

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**GENLEŞTİRİLMİŞ CAM, GENLEŞTİRİLMİŞ KİL VE HİBRİT TAKVİYELİ  
SİNTAKTİK KÖPÜK METALLERİN ÜRETİMİ, İÇYAPI VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Engin KARAMAN**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Malzeme ve İmalat Programı**

**AĞUSTOS 2023**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**GENLEŞTİRİLMİŞ CAM, GENLEŞTİRİLMİŞ KİL VE HİBRİT TAKVİYELİ  
SİNTAKTİK KÖPÜK METALLERİN ÜRETİMİ, İÇYAPI VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Engin KARAMAN  
(503181320)**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Malzeme ve İmalat Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ali GÖKŞENLİ**

**AĞUSTOS 2023**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503181320 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Engin KARAMAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GENLEŞTİRİLMİŞ CAM, GENLEŞTİRİLMİŞ KİL VE HİBRİT TAKVİYELİ SİNTAKTİK KÖPÜK METALLERİN ÜRETİMİ, İÇYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Doç. Dr. Ali GÖKŞENLİ**  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ**  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Umut KARAGÜZEL**  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : 13 Temmuz 2023  
**Savunma Tarihi** : 02 Ağustos 2023





*Aileme,*





## ÖNSÖZ

Günümüz dünyasında her geçen gün yeniliklere ayak uydurmak gerekmektedir. Değişen üretim farklılıkları ve prosesleri, ihtiyaç duyulan ürün çeşitlilikleri bu konudaki iştirakleri yeni çalışmalar yapmaya itmektedir. Bu kapsam doğrultusunda 20. yüzyılın ortalarından itibaren ortaya çıkan metal köpük kavramına son yıllarda sintaktik metal köpük kavramı da eklenmiştir. Bu malzemeler sayesinde tasarım kriterlerinden vazgeçmeyerek kullanılan yapılarda hafiflik sağlanması amaçlanmaktadır. Günümüzde enerji verimliliği ve çevre dostu politikalarında son derece hızlı artmasıyla hafiflik çok önemli bir parametre haline gelmektedir. Bu bilgiler ışığında da sintaktik köpük metallerle ilgili çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilmiş cam, geliştirilmiş kil ve ikisinin bir arada olduğu hibrit takviyeler 7075 alüminyum malzemesinin matris olarak kullanıldığı toplamda 21 adet sintaktik köpük metal numunenin üretimi sağlanmış olup yapılan incelemeler, ölçümler ve testlerden çıkan sonuçlar mercek altına alınmıştır.

Tez çalışmamda benim bu projede çalışmamı sağlayan ve bu süre zarfında bütün desteğini veren, yönlendirmeler yaparak verimli bir çalışmayı ortaya koymamı sağlayan sayın hocam Doç.Dr. Ali Gökşenli'ye teşekkürlerimi sunarım.

Beni bugünlere getiren hiçbir zaman desteğini esirgemeyen aileme en içten teşekkürlerimi göstermek isterim.

Ayrıca bu çalışma süresince motivasyonumu yüksek tutup, her zaman desteğini ortaya koyan Begüm Gürses'e ve her zaman yanımda olan dostlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Temmuz 2023

Engin KARAMAN

Makina mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                                                              | vii       |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                       | ix        |
| KISALTMALAR .....                                                                       | xi        |
| SEMBOLLER .....                                                                         | xiii      |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                                    | xv        |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                      | xvii      |
| ÖZET.....                                                                               | xix       |
| SUMMARY.....                                                                            | xxi       |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                                   | <b>1</b>  |
| 1.1 Köpük Metallerin Tanımı.....                                                        | 1         |
| 1.2 Köpük Metallerin Gelişimi ve Tarihçesi.....                                         | 1         |
| <b>2. KÖPÜK METALLER .....</b>                                                          | <b>3</b>  |
| 2.1 Köpük Metallerin Sınıflandırılması .....                                            | 3         |
| 2.1.1 Açık hücreli metal köpükler.....                                                  | 3         |
| 2.1.2 Kapalı hücreli metal köpükler.....                                                | 4         |
| 2.2 Köpük Metallerin Üretim Yöntemleri.....                                             | 4         |
| 2.2.1 Gaz enjeksiyonu ile köpük üretim .....                                            | 4         |
| 2.2.2 Gaz oluşturan parçacıklar ile köpük üretimi .....                                 | 6         |
| 2.2.3 Katı-gaz ötektik katılaştırma metodu ile köpük metal üretimi .....                | 7         |
| 2.2.4 Gaz çıkaran partiküllerin yarı katı yapıda çözünerek köpük metal<br>üretimi ..... | 8         |
| 2.2.5 Sıkışmış gazın genişlemesi ile metal köpük üretimi .....                          | 9         |
| 2.2.6 Döküm yöntemleri ile metal köpük üretimi .....                                    | 9         |
| 2.3 Köpük Metallerin Uygulama Alanları.....                                             | 11        |
| <b>3. SİNTAKTİK KÖPÜK METALLER .....</b>                                                | <b>15</b> |
| 3.1 Sintaktik Köpük Metallerin Tanımı .....                                             | 15        |
| 3.2 Sintaktik Köpük Üretiminde Kullanılan Malzemeler .....                              | 15        |
| 3.3 Sintaktik Köpük Metal Üretim Yöntemleri.....                                        | 16        |
| 3.3.1 İnfiltrasyon yöntemi ile üretim .....                                             | 16        |
| 3.3.2 Karıştırma yöntemi ile üretim .....                                               | 16        |
| 3.3.3 Toz metalurjisiyle üretim yöntemi.....                                            | 17        |
| <b>4. SİNTAKTİK KÖPÜK METAL ÜRETİMİ.....</b>                                            | <b>19</b> |
| 4.1 Kullanılan Malzemeler .....                                                         | 19        |
| 4.2 Numune Üretim Ön Hazırlığı.....                                                     | 23        |
| 4.3 Numune Üretimi.....                                                                 | 26        |
| <b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>                                                      | <b>31</b> |
| 5.1 Tahribatsız Muayene .....                                                           | 31        |
| 5.1.1 Makro boyut incelemesi.....                                                       | 31        |
| 5.1.2 Mikro boyut incelemesi .....                                                      | 33        |
| 5.1.3 Yoğunluk ölçümü.....                                                              | 34        |

|                                            |           |
|--------------------------------------------|-----------|
| 5.2 Tahribatlı Muayene .....               | 36        |
| <b>6. GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b> | <b>47</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                      | <b>49</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                      | <b>55</b> |



## KISALTMALAR

|            |                    |
|------------|--------------------|
| <b>g</b>   | : Gram             |
| <b>cm</b>  | : Santimetre       |
| <b>°C</b>  | : Santigrat derece |
| <b>kPa</b> | : Kilopaskal       |
| <b>mm</b>  | : Milimetre        |
| <b>W</b>   | : Watt             |
| <b>m</b>   | : Metre            |
| <b>K</b>   | : Kelvin           |
| <b>kg</b>  | : Kilogram         |





## SEMBOLLER

$\rho$  : Yoğunluk







## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 4.1 : Genleştirilmiş cam kürelerin özellikleri .....  | 19 |
| Çizelge 4.2 : Genleştirilmiş cam kürelerin özellikleri .....  | 20 |
| Çizelge 4.3 : Lecat genleştirilmiş kil kimyasal analizi ..... | 21 |
| Çizelge 4.4 : 7075 alüminyum özellikleri.....                 | 22 |
| Çizelge 4.5 : 7075 alüminyum kimyasal analizi.....            | 22 |
| Çizelge 5.1 : Numune yoğunlukları.....                        | 35 |
| Çizelge 5.2 : Plato gerilmeleri ve enerji absorpsiyon .....   | 42 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 : Açık hücreli metal köpük mikroyapısı [26] .....                                                   | 3  |
| Şekil 2.2 : Kapalı hücreli metal köpük mikroyapısı [26].....                                                  | 4  |
| Şekil 2.3 : Gaz enjeksiyon ile üretim yöntemi [31] .....                                                      | 5  |
| Şekil 2.4 : Partikül boyutu ve hacimsel oran grafiği [34].....                                                | 5  |
| Şekil 2.5 : Kalsiyum miktarı viskozite ve karıştırma süresi grafiği [35].....                                 | 6  |
| Şekil 2.6 : Gaz oluşturan parçacıklarla metal köpük üretimin prosesleri [35] .....                            | 7  |
| Şekil 2.7 : Hidrojen – metal alaşım faz diyagramı [36].....                                                   | 7  |
| Şekil 2.8 : Küresel (a), radyal (b), silindirik (c), lamine (d)(e)(f) boşluklu köpük metaller [37] .....      | 8  |
| Şekil 2.9 : Gaz çıkaran partiküllerin yarı katıda çözünerek metal köpük üretim prosesi [38] .....             | 8  |
| Şekil 2.10 : Sıkışmış gazın genleşmesi ile üretim prosesi [41] .....                                          | 9  |
| Şekil 2.11 : Buharlaşılabilen polimer ile iki aşamalı metal köpük üretimi [42].....                           | 10 |
| Şekil 2.12 : Gözenek oluşturunca malzemelerle eriyik metal eklenerek metal köpük üretimi [43].....            | 10 |
| Şekil 2.13 : Metal köpüklerin (a) otomotiv ve (b) raylı sistemlerde darbe emici uygulamaları [45] .....       | 12 |
| Şekil 2.14 : Titanyum köpükten üretilmiş diş implantı [51].....                                               | 13 |
| Şekil 2.15 : Metal köpük kullanılarak üretilme makine elemanı kesiti [45] .....                               | 14 |
| Şekil 3.1 : İnfiltrasyon yöntemiyle sintaktik köpük metal üretimi [59] .....                                  | 16 |
| Şekil 3.2 : Toz metalurjisi ile sintaktik metal köpük üretimi [59].....                                       | 17 |
| Şekil 4.1 : Genleştirilmiş cam malzeme .....                                                                  | 20 |
| Şekil 4.2 : Genleştirilmiş kil malzeme.....                                                                   | 21 |
| Şekil 4.3 : Hibrit takviye malzeme .....                                                                      | 22 |
| Şekil 4.4 : 7075 alüminyum alaşımı .....                                                                      | 23 |
| Şekil 4.5 : Kalıp gövdesi, kelepçe, alt pul ve piston.....                                                    | 23 |
| Şekil 4.6 : Yağlanmış kalıp elemanları.....                                                                   | 24 |
| Şekil 4.7 : 2 mm boyutuna uygun elek .....                                                                    | 24 |
| Şekil 4.8 : Parçaların fırında bekletilme süreci.....                                                         | 25 |
| Şekil 4.9 : Nüve MF 110 kül fırını .....                                                                      | 26 |
| Şekil 4.10 : Numune üretim süreci aşamaları .....                                                             | 27 |
| Şekil 4.11 : İlk yöntemle alınan numuneler.....                                                               | 27 |
| Şekil 4.12 : Kalıptan çıkarılan ve kuvvet uygulanmış kalıp.....                                               | 28 |
| Şekil 4.13 : Genleştirilmiş cam (a), genleştirilmiş kil(b) ve hibrit takviyeli (c) sintaktik metal köpük..... | 29 |
| Şekil 5.1 : METKON FORCIPOL® zımparalama ve taşlama makinesi .....                                            | 32 |
| Şekil 5.2 : Makro boyutsal incelenen hibrit takviyeli numune.....                                             | 32 |
| Şekil 5.3 : Nikon SMZ 800 optik mikroskop cihazı .....                                                        | 33 |
| Şekil 5.4 : Döküm boşlukları mikroskop görüntüsü.....                                                         | 34 |
| Şekil 5.5 : Peteksi takviye malzeme mikroskop görüntüsü .....                                                 | 34 |
| Şekil 5.6 : Temas halindeki takviye malzemelerin mikroskop görüntüsü.....                                     | 34 |

|                                                                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Şekil 5.7 :</b> T6 ısıt işlemleri uygulama adımları .....                                                      | <b>36</b> |
| <b>Şekil 5.8 :</b> Schimadzu AG-IS 50 kN cihazı .....                                                             | <b>37</b> |
| <b>Şekil 5.9 :</b> Cam takviyeli numunelerin ısıt işlemsiz gerilme – birim şekil değıştirme grafiği .....         | <b>37</b> |
| <b>Şekil 5.10 :</b> 5 numaralı numunenin birim şekil değıştirme görüntüleri .....                                 | <b>38</b> |
| <b>Şekil 5.11 :</b> Cam takviyeli numunelerin T6 ısıt işlemleri gerilme – birim şekil değıştirme grafiği .....    | <b>38</b> |
| <b>Şekil 5.12 :</b> 4 numaralı numunenin birim şekil değıştirme görüntüleri .....                                 | <b>38</b> |
| <b>Şekil 5.13 :</b> Hibrit takviyeli numunelerin ısıt işlemsiz gerilme – birim şekil değıştirme grafiği .....     | <b>39</b> |
| <b>Şekil 5.14 :</b> 9 numaralı numunenin birim şekil değıştirme görüntüleri .....                                 | <b>39</b> |
| <b>Şekil 5.15 :</b> Hibrit takviyeli numunelerin T6 ısıt işlemleri gerilme – birim şekil değıştirme grafiği ..... | <b>39</b> |
| <b>Şekil 5.16 :</b> 10 numaralı numunenin birim şekil değıştirme görüntüleri .....                                | <b>40</b> |
| <b>Şekil 5.17 :</b> Kil takviyeli numunelerin ısıt işlemsiz gerilme – birim şekil değıştirme grafiği .....        | <b>40</b> |
| <b>Şekil 5.18 :</b> 13 numaralı numunenin birim şekil değıştirme görüntüleri .....                                | <b>40</b> |
| <b>Şekil 5.19 :</b> Kil takviyeli numunelerin T6 ısıt işlemleri gerilme – birim şekil değıştirme grafiği .....    | <b>41</b> |
| <b>Şekil 5.20 :</b> 16 numaralı numunenin birim şekil değıştirme görüntüleri .....                                | <b>41</b> |
| <b>Şekil 5.21 :</b> Cam takviyeli numunelerin plato gerilmesi – yoğunluk grafiği.....                             | <b>43</b> |
| <b>Şekil 5.22 :</b> Hibrit takviyeli numunelerin plato gerilmesi – yoğunluk grafiği.....                          | <b>43</b> |
| <b>Şekil 5.23 :</b> Kil takviyeli numunelerin plato gerilmesi – yoğunluk grafiği .....                            | <b>44</b> |
| <b>Şekil 5.24 :</b> Cam takviyeli numunelerin enerji absorpsiyon – yoğunluk grafiği .....                         | <b>44</b> |
| <b>Şekil 5.25 :</b> Hibrit takviyeli numunelerin enerji absorpsiyon – yoğunluk grafiği .....                      | <b>45</b> |
| <b>Şekil 5.26 :</b> Kil takviyeli numunelerin enerji absorpsiyon – yoğunluk grafiği.....                          | <b>45</b> |

# GENLEŞTİRİLMİŞ CAM, GENLEŞTİRİLMİŞ KİL VE HİBRİT TAKVİYELİ SİNTAKTİK KÖPÜK METALİN ÜRETİMİ, İÇYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

## ÖZET

Günümüz dünyasında teknoloji her geçen gelişim göstermekte ve bu duruma ayak uydurarak katkı sağlamanın önemi günden güne artmaktadır. Piyasa ihtiyaçlarındaki farklılıklar değişik üretim yöntemlerini araştırma yolunu açmaktadır. Köpük metaller de bu kapsamda 20. yüzyılın ortalarından itibaren çalışılmaya başlanan mühendislik malzemelerinden olup temel olarak içerisinde porozite barındırmaktadırlar. Köpük metaller baz metal yapıda dağılmış, yüksek hacimli, gaz dolu boşluklardan oluşan ve %75 ile %95 arasında değişen porozite içeren yapılardır. Düşük yoğunluklu, enerji absorpsiyonu, ısı ve ses iletkenlikleri iyi olan bu parçalar havacılık-uzay, otomotiv, gemi, inşaat, biyomedikal gibi kullanım alanlarında görülmektedir.

Sintaktik köpük metal kavramı da temel olarak metal köpüklerin bir alt kolu olarak değerlendirilebilir. Metal matris yapı ve içi peteksi ya da boş kürelerden oluşabilen takviye partiküllerin birleşimi ile oluşan malzemelerdir. Sintaktik köpük metallerin elde edilmesindeki amaç daha düşük yoğunlukta daha iyi mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlamaktır. Günümüzde araştırmacılar çeşitli üretim yöntemleri yardımıyla farklı matris ve takviye malzemeleri kullanarak çalışmalar yapmaktadırlar. Enerji verimliliği ve çevre dostu politikaların da son derece hızlı artmasıyla hafiflik önemli bir durum olarak göze çarpmaktadır. Bu bilgiler ışığında da sintaktik köpük metallerle ilgili çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır.

Bu çalışmada sintaktik metal köpük üretiminde takviye malzeme olarak geliştirilmiş cam, geliştirilmiş kil ve bu iki malzemenin karıştırılmasıyla ortaya çıkan hibrit kullanılmıştır. Matris malzeme olarak 7075 alüminyum alaşımı tercih edilmiştir. Kullanılan takviye malzemelerden geliştirilmiş cam için istif yoğunluk değeri  $0,2 \text{ g/cm}^3$ , geliştirilmiş kil için istif yoğunluk değeri  $1,068 \text{ g/cm}^3$  ve matris malzeme olan 7075 alüminyum alaşımı için yoğunluk değeri  $2,81 \text{ g/cm}^3$  değerindedir. Hibrit malzemenin yoğunluğunun da yaklaşık olarak  $0,65 \text{ g/cm}^3$  olabileceğini söyleyebiliriz. Alınan numunelerde cam takviyeli metal köpük için  $1,35 - 1,55 \text{ g/cm}^3$ , kil takviyeli metal köpük için  $1,67-1,76 \text{ g/cm}^3$  ve hibrit takviyeli metal köpük için  $1,47-1,67 \text{ g/cm}^3$  yoğunluk değerleri arasında olmaktadır. Yoğunluk değerlerinden de anlaşılabacağı üzere metal köpük numunelerindeki saf alüminyum malzemesine göre yüksek seviyede düştüğü sonucuna ulaşılabilir.

Tez çalışması kapsamında numuneler sandviç infiltrasyon yöntemiyle elde edilmiştir. Yöntemin temelinde kalıp içerisinde serbest halde bulunan takviye malzemelerinin arasına nüfuz eden matris ve takviyelerin homojen bir şekilde dağılımı amaçlanmaktadır. Üretim sürecinde takım çeliğinden yapılmış ve takviye-matris malzemelerin konulduğu bir kalıp, kalıbın altına üzerine açılmış mikrokannalar sayesinde kalıptan hava çıkışına izin veren pul, kalıbı bir arada tutan bir kelepçe ve

kalıp üstüne yerleştirilen ağırlığın kuvvet aktarımını sağlaması adına bir piston kullanılmıştır.

790°C'ye kadar ısıtılan fırının içine kelepçeli halde kalıp, grafit potaya konulan alüminyum ve piston parçası yerleştirilmiştir. Bu kapsamda takviye malzemelerin fırında kalıp parçalarıyla aynı süre bekletildiği takdirde sinterleme görüldüğü ve takviye malzemelerin kalıba aktarımında zorluk oluşacağı için takviye malzemeler 790°C'deki fırına kalıptan 11 dakika sonra 4 dakika fırında duracak şekilde grafit potaya konulup fırına yerleştirilmiştir. Partiküllerin ön ısıtmaya tabi tutulması sayesinde eriyik haldeki alüminyumun erken katılaşmasının önüne geçilmiş olup metal köpük içerisindeki matris ve takviye malzemelerinin birleşimi iyileştirilmiştir.

