].

#### **7.1.8 Gözeneklilik ve geçirgenlik**

Açık hücre metalik malzemelerin iç yapılarıyla ilgili, spesifik yüzey alanı, hücre boyut dağılımı ve kanal boyut dağılımı gibi parametrelerin hesaplanması önemlidir. Bunun için cıva gözenekliliği, gaz emme teknikleri, geçirgenlik gibi bir takım teknikler kullanılmaktadır [5].

#### **7.1.9 Elektriksel ve ısı iletim ölçümleri**

Alüminyum Köpükler için ortalama 2 mm çapında gözenekler, 200 mm<sup>2</sup> kesitli ve 200 mm uzunlukta dikdörtgenel numuneler kullanılır. Ölçümler köpüğe kenetlenmiş bakır plaklarla yapılır [5].

#### **7.1.10 Diğer metotlar**

X-ışını ve nötron küçük açı yayma, dalga yayma spektrometresi, ultra ses sureti gibi yöntemlerle hücresel metaller karakterize edilebilir [5].

### **7.2 Tahribath Muayene**

#### **7.2.1 Optik suret analizi**

Hücresel metallerin hücre morfolojisi ve mikro yapıları çeşitli büyütmelemlerle optik gözlemlerle analiz edilebilir. Gerçek analiz tahribatsız olmakla birlikte

numune hazırlanması için genellikle kesme, gömme parlatma gibi işlemler gerektiği için pratikte tahribatlı muayene yöntemidir [5].

### **7.2.2 Mekanik testler**

Hücresele metallere herhangi bir yapısal uygulaması için mekanik testlerin yapılması ilk koşuldur [5].

### **7.2.3 Korozyon testi**

Hücresele metallere için mevcut korozyon test standardı yoktur. Genellikle otomotiv parçaları ile ilgili test standartları oluşturulmaktadır [5].

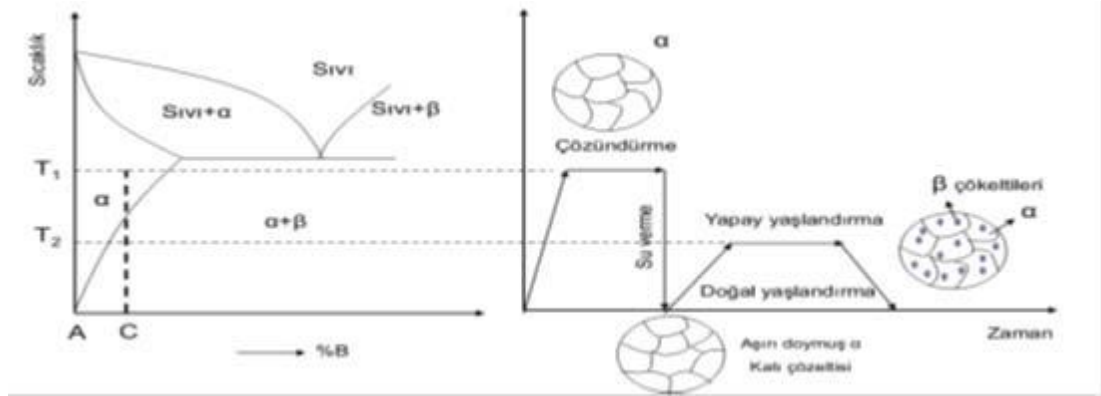




## 8. YAPAY YAŞLANDIRMA

Alüminyum alaşımlarına sertlik kazandırmak amacıyla ısıl işlem uygulanır. Bu ısıl işlem ile birlikte ikincil faz çökeltileri homojen ve ince bir şekilde matris içine çökerek sertlikte artış meydana getirir. Bu sertleştirme işlemine yaşlandırma işlemi (çökeltme sertleşmesi) denir. Bu işlemle malzemelerin mekanik, manyetik ve iletkenlik özellikleri değiştirilebilmektedir [50].

Yaşlandırma ısıl işlemi solvüs eğrisi içeren, sıcaklığın artması ile katı çözünürlüğün arttığı, sıcaklığın düşmesi ile katı çözünürlüğün düştüğü alaşım sistemlerine uygulanabilir[51]. Aşırı doymuş katı bir fazdan sıcaklık zaman etkisi ile yeni bir faz oluşur. Bu oluşumda dikkat edilecek nokta bu ikili, üçlü veya daha fazla fazın  $\beta$  şekli ile değil  $\beta$  fazı içine  $\alpha$  fazının hapsedilmesi ile oluşmasının gerekliliğidir. Bu durum katı hal reaksiyonları sayesinde gerçekleştirilir. Yaşlanma olayı da bir katı-hal reaksiyonudur [52]. Şekil 8.1’de çökeltme sertleşmesinin malzeme yapısına etkileri görülmektedir.



**Şekil 8.1:** Çökeltme sertleşmesinin malzeme yapısına etkileri [13]

Yaşlandırma (çökeltme sertleşmesi) işlemi ile malzemenin dayanımının artırılmasında ki ilk aşama çözeltili alma işlemidir. Çözeltili alma işleminin amacı yapı içerisindeki elementlerin katı eriyik içerisinde yüksek oranlarda çözünmesini sağlayarak homojen, aşırı doymuş tek fazlı bir katı çözelti elde etmektir [51].

Katı durumda kısmen, sıvı durumda ise her oranda karışabilen bir yapıya sahip alaşım tek fazlı  $\alpha$  yapısı elde etmek için faz diyagramının solvüs sıcaklığının üzerinde bir T1 sıcaklığına kadar ısıtılır. Yapı içerisindeki ikincil fazın matris içerisinde çözünmesi sağlanıncaya kadar T1 sıcaklığında bekletilir. Bu işleme solüsyona alma (çözeltiye alma) ısıl işlemi denir [54].

Çözeltiye alma sıcaklığı, alaşımın ergimeye uğramasına sebep olmayacak bir değerde seçilmelidir. Çözeltiye alma sıcaklığının malzeme yapısındaki çökeltilerin boyutuna, sayısına, morfolojilerine ve tane sınırlarına etki ettiği belirlenmiştir. Yani çözeltiye alma sıcaklığı, alaşımların nihai özelliklerine etki eder. Çözeltiye alma sıcaklığı arttığında akma ve çekme mukavemetlerinin arttığı, fakat sıcaklığın artmasıyla birlikte tane sınırlarında çökelti fazlarının oluştuğu ve bu sebeple gerilmeli korozyon direncinin düştüğü belirlenmiştir [13].

Çözeltiye alma işlemi takiben gerçekleştirilen su verme işlemi, alaşımın yayınmaya ve bu nedenle  $\beta$  fazının yeniden oluşmasına imkan vermeden yüksek bir hızla oda sıcaklığına ani olarak soğutulması işlemidir. Bu işlem sayesinde  $\beta$  atomları ile aşırı doymuş, kararsız  $\alpha$  katı çözeltisi oluşturulur. Su verme işlemi ile solüsyona alma işlemi sonucu meydana gelen aşırı doymuş katı eriyiğin hızla soğuma ile toparlanmasına izin vermeden oda sıcaklığına soğutularak korunması amaçlanmaktadır. Su verme işlemi uygulanmayan durumlarda kayma düzlemlerine çökelen katı eriyikler alaşımın şekil değiştirme kabiliyeti ile taneler arası korozyon dayanımında düşüş meydana gelmektedir. Su verme aralığı ve su verme ortamı hızlı soğutma işlemindeki en önemli parametrelerdir. Su verme aralığı 10-20 saniye gibi kısa sürelerde gerçekleştirilmelidir. Su verme işlemi ne kadar kısa sürede gerçekleşirse malzemenin mukavemeti de o oranda artacaktır [13].

Su verme metodu, malzemedeki istenilen özelliklere ve sağladıkları kolaylıklara göre üç farklı yöntem ile gerçekleştirilebilir [52].

Soğuk suda su verme işlemi: Alaşımlara soğuk su banyolarında su verilmesi işlemidir. Bu yöntemde su verme sıcaklığı en fazla 30 C olmalıdır.

Sıcak suda su verme işlemi: Büyük boyutlu ve kesiti kalın olan dökme parçalara 75-90 C, hatta 100 C'de kaynamış haldeki suda uygulanan bir işlemdir. Sıcak

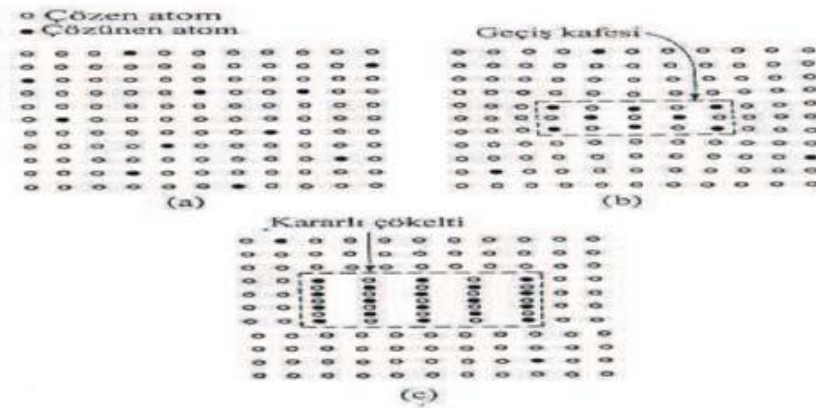


suda su verme ile distorsiyon en aza indirgenir ve eşit olmayan sıcaklık dağılımının neden olduğu çatlama tehlikesi önlenir. Sıcak su verme işleminde kullanılan su sıcaklığı malzemenin korozyon mukavemetini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle dövme alaşımlarında bu yöntem tercih edilir.

Püskürtülerek su verme işlemi: Genellikle geniş yüzeyli parçalar için uygulanan bir yöntemdir. Distorsiyonu minimum kılar ve su verme işlemi esnasında oluşan çatlakları önlemektedir.

