



**DÖKÜM YÖNTEMİ İLE AÇIK GÖZENEKLİ PARÇA ÜRETİMİNDE  
GÖZENEK BOYUTUNUN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**Abdulkerim ERCİL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2020**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



Abdülkerim ERCİL

20/01/2020

# DÖKÜM YÖNTEMİ İLE AÇIK GÖZENEKLİ PARÇA ÜRETİMİNDE GÖZENEK BOYUTUNUN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Abdulkerim ERCİL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2020

## ÖZET

Alüminyum köpük metaller, çok iyi derecedeki mekanik, akustik, termal, elektriksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı, yapısal ve fonksiyonel ürünlerde geniş uygulama alanı bulmuştur. Günümüzde alüminyum köpük metaller için pek çok uygulama mümkündür. Özellikle otomotiv, savunma sanayi ve inşaat sektörü gibi pek çok yapısal uygulamada köpük malzemeler kapalı hücreli olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber darbe sönümler ve kompozit hücreli yapı oluşturmada açık hücreli yapılara da gereksinim duyulmaktadır. Yapılan bu çalışmada NaCl tuzu kullanılarak döküm yöntemiyle Alüminyum alaşımından açık hücreli yapı üretimi gerçekleştirilmiştir. Açık hücreli yapıda üretilen numunelerin hücre büyüklüğü 8, 10 ve 12 mm olarak öngörülmüş ve Alüminyum metalik köpük numuneler üretilmiştir. NaCl tuzu, belirli oranlarda su karışımından elde ettiğimiz yaş tuzlardan farklı çaptaki gözenek boyutlarını metal kalıpta sıkıştırarak istenilen boyutlara sahip küresel tuzlar elde edilmiştir. Elde edilen küresel tuzlar, kum kalıplarda şekillendirilmiş farklı boyutlarda hazırlanan kalıp boşlukları içerisine basit kübik şekil oluşturacak şekilde sıralı yerleştirilerek kalıplar kapatılmış ve döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen farklı boyutlardaki köpük numuneler kalıptan çıkartıldıktan sonra su havuzunda yıkanarak tuz boşaltma işlemi yapılmıştır. Elde edilen köpük numunelerin yoğunluk ve gözenek geometrisi incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda 8 mm gözenek çapına sahip numunede  $1.44 \text{ gr/cm}^3$ , 10 mm gözenek çapına sahip numunede  $1.46 \text{ gr/cm}^3$  ve 12 mm gözenek büyüklüğüne sahip numunelerde  $0.99 \text{ gr/cm}^3$  teorik yoğunluklar elde edilmiştir. Daha sonra eldi edilen numunelere farklı mekanik testler yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bilim Kodu : 91504

Anahtar Kelimeler : Metalik Köpük, Açık Hücreli Köpükler, Döküm, Mekanik Özellikler

Sayfa Adedi : 66

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Necati YALÇIN

THE EFFECTS OF THE PORE SIZE ON MECHANICAL PROPERTIES OF OPEN  
POROUS PART PRODUCTION BY CASTING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Abdulkerim ERCİL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2020

ABSTRACT

Aluminum foam metals have found a wide application area in structural and functional products due to their excellent mechanical, acoustic, thermal, electrical and chemical properties. Today, many applications are possible for aluminum foam metals. Foam materials are used as closed cells in many structural applications, especially in the automotive, defense and construction sectors. However, open cell structures are also needed for impact damping and composite cellular structure. In this study, open cell structure was produced from aluminum alloy by casting method using NaCl salt. Samples produced in open cell structure are provided with cell sizes of 8, 10 and 12 mm and aluminum metallic foam samples are produced. The NaCl salt was obtained by mixing the pore sizes of different diameters in the metal mold from spherical salts with the desired dimensions from the wet salts obtained from the mixture of water in certain proportions. The obtained spherical salts were placed in mold cavities prepared in different sizes shaped in sand molds in order to form a simple cubic shape and the molds were closed and casting process was performed. After the foam samples of different sizes were removed from the mold, they were washed in the water pool and then salt was removed. The density and pore geometry of the foam samples were examined. As a result of this investigation, theoretical densities of  $1.44 \text{ g / cm}^3$  in the sample with 8 mm pore diameter,  $1.46 \text{ g / cm}^3$  in the sample with 10 mm pore diameter and  $0.99 \text{ g / cm}^3$  in the samples with 12 mm pore size were obtained. Then, different mechanical tests were performed on the obtained samples and the results were evaluated

Science Code : 91504

Key Words : Metallic foam, Open Cell foam, Mechanical Properties

Page Number : 66

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Necati YALÇIN

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım danışmanlarım Dr. Öğr. Üyesi Necati YALÇIN laboratuvarında görevli tüm çalışma arkadaşlarıma, Dr. Öğr. Üyesi Volkan KILIÇLI, Arş. Gör. Tolga YILMAZ ve Tuncer KILIÇ'a manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam süresince maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, sevgili eşim Ayşe ERCİL'e oğlum Kerem'e ve kızım Ezgi'ye sonsuz teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                       | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                                            | iv    |
| ABSTRACT.....                                                                         | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                                                         | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                     | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                                             | x     |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                                               | xi    |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                                                              | xiii  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                                          | xiv   |
| 1. GİRİŞ.....                                                                         | 1     |
| 2. HÜCRESEL METALİK MALZEMELERİN BAZI ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....                          | 3     |
| 2.1. Kapalı Hücreli Metal Köpük Üretim Metotları.....                                 | 4     |
| 2.2. Köpükleştirici Ajanlar Yardımıyla Kapalı Hücreli Metal Köpük Üretim Metodu ..... | 7     |
| 2.3. Köpürebilen Öncüler Kullanarak Metal Köpük Üretimi .....                         | 9     |
| 2.4. Toz Metalurjisi ile Üretim.....                                                  | 11    |
| 3. AÇIK HÜCRELİ METAL KÖPÜK ÜRETİM METOTLARI .....                                    | 15    |
| 3.1. Polimer Köpük Kullanarak Doğru Döküm Yöntemi .....                               | 15    |
| 4. HÜCRESEL METALİK MALZEMELERİN UYGULAMALARI .....                                   | 17    |
| 4.1. Otomotiv Endüstrisi .....                                                        | 18    |
| 4.2. Çarpışma Enerjisinin Emilimi.....                                                | 19    |
| 4.3. Gürültü ve Ses Kontrolü.....                                                     | 20    |
| 4.4. Havacılık ve Uzay Endüstrisi.....                                                | 20    |
| 4.5. Gemi İmalat Sektörü .....                                                        | 21    |
| 4.6. Demiryolu Endüstrisi .....                                                       | 21    |

**Sayfa**

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.7. İnşaat Sektörü.....                                                              | 22        |
| 4.8. Makine Sanayii.....                                                              | 22        |
| 4.9. Spor Aletleri.....                                                               | 23        |
| 4.10. Biyomedikal Endüstrisi.....                                                     | 23        |
| <b>5. DÖKÜM YÖNTEMİ İLE AÇIK GÖZENEKLİ PARÇA ÜRETİMİ.....</b>                         | <b>25</b> |
| 5.1. Vakum Yöntemi ile Açık Gözenekli Parça Üretimi .....                             | 25        |
| 5.2. Mekanik İşlemler .....                                                           | 26        |
| 5.3. Kristal Tuzlardan Temizlenmesi .....                                             | 26        |
| 5.4 Döküm Yöntemiyle Gözenekli Yapıların Diğer Yöntemlerle<br>Karşılaştırılması ..... | 27        |
| 5.4.1. Toz sinterleme yöntemi ile alüminyum köpük üretimi .....                       | 27        |
| 5.4.2. Köpürtme yöntemi ile alüminyum köpük üretimi.....                              | 28        |
| 5.4.3. Gaz üfleme yöntemiyle alüminyum köpük üretimi .....                            | 28        |
| 5.4.4. Polimer köpük üretimi.....                                                     | 29        |
| 5.4.5. Gözenekli seramikler .....                                                     | 30        |
| 5.4.6. Gözenekli plastikler .....                                                     | 30        |
| <b>6. GÖZENEKLİ YAPILARIN KULLANIM ALANLARI .....</b>                                 | <b>33</b> |
| 6.1. Filtreler ve Filtre Elemanları Olarak Metalik Köpükler .....                     | 33        |
| 6.2. Susturucu Olarak Metalik Köpükler .....                                          | 34        |
| 6.3. Isı Transferi Uygulamalarında Metalik Köpükler.....                              | 35        |
| 6.4. Yalıtım Uygulamalarında Metalik Köpükler .....                                   | 36        |
| 6.5. Vakumla Uygulamalarında Metalik Köpükler.....                                    | 37        |
| 6.6. Pnömatik ve Basıncılı Hava Susturucularında Metalik Köpükler .....               | 39        |
| 6.7. Akışkan Yataklarda Metalik Köpükler .....                                        | 39        |
| 6.8. Vakum Masaları ve Bağlama Sistemlerinde Metalik Köpükler .....                   | 41        |
| <b>7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>                                                   | <b>43</b> |

|                                                 | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------------|--------------|
| 7.1. Malzeme.....                               | 43           |
| 7.2.1 Açık gözenekli metalik köpük üretimi..... | 44           |
| 7.3. Basma Deneyi .....                         | 46           |
| 7.4. Düşme Deneyi.....                          | 47           |
| 7.5. Mikroyapı Karakterizasyonu.....            | 48           |
| 8. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....          | 51           |
| 8.1. Basma Deneyi Sonuçları .....               | 51           |
| 8.2. Düşme Deneyi Sonuçları.....                | 53           |
| 8.3. Mikroyapı Karakterizasyonu.....            | 56           |
| 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....                   | 59           |
| KAYNAKLAR .....                                 | 61           |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                  | 65           |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                             | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1. Gaz üfleme metodunda kullanılan tipik alaşımlar .....                                                  | 6     |
| Çizelge 7.1. Açık gözenekli metalik köpük üretiminde kullanılan alüminyum<br>alaşımının kimyasal kompozisyonu ..... | 43    |
| Çizelge 8.1. Basma deneyinde köpük malzemedede, elde edilen mekanik özellikler .....                                | 53    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                     | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Metal köpüğün yapısı. ....                                                     | 3     |
| Şekil 2.2. Açık hücre modeli b) kapalı hücre modeli. ....                                 | 4     |
| Şekil 2.3. A) açık hücreli metal köpük B) kapalı hücreli metal köpük. ....                | 4     |
| Şekil 2.4. Gaz üfleme yöntemiyle alüminyum köpük üretimi. ....                            | 5     |
| Şekil 2.5. Alüminyum köpük üretiminde işlem sınırları. ....                               | 6     |
| Şekil 2.6. Köpükleştirici ajanlar yardımıyla üretim yöntemi. ....                         | 8     |
| Şekil 2.7. Formgrip işleminin birinci adımı. ....                                         | 10    |
| Şekil 2.8. Formgrip yönteminin aşamaları. ....                                            | 11    |
| Şekil 2.9. Toz metalurjisi metodu. ....                                                   | 12    |
| Şekil 3.1. Hassas döküm metodu. ....                                                      | 15    |
| Şekil 3.2. Polimer köpük kullanılarak hassas döküm metodu. ....                           | 15    |
| Şekil 3.3. DUOCEL metodu. ....                                                            | 16    |
| Şekil 4.1. Köpük metallerin kullanım alanları. ....                                       | 18    |
| Şekil 4.2. Köpük metallerin otomotiv alanında uygulamaları. ....                          | 19    |
| Şekil 5.1. Döküm yöntemiyle gözenekli parçaların üretim şeması ....                       | 25    |
| Şekil 6.1. Filtrelerde kullanılan gözenekli alüminyum döküm parçalar ....                 | 33    |
| Şekil 6.2. A) Gözenekli alüminyum, B) Sinter metal deki ısı transferi ....                | 35    |
| Şekil 6.3. Isı transferi için gözenekli alüminyum döküm parçaları ....                    | 36    |
| Şekil 6.4. İnşaatlarda hafif malzeme olarak kullanılan gözenekli alüminyum parçalar. .... | 37    |
| Şekil 6.5. Vakumlama kalıplarında kullanılan gözenekli alüminyum parça ....               | 38    |
| Şekil 7.1. Açık gözenekli metalik köpük üretimi için kalıp dizaynı. ....                  | 44    |
| Şekil 8.1. Metal köpüklerin gerilme-birim şekil değişim grafiği. ....                     | 51    |
| Şekil 8.2. Basma deneyinde gerilme –şekil değişimi ilişkisi. ....                         | 52    |
| Şekil 8.3. Düşme deneyinde deformasyon derinliği ....                                     | 54    |

**Şekil****Sayfa**

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| Şekil 8.4. Düşme deneyinde deformasyon derinliği ..... | 55 |
|--------------------------------------------------------|----|

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                                                                                              | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 5.1. A) Gözenekli alüminyum, B) Metal köpük iç kesitleri görünümü.....                                                                       | 28    |
| Resim 5.2. Gözenekli seramik ve gözenekli alüminyum parçalar.....                                                                                  | 30    |
| Resim 5.3. Gözenekli Plastik Ve Gözenekli Alüminyum Parçalar. ....                                                                                 | 31    |
| Resim 7.1. Kum döküm kalıpları.....                                                                                                                | 43    |
| Resim 7.2. Kristal tuzların kalıp içinde dizilimi .....                                                                                            | 43    |
| Resim 7.3. Al alaşımından elde edilen döküm numuneler .....                                                                                        | 45    |
| Resim 7.4. 8mm numunenin a) basma deneyi öncesi b) basma deney sonrası .....                                                                       | 46    |
| Resim 7.5. 10mm numunenin a) deney öncesi b) deney sonrası .....                                                                                   | 47    |
| Resim 7.6. 12mm lik numunenin a) basma deney öncesi b) basma deney sonrası .....                                                                   | 47    |
| Resim 7.7. A) düşme deney öncesi 8mmlik numune b) düşme deney sonrası<br>numuneler .....                                                           | 48    |
| Resim 7.8. Döküm yöntemiyle elde edilen açık gözenekli alüminyum metalik<br>köpük numune kesitleri.....                                            | 49    |
| Resim 7.9. Döküm yöntemiyle elde edilen 8 mm gözenek çapına sahip alüminyum<br>metalik köpük numune kesiti. ....                                   | 49    |
| Resim 8.1. Açık gözenekli metalik alüminyum köpük numunelerin hücre<br>duvarlarından alınan mikro yapı görüntüleri .....                           | 56    |
| Resim 8.2. 8 mm gözenek çapına sahip açık gözenekli metalik alüminyum köpük<br>numunelerin hücre duvarlarından alınan mikro yapı görüntüleri. .... | 57    |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler            | Açıklamalar          |
|---------------------|----------------------|
| cm                  | Santimetre           |
| Dk                  | Dakika               |
| g / cm <sup>3</sup> | Gram / Santimetreküp |
| K                   | Derece               |
| kg                  | Kilogram             |
| kgf                 | Kilogramkuvvet       |
| kJ                  | Kilojoule            |
| MPa                 | Megapaskal           |
| W                   | Watt                 |
| ° C                 | Santigrat            |

## 1. GİRİŞ

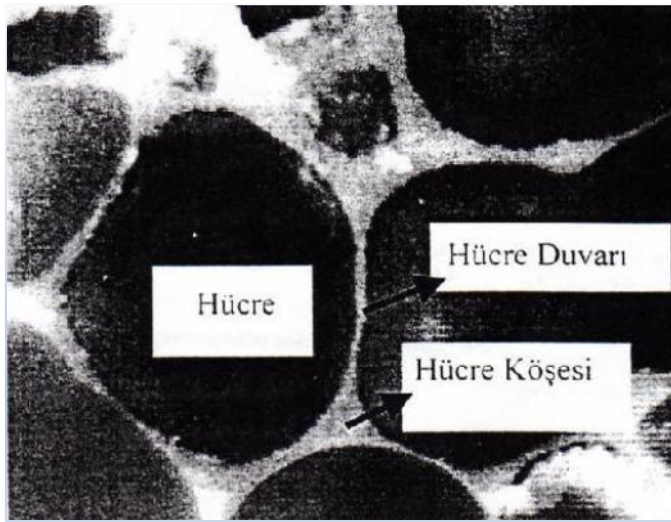
Alüminyum köpük metaller, çok iyi derecedeki mekanik, akustik, termal, elektriksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı, yapısal ve fonksiyonel ürünlerde geniş bir oranda artan uygulama alanı bulmuştur. Günümüzde alüminyum köpük metaller için pek çok uygulama mümkündür. Özellikle otomotiv, savunma sanayi ve inşaat sektörü gibi pek çok yapısal uygulamada köpük malzemeler kapalı hücreli olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber darbe sönümleme ve kompozit hücresel yapı oluşturmada açık hücreli yapılara da gereksinim duyulmaktadır [1,2]. Bu yöntemlerden en kolayı gözenekli bir boru veya gaz salan bir madde ekleyerek gazın sıvı bir metal içine verilmesidir. Ancak, bu yöntemle gözenek boyutunun ve dağılımının homojen olduğu bir köpük yapı elde etmek için uygun bir yöntem değildir. Ayrıca bu işlemlerin uygulanması, karmaşık Enjeksiyon veya karıştırma sistemlerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu sistemler olmadan metalik köpük üretimini gerçekleştirmek pek mümkün olamamaktadır [1,2].

Metalik köpük oluşturma bir başka yolu, gözeneklerinin bir köpüğün ağ yapısına sahip kalıp boşluğuna sıvı metal dökmezdır. Sıvı metal katılaştıktan sonra ağ oluşumunu sağlayan malzeme (maça) döküm parçadan uzaklaştırılarak, açık gözenekli metalik köpük elde edilir. Döküm yöntemiyle açık gözenekli köpük parça üretiminde kalıp boşluğuna yerleştirilen maça belirli kriteri yerine getirmelidir. Özellikle, metalin dökülmesinden sonra tamamen ortadan kaldırılabilmesi ve bu işlem metalik köpüğe zarar vermemelidir [2]. Maça, döküm parçada izole edilmiş adalar oluşturmamalıdır. Aynı zamanda, döküm esnasında şeklini koruyan (yani ısıyı dayanabilen) bir malzemeden yapılmalıdır. Bu nedenle kum maçalara alternatif yüksek erime noktasına sahip tuzlar kullanılmaktadır [2]. Ayrıca, kalıbın döküm sırasında eksiksiz dolumu mekanik davranışını önemli ölçüde etkiler. Homojen olmayan yapı, gözenek dağılımı ve büyüklüğü üretilen metalik köpüğün mekanik performansları beklentilerin çok altında sergilemesine neden olabilir [2]. Ağ yapısına sahip malzemelerin döküle bilirliğini; döküm sıcaklığı, davranışını döküm şartları, metal bileşimi, yolluk sistemi vb. pek çok değişken etkilemektedir. Farklı geometriye sahip parçalar için alternatif döküm tasarımları geliştirmek üretimde kolaylıklar sağlayacaktır. 1940'lı yıllardan bugüne kadar metalik köpük üretmek için yapılan çalışmalarda birçok yöntem geliştirildi [3].

Günümüzde askeri araçların darbe ve patlama sonucu oluşan basınç karşısında içerideki personelin güvenliği ve karayollarında artan taşıt sayısına bağlı olarak artan trafik kazaları nedeniyle can güvenliği önem arz etmektedir. Yaşanan kazalarda araç içerisinde personel, yolcu ve sürücülerde ortaya çıkan enerji sonucu yaralanma ve ölümler meydana gelmektedir. Ortaya çıkan enerjinin kısa sürede emilmesi bu olumsuzlukların şiddetini azaltacak ve araç içerisinde daha güvenli ortam oluşmasına neden olacaktır. Bu da ancak darbe emicilerle sağlanabilir. Dünyada son yıllarda metalik köpük üretimi ve karakterizasyonu üzerine araştırmalar yoğunlaşmaktadır. Ancak, ülkemizde henüz endüstriyel ölçekli hiçbir uygulama bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışma metalik köpüklerin dökülebilirliğini sağlayarak özelliklerini geliştirmeyi amaçlamaktadır.

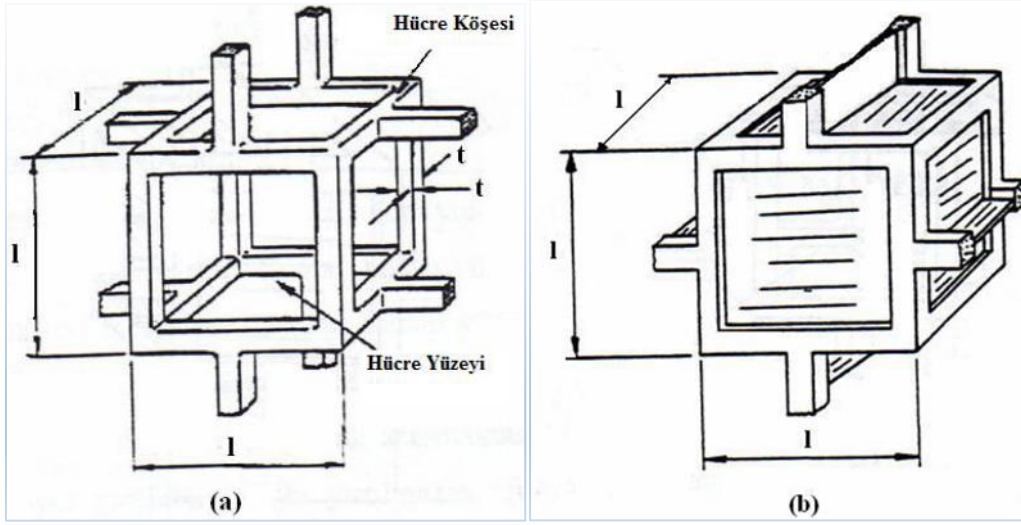
## 2. HÜCRESEL METALİK MALZEMELERİN BAZI ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Yapılarında ufak boyutlar halinde dağınık halde küçük boyutta gaz kabarcıklarında bulunan sıvılar, sıvı köpük olarak adlandırılır. Sıvı metal köpükler, katılaşma noktasının altında bir sıcaklığa getirildiklerinde katı metal köpük meydana gelir. Metal köpükte her bir gaz kabarcığının oluşturduğu hacme “hücre” denir (Şekil 2.1). Hücre, hücre duvarları ve hücre köşeleri meydana gelir. Hücre duvarı iki gaz kabarcığının oluşturduğu sınır, hücre köşesi ise üç gaz kabarcığının kesiştiği yerdir. Hücre köşeleri hücre duvarından daha kalındır [4].