Isıtma ve eritme prosesleri tamamlandığında takviye malzemeler sandviç infiltrasyon yöntemiyle eriyik alüminyum ortada kalacak şekilde kalıbın içerisine dökülmüştür. Daha sonrasında piston takviye malzeme ile temas edecek şekilde kapatılmış ve 39,98 kPa değerinde bir basınç yardımıyla parçaların nüfuziyeti sağlanmıştır. Üretim işlemleri tamamlanan parça katılaşma için belirli bir miktar soğutulduktan sonra kalıp açılarak numuneler alınmaktadır.

Her bir tipten alınan yedişer numuneden bir adedi iç yapı incelenmesi için, 3 adet T6 ısıl işlemlili testlerde, diğer üç adedi de ısıl işlemsiz testlerde kullanılmak üzere hazırlandı ve tahribatlı - tahribatsız muayeneler gerçekleştirildi.

Tahribatsız muayene işleminde zımparalama ve yüzey parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu işlemde sonra parçanın genel görüntüsündeki homojen dağılım incelenmiştir. Mikro boyut incelemesi olarak optik mikroskop ile yapı içeriğindeki durumlar gözlemlenmiştir. Bu incelemelerin sonucunda numunelerde yoğunluğun azalmasını sağlayan döküm boşlukları görülmektedir. Bunların yanında takviye malzemelerin peteksi yapıları da gözlemlenebilmektedir.

Basma testi için hazırlanan numuneler de T6 ısıl işlemi uygulanarak hazır hale getirilmiştir. T6 ısıl işlemin adımları 480 derece fırında 3 saat bekletme, su verme ve 120 derecede 3 saat yaşlandırma işlemi ve oda sıcaklığında bekletme şeklindedir. Temel olarak yapılan ısıl işlemin parça üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Basma testi sonucunda her bir numune tipi için birim şekil değiştirme – gerilme değerlerini bulunduğu mühendislik grafikleri elde edilmiştir. Grafiklerin bir çıktısı olarak numunelerin plato gerilmeleri ve enerji absorpsiyon verilerine ulaşılmaktadır. Plato gerilmesi hesaplanırken ISO 13314 standartlarına uygun olarak %20 – 30 değerleri arasındaki ortalama gerilme değeri alınarak değerler elde edilmiştir. Genel sonuç olarak yoğunluk artışıyla birlikte hem enerji absorpsiyonun da artışlar gözlemlenmektedir.

# **EXPANDED GLASS, EXPANDED CLAY AND HYBRID ADDED SYNTACTIC FOAM METAL PRODUCTION, MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES ANALYSIS**

## **SUMMARY**

Mankind has been changing and enhancing throughout history, thus technology also has been developing at a dramatic rate to meet the needs of humans. Today it is a well-known fact that stringing along with the increasing trend of innovation is vitally significant. As the scope of human needs enlarges the more complex challenges merge for technology to overcome. The varying demands of different industries lead the way for further development in production methodologies and processes. Metal foams are splendid examples of products of innovation trends that arise from progress in the industry. In the middle of the 20th century, research on metal foams was initiated, and they took their place in the literature as materials those structures accommodate a high percentage of porosity. Structures of metal foams are composed of base metal and high-volume pores containing gas, dispersed across the base metal at a rate of between 75% and 90%. Enhanced mechanical and physical properties such as relatively low density, energy absorption capacity, and thermal conductivity offer metal foams a wide range of applications in different industries such as aerospace, automotive, construction, and biomedical.

Syntactic metal foams are materials defined as a sub-group of metal foams that are produced by diffusion of reinforcing hollow spherical particles and secondary reinforcement particles having different characteristics across the metal matrix structure. The reason behind the growth of interest in syntactic metal foams is the need to obtain further enhanced mechanical properties combined with even lower density. Syntactic metal foams are defined as still under progress, owing to many different production methodologies and a variety of reinforcement materials. In today's world, as the targets for increasing energy efficiency and environmentally friendly policies continue to become prevalent at an extremely high rate, lower density becomes a much more substantial physical property to achieve in a material therefore, research on syntactic metal foams becomes wider and wider day by day.

In the present study, expanded glass, expanded clay, and a hybrid structure obtained as a combination of the expanded glass and clay are chosen to be utilized as reinforcement particles in the syntactic metal foam production process, whereas 7075 class aluminum is defined to be the base metal. Densities of expanded glass, expanded clay, and base metal 7075 class aluminum is  $0,2 \text{ g/cm}^3$ ,  $0,3\text{-}0,5 \text{ g/cm}^3$ , and  $2,81 \text{ g/cm}^3$ , respectively, while the density of the hybrid material is assumed to be  $0,25\text{-}0,35 \text{ g/cm}^3$ . After the samples are produced, densities are measured. The results of measurements of expanded glass-reinforced metal foam, expanded clay-reinforced metal foam and hybrid-reinforced metal foam were  $1,35 - 1,55 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,67\text{-}1,76 \text{ g/cm}^3$  and  $1,47\text{-}1,67 \text{ g/cm}^3$ , respectively. The comparison between densities of base metal aluminum and

syntactic metal foams has proved that the introduction of reinforcement particles having relatively lower density has resulted in a decrement in the density of specimens.

In the scope of the present thesis research, specimens were produced by the mechanical infiltration method. The basis of the method aims homogenous distribution of diffusing reinforcement particles across the base metal matrix. During the production process, a mold made of tool steel to contain reinforcement particles and base metal matrix, a shim to provide airflow inside the mold via fine holes that contain, a clamp to hold the mold together, and a piston to generate a force is utilized.

During the production process, the mold has put into the furnace that is heated up to 790°C with clamps on, with aluminum contained in a graphite melting pot and the piston. Meanwhile, it has been seen that particles diffuse into each other and make the casting process even harder as the particles stayed in the furnace at the same time for the same period therefore, reinforcement particles are put into the furnace after a while in a graphite melting pot. As all the particles were heated up to a certain level, the diffusion rate of particles into the metal matrix was improved by avoiding sudden temperature changes.

As the heating and melting processes are finalized, reinforcement particles were introduced into the mold by the sandwich methodology as aluminum is located as a layer between reinforcement particles in the mold. Later on, the piston was located onto the mold and in contact with the upper layer of reinforcement particles, to provide 19,62 N of force to enhance the diffusion of particles into the metal matrix. After diffusion is completed, the mold was taken out of the furnace and cooled down for solidification, and specimens were taken out of the mold.

In the end, seven specimens were produced from each composition. One of the seven specimens used in microstructure examination, meanwhile, three of the remaining six specimens are utilized in T6 heat treatment tests and the other three specimens used for non-heat treatment test and destructive - non-destructive inspections were performed with prepared samples.

Grinding and surface polishing processes were carried out into non-destructive testing procedure. After this process, as a macro-dimensional observation homogeneous distribution in the structure of the piece was examined. As a micro-dimensional control, the conditions in the structure were observed with an optical microscope. As a result of these examinations, casting voids are detected in the samples, which reduce the density. In addition to these situations, honeycomb structures of reinforcement materials can also observed.

Samples prepared for the compression test were also made ready by applying T6 heat treatment. The steps of the T6 heat treatment are keeping the samples in the oven at 480 C° for 3 hours, quenching and aging at 120 C° for 3 hours and keep waiting at room temperature respectively. Basically, the effects of the heat treatment procedure on the part examined comparatively. As a result of the compression test, stress – strain graphics for each sample type were obtained. Plateau stresses and energy absorption datas of the samples were calculated as an output of these graphics. While calculating the plateau stress, values were obtained by taking the average stress values between 20-30 % in accordance with ISO 13314 standarts. As a general result, both energy absorption and plateau stress values increases with the increaing of density.

The further prevalence of syntactic foam metals in the developing industry is a future situation. Both its significant contribution to density and its mechanical properties are



among the parameters that we can predict that the application areas of syntactic foam metal will increase day by day. Different products can be obtained with a large number of variability in these point material parameters. Matrix material selection, reinforcement material selection, dimensions, thicknesses, production method, mixing ratios are some of these parameters and the most suitable material can vary. The fact that there are so many variables will appear as a result of the continuation of studies on syntactic foam metals.





## 1. GİRİŞ

### 1.1 Köpük Metallerin Tanımı

Metal köpükler, kendilerine has fiziksel ve mekanik özellik kombinasyonu ile son zamanlarda mühendislik dünyasında tanınmaya başlanan yeni bir malzeme türüdür. Doğal köpük ile bir bağlantıları olmamalarına rağmen, gözenekli yapılarından dolayı metal köpükler olarak adlandırılmaktadırlar. Saf metal veya metal alaşımlarından oluşan metal köpükler yapılarında yaklaşık olarak %75 - %90 oranında gözenek bulundurmaktadır [1]. Gözenekli yapı içi peteksi [2] ya da boş küre [3] şeklindeki takviye malzemelerle sağlanmaktadır.

Günümüzde, metal köpüklerin tam anlamıyla karakterize edilmemiş olmaları ve üretim proseslerinin belirli standartlar altına alınmamış oluşu malzeme özelliklerinde bazı değişkenliklere neden olmaktadır. Fakat, metal köpüklerin bu stabil olmayan koşullar altında dahi özellikle düşük yoğunluklarda [4] gelişmiş mekanik [5] ve termal [6] özellikler sergilemeleri hem çeşitli kullanım alanları için potansiyel oluşturmuş hem de gelişim süreçlerini hızlandırmıştır [7].

Düşük yoğunlukları ve hafiflikleri [4], yüksek kırılma mukavemetleri [8], termal iletkenlikleri [6] ve enerji absorbe etme [8] kapasitesiyle metal köpükler otomotiv [9], uçak-uzay sanayi [10], inşaat [8] gemi [11] ve biyomedikal [12] gibi çok geniş yelpazede kullanımın alanına sahiptir. Sinterleme [13], karıştırma [14], presleme [2] gibi çeşitli yöntemlerle üretilebilirler ve aynı zamanda geri dönüştürülebilir özelliğe de sahiptirler. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan metal köpükler alüminyum [4] veya nikel [15] bazlıdır; fakat titanyum [16], çelik [17], kurşun [18], bakır [19] gibi metallerin köpük üretimi de gün geçtikçe gelişmektedir.

### 1.2 Köpük Metallerin Gelişimi ve Tarihçesi

Yüksek yoğunluğa sahip malzemelerden köpük üretimi ilk olarak 20. yüzyılda başlamış, özellikleri, kullanım alanları ve üretim teknolojileri günümüze kadar sistematik olarak incelenerek geliştirilmiştir.

Literatürde rastlanan ilk metal köpük üretimi ise 1925 yılında De Meller tarafından yayınlanan patenttir. Patentte eriyik metale soygaz enjeksiyonu veya karbonat gibi gaz yapıcı bir madde ilavesi ile metal köpük üretiminden bahsedilmiş, bu yöntem ile üretilebilecek bazı kompleks yapılara örnek verilmiş fakat somut bir çıktı olarak üretilen gerçek bir malzeme gösterilmemiştir [20].

Yaklaşık 20 yıl sonra, 1943 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde Benjamin Sosnick köpük metal üretimini tekrar gündeme getirmiştir. Sosnick eriyik alüminyum içine civa ilave etmiş ve cıvanın kaynama noktasının üzerinde porlu yapı elde etmiştir [20].

İlerleyen yıllarda, 1951'de John C. Elliott De Meller'in patentinde bahsettiği yöntemi geliştirmiş ve yeni bir patent yayınlamıştır. Bu sefer Elliott eriyik Al-Mg alaşımında gaz yapıcı olarak  $TiH_2$  (titanyum hidrit) ve  $ZrH_2$  (zirkonyum hidrit) ilave etmiş ve alaşımın erime sıcaklığında gaz yapıcı maddeyi bozundurarak gaz çıkışı sağlamış ve metalde porlu bir yapı elde etmiştir [21]. Aynı dönemde, 1956 yılında Borksten Research Laboratory eriyik alüminyum ve seramik partiküllerine ( $SiC$  veya  $Al_2O_3$ ) gaz enjekte ederek kapalı hücre alüminyum köpük elde etmiştir [22].

Metal köpükler özellikle 1950-1970 yılları arasında popülaritesini artırmış, pek çok yeni üretim yöntemi geliştirilmiş ve patent yayınlanmıştır. 1980 yılında Alcan, Hydro Aluminum ve Shinko Wire gibi büyük şirketlerin sektöre girişi ile metal köpüklere olan ilgi artmış, üretim yöntemleri ve metal köpük karakteristikleriyle ilgili pek çok yayın ile literatür zenginleşmiştir [23].

1980'li yıllarda Japonya'da Shinko Wire Company adlı şirket kalsiyum ilavesiyle viskozitesi artırılmış eriyik metale titanyum hidrit enjekte ederek metal köpük üretmiş ve bu üretim yönteminin patentini almıştır. Takip eden yıllarda Toronto ve Norveç'deki büyük şirketler de aynı yöntemle metal köpük üretimine başlamış ve eriyik metale doğrudan gaz enjeksiyonu ile metal köpük üretimini yaygın hale getirmişlerdir. 1990'lı yıllara gelindiğinde ise yine Toronto'da kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile polimer üzerinde Nikel biriktirilmiş, böylece açık hücreli metal köpük üretilmiştir [24].

Günümüzde metal köpükler halen çok yaygın olarak kullanılmaları da gösterdikleri üstün fiziksel ve mekanik özellikler, görece düşük üretim maliyetleri ve gelişime açık pek çok üretim yöntemi ile yüksek potansiyele sahip olduklarını ispatlamışlardır.

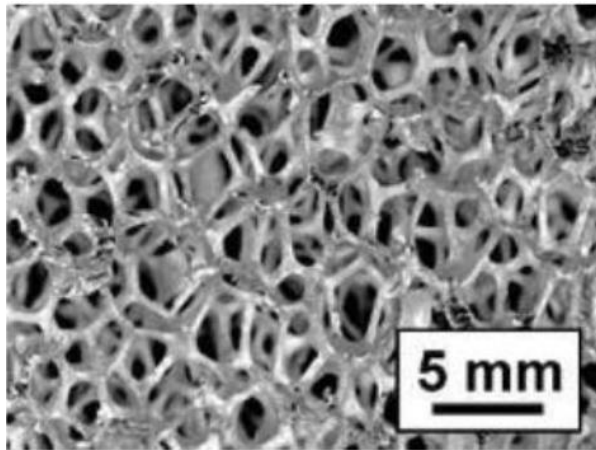
## 2. KÖPÜK METALLER

### 2.1 Köpük Metallerin Sınıflandırılması

Köpük metaller metal matris içinde dağılmış, yüksek hacimli, gaz dolu boşluklardan oluşan gözenekli yapılardır. Yapılarındaki yüksek gaz oranıyla metal köpüklerin en belirgin özellikleri %75 ila %95 arasında değişen poroziteleri ve %1 ila %20 arasında farklılık gösteren teorik yoğunluklarıdır [25]. Metal köpüklerin fiziksel özellikleri baz metal ile yüksek oranda benzerlik gösterse de gözenek boyu, yoğunluk, baz metal türü ve üretim yöntemi gibi faktörlere bağlı olarak farklılaşabilir. Bu nedenle metal köpüklerin üretim yöntemlerine göre, kullanılan metal tozların veya baz metalin türüne göre, kullanım alanlarına göre ve daha pek çok farklı parametreye bağlı olarak sınıflandırılması mümkündür. Morfolojik olarak değerlendirildiklerinde ise metal köpükler açık hücreli ve kapalı hücreli olmak üzere iki farklı kategoride incelenir.

#### 2.1.1 Açık hücreli metal köpükler

Açık hücreli köpük metaller yapılarında birbiriyle bağlantılı veya temas halinde bulunan boşluklar barındırırlar. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere açık hücreli metal köpükler görüntüleri itibariyle çoğunlukla kabak lifi veya süngere benzetilirler.



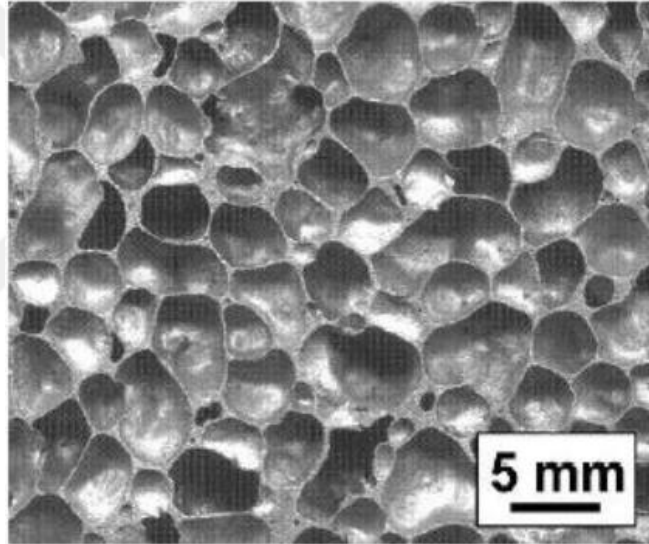
Şekil 2.1: Açık hücreli metal köpük mikroyapısı. [26]

Açık hücreli metal köpüklerin yapısı nedeniyle metal ve sıvı arasındaki yüzey alanı oldukça fazladır; dolayısıyla açık hücreli metal köpükler özellikle ısı transferi

uygulamalarında yüksek performans sergiler ve sıklıkla tercih edilirler. Özellikle ısı eşanjörleri [27], ses yalıtımı [28] gerektiren uygulamalarda; biyomedikal [29] ve otomotiv [30] sektöründe açık hücreli metal köpük kullanımı mümkündür.

### 2.1.2 Kapalı hücreli metal köpükler

Kapalı hücreli metal köpükler Şekil 2.2’de görüldüğü üzere, yapılarında kapalı duvarlarla birbirlerinden tamamen izole edilmiş, birbirinden bağımsız boşluklar barındırırlar. Boşluklar arasında herhangi bir iç geçiş bulunmadığından açık hücreli metal köpüklere göre daha yüksek mekanik özelliklere ve özgül ağırlığa sahip olabilirler. En yaygın kullanım alanları ise otomotiv [9] ve inşaat [8] sektörlerindeki darbe emici ve yük taşıyıcı özelliğe sahip uygulamalardır. Kapalı hücre metal köpükler ergimiş metale gaz [31] veya gaz yapıcı partikül [32] enjeksiyonu ile üretilir.



Şekil 2.2: Kapalı hücreli metal köpük mikroyapısı. [26]

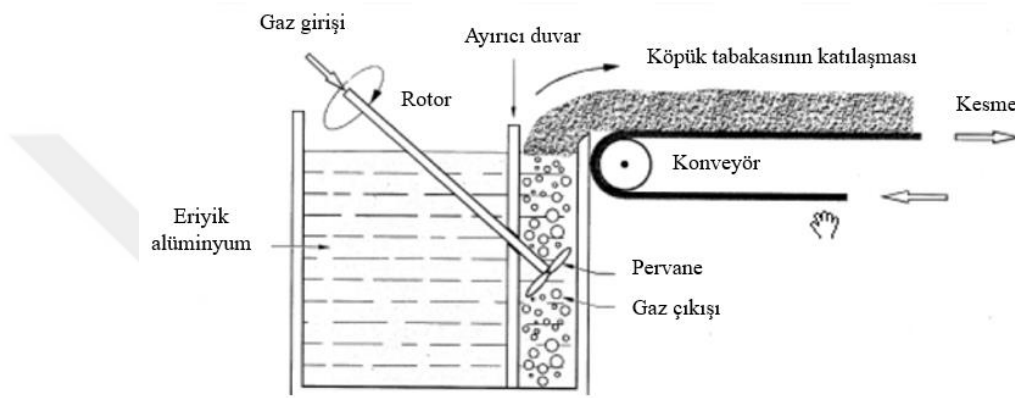
## 2.2 Köpük Metallerin Üretim Yöntemleri

### 2.2.1 Gaz enjeksiyonu ile köpük üretimi

Gaz enjeksiyonu ile üretim yönteminin arka planında eriyik metalin yapısına gaz moleküllerinin entegre edilmesi ve yapı içerisinde gaz boşlukları oluşturulması yatmaktadır. Metalik eriyiğe verilen gaz kabarcıkları kaldırma kuvvetlerinin etkisi altında yüzeye çıkma eğilimi göstermektedirler. Yüzeye hızlı çıkma isteği eriyik metalin içine atılan parçacıklar sayesinde viskozite artırılarak engellenebilir [31].