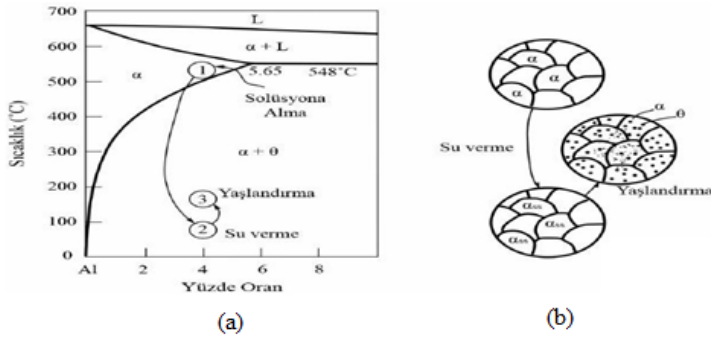
Su verme işleminde genellikle su tercih edilmektedir. Ancak suyun dışında suda çözünebilen polimerik yağlar veya madeni yağlar da kullanılmaktadır. Su verme ortamı olarak glikol-su karışımları da kullanılmaktadır [52].

Solüsyona alma ve su verme işlemlerinde sonraki aşama yaşlandırma işlemidir. Yaşlandırma, aşırı doymuş bir katı eriyiğe çözeltiye alma işlemi uygulanması ve akabinde oda sıcaklığında doğal yaşlandırma veya solvüs eğrisi altındaki bir sıcaklıkta suni yaşlandırma işlemi uygulanarak çökelmeye alınması işlemi olarak tanımlanabilir. Solüsyona alma (katı eriyiğe alma) işleminin ardından yapılan su verme işleminin sonunda malzeme henüz tam olarak istenilen sertlik ve dayanıma sahip değildir. Alaşımın maksimum sertlik ve dayanıma ulaşması için yaşlandırılma işlemi yapılmaktadır [56].



**Şekil 8.2:** Düzenli bir çökeltinin oluşma safhaları a)Aşırı doymuş katı çözelti  
b)Katı çözelti ile bağdaşık olan geçiş kafesi  
c)Katı çözeltiden bağımsız olan kararlı çökelti [57]

Yaşlandırma işleminde çökelen fazın kafes parametresi matristen farklıdır. Faz, matris yapısına bağdaşık olduğu için matris kafes yapısında distorsiyon meydana gelir. Yapıda meydana gelen distorsiyon, dislokasyon hareketini engelleyerek alaşımın sertlik ve dayanımını artırır [51]. Şekil 8.2’de yaşlandırma aşamasında malzeme yapısındaki çökelmeler görülmektedir. Şekil 8.3’te ise Al-Cu faz diyagramı, Al- % 4 Cu alaşımının solüsyona alma işlemi ile su verme ve yaşlandırma (çökeltme sertleşmesi) aşamalarında meydana gelen mikro yapı değişimleri şematik olarak verilmektedir.



**Şekil 8.3:** (a) Al-Cu faz diyagramı ve Al- % 4 Cu alaşımının solüsyona alma, (b) su verme ve yaşlandırma (çökeltme sertleşmesi) safhalarında mikro yapı değişimleri [56]

## 9. MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışmamız temel olarak iki aşamadan oluşmaktadır. İlk bölümde vakum döküm yöntemiyle alüminyum köpük üretilmiştir. İkinci bölümde ise üretilen alüminyum köpük malzemelere belirlenen parametreler ışığında yapay yaşlandırma işlemi uygulanmış ve malzemenin yapısındaki değişimler incelenmiştir.

### 9.1 Deneyleerde Kullanılan Malzemeler

Metal köpük malzeme Afyon Kocatepe Üniversitesinin döküm atölyesinde vakum döküm yöntemiyle üretilmiştir. Metal köpük üretimi için külçe olarak temin edilen Etial-160 ( $AlSi_8Cu_3Fe$ ) alaşımli alüminyum malzeme kullanılmıştır. Kullanılan alüminyum alaşımli malzemenin içeriği Tablo 9.1’de görölmektedir.

**Çizelge 9.1** Etial 160 malzemesinin içeriği

	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Tl	Pb	Sn
<b>Etial 160</b>	1,00	7,50- 9,00	3,00- 4,00	0,50	0,30	1,00	0,20	0,20	0,10	0,10

Köpük malzeme üretiminde gözenek oluşumunu sağlaması için boşluk tutucu malzeme olarak kaya tuzu kullanılmıştır. Kaya tuzu kayaç halinde temin edilmiştir ve kırma işlemi için ise çekiç kullanılmıştır. Şekil 9.1’de köpük malzeme üretiminde kullanılmış olan kaya tuzu görölmektedir.



**Şekil 9.1:** Kayaç olarak temin edilmiş olan kaya tuzu

Kaya tuzları çekiç yardımıyla daha küçük parçalara ayrıldıktan sonra 4,75 mm ve 2 mm ölçülerindeki eleklerden geçirilmiştir. Bu sayede +2 mm -4,75 mm ölçülerinde kaya tuzu parçaları elde edilmiştir. Şekil 9.2’de kaya tuzunu eleme işlemi sırasında kullanılmış olan elekler görülmektedir.



**Şekil 9.2:** Kaya tuzunu eleme kullanılan 4,75 mm ve 2 mm ölçüsündeki elekler

Metal köpük malzeme üretiminde kullanılan Şekil 9.3’teki kalıp ile boşluk tutucu malzeme olarak kullanılan kaya tuzu döküm sırasında alüminyum alaşım malzemenin oda sıcaklığından dolayı taneler arasında daha fazla ilerleyebilmesi için döküm işleminden önce ısıtılmıştır.



**Şekil 9.3: Kalıp**

Bu sebepten dolayı kaya tuzu Şekil 9.4'teki gibi Protherm (Şekil 9.5) marka ısıtıl işlem fırınında 610 °C sıcaklığa getirilmek üzere konulmuştur. Kabın içinde ısınan tuzun sıçrayıp fırına zarar vermemesi içinde kabın üzeri kapatılmıştır.



**Şekil 9.4: Tuzun fırına yerleştirilmesi**





**Şekil 9.5:** Kullanılan ısı işlem fırını

Kullanılacak olan kalıp ise Şekil 9.6 'da görüldüğü üzere LPG ile çalışmakta olan döküm fırınında sıcaklığı 440°C'ye ulaşana kadar ısıtılmıştır. Kalıp ısıtma işlemine başlamadan önce malzemenin kalıptan rahat bir şekilde çıkabilmesi için grafit ile yağlanmıştır. Kalıbın homojen bir şekilde ısınması için kalıp 2-3 dakikalık aralıklarla çevrilmiştir. Kalıbın sıcaklığı Optris marka lazerli termometre (Şekil 9.7) ile takip edilmiştir.



**Şekil 9.6:** Kalıbın döküm fırınında ısıtılması



**Şekil 9.7:** Kalıp sıcaklığının ölçümü

Tedarik edilen Etial 160 alüminyum külçeler ergitilmek için konulacak olan potaya rahat girebilmesi için Şekil 9.8’de ki gibi kestirilmiştir. Daha sonra 440 gr alüminyum alaşımlı malzemeler ergitilmek üzere Şekil 9.9’da ki gibi döküm potasına konulmuştur. Alüminyum alaşımlı malzemenin ergitme işlemi için Reterm marka indüksiyon ısıtma cihazı (Şekil 9.10) kullanılmıştır. Alüminyum malzeme, son döküm sıcaklığı olan 790 °C sıcaklığa ulaşınca kadar ısıtılmıştır.



**Şekil 9.8:** Kestirilmiş alüminyum malzemeler



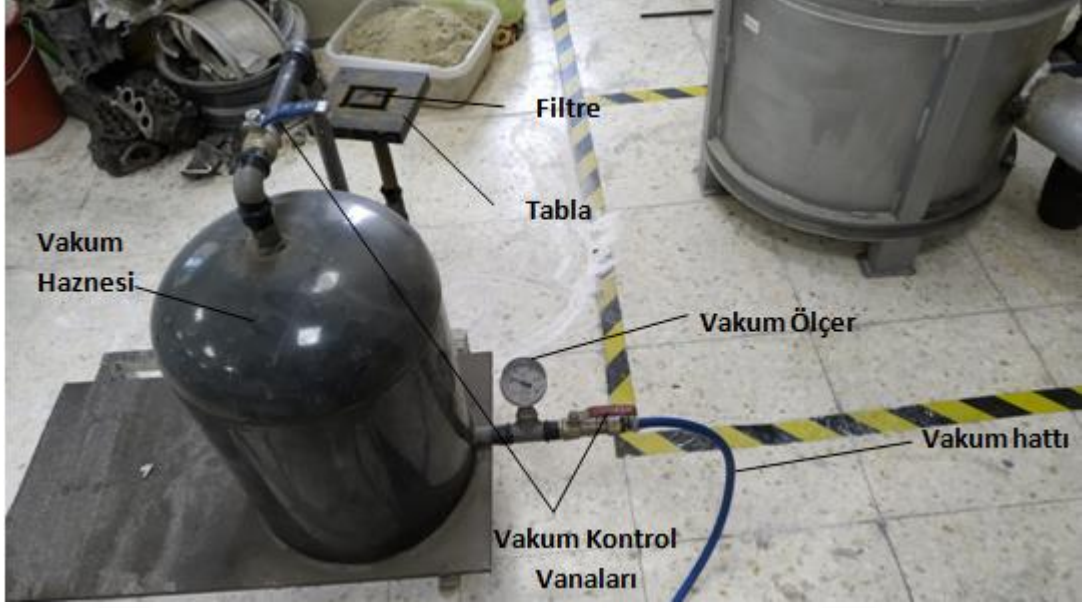
**Şekil 9.9:** Döküm potası



**Şekil 9.10:** İndüksiyon ısıtma cihazı

Metal köpük üretimi yapılırken tuzun ve kalıbın ısıtılması ile alüminyum alaşımlı malzemelerin ergitilme işlemleri eş zamanlı olarak yürütülmüştür. Bu esnada döküm işlemi sırasında kullanılan vakum döküm sistemi çalıştırılarak basıncının -0.8 bara ulaşması beklenmiştir. Vakum döküm sistemi (Şekil 9.11) temel olarak vakum pompası, vakum haznesi, vakum ölçer, kalıbın oturtulması için kullanılan tabla, filtre, kalıp ve döküm sırasında oluşan fazlalıkların toplanması için yapılmış olan haznedir. Şekil 9.12’de kalıbın yerleştirilmiş haliyle vakum döküm sistemi görülmektedir.