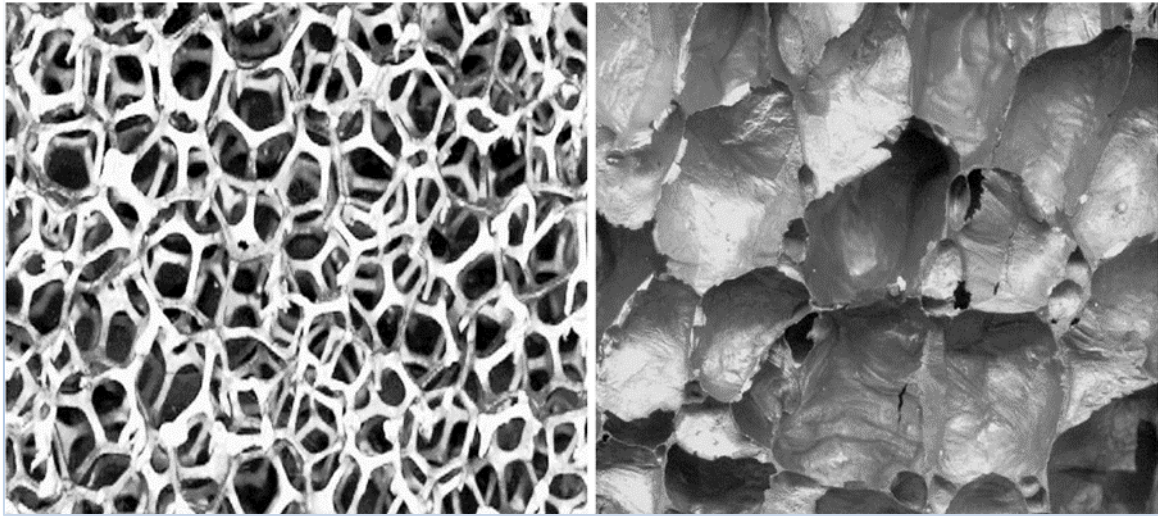


Şekil 2.1. Metal köpüğün yapısı [4].

Metal köpüklerin sınıflandırması iki şekilde yapılmaktadır açık hücreli ve kapalı hücreli olarak. Metalik köpükler %80-90'ı oranında gözeneklerden oluşmaktadır. Şayet gözenekler birbiriyle bağıntılı bir halde bulunuyorsa bu yapıya “açık hücreli köpük metal” adı verilmektedir. “Kapalı hücreli köpük metaller” de ise hücrelerin her birinin içerisinde gaz hapsedilmiştir ve birbirinden yalıtılmış bir halde bulunmaktadır. Şekil 2.3’de de açık ve kapalı köpük metallerin hücre yapıları görülmektedir [5].



Şekil 2.2. Açık hücre modeli b) Kapalı hücre modeli [4].



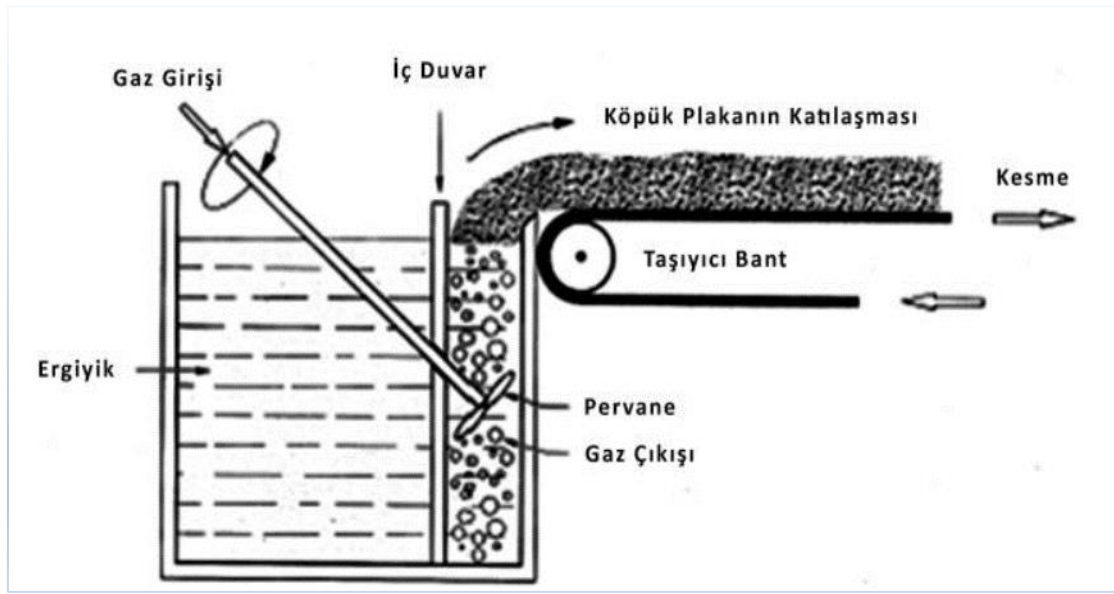
Şekil 2.3. a) Açık hücreli metal köpük b) Kapalı hücreli metal köpük [4].

Metalik Köpükler yukarıda belirtilen gözenek yapılarına göre farklı üretim yöntemleri olup, bu yöntemlerden bazıları aşağıda açıklanmıştır.

### 2.1. Kapalı Hücreli Metal Köpük Üretim Metotları

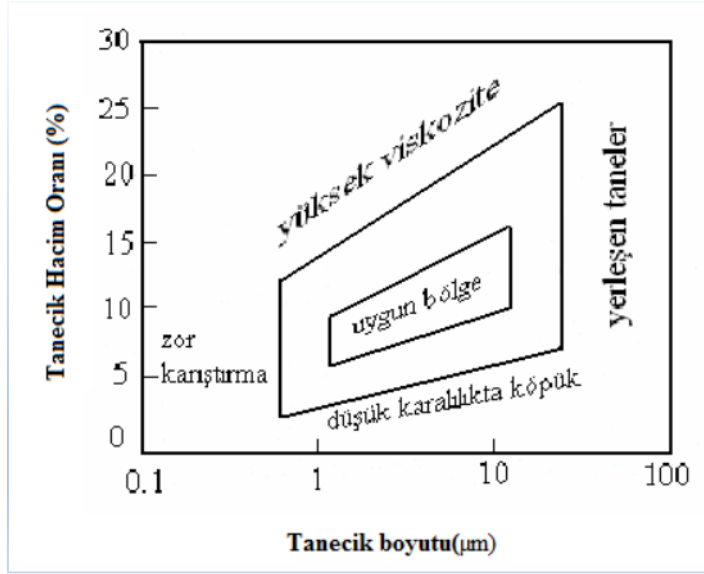
Metalik köpüklerin üretim yöntemlerinin ilki Gaz üfleme ile kapalı gözenekli metalik köpük üretim yöntemi Norveç'te Hydro Alüminyum tarafından ve Kanada'daki Cymat Alüminyum tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde SiC, MgO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi tozlarla ergiyeğn viskozitesini yükseltmek için ilave edilir. Şekil 2.5 Bu ilavelerle meydana gelebilecek problemler ergiyeğe ilave edilen parçacıkların ergiyik tarafından ısıtılabilmesi

ve ergiyiğin içinde homojen bir şekilde dağılabilmelidir. Homojen bir şekilde karışabilmesi için özel karıştırma tekniği kullanılmaktadır. İkinci kademedede ise köpüklemeye oluşan bu metal matris kompozite gaz ilave edilmektedir. Bu kademedede soy gazlar tercih edilmektedir (argon, vb.). Gaz, özel olarak dizayn edilmiş bir nozul yardımıyla eriyiğe ilave edilir. Böylece eriyik içinde homojen olarak dağılmış çok ince gaz kabarcıkları meydana gelir. Oluşan köpükler eriyik metalin yüzeyinde yüzmeye başlar. İlave edilen taneciklerin eriyikte olmasından dolayı oluşan köpükler oldukça kararlı halde bulunurlar. Sonra oluşan metalik köpük bir konveyör ile çekilerek soğuyup katılaşmasına beklenir [1].



Şekil 2.4. Gaz üfleme yöntemiyle Alüminyum köpük üretimi [4].

Gaz üfleme yöntemiyle ilave edilen parçacıklar %10–20 hacminde ve 5-20 $\mu$  boyutları arasında ilave edilir. İlave edilen parçacıkların boyut ve hacimlerinin az yâda fazla olması çeşitli problemler meydana gelmektedir. Bu durum Şekil 2.4'te görülmektedir [6].



Şekil 2.5. Alüminyum köpük üretiminde işlem sınırları [4].

Literatürde parçacıkların köpüğü kararlı hale getirme mekanizması farklı görüşler bulunmaktadır ama genel olarak kabul gören parçacıkların hücre duvarları üzerinde toplanmasının köpüklerin kararlı hale getirilmesinde önemli rol oynadığıdır. İlk önce parçacıklar yüzey viskozitesini arttırdığından filmdeki drenajın hızını kesmektedir. İkinci olarak, parçacıklar eriyik tarafından kısmen ıslanmaktadır (1). Bu yöntemle köpük metal üretmekte kullanılan tipik alaşımlar ve parçacıklar Çizelge 2.1’de verilmiştir [7].

Çizelge 2.1. Gaz üfleme metodunda kullanılan tipik alaşımlar

| Temel Alaşım Adı         | Parçacık Tipi                  | Parçacık Boyutu | Parçacık Miktarı |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|
| Al <sub>8</sub> Mg       | SiC                            | 10-30μm         | % 10-30          |
| AlSi <sub>8</sub> MgCuNi | SiC                            | 10-30μm         | % 10-30          |
| AlSi <sub>8</sub> Mg     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10-30μm         | % 10-30          |

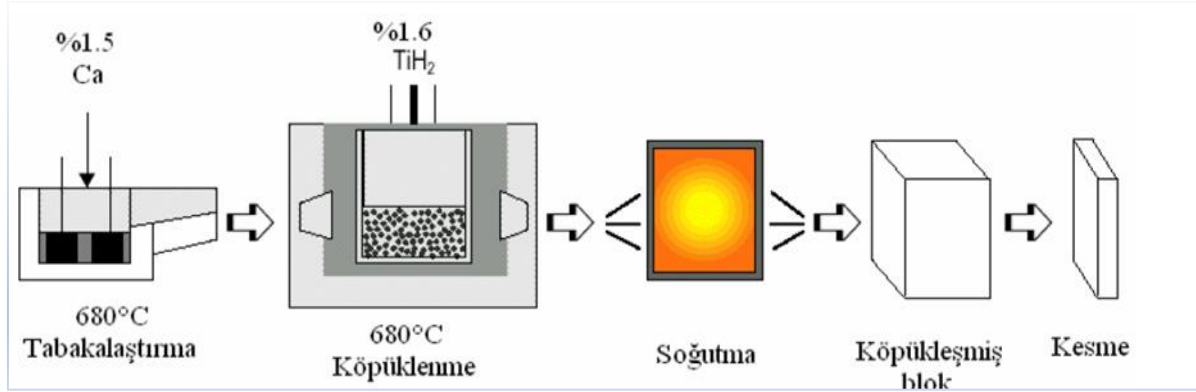
Gaz üfleme yöntemiyle üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluğu 0,069-0,54 g/cm<sup>3</sup> arasında, ortalama hücre boyutları 3-25 mm arasındadır. Ortalama hücre boyutları gaz akış hızına, pervane dönüş hızına ve diğer parametrelere bağlıdır.

Gaz üfleme yönteminin en önemli avantajlarından biri büyük hacimlerdeki köpüklerin sürekli bir şekilde üretilebilmesi ve düşük yoğunluğun başarılabilmesidir. Gaz üfleme yöntemiyle üretilen alüminyum köpük metaller daha ekonomik elde edilmektedir [1].

Kanada şirketi Cymat 1.5 m genişlikte ve 2.5-15 cm kalınlığında köpük plakaları saatte 1000 kg kapasite ile dökmektedir. Bu yöntemin dezavantajı ise üretilen panellerin kesilmesi, istenilen şekle getirilmesi gibi problemlerdir [6].

## 2.2. Köpükleştirici Ajanlar Yardımıyla Kapalı Hücreli Metal Köpük Üretim Metodu

Doğrudan eriyen metalik köpük elde etmenin ikinci bir alternatif yolu, eriyene içine gaz vermek yerine eriyik içine bir köpüklenme maddesi eklemektir [8-11]. Üfleme maddesi, ısı altında ayrışır ve daha sonra köpürme işlemini başlatan gazı serbest bırakır. Bu, Şekil 6'da, 1986'dan beri Shinko Wire, Amagasaki, Japonya'da üretim hacimlerinin günde 1000 kg'a kadar üretildiği bilinen küçük ölçekli ticari sömürde kullanılan işlemin [12-13] modern versiyonları için açıklanmıştır. Bu yöntemle, 680 ° C'de bir alüminyum eriyiğine kalsiyum metali ilavesi yapılır. Eriyik birkaç dakika boyunca karıştırılır; bu sırada viskozitesi, kalsiyum oksit (CaO), kalsiyum-alüminyum oksit (CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) veya hatta Al<sub>4</sub>Ca intermetalik oluşumu sayesinde [ve [13-14] kadar bir faktörle sürekli artar. Sıvı metalin kalınlaştırılması [15,16]. Çeşitli kalsiyum ilaveleri ile alüminyum eriyiklerinin viskozitesi üzerine karıştırmanın etkileri vardır [17]. Gerçek köpük üretimi için, genellikle ağırlıkça %1.5-3 Ca eklenir. Viskozite istenen seviyeye ulaştıktan sonra, bir üfleme ajanı (genellikle ağırlıkça % 1.6) olarak görev yapan titanyum hidrit (TiH<sub>2</sub>) ilave etmek için sıcak viskoz sıvıda hidrojen gazı salınır. Eriyik yavaşça genişlemeye başlar ve yavaş yavaş kabarcık kabını yavaşlatır. Köpük sabit basınçta meydana gelir. Kap, alaşımın erime noktasının altına soğuduktan sonra, sıvı köpük katı alüminyum köpük haline gelir ve daha sonraki işlemler için kalıptan çıkarılıyor. Bütün köpürme işlemi tipik bir büyük parti için yaklaşık 15dakika sürebilir. Proses parametrelerinin dikkatli bir şekilde ayarlanmasının çok homojen köpüklere yol açtığı gösterilmiştir [18]. Aslında, bu şekilde üretilen köpükler - "Alporas" ticari ismi şu anda mevcut olan en homojen alüminyum köpükler gibi görünmektedir.



Şekil 2.6. Köpükleştirici ajanlar yardımıyla üretim yöntemi [4].

Literatürde, zirkonyum hidrid ( $ZrH_2$ ) konsantrasyon olarak ağırlıkça % 0.5 ila 0.6 ve köpüklenme sıcaklıkları 670 ila 705 C arasında değişen alüminyum köpüklerin üretimi için bir üfleme maddesi olarak tavsiye edilmiştir. Köpüklü alüminyum Shinko Wire tarafından 2050 650 450 mm tipik seri halinde üretilir. Bir dökme köpük bloğunun kütlesi 0.27 g / cm<sup>3</sup>’lük dış derileri içeren genel bir yoğunluğa karşılık gelen yaklaşık 160 kg’dır. Kesimden sonra tipik yoğunluklar, bloğun kenarları 0.18 ile 0.24 g / cm<sup>3</sup> arasındadır, ortalama gözenek boyutu 2 ila 10 mm arasındadır. Biri, döküm köpük bloğunun hem yatay hem de dikey yönü boyunca yoğunluk gradyanlarını gözlemlemekte, en düşük yoğunluklar bloğun üst orta kısmında meydana gelmektedir. Bloklar genellikle gerekli kalınlıkta tabakalar halinde kesilir (5–250 mm, standart kalınlık 10 mm).

“Alporas” ın mekanik ve diğer bazı özellikleri ölçülmüştür. 'Alpora'lara dayanan epoksi reçine esaslı sandviç yapılar üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Alporas köpükleri, korozyon direncini arttırmak için su veya kimyasal buharla yüzey işleme tabi tutulmuştur [19]. Süreci sürekli bir köpük üretimine ya da karmaşık şekilli köpük parçalarının üretimine doğru genişletmek için bazı adımlar atılmıştır [20]. Demirli alaşımların bile bir şişirici ajan ve bir köpük "stabilizatör" karışımı enjekte etmek suretiyle alüminyum ve diğer düşük erime noktalı alaşımlara benzer bir şekilde köpüklenebileceği iddia edilmiştir. Tungsten tozu, bir demirli eriyik halinde [21]. Eriyik özelliklerini ayarlamak için kalsiyum kullanmak yerine erimiş alüminyumun viskozite artırımı, eriyikten oksijen, hava veya diğer gaz karışımlarının köpürtülmesiyle (alümina oluşumuna neden olur) [22] toz alümin ilave edilerek elde edilebilir. Silisyum karbür [23], alüminyum cüruf [24] veya hurda köpüklü alüminyum [25] veya metalik viskozite arttırıcı katkı maddeleri [26] kullanarak. Bununla birlikte, uygun ayarlama oldukça karmaşık görünmektedir ve karmaşık sıcaklık döngüleri ve mekanik ajitasyon gerektirir. Viskozitenin arttırılması için ortalama parçacık

büyüklüğü 20 mm olan mangan oksit ( $MnO_2$ ) tozu kullanılarak oldukça ümit verici sonuçlar elde edilmiştir [27]. Metal hidrit tozlarının bir eriyiğe karıştırılmasındaki sorunlardan bazıları, düşük erime noktalı ötektik öncü bir alaşım, örneğin; Üfleme ajanının ayrışma olmadan dâhil edilebildiği Al-Mg, daha sonra, daha yüksek bir erime alaşımını, örn. saf alüminyum, söz konusu öncü alaşımın onunla karıştırılmasıyla [28]. Bu sıvı köpürtme işleminin diğer yönleri, Jarema [29,30] ve Niebylski [31–35] patentlerinde açıklanmaktadır. Ptashnik [36] tarafından ilginç bir değişken önerilmiştir: üfleme maddesi, katı maddenin sıcaklığının hemen üzerindeki bir sıcaklıkta, ancak üfleme maddesinin ayrışma sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta bir sıvı alaşıma ilave edilir. Yoğun bir şekilde karıştırıldıktan sonra metalin istenen şekilde bir kalıpta katılaşmasına izin verilir. Gerçek köpüklenme, bileşik, üfleme ajanının ayrışma sıcaklığının üstünde bir sıcaklığa ısıtıldığında ikinci bir adımda gerçekleşir. Daha sonra gelişen gaz kabarcıklar üretir ve hacim artar.

Dökme ALPORAS bloklar 450x2050x650 mm boyutlarında ve 160 kg ağırlığındadır. Alüminyum köpük bloklar kalıptan çıkartılarak istenilen boyutta kesilebilir [1].

Avantajları;

- Oldukça tekdüze (uniform) hücre boyutu
- Alcan yöntemine göre daha homojen köpük yapı
- Küçük hücreliler

Dezavantajları;

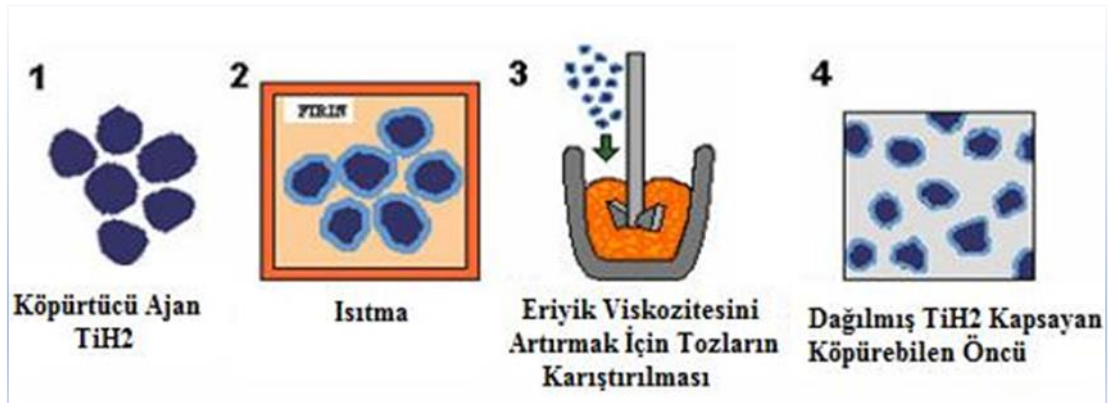
- Katkı malzemelerinden dolayı pahalı olması
- İstenilen son şekilde parça üretilememesi

### 2.3. Köpürebilen Öncüler Kullanarak Metal Köpük Üretimi

Kimyasal şişirme ajanları ile yapılan metal köpüklerin hücre yapısının kontrolü doğrudan gaz kabarcıkları tarafından yapılanlardan daha iyidir. Bununla birlikte, üfleme ajanlarının erimiş halde dağılımını kontrol etmek zordur, bu da oluşturulan metal köpük hücre yapısının homojenleştirilmesinin çok zor olduğu anlamına gelir. Birçok yöntem çalışılmış ve üfleme ajanının eriyik içindeki tam dağılılabirliğini geliştirmeye çalışılmıştır. Bunun

için geliştirilen bir işlemden, itici katı metal tozlarla karıştırılarak ısıtılmış ve karıştırma için (çok ince tozlar kullanarak) ve mükemmel bir karışım elde edilmiştir.