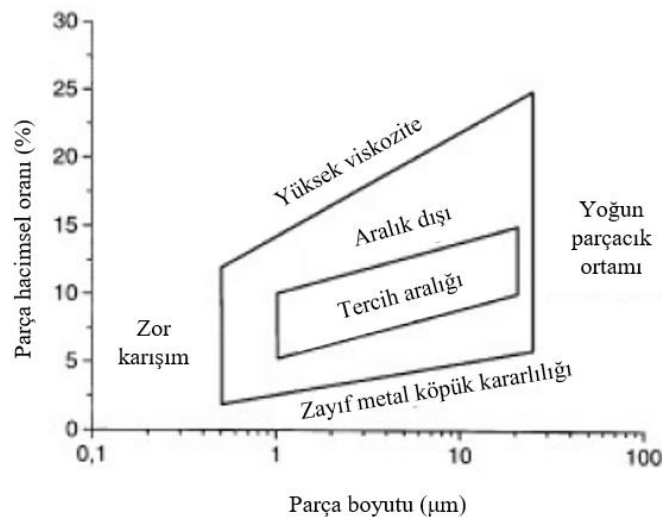
Alüminyum oksit, silisyum karbür gibi küçük, çözünmeyen veya çözünmesi yavaş olan partiküllerinin % 10- 30 seviyeleri arasında eriyik metale eklenmesi viskoziteyi arttırarak baloncukların yüzeye çıkmasını engellemektedir [33].

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi, partiküllerin eklenmiş olan eriyik metale rotor yardımıyla gaz parçacıkları ilave edilmektedir. Rotor yardımıyla gaz partikülleri eşit bir şekilde yapıya dağılım göstermektedir. Yapıdan çıkan eriyik parça yürüyen konveyör yardımıyla arzu edilen boyutlarda elde edilebilir [31].



**Şekil 2.3:** Gaz enjeksiyon ile üretim yöntemi. [31]

Kabarcıkların yüzeye çıkışını engellemek adına kullanılan harici partiküllerin boyutları 5-20  $\mu\text{m}$  değerlerinde değişkenlik göstermektedir. Şekil 2.4'de bu yöntemle birlikte partiküllerin hacimsel ve boyutsal olarak olması gereken en uygun değerler belirtilmektedir [34].

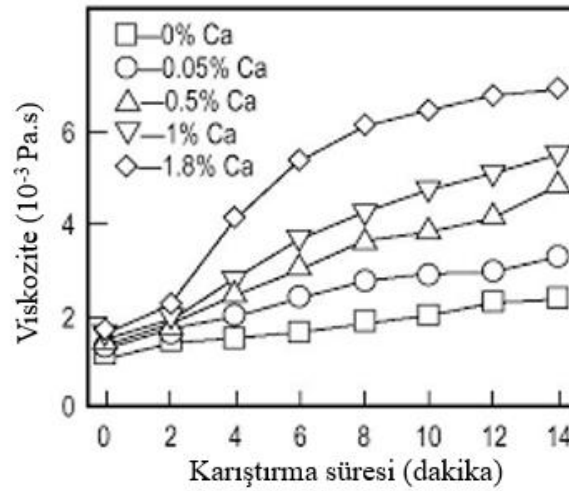


**Şekil 2.4:** Partikül boyutu ve hacimsel oran grafiği. [34]

## 2.2.2 Gaz oluşturan parçacıklar ile köpük üretimi

Bu yöntemde metal alaşımları yapısına eklenen ve ısıtıldığında gaz meydana getiren köpürtücü maddeler yardımıyla metal köpük üretimi sağlanır. Köpürtücü madde olarak geniş ölçekte titanyum hibrit kullanılmaktadır. İçerisine titanyum hidrit eklenen metal alaşım belirli sıcaklıkta titanyum ve gaz halindeki hidrojen olarak ayrışmaya başlar. Hızlı bir şekilde ortaya çıkan büyük hacimdeki gaz halindeki hidrojen kabarcıklar oluşturarak kapalı hücre bir metal köpük elde edilmesini sağlar. Oluşturulan yapının viskozitesindeki artış, yüzeye tırmanmanın yeterince yavaş olmasıyla sağlanmaktadır [32].

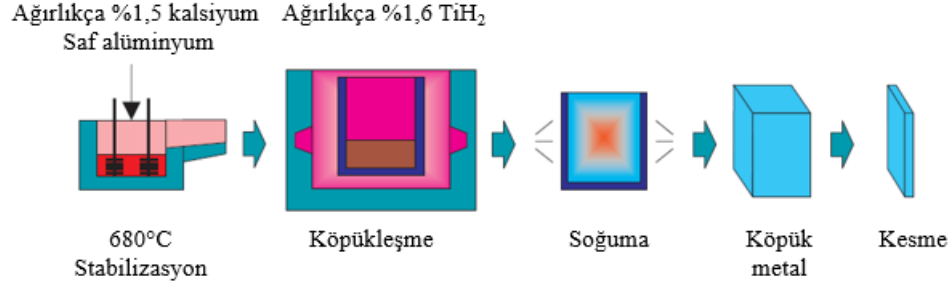
Piyasada en yaygın kullanım türlerinden biri ALPORAS yöntemidir. Bu yöntemde eriyik alüminyum içerisine toplam ağırlığın %1,5 Kalsiyum eklenerek viskozite arttırılmış olup yapı stabil hale gelmektedir. Yapıdaki kalsiyum miktarına göre akma direnci ve karıştırma süresi grafiği Şekil 2.5'teki gibi oluşmaktadır [35].



**Şekil 2.5:** Kalsiyum miktarı viskozite ve karıştırma süresi grafiği. [35]

Şekil 2.6'da görüldüğü üzere stabil hale gelen eriyik yapı döküm kalıba eklenir ve içerisine ağırlık olarak % 1,6 oranında ve 680°C sıcaklıkta titanyum hibrit eklenerek karıştırılır. Titanyum hibrit yapısındaki hidrojen var olan sıcaklığın etkisi sayesinde ayrışır. Ayrışan hidrojen gazı genişleyerek bulunduğu döküm kalıbın şeklini alır. Bu proses sayesinde yapı içerisinde partikül halde gelip eriyik yapı içerisinde oluşan gaz sayesinde metal köpük yapısı elde edilir. Döküm kalıp soğutulmaya bırakılır, kalıptan çıkarılır ve istenilen boyutlara ayrılabilir [35].

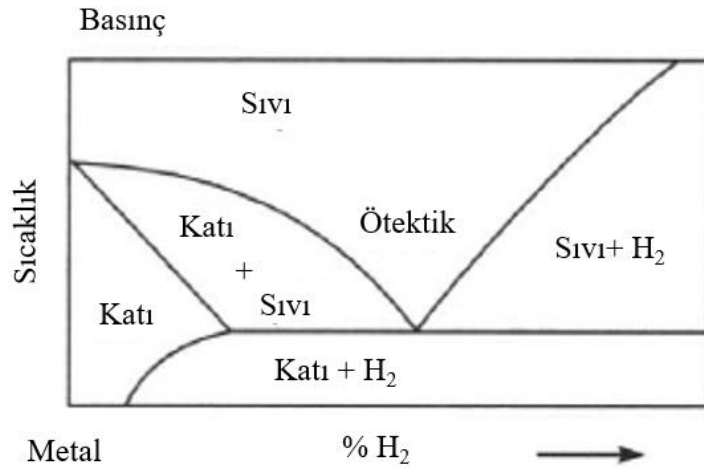




**Şekil 2.6:** Gaz oluşturan parçacıklarla metal köpük üretimin prosesleri. [35]

### 2.2.3 Katı-gaz ötektik katılaştırma metodu ile köpük metal üretimi

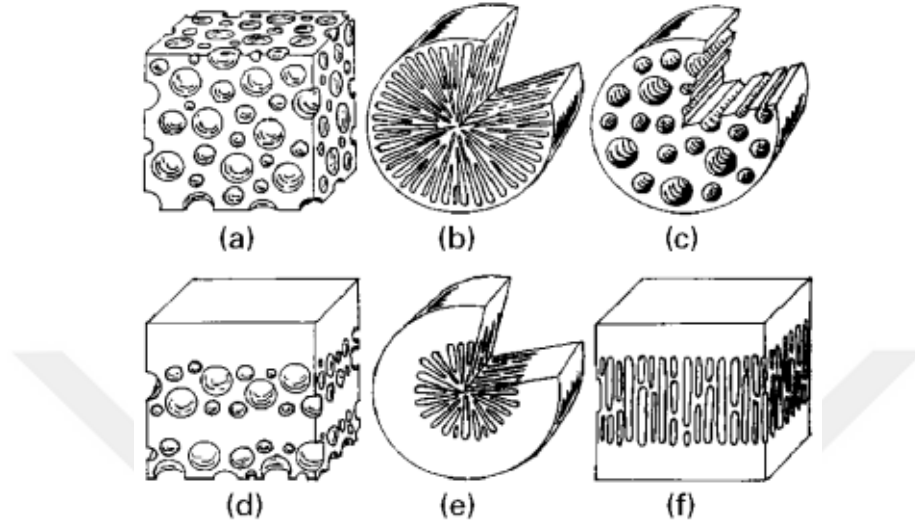
Çok sayıda hidrojen metal alaşım ikilisi etkileşime girdiğinde faz diyagramında ötektik bir yapı sergilemekte olup bunlara örnek olarak alüminyum, berilyum, krom, demir, magnezyum, mangan ve nikel bazlı alaşımlar verilebilir. Şekil 2.7’ de metal alaşım ve hidrojen etkileşimin ötektik yapıya ulaşmasına bağlı faz diyagramı bulunmaktadır. Metal alaşımlar ısıtıldıktan sonra basınç altında hidrojen gazı doygunluğuna ulaştırılır, katılaştırılır ve adım adım basıncı azaltılır. Katılma esnasında metal alaşım ve hidrojen gazı arasında ötektik reaksiyon gerçekleşir ve gaz dolu gözenekli yapı elde edilmiş olur. Bu yöntem ile üretilen malzemelere de Gasar yöntemiyle üretilmiş parçalar olarak adlandırılır [36].



**Şekil 2.7:** Hidrojen – metal alaşım faz diyagramı. [36]

Bu işlem sırasındaki süreci gözenekli yapının büyüklüğünü, şeklini ve dağılımını oluşturan parametreler eriyik için hidrojen gazı miktarı, katılma sırasında oluşturulan basıncın miktarı, başlangıç kalıp sıcaklığı, belirlenen yön altındaki ısı

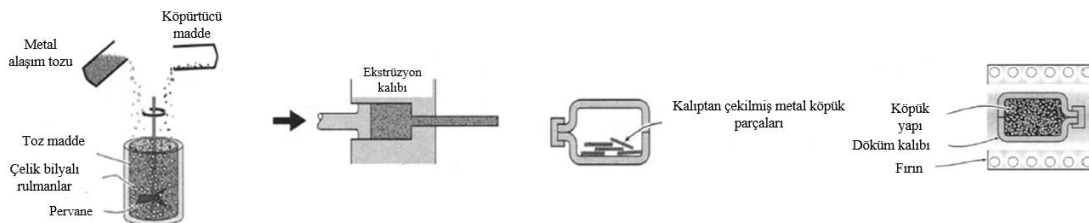
kayıpları etkisini göstermektedir. Bu nedenle bu yöntemle üretilen metal köpükler kontrollü gözenekli malzemeler olarak da adlandırılmaktadır. Şekil 2.8’de görüldüğü üzere parametreleri değiştirilen yapıların yüzey kesit görüntüleri de farklılaşmaktadır [37].



**Şekil 2.8:** Küresel (a), radyal (b), silindirik (c), lamine (d)(e)(f) boşluklu köpük metalleri. [37]

#### 2.2.4 Gaz çıkaran partiküllerin yarı katı yapıda çözünerek köpük metal üretimi

Metal yapıcı maddeler toz yapıda karıştırılıp ve birleştirilerek katı durumdaki metallerle sıkıştırılma yöntemiyle köpük metal yapısı elde edilir. Bu yöntemde de titanyum hidrit yoğun olarak kullanılan malzemelerdendir. Titanyum hibrit 465°C sıcaklığında ayrışmaya başlamaktadır. Bu değer alüminyum ve alaşımlarının altında olan bir değerdir. Bu sayede köpürtücü maddenin yapı içerisinde dağılması ve sıcaklığın yükselmesiyle birlikte de metalin eriyerek köpük oluşumunun sağlanması gerçekleşir. Kabın içerisinde oluşan gazlar ile iç taraftaki genleşmeler sayesinde bulunan yapının şekli alınmaktadır [38].



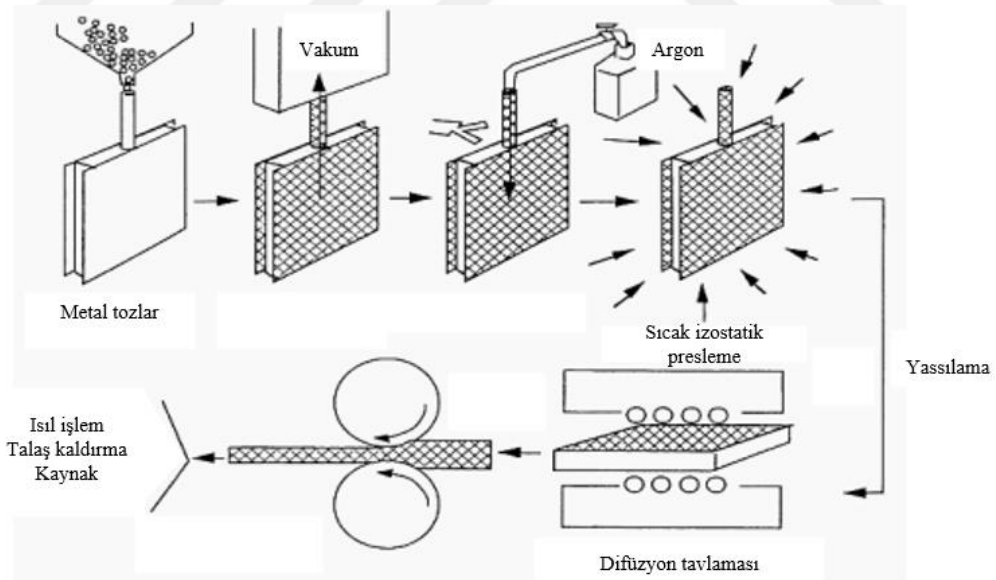
**Şekil 2.9:** Gaz çıkaran partiküllerin yarı katıda çözünerek metal köpük üretim prosesi. [38]

### 2.2.5 Sıkışmış gazın genişlemesi ile metal köpük üretimi

İnert gazlar metal içerisinde çözünme seviyesi olarak son derece düşük durumdadırlar. Toz metalurjisi yönteminde yüksek basınç altında inert gazların sisteme verilerek içerisinde küçük gözeneklerin olduğu malzemeler ortaya çıkmaktadır. Parçalar daha sonra ısıtılır, boşluklu yapı bölgelerinde basınç artar ve gözenekler toz metalin sürünmesiyle genişler [39].

Proses asıl olarak gözenekli titanyum metali üretmek üzerine kurulmuştur [16]. İlk olarak gaz geçirmez bir kutu metal tozları ile doldurulur ve vakumlanır. Yaygın uygulamalardan farklı olarak kapalı kap 3-5 bar aralığında argon gazı ile doldurulur ve yüksek sıcaklıkta izostatik preslenir. Gözenekli yapı parçanın tavlama ile ortaya çıkmaktadır [40].

Tavlama işleminin erime noktasının %60 değerinde ve 6-24 saat aralığında sürmektedir. Isıl işlem nedeniyle argon gazı genişler, denge durumuna gelene kadar iç basıncı düşürür. Şekil 2.10'da bu yöntemle birlikte üretilen malzemeleri için proses şeması verilmiştir [41].

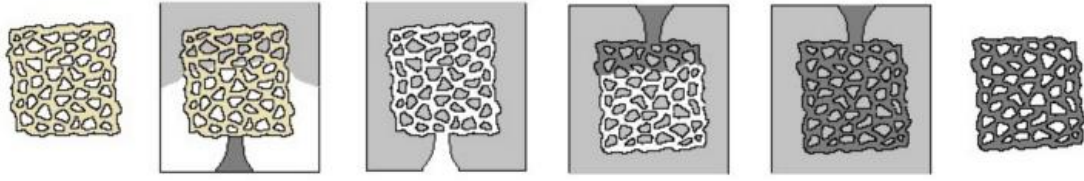


**Şekil 2.10:** Sıkışmış gazın genişlemesi ile üretim prosesi. [41]

### 2.2.6 Döküm yöntemleri ile metal köpük üretimi

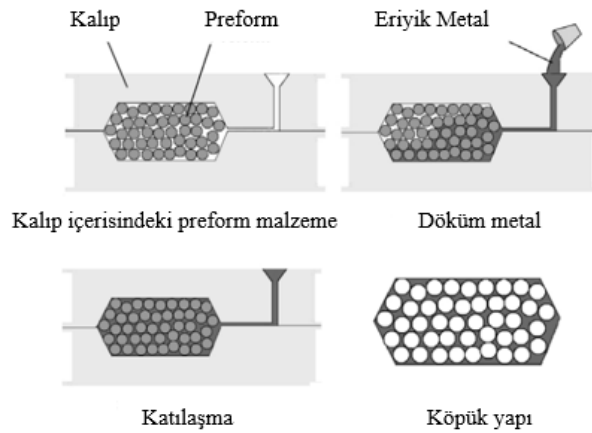
Köpük metal üretiminde önceki kısımlarda bahsedilen metal içerisinde gözenekli yapı elde etme dışında döküm yöntemleri kullanılarak da bu yapılar elde edilebilmektedir.

İlk yöntem olarak buharlaşabilen polimer kullanarak düzensiz bir yapıya sahip köpük metal üretimi bulunmaktadır. Şekil 2.11’de bu yöntemin üretim aşamaları gösterilmektedir. İstenen şekildeki polimer malzeme bir kap içinde refrakter malzeme ile doldurulur. Bu şekilde ortaya çıkarılan kalıp kurutulur ve tavlânır. Yüksek sıcaklıklara gelindiğinde kalıp içindeki polimer buharlaşır ve böylelikle erimiş metalin döküleceği kısım ortaya çıkarılmış olur. Eriyik metal kalıba dökülür ve katılaştıktan sonra kalıptan çıkarılır. Çıkarılan malzeme baştaki polimer parça ile aynı şekilde olan metal köpük formuna ulaşmış olur [42].



**Şekil 2.11:** Buharlaşabilen polimer ile iki aşamalı metal köpük üretimi. [42]

İkinci yöntem olarak gözenek oluşturun malzemeler üzerine eriyik metal ekleyerek metal köpük üretimi bulunmaktadır. Yöntemin temelinde şekil 2.12’deki gibi preform oluşturan malzemenin kalıbın içine yerleştirilmesi, kalıbın içerisine erimiş metalin eklenmesi, soğutulması ve preform malzemenin yapıdan ayrılması bulunmaktadır. Bu yöntemde kalıpta bulunan preform parçaları belirli parametrelere sahip olmalıdır. Kalıptan çıkarılabilmesi için izole durumda kalmamalı, ısıya dayanıklı ancak dökümden sonra kolayca çıkarılıp şekli bozulmamalıdır. Ortaya çıkan bu sonuçlar bu yöntemle metal köpük üretimi için engeller çıkarmaktadır [43].