**Şekil 9.11:** Vakum döküm sisteminin elemanları



**Şekil 9.12:** Vakum döküm sistemi

Vakum döküm sisteminin basıncı  $-0.8$  bar değerine ulaştıktan sonra önce fırında ısıtılmış olan kaya tuzu kalıbın içerisine dökülmüştür. Hemen ardında indüksiyon fırınında ergitilmiş olan sıvı haldeki alüminyum alaşımlı malzeme kalıba dökülüp vakum vanaları açılarak sıvı alüminyum alaşımlı malzemenin tuz içinde hızlı bir şekilde ilerlemesi sağlanmış ve bu şekilde alüminyum köpük üretilmiştir. Bu işlemler daha sonra bir kez daha yapılmış ve toplamda iki adet alüminyum köpük malzeme üretilmiştir. Üretilen malzemelerin ilki 300 mm kalınlığında 200 mm uzunluğunda olup, ikincisi ise 30 mm kalınlığında 300 mm

uzunluğundadır. Üretilen alüminyum malzemelerin fotoğrafları Şekil 9.13'te görülmektedir. Daha sonra ise üretilmiş olan alüminyum malzemelerin üzerindeki kaya tuzunun çözülmesi için malzemeler suya çözülmesi için bırakılmıştır.



**Şekil 9.13:** Üretilen alüminyum köpük malzemeler

## **9.2 Yapay Yaşlandırma**

Alüminyum köpük malzemeler üretildikten sonra yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Yapay yaşlandırma işleminden önce malzemeler testere ile 40mmx40mmx30mm boyutlarında kesilmiştir. Kesme işleminden sonra malzemeler yaşlandırma işleminin ilk aşaması olan çözeltiye alma işlemine tabi tutulmuştur. Çözeltiye alma işlemi için Protherm marka ısıtma fırını (Şekil 9.14) kullanılmıştır. Numunelere 30 dakika boyunca 500 °C ısıtma işlemi uygulanmış (Şekil 9.15) daha sonra ise malzemeler suda soğutulmuştur.



**Şekil 9.14:** Isıl işlem fırını



**Şekil 9.15:** Çözeltiyeye alma işlemi

Çözeltiyeye alma işlemi tamamlandıktan sonra numuneler üç gruba ayrılmış ve her grup malzemeye 10 saat süreyle 120°C, 170°C ve 220°C’lerde ısıl işlem uygulanmıştır. Isıl işlem uygulandıktan malzemeler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ve böylece yapay yaşlandırma işlemi tamamlanmıştır. Şekil 9.16’da yapay yaşlandırma işlemi ve kullanılan Drying Oven marka ısıl işlem fırını görülmektedir.



**Şekil 9.16:** Yapay yaşlandırma işlemi ve kullanılan fırın

### **9.3 Numunelerin Tanıtımı ve Deneylerin Yapılması**

Metal köpük malzemelerin üretim ve kesim işlemi bittikten sonra, numunelere basma deneyi yapılmış ve yüzey fotoğrafları çekilmiştir. Bu kapsamda numuneler aşağıdaki gibi isimlendirilmiştir;

A1 Numunesi: Herhangi bir işlem uygulanmamıştır.

A2 Numunesi: Sadece 30 dakika 500°C’de çözeltilme işlemi uygulanmıştır.

A3 Numunesi: 30 dakika 500°C’de çözeltilme işlemi + 10 saat 120°C’de yapay yaşlandırma uygulanmıştır.

A4 Numunesi: 30 dakika 500°C’de çözeltilme işlemi + 10 saat 170°C’de yapay yaşlandırma uygulanmıştır.

A5 Numunesi: 30 dakika 500°C’de çözeltilme işlemi + 10 saat 220°C’de yapay yaşlandırma uygulanmıştır.

### **9.4 Numunelere Basma Deneyinin Uygulanması**

Basma deneyi, deney numunesi olarak hazırlanan malzemenin belirlenmiş eksen boyunca, sabit bir hız altında ve malzeme deforme oluncaya kadar kuvvet uygulanarak yapılan basma işlemidir. Basma deneyi yapılırken uygulanan kuvvetin malzeme kesitinde oluşturmuş olduğu kuvvet ise basma gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. Basma gerilmesinin formülü aşağıdaki gibidir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad F = \text{Basma Kuvveti(N)} \quad A = \text{Alan(mm}^2\text{)} \quad \sigma = \text{Basma Gerilmesi(N/mm}^2\text{)}$$

Numunelere basma deneyleri Şekil 9.17'deki 600 kN kapasitesine sahip Zwick/Roell Z600 marka Basma test cihazında 2 mm/dakika ilerleme hızında yapılmıştır. Basma deneyi yapılırken numunelere ait parametre Tablo 9.2'deki gibidir.



Şekil 9.17: Zwick/Roell Z600 basma deneyi test cihazı

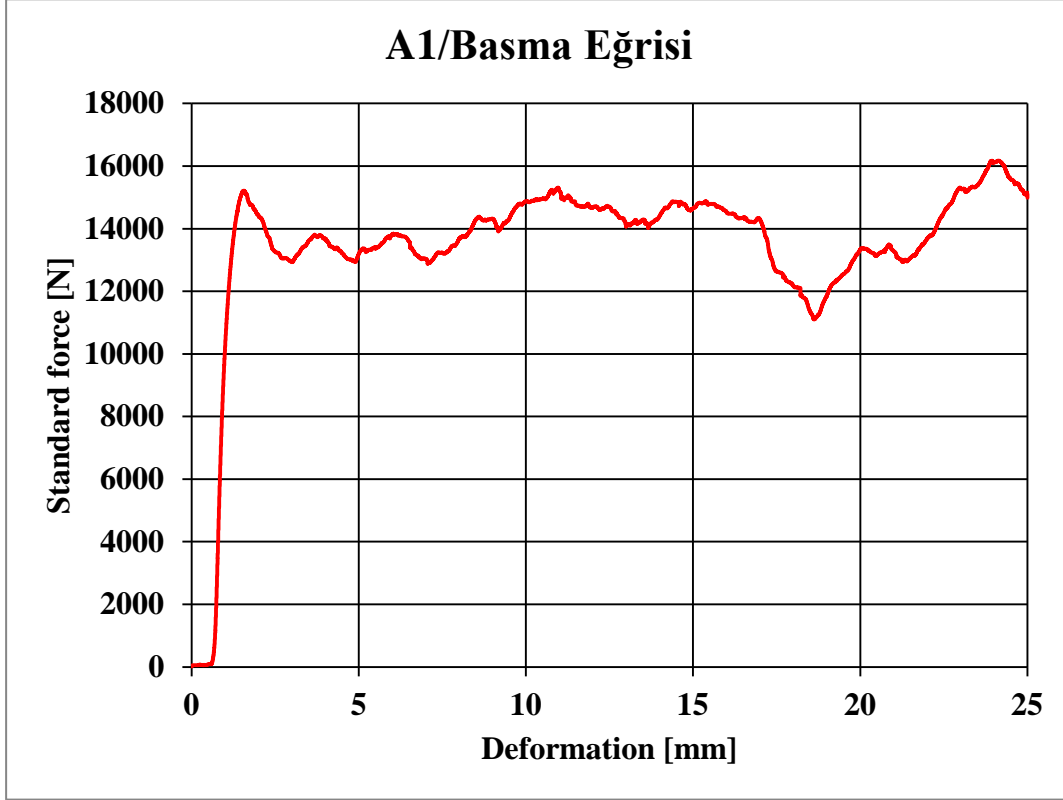
Çizelge 9.2: Basma deneyinde kullanılan parametreler

Numune	$h_0/mm$	$F_{x2}/N$	$F_{max}/N$	$dL$ $F_{max}/mm$	$at$	$W$ $F_{max}/Nmm$	$t_0$	$a_0/m$	$b_0/mm$	$S_0/mm^2$
A1	44, 86	7775,59 791	16177, 62	24,15257		323454,8		29, 84	40, 12	1197,1 81
A2	44, 86	2735,62 532	28006, 86	18,96525		444538,7		29, 86	40, 46	1208,1 36
A3	44, 86	8930,55 612	29418, 13	2,254925		32525,01		29, 8	40, 34	1202,1 32
A4	44, 86	13823,2 011	50399, 56	4,661547		169595,1		29, 76	42, 24	1257,0 62
A5	44, 86	11201,9 279	34396, 85	3,332592		74657,19		29, 84	40, 1	1196,5 84