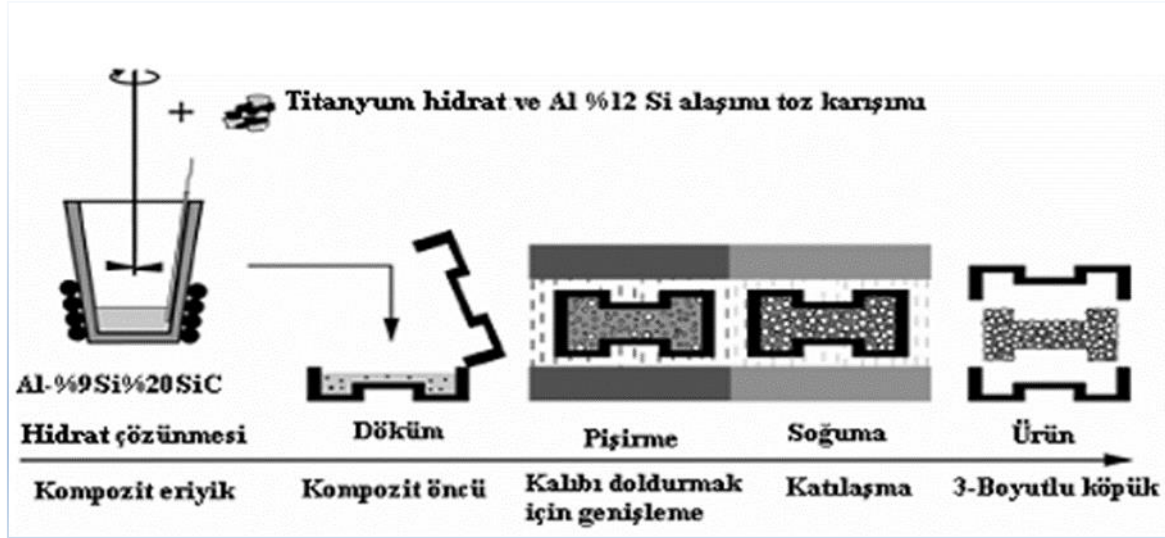
Bu karışım "köpürebilen bir öncül karışım" olarak adlandırılır. Bu yöntem, doğrudan gaz yöntemi ve toz metalurjisi yöntemi olarak iki şekilde kullanılır. FORMGRIP yöntemiyle yapılan üretim, "Foaming Of Reinforced Metal by Gas Release In Precursor " kelimelerinin baş harfleriyle adlandırılmıştır. Bu yöntemin bir başka ismi, sıvı metal ile köpüklenebilen öncüllerin hazırlanmasıdır. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, titanyum hidrür ( $TiH_2$ ) ısıtılma işlemi görmüştür, yüzeyde bir titanyum oksit filmi ile sonuçlanmaktadır (sadece hidrojen geçirgenliği ile sınırlıdır). Hidrit daha sonra erimiş alüminyum ile karıştırılır (bu arada, viskoziteyi arttırmak için eriyene SiC parçacıklarının eklenmesi gerekir). Hidrit partiküller üzerindeki oksit tabakası, çözünmeyi önleyen bir bariyer olarak görev yapar. Bu, metal, üfleme maddesi ve SiC'nin zayıf gözenekli bir öncüsüdür.



Şekil 2.7. FORMGRIP işleminin birinci adımı [4].

İkinci aşamada, alaşım eritilir - hidrojen gazının salıp çözünmesi ve bunun neden olduğu titanyum hidrürün eritilmesi için öncül - öncül yaklaşık  $630^\circ C$ 'ye kadar ısıtılır. Pişirme süresini ayarlayarak, 1 ila 10 mm hücre boyutuna ve % 50 ila 95 gözenekli yapıya sahip köpükler elde edilebilir. Ardından istenen ürünü elde etmek için ürün soğutulur.

Dağılımın gelişimi nedeniyle, köpükler muntazam bir yapıya sahip olurlar. Şekil 2.8, tüm FORMGRIP yönteminin şemasını göstermektedir [37].



Şekil 2.8. FORMGRIP yönteminin aşamaları [4].

Avantajları;

- Hücre tekdüzeliği ve kontrolü çok iyi yapılabilir (ısıtma/soğutma işleminin ve toz köpürtücü ajanının bir fonksiyonu olarak)
- ALPORAS köpüğü ile aynı hücre boyutuna sahiptir.
- Son ürün şeklinde parçalar dökülebilmektedir
- Aynı zamanda karmaşık kalıpları doldurmak için kullanılır

Dezavantajları;

- Sınırlı malzemeler kullanılabilir
- Seramik parçacıkların kullanılması zorunludur
- Metal ergime sıcaklığında yeteri derecede viskoz değilse, köpük katılaşmadan önce söner

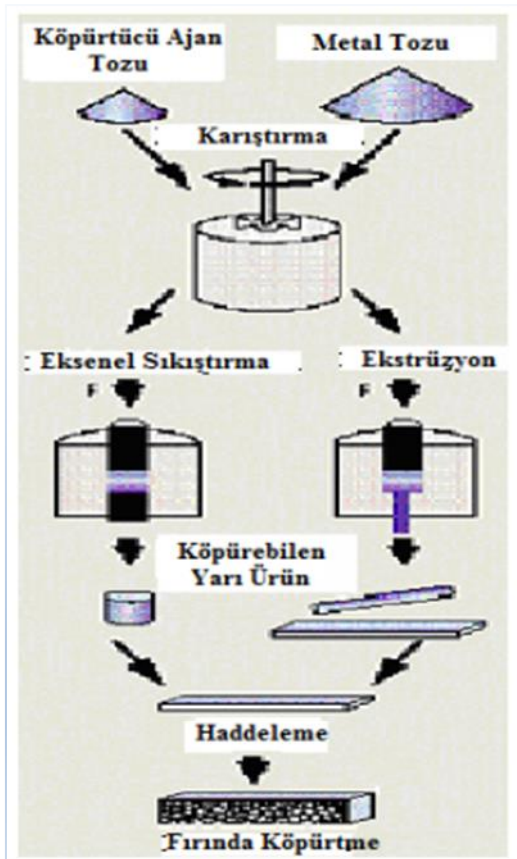
## 2.4. Toz Metalurjisi ile Üretim

ALULIGHT ve FOAMINAL olarak bilinen ve Fraunhofer Enstitüsü'nün (Bremen) patentli bir köpük metal üretim sürecidir [39].

Bu işlemde, metal tozu ve köpürme ajanı karıştırıldıktan sonra, presleme, sıkma ve haddeleme gibi metal şekillendirme ile köpüklenecek yoğun bir yapıya sahip bir yarı ürün elde edilir (Şekil 2.9). Köpüklenecek yarı mamul, metalin erime sıcaklığının üstünde

ısıtılırken, köpüklenme maddesi gazı ayrıştırır ve serbest bırakır. Serbest bırakılan gaz, erimiş metalin genişlemesine ve gözenekli bir yapı oluşturmaya neden olur. Metal hidratlara ek olarak (örneğin,  $TiH_2$ ), karbonatlar (örneğin,  $CaCO_3$ , potasyum karbonat, sodyum karbonat ve sodyum bikarbonat) ve buharlaştırma ajanları (örn. Cıva bileşikleri ve tozlu organikler) köpükendirme ajanı olarak kullanılabilir. Etkili köpürme için, gaz kaçışını önleyebilecek yoğunluğa sahip yarı bitmiş bir ürün yapılması çok önemlidir. Köpük ajanı metale tamamen kapatılmalıdır

Bu nedenle, kalıplama için kullanılan sıcaklık ve basınç miktarı, toz metal parçacıklarının birbirine bağlanacağı ve üfleme maddesinin ayrışması ile oluşan hidrojen gazı kaçmayacak şekilde ayarlanmalıdır. Haddeme yöntemiyle sıkıştırmada, özellikle yüzey katmanı içinde parçacıklar arasında difüzyonun sağlanması için 350 ila 450 ° C' lik bir sıcaklık yeterlidir.



Şekil 2.9. Toz metalurjisi metodu [4].

Yarı mamul bir ürünün köpüklenmesi için gereken süre, uygulanan sıcaklığa ve yarı mamul ürünün boyutuna, birkaç saniyeden birkaç dakikaya kadar değişir. Bu işlemde,

uygun köpüklendirme ajanı ve işlem parametreleri seçilerek sadece Al ve Al alaşımları, kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer metal alaşımları köpürtülebilir.

Titanyum hidrit ( $\text{TiH}_2$ ), alüminyum ve alüminyum alaşımları için en iyi köpürtücü maddesidir. Alüminyum için  $\text{TiH}_2$  tozu genellikle % 0,6-1 oranında kullanılır [39]. Diğer hidritler ( $\text{ZrH}_2$  ve  $\text{HfH}_2$ ) pratikte kullanılabilir, ancak daha pahalı olmaları durumundan tercih edilmez.  $\text{TiH}_2$  hidrojen evriminin sıcaklığını belirlemek zordur [40].

#### Avantajları;

- Nihai ürüne yakın üretim mümkündür
- Kompozitler üretilebilir
- Alaşım seçiminde esneklik sağlar
- Kararlaştırıcı ek malzemelere ihtiyaç yoktur
- Seramik ve fiberler eklenebilir

#### Dezavantajları;

- Tozların maliyeti yüksektir
- Çok büyük parçaların üretilebilmesi çok zordur

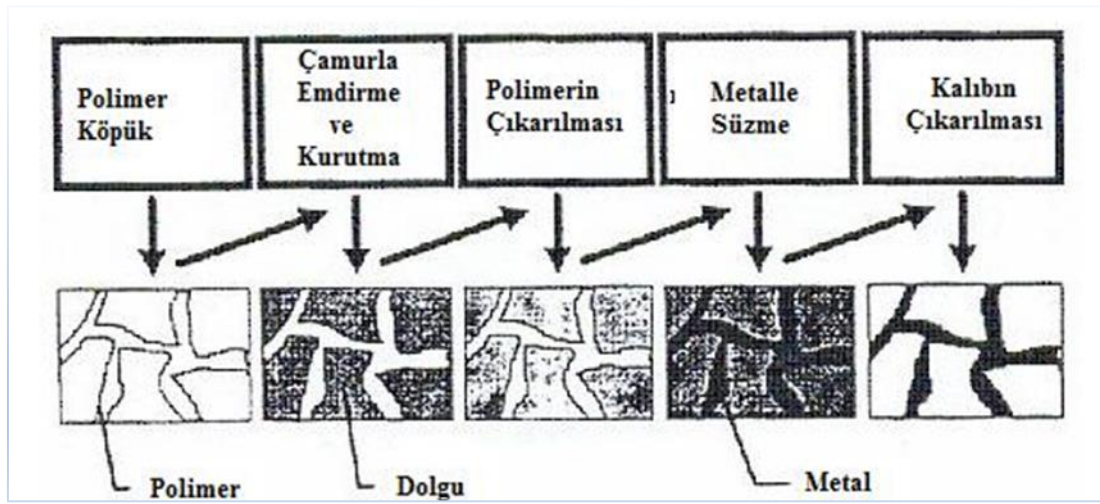


### 3. AÇIK HÜCRELİ METAL KÖPÜK ÜRETİM METOTLARI

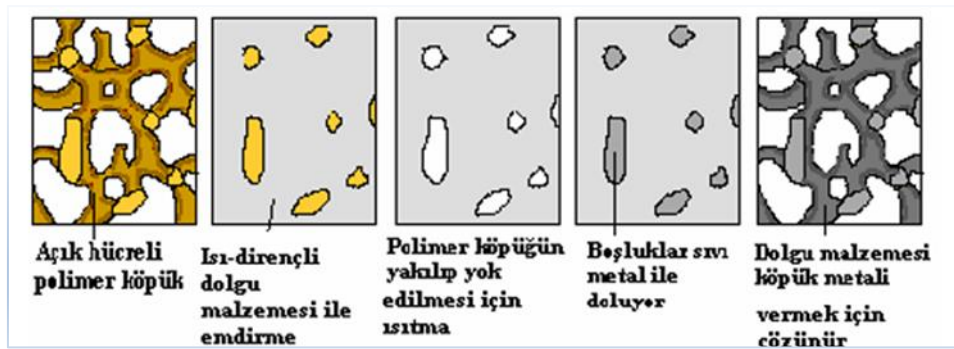
Açık hücreli metal köpükler genellikle hassas döküm metodu ile üretilir. Açık hücreli köpük metal üretimi için kullanılan ana yöntemler aşağıda listelenmiştir.

#### 3.1. Polimer Köpük Kullanarak Doğru Döküm Yöntemi

“Emdirme” olarak adlandırılır [5] Bu yöntem şematik olarak Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



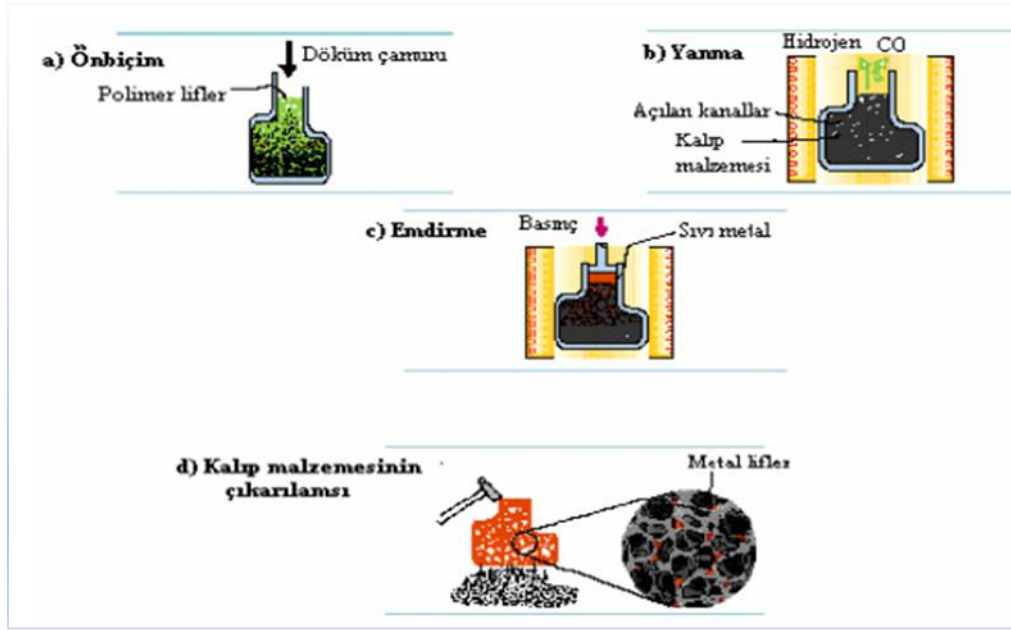
Şekil 3.1. Hassas döküm metodu [4].



Şekil 3.2. Polimer köpük kullanılarak hassas döküm metodu [4].

Köpükler, metali doğrudan köpürtmeden erimiş metalden imal edilebilir. Polimer köpüğün kapalı gözenekleri varsa, bir retikülasyon işlemi ile açık bir gözenekli haline dönüştürülmesi gerekir. Açık hücrelere sahip olan ortaya çıkan polimer köpüğü daha sonra, örneğin ısıya dirençli bir malzemedan bir bulamaç ile doldurulur; mullit, fenolik reçine ve

kalsiyum karbonat [41] veya basit sıva karışımı [42]. Sertleştikten sonra polimer köpüğü ısıtıl işlemle çıkarılır ve erimiş metal, orijinal polimer köpük yapısını çoğaltan ortaya çıkan açık boşluklara dökülür. Basit yerçekimi dökümünde, sıvı metal ile dar boşlukların doldurulması mümkün değilse, kalıbın basıncı ve ısıtılması gerekebilir. Kalıp malzemesinin çıkarılmasından sonra (örneğin basınçlı su ile), orijinal polimer köpüğün tam bir kopyası olan metalik bir yapı elde edilir [1].



Şekil 3.3. DUOCEL metodu [4].

İstenilen hücre büyüklüğü ve yoğunluğunda hazırlanmış açık hücreli polimer formu hazırlanır. Kalıp daha sonra kalıplama bulamacı (seramik tozu) ile kaplanır. Kalıp, döküm malzemesini sertleştirilir ve polimer formunu ayrılır. Daha sonra, kalıp metal bir alaşımla doldurulur ve soğumaya bırakılır. Daha sonra kalıp malzemeleri çıkartılır, köpük metal orijinal polimer köpüğe eşdeğerdir kalıptan ayrılır. Alçı veya plastik gibi diğer kalıplama bileşikleri de kullanılabilir.

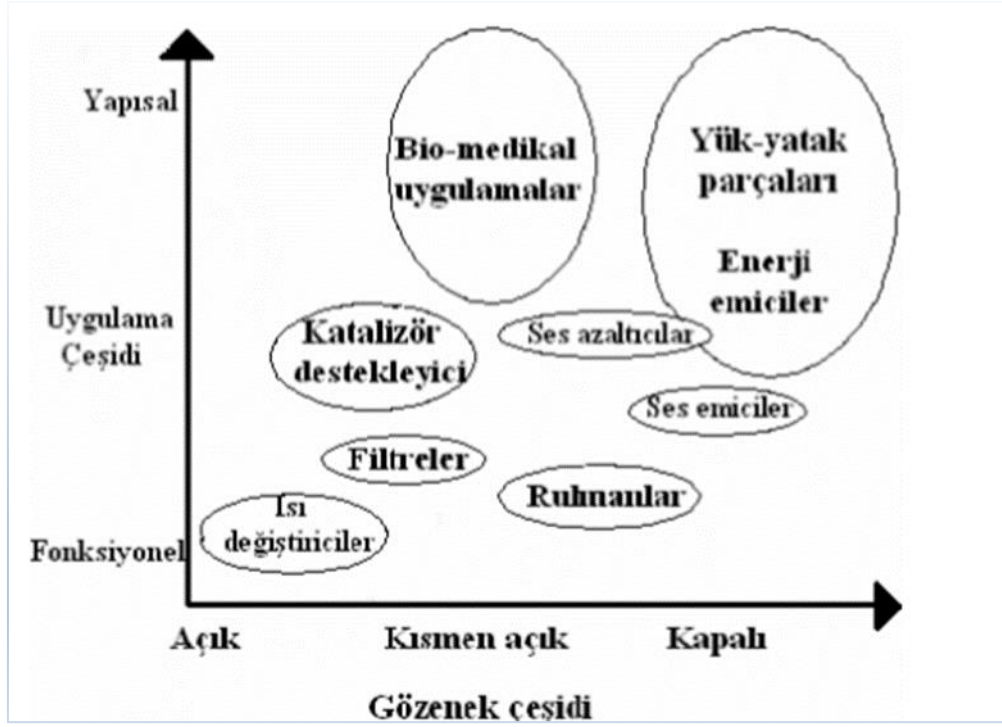
#### 4. HÜCRESEL METALİK MALZEMELERİN UYGULAMALARI

Hücresel metalik malzemeler gittikçe artan sayıda uygulamada bulunur. Aşağıdaki anahtar kelimelerden kaynaklanıp kaynaklanmadığı:

- i. Morfoloji: istenen gözeneklilik türü (açık veya kapalı), istenen gözeneklilik miktarı, istenen gözeneklilik ölçeği, gerekli hücre malzemesinin toplam iç yüzeyi,
- ii. Metalurji: metal alaşım veya gereken mikro yapı durumu,
- iii. İşleme: köpüğü veya hücresel katıyı şekillendirmek için veya köpük ile geleneksel tabakalar ya da prolinler arasında kompozit üretmek için olanaklar,
- iv. Ekonomi: maliyet sorunları, büyük hacimli üretime uygunluk.

Özellikle, ilk nokta, hücresel metalik malzeme uygulamalarının değerlendirilmesi için çok önemlidir. Birçok uygulama, hücresel malzemeden geçmek için bir sıvı veya gaz ortamı gerektirir. “Çok açık” ile “yüksek yük” arasında değişen farklı derecelerde “açıklık” vardır.

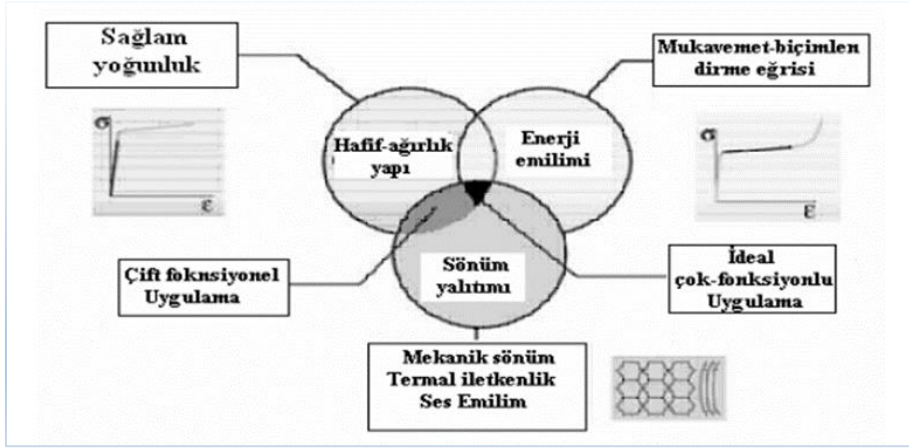
Belirli bir tür hücresel yapının hangi metallerden veya alaşımlardan üretilebileceği sorusu da önemlidir. Yapısal, yük taşıyan parçaların hafif olması gerekir çünkü aksi takdirde geleneksel masif metallerden veya alaşımlardan yapırlar [1].



Şekil 4.1. Köpük metallerin kullanım alanları [4].

#### 4.1. Otomotiv Endüstrisi

Otomobillerin güvenliği için artan talep, çoğu durumlarda daha yüksek bir araç ağırlığına neden olmaktadır. Bu, düşük yakıt tüketimi için daha fazla talep doğurur, bu da ağırlık azaltma için ek önlemler gerektirir. Dahası, özellikle Avrupa ve Japonya'da, uzunlukları azaltılmış otomobiller istenmektedir. Bununla birlikte, bu azalma, yolcu bölmesinin büyüklüğü pahasına gerçekleşmemelidir. Bu nedenle, biri yolcu konforunu sağlamak için yeni kompakt motorlar çıkarmaya veya diğer yapıları azaltmaya çalışır. Bu, tüm parçaların çok aralıklı olması ya da çarpma bölgelerinin azaltılmış uzunluğu nedeniyle çarpma emniyetinde olması nedeniyle, motor bölmesinde ısı dağılımı ile ilgili yeni sorunlar yaratır. Son olarak, otomobillerden gelen akustik emisyonları azaltma ihtiyacı, yeni ses emiciler için bir talebe yol açmıştır.