**Şekil 2.12:** Gözenek oluşturun malzemelererek eriyik metal eklenerek metal köpük üretimi. [43]

### 2.3 Köpük Metallerin Uygulama Alanları

Metal köpükler, geliştirilmeye başlandıkları ilk günden itibaren hafif özgül ağırlıkları [4] nedeniyle başta otomotiv [9] sektörü olmak üzere pek çok farklı uygulama alanı ve sektör tarafından ilgiyle karşılanmışlardır. Potansiyel uygulama alanları arasında uzay-havacılık sektörü [10], gemi endüstrisi [11] ve inşaat [8] sektörü sayılabilir.

Metal köpüklerin mekanik ve fiziksel özellikleri matris malzemeleri olarak kullanılan alaşım türü, hücre yapısı, üretim metodu gibi pek çok farklı parametreye göre değişkenlik gösterir, dolayısıyla her uygulama alanı için bu parametreler göz önünde bulundurularak metal köpük seçilmelidir.

Metal köpükler farklı endüstrilerde farklı amaçlarda kullanılsalar da temelde üç farklı fonksiyonu gerçekleştirirler.

Isı ve Ses Kontrolü [44] – Metal köpükler termal iletkenlikleri düşük olduğu için yüksek sıcaklıklar altında çalışmaya uygundur; ayrıca bazı koşullar altına titreşimleri sönümleme ve sesi emme kabiliyetine de sahiptirler.

Enerji Absorpsiyonu [6] – Metal köpükler yüksek gözenekli yapıları gereği deforme olduklarını yüksek oranda mekanik enerjiyi emebilme kapasitesine sahiptir, dolayısıyla yüksek mukavemetlerinden ötürü enerji absorpsiyonu gerektiren uygulamalarda kullanılabilirler.

Düşük Yoğunluk [44] – Metal köpükler özkütleleri görece düşük ve çeşitli mühendislik uygulamaları için optimize edilebilir olduğu için hafif yapı uygulamalarında tercih edilebilirler.

Metal köpüklerin en yaygın olarak kullanıldığı sektör otomotiv sektörüdür. Özellikle hafif olmaları, darbe emici özellikleri ve sönüm kabiliyetleri metal köpüklerin popülaritesini artırmakta ve uygulama alanlarını genişletmektedir. Sektördeki güvenlik kaygıları ve homologasyon koşulları göz önünde bulundurulduğunda araç ağırlığını artırmadan yolcuların güvenliğini artıracak çözümler üretmek zorunlu hale gelmektedir. Metal köpükler hem otomotiv hem de tramvay, tren gibi raylı sistemlerde özellikle enerji absorpsiyonu ihtiyaç duyulan uygulamalar için sıklıkla tercih edilirler; üstün kinetik enerji dağıtım özelliği ile metal köpükler çarpışma esnasında gerçekleşen yük transferini kontrollü bir şekilde yavaşlatarak çarpışmanın dinamik etkilerini etkin

bir şekilde azaltırlar. Şekil 2.13'te araçlar ve tramvaylarda kullanılan metal köpük darbe emiciler görülmektedir [45].



**Şekil 2.13:** Metal köpüklerin (a) otomotiv ve (b) raylı sistemlerde darbe emici uygulamaları. [45]

İlaveten, özellikle daha kısa gövdeli aralarda hem ağırlığı azaltmak hem de kullanılabilir iç hacmi artırmak için düşük hacimde yüksek mukavemet sağlamak ve araçtaki titreşim, ses ve ısı etkileşimini minimuma indirmek için köpük metal panellere duyulan ihtiyaç artmaktadır. Titreşimi sönümleme ve sesi absorbe etme [28] yetenekleri metal köpüklere zemin kaplama malzemesi olarak veya yüksek hızlı demiryollarında yapı malzemesi olarak uygulama alanı sunmaktadır.

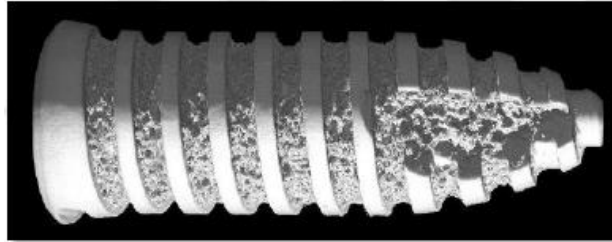
Metal köpüklerin havacılık-uzay endüstrisindeki kullanımları otomotiv sektörü ile benzerlik göstermektedir. Düşük özgül ağırlıkta sağladıkları yüksek mukavemet ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilme özellikleri uzay uygulamaları için uygun bir profil çizirken, sektörde kullanılan diğer malzemelerden nispeten düşük maliyetleri metal köpükleri cazip kılmaktadır. Hafif ve yüksek mukavemetli olduklarından helikopter kuyruk konilerinde [46]; yük absorpsiyonların yüksek olması nedeniyle uzay araçlarının iniş takımları [47] olarak da kullanılırlar.

Metal köpükler gemi sektöründe ise düşük özgül ağırlıkta yüksek hacim ve mukavemet sağlamaları ile ön plana çıkarlar. Sektörde düşük ağırlıkta yüksek yolcu ve yük taşıma kapasitesinin sağlanması ihtiyacı ön plana çıkmaktadır. Günümüzde yolcu gemileri neredeyse tamamen metal köpüklerden üretilmekte olup, ambar platformları ve fişek ambarları gibi uygulamalar da sıklıkla metal köpük kullanılmaktadır [48]. Yüksek hacimli metal köpüklerde üretilen deniz şamandıraları

herhangi bir çarpışma anında batmaması da büyük bir kullanım avantajı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Metal köpüklerin inşaat sektöründe kullanım sebepleri diğer uygulamalarla paralellik göstermesine karşın pek yaygın değildir. Hafif ve rijit özellik gösteren metal köpükler yaygın olarak yüksek ısı yalıtımı potansiyeline sahip olmaları nedeniyle binaların dış yüzeylerinde kullanılmaktadırlar, ilaveten yangına karşı dayanıklı ve hafif olmaları nedeniyle asansör kabinleri de metal köpükler için uygun kullanım alanlarındandır [49]. Yapılan incelemeler sayesinde standart metal plaka yardımıyla oluşturulan balkonlarda köpük metal kullanılmasının hafiflikten fayda sağlayarak maliyet anlamında olumlu etkileri sonucunu ulaşılmaktadır [50].

Bazı metallerden üretilen metal köpükler ise biyomedikal kullanım için de uygundur. İnsan vücudunda maruz kalınabilecek yüklere dayanıklı ve hafif yapılarına ilave olarak kimyasal stabiliteleri, biyolojik uyumlulukları ve toksik özelliğe sahip olmamaları nedeniyle özellikle protez ve diş implantlarında, kalça eklem protezlerinde ve kemik plakalarında kullanılmaktadırlar [51]. Şekil 2.14’de Titanyum bazlı metal köpükten üretilmiş diş implantı görülmektedir.



**Şekil 2.14:** Titanyum köpükten üretilmiş diş implant. [51]

Makine parçalarının hızlı ve hafif olma gereksinimleri ve çalışma esnasında maruz kaldıkları yoğun titreşim ve dinamik yükler kullanılacak malzemenin üstün fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmasını gerektirir. İlaveten ağır çalışma koşulları göz önünde bulundurulduğunda makina parçalarının uzun ömürlü olması, üretim kolaylığı ve maliyet etkisi de malzeme seçiminde önemli bir parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır. Metal köpükler enerji sönümleme kapasiteleri sayesinde ortaya çıkabilecek yorulma ve aşınma sorunlarına çözüm sunmaktadırlar. Bu nedenle torna, freze ve diğer CNC makine elemanları uygulamaları için potansiyel teşkil etmektedirler. Şekil 2.15’te metal köpükten üretilmiş makine elemanı kesiti görülmektedir.



**Şekil 2.15:** Metal köpük kullanılarak üretilme makine elemanı kesiti. [45]



### **3. SİNTAKTİK KÖPÜK METALLER**

#### **3.1 Sintaktik Köpük Metallerin Tanımı**

Günümüzde yüksek dayanım gerektiren düşük yoğunluklu malzemelere birçok uygulama alanında ihtiyaç bulunmaktadır. Bu tarz malzemeler yapıya hafif takviye maddesi [3] veya gaz [31] entegre ederek ortaya çıkarılabilir. Sintaktik köpük metaller içi boş kürelerden oluşan [3] ve belirli matris altında bu kürelerin dağılım gösterdiği kompozit malzemelerdir. Sintaktik kelimesi köken olarak ‘birlikte düzenlenme’ anlamından gelmektedir [52].

#### **3.2 Sintaktik Köpük Üretiminde Kullanılan Malzemeler**

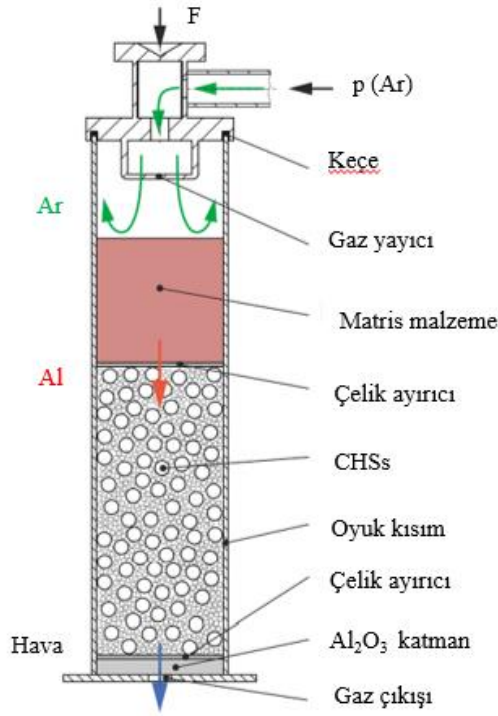
Sintaktik köpük üretiminde çok farklı tipte matris malzemeler kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak metal [2], seramik [53] ve polimer [54] matris malzemeler verilebilir. Bu noktada metal ve seramik matrisli malzemelerde yeni süreçte yaygınlaşmaya başlamaktadır. Metal ve seramik matrisli malzemelerde yeni süreçte yaygınlaşmaya başlamaktadır [53]. Metal matrisli sintaktik köpüklerde de matris malzemesi olarak genellikle alüminyum [5], titanyum, [55] çinko, [56] magnezyum [57] gibi metaller kullanılmıştır.

Takviye malzemelerin seçimi de iyi bir özellikte sintaktik köpük metal üretimi elde edilmesi adına önemli rol oynamaktadır. Metal matrisli malzemelerde genel olarak alüminyum oksit, silisyum karbür, bor karbür, cam gibi seramik parçaları kullanılmaktadır. Polimer matrisli parçalarda da cam mikro balonları yaygın kullanımlardandır [58].

### 3.3 Sintaktik Köpük Metal Üretim Yöntemleri

#### 3.3.1 İnfiltrasyon yöntemi ile üretim

Üretim yöntemlerinden ilki infiltrasyon yöntemiyle sintaktik köpük üretimidir. Bu yöntemde öncelikle kalıp içerisine preform malzeme yerleştirilir. Eriyik metal yüksek basınç, vakum ya da ikisinin birleşimi olan bir yöntem vasıtasıyla preform malzemede süzülmesi sağlanır. Bu yöntemdeki en önemli avantajlardan biri %70 hacme kadar partikül dağılımı, nihai ürüne yakın sonuç ve kompozit yapıdaki düşük gözeneklilik bulunmaktadır [18]. Şekil 2.9’da argon gazı yardımıyla basınçlı infiltrasyon yöntemiyle sintaktik köpük metal üretim şekli bulunmaktadır [59].



Şekil 3.1: İnfiltrasyon yöntemiyle sintaktik köpük metal üretimi. [59]

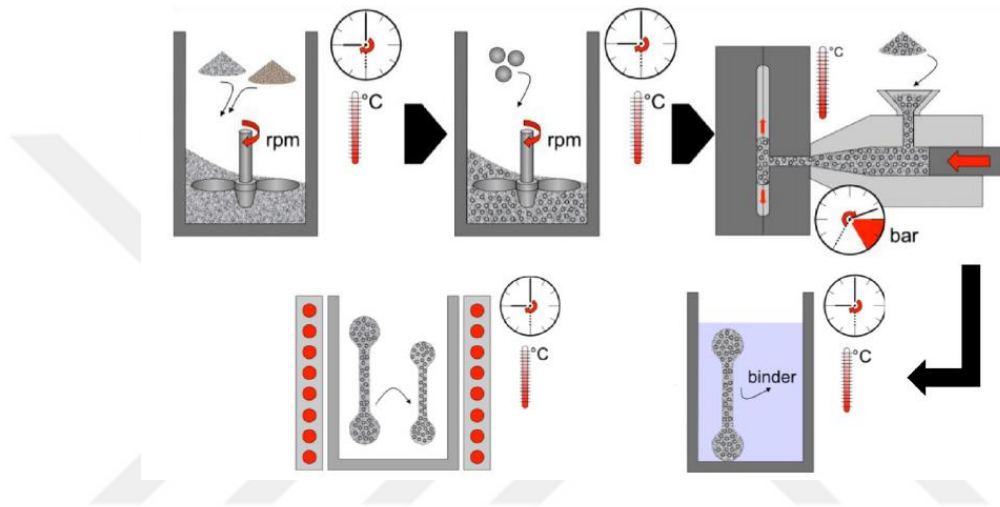
#### 3.3.2 Karıştırma yöntemi ile üretim

Sintaktik köpük metal üretiminde kullanılan bir diğer yöntem de karıştırma metodudur. Bu yöntemde mekanik bir karıştırıcı veya mekanik titreşim yardımıyla eriyik metal yapısına küreler atılarak karıştırılır. Uygulama bakımında son derece basit ve ucuz bir yöntemdir. Yüksek hacimde takviye malzemenin kullanılması iç interaksyonu arttırmakta olup düşük hacimde takviye kullanılması uygun numune

alınması açısından gereklidir. Fakat bununla birlikte katılaşma sürecinde yüzeyde partiküllerin toplanması da bir diğer bir üretim zorluğu olarak geçmektedir.

### 3.3.3 Toz metalurjisiyle üretim yöntemi

Bir diğer yöntem olarak toz metalurjisi ile üretim bulunmaktadır. Bir mekanik kuvvetle tercih edilen oranlarda birbirine karıştırılan oyuk küreler ve metal tozları daha sonra sinterleme işlemi yapılmasıyla sintaktik köpük metal üretimi sağlanır [59]. Şekil 3.2’de bu yöntemin üretim aşamalarını gösteren şematik gösterim bulunmaktadır.



Şekil 3.2: Toz metalurjisi ile sintaktik metal köpük üretimi. [59]



#### 4. SİNTAKTİK KÖPÜK METAL ÜRETİMİ

Çalışmanın bu bölümünde 7075 alüminyum matrisli genleştirilmiş cam, genleştirilmiş kil ve hibrit (genleştirilmiş cam + genleştirilmiş kil) takviyeli sintaktik köpük metal üretilmiştir. Malzeme üretimi sırasında kullanılan malzemelerin özellikleri, üretim yöntemleri ve prosesleri de bu kısımda incelenecektir.

##### 4.1 Kullanılan Malzemeler

Genleştirilmiş cam takviye içeren sintaktik köpük metali üretiminde Omnis Kompozit firması tarafından tedarik edilen genleştirilmiş cam küreler kullanılmıştır. Stikloporas olarak adlandırılan bu malzemeler küçük gözenekli granüller şeklinde geri dönüştürülmüş camdan yapılmış beyaz inorganik parçalardır.

Çizelge 4.1’ de genleştirilmiş cam kürelerin fiziksel özelliklerine ait bilgiler bulunmaktadır. Yapılan çalışmada 2-4 mm boyutundaki küreler kullanılmıştır.

**Çizelge 4.1:** Genleştirilmiş cam kürelerin özellikleri.

| Küre Boyutu<br>(mm) | Kütle<br>yoğunluğu<br>(g/cm <sup>3</sup> )<br>(±15%) | Basma<br>dayanımı<br>(MPa) | Termal<br>iletkenlik<br>W/(m-K) | Yumuşama<br>noktası |
|---------------------|------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------|
| 0,1-0,3             | 0,4                                                  | 2,8                        | -                               | ~ 700 °C            |
| 0,25-0,5            | 0,34                                                 | 2,5                        | 0,0767                          |                     |
| 0,5-1               | 0,27                                                 | 2,3                        | 0,713                           |                     |
| 1-2                 | 0,23                                                 | 2                          | 0,0663                          |                     |
| 2-4                 | 0,2                                                  | 1,4                        | 0,0639                          |                     |
| 4-8                 | 0,19                                                 | 1,2                        | 0,0661                          |                     |

Şekil 4.1’ de numune üretim sürecinde kullanılan genleştirilmiş cam malzemesi gösterilmektedir.



**Şekil 4.1:** Genleştirilmiş cam malzeme.

Çizelge 4.2’de genleştirilmiş cam kürelere ait kimyasal analiz oranları verilmiştir.

**Çizelge 4.2:** Genleştirilmiş cam kürelerin özellikleri.

| İçerik Yapısı                      | %      |
|------------------------------------|--------|
| SiO <sub>2</sub>                   | 71-73  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 1,5-2  |
| K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O | 13-14  |
| MgO+CaO                            | 8-10,5 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | <0,3   |
| Diğer                              | <0,5   |

Genleştirilmiş kil takviye içeren sintaktik köpük metali Türkiye menşeli Söğüt Toprak Madencilik Sanayi A.Ş. tarafından üretilen LECAT genleştirilmiş kil parçaları kullanılmıştır. Sinterleşme süreci çabuk olan ve 1100-1300°C dereceler arasında belirli bir hacim artışına uğrayan killerdir. Malzeme, parça yoğunluğu ( $\rho$ ) 1,068 g/cm<sup>3</sup> parça yoğunluğuna sahiptir. Yapılan çalışmada 2-4 mm boyutundaki küreler kullanılmıştır.

Çizelge 4.3'te genişletilmiş kil kürelere ait kimyasal analiz oranları verilmiştir.

**Çizelge 4.3:** LECAT genişletilmiş kil kimyasal analizi.

| Bileşen Yapısı                 | %     |
|--------------------------------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 64,83 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15,05 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7,45  |
| K <sub>2</sub> O               | 2,55  |
| MgO                            | 3,67  |
| CaO                            | 2,98  |
| Na <sub>2</sub> O              | 1,1   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,13  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,63  |
| MnO                            | 0,13  |
| T.K.                           | 1,37  |

Şekil 4.2'de numune üretim sürecinde kullanılan genişletilmiş kil malzemesi gösterilmektedir.



**Şekil 4.2:** Genişletilmiş kil malzeme.

Şekil 4.3'te numune üretim sürecinde kullanılan hibrit malzeme gösterilmektedir.

Yapılan çalışma kapsamında alınan tüm numunelerde matris malzemesi olarak 7075 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Numune üretiminde kullanılan alüminyum 25 mm çapında, 15 mm yüksekliğinde silindirler halinde grafit potalara yerleştirilerek kamara

fırında eritilmiştir. Çizelge 4.4’te matris olarak kullanılan 7075 alüminyum alaşımının ısıtıl işlemli ve ısıtıl işlemsiz olmak üzere mekanik özellikleri bulunmaktadır.



**Şekil 4.3:** Hibrit takviye malzeme.

**Çizelge 4.4:** 7075 alüminyum özellikleri.

| Özellikler           | T6-Isıl İşlemli | T6-Isıl İşlemsiz |
|----------------------|-----------------|------------------|
| Çekme Dayanımı (MPa) | 560             | 225              |
| Akma Dayanımı (MPa)  | 500             | 105              |
| Birim Uzama (%)      | 7               | 17               |
| Sertlik (Brinell)    | 169             | 60               |

Çizelge 4.5’de genişletilmiş kil kürelere ait kimyasal analiz oranları verilmiştir. Şekil 4.4’te matris malzemenin görüntüsü verilmiştir.