$h_0$ =Numunenin ilk boyu       $F_{x2}$ =Numunenin akma kuvveti

$dL$  at  $F_{max}$ = Basma sonucu       $F_{max}$ =Uygulanan maksimum kuvvet

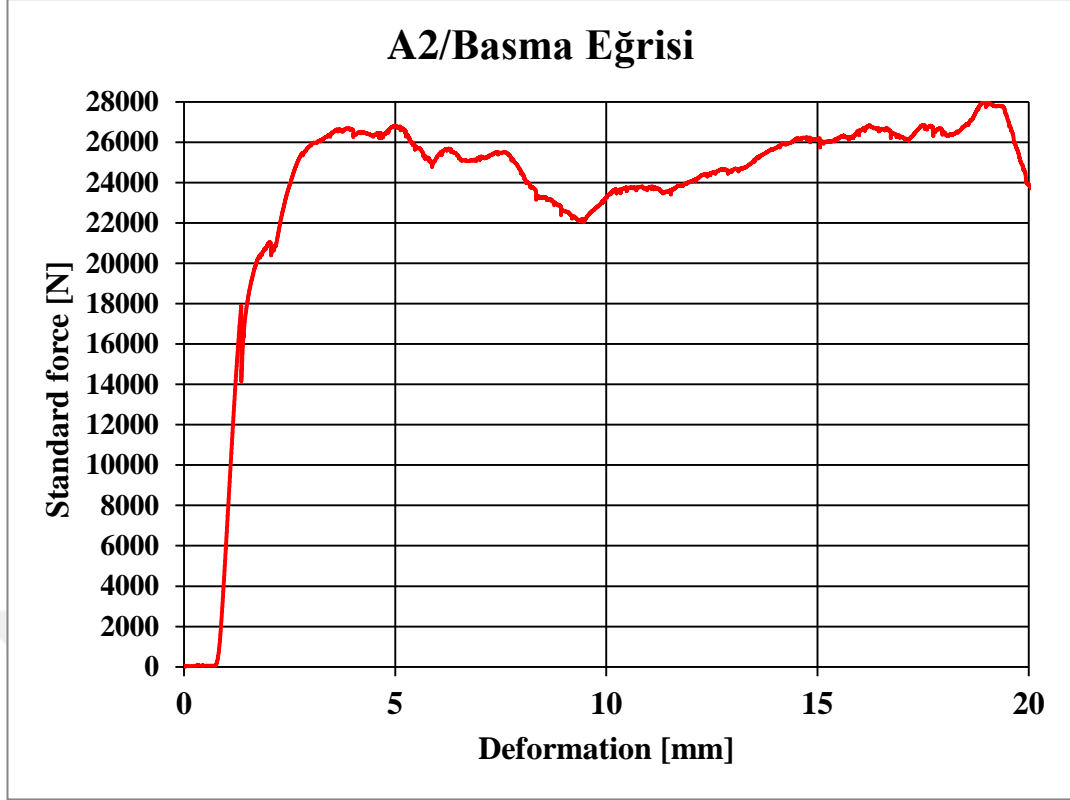
$a_0$ =Numune malzemenin genişliği       $S_0$  = Numune malzemenin kesit alanı



Şekil 9.18: A1 Numunesinin basma eğrisi

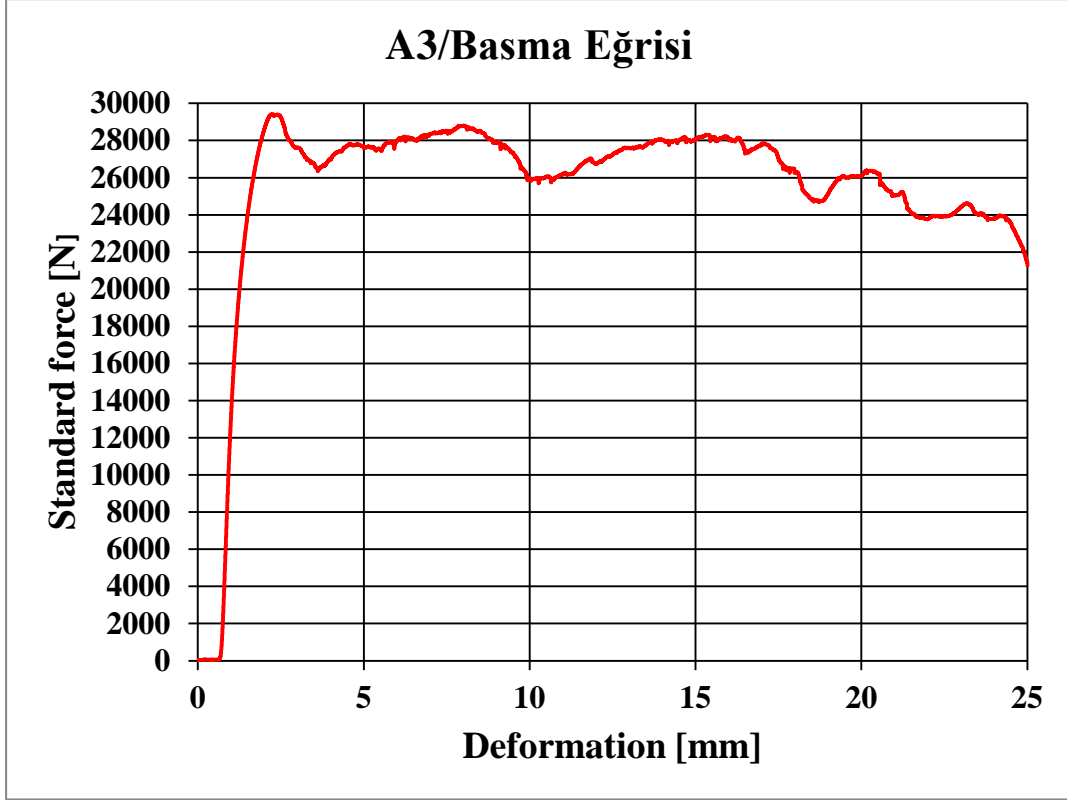
Şekil 9.18’de herhangi bir yaşlandırma işlemine tabi tutulmamış olan A1 numunesinin basma eğrisi görülmektedir. Numune yaklaşık 15 kN’a kadar bir mukavemet göstermiş ve bunu takiben yaklaşık %80 deformasyona uğrayana kadarda 11 000 N ile 16 000 N aralığında değişken bir mukavemet göstermiştir. Eğriden de anlaşılacağı gibi numune süneklik özellik göstermiştir.





Şekil 9.19: A2 Numunesinin basma eğrisi

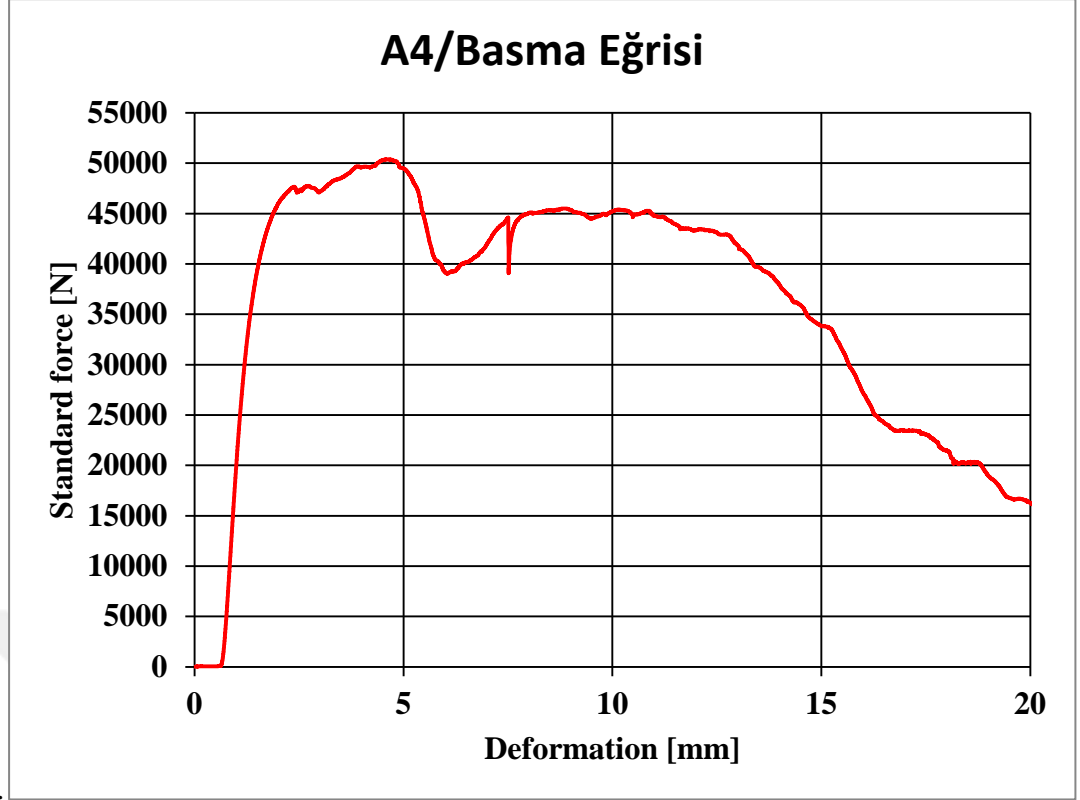
Şekil 9.19'da ki grafikte 500°C'de yarım saat boyunca çözeltiliye alma işlemi uygulanmış olan A2 numunesinin basma eğrisi görülmektedir. Numune burada çökeltmenin başlangıcında çökelti boyutu çok küçük olduğundan dolayı dislokasyon hareketleri çok az etkilenmiştir. Mukavemet yaklaşık 27 kN'a kadar çıkmıştır. A1 numunesiyle kıyaslandığında hem mukavemeti hem de tokluğunun arttığı görülmektedir.