Şekil 4.2. Köpük metallerin otomotiv alanında uygulamaları [4].

Metal köpükler bu sorunların bazıları için olası bir çözümdür. Şekil 4.2 de otomotiv endüstrisindeki metal köpükler, çoğunlukla alüminyum köpükler için üç uygulama alanını özetlemektedir. İç daireler, ayırt edilmesi gereken üç alanı temsil eder ve dış kutular, belirtilen alandaki avantajdan sorumlu olan köpük özelliklerini gösterir. İdeal bir uygulama, hafif bir panel görevi gören, çarpma durumlarında enerjiyi emen ve ses veya ısı emici işlevler taşıyan (Şekil 4.2'deki üç dairenin kesişimi) bir parça olacaktır. Bu tür çok işlevli uygulamalar elbette ki zorlanır ve bir tanesi çoğu zaman, aynı zamanda bir ses emici olarak kullanılan yapısal bir hafif panelin kullanıldığı iki katlı bir uygulamanın sağlanması ile karşılanır. [1]

#### 4.2. Çarpışma Enerjisinin Emilimi.

Enerji soğurma uygulamalarında, malzemelerin plastik, geri dönüşümsüz deformasyon rejiminden yararlanılmaktadır. Pek çok hücresel katı, geniş bir gerilme aralığında neredeyse sabit bir stres seviyesinde deformasyonları nedeniyle mükemmel enerji emicilerdir [1]. Metal köpükler geleneksel köpüklerden daha iyi performans gösterebilir; polimer köpükleri, çok daha yüksek mukavemetlerinden dolayı. Alüminyum köpükleri daha da cazip kılan şey, bir çalışmada % 3'ten daha düşük bir poliüretan köpüğü için % 15'e kıyasla belirlenen dinamik çarpma durumlarındaki düşük toparlanmalarıdır [43]. Bu nedenle, genel olarak hücresel metaller ve özellikle metalik köpükler için önemli bir uygulama enerji emilimidir.

Her durum için, bir enerji emicisinin farklı bir performans göstermesi gerekir, ancak iyi bir enerji emicisinin genel kriterleri burada belirtilebilir:

- i. mümkün olduğunca ideal enerji emme özellikleri. Normal olarak, bir kişi dikdörtgen gerilme-gerilme davranışı gerektirir, yani yalnızca bu tortu gerilmesinde maksimum tolere edilebilir strese ulaşıldıktan ve ilerici deformasyondan sonra;
- ii. hacim, uzunluk veya kütle birimi başına yüksek bir emme kapasitesi;
- iii. enerji absorpsiyonunun izotropisi, yani en azından geniş bir darbe yönü aralığı için iyi emme özellikleri

#### **4.3. Gürültü ve Ses Kontrolü.**

Polimer köpükler genellikle gürültü kontrolü için kullanılır. Bu nedenle, metal köpüklerin potansiyel kullanımları için değerlendirilmesi el altındadır [44]. Alüminyum köpüklerin gürültüyü azaltmaya yardımcı olabileceği çeşitli yollar vardır ve çeşitli etki yollarını karıştırmamak için özen gösterilmelidir. Her şeyden önce, bir yapının (makine, araç vb.) İstenmeyen titreşimlerinde sorunlara neden olabilir ve ses dalgalarının (gürültü) yayılmasına neden olabilir. Young'ın metal köpük modülleri karşılık gelen normal dökme metale göre daha düşük olduğundan, bir metal köpük yapısının rezonans frekansı genellikle geleneksel bir yapıya kıyasla daha düşük frekanslara kaydırılır. Ayrıca, köpüklerin kayıp faktörü, normal metalin kayıp faktöründen en az 10 kat daha yüksektir, böylece titreşimler sönümlenir - yani ısıya dönüştürülür - daha verimli bir şekilde [45-46]. Bu nedenle, köpükler gürültü problemlerinden kaçınma olasılığını gösterir, ancak metal köpüklerin kayıp faktörünün hala çoğu polimerinkinden çok daha düşük olduğuna dikkat çekmektedir.

#### **4.4. Havacılık ve Uzay Endüstrisi**

Köpüklü metallerin hafif yapısal yönü, havacılık ve otomotiv sektöründe çok benzerdir. Havacılık uygulamalarında, pahalı petek yapılarının köpüklü alüminyum levhalar veya metal köpük sandviç panellerle değiştirilmesi, düşük maliyetlerde daha yüksek performansa yol açabilir. Bir yandan, daha yüksek bir burkulma ve sakatlanma direnci aranmaktadır [47], diğer yandan, köpüklerin önemli bir avantajı, panellerin mekanik özelliklerinin izotropisi (yüz tabakaları olsun veya olmasın) ve kompozit yapılar yapma olasılığıdır. Yapıştırma yapmadan. İkincisi, yapının bütünlüğünü mümkün olduğu kadar uzun süre muhafaza etmesinin gerekli olduğu durumlarda, daha iyi huylu bir davranış ortaya çıkarmaktadır. Boeing (ABD), gaz tutma tekniği ile yapılan büyük titanyum

köpüklü sandviç parçaların ve helikopterlerin kuyrukları için alüminyum köpük çekirdekli alüminyum sandviçlerin kullanımını değerlendirmiştir. Bu tür sandviçlerin önemli bir avantajı, genellikle bal peteği yapılarında düzün aksine eğriliklerle ve hatta 3D şekillerde üretilibilmeleridir. Bu nedenle, helikopter üreticileri şu anda kullanılan bazı petek bileşenlerinin yerine alüminyum köpük parçaları kullanılmaktadır.

Diğer uygulamalar, artmış sönümleme ile birlikte geliştirilmiş sağlamlığın değerli olduğu türbinlerdeki yapısal parçaları içerir. Motorun çeşitli aşamaları arasındaki conta da gözenekli metallere yapılmıştır. Türbin kanadı, ilk işlemi sırasında istenen konturu hücresel malzemeye keser ve bu şekilde neredeyse gaz sızdırmaz bir conta oluşturur.

#### **4.5. Gemi İmalat Sektörü**

Hafif malzeme yapısı gemi inşasında önem kazanmıştır. Modern yolcu gemileri tamamen alüminyum ekstrüzyondan, alüminyum levhalardan ve alüminyum petek yapılarından yapılabilir. Yüzey tabakaları oldukça elastik poliüretan yapıştırıcılar ile göbek malzemesine yapıştırılırsa, gemilerde yaşanan düşük frekanslarda bile mükemmel sönümleme davranışıyla hafif ve sağlam yapılar elde edilir. Gemi yapımındaki uygulamalar için, köpük sandviç elemanlarını etkili bir şekilde birleştirip gemi yapımı sırasında uygun bağlantı elemanlarını tanıtabilmek önemlidir [48]. Hücresel malzemeler için denizcilik uygulamaları da asansör platformları, yapısal perdeler, anten platformları ve piroteknik dolaplar dahil olmak üzere belirlenmiştir [49].

#### **4.6. Demiryolu Endüstrisi**

Demiryolu ekipmanlarında metal köpüklerin uygulanması, üç ana uygulama alanına ilişkin olarak otomotiv endüstrisi için aynı kuralları takip eder. Enerji absorpsiyonu, özellikle kentsel alanlarda faaliyet gösteren ve arabalarla çarpışmaların yaşanabileceği hafif demiryolu setleri ve tramvaylar için bir sorundur. Japon trenleri kazada enerji emilimini arttırmak için 2,3 m<sup>3</sup>'lük bir “Alporas” köpüğü ile donatılmıştır [20]. Hafif köpüklü elemanların avantajları, arabalarla aynıdır, asıl fark, demiryolu vagonları için yapıların çok daha büyük olmasıdır.

#### 4.7. İnşaat Sektörü

Yapı endüstrisinde çok çeşitli olası uygulamalar vardır. Modern ofis binaları betondan yapıldığından cepheleri, betonu gizleyen ve binanın görünümünü iyileştiren panellerle dekore edilmiştir. Bu paneller hafif, sağlam ve dayanıklı olmalıdır. Oldukça sık ince mermer dilimleri veya diğer dekoratif taşlar daha sonra binanın duvarlarına sabitlenmiş bir desteğe birleştirilir. Bu tür destekler, günümüzde kullanılan pahalı peteklerin bir kısmını değiştirerek alüminyum köpükten yapılabilir. Balkonların bilya yatakları, sıkı güvenlik yönetmeliklerine uymak zorundadır. Günümüzde kullanılan malzemelerin bazıları çok ağırdır ve yangın durumlarında problemler oluşturmaktadır. Alüminyum köpük numuneleri ile değiştirilebildiklerinde, problemlerin bir kısmı çözülmektedir. Alüminyum köpükler veya köpük panelleri asansörlerin enerji tüketimini azaltmada çok yardımcı olabilir. Sık sık hızlanma ve yavaşlama ve modern asansörlerin yüksek hızları nedeniyle hafif yapı önemli bir konudur. Bununla birlikte, güvenlik yönetmelikleri genellikle geleneksel hafif yapım tekniklerinin uygulanmasını önler. Alüminyum köpükler enerji emici ve aynı zamanda strüktürel yapı malzemesi olarak hareket edebildiklerinden, bu uygulamalar çok üstün görünüyor. Hafif geri kazanımlar ve kapaklar göreceli olarak zayıf termal iletkenlikten ve düşük yoğunluklu alüminyum köpüklerin bir kısmının ateş dirençlerinden faydalanır. Alüminyumun erime noktası oldukça düşük  $<660\text{ }^{\circ}\text{C}$  olmasına rağmen, alüminyum köpükler, bu koşullar altında güçlü bir oksidasyon nedeniyle açık bir aleve maruz kaldıklarında şaşırtıcı bir şekilde kararlıdır [49,50].

#### 4.8. Makine Sanayii

Makine yapımında metalik köpükler için bazı ilginç uygulamalar vardır. Stresli parçalar veya azaltılmış ataletli ve geliştirilmiş sönümlenmeli köpürtülmüş sütunlar, hali hazırda geleneksel metalden yapılmış aksların, ruloların veya platformların yerini alabilir. Bu bileşenler sabit delme veya freze makinelerinde ve ayrıca baskı makinelerinde kullanılabilir. Küçük el tipi delme veya taşlama makineleri için yuvalar, geliştirilmiş iç sönümleme gibi geleneksel yuvalara göre bazı avantajlar sunar. Elektrikli makineler için köpüklü metal gövdeler, malzemenin performans spektrumuna elektromanyetik ekranlama ekler. Öğütme disklerinin yapısal gövdesi, öğütme malzemesi çevresine bağlıyken alüminyum köpükten de yapılabilir. Diskin kendinden sönümlenmesi zararlı titreşimlerin önlenmesine yardımcı olacaktır, kısmen açık bir gözeneklilik malzeme toprağı için bir

rezervuar görevi görebilir. Teleskop aynalarında destek olarak alüminyum köpükler de kullanılmıştır [51,52]. Diğer uygulamalar, sıcak veya aşındırıcı ortamın dolun seviyesini ölçen dolun yağları için yüksek dayanımlı çok hafif bir dolgu malzemesi gerektirir. Polimer köpüklerin kullanılamaması nedeniyle, ince kaynaklı titanyum sac konstrüksiyonlardan yapılan ve pozisyonlarını okumak için manyetik bir sistem içeren sac yüzdürücüler kullanılır. Bu tür yüzdürücüler çok pahalı olduğu için, manyetik sistemi barındırabilen, dış basınca dayanabilen ve gerekli yüzdürme gücünü yaratabilen yoğun bir dış yüzeye sahip olan alüminyum köpük parçaları ile değiştirilebilmektedir.

#### **4.9. Spor Aletleri**

Spor malzemeleri, bu sektörde kabul edilen yüksek fiyatlar nedeniyle yeni malzemelerin uygulanması için faydalıdır. Bununla birlikte, hücresel metaller için pek çok uygulama çalışmaları yoktur. Bir örnek, alüminyum köpüklerin iyi bir enerji emme kapasitesinden yararlanabileceği futbolcular için kaval kemiği koruyucularıdır [1].

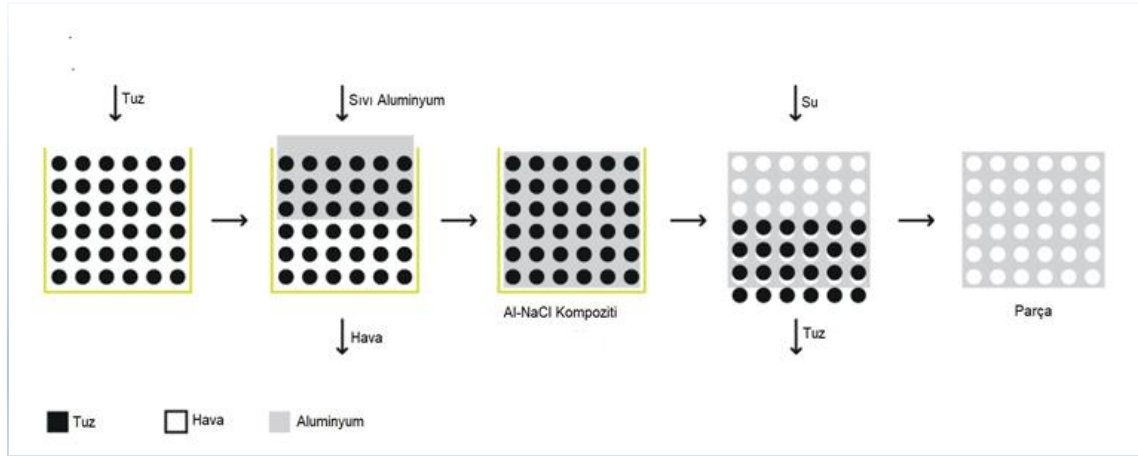
#### **4.10. Biyomedikal Endüstrisi**

Titanyum veya kobalt-krom alaşımları, protezlerde veya diş implantlarda, biyo-uyumluluklarından dolayı kullanılır. Dokunun büyümesini sağlamak için, biri genellikle protez üzerinde termal püskürtme veya başka yöntemlerle aynı veya başka bir biyo-uyumlu malzemenin gözenekli bir tabakasını üretir. Alternatif olarak, bu tür uygulamalar için gözenekli titanyum veya titanyum köpük kullanılabilir ve bu tür bileşenlerin gücü, modülleri, vb. İle ilgili gereklilikleri yerine getirmek için yoğunluk dağılımını uyarlayabilir. Maksimum dayanıklılık ve işlevsellik sağlamak için implantların nasıl tasarlanması gerektiği konusunda bir fikir birliği yoktur. Bir görüşe göre, diş implantlarının modülü çene kemiğinin modülüyle eşleşmelidir. Metalik köpüklerin modülü ve yoğunluğu arasındaki ilişkiyi bilerek, uygun uyarlanmış modül ile kolayca implant üretilebiliyor, biyo-uyumluluk sağlanıyor ve (açık) gözeneklilik içine kemik büyümesini teşvik edebiliyor [53]. Magnezyum köpükleri, kemik büyümeye devam ettiği sürece yük taşıyıcı bir yapıya hizmet eden, ancak vücut tarafından yavaş yavaş tekrar keşfedilme aşamasında yavaş yavaş emilen biyobozunur implantlar olarak kullanılabilir [54].



## 5. DÖKÜM YÖNTEMİ İLE AÇIK GÖZENEKLİ PARÇA ÜRETİMİ

Döküm yöntemiyle üretilen gözenekli alüminyum, hacim boyunca geçirgen ve geçirgen bir gözenekli malzemedir. Döküm yöntemiyle gözenekli alüminyum üretimi, sinter metaller veya metal köpükler gibi diğer gözenekli metallerin üretim teknolojilerinden farklıdır. Gözenekli alüminyum üretim süreci, üç ana adımda kısaca açıklanabilir: [55-56].



Şekil 5.1. Döküm yöntemiyle Gözenekli parçaların üretim şeması [57].

### 5.1. Vakum Yöntemi ile Açık Gözenekli Parça Üretimi

Döküm yöntemiyle gözenekli alüminyumdan üretilen ürünlerin üretimi için, sinterleme teknolojisinde olduğu gibi pahalı kalıplara değil, geleneksel kalıplarla yapılmaktadır. Kalıp kristal tuzla doldurulur, daha sonra erimiş alüminyum dökülür ve tuz parçacıklarından geçer. Farklı gözenek ebatlarında ve gözenek yapılarında ürünler elde etmek için, tuz çeşitli niteliklerde kullanılır. Tüm tuz taneleri birbirleriyle temas halindedir, bu da son gözenekli alüminyum ürününün geçirgenliğini sağlar [55].

Sadece tuz kalitesi gözenekli alüminyum üretimini ve dolayısıyla malzeme özelliklerini etkilemez. Nihai ürünün kalitesine uyacak şekilde değiştirilebilecek çeşitli döküm parametreleri uygulanır. Uygulamaya veya parçanın özelliğine kullanım alanına bağlı olarak, gözenekli alüminyum üretimi için uygun alüminyum alaşımının kullanılması gerekmektedir. Çoğunlukla  $AlSi_7Mg$  alaşımı mükemmel uyum sağlar. Özel durumlarda yüksek ısı iletimi nedeniyle saf alüminyum tercih edilir.

Sinterleme teknolojisi ile elde edilen hücresel metaller için, ayrı metal partikülleri bir araya toplanır. Tek tek metal küreler arasındaki temas noktaları, termal iletkenlik için direnç noktaları oluşturur. Sinterlenmiş metallerin aksine, gözenekli alüminyum, tek tek parçacıklardan oluşmaz, ancak dökme bir yapıya sahiptir. Gözenekli alüminyum ürünlerinin ısı iletkenliği ve mukavemeti sinterlenmiş malzemelere kıyasla önemli ölçüde yüksektir. [55].

## **5.2. Mekanik İşlemler**

Mekanik İşlemler, gözenekli alüminyum ürünlerin üretiminde önemli bir aşamadır. Şerit testere yardımıyla, blok ve plakalar çeşitli boyutlarda ve duvar kalınlıklarında üretilir. Silindirik ürünler de elde edilir. Alüminyumun bir kalıba tuzla dökülmesinden ve kalıbın soğutulmasından sonra mekanik işlem bir torna tezgâhı, freze tezgâhı, bant bıçağı makinası veya CNC tezgâhı üzerinde gerçekleşir. Bu nedenle, bu üretim teknolojisi sayesinde tüm karmaşık ve karmaşık parçaların üretimi mümkündür [55].

## **5.3. Kristal Tuzlardan Temizlenmesi**

Mekanik işlemler, gözenekli alüminyum üretiminde diğer önemli bir aşamadır. Tuzun yıkanması yalnızca mekanik işlemlerden sonra gerçekleştirilir, bu nedenle tüm gözeneklerin açık bir yapıya sahip olması garanti edilir ve ürün tamamen geçirgen kalır. Ayrıca gözenekli alüminyumun kendisinin ek bir mekanik işlemlerini de yapabilirsiniz.

## 5.4 Döküm Yöntemiyle Gözenekli Yapıların Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması

### 5.4.1. Toz sinterleme yöntemi ile alüminyum köpük üretimi

Gözenekli alüminyum ve sinterlenmiş metal hem açık hücrelidir hem de geçirgendir, ancak üretim teknolojileri ve dolayısıyla malzemelerin yapısı farklıdır. Gözenekli alüminyum üretiminde sıvı alüminyum kristal tuzu ile birlikte dökülür. Soğutma ve mekanik işlemden sonra, tuz yıkanır. Tuz taneleri ve temas noktaları yerine gözenekler oluşur. Sinterlenmiş metaller için metal granüller birlikte pişirilir. Granüller arasındaki boşluklar oluşur bu durumda gözenekler haline gelir. Gözenekli alüminyumda, gözenekleri tuz tanecikleri yerine oluşturulmakta ve granül tuzdaki boşluklar metal ile doldurulmaktadır [55].

Gözenekli metaller modern teknolojiye önemli bir rol oynamaktadır. Filtreler ve filtre elemanları, muylu yatakları, susturucular, yangın bariyerleri, vb. sinterleme teknolojisi (sinterlenmiş metal) olarak adlandırılan toz metalurjisi (toz metalurjisi malzemeleri) yöntemine göre çeşitli metal tozlarından yapılır.

Sinterleme yöntemine göre yüksek stabiliteye ve yüksek hacimli gözenekliliğe sahip geçirgen malzemeler gerektiriyorsa, bu genellikle bronz, bakır veya çelik kullanır. Düşük yoğunluğa, iyi korozyon direnci ve nispeten yüksek ısı ve elektrik iletkenliği nedeniyle, alüminyum bronz, çelik ve bakıra göre birkaç avantaja sahiptir. Bununla birlikte, sinterleme teknolojisiyle gözenekli alüminyum malzemeler üretmek zordur [55].

Sinterleme teknolojisinde alüminyum üretiminde bazı zorluklar ortaya çıkar: alüminyum tozu hızlı bir şekilde reaksiyona girer ve alüminyum granüller erimeyen okside  $Al_2O_3$ 'e oksitlenir. Oksit tabakanın çözüneceği sıcaklık, alüminyumun erime sıcaklığından bir miktar daha yüksektir. Bu sıcaklık ayrıca alüminyum granüllerin boyutuna ve oksit tabakasının kalınlığına da bağlıdır. Teorik olarak, bu problemi çözmek için bazı yöntemler vardır, ancak pratikte sinterleme teknolojisinden sonra yeterli dayanıma sahip yüksek hacimli poroziteli alüminyum ürünlerin üretimi henüz gerçekleşmemiştir.