**Çizelge 4.5:** 7075 alüminyum kimyasal analizi.

| Bileşen Yapısı | %    |
|----------------|------|
| Si             | 0,4  |
| Fe             | 0,5  |
| Cu             | 1,2  |
| Mn             | 0,3  |
| Mg             | 2,1  |
| Zn             | 5,1  |
| Ti             | 0,2  |
| Cr             | 0,18 |
| Zr             | 0,05 |





**Şekil 4.4:** 7075 alüminyum alaşımı.

#### 4.2 Numune Üretim Ön Hazırlığı

Genleştirilmiş cam, genleştirilmiş kil ve hibrit takviyeli sintaktik köpük metal üretimi gerçekleştirilmiştir. Numune alma sürecinde kullanılan kalıp elemanları takım çeliğinden imal edilmiştir. Kalıp elemanları olarak Şekil 4.5'te gösterilen kalıp gövdesi, pul, takım kelepçesi ve piston kullanılmıştır. Yapıyı oluşturan tüm parçaların aynı malzeme özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Yüksek sıcaklıklara çıkacak bu parçalarda ısıl genleşmelerinin aynı olması sağlanmalıdır. Aksi takdirde kalıpta belirli bölgelerde boşluk olma ihtimali artmakta ve uygun numune alınmasına engel olabilmektedir.



**Şekil 4.5:** Kalıp gövdesi, kelepçe, alt pul ve piston.

Numune hazırlığı olarak kalıp parçalarının iyi derecede yağlanması da uygun ürün alınması bakımından çok kritiktir. Bu süreçte eriyik alüminyumun temas edebileceği kalıptaki tüm noktaların yağlanarak üretime başlanmalıdır. Yağlamanın eksik kaldığı noktalarda kalıp katılaştığı zaman atık alüminyum parçalarının kalıptan atılması zor olmakta ve kalıp ömrünü azaltmaktadır. Şekil 4.6’de yağlanan kalıp parçalarına ait görsel paylaşılmaktadır.



**Şekil 4.6:** Yağlanmış kalıp elemanları.

Numune hazırlık sürecinde kullanılan takviye malzeme olarak kullanılan genleştirilmiş cam ve genleştirilmiş kil malzemelerinin 2-4 mm boyutlarına getirilmesi için şekil 4.7’de gösterilen boyutları 2mm’ye uygun olan elekten geçirilerek takviye malzemeler içlerindeki kırık parçacıklardan ve istife karışmış olan daha küçük partiküllerden arındırılmıştır.



**Şekil 4.7:** 2 mm boyutuna uygun elek.

Standart koşullarda 7075 alüminyum alaşımı erime başlama sıcaklığı 670°C sıcaklığı olmasına rağmen kalıp içine numune dökölme süreleri ve erken katılaşma etkisini azaltabilmek için azaltabilmek adına alüminyum alaşımı 790°C sıcaklığında eritilmiştir. Yine aynı durum gözetilerek diğer kalıp elemanları da bu sıcaklıkta fırında bekletilerek üretime hazır hale getirilmektedir. Parçaların fırın içindeki konumları da üretim şeması adımları gözetilerek planlanmalıdır. Eritme işlemi 2-4 mm aralığındaki boyutlardaki genleştirilmiş kil, genleştirilmiş cam, hibrit takviye ve alüminyum ayrı ayrı potalara konularak hazır hale getirilmektedir. Isıtma ve eritme süreçleri sırasında ilk numunelerde bütün bileşenler birlikte fırına konulup 15 dakikalık süre zarfında fırında tutulmuştur. Bu süre takviye malzemeler için fazla gelmiş olup numunelerin sinterlemeye uğradığı görölmüştür. Bu nedenle takviye malzemeler fırına 11 dakika sonra yerleştirilmiştir. Böylelikle kalıp elemanları ve alüminyum alaşımı 15 dakika, takviye malzeme de 4 dakika fırında kalmış olmaktadır (şekil 4.8).



**şekil 4.8:** Parçaların fırında bekletilme süreci.

Bütün eritme ve ısıtma işlemleri şekil 4.9’da belirtilen Protherm MF 110 tipi kamara fırında yapılmıştır.



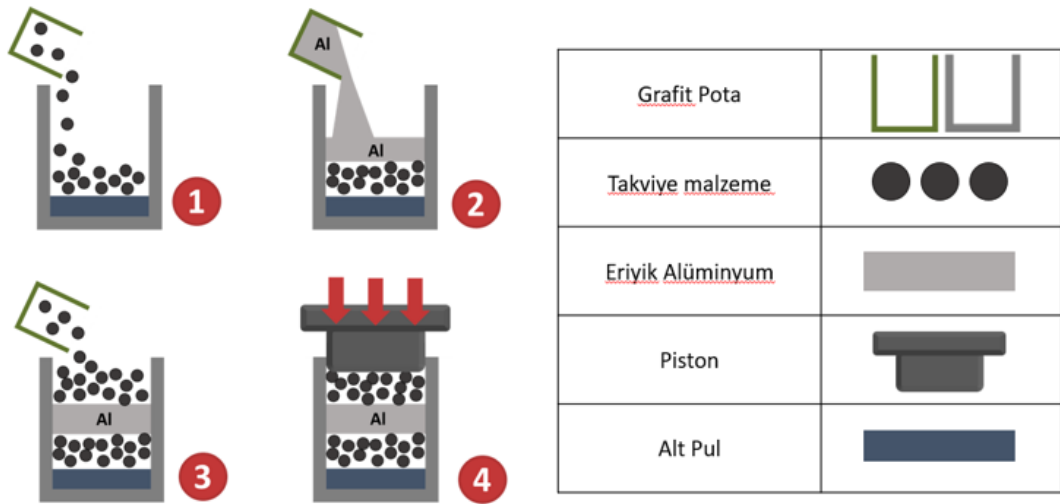
**Şekil 4.9:** Nüve MF 110 kül fırını.

#### **4.3 Numune Üretimi**

Üretim aşamasında birçok deneme yapılmış olup optimizasyon sağlanarak en uygun üretim gereklilikleri oluşturulmuştur. Optimizasyonda kürelerin miktarı, alüminyum miktarı, kalıpta kalma süreleri gibi etkenler göz önünde bulundurulmuştur.

Sintaktik köpük metal üretiminde en önemli hedef eriyik metalin kalıp boşluğunun her noktasına nüfuz etmesi vesilesiyle matris ve takviye malzemelerinin kalıp boşluğunda homojen bir şekilde dağılımını sağlamaktır. Yapılan çalışmada yer çekimi etkisi kullanılmasının yanı sıra daha iyi bir dağılım olması adına belirli bir kuvvet uygulaması da gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10’da üretim sürecindeki izlenen adımlar gösterilmiştir.

Fırın sıcaklığı 790°C’ye ulaştıktan sonra potaya konulan alüminyum alaşımı, kalıp ve piston fırın içerisine bırakılmıştır. İlk denemelerde takviye malzemesi de bu parçalarla birlikte fırına konulmuştur. İlk yöntemde fırından çıkan kalıba önce eriyik alüminyum daha sonra takviye malzeme eklenerek numune alınmaya çalışıldı. Şekil 4.11’de takviye malzemenin fırın içerisinde uzun süre kalması kalıba döküm sırasında sinterlemeye uğradığı ve dökümü zorlaştırdığı için bu yöntemde devam edilmemiştir.



Şekil 4.10: Numune üretim süreci aşamaları.



Şekil 4.11: İlk yöntemle alınan numuneler.

Yapılan numune üretim süreçlerinde takviye malzemesinin sinterlemeye uğramasının yanı sıra farklı parametreler de uygun numune alınmasına engel olmuştur. Bunlara örnek olarak ergimiş alüminyum malzemesinin döküm hızı ile birlikte katılaşmanın erken başlaması sayılabilir. Katılaşmanın erken başlaması ergimiş alüminyumun kalıp içerisindeki dağılımını etkilemektedir. Yine aynı şekilde kalıba dökülen takviye ve matris malzeme miktarlarındaki sapmalar da uygun numuneler alınmasını etkilemektedir. Bunlara ek olarak piston basıncı, hızı ve kalıp sıcaklığındaki düşüşlerde uygun numune alınmasındaki kritik parametrelerdendir.

Ek olarak sandviç infiltrasyon yönteminin de malzememin daha homojen bir yapı sağlayacağı öngörülmesinden sonra üretim aşamaları da önce takviye sonra matris malzeme daha sonra tekrar takviye malzeme olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Optimizasyon süreçleri sonunda kalıp, belirtilen boyutlarda kesilen alüminyum 790°C sıcaklıkta 15 dakika fırında bekletilmiştir. Bu süre geçtikten sonra 7 gr takviye malzeme olarak ikiye pota halinde takviye malzemeler fırına eklenmiştir. Hibrit takviye için de daha önceden birbirine karıştırılan kaplardan kendi içlerinde homojen dağılım olması adına karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra belirtilen ağırlıklarda potalara aktarılmıştır. Toplamda 20 dakikalık bir süre sonunda sırasıyla kalıp, ilk takviye, eriyik alüminyum, diğer potadaki takviye dışarı çıkarılıp kalıp içerisine dökülmüştür. Malzemelerin ulaştığı sıcaklıklar eşit olmasından dolayı alüminyum belirli bir süre sıvı halde bulunmaktadır. Dökülen numuneler yer çekimi etkisiyle birbiri içine nüfuz etmeye başlamıştır. Döküm işlemleri tamamlandıktan sonra piston parçası kalıp üzerine takviye malzeme ile temas edecek şekilde konumlandırılır. Bu noktada piston üzerine nüfuziyeti arttırmak amacıyla 2 kg değerindeki bir ağırlıkla 39,98 kPa değerinde bir basınç uygulaması gerçekleştirilmektedir (Şekil 4.12).

Piston kalıp içerisinde son noktaya geldikten 60 saniye sonra kuvvet kaldırılır. Döküm sonrasında katılaşma için soğutulmaya bırakılan kalıp yaklaşık 20 dakika gibi bir süre boyunca oda sıcaklığında bırakılmıştır. İki gövde kısmından oluşan kalıp soğutulduktan sonra birbirinden ayrılır ve kalıbın içerisinden numune çıkartılır. Kalıptan çıkan numunelerde eğe yardımıyla çapak temizleme ve sonrasında alın torna işlemi uygulanarak numune uygun hale getirilmektedir. Bu nokta kalıbın sağlığının korunması adına yapılan temizleme işlemi son derece önemlidir.



**Şekil 4.12:** Kalıptan çıkarılan ve kuvvet uygulanmış kalıp.

Çalışmada bu yöntem kullanılarak 7 adet genişletilmiş cam takviyeli sintaktik metal köpük, 7 adet genişletilmiş kil takviyeli sintaktik metal köpük ve 7 adet hibrit takviyeli sintaktik metal köpük numunesi elde edilmiştir. Şekli 4.13'te (a) genişletilmiş cam takviyeli, (b) genişletilmiş kil takviyeli ve (c) hibrit takviyeli sintaktik metal köpüklerden birer adet numuneler örnek olarak gösterilmektedir.



(a) Genleştirilmiş cam

(b) Genleştirilmiş Kil

(c) Hibrit

**Şekil 4.13:** Genleştirilmiş cam (a), genleştirilmiş kil(b) ve hibrit takviyeli (c) sintaktik metal köpük.

Alınan numunelerde kalıptan çıktığı ve alın tornalama öncesi durumda ilk ölçümlerini aldığımızda cam takviyeli metal köpük için 1,08-1,48 g/cm<sup>3</sup>, kil takviyeli metal köpük için 1,45-1,72 g/cm<sup>3</sup> ve hibrit takviyeli metal köpük için 1,35-1,65 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk değerleri arasında olmaktadır. Üretim süreci sonrasında alınan bu 21 numune bir sonraki bölümde anlatılacak olan incelemeler, ölçümler ve testler için hazır hale getirilmiştir.





## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmanın bir sonraki aşamasında üretilen numuneler tahribatlı ve tahribatsız muayeneler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda tahribatsız muayene olarak makro analizler ve mikroskop yardımıyla mikroyapı analizleri tamamlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda matris metal malzemenin numune içindeki dağılımları incelenmiştir.

Alın tornalama işlemi gerçekleştirilen uygun parçalarda yoğunluk ölçümü ayrı olarak gerçekleştirilecektir. Tornalama işlemi öncesinde üretilen 21 adet numune için de yoğunluk değerleri bir önceki bölümde de belirtildiği gibi cam takviyeli metal köpük için 1,08-1,48 g/cm<sup>3</sup>, kil takviyeli metal köpük için 1,45-1,72 g/cm<sup>3</sup> ve hibrit takviyeli metal köpük için 1,35-1,65 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk değerleri arasında olmaktadır.

Tahribatlı muayene olarak numunelere basma testi uygulanmıştır. Genleştirilmiş cam, genleştirilmiş kil ve hibrit takviyeli sintaktik köpük metal numunelerin her bir türünden altı adet numune basma testine tabi tutulacaktır. Bu altı adet numuneden üç adedi T6 ısıtılı olarak gerçekleştirilecek, diğer üç adedi ısıtılı işlem uygulanmadan gerçekleştirilecektir. Deneylerin sonucunda kırılma tipleri, birim şekil değiştirme değerleri, çatlak yapıları, plato rejimleri de bu bölümde incelenmiş olacaktır.

### 5.1 Tahribatsız Muayene

#### 5.1.1 Makro boyut incelemesi

Numunelerin makro boyut incelemeleri alınan enine kesitler yardımıyla yapılmıştır. Bu inceleme için Şekil 5.1'de gösterilen METKON FORCIPOL® 2V makinası kullanılmış olup zımparalama ve yüzey parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Silisyum karbür bazlı zımpara kağıtları ile sırasıyla 180, 240, 400, 600 ve 1000 boyutlarında zımpara işlemi uygulandı ve ardından yüzey parlatma işlemi tamamlanmıştır.



**Şekil 5.1:** METKON FORCIPOL® zımparalama ve taşlama makinesi.

Zımparalama ve yüzey parlatma işlemlerinin ardından eldi edilen numuneler makro olarak incelenmiştir. Grafit potalara manuel olarak dökülen takviye malzemelerin yapı içerisinde rastgele bir dağılım gerçekleştirmesini ortaya çıkarmaktadır. Bununla birlikte filtrasyon yöntemiyle elde edilen numunelerde yüksek ölçüde homojen bir dağılıma ulaşıldığı gözlemlenebilmektedir. Şekil 5.2’de zımparalama ve yüzey parlatma işlemi görmüş hibrit takviyeli sintaktik köpük metal gösterilmektedir.



**Şekil 5.2:** Makro boyutsal incelenen hibrit takviyeli numune.

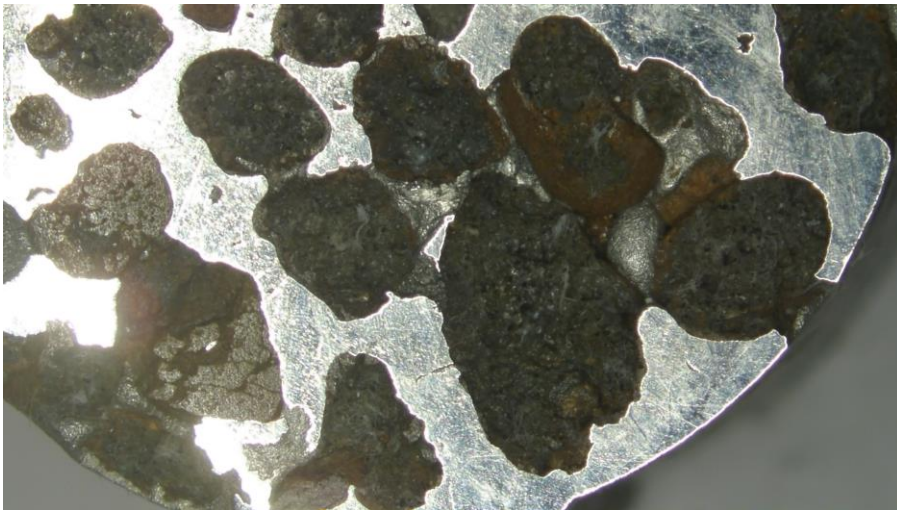
### 5.1.2 Mikro boyut incelemesi

Yüzey işlemleri tamamlandıktan sonra makro boyut incelemesi tamamlandıktan sonra numunelerin iç yapısının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3'te gösterilen Nikon SMZ800 model optik mikroskop yardımıyla numunelerin içerisindeki görüntüler bilgisayar ortamına aktarılmıştır.



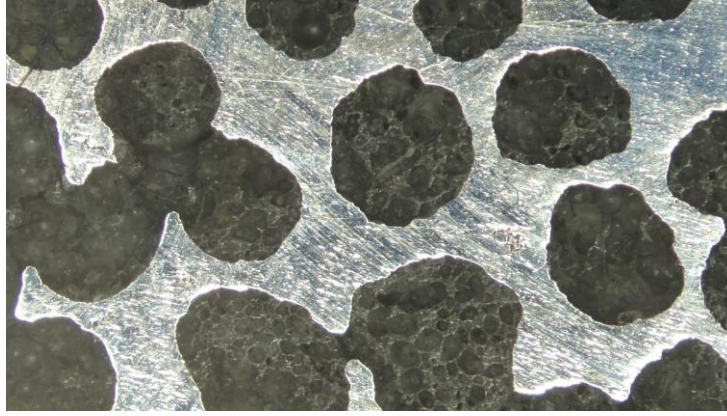
**Şekil 5.3:** Nikon SMZ 800 optik mikroskop cihazı.

Şekil 5.4'te numune üretimi sırasında oluşan döküm boşlukları gözlemlenmektedir. Oluşan bu durum toplam ağırlığın azalmasına katkı sağlamakta olup arzu edilen köpük yapıya ulaşılmasına katkıda bulunmaktadır.



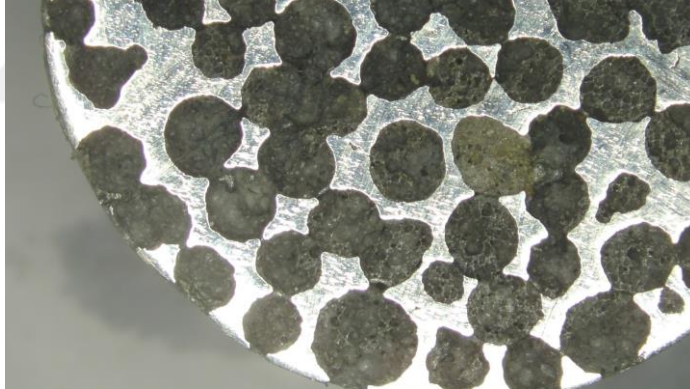
**Şekil 5.4:** Döküm boşlukları mikroskop görüntüsü.

Sintaktik köpük metallerdeki hafif olma özelliğini sağlayan bir başka özellik takviye malzemelerdeki peteksi yapı olarak belirtilmişti. Şekil 5.5'te takviye malzemelerin iç yapısındaki peteksi yapı net bir şekilde görülebilmektedir.



**Şekil 5.5:** Peteksi takviye malzeme mikroskop görüntüsü.

Şekil 5.6'da takviye malzemelerin birbiri ile temas halinde oldukları gözlemlenmektedir. Buna sebep olarak infiltrasyon sürecinde yerçekimi etkisi altında bazı takviye parçaların birbirine tutunarak hareket etmesidir.



**Şekil 5.6:** Temas halindeki takviye malzemelerin mikroskop görüntüsü.

Mikroskop incelemeleri sonucunda ergimiş alüminyumun takviye malzemeler içerisine infiltrasyon işleminin yeterli miktarda homojen bir dağılım gerçekleştirdiği gözlemlenmektedir.