**Şekil 9.20:** A3 Numunesinin basma eğrisi

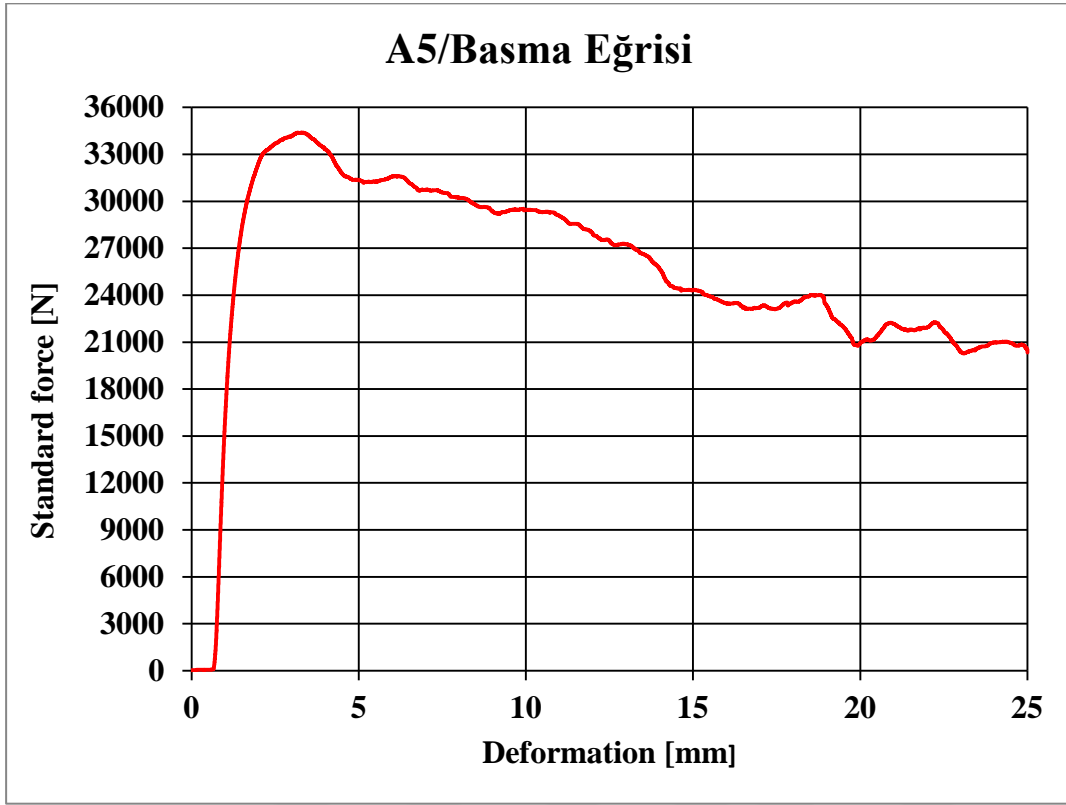
Şekil 9.20’de görülen grafikte A3 numunesinin basma eğrisi görülmektedir. A3 numunesine 500°C’de çözeltiye alma işlemi uygulandıktan sonra sıcaklığı oda sıcaklığına kadar suda soğutulmuş ve 10 saat boyunca 120°C’de ısıtılarak işlem uygulanmış ve hava ortamında soğutularak yapay yaşlandırma uygulanmıştır. Eğri A1 ve A2 numuneleriyle kıyaslandığında çökeltmenin hem boyutu hem de sayısı arttığından mukavemeti ve tokluğu daha fazla artmıştır. Mukavemet 29 kN'a kadar çıkmıştır.





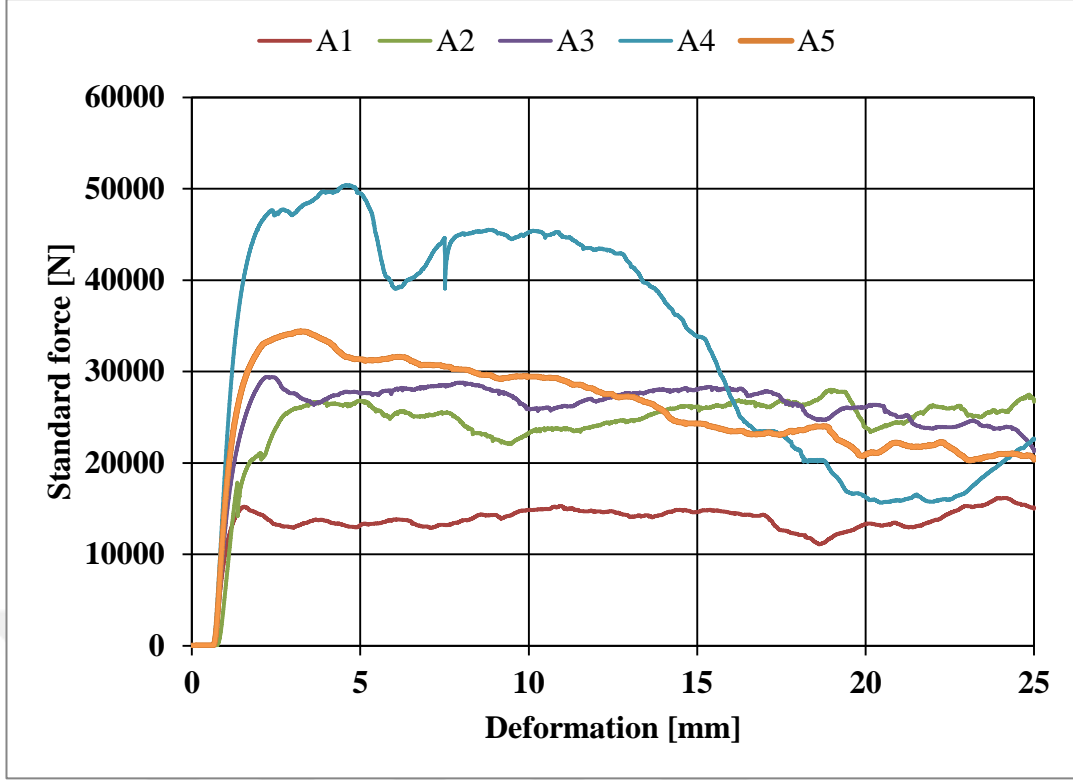
Şekil 9.21: A4 Numunesinin basma eğrisi

Şekil 9.21’de A4 numunesinin basma eğrisi görülmektedir. A4 numunesine 500°C’de çözeltiye alma işlemi uygulandıktan sonra sıcaklığı oda sıcaklığına kadar suda soğutulmuş ve 10 saat boyunca 170°C’de ısıtılarak yapay yaşlandırma uygulanmıştır. A4 numunesine ait eğri A1, A2 ve A3 numunelerinin eğrileriyle kıyaslandığında en yüksek mukavemetin A4 eğrisine ait olduğu görülmektedir. Çökme bu sıcaklıkta daha fazla olduğundan mukavemet artışı 50 kN'a kadar yükselmiştir. Burada çökeltelerin hem boyu hem de sayısı arttığı için dislokasyon zorlaşmış dolayısıyla malzemenin mukavemeti yükselmiştir. Yaşlanma sıcaklığı maksimum mukavemet değerine burada ulaşmıştır. A1 numunesi ile kıyaslandığında mukavemet yaklaşık 3 kat artmıştır. Fakat tokluk azalmıştır.



**Şekil 9.22:** A5 Numunesinin basma eğrisi

Şekil 9.22’de ise A5 numunesinin basma eğrisi görülmektedir. A5 numunesine ise 500°C’de çözeltiye alma işlemi uygulandıktan sonra sıcaklığı oda sıcaklığına kadar suda soğutulmuş ve 10 saat boyunca 220°C’de ısıtılma işlemi uygulandıktan sonra hava ortamında soğutulmuştur. A4 numunesi ile kıyaslandığında mukavemeti ve tokluğu düşmüştür. Ama A1 numunesi ile kıyaslandığında hem mukavemeti hem de tokluğu artmıştır. Yapay yaşlandırma işleminin uygulanmasıyla çökme oluşumu artarak mukavemet etkisi kazanmıştır



**Şekil 9.23:** Bütün numunelerin basma eğrisi

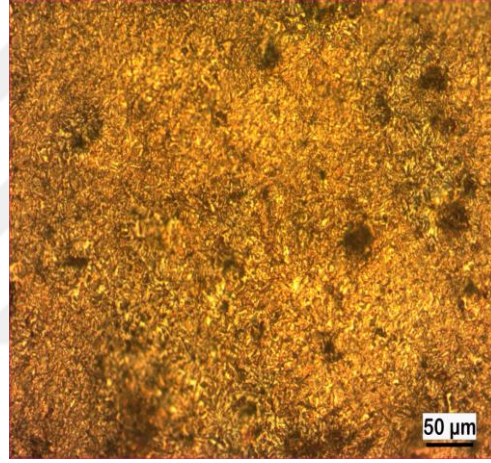
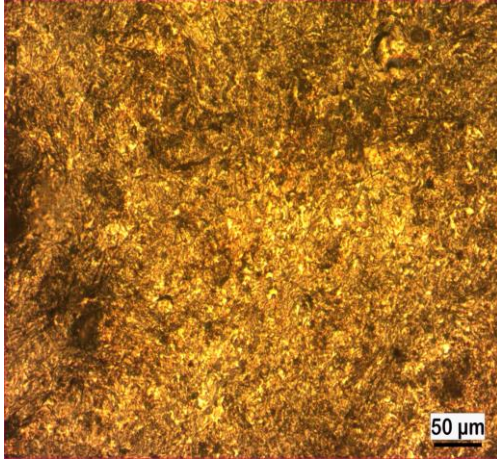
Şekil 9.23’de bütün numunelerin basma eğrileri birlikte görülmektedir. Yapılan incelemelerde yapay yaşlandırma işlemi uygulandığında mukavemet ve tokluk artışı hiçbir işlem yapılmayan A1 numunesine göre A2, A3, A4 ve A5’de artış gerçekleşmiştir. Sıcaklığın artması çökelti artmasını sağlamış, bu da dislokasyonların kaymasını engelleyerek mukavemet artışını sağlamıştır. Yaşlandırma sıcaklığı değiştirilerek işlemler yapıldığından en iyi yaşlandırma sıcaklığının A4 numunesine ait olan  $500^{\circ}\text{C}+170^{\circ}\text{C}$  olduğu görülmüştür. Yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerde sıcaklık artmasıyla A1 numunesi ile kıyaslandığında tokluk artmakta, fakat A4 numunesi ile A5 kıyaslandığında A5 numunesinde tokluk bir miktar düşmektedir.