Sinterlenmiş metallere göre avantajları:

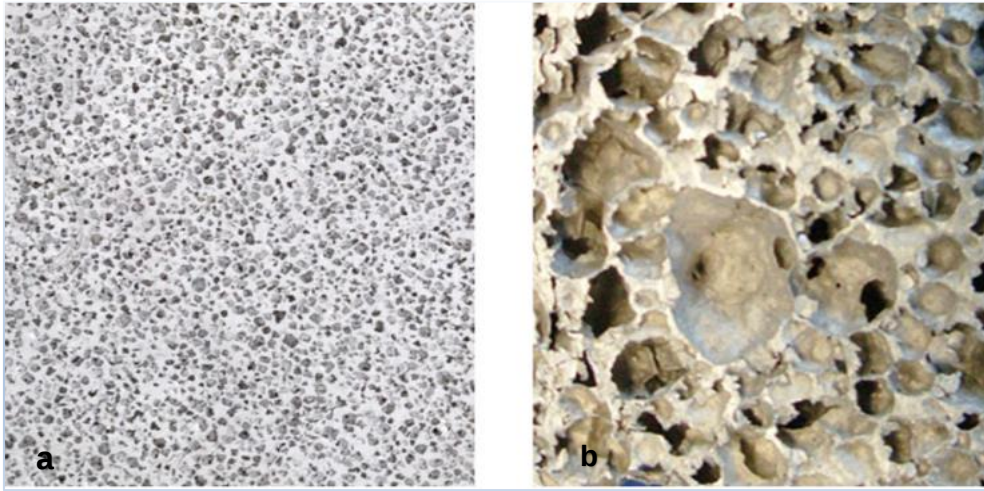
- Sinterlenmiş alüminyum bugün üretilmiyor
- Gözenekli alüminyumun hacim gözenekliliği yaklaşık% 55-65 olabilir.

- Sinterlenmiş metallerin hacim porozitesi yaklaşık% 30-35'tir
- Dökme yapı sayesinde gözenekli alüminyum yüksek stabiliteye sahiptir ve sinterlenmiş metallerin aksine parçalanmaz [55].

#### 5.4.2. Köpürtme yöntemi ile alüminyum köpük üretimi

Açık hücreli metal köpük ve gözenekli alüminyum hem gaz hem de sıvı ortamlara karşı geçirgendir, ancak üretim teknolojileri ve özelliklerinde farklılık gösterir. Alüminyum kristal tuzu ile birlikte dökülür, ardından tuz yıkanır ve tuz taneleri ve temas noktaları yerine gözenekler oluşur buda gözenekli döküm alüminyum ürünler elde edilir.

Yüksek kırılma mukavemeti ve düşük ağırlığı sayesinde köpüklü metaller, endüstriyel olarak ilgili malzemeler olarak giderek daha önemli hale gelmektedir. Özellikle içyapı ve iyi ısı iletkenliği sayesinde araç yapımında hafif bileşenler olarak, aynı zamanda ısı mühendisliğinde. Metal köpükler genellikle alüminyum veya alüminyum alaşımlarından üretilmektedir, ancak bakır, çinko ve hatta kurşun köpüklenebilmektedir [55].



Resim 5.1. a) Gözenekli alüminyum b) Metal köpük iç kesitleri görünümü [55].

#### 5.4.3. Gaz üfleme yöntemiyle alüminyum köpük üretimi

Metal tozları diğer bileşenler ile karıştırılır ve metalin erime noktasının üzerinde ısıtılır. Sonuç olarak, karışımı köpüren gaz halindeki hidrojen salınır.

Erimiş metal gaz enjekte edilir, soğuduktan sonra gözenekli yapı kalır. Şekil 2.4 deki Gaz üfleme yöntemiyle alüminyum köpük üretim yöntemi görülmektedir.

Metal köpük üretimindeki zorluklar temel olarak metal ve iticinin doğru kombinasyonunu bulmak ve bunları doğru zamanda doğru sıcaklığa ısıtmaktır. İstenilen sonucu elde edebilmenin tek yolu budur. Gözenek paylarının kontrolü, gözenek büyüklüğü ve gözeneklerin dağılımı tahmin edilemez.

Bu nedenlerden dolayı, basit üretim teknolojisi ile gözenekli, dökme alüminyum değerli bir alternatiftir. Farklı boyutlardaki gözenekler arasında geniş aralıklı iyi tanımlanmış gözenek boyutları, istenen uygulama için optimum gözenekliliğin üretilmesini mümkün kılar. Gözenekli ve gözeneksiz parçaların ayrılmaz kombinasyonu, mümkün olan en basit şekilde geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Gözenekli alüminyumun, metal köpüğüne göre aşağıdaki bazı avantajlara sahiptir:

- Hacim porozitesinin kontrolü
- Gözenek ölçüsünün kontrolü
- Gözenek dağılımının kontrolü / homojen yapı
- Gözenekli alüminyum üretimi için iki tür tuz kullanılır. Küresel bir şekle sahip parçacıklara ve bir kayacık şekline sahip tuzlardır[1-55].

#### **5.4.4. Polimer köpük üretimi**

Gözenekli alüminyum üretim teknolojisi, diğer gözenekli malzemelerin üretim teknolojilerinden farklıdır. Teknolojinin yüksek esnekliği ve uyarlanabilirliği sayesinde, gözenekli alüminyum çeşitli uygulamalar için diğer gözenekli malzemelerle başarılı bir şekilde rekabet edebilir. Çoğu durumda, gözenekli alüminyum sinterlenmiş metaller, gözenekli seramikler, gözenekli plastikler, ağlar ve tel malzemeler için değerli bir alternatiftir [55].

#### 5.4.5. Gözenekli seramikler

Seramik ürünlerin bazı kullanım alanları ve yeterli kullanım ömrüne sahip olabilmesi için, belli duvar kalınlığına sahip olmaları gerekir. Bu nedenle ağırdır ve kırılıgandır özenle işlenmesi gerekmektedir.

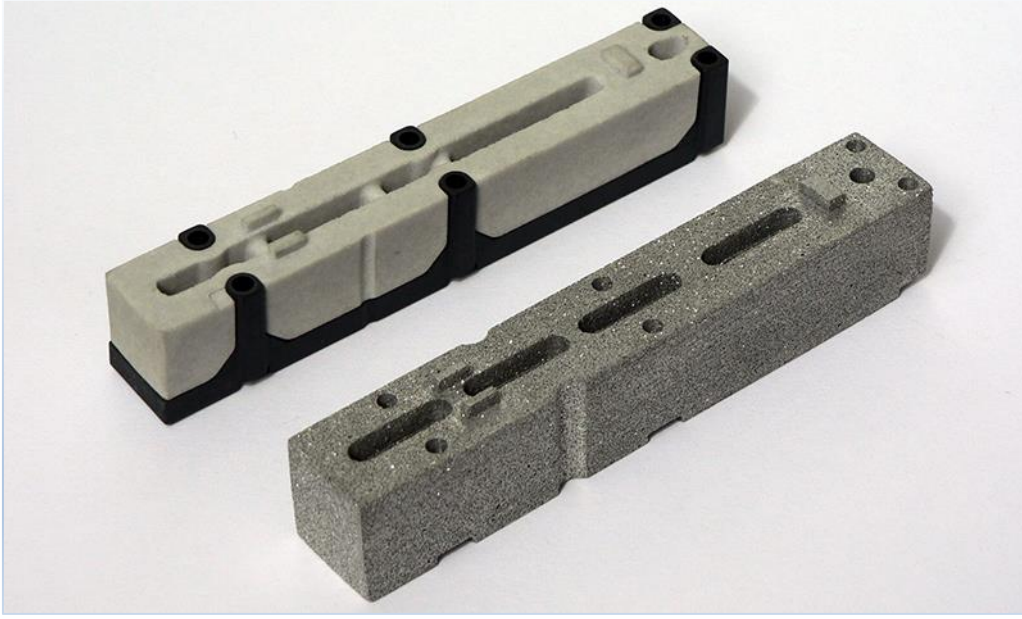
Gözenekli alüminyum Seramik ürünlerin bazı kullanım alanlarında 5-10 kat daha küçük duvar kalınlığına, 7-15 kat daha az ağırlığa ve aynı zamanda daha yüksek dayanıma sahiptir, titreşime ve darbelere karşı dayanıklıdır. Gözenekli alüminyum Seramik parçalara göre daha yüksek çalışma basıncı sahiptir [55].



Resim 5.2. Gözenekli Seramik ve Gözenekli alüminyum parçalar [55].

#### 5.4.6. Gözenekli plastikler

Gözenekli plastiklere kıyasla, gözenekli alüminyum ürünleri daha yüksek mukavemete ve daha yüksek çalışma sıcaklığına sahiptirler ve muhafaza gerektirmezler. Bazı uygulamalarda gözenekli alüminyumun kullanımı filtrelerde ve susturucularda daha uzun ömürlüdür ve daha yüksek basınç altında çalıştırılabilir ve gözenekli alüminyum yanmazdır [55].



Resim 5.3. Gözenekli plastik ve gözenekli alüminyum parçalar [55].

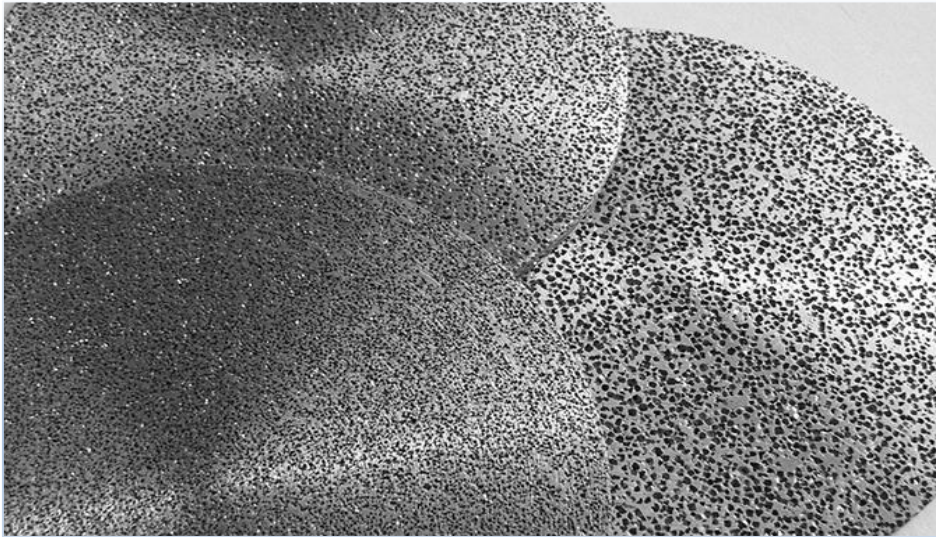


## 6. GÖZENEKLİ YAPILARIN KULLANIM ALANLARI

### 6.1. Filtreler ve Filtre Elemanları Olarak Metalik Köpükler

Sinterleme teknolojisiyle filtrelerin üretimi uzun zamandan beri bilinmektedir ve sıklıkla kullanılmaktadır. Sinterlenmiş filtrelerin daha geniş kullanımı, sinterleme teknolojinin bazı önemli kısıtlamaları ile önlenir. Gözenekli alüminyum filtreler sinterlenmiş filtreler için bir alternatiftir ve bu filtre ve filtre elemanları neredeyse sınırsız şekillerde ve hemen hemen tüm boyutlarda üretilir.

Gözenekli alüminyum kristal tuzlar yardımıyla üretilir. Bu teknoloji, gözenekli metaller mükemmel özellikteki bir yapı sağlar. Gözenekli alüminyumun yapısı ve bilinen sinterlenmiş metallerin yapıları birbirlerinin tamamlayıcısıdır. Sinterlenmiş metal içindeki gözenekler, gözenekli alüminyumdaki metale karşılık gelir ve bunun tersi de geçerlidir. Teorik olarak, sinterlenmiş metallerin minimum porozitesi % 26 ve gözenekli alüminyumun maksimum porozitesi % 74'tür. Gerçekte, gözenekli alüminyum, tuz parçacıklarının kusurlu istiflenmesi nedeniyle % 55-65 gözeneklidir. Yüksek gözeneklilik ve özel gözenek yapısı sayesinde gözenekli alüminyum filtre, sinterlenmiş filtreden çok daha uzun bir servis ömrüne sahiptir [9-10].



Şekil 6.1. Filtrelerde kullanılan gözenekli Alüminyum döküm parçalar [55].

Son derece gözenekli malzeme olan gözenekli Alüminyum filtrelemede çok çeşitli kullanım alanları bulmuştur. Başlıca kullanım alanlarına birkaç örnek:

- Gaz filtresi                      Yağ filtresi
- Hava filtresi                      Su filtreleri
- Atık su filtresi                      Kimyasal filtreler
- Sıvı filtreler                      Sıcak gaz filtresi
- Hidrolik filtreleri                      Temizleme filtresi

## 6.2. Susturucu Olarak Metalik Köpükler

Gözenekli alüminyum, silah susturucu üretimi için ideal olan tamamen geçirgen bir metaldir. Ateşin güçlü ve keskin bir tonu, barut yandığında oluşan sıcak gazların hızlı bir şekilde genişlemesinden kaynaklanır. Hızın ve bu gazların sıcaklığının azaltılması, atış gürültüsünün azalmasına yol açar. Geleneksel susturucular, gazların hızlarını ve sıcaklıklarını düşürdüğü özel bölmeler kullanır. Bundan sonra, gazlar susturucuyu güçlü sesler oluşmadan terk eder. Gözenekli alüminyumdan gözenek içinde akışkan veya gaz içinde gözenekli alüminyum, silah susturucuları için en uygun malzemelerden biridir. Bu malzeme birbirine bağlı hücrelerin % 55-65'ini oluşturur. Gözenekli alüminyum her yönden gazlara karşı geçirgendir. Gözeneklerin özel şekli ve yapısı, gaz ve gözenekli alüminyum matrisinin uzun bir temas süresi sağlar. Gaz akışları girdaplı karmaşık yolları takip eder. Farklı gözenek boyutlarının kombinasyonu, gaz hareketini çok hassas bir şekilde kontrol etmeyi mümkün kılar. Ek olarak, gözenekli alüminyum ürünler ne kadar karmaşık olursa olsun her şekilde yapılabilir.

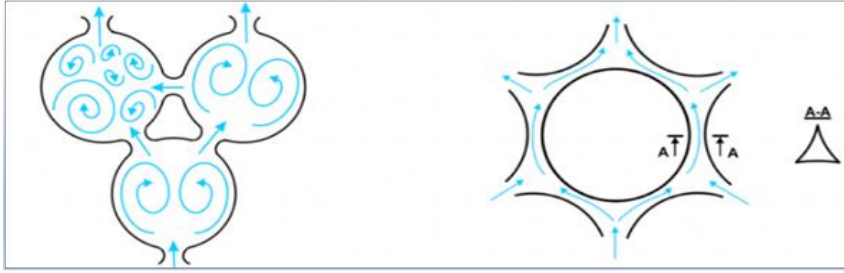
Gözenekli alüminyum yüksek bir iç yüzeye sahiptir. Gaz akışının türbülansı ve gaz akış hızının azaltılması, gazlar gözenekli yapı boyunca akarken meydana gelir. Alüminyum çok iyi bir ısı ileten metaldir ve bu sayede gazların hızla soğutulmasını sağlar. Gözenekli alüminyum yaklaşık % 55-65'lik bir hacim gözenekliliği sayesinde düşük ağırlığa sahiptir, ancak aynı zamanda döküm yapısı sayesinde yüksek bir dayanıma sahiptir. Tabanca susturucuları için gözenekli alüminyumun ek bir avantajı, gözenekli ve gözeneksiz parçaları tek parça halinde bir araya getirmenin mümkün olmasıdır.

Silah susturucuları için gözenekli alüminyum - yalıtım performansı, ağırlık ve sağlamlığın mükemmel kombinasyonu sağlar [55,57].

### 6.3. Isı Transferi Uygulamalarında Metalik Köpükler

Gözenekli alüminyum ısı eşanjörü olarak kullanım için ideal bir malzemedir. Isı transferi için esas olarak iyi termal iletkenlik alüminyum nedeniyle kullanılır. Gözenekli alüminyumun ısı değişim kapasitesi geleneksel olarak işlenmiş alüminyumdan daha yüksektir, çünkü gözenekli alüminyum hacme göre çok büyük bir iç yüzey alanına sahiptir.

Sinterleme teknolojisinde yüksek hacimli gözeneklilik ve yeterli dayanıma sahip alüminyum ürünler üretmek henüz mümkün değildir. Gözenekli alüminyumun bir başka avantajı, termal iletkenliği de destekleyen döküm yapısıdır. Sinterlenmiş metallerde, preslenmiş bilyaların temas noktalarında ısı direnç oluşturulur. Şekil 6.2



Şekil 6.2. a)Gözenekli alüminyum b)Sinter metaldeki ısı transferi [57].

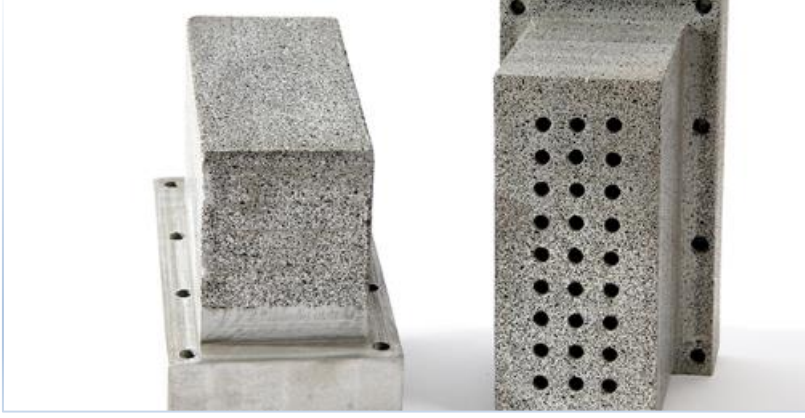
Yüksek hacimli gözeneklilik veya büyük iç yüzey nedeniyle, konvektif ısı transferinde bir ısı eşanjörü olarak da kullanılmaktadır. Su veya diğer sıvılar, hava veya gaz gözenekli alüminyumdan akar ve bu da sıcaklığı büyük iç yüzeyden en iyi şekilde alır. Bu sıcaklık bir katıya veya benzerlerine bir sıvıya iletilebilir.

Ayrıca gözenekli alüminyumun soğutulması için idealdir. Soğutulacak nesne doğrudan gözenekli alüminyuma tutturulmakta ve gerektiğinde havalandırma gerektiğinde ısı, büyük iç yüzeyden dış havaya optimum şekilde yayılmaktadır.

Yüksek ısı kapasitesi ve ısı iletkenliği nedeniyle, alüminyum çeşitli ısı işlemlerde sıklıkla kullanılır. Gözenekli alüminyum, verimli ısı eşanjörleri oluşturmak için ek avantajlar sunar. Özellikle malzemenin düşük ağırlığının önemli olduğu sektörlerde [55,57].

- Elektrikli araçlarda
- Otomotiv endüstrisi

- Uçak sanayii
- Uzay endüstrisi



Şekil 6.3. Isı transferi için gözenekli alüminyum döküm parçaları [55].

#### 6.4. Yalıtım Uygulamalarında Metalik Köpükler

Sandviç gibi yarı mamul alüminyum köpükler hafif yapılar için idealdir. Gözenekli alüminyum, % 55-65 gözenekliliğe ve  $1.0-1.2 \text{ g / cm}^3$  yoğunluğa sahip hafif bir malzemedir.

Hücreli yapı nedeniyle, gözenekli alüminyum çok hafiftir, iyi titreşim sönümlemesi, yüksek enerji emme kapasitesi ve katı malzemedir. Gözenekli alüminyumun özellikleri büyük ölçüde gözeneklerin boyutuna bağlıdır. Çok farklı özelliklere sahip gözenekli malzeme elde etmek için farklı tuz fraksiyonu kullanılabilir.

Hafif bir malzeme olarak gözenekli alüminyum, beton ve yapısal çelik gibi geleneksel malzemelerden daha pahalıdır [55].



Şekil 6.4. İnşaatlarda hafif malzeme olarak kullanılan gözenekli alüminyum parçalar [55].

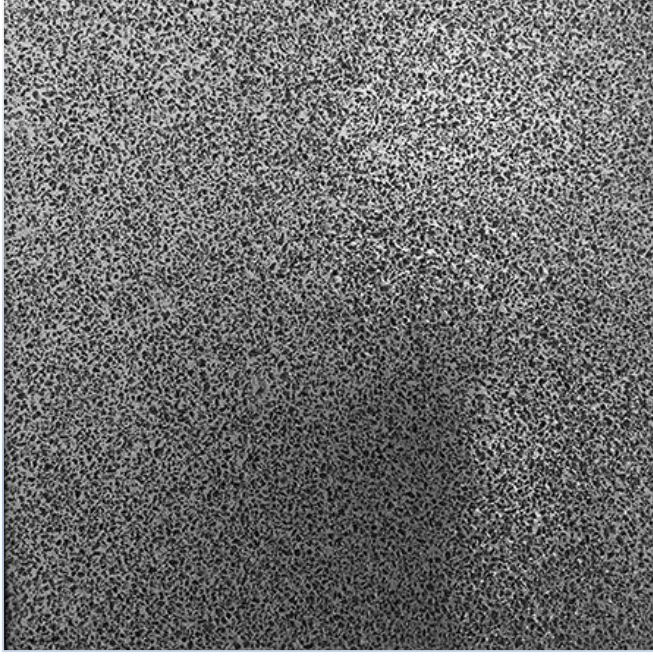
### 6.5. Vakumla Uygulamalarında Metalik Köpükler

Vakum şekillendirme ve termoform, termoplastiklerin oluşturulması için bir prosestir. Bu işlemlerde, genellikle vakum delikleri veya buhar nozulları içeren özel alüminyum kalıplar kullanılır. Bu amaçlar için gözenekli metaller giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Gözenekli alüminyum köpük ve termoform aletleri üretimi için idealdir.

Gözenekli alüminyum köpük ve termoform aletleri üretimi için mükemmel şekilde uygundur:

- Tamamen geçirgendir, vakum delikleri delme ihtiyacını ortadan kaldırır
- Alüminyum çok iyi bir ısı ileten metaldir ve bu nedenle parçanın hızlı bir şekilde soğutulmasını sağlar
- Döküm yapı sayesinde yüksek mukavemet, böylece gözenekli alüminyumdan yapılmış kalıpların kullanım ömrü uzundur [55].



Şekil 6.5. Vakumlama kalıplarında kullanılan gözenekli alüminyum parça [55].

#### Karmaşık şekilli parça uygulamaları

Katı alüminyumdan yapılan kalıpların üretiminde çok karmaşık şekiller genellikle mümkün değildir. Bunun nedeni, bu tür formlarda vakum veya buhar için kanallar oluşturamamasıdır; bu tür kanallara vakum veya buhar vermek de çok zor olabilir.