### 5.1.3 Yoğunluk ölçümü

Tahribatlı muayene için elde edilen tüm numunelerin yoğunluk ölçümleri arşimed metodu kullanılarak yapılmıştır. Köpük metallerin en belirgin özelliği olarak sayılan düşük yoğunluklu malzeme olanağı elde edilen numunelerde de gözlemlenmektedir. 7075 Alüminyum malzemesi  $2,81 \text{ g/cm}^3$  yoğunluk değerine sahipken cam takviyeli

numuneler 1,35-1,55 g/cm<sup>3</sup>, kil takviyeli numuneler 1,67-1,76 g/cm<sup>3</sup> ve hibrit takviyeli numuneler 1,47-1,67 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk değerleri arasında değişim göstermektedir. Yoğunluk ölçümü alınan bütün numunelerin değerleri Çizelge 5.1’de belirtilmektedir. Numunelerden alınan yoğunluklardaki farklar döküm boşlukları, takviye elemanın dağılımı ve küre boyutlarında farklılıklar sayılabilmektedir.

**Çizelge 5.1:** Numune yoğunlukları.

| Numune Numarası | Takviye Tipi | Isıl işlem | Uzunluk (mm) | Çap (mm) | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------|--------------|------------|--------------|----------|-------------------------------|
| #1              | Cam          | -          | 33,04        | 25,03    | 1,35                          |
| #2              | Cam          | T6         | 29,59        | 25,1     | 1,37                          |
| #3              | Cam          | -          | 32,67        | 25,09    | 1,42                          |
| #4              | Cam          | T6         | 34,85        | 25,12    | 1,51                          |
| #5              | Cam          | -          | 27,65        | 25,01    | 1,55                          |
| #6              | Cam          | T6         | 33,8         | 25,15    | 1,55                          |
| #7              | Hibrit       | -          | 24,45        | 25,27    | 1,47                          |
| #8              | Hibrit       | T6         | 30,50        | 25,02    | 1,47                          |
| #9              | Hibrit       | -          | 38,24        | 25,09    | 1,53                          |
| #10             | Hibrit       | T6         | 38,37        | 24,99    | 1,59                          |
| #11             | Hibrit       | -          | 29,11        | 25,13    | 1,66                          |
| #12             | Hibrit       | T6         | 40,18        | 25,01    | 1,67                          |
| #13             | Kil          | -          | 28,03        | 25,02    | 1,67                          |
| #14             | Kil          | T6         | 38,46        | 25,42    | 1,69                          |
| #15             | Kil          | -          | 36,82        | 25,47    | 1,71                          |
| #16             | Kil          | T6         | 44,22        | 25,13    | 1,73                          |
| #17             | Kil          | -          | 38,23        | 25,05    | 1,75                          |
| #18             | Kil          | T6         | 40,39        | 25,42    | 1,76                          |

## 5.2 Tahribatlı Muayene

Tahribatlı muayene içeriğinde yoğunluk bilgilerini elde ettiğimizi toplamda 18 adet numuneye basma testi uygulanarak gerilme – birim şekil değiştirme bilgileri grafiklerle çizdirilmiştir. Her bir tipteki 6 adet numune 3 tanesi ısıl işlem yapılarak 3 tanesi ise ısıl işlem yapılmadan bu teste tabi tutulmuştur.

T6 ısıl işlem sürecinde öncelikle toplamda 9 adet numune 480 °C fırında 3 saat bekletilerek çözeltiye alma işlemi uygulanmıştır. Bu süre sonunda oda sıcaklığında bulunan bir kap içerisinde su verme işlemi uygulanmıştır. Bu süreçte fırının yaşlandırma sıcaklığı olan 120 °C sıcaklığı inmesi beklendikten sonra fırına kurutma işlemi için tekrar atılmıştır. Suni yaşlandırma için 12 saat fırında bekletildikten sonra numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmışlardır.



**Şekil 5.7:** T6 ısıl işlem uygulama adımları.

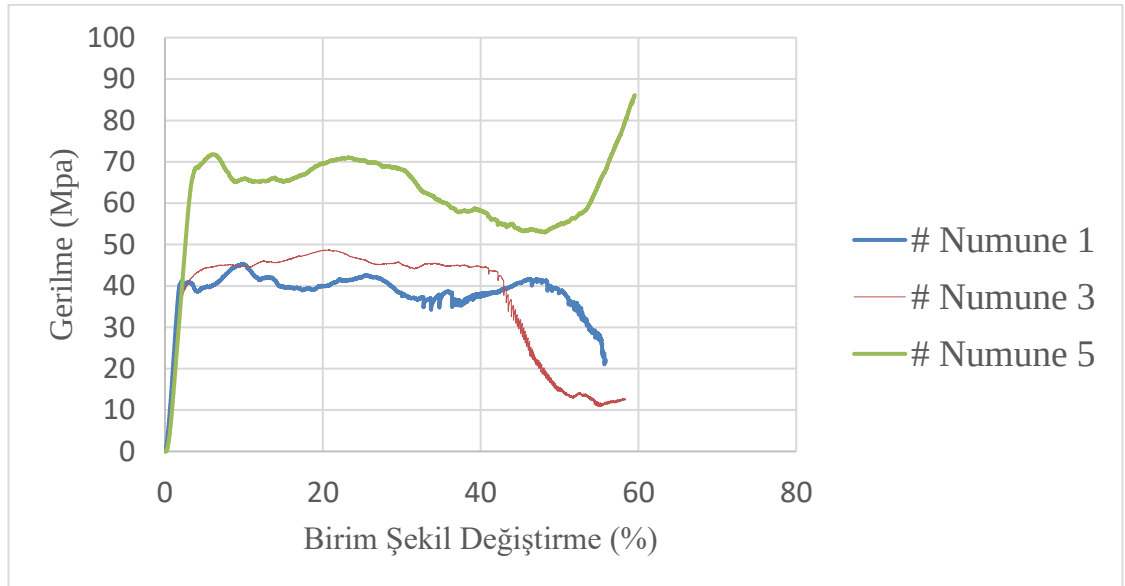
T6 ısıl işleminden sonra hazır hale gelen 9 adet numune ile birlikte ısıl işlemsiz 9 numune Şekil 5.8’ de gösterilen Schimadzu AG-IS 50 kN cihazında basma deneyi tamamlanmıştır.

İlk olarak cam takviyeli numuneleri ısıl işlemsiz ve T6 ısıl işlemli olmak üzere elde edilen grafikleri sırasıyla Şekil 5.9 ve Şekil 5.11’de gösterilmektedir. Şekil 5.10 ve Şekil 5.12’de de cam takviyeli numunelere örneklem olarak ısıl işlemsiz ve T6 ısıl işlemli olmak üzere basma testi sırasındaki birim şekil değiştirme görüntüleri gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde numunelerin genel olarak sintaktik köpük metallerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiğine uygun olduğu gözlemlenmektedir. Grafiğin ilk bölgesinde elastik deformasyon gerçekleşirken, bir sonraki aşamada plastik deformasyonun aynı gerilme seviyesinde seyrettiği plato bölgesi oluşmaktadır. Plato gerilmesinin tek bir değeri olmamakla birlikte ISO 13314 standartları gereğince %20-%30 birim şekil değiştirme değerlerindeki ortalama gerilme miktarıdır.

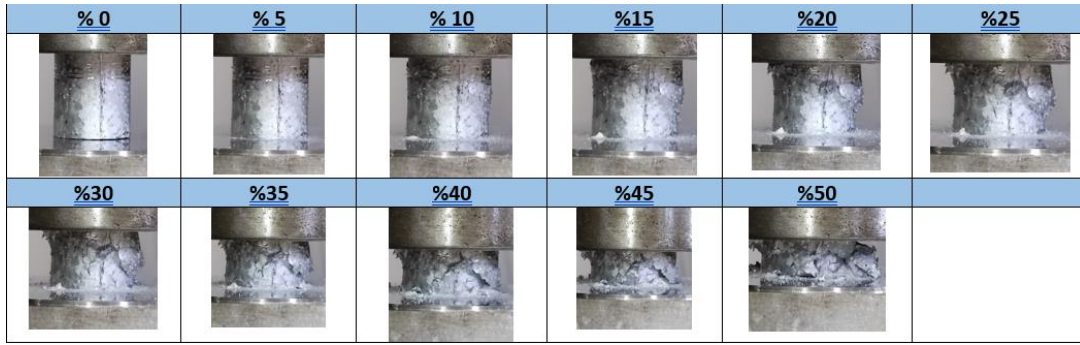




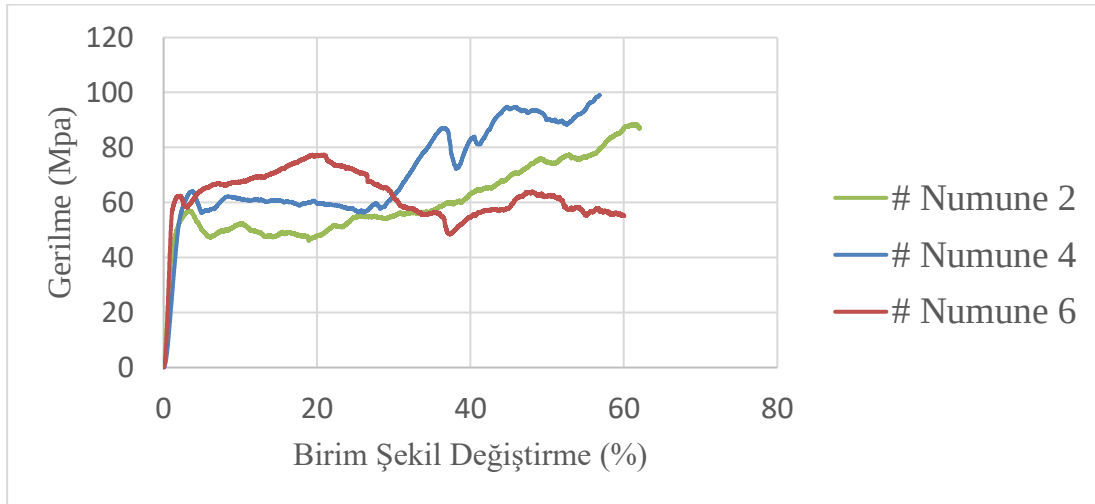
Şekil 5.8: Schimadzu AG-IS 50 kN cihazı.



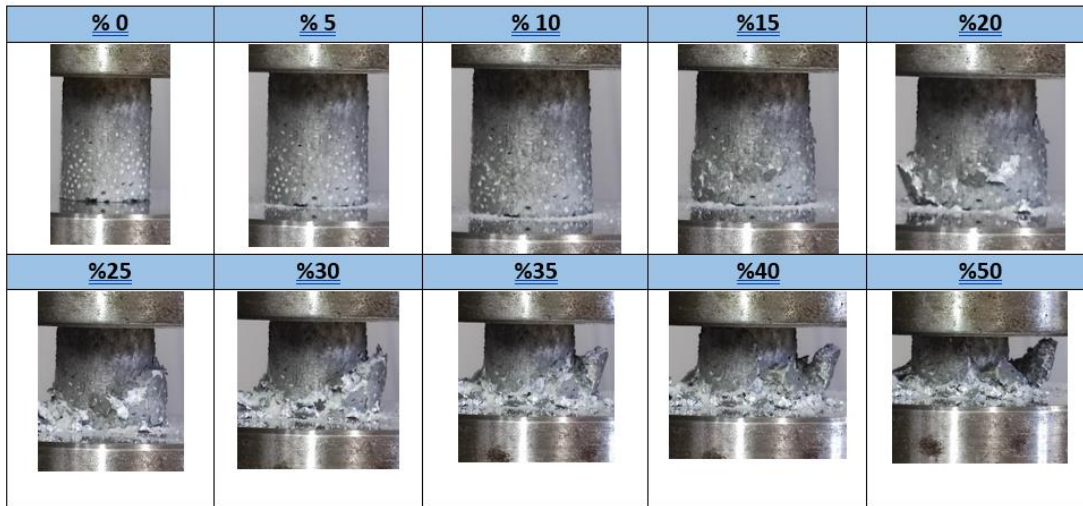
Şekil 5.9: Cam takviyeli numunelerin ısıtılmış gerilme – birim şekil değiştirme grafiği.



**Şekil 5.10:** 5 numaralı numunenin birim şekil değiştirme görüntüleri.



**Şekil 5.11:** Cam takviyeli numunelerin T6 ısıt işlemleri gerilme – birim şekil değiştirme grafiği.

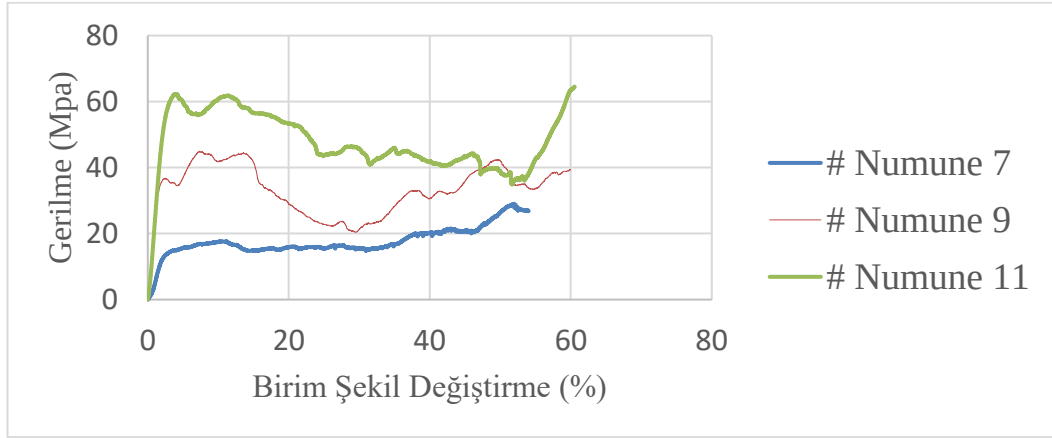


**Şekil 5.12:** 4 numaralı numunenin birim şekil değiştirme görüntüleri.

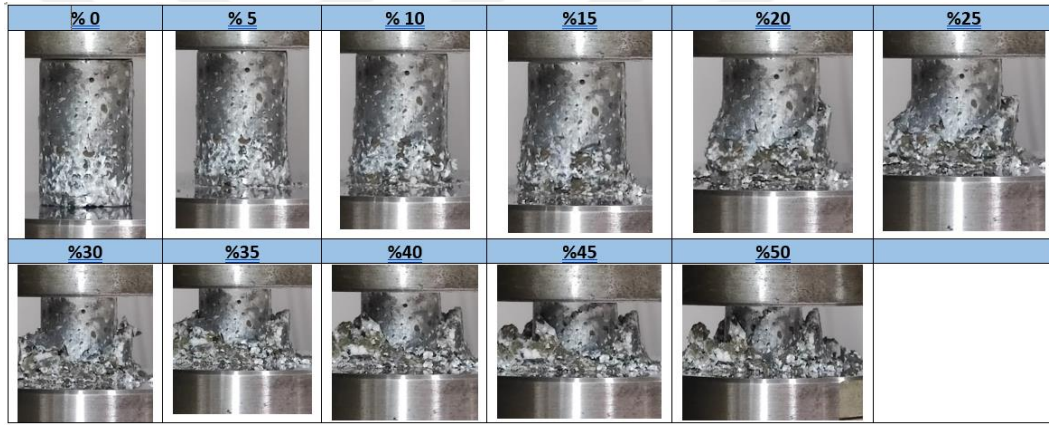
İkinci olarak olarak hibrit takviyeli numuneleri ısıt işlemsiz ve T6 ısıt işlemleri olmak üzere elde edilen grafikleri sırasıyla Şekil 5.13 ve Şekil 5.15'te gösterilmektedir. Şekil



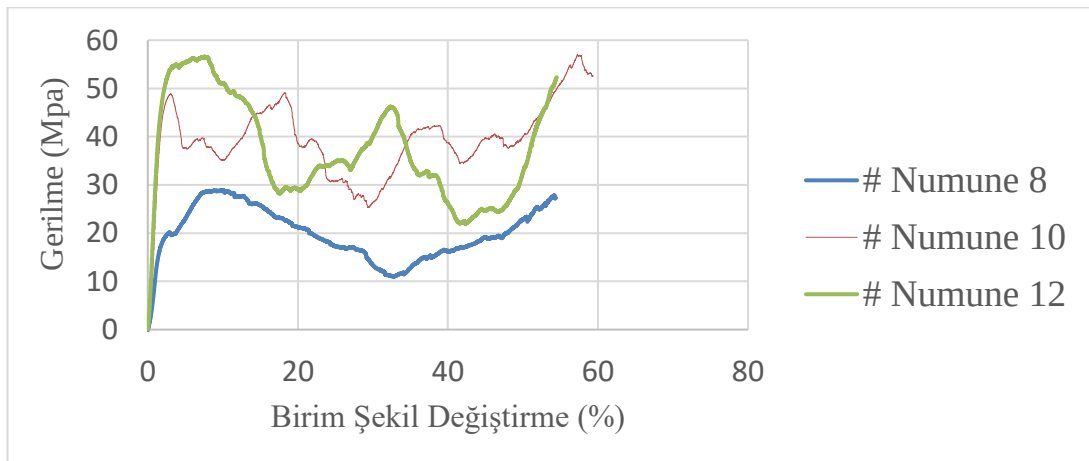
5.14 ve Şekil 5.16’da da hibrit takviyeli ısılsız işlemsiz ve T6 ısılsız işlemlili olmak üzere basma testi sırasındaki birim şekil değıştirme görüntüleri gösterilmektedir



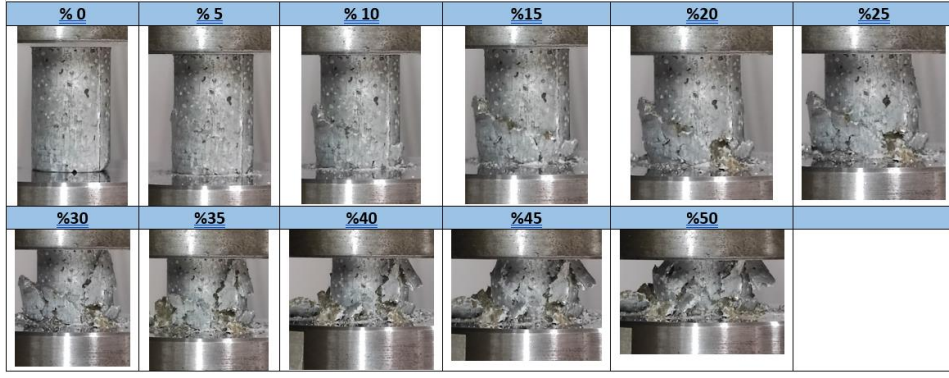
**Şekil 5.13:** Hibrit takviyeli numunelerin ısılsız işlemsiz gerilme – birim şekil değıştirme grafiğı.