### 9.5 Yüzey Fotoğraflarının İncelenmesi

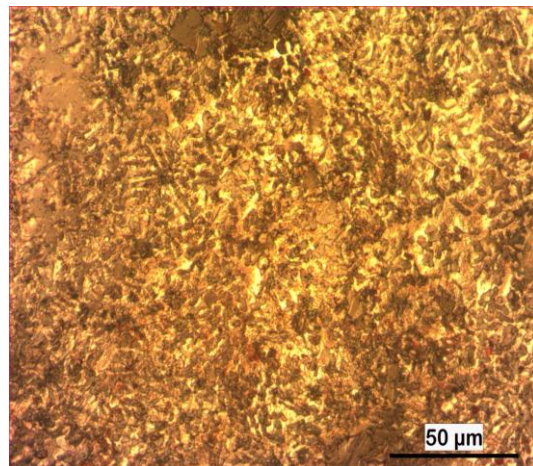
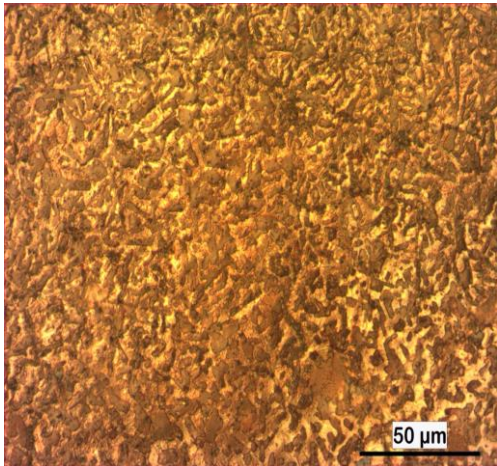
Numunelerin yüzey fotoğrafları Şekil 9.23’deki 50X,100X,200X,500X,100X görüntüleme kapasitesine sahip Nikon marka ters metalürjik mikroskopla çekilmiştir. Köpük malzeme döküldükten sonra 40x40x30mm boyutlarında testereyle kesildikten inceleme için hazır hale getirilmiştir.



**Şekil 9.24:** Yüzey fotoğraflarının çekildiği mikroskop



**Şekil 9.25:** A1 Numunesinin 200 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları

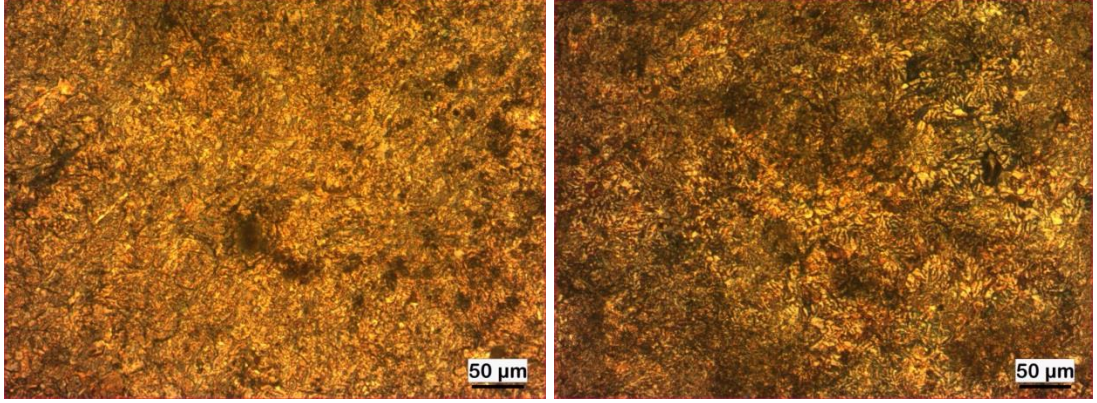


**Şekil 9.26:** A1 Numunesinin 500 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları

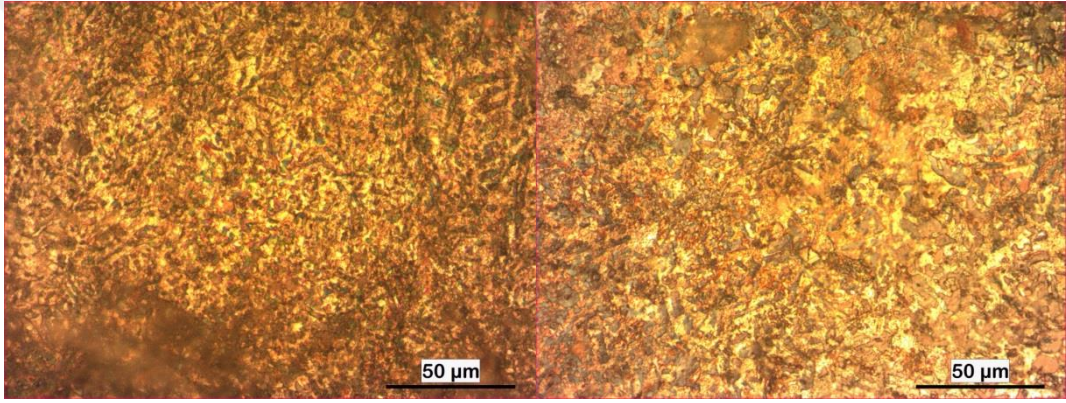
Şekil 9.25 ve 9.26' da görüldüğü gibi herhangi bir işleme tabi tutulmamış köpük malzemenin hücre duvarları diğer numunelerle kıyaslandığı zaman daha kalın



ve yoğun olduğu görülmüştür. Bu durum tipik bir alüminyum alaşımli köpük malzemenin özelliğini göstermektedir.



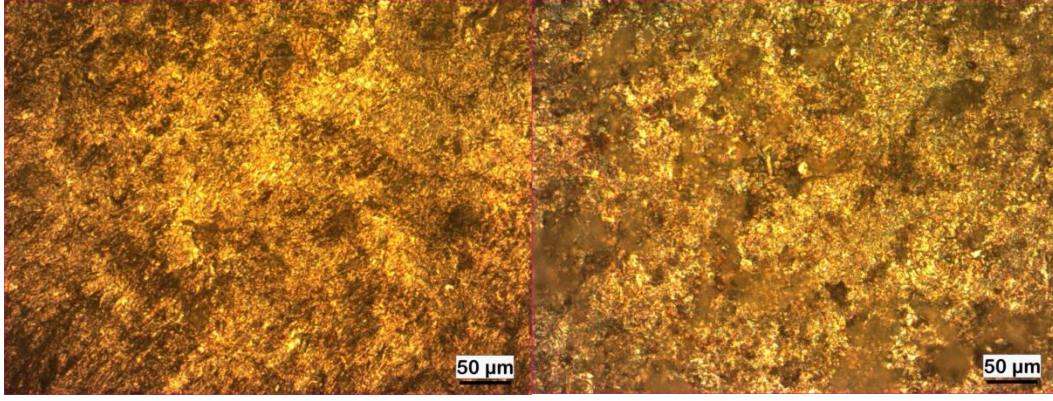
**Şekil 9.27:** A2 Numunesinin 200 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları



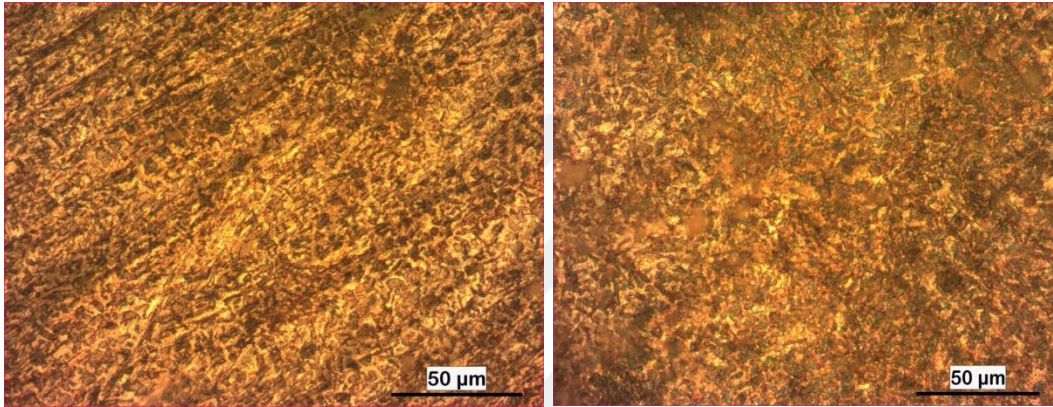
**Şekil 9.28:** A2 Numunesinin 500 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları

Şekil 9.27 ve 9.28’de görüldüğü gibi A2 numunesinin hücre duvarlarında bozulmalar ve incelmeler meydana gelmeye başlamıştır. Bunun sebebi A2 numunesine 500°C’de çözeltiye alma işleminin uygulanmasıyla çözeltin tek fazlı yapıya sahip olmasının etkili olduğu düşünölmüştür.