Gözenekli alüminyumdaki gözeneklerin düzgün dağılımı ve her yöndeki geçirgenliği sayesinde, en karmaşık şekilleri sınırlama olmaksızın üretmek mümkündür [55].

#### Vakum ve buharının dağılımı

Gözenekli alüminyumun yüzeyi gözeneklerin yaklaşık% 50'sinden oluşur. Bu, her noktada eşit bir vakum veya buhar beslemesine olanak sağlar. Sonuç olarak, plastik ürünün özelliklerinin homojenliği, vakum ve buhar için nispeten seyrek olarak düzenlenmiş kanalların kullanımına kıyasla çok yüksek hale gelir [57].

Hafiflik: Düşük gözenekli alüminyum ağırlığı, köpük ve termoform parçaları için hafif kalıpların üretimine izin verir. Tüm yapı büyük ölçüde basitleştirilmiştir ve ayrıca, gerekli vakum ya da buhar temini için hiçbir boru / hortum bulunmadığından ağırlık da azalmaktadır. [55]

Kolay prototip üretimi: Özel işleme koşullarında (yüksek dönme hızı, ince kesim ve keskin kenar) gözenekli alüminyum tornalarda, frezeleme tezgâhlarında ve ayrıca diğer makinelerin yardımıyla işlenebilir. Bu, prototip üretimi veya seri üretim için hızlıca karmaşık kalıplar oluşturmaya olanak sağlar [55].

Yüksek Çalışma sıcaklığı: Gözenekli alüminyum bir dökümle üretildiği için herhangi bir bağlayıcı malzemesi, tutkal veya reçine gibi bir bağlayıcı madde içermediğinden yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir 250-550C° dereceye kadar [55].

### **6.6. Pnömatik ve Basıncı Hava Susturucularında Metalik Köpükler**

Otomatik üretimde, hareket ettirilmesi ve kontrol edilmesi için basınçlı hava gerektiren cihazlar kullanılır. Böyle bir sistemin çalışma döngüsünün sonunda, basınçlı hava çevreye salınır. Basınçlı havanın yüksek hızı, çalışanların refahını, verimliliğini ve sağlığını etkileyebilecek yüksek bir gürültü oluşturur. Bu tür pnömatik cihazların gürültü seviyesini azaltmak için, gözenekli malzemelerden yapılmış susturucular (hava susturucuları / pnömatik susturucular) kullanılır.

İyi bir susturucu sadece istenen ses seviyesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda cihazın hızının ve performansının düşmesini de önlemektedir. Gözenekli alüminyum susturucuları her iki durumu da karşılar. Teknolojinin geniş esnekliğinden dolayı, gözenekli alüminyum, gürültü azaltma problemleri için en iyi çözümlerden biridir. Gözenekli alüminyum susturucular, pnömatik silindirlerde, valflerde, hava motorlarında, kompresörlerde, pnömatik aletlerde ve diğer pnömatik ekipmanlarda kullanılabilir. Susturucular yalnızca egzoz havasının gürültü seviyesini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda pnömatik sistemi vanadan girebilecek toz ve kirden de korur [55].

### **6.7. Akışkan Yataklarda Metalik Köpükler**

Toz halindeki malzemeleri karıştırmak, iletmek, kurutmak veya soğutmak için dökme malzemeler akışkanlaştırma yoluyla akışkanlaştırılarak sıvı benzeri bir duruma getirilir.

Toz halindeki, parçacıklar yükselen gaz akışlarının (çoğunlukla sıkıştırılmış hava) etkisi altında kayan bir durumda olduğunda akışkan halde (akışkan yatak olarak da adlandırılır) olabilir. Akışkan yatak oluşturmak için delikli veya gözenekli malzemeler kullanılır. Bu

malzemeler toz malzemenin bulunduğu yüzey üzerinde birçok küçük hava akımına neden olur. Yerçekimi ve hava jetleri basıncı parçacıklar üzerinde etkilidir. Partiküllerin düşmemesini sağlamak için, ince partiküllerin boyutuna ve kütlesine bağlı olarak havayı belli bir hızda geçirmek gerekir.

Bu durumda, hava-toz karışımı, bir sıvının özelliklerine benzer, diğer şeylerin yanı sıra, küçük bir eğimde "akabilir". Bu özellik genellikle toz halindeki malzemelerin taşınması için pnömatik taşıma sistemlerinde kullanılır. Hareket, tozun taşıma kanalında periyodik olarak akışkanlaştırılmasıyla da organize edilebilir. Bu durumda, belirli aralıklarla bir akışkan yatak (akışkan yatak) oluşturan gözenekli alanlar kullanılır. Aynı zamanda, askıya alınmış parçacıkları hareket ettirmek için tüm kanal boyunca bir hava akımı yaratılır. Gözenekli bölümlerin akışları ve yerleri hesaplanır, böylece toz bir sonraki gözenekli bölüm bölgesinde yerleşmeye başlar ve gözenekli yüzey boyunca radyal akışlarla tekrar kaldırılır [55].

Gözenekli alüminyumdan yapılan ürünler, akışkanlaştırılmış akışkan yatak sistemlerinde kullanım için akışkanlaştırılmış yatak olarak uygundur.

Akışkanlaştırma için gözenekli alüminyumun avantajları:

- Yüksek gözeneklilik (% 55-65)
- Gözeneklerin her noktaya dağılması
- Ayarlanabilir gözenek boyutu
- Karmaşık şekilli yüzeyler üretme imkânı

Gözenekli alüminyum, muntazam bir gözenek dağılımına sahip geçirgen bir malzemedir. Pürüzsüz (düz) yüzey, homojen bir hava akışı dağılımına ve böylece dökme malzemenin tamamen homojen bir şekilde gevşemesine izin verir.

İhtiyaçlarınıza göre, gözenek ebatları istenilen ebatlarda üretilir.

Gözenekli ve gözenekli olmayan parçaların ayrılmaz döküm bağlantısı, gözenekli alüminyum parçaların akışkan yatak sistemlerine kolayca dâhil edilmesini sağlar. Kalıplanmış yapısı sayesinde ürünler dayanıklılık yükleri, basınç tepeleri, şok, döngüsel ve titreşim yüklerine karşı çok dayanıklıdır.

Geri yıkama, ultrasonik veya mekanik ve kimyasal temizlik ile kolay temizleme imkânı sağlar [55].

### **6.8. Vakum Masaları ve Bağlama Sistemlerinde Metalik Köpükler**

Vakum masaları iş parçasının hızlı bir şekilde sıkıştırılması ve gevşetilmesi için kullanılır. Takılması zor veya imkânsız olan ince ve esnek malzemelerin işlenmesinde de kullanılırlar. Ayrıca gözenekli plaka ve levhalar ile yivli boru ve profillerin üretiminde de kullanılmaktadır.

Vakum tablasının vakum haznesindeki atmosferik basınç ile basınç arasındaki farktan dolayı tutar. Vakum aynası üzerindeki sıkma kuvveti, iş parçasının yüzeyinin altındaki vakum plakasındaki deliklerin alanlarının toplamına ve vakum pompasının üretebileceği basınç farkına bağlıdır.

Vakum masaları için gözenekli alüminyum levhalarda, gözenekler, vakum plakasının her bir noktasında ve herhangi bir küçük alanda yüzeyin% 55-65'ini kaplar.

Bu, küçük gözenek büyüklüğü ve gözenekli alüminyum yüzeyindeki gözeneklerin eşit dağılımı nedeniyle elde edilir.

Gözenekli alüminyumun bu özellikleri maksimum sıkma kuvveti sağlar ve iş parçasını vakum tablasının herhangi bir yerine ve herhangi bir pozisyonuna yerleştirmenize izin verir.

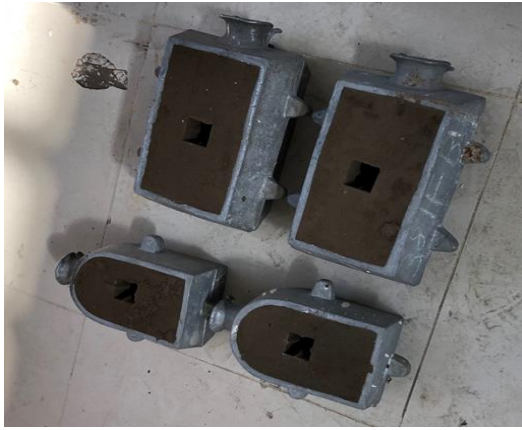
Gözenek boyutlarını ve vakum plakasının kalınlığını değiştirebilme özelliği sayesinde, sıkıştırma kuvvetini ayarlamak için tam olarak gereken zamanı ayarlanabilir [55].



## 7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Geleneksel döküm yöntemiyle açık gözenekli parçaların üretimi, deneysel çalışmalarda klasik döküm yöntemi ile yapılmıştır. Dökümde AFS 70 kumu kullanılmıştır %10 kil, %5 su ve %85 Silis kumu ilavesiyle 10dk. birlikte karıştırılarak döküm kumu hazırlanmıştır.

Farklı boyutlardaki açık gözenekli metalik köpük üzerine yapılan deneysel çalışma AlSi alaşımı kullanılarak geleneksel döküm yöntemiyle yapılmıştır. Kalıplar yaş kumundan üretilirken, gözenekler de maçalarla üretilmiştir.



Resim 7.1 Kum döküm kalıpları



Resim 7.2. Kristal tuzların kalıp içinde dizilimi

### 7.1. Malzeme

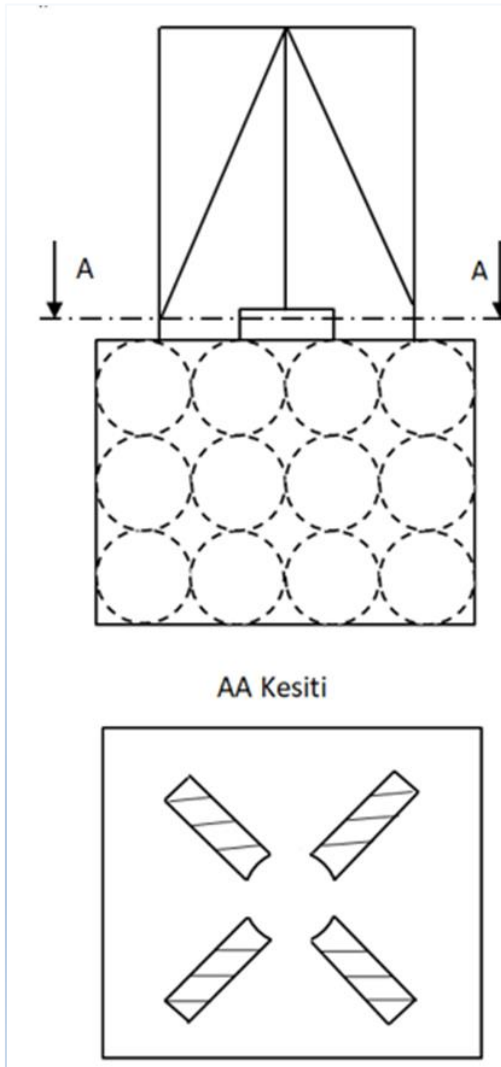
Açık gözenekli metalik köpük malzeme üretiminde ETİAL-171 olarak isimlendirilen AlSi10Mg alaşımı, maça yapımında erime sıcaklığı yaklaşık 800 °C olan NaCl tuzu ve kalıp malzemesi olarak da yaş kum kalıp için AFS 70 boyutunda silis kumu kullanılmıştır. Döküm işleminde kullanılan alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Açık gözenekli metalik köpük üretiminde kullanılan alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu

| Element | Al (%) | Si (%) | Cu (%) | Mg (%) | Fe (%) | Mn (%) | Zn (%) |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Oran    | 87,63  | 10,21  | 0,047  | 0,340  | 0,586  | 0,482  | 0,243  |

### 7.2.1 Açık gözenekli metalik köpük üretimi

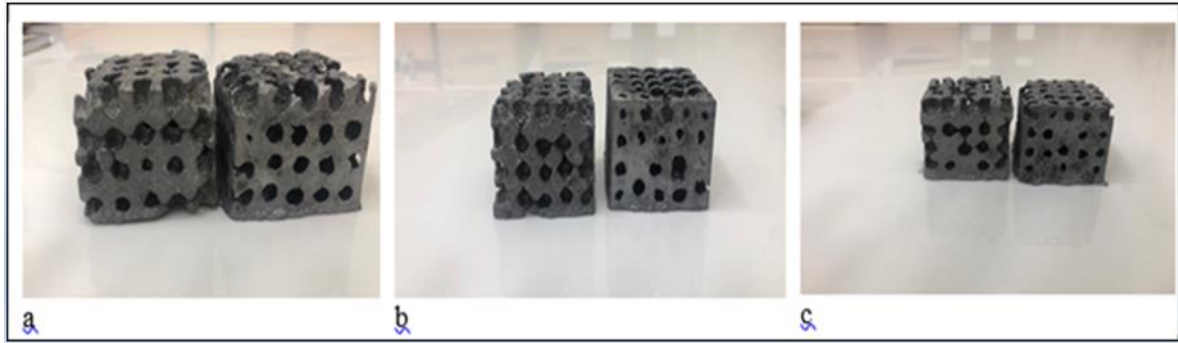
Metalik köpüğün gözeneklerini oluşturacak maçalar bir kalıp içerisinde nemli halde sıkıştırılarak küresel formlarda şekillendirildi. Gözenek miktarı kadar şekillendirilen tuz küreleri 60 °C sıcaklıkta 3 saat kurutma işlemine tabi tutuldu. Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilen model, dereceye alınarak yaş kumla şekillendirildi. Sıvı metal tarafından kalıp dolumunun dengeli olması için Şekil 7.1’de kesiti verilen yolluk tasarımı kullanıldı. Elde edilen kalıp boşluğuna, önceden şekillendirilip kurutulan tuz küreler basit kübik şekilde dizilerek kalıp kapatıldı ve döküm işlemi 750 °C sıcaklıkta gerçekleştirildi.



Şekil 7.1. Açık gözenekli metalik köpük üretimi için kalıp dizaynı [63]

Açık gözenekli yapı üretimi için yapılan deneysel çalışmalarda aynı dolgu faktörü farklı ebatlardaki modellerden faydalanılmış ve Resim 9.1’deki numuneler geleneksel döküm

yöntemi ile maçalı olarak elde edilmiştir. Akıcılık açısından sorun yaşamamak için silisyum miktarı yüksek alaşım tercih edilmiştir. İnce kesitli parçaların dökümünde sıvı metalin kalıbı tam dolduramama riski her zaman vardır. Silisyum alaşımlarında alaşımın viskozitesini düşürerek akıcılığı artırma özelliğine sahip bir elementtir [58, 59]. Yüksek akıcılığa sahip Al alaşımları, genellikle silisyum oranı yüksek olan alaşımlardır. Alaşımlama sadece ince kesite sahip parçaların dökülebilirliği için yeterli olmayabilir. Özellikle parçanın her noktasına dengeli sıvı metal akışını sağlayacak tasarımlar da önemlidir [60-56]. Parçaların üretilmesinde tasarlanan ve uygulanan kelebek yolluk sistemi sıvı akışını yüzey boyunca dağıtarak, dengeli bir dolum sağlamış ve parçaların hatasız elde edilmesine neden olmuştur, Şekil 7.1. Kelebek yolluk sistemi hem ince bir meme bağlantısı sağlamış, hem de farklı noktalardan sıvı metalin akışını sağlayarak metal katılaşmadan kalıbı tam doldurması için yeterli zamanı kazandırmış ve tam dolumu sağlayarak Resim 9.1'deki numunelerin üretimini sağlamıştır. Aynı zamanda kelebek yolluk, aynı kesite sahip geniş meme bağlantıları yerine aynı meme kesiti eşit kollara ayırarak parça üzerinde meme birleşme yüzeylerinin birim alanda küçülerek parçadan daha kolay ve deforme etmeden ayrılmasına imkân sağlamıştır.



Resim 7.3. Al alaşımından elde edilen döküm numuneleri; a) 12 mm gözenek çapı, b) 10 mm gözenek çapı c) 8mm gözenek çapı

## 7.2.2 Mekanik Testler

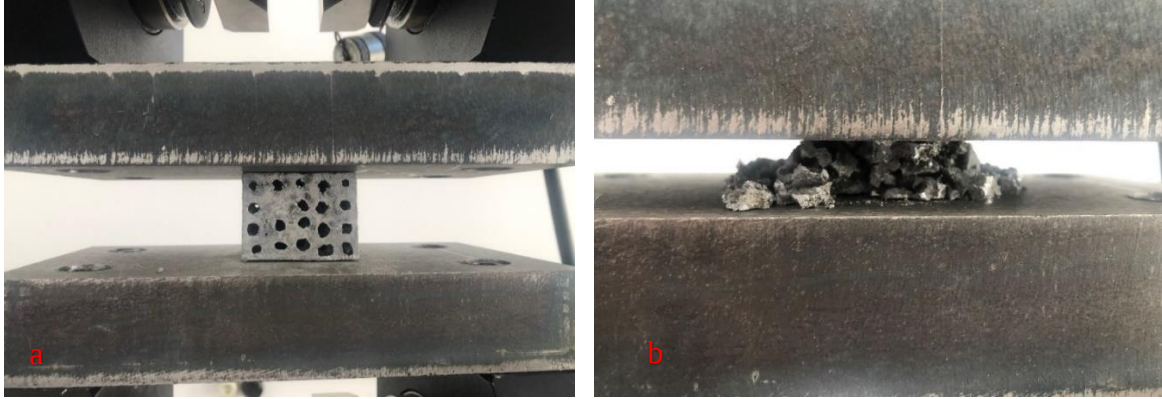
Elde edilen açık gözenekli numunelere mekanik test olarak düşme ve basma deneyleri uygulanmıştır. Düşme testinde, numunelerin üzerine belli bir ağırlığa sahip parça serbest düşme yapar ve numunedeki hasar incelenir. Düşme testinde yüksek hızlı çarpışmadan dolayı deformasyon mekanizmaları ve titreşimi gerçekleşemez. Bu nedenle çarpışma esnasında malzemeler gevrek kırılma davranışı sergilerler ve uygulanan yükün büyük bir kısmı malzemenin kırılmasında harcanır.

### 7.3. Basma Deneyi

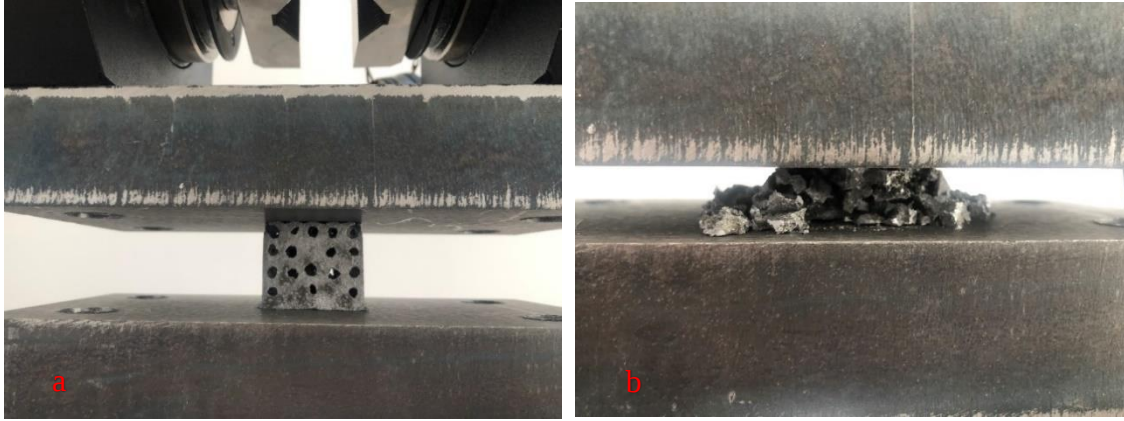
Elde edilen 12,10 ve 8 mm gözenek çapına sahip numunelere düşme deneyi için Instron Marka cihazda 2000 Joule enerji oluşturacak şekilde ISO 7765 standardına göre yapılmıştır. Basma testi, bir malzemenin yumuşak kırılma ve plastik akma davranışını ölçmektedir. Basma deneyi, ASTM-E-9 standardına göre yapılmıştır.

Basma Deneyi tüm numunelere Instron 8501 model Servohidrolik 50 kN basma kapasitesinde olan üniversaltest cihazında oda sıcaklığında deneyler yapılmıştır. Deneylerde cihazın başlık hızı 16mm/dak. hızında yapılmıştır. Cihazıyla 38mmlik plaka kalınlığında ve 6mm/dk. hızında oda sıcaklığında yapılmıştır. Gerilme ve yer değişim değerleri basma cihazındaki yazılımdan veri ve grafik olarak elde edilmiştir.

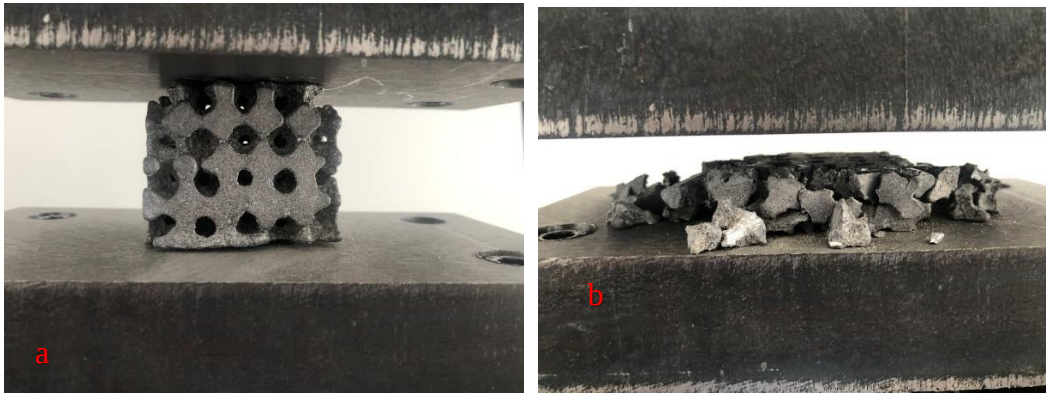
Açık gözenekli alüminyum parçalar üzerine uygulanan yüklemeler sonrasında numunelerin hücre duvarlarındaki deformasyonlar gözlenmiştir. 40X40X32 mm, 50X50X40mm, 60X60X48 mm boyutlarındaki açık gözenekli alüminyum numuneler kullanılmıştır. Resim 9.3-4-5 de deney öncesi ve sonrası numunelerin görüntüleri alınmıştır.