**Şekil 5.14:** 9 numaralı numunenin birim şekil değıştirme görüntüleri.

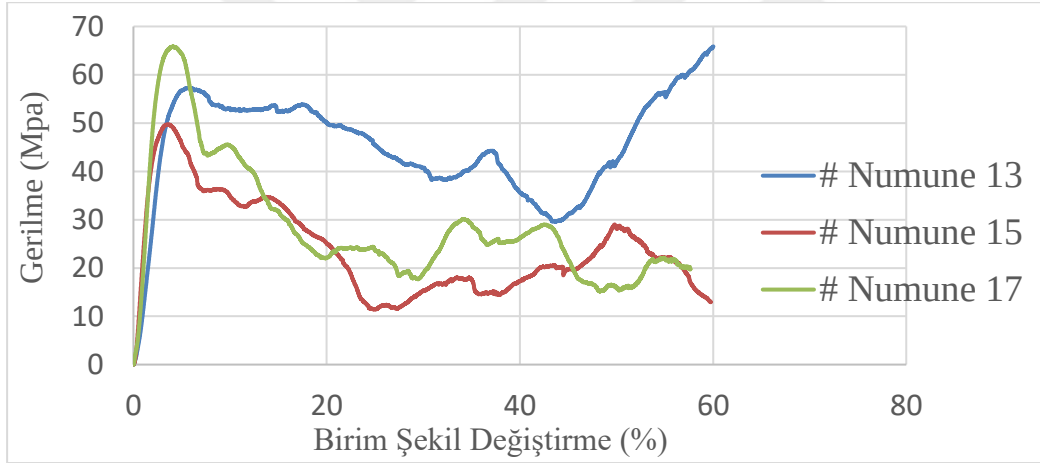


**Şekil 5.15:** Hibrit takviyeli numunelerin T6 ısılsız işlemlili gerilme – birim şekil değıştirme grafiğı.

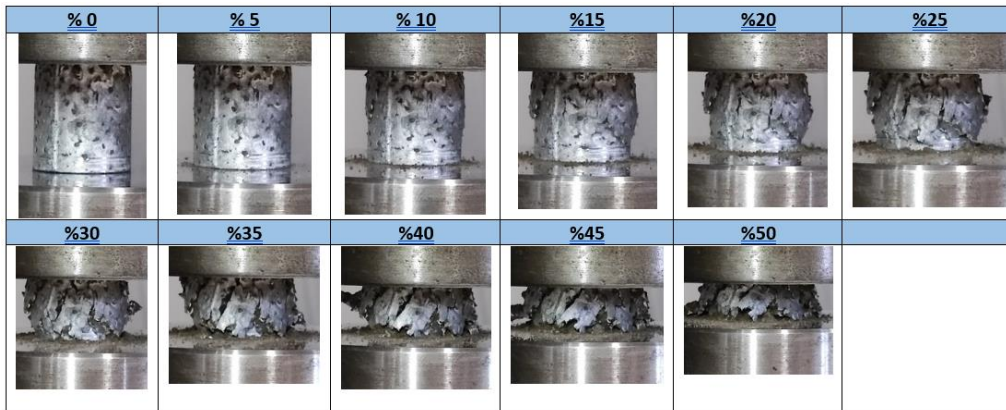


**Şekil 5.16:** 10 numaralı numunenin birim şekil değiştirme görüntüleri.

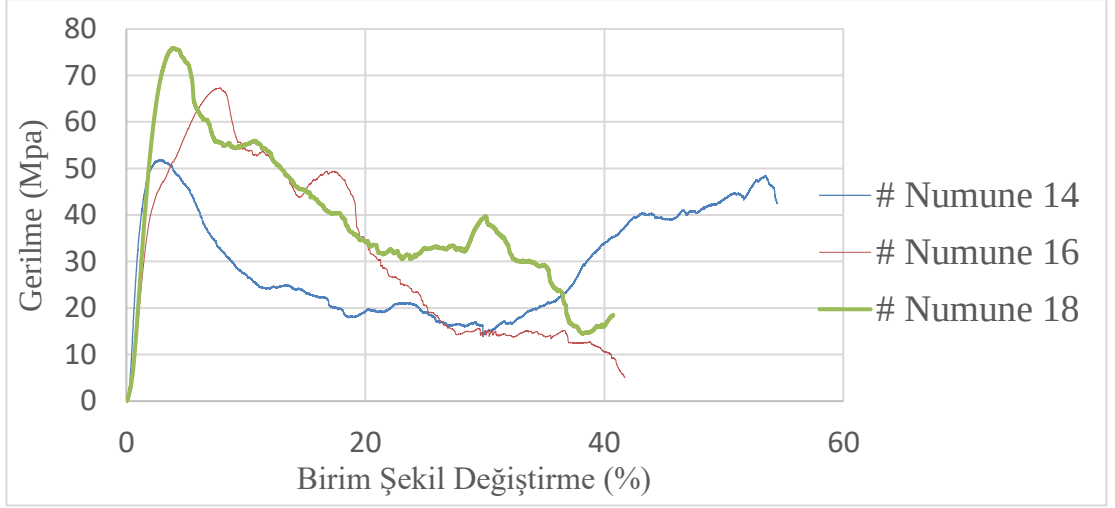
Son olarak olarak kil takviyeli numuneleri ısıt işlemsiz ve T6 ısıt işlemlı olmak üzere elde edilen grafikleri sırasıyla Şekil 5.17 ve Şekil 5.19’da gösterilmektedir. Şekil 5.18 ve Şekil 5.20’de hibrit takviyeli ısıt işlemsiz ve T6 ısıt işlemlı olmak üzere basma testi sırasındaki birim şekil değıştirme grafikleri gösterilmektedir.



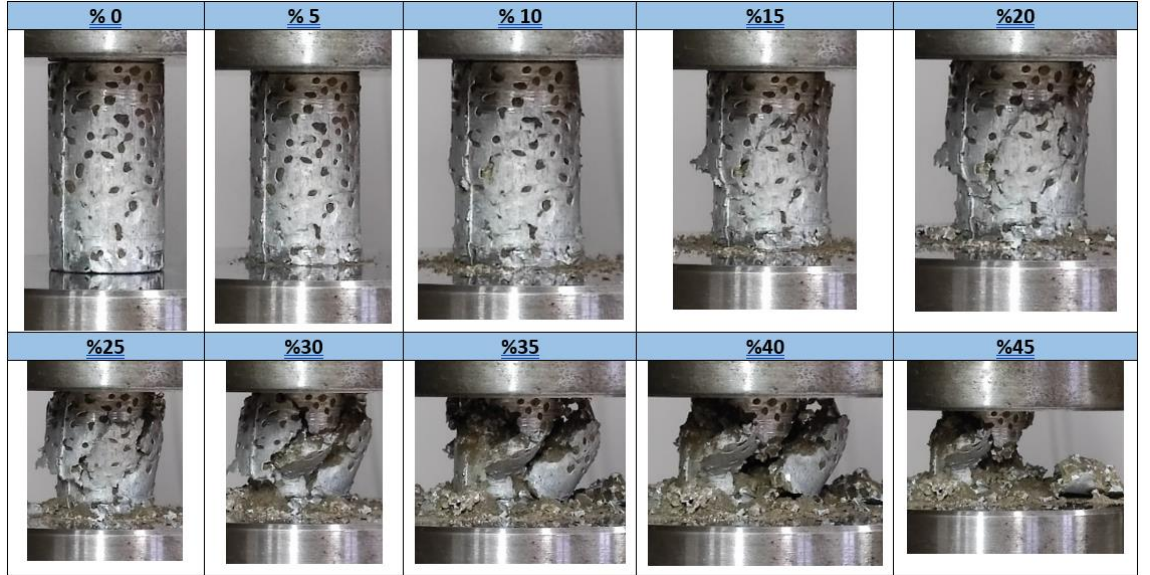
**Şekil 5.17:** Kil takviyeli numunelerin ısıt işlemsiz gerilme – birim şekil değıştirme grafiğı.



**Şekil 5.18:** 13 numaralı numunenin birim şekil değıştirme görüntüleri.



**Şekil 5.19:** Kil takviyeli numunelerin T6 ısıtıl işlemli gerilme – birim şekil değiştirme grafiği.



**Şekil 5.20:** 16 numaralı numunenin birim şekil değiştirme görüntüleri.

Sintaktik köpük metallerde malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesi birim şekil değiştirmesi %50 kısıma kadar olan alan kısmın grafikteki toplam alanı olarak hesaplanabilir. Bu alandaki değerin yüksekliği malzemenin enerji sönümleme kapasitesiyle doğru orantılıdır. Bu kapsamda birim hacimdeki enerji sönümleme miktarı Denklem 5.1 yarımıyla bulunmaktadır. Plato gerilmeleri ISO 13314 standartlarına uygun olarak %20 - %30 birim şekil değiştirme değerlerindeki ortalama gerilme miktarı alınarak belirlenmiştir.

$$\omega = \int_0^{\varepsilon_{50}} \sigma d\varepsilon \quad (5.1)$$

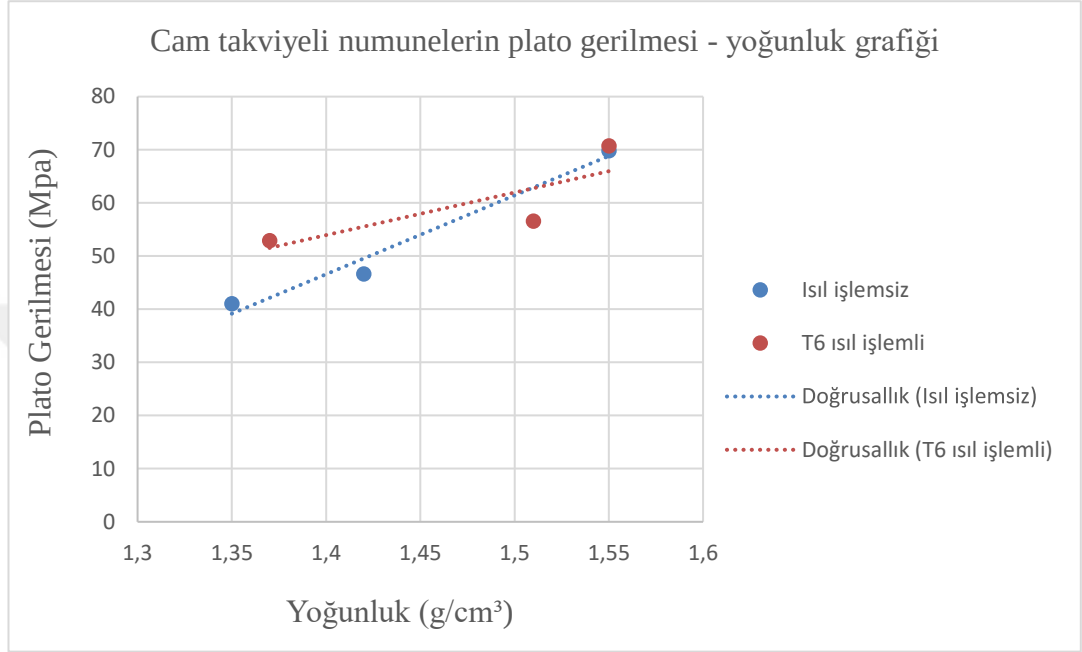
Çizelge 5.2’de basma testine tabi tutulan toplamda 18 adet numunenin plato gerilmeleri ve enerji absorpsiyon miktarları belirtilmektedir.

**Çizelge 4.2:** Plato gerilmeleri ve enerji absorpsiyon.

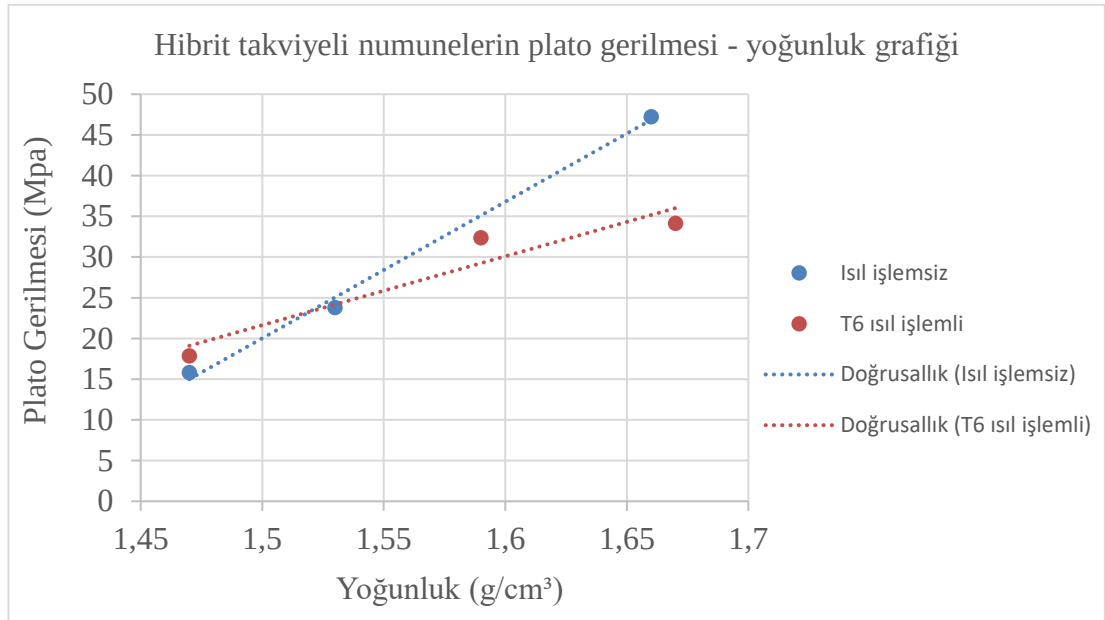
| s   | Takviye Tipi | Isıl işlem | $\sigma_{\text{Plato}}$ (MPa) | W (MJ/m <sup>3</sup> ) |
|-----|--------------|------------|-------------------------------|------------------------|
| #1  | Cam          | -          | 41,05                         | 19,6                   |
| #2  | Cam          | T6         | 52,9                          | 27,67                  |
| #3  | Cam          | -          | 46,64                         | 20,69                  |
| #4  | Cam          | T6         | 56,61                         | 33,86                  |
| #5  | Cam          | -          | 69,85                         | 30,75                  |
| #6  | Cam          | T6         | 70,75                         | 31,72                  |
| #7  | Hibrit       | -          | 15,83                         | 8,43                   |
| #8  | Hibrit       | T6         | 17,85                         | 9,72                   |
| #9  | Hibrit       | -          | 23,82                         | 16,23                  |
| #10 | Hibrit       | T6         | 32,36                         | 18,71                  |
| #11 | Hibrit       | -          | 47,23                         | 24,1                   |
| #12 | Hibrit       | T6         | 34,14                         | 18,43                  |
| #13 | Kil          | -          | 45,46                         | 21,71                  |
| #14 | Kil          | T6         | 18,43                         | 14,08                  |
| #15 | Kil          | -          | 15,42                         | 12,20                  |
| #16 | Kil          | T6         | 21,3                          | 13,4                   |
| #17 | Kil          | -          | 21,96                         | 14,96                  |
| #18 | Kil          | T6         | 33,06                         | 17,13                  |

Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’te her bir tipteki ısıt işlemsiz ve T6 ısıt işlemlı olmak üzere plato gerılme değışimlerini gösteren grafikler belirtilmektedir. Isıt işlemsiz numuneler incelendiğinde yoğunluk artışı ile birlikte plato gerilmelerindeki

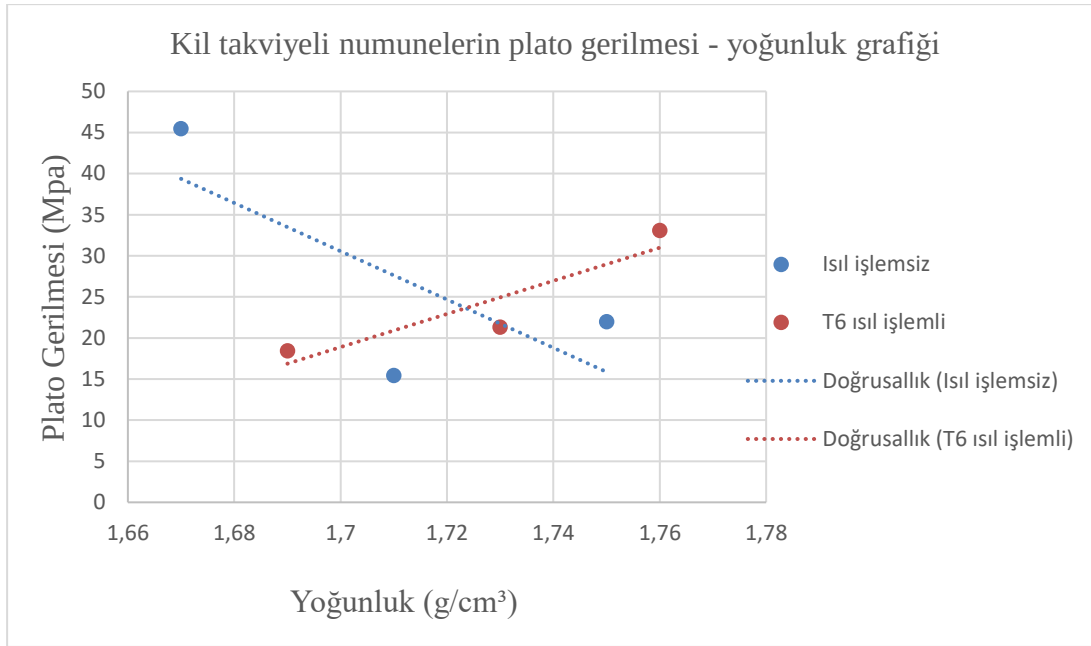
artış gözlemlenebilmektedir. Fakat kil takviyeli numunelerde lineer doğrunun aşağı yönde seyrettiği görülmektedir. Bunun nedeni olarak homojen olmayan bir dağılım, döküm boşlukları ya da takviye malzemelerin birbiri ile ilişki içinde olabilmesi söylenebilir. Bununla birlikte ısıtıl işlemlili numunelerde yoğunluk artışı ile plato gerilme değelerlerinin lineer artışı görülmektedir.