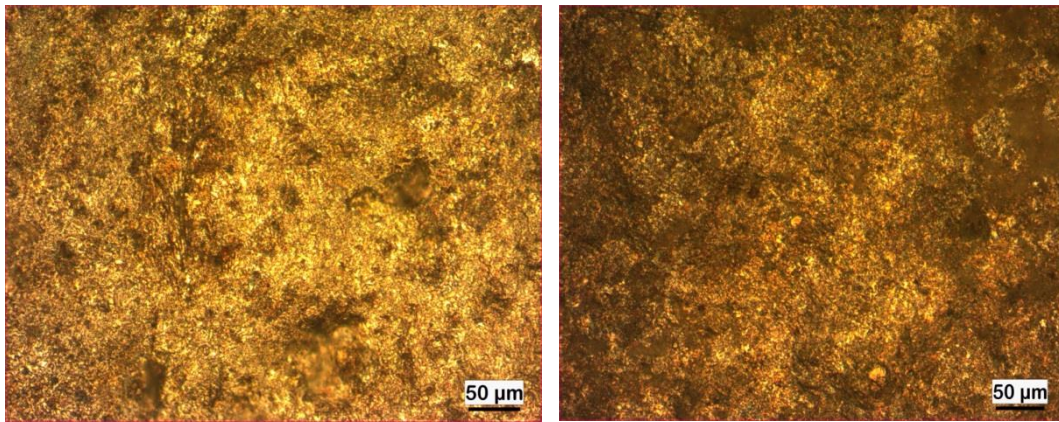


**Şekil 9.29:** A3 Numunesinin 200 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları



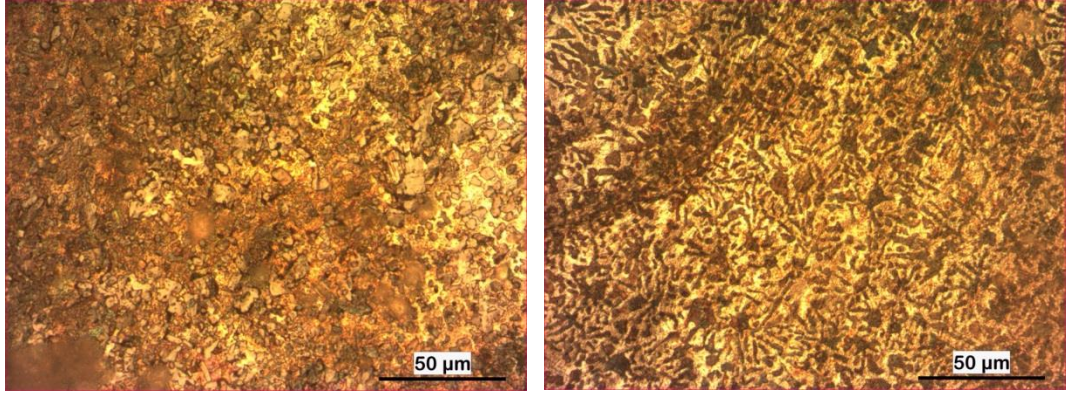
**Şekil 9.30:** A3 Numunesinin 500 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları

Şekil 9.29 ve 9.30'da A3 numunesinin yüzey fotoğraflarına bakıldığında gözeneklerin küçülmüş olduğu ve hücre duvarlarının A2 numunesi ile kıyaslandığında daha düzensiz bir yapı sergilediği görülmektedir. Bunun nedeni olarakta numuneye 120°C'de 10 saat süreyle yapay yaşlandırma işleminin uygulanmasıyla numunenin yapısında dislokasyonların oluşmaya başlamasıdır.



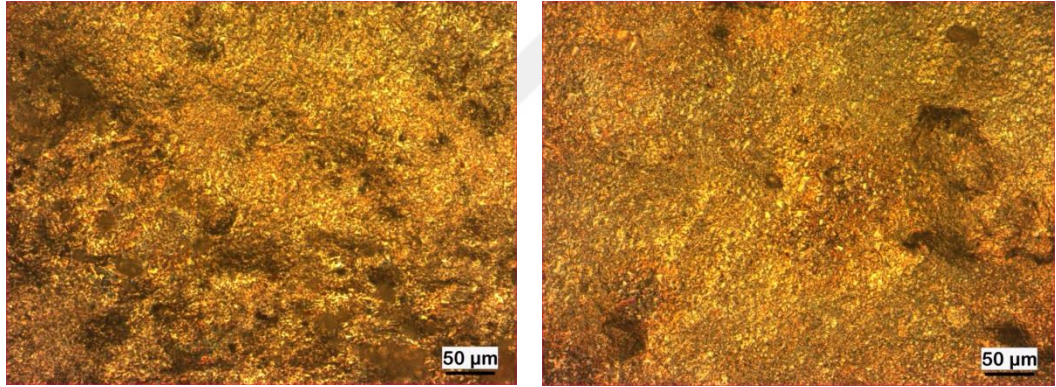
**Şekil 9.31:** A4 Numunesinin 200 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları



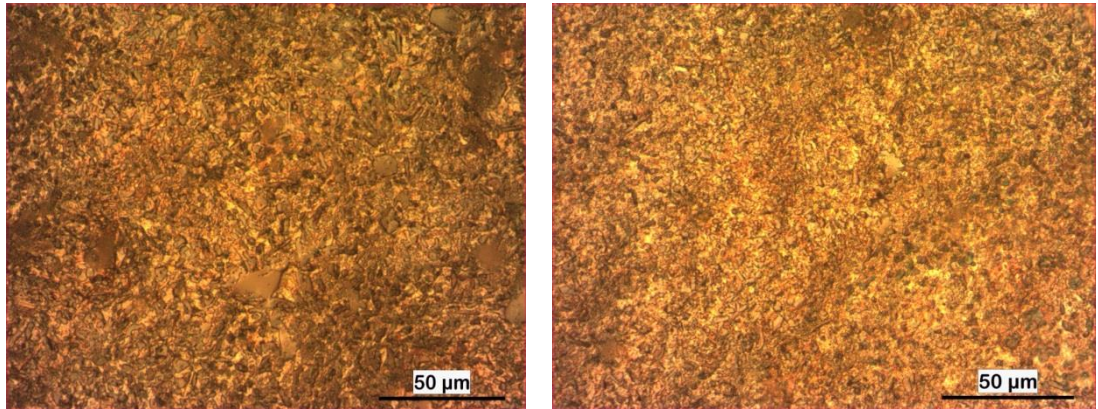


**Şekil 9.32:** A4 Numunesinin 500 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları

Şekil 9.31 ve 9.32’de A4 numunesinin yüzey fotoğrafları bulunmaktadır. Bunlar incelendiğinde A1,A2 ve A3 numunelerine göre hücre duvarları belirgin bir şekilde bozulduğu görülmüştür. Bunun nedeni bu numuneye çözeltiye alma işlemi uygulandıktan sonra 170°C’de 10 saat süreyle yapay yaşlandırma işleminin uygulanmasıdır. Sıcaklığın artırılmasının hücre duvarlarında kırılmalara ve bununla numunedeki gözeneklere etki ettiği görülmüştür.



**Şekil 9.33:** A5 Numunesinin 200 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları



**Şekil 9.34:** A5 Numunesinin 500 kat büyütülmüş yüzey fotoğrafları

Şekil 9.33 ve 9.34'deki A5 numunesinin yüzey fotoğrafları incelendiğinde uygulanan yüksek sıcaklığın numunenin bazı bölgelerinde hücre duvarlarını tamamen ortadan kaldırdığı gözlemlenmiştir. A4 numunesi ile kıyaslandığında A5 numunesinin daha fazla deformasyona uğradığı bununda gözenek yapısını bozduğu ve dayanımının azalttığı tespit edilmiştir.





## 10. SONUÇLAR

Vakum döküm yöntemiyle Alüminyum köpük malzeme üretilmiştir. Alüminyum alaşım olarak Etial-160 ( $AlSi_8Cu_3Fe$ ) ve boşluk tutucu malzeme olarak ta kaya tuzu ( $NaCl$ ) kullanılarak açık hücreli köpük üretilmiştir. Kullanılan  $NaCl$ 'nin tane boyutu +2 mm,-4,75 mm seçilmiştir. Daha küçük tane boyutundaki tuzlar vakum döküm sistemindeki kompresörün tıkanmasına neden olacağı için tercih edilmemiştir. Ergimiş metalin kalıptan daha rahat akabilmesi ve sıyrılabilmesi için kalıp grafitle yağlanıp fırında ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Kalıptan çıkartılan köpük testereyle 40 mm x 40 mm x 30mm boyutlarında kesilerek incelemeler için numuneler hazır hale getirilmiştir.

Hazırlanan numunelerden A1 olarak adlandırılan numune herhangi bir işleme tabi tutulmayıp referans numune olarak kullanıldı. A2, A3, A4 ve A5 numunesi ise 500°C'de 30 dakika süreyle çözeltiyeye alma işlemi uygulanmıştır. A3, A4 ve A5 numunesine sırasıyla 120 °C, 170 °C ve 220 °C'de 10 saat süreyle yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.

Yapay yaşlandırma işlemi uygulandıktan sonra numunelerin mikroyapı fotoğrafı çekilmiş ve ardından basma deneyi uygulanmıştır.

Elde edilen köpüklerin yüzey fotoğrafları incelendiğinde herhangi bir işleme tutulmayan numune düzenli bir deformasyon davranışı göstermiştir. Yapay yaşlandırma işlemine tabii tutulan numunelerin hücre duvarlarında sıcaklıklar arttıkça deformasyonların daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Bu da numunenin mukavemetini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Yapılan incelemelerde yapay yaşlandırma işlemi uygulandığında mukavemet ve tokluk artışı hiçbir işlem yapılmayan A1 numunesine göre A2, A3, A4 ve A5'de artış gerçekleşmiştir. Sıcaklığın artması çökelti artmasını sağlamış, bu da dislokasyonların kaymasını engelleyerek mukavemet artışını sağlamıştır. Yaşlandırma sıcaklığı değiştirilerek işlemler yapıldığından en iyi yaşlandırma sıcaklığının A4 numunesine ait olan 500°C+170°C olduğu görülmüştür.

Yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerde sıcaklık artmasıyla A1 numunesi ile kıyaslandığında tokluk artmakta, fakat A4 numunesi ile A5 kıyaslandığında A5 numunesinde tokluk bir miktar düşmektedir



## KAYNAKLAR

- [1] **Sığırtmaç, T.** (2010). Metal Köpük Malzemelerin Üretim Sonrası Kesme ve Birleştirme İşlemlerin Deneysel Verilerden Yararlanarak Modellenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- [2] **Güven, Ş. Y.** (2011). Toz Metalürjisi ve Metalik Köpükler, *SDÜ Teknik Bilimler Dergisi*, Cilt 1 Sayı:2, Isparta,Sf.22-28
- [3] **Mutlu, İ.** (2011). AlZn5.5MgCu /SiCp Köpük Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Isıl İşlemin Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi,
- [4] **Yıldırım, Ş.** (2010). Parçacık Takviyeli Alüminyum Köpük Metalinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- [5] **Çağlar, S. İ.** (2009). Alüminyum Esaslı Kompozit Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- [6] **Banhart, J. ve Weaire, D.** (2002). On The Road Again: Metal Foams Find Favor, *Physics Today*.
- [7] **Ashby, M.F. , Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., and WadleyH.N.G.** (2000), *Metal foams: a design guide*, Butterworth-Heinemann publication, 251 p.
- [8] **Banhart, J.**, (2001), Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*, 46, 559-632.
- [9] **Prakash, O., Sang, H., Embury, J. D.**, (1995), “Structure and Properties Al-SiC foam”, *Materials Science and Engineering*, A199, 195-203.
- [10] **Babcsan, N., Banhart, J. and Leitmeier, D.**, (2003), Metal foams-manufacture and physics of foaming, *International Conference Advanced Metallic Materials*, Slovakia, 5-15.
- [11] **Yavuz, İ.**, (2012). Taşıtlarda Kullanılan Metal Köpüklerin Yapısal Özelliklerinin İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- [12] **Neville, B.P., Rabiei, A.**, (2008). “Composite metal foams processed through powder metallurgy”, *Materials and Design*, 1-9
- [13] **Patır, A.**, (2014). AA 2024- B4C Kompozitlerin Özelliklerine Yaşlandırma Parametrelerinin Etkisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111s, Trabzon.
- [14] **Aydın, H.**, (2008). “Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş yaşlandırılabilir alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin ve korozyon davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 5-6
- [15] **Şendeniz, M.**, (2006). “Seçilen bir Al-Mg-Si alaşımının (AlMgSi0.5; etial 60) ısıl işlemlerle özellik değişimlerinin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 3.

- [16] **Amjad, S.**, (2001). “Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams”, Adissertation submitted for the degree of Master of Philosophy in Materials Modelling at the University of Cambridge, 3-7.
- [17] **Gökmen, U.** (2009). Toz Metalurjisi Yöntem İle Al Esaslı Parçacık Takviyeli Metalik Köpük Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [18] **Akbaba, B.**, (2016). Alüminyum Köpüklerde İki Boyutlu Sıcaklık Dağılımının Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- [19] **Jiang, B., Zhao, N.Q., Shi, C.S., Du, X.W., Li, J.J. and Man, H.C.** (2005). A Novel Method Making Open Cell Aluminium Foams by Powder Sintering Process, *Journal of Materials Letters*, 59, 3333-3336.
- [20] **Uzun, A.**, (2009). TM Yöntemi ile Alüminyum Esaslı Küresel Şekli Metalik Köpük Üretimi ve Üretim Parametrelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara
- [21] **Losito, O.**, (2008). An analytical characterization of metal foams for shielding applications, *Progress In Electromagnetics Research Symposium*, Cambridge, USA.
- [22] **Degischer, H. P., Kristz, B.**, (2002). *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 3-527-60055-8, 315-319.
- [23] **E. Andrews, W. Sanders, L.J. Gibson.**, (1999). Compressive and tensile behaviour of aluminum foams, *Materials Science and Engineering*, 113–124.
- [24] **Oka, S. H.**, (2009). Alüminyum Köpük Metalinin Farklı Yükleme Koşullarındaki Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Matematik Modellemesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- [25] **Wadley, H.N.G.**, (2002), Cellular Metal Manufacturing , *Advanced Engineering Materials*, 4, 726-733.
- [26] **Banhart, J.**, (2000), Manufacturing routes for metallic foams, *Jom-Journal of the Minerals Metals & Materials Society*, 52 (12),22-27.
- [27] **O’Neill, A.T.**, (2004), Development of closed cell metallic foam using casting techniques, M.S.thesis, North Carolina State University, 86 p.
- [28] **Çinici, H.**, (2004), Toz metalürjisi yöntemi ile alüminyum esaslı metalik köpük üretimi, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi
- [29] **Song, Z., Zhu, J., Ma, L., He, D.**, (2001), “Evolution of Foamed Aluminium Structure in Foaming Process”, *Materials Science And Engineering*, A298,137–143
- [30] **Song, Z., Nutt, S.R.**, (2007), “Rheology of Foaming Aluminum Melts” ,*Materials Science and Engineering*, A 458, 108–115
- [31] **Banhart, J.**, (2003), “Aluminium Foams: On the Road to Real Applications”, *MrsBulletin*, 290-295
- [32] **Şahin, A.**, (2011). Kompozit Metal Köpük Malzemelerin Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Kesme Mukavemetinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- [33] **Kalkan, Y.** (2012). Vakum Döküm Yöntemiyle Açık Gözenekli Alüminyum Köpük Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.
- [34] **Banhart, J.** (2000).Properties and Applications of Cast Aluminum Sponges. *Advanced Engineering Materials*, 4:188-191.

- [35] Haydn, N. , Wadley G., (2002), “Cellular Metals Manufacturing”, *Advanced Engineering Materials*, (10):726-733.
- [36] Karakoç, H. (2012). Sıcak Presleme Yöntemiyle Alüminyum Esaslı Metal Köpük Malzeme Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [37] Kennedy, A. R., (2002). “The Effect of TiH<sub>2</sub> Heat Treatment on Gas Release and Foaming Al- TiH<sub>2</sub> Preforms”, *Scripta Materilia*, 47:763-767
- [38] Banhart, J., (2004). "Industrialisation of Aluminium Foam Technology", *Proceedings of the 9th International Conference on Aluminium Alloys*, 764-770
- [39] Stöbener, K., Baumeister , J., Lehnhus, D., Stanzick, H., Zöllmer, V., (2003). “Composites based on metallic foams: phenomenology, production, properties and principles”, *International Conference Advanced Metallic Materials*, Smolenice, Slovakia, 281-286
- [40] Zaman, E., (2011). Açık Hücreli Alüminyum Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [41] Gergely, V., Degischer, H.P., Clyne, T.W., (2000). Recycling of MMCs and production of metallic foams. *Comprehensive Composite Materials* 3: 797- 820.
- [42] Banhart, J. (2000). Metallic foams: challenges and opportunities, *Errofoam 2000*, 13-20
- [43] Bor, Ş., Tahran, E., Esen, Z. ve Kotan, G., (2007), Toz metalurjisi yöntemiyle köpüksü saf titanyum ve Ti6Al4V alaşım üretimi ve karakterizasyonu, Tübitak projesi, 104M121,134.
- [44] Avarisli, O. ve Uğuz, A. (2003). Metalik köpük malzemelerin otomotiv endüstrisinde kullanılması, *VIII. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu*, Bursa
- [45] Simancik, F., Degischer, H.P. and Wörz, H. (1995). Foamed aluminium-light, structural and insulation material, *Euromat 95*, Italia.
- [46] Curran, D. C., (2003), Aluminium foam production using calcium carbonate as a foaming agent, Doctoral thesis, University of Cambridge, 176. (unpublished).
- [47] Tunçer, N., (2006), Metalik köpük malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- [48] Yılmaz, S., Güden, M., ve Elbir, S., (2001), Kompozit alüminyum köpük malzemesinin hazırlanması ve mekanik özelliklerinin karakterizasyonu, Tübitak projesi, Misag-135,51.
- [49] Banhart, J., Seeliger, H., (2008) “Aluminium foam sandwich panels: manufacture,metallurgy and applications”, *Advanced Engineering Materials*, 9: 793-802
- [50] Sun, Y., (1998). “Yaşlanabilir Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları”, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [51] Delikanlı, Y. E., (2011). Alüminyum Alaşımlarında Çökeltme Sertleşmesinin Mekanik Özelliklere Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 69s, Isparta.
- [52] Onur, A., (2014). AA6XXX Serisi Alüminyum Alaşımlarının Yaşlandırma İşlemine Bağlı Olarak İşlenebilirliğinin İncelenmesi, Bilecik Şeyh

- Edebali Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 3-5s, Bilecik.
- [53] **Patır, A.**, (2014). AA 2024- B4C Kompozitlerin Özelliklerine Yaşlandırma Parametrelerinin Etkisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111s, Trabzon.
- [54] **Tufan, M.**, (2011)“AA6082 alüminyum alaşımlarında yaşlandırma ısı işleminin işlenebilirliğe ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [55] **Yaman, K.**, (2004)“Etial-145 alaşımının dökümünde ultrason uygulamalarının etkilerinin incelenmesi ve klasik dökümle karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, 8: 23-26.
- [56] **Tekin, M.**, (2009). Alüminyum-Titanyum Alaşımlarının Aşınma ve Korozyon Davranışlarına Yaşlandırma Isıl İşleminin Etkisinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 90s. Karabük.
- [57] **Savaşkan, T.**, (1999). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*, Beta Basım A.Ş., Trabzon.

## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad-Soyadı:** : Halil İbrahim SÜMBÜL

**Doğum Tarihi ve Yeri:** 15.11.1992-İSTANBUL

**E-Posta** : halilibrahimsumbul92@gmail.com

### **ÖĞRENİM DURUMU :**

**Lisans** : 2015, Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği

### **MESLEKİ DENEYİM :**

2016-Devam ediyor Metro İstanbul