Resim 7.4. 8mm numunenin a) basma deneyi öncesi b) basma deney sonrası



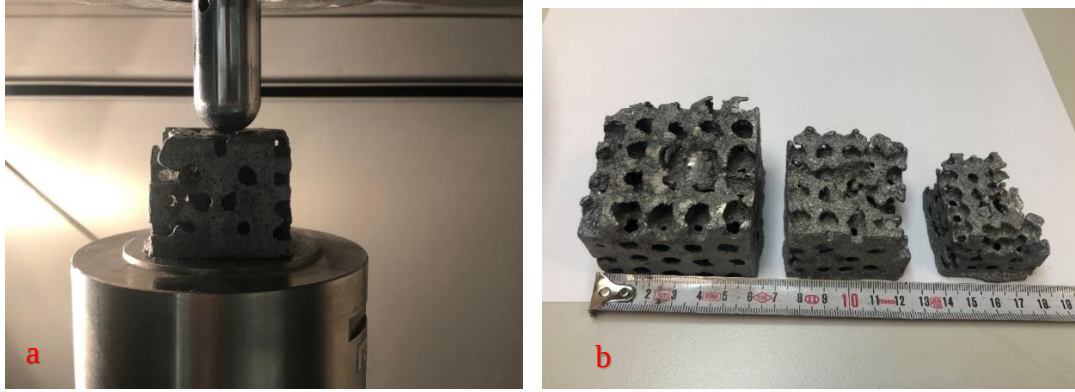
Resim 7.5. 10mm numunenin a) deney öncesi b) deney sonrası



Resim 7.6. 12mm lik numunenin a) basma deney öncesi b) basma deney sonrası

#### 7.4. Düşme Deneyi

Ağırlık düşürme ile darbe testi Instron Marka CEAST 9400 Serisi ile yapılmıştır. Ham madde numuneleri ve nihai bileşenlerin darbe performansının ölçmek amacıyla bu test numunelere uygulanmıştır. Küresel ucun düşme yüksekliği ve uygulanan yük miktarı 4.300 kg olarak uygulanmıştır.

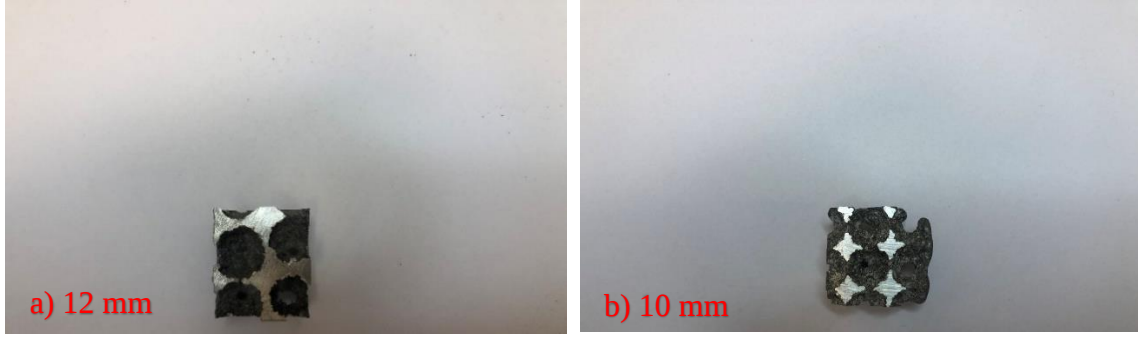


Resim 7.7. a) Düşme deney öncesi 8mmlik numune b) düşme deney sonrası numuneler

### 7.5. Mikroyapı Karakterizasyonu

Metalografik çalışmanın amacı, malzemelerin mikro yapılarının nicel ve nitel olarak incelenmesidir. Bu, numune hazırlama adımlarının ve farklı mikroskopi tekniklerinin uyumlu adımlarla sağlanmasıyla mümkündür. Test sonuçları, bir malzemenin mikroyapısı ve özellikleri hakkında bilgi sağlar. Laboratuvar teknikerlerin ayrıca güvenilir ve doğru sonuçlar üretmek için yüksek hassasiyete sahip ve profesyonel araçlara gereksinim duyar.

Köpüklerin mikro yapı incelemeleri ışık (Leica) mikroskobunda yapabilmek için Numunelerden aynı bölgelerden kesme cihazıyla küçük parlar alınmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemlerini düzgün bir şekilde yapabilmek için numuneler sıcak bakalite alındı. Işık mikroskobunda inceleme yapmak üzere sıcak bakalite alınan köpükler, sırasıyla 320, 600,1200 mesh'lik zımpara ile zımparalama ve parlatma cihazında su altında zımparalandıktan sonra 3  $\mu\text{m}$ 'lik elmas süspansiyon ve 0.02  $\mu\text{m}$ 'lik koloidal silika ile parlatılmıştır. Metalik köpüklerin mikro yapı görüntüleri elde edilmiştir.



Resim 7.8. Döküm yöntemiyle elde edilen açık gözenekli alüminyum metalik köpük numune kesitleri; a) 12 mm gözenek çaplı numune b) 10 mm gözenek çaplı numune



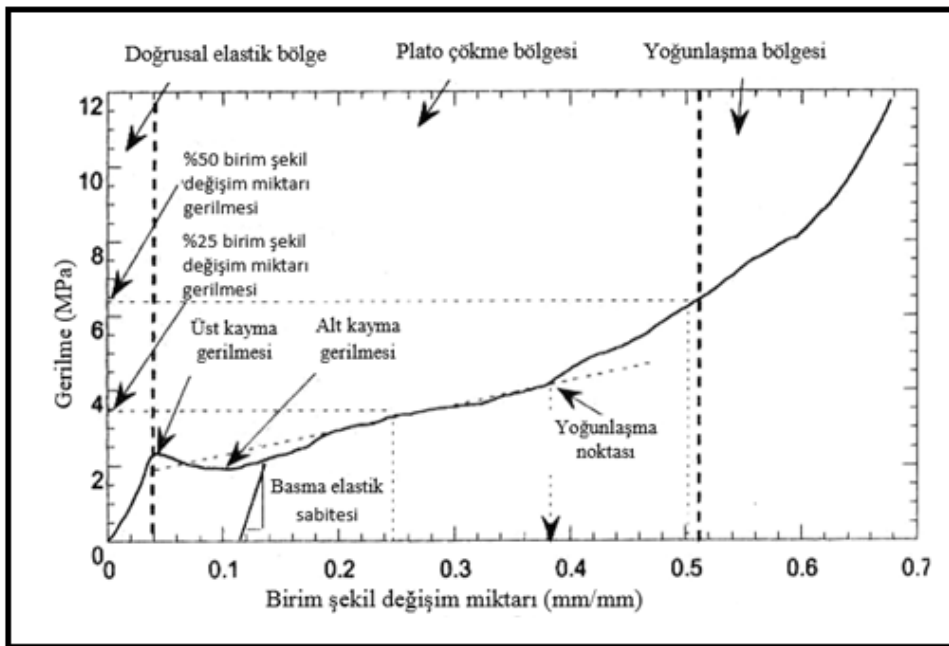
Resim 7.9. Döküm yöntemiyle elde edilen 8 mm gözenek çapına sahip alüminyum metalik köpük numune kesiti.



## 8. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 8.1. Basma Deneyi Sonuçları

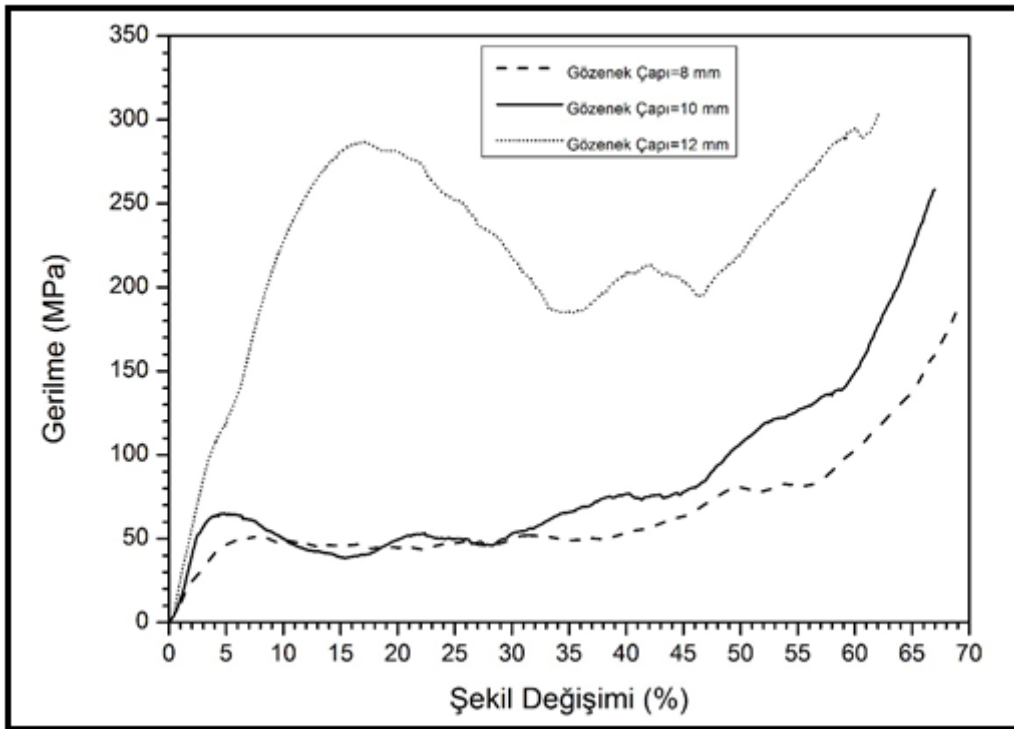
Üretimi gerçekleştirilen gözenekli metalik numuneler her bir maçanın bir araya gelerek oluşturduğu yapıdan elde edilir. Yapı içerisindeki maça ile elde edilen her bir boşluğu hücre denilmektedir. Hücre ise hücre duvarlarından oluşmaktadır. Maçalar birbirine temas ettiği için yapı olarak açık gözenekli metalik köpük olarak adlandırılmaktadır. Bu nedenle hücre duvarı olarak isimlendirilen hacimler yapı içerisinde maçaların birbirine temas etmesinden sonra sıvı metalin doldurmuş olduğu hacimlerdir. Uygulanan yük bu dolu hacimler tarafından karşılanır. Açık gözenekli metalik köpüklerin basma deneyinde tipik bir gerilme-birim şekil değiştirme grafikleriyle dayanım yorumlanır (Şekil 8.1).



Şekil 8.1. Metal köpüklerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği [62]

Basma deneyinde Elastik modülü, gerilim ile şekil değişiminin lineer olarak devam ettiği bölge olarak gösterilebilir. Açık gözenekli metalik köpüklerde gerilim-şekil değişimi grafiği incelendiğinde lineer elastiklik, çökme ve yoğunlaşma olmak üzere üç bölgeden oluştuğu söylenebilir. Açık gözenekli metalik köpük lineer değişim gözlemlendiği bölgede elastik deformasyona uğrar. Bu bölgede yapısal olarak hücre duvarlarında bükülme ve zamanla kaymanın başlamasıyla sonlanır. Elastik deformasyonun sonlanması ile birlikte yapıda çökme başlar. Grafik üzerinde gösterilen (Şekil 8.2) çökme bölgesinde plastik

deformasyon gözlemlenir. Homojen gözenek yapıya sahip metalik köpüklerde çökme bölgelerinde plastik deformasyon gerilmesi uğramaktadır. Metalik köpüklerde homojen olmayan hücre boyutlu numunelerde önce zayıf hücre duvarların çökmesi daha sonrada kalın olan hücre duvarların çökmesine sebep olur. Bu nedenle zamanla yatay seyir izleyen gerilim, şekil değişimindeki artışla birlikte hücre duvarlarının tamamen çökmesiyle gerilmeye tekrar artışa neden olarak yoğunlaşma bölgesine geçiş gözlemlenir. Açık gözenekli alüminyum metalik köpük numunelerin basma deneyi grafiğinde akmadan sonra gözlenen çökme (plato ) bölgesinde meydana gelen pikler veya ikincil yükseltiiler gözenek katmanlarındaki çökmeleri göstermektedir. Buradan her bir yükselti/pikin katman sayısını gösterdiği söylenebilir. Gerilmadaki her bir artış katmanın göstermiş olduğu dayanımı ifade etmektedir. Elastik ve çökme bölgelerinin altında kalan toplam alan metalik köpük malzemelerin enerji emme kapasitesinin hesabı için kullanılmaktadır [4,62]. Açık gözenekli metalik köpüklerdeki enerji emme miktarı basma deneyi ile elde edilen verilerle ve enerjisi çökme bölgesindeki plastik deformasyonla karşılanabilir.



Şekil 8.2. Basma deneyinde gerilme –şekil değişimi ilişkisi

Alüminyum alaşımından yaş kalıba döküm yöntemi ile elde edilen açık gözenekli metalik köpük numunelerin basma deneyleri sonucunda elde edilen gerilme –şekil değişim grafiği Şekil 8.2 Şekilde görüleceği üzere 12 mm çapında ve boyutları 60X60X48 mm olan

numunelerden 102 Mpa elastik limit ve 280 Mpa akma değerleri elde edilirken, 10 mm çapında 50X50X10 mm olan numunelerden 54 Mpa elastik limit ve 67 Mpa akma değerleri elde edilirken, 8 mm çapında ve boyutları 40X40X32 mm olan numunelerden 12 Mpa elastik limit ve 54 Mpa akma değerleri elde edilmiştir. Çizelge 8.1’de de görüldüğü gibi 12 mm numunede en yüksek basma gerilmesi elde edilmiştir. Gözenek çapının büyümesiyle bütün numunelerde elastik limit ve akma değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerde eşit tutulan kesit alanındaki hücre sayısı ile üretilen numunelerde artan gözenek çapı hücreler arasında kalan hücre duvarının kalınlaşmasına ve etkin yüzey alanının artmasına neden olduğundan elastik limit ve akma noktasındaki artışların artan kesit alanından kaynaklandığı düşünülmektedir. Basma deney sırasında farklı gözenek çapına sahip (12, 10 ve 8 mm) numune yüzey alanından boşluk alanlarının çıkarılmasıyla elde edilen ve yüke maruz kalan etkin yüzey alanları sırasıyla 774, 537 ve 344 mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Buradan da görüleceği üzere gözenek boyutunun artmasıyla elastik limit ve akma değerlerindeki artış etkin yüzey alanının büyüklüğüyle doğru orantılı olduğu görülmüştür.

Çizelge 8.1. Basma deneyinde köpük malzemede, elde edilen mekanik özellikler

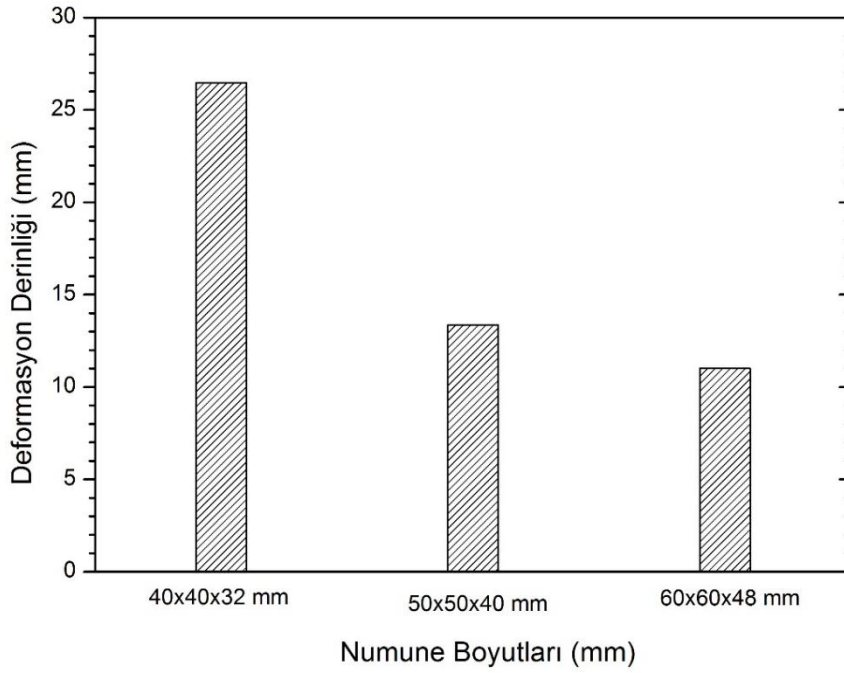
| Gözenek Çapı (mm) | Elastik Limit (Mpa) | Akma Noktası (Mpa) |
|-------------------|---------------------|--------------------|
| 12                | 102                 | 280                |
| 10                | 54                  | 67                 |
| 8                 | 12                  | 54                 |

Basma deneyinde elde edilen gerilme-şekil değişimi grafikleri gözenekli metallerin tipik basma deneyiyle benzerlik göstermektedir, Şekil 8.1 [61, 62]. Bu sonuçlara göre hem numune boyutu hem de gözenek çapının ve buna bağlı olarak ta etkin yüzey alanının maksimum yük ve şekil değişimi üzerine etkili olduğu yapılan deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Ayrıca yaş kum kalıba döküm yöntemiyle elde edilen açık gözenekli numunelerin görüntüleri de (Resim 7.4 ve 7.5).

## 8.2. Düşme Deneyi Sonuçları

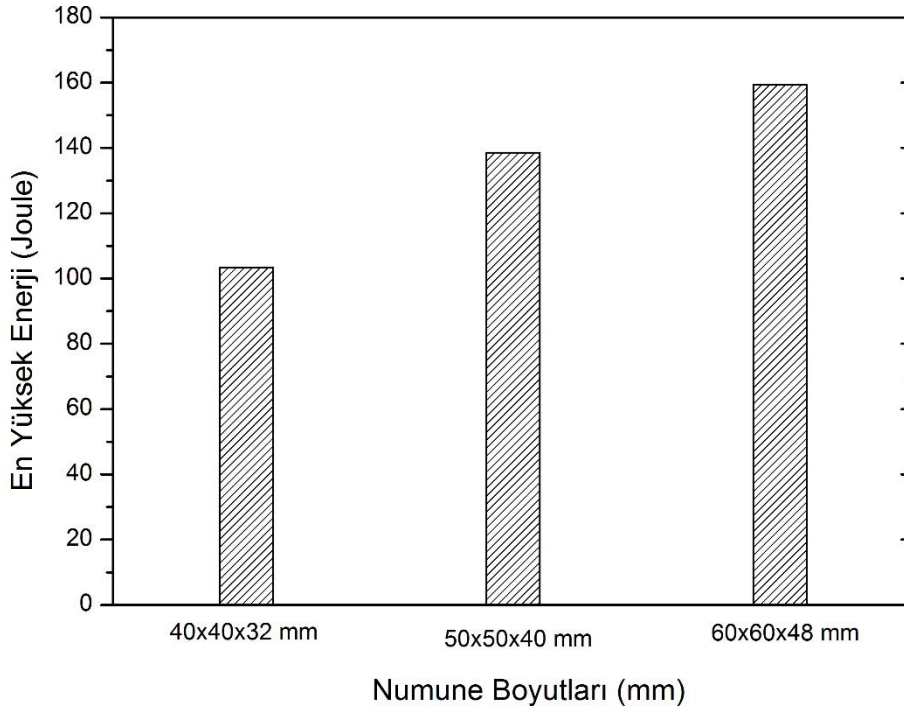
Düşme deneyi gözenekli malzemelere belirli yükseklikten malzeme yüzeyine batıcı küresel ucun bırakılması ve elde edilen izin derinliği ile malzemelerin göstermiş olduğu deformasyon miktarını derinlik ve sönümlendiği enerji olarak değerlendiren bir mekanik test yöntemidir. Düşme deneyi 12, 10 ve 8 mm gözenek çapına sahip açık gözenekli

döküm numuneler üzerine uygulanmıştır. Yapılan düşme deneylerinde farklı gözenek çapına sahip numunelerde farklı düşme derinlikleri ve absorbe edilen enerji miktarları tespit edilmiştir. Bu sonuçlarla küresel ucun numune yüzeylerinde (gözenek çapı 12, 10 ve 8 mm) bırakmış olduğu iz derinliği sırasıyla 11, 13,35 ve 26,45 mm olarak ölçülmüştür, Şekil 8.3. Bu değerler incelendiğinde gözenek büyüklüğü arttıkça düşme derinliğinde bir azalma gözlemlenmiştir. Bu azalmanın temel sebebi gözenek çapına bağlı olarak oluşan hücre duvarıdır. Numunelerin gözenek çapındaki artışı temas yüzeyleri arasında kalan açık gözenekli hücre duvarlarının kalınlığını arttırmıştır. Yapılan literatür çalışmalarında genellikle köpürtme yöntemi ile üretilen kapalı gözenekli, farklı gözenek boyutuna sahip homojen bir gözenek dağılımına sahip olmayan ancak nispeten eşit ve ince hücre duvarına sahip çalışmalardan ibarettir [61, 62].



Şekil 8.3. Düşme deneyinde Deformasyon derinliği

Düşme deney testinde düşme derinliğinde olduğu gibi açık gözenekli numunelerin enerji absorbe miktarları da farklılık arz etmektedir, Şekil 8.4. Numunelerdeki gözenek çapının artması ile absorbe edilen enerji miktarlarında artmıştır. 12mm gözenek çapına sahip numune 189 Joule enerji absorbe ederken, 10 mm gözenek çapına sahip numune 138 Joule absorbe etmiş ve 8 mm gözenek numunelerde ortalama 103 Joule enerji absorbe ettikleri Şekil 8.4'te görülmektedir. Deney sonuçlarından görüldüğü üzere artan gözenek çapıyla birlikte deformasyon derinliği azaldığından absorbe edilen enerji miktarı artmaktadır.



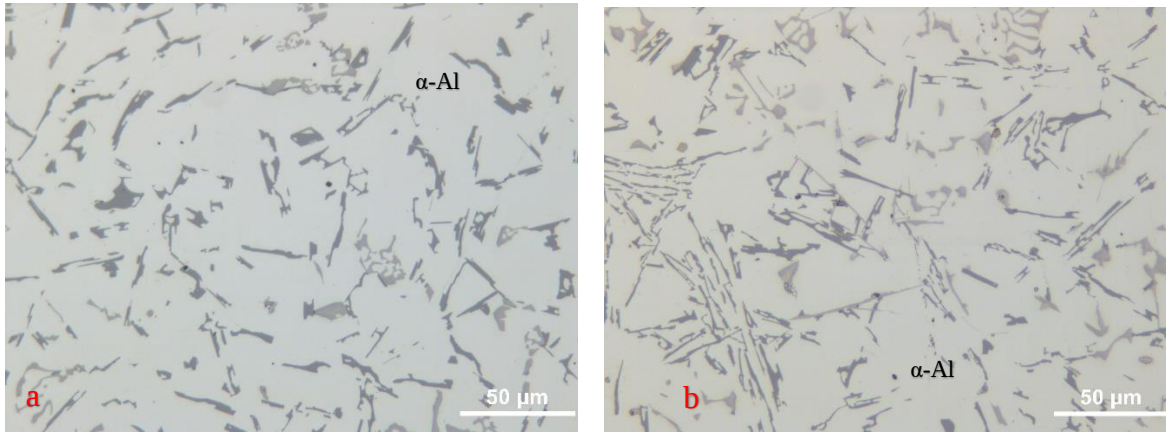
Şekil 8.4. Düşme deneyinde Deformasyon derinliği

Köpük alüminyum parçalar tüm gözenek boyutlarında yapılan düşme testlerinde tipik bir şekil değişimi göstermişlerdir. Köpük alüminyum parçalar düşme testi sırasında şekil değişimleri basma testinden oldukça farklılık gösterir. Basma test grafiklerinde görülen doğrusal elastik, çökme ve yoğunlaşma bölgeleri bu test yönteminde görülmemektedir. Basmayla benzer yanı kırılma yapıda olduklarından gevrek olarak kırılması olayıdır. Buradaki olay hücre duvarlarının bükülmesi, gevrek olarak kırılmaların başlaması ve son olarak zayıflayan kısmın kopması olayıdır. Kırılma bölgesinde bölgesel deformasyon, (hücre duvarlarının zayıflayarak kırılması) diğer bölgelere yayılarak devam eder. Kırılma bölgesinde oluşan değişim gevrek bir kırılma olduğundan yok denecek kadar azdır. Farklı gözenek çaplarına sahip alüminyum köpük parçaların hücre duvar kalınlıklarındaki farklılık deformasyon derinliği ve enerji miktarlarına da yansımıştır. Bu değişim 8 mm gözenek çapına sahip daha ince hücre duvar kalınlığı olan numunelerin daha yüksek düşme derinliği ve daha düşük enerji verdiğini göstermektedir.

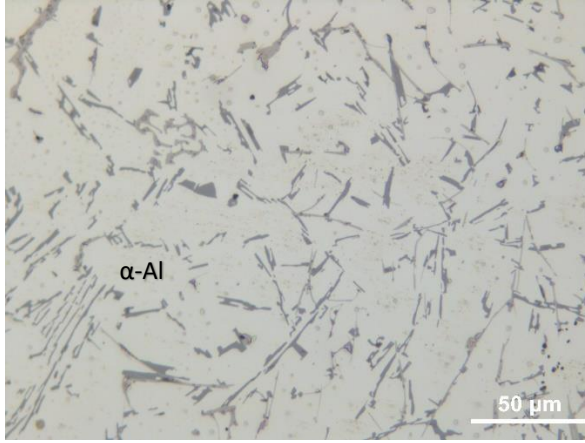
### 8.3. Mikroyapı Karakterizasyonu

Döküm yöntemiyle açık gözenekli numunelerin üretimi öncesinde fırın sıcaklık göstergesinden 800 °C okunmasına rağmen döküm sıcaklığı 750 °C dir. Döküm sıcaklığı hem mikroyapı oluşuma etki ettiği gibi taneler arsında alüminyum sıvısının akış hızına da etkisi vardır. Hücre boyutlarının farklı olması hücre duvarının katılaşma sırasında ısı iletiminde farklılıklar gösterebilir. Numunelerin ince hücre duvarından dolayı katılaşma sırasında oluşacak hücre yüzeylerindeki soğumanın hızlı olacağı söylenebilir.

Farklı numunelerin aynı bölgelerden alınan mikroyapı görüntülerinde katılaşma hızından veya gözenek boyutunun oluşturduğu kesit kalınlığından dolayı meydana gelen bir farkın olup olmadığını gözlemlemek amacıyla metalografi çalışması yapılmıştır. Döküm sonrası açık gözenekli alüminyum numunelerin hücre duvarlarından alınan kesitlerin mikroyapıları Resim 8.1-2’de görülmektedir. Döküm sonrasında numunelere herhangi bir işlem uygulanmamış olup mikroyapılarda Al matris içerisinde primer Si fazının genel olarak homojen dağılımlı olduğu söylenebilir (Resim 8.1-2’de). Elde edilen mikroyapılar ötektik altı AlSi alaşımlarıyla uyumludur. Beyaz renk ile görülen bölgeler ise alfa alüminyumdur.



Resim 8.1. Açık gözenekli metalik alüminyum köpük numunelerin hücre duvarlarından alınan mikro yapı görüntüleri a) 12 mm gözenek çaplı numune b) 10 mm gözenek çaplı numune



Resim 8.2. 8 mm gözenek çapına sahip açık gözenekli metalik alüminyum köpük numunelerin hücre duvarlarından alınan mikro yapı görüntüleri.

Al-Si alaşımlarında, Silisyum atomları Alüminyum içerisinde çözünürken, Alüminyum, Silisyum atomları içinde çözünme davranışı göstermez. Ağırlıkça %Si oranının %12,6'dan düşük olduğu alaşımlar ötektik altı olarak adlandırılır ve sıcaklık düştükçe  $\alpha$ -Al fazı oluşumu ve ötektik reaksiyon gerçekleşmektedir. Ötektik altı ve hızlı soğutulmuş ötektik Al-Si alaşımlarında, Al yapıda dendritler halinde bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan AlSi10Mg alaşımı (ETİAL-171), içerisinde Si oranı %10,21 olduğundan bu ötektik altı olarak değerlendirilir. Dendrit kolları arasında mesafe ve kolonsal görüntü açısından tüm numuneler benzer özellikler göstermektedir. Ancak azalan gözenek çapı ile daha düzenli ve homojen bir yapıya dönüşmüştür. Üretilen açık gözenekli Al numuneler içerisinde hücre boyutlarının farklı olması, hücre duvarları üzerinde de boyutsal değişimlere neden olmuştur. Mevcut hücre duvar kalınlıkları katılaşma sırasında ısı iletim açısından numune özelliklerini etkilemektedir. Ancak bu çalışmada gözenek büyüklüğü ve hücre duvar kalınlıkları arasındaki ilişkiden dolayı bir denge sağlanmış ve mikroyapılar da belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Ancak soğuma hızındaki azda olsa değişim bir anlamda modifikasyon etkisi göstermiş ve 8 mm gözenek çaplı numunelerde Resim 8.2. Al ötektik bölge içerisindeki Si tanelerini daha belirgin ince kolonsal yapıya dönüştürmüştür. Sonuç olarak söylenebilir ki; mikro yapı şekillerinde görülen ince kolonsal yapıdaki ufak farklılıklar olma eğilimi gözenek çapıyla bağlantılı olan gözenek duvar kalınlığının soğumaya olan etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



## 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Döküm yöntemiyle elde edilen açık gözenekli yapı üretiminde elde edilen numuneler üzerine uygulanan mekanik deneylerden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Açık gözenekli yapıya sahip numunelere uygulanan basma deneyi sonucunda elde edilen basma eğrileri tipik gözenekli malzemelerin basma eğrileri ile benzerlik göstermektedir.
2. Aynı gözenek sayısına sahip ve farklı çaplardaki numunelerin basma değerlerinde 12mm gözenek çapına sahip numunelerde en yüksek basma değerleri elde edilmiştir.
3. Gözenek çapı küçüldükçe basmayı karşı gelen yüzey alanı azaldığından dolayı daha düşük basma değerleri elde edilmiştir.
4. Tüm köpük metallerin gerilme/birim sekil değişim miktarı grafikleri doğrusal elastik, çökme ve yoğunlaşma olmak üzere üç bölgeden oluşmaktadır. Ancak bu durum artan gözenek boyutuyla değişmekte yoğunlaşma bölgesi daralmaktadır.
5. Köpük metal doğrusal elastik bölgede elastik deformasyona uğrar. Bu bölge hücre duvarlarının bükülmesi ve yırtılmaya başlaması ile sona erer ve çökme bölgesi baslar. Çökme bölgesinde bölgesel deformasyon, (hücre çökmesi ve yoğunlaşması) diğer bölgelere yayılarak devam eder. Bu bölgenin bitiminde hücreler (çökme-yoğunlaşma deformasyon sırasını izleyerek) sıkışarak yoğunluğu artmış bir yapı oluşturur. Çökme bölgesinde oluşan gerilme dalgaları (değişimleri) bölgesel deformasyonun yayılmasıyla oluşmaktadır.
6. Tüm gözenek boyutlarında yapılan düşme testlerinde kırılma yapının baskın olduğu gözlenmiştir. Düşme sonucu oluşan kısmi kırılmalar hücre duvarının en zayıf olduğu etkin yüzey alanlarında başlamıştır.
7. Çökme bölgesindeki gerilmedeki değişim gevrek bir kırılma olduğundan yok denecek kadar azdır.
8. Farklı gözenek çaplarına sahip alüminyum köpük parçaların hücre duvar kalınlıklarındaki farklılık deformasyon derinliği ve enerji miktarlarında yansımıştır. Bu değişimin düşük gözenek çapına sahip daha ince hücre duvar kalınlığı olan numunelerin daha yüksek düşme derinliği ve daha düşük enerji verdiğini göstermektedir.
9. Düşme test sonuçlarına göre söylenebilir ki; artan gözenek çapı ile hücre duvar kalınlıkları artmakta ve yapı daha dayanıklı olmaktadır.

10. Alüminyum alaşımlarından elde edilen açık gözenekli yapılar için kalıp içerisinde şekillendirilen NaCl tuzlarının dökülebilirlik için bir engel oluşturmadığı, döküm esnasında şeklini muhafaza ettiği gözlemlenmiştir.
11. Bu çalışmada kullanılan ticari ismi ETİAL-171 olan AlSi10Mg alaşımı içerisinde Si oranı %10,21 olduğundan ötektik altı olarak değerlendirilir.
12. Kolonsal görüntü ve dendrit kolları arasında mesafe açısından tüm numuneler benzer özellikler göstermektedir. Gözenek çapının azalması daha düzenli ve homojen bir mikroyapı oluşturmuştur.
13. Hücre duvar kalınlıkları üzerinde, hücre boyutlarının etkisi bulunmaktadır ve bunlar ısı iletimi açısından köpük numunelerin döküm esnasında soğuma hızını etkilemektedir. Mikroyapılar da belirgin bir değişim gözlenmemiş; ancak soğuma hızında oluşan azda olsa değişim bir anlamda modifikasyon etkisi göstermiş ve 8 mm gözenek çaplı numunelerde Al ötektik bölge içerisindeki Si tanelerini daha ince kolonsal yapıya dönüştürmüştür.

## KAYNAKLAR

1. Banhart, J. (2001). "Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams" *Progress in Materials Science*, 46, 559–632.
2. Ashby M.F., Evans AG., Fleck NA, Gibson LJ, Hutchinson JW, Wadley HNG. (2000). *Metal foams: a design guide* Butterworth–Heinemann.
3. Ozan, S., Katı, N. (2011). "Metal Köpükler" 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Türkiye.
4. Elbir, S., Yılmaz, S., Güden, M. (1999). Kapalı Hücreli Alüminyum Köpük Metallerin Üretim Metodları ve Mekanik Özellikleri, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi*, (120):35-42.
5. Amjad, S. (2001). Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams. A dissertation submitted for the degree of Master of Philosophy in Materials Modelling at the University of Cambridge.
6. Wood, J. T. (1996). *Production and Application of Continuously Cast, Foamed Aluminium*. CYMAT.
7. Asholt, P. (1999). Aluminium Foam Produced by the Melt Foaming Route Process, Properties and Applications. Hydro Aluminium R&D Materials Technology, Sunndalsøra, Norway, 133-140.
8. Elliot, JC. (1961). US Patent 2,983,597.
9. Hardy PW, Peisker GW. US Patent 3,300,296,196.
10. Berry, CB. (1972). US Patent 3,669,654.
11. Bjorksten J, Rock EJ. (1972) US Patent 3,707,367.
12. Akiyama, S., Imagawa, K., Kitahara, A., Nagata, S., Morimoto, K., Nishikawa, T., Itoh M. (1986). European Patent Application 0, 210, 803 A1.
13. Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., Kitahara, A. (1998). *Porous and cellular materials for structural applications*. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., 521, 133.
14. Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., Kitahara, A. (2000) *Advanced Engineering Materials*. 2:17. Germany.
15. Simone, AE., Gibson, LJ. (1998). Aluminum foams produced by liquid-state processes. *Acta Mater.* 46:3109.
16. Banhart, J. (2000). Manufacturing routes for metallic foams. *Journal of Metals*. 52-22.
17. Ma, L., Song, Z. (1998). Cellular structure control of aluminium foams during foaming process of aluminium melt. *Scripta Materialia*. 39:1523.

18. Otsuka, M., Kojima, A., Itoh, M., Ishii, E. (1991). *Proc. Conf. Recent Advances in Science and Engineering of Light Metals* (RASELM '91), Tokyo, October. Sendai: Japan Institute of Light Metals. 99.
19. Kaminaga, K., Toyoda, K., Sato, T. (1996). *Proc. Interfinish 96 World Congress*. Birmingham, UK, 10–12 September.
20. Miyoshi, T. (1998). Private communication.
21. Albright, DM., Chilcott, WR., Floridis, TP. (1967). US Patent 3,360,361.
22. Hall, CG. (1972). US Patent 3,692,513.
23. Gui, MC., Wang, DB., Wu, JJ., Yuan, GJ., Li, CG. (2000). Deformation and damping behaviors offoamed Al-Si-SiCp composite” *Materials Science and Engineering*, A286:282.
24. Berry, CB. (1972). US Patent 3,671,221.
25. Berry, CB., Valdo, AR. (1973). US Patent 3,725,037.
26. Niebylski, LM., Jarema, CP., Lee, TE. (1974). US Patent 3,843,353.
27. Han, F., Zhu, Z., Gao, J. (1998). Compressive deformation and energy absorbing characteristic of foamed aluminum. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29A:2497.
28. Bjorksten J. US Patent 3,782,919, 1974.
29. Jarema, CP., Niebylski, LM. (1973). US Patent 3,719,223.
30. Jarema, CP., Niebylski, LM. (1974). US Patent 3,839,080.
31. Niebylski, LM. (1970). German Patent 2,006,445.
32. Niebylski, LM., Jarema, CP. (1974). Immethun PA. US Patent 3,794,481.
33. Niebylski, LM., Jarema, CP., Lee, TE. (1976). US Patent 3,940,262.
34. Niebylski, LM., Jarema, CP. (1974). US Patent 3,790,365.
35. Niebylski, LM., Jarema, CP. (1974). US Patent 3,847,591.
36. Ptashnik, WJ. (1973). US Patent 3,758,291.
37. Gergely, V., Clyne, B. (2000). The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors. *Advanced Engineering Materials*, (4):175-178.
38. Haydn, N., Wadley, G. (2002). Cellular Metals Manufacturing. *Advanced Engineering Materials*, (10):726-733.
39. 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.

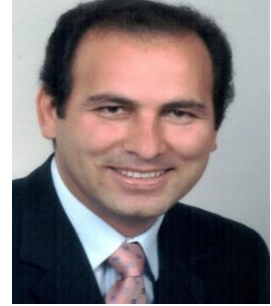
40. Banhart, J. (2004). *Industrialisation of Aluminium Foam Technology*. 9th International Conference on Aluminium Alloys, 764-770.
41. Yosida, Y., Hayashi, C. (1990). Effects of Surface Morphology of Transparent Electrode on the Open-Circuit Voltage in a-Si:H Solar Cells. *Japanese Journal of Applied Physics*, 29.
42. Yamada, Y., Shimojima, K., Sakaguchi, Y., Mabuchi, M., Nakamura, M., Asahina, T., Mukai, T., Kanahashi, H., Higashi, K. (2000). Processing of Cellular Magnesium Materials, *Advanced Engineering Materials*, 2:184.
43. Niebylski, LM., Fanning, RJ. (1972). SAE Transactions. New York, USA: *Society of Automotive Engineers*, Paper 720490.
44. Endler, F. Lahner, S., Hoffmann, M. (1997). *Metallschaume*. In: Banhart J, editor. Proc. Symp. Metallschaume, Bremen, Germany, 6–7 March. Bremen: MIT Press–Verlag, 117 [in German].
45. Banhart, J., Baumeister, J., Weber, M. (1996). Damping properties of aluminium foams, *Materials Science and Engineering: A*, A205:221.
46. Liu, CS., Zhu, ZG., Han, FS., Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*, 46, 559,632
47. Schwartz, DS., Shih, DS., Lederich, RJ., Martin, RL., Deuser, DA. (1998). *Porous and cellular materials for structural applications*. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., 521, 22.
48. Banhart, J., Schmoll, C., Neumann, U. (1998). In: Faria L, editor. Proc. Conf. Materials in Oceanic Environment (Euromat '98), 1. 55.
49. Giamei, AF. (1997). *Metal foams*. In: Banhart J., Eifert H., editors. Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams, Stanton, USA, 7–8 October. Bremen: MIT Press–Verlag. 63
50. Lu, TJ., Chen, C. (1999). Thermal transport and fire retardance properties of cellular aluminium alloys, *Acta Materialia*, 47:1469.
51. İnternet: ERG Inc. Oakland, USA. Product information of “Duocel” and URL: <http://www.ergaerospace.com>, Son Erişim Tarihi: 12.01.2019.
52. Geiger, AL. (1990). *Advances in Optical Structure Systems*. In: Proc. Ser. Society for Photo-Optical Engineering (SPIE). 1303, 546.
53. Wheeler, KR., Karagianes, MT., Sump, K.R. (1983). *Conference Titanium Alloys in Surgical Implants*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials. 241.
54. Niemeyer, M. (1999). DFG Symposium 11–12 November, Bonn, Germany.

55. İnternet: URL: <https://www.exxentis.com/poroeses-aluminium/herstellung-poroeses-aluminium>, Son Erişim Tarihi: 02.11.2019.
56. Ravi, B. (1997). “Intelligent design of gating channels for casting”, *Materials Science and Technology*, 13:9, 785-790.
57. İnternet: URL: <https://alupor.eu/technologie>. Son Erişim Tarihi: 29.11.2019.
58. Campbell, J. (2015). “*Complete Casting Handbook (Second Edition)*”, Chapter 6 – Casting Alloys”, Butterworth Heinemann. 223–340.
59. John, R. Brown. (1994). “*Foseco Non-Ferrous Foundryman’s Handbook*”, *Eleventh edition*, Butterworth Heinemann.
60. Hu, B.H., Tong, K.K., Niu, X.P., Pinwill, I. (2000). “Design and optimisation of runner and gating systems for the die casting of thin-walled magnesium telecommunication parts through numerical simulation” *Journal of Materials Processing Technology*, 105, 128-133.
61. Çinici, H., Gökmen, U., Uzun, A., Karakoç, H., Göde, C., Türker, M. (2014). Toz Metalurjisi yöntemiyle üretilen AlSi7 Köpüklerin düşük hızla darbe enerjileri altında penetrasyon davranışının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Der.* 9, 395-400.
62. Bahçeci, E., Çatalbaş, Y. (2012). *Kapalı Hücreli Metalik Köpüklerde Hücre Morfolojisinin Mekanik Özelliklere Etkisi ve Fotoelastisite Yönteminin Kullanılabilirliği*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
63. Yalçın, N. (2017). *Döküm Yöntemi ile Açık Gözenekli Parça Üretiminde Gözenek Boyutunun Dökülebilirliğe Etkisi*. 1st International Turkish World Engineering and Science Congress in Antalya, Türkiye

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERCİL, Abdulkerim  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 04.05.1970, Altınözü  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (531) 660 15 79  
 e-mail : abdulkerimercil@hotmail.com



### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi                                           | Mezuniyet Tarihi |
|---------------|---------------------------------------------------------|------------------|
| Yüksek lisans | Gazi Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği    | Devam ediyor     |
| Lisans        | Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği | 2000             |
| Önlisans      | Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Kadastoro         | 1993             |
| Lise          | Antakya Merkez Lisesi                                   | 1990             |

### İş Deneyimi

| Yıl       | Yer                                                 | Görev        |
|-----------|-----------------------------------------------------|--------------|
| 2018-2019 | PRESİ SAS / Grenoble/Fransa                         | Bölge Müdürü |
| 2006-2018 | Buchler GmbH /Düsseldorf/Almanya                    | Bölge Müdürü |
| 2004-2005 | Friedrich Wilhelm Hütte/Mülheim an der Ruhr/Almanya | Kalite Müh.  |
| 2003-2004 | Deutz AG /Köln/Almanya                              | Kalite Müh   |

### Yabancı Dil

İngilizce, Almanca, Arapça

**Yayınlar**

1. Ercil A. Yalçın N., (2019). *Döküm Yöntemi ile Açık Gözenekli Parça Üretiminde Gözenek Boyutunun Mekanik Özelliklere etkisi*. II. International Turkish Word Engineering and Science Congre Anltalya/TURKEY.

**Hobiler**

Yüzme, Seyahat, Balık tutma, Bilgisayar teknolojileri



*GAZİ GELECEKTİR..*