**Şekil 5.21:** Cam takviyeli numunelerin plato gerilmesi – yoğunluk grafiğı.

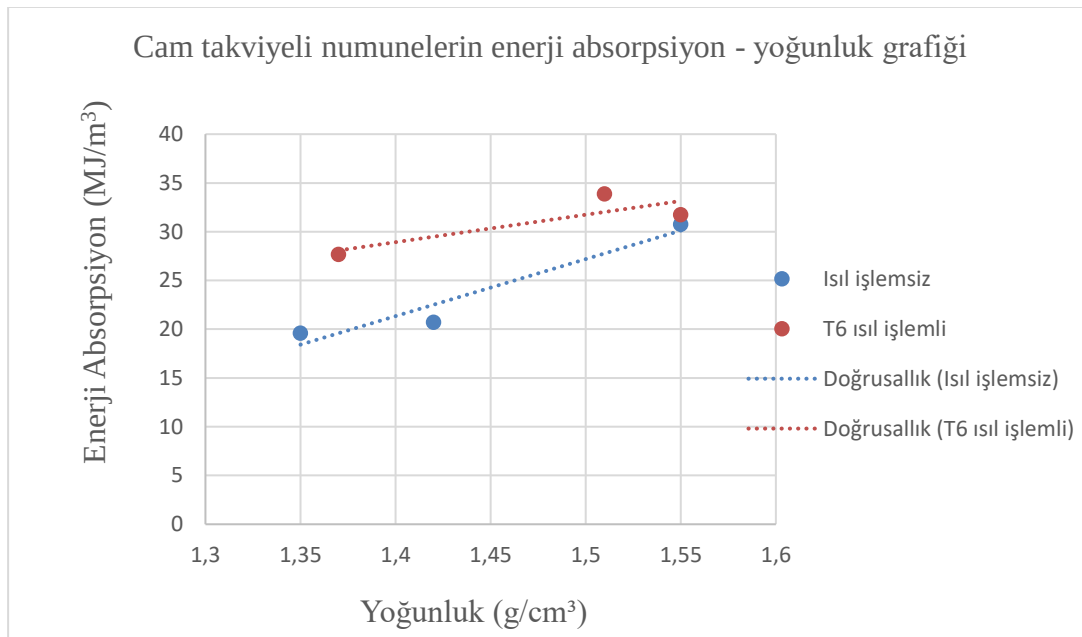


**Şekil 5.22:** Hibrit takviyeli numunelerin plato gerilmesi – yoğunluk grafiğı.

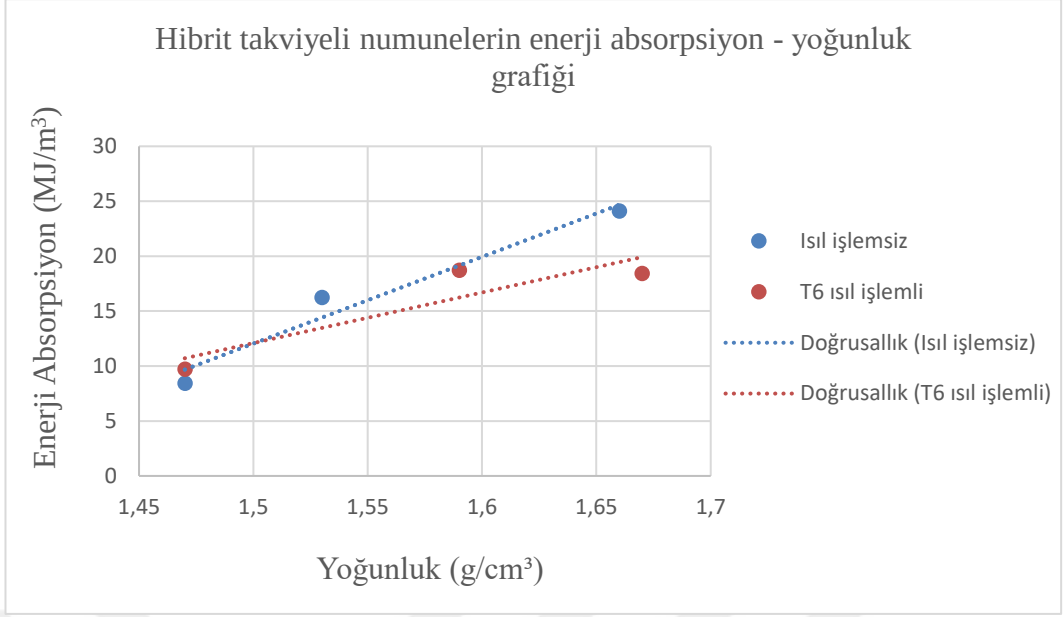


**Şekil 5.23:** Kil takviyeli numunelerin plato gerilmesi – yoğunluk grafiği.

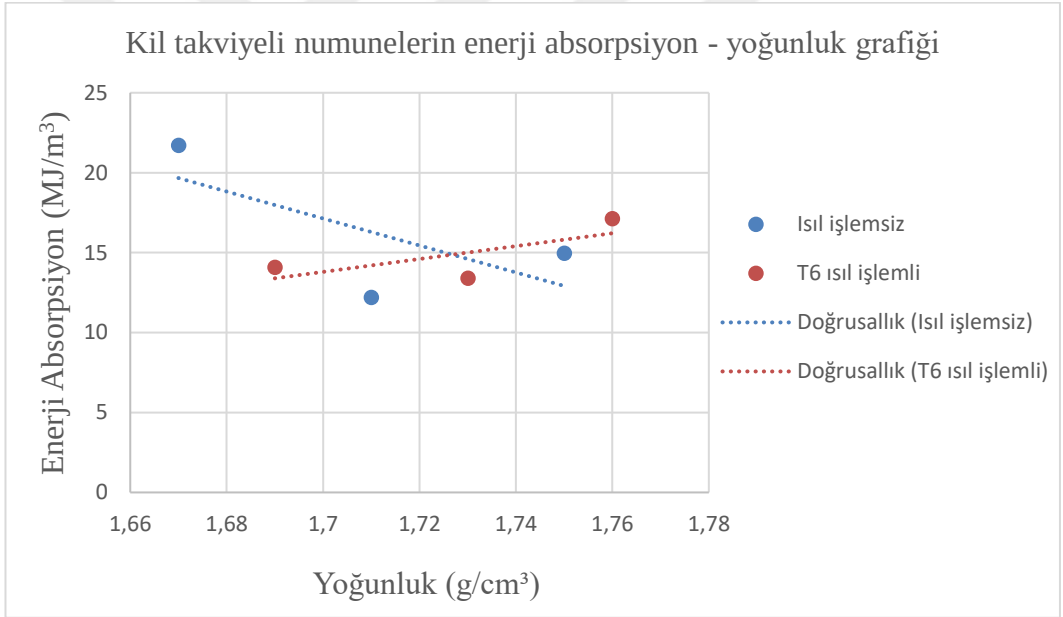
Şekil 5.24, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’da her bir tipteki ısıtılmış ve T6 ısıtılmış olmak üzere enerji absorpsiyon-yoğunluk değişimlerini gösteren grafikler gösterilmektedir. Plato gerilmelerine benzer şekilde yoğunluk artışına bağlı olarak enerji absorpsiyon değerleri de artmaktadır. Bazı numunelerdeki değer farklılıkları lineer durumu etkilese de genel olarak sintaktik metal köpük yapısına uygun durumlar oluşmaktadır.



**Şekil 5.24:** Cam takviyeli numunelerin enerji absorpsiyon – yoğunluk grafiği.



**Şekil 5.25:** Hibrit takviyeli numunelerin enerji absorpsiyon – yoğunluk grafiği.



**Şekil 5.26:** Kil takviyeli numunelerin enerji absorpsiyon – yoğunluk grafiği.





## 6. GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmalar sonucunda genleştirilmiş cam, genleştirilmiş kil ve bu parçaların karışımından oluşan hibrit takviyeli ve 7075 alüminyum matrisli malzemeler kullanılarak başarılı bir şekilde sintaktik köpük metal üretimi sağlanabilmektedir. İlk numunelerden alınan ölçüm değerleriyle birlikte de yoğunluk oranlarında gözle görülür biçimde bir düşüş gerçekleşmiştir. Bu noktada hafiflik gereksinimi duyulan tasarım durumlarında mekaniksel özelliklerin de sağlanmasıyla parçanın kullanılabilirliği kanıtlanmış olmaktadır.

Yapılan çalışmada kullanılan takviye malzemelerin nüfuziyet konusunda başarılı bir şekilde uygulandığı gözlemlenmiştir. Bu noktada fırındaki parçaların çıktığı 790°C sıcaklığın malzemeleri ani soğumalarından en az şekilde etkilenmesini sağlamıştır. Kullanılan takviye malzemelerin genel olarak çaplarının 2-4 mm arasında değişmesi de parça içerisinde nüfuziyeti arttıran durumlardan biri olmuştur. Üretim sırasında sandviç yöntemiyle önce takviye malzeme sonra eriyik alüminyum ve sonra tekrar takviye malzeme kullanılmış olup pistonun üst tarafına yerleştirilen 2 kg'lık bir kütle konulmuş ve 39,98 kPa değerinde basınç uygulaması sağlanmıştır. Bu kuvvet sayesinde de malzeme içerisindeki homojen dağılım daha uygun hale gelmiştir. Açılan kalıptan alınan numunelerde önce çapaklar alınmış olup, daha sonra testlere uygun hale gelmesi açısından tornalama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Alınan numunelerde yoğunluk ölçümleri gerçekleştirildiğinde cam takviyeli metal köpük için 1,35 – 1,55 g/cm<sup>3</sup>, kil takviyeli metal köpük için 1,67-1,76 g/cm<sup>3</sup> ve hibrit takviyeli metal köpük için 1,47-1,67 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk değerleri arasında olmaktadır. . Elde edilen numunelerde 7075 alüminyum ile karşılaştırıldığında cam takviyeli numunelerde % 49, hibrit takviyeli numunelerde % 45 ve kil takviyeli numunelerde % 40 oranında yoğunluk düşüşü gerçekleşmiştir.

Elde edilen numuneler basma testi için öncelikle T6 ısıtma işlem sürecine başlatılmış olup toplamda 9 adet numune 480 °C fırında 3 saat bekletilerek çözeltiye alma işlemi uygulanmıştır. Bu süre sonunda oda sıcaklığında bulunan bir kap içerisinde su verme işlemi uygulanmıştır. Bu süreçte fırının yaşlandırma sıcaklığı olan 120 °C sıcaklığı inmesi beklendikten sonra fırına kurutma işlemi için tekrar atılmıştır. Suni yaşlandırma için 12 saat fırında bekletildikten sonra numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmışlardır. Basma testine uygun hale gelen ürünler ısıtma işlemi ve ısıtma işlemli olmak üzere testler tabi tutulmuştur. Alınan sonuçlara göre numunelerin genel olarak sintaktik köpük metallerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiğine uygun olduğu gözlemlenmektedir. Grafiğin ilk bölgesinde elastik deformasyon gerçekleşirken, bir sonraki aşamada plastik deformasyonun aynı gerilme seviyesinde seyrettiği plato bölgesi olduğu görülmektedir

Gelişen endüstride sintaktik köpük metallerin daha da yaygınlaşması ileride görülebilecek durumlardandır. Hem yoğunluk konusunda sağladığı önemli katkı, hem de mekaniksel olarak gösterilen özellikler sintaktik köpük metal uygulama alanlarının her geçen gün artacağını öngörebileceğimiz parametrelerdendir. Bu nokta malzeme parametrelerindeki çok sayıdaki değişkenlikle farklı ürünler elde edilebilmektedir. Matris malzeme seçimi, takviye malzeme seçimi, boyutları, kalınlıkları, üretim yöntemi, karıştırılma oranları bu parametrelerden birkaçı olup en uygun malzemenin elde edilebilmesi değişkenlik gösterebilmektedirler. Bu kadar fazla değişkenin olması da sintaktik köpük metallerle ilgili çalışmaların devamının her geçen gün artacağını bir sonucu olarak karşımıza çıkacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] **Yıldırım, Ç.V.** (2018). Metalik Köpük Malzemelerin Üretim Yöntemleri, Uygulama Alanları Ve Malzeme Özellikleri. *Journal of Advanced Technology Sciences*, 7(2), (pp. 100-116). Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/duzceitbd/issue/39375/435644>
- [2] **Zhang, L. P., & Zhao, Y. Y.** (2007). Mechanical response of Al matrix syntactic foams produced by pressure infiltration casting. *Journal of Composite Materials*, 41(17), 2105-2117.
- [3] **Yu, M., Zhu P., & Ma, Y.** (2013). Effects of particle clustering on the tensile properties and failure mechanisms of hollow spheres filled syntactic foams: A numerical investigation by microstructure based modeling. *Materials and Design*, 47, 80-89
- [4] **Taherishargh, M., Belova, I.V., Murch, G.E., & Fiedler, T.** (2014). Low-density expanded perlite-aluminium syntactic foam. *Materials Science and Engineering: A*, 4, 127-134
- [5] **Orbulov, I.N., Szlansik, A.** (2018). On the Mechanical Properties of Aluminum Matrix Syntactic Foams. *Advanced Engineering Materials*. 20(5) 1700980. <https://doi.org/10.1002/adem.201700980>
- [6] **Banhart, J.** (2001) Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams, *Progress in Materials Science*, 46, 559-632.
- [7] **Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, L.J, Hutchinson, J.W & Wadley, H.N.G.** (Eds.), (2000). Chapter 1 – Introduction. *Metal Foams: A Design Guide* (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1016/B978-075067219-1/50003-9>
- [8] **Hipke, T., Hohlfeld, J., & Rybandt, S.** (2014). Functionally aluminum foam composites for building industry. *Procedia Materials Science*, 4, 133-138.
- [9] **Claar, T. D., Yu, C. J., Hall, I., Banhart, J., Baumeister, J., & Seeliger, W.** (2000). Ultra-lightweight aluminum foam materials for automotive applications. *SAE transactions*, 109(5), 98-106.
- [10] **Nie, Z., Lin, Y., & Tong, Q.** (2018). Numerical simulations of two-phase flow in open-cell metal foams with application to aero-engine separators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 917-932.
- [11] **Banhart, J., Schmoll, C., & Neumann, U.** (1998). Light-weight aluminium foam structures for ships. In L.Faria, (Ed.), *G In Proceedings of the Conference on Materials in Oceanic Environment*, (pp. 55-63). Portugal: Lisbon, 22-24 July.
- [12] **Rúa, J. M., Zuleta, A. A., Ramírez, J., & Fernández-Morales, P.** (2019). Micro-arc oxidation coating on porous magnesium foam and its

potential biomedical applications. *Surface and Coatings Technology*, 360, 213-221.

- [13] **Vogiatzis, C.A., & Skolianos, S.M.** (2016). On the sintering mechanisms and microstructure of aluminium–ceramic cenospheres syntactic foams produced by powder metallurgy route. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 82, 8-19
- [14] **Ramachandra, M., & Radhakrishna, K.** (2005). Synthesis microstructure - mechanical properties – wear and corrosion behaviour of an Al-Si (12%)– fly ash metal matrix composite. *J. Mater. Sci.* 40, 5989-5997, DOI 10.1007/s10853-005-1303-6.
- [15] **Paserin, V., Marcuson, S., Shu J., & Wilkinson, D.S.** (2003). The Chemical Vapor Deposition Technique for Inco Nickel Foam Production— Manufacturing Benefits and Potential Applications. In: Banhart J., Fleck N.A., editors. *Proceedings of the Cellular Metals and Metal Foaming Technology*; Berlin, Germany Berlin, Germany: MIT-Verlag; pp. 31–38.
- [16] **Banhart, J., Baumeister, J.** (1998). Production Methods for Metallic Foams. *MRS Online Proceedings Library*, 521, pp. 121–132. <https://doi.org/10.1557/PROC-521-121>
- [17] **Salimon, A., Bréchet, Y., Ashby M.F., & Greer, A.L.** (2005). Potential applications for steel and titanium metal foams. *Journal of Matirial Science*, 40, 5793-5799.
- [18] **Gupta, N., Luong, D.D., Rohatgi, P.K. & Schultz, B.F.** (2011). The Synthesis, Compressive Properties, and Applications of Metal Matrix Syntactic Foams. *The Member Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 63(2). pp. 36-42. Retrieved From: <https://www.tms.org/pubs/journals/jom/1102/rohatgi-1102.html>
- [19] **Shishkin, A., Drozdova, M., Kozlov, V., Irina, H., & Lehmhus, D.** (2017). Vibration-Assisted Sputter Coating of Cenospheres: A New Approach for Realizing Cu-Based Metal Matrix Syntactic Foams. *Metals*, 7, 16. DOI: 10.3390/met7010016
- [20] **Banhart, J.** (2013). Light-Metal Foams – History of Innovation and Technological Changes. *Advanced Engineering Materials*, 15(3), (pp. 28-111). <https://doi.org/10.1002/adem.201200217>
- [21] **Apatsidis, D.P., Pandit, A. & Ryan, G.** (2006). Fabrication Methods of Porous Metals for Use in Orthopaedic Applications. *Biomaterials*, 27(13), (pp. 2651-2670). <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.12.002>
- [22] **Khabushan, J.K., Sarajan, Z. & Soltani, M.** (2011). Foaming of Al-Si by TiH<sub>2</sub>. *Material and Manufacturing Processes*, 26(10), (pp. 1293-1298). <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.551964>
- [23] **Banhart, J.** (2007). Metal Foams – From Fundamental Research to Applications. In Matthew, M.D., Raj. B., Ranganathan, S., Rao, K.B.S., & Shankar, P. (Eds.), *Fronteriers in the Design of Materials*. (pp. 279-289).

- [24] **Danacı, E.** (2011). Ti-6Al-4V Alaşımı ile Açık Hücreli Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu. [Unpublished master thesis]. Istanbul Technical University.
- [25] **Oshida, Y.** (2013). Advanced Materials, Technologies, and Processes. *Bioscience and Bioengineering of Titanium Materials* (2nd ed., pp. 457-497). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62625-7.00012-1>
- [26] **Herath.S., Sathurusinghe, P.** (2012). Elastic Properties of Open Cell Metallic Foams Using Finite Element Analysis and Homogenization Technique. [Conference Paper] *45th Institute of Engineers Pakistan Convention*, Karachi, Pakistan. DOI: 10.13140/RG.2.1.2325.3606
- [27] **Lua, T.J., Stone H.A., & Ashby M.F.** (1998). Heat transfer in open-cell metal foams. *Acta Materialia*, 46, 3619-3635.
- [28] **Lu, J.T., Hess, A., & Ashby, M.** (1999). Sound absorption in metallic foams. *Journal of Applied Physics*, 87, 7528-7539. DOI : 10.1063/1.370550
- [29] **M. Cheng, T. Wahafu, G. Jiang, W. Liu, Y. Qiao, X. Peng, T. Cheng, X. Zhang, G. He, X. Liu,** A novel open-porous magnesium scaffold with controllable microstructures and properties for bone regeneration, *Sci. Rep.* 6 (2016) 24134, , <https://doi.org/10.1038/srep24134>.
- [30] **Pestryakov, A. N., Yurchenko, E. N., & Feofilov, A. E.** (1996). Foam-metal catalysts for purification of waste gases and neutralization of automotive emissions. *Catalysis today*, 29(1-4), 67-70.
- [31] **Banhart, J., Baumeister, J.** (1998). Production Methods for Metallic Foams. *MRS Online Proceedings Library* 521, pp. 121–132. <https://doi.org/10.1557/PROC-521-121>
- [32] **Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, L.J, Hutchinson, J.W & Wadley, H.N.G.** (Eds.), (2000). Chapter 2 – Making Metal Foams: A Design Guide (pp. 6-23). <https://doi.org/10.1016/B978-075067219-1/50004-0>
- [33] **Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, L.J, Hutchinson, J.W & Wadley, H.N.G.** (Eds.), (2000). Chapter 2 – Making Metal Foams: A Design Guide (pp. 6-23). <https://doi.org/10.1016/B978-075067219-1/50004-0>
- [34] **Banhart, J.** (2013). Light-Metal Foams – History of Innovation and Technological Changes. *Advanced Engineering Materials*, 15(3), (pp. 28-111). <https://doi.org/10.1002/adem.201200217>
- [35] **Akiyama, S., Itoh, M., Kitahara, A. & Miyoshi, T.** (1999). Aluminum Foam, “ALPORAS”: The Production Process, Properties and Applications. *Advanced Engineering Materials*. 2(4). pp. 179-183. DOI: 10.1002/(SICI)1527-2648(200004)2:43.3.CO;2-7
- [36] **Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, L.J, Hutchinson, J.W & Wadley, H.N.G.** (Eds.), (2000). Chapter 2 – Making Metal Foams: A Design Guide (pp. 6-23). <https://doi.org/10.1016/B978-075067219-1/50004-0>
- [37] **Drenchev, L., Malinov, S., Sha, W & Sobczak, J.J.** (2006). Gasars: A Class of Metallic Materials with Ordered Porosity. *Materials Science and Technology*. 22(10). pp. 1135-1147. DOI: 10.1179/174328406X118302

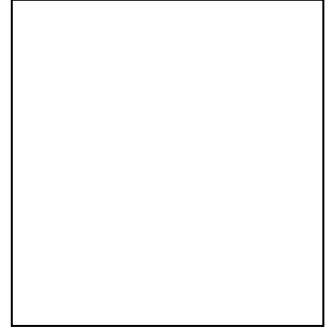
- [38] **Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, L.J, Hutchinson, J.W & Wadley, H.N.G.** (Eds.), (2000). Chapter 2 – Making Metal Foams: A Design Guide (pp. 6-23). <https://doi.org/10.1016/B978-075067219-1/50004-0>
- [39] **Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, L.J, Hutchinson, J.W & Wadley, H.N.G.** (Eds.), (2000). Chapter 2 – Making Metal Foams: A Design Guide (pp. 6-23). <https://doi.org/10.1016/B978-075067219-1/50004-0>
- [40] **Kennedy, A.** (2012). Porous Metals and Metal Foams Made from Powders. In Kondoh. K (Ed.). Powder Metallurgy. pp. 31-46. DOI: 10.5772/1922
- [41] **Anuar. S.A., Huey, H.S., Sulong, A.B., Muhammad, N., Paramasivam, S & Tatt, T.K.** (2021). Review on Manufacturing of Metal Foams. *ASM Science Journal*, 16, pp.1-8. <https://doi.org/10.32802/asmscj.2021.794>
- [42] **Beňo, J., Gawronová, M., Janovská, K., Kroupová, I., Lichý, P., Merta, V. et al.** (2021). Preparation of Cast Metallic Foams with Irregular and Regular Inner Structure. *Materials*. 14(22). pp. 1-19. <https://doi.org/10.3390/ma14226989>
- [43] **Dairon, J., Gaillard, Y.** (2010). Casting Parts with Metallic Foam. *MetFoam 2009: 6th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams*, Bratislava, Slovakia
- [44] **Banhart, J.** (2012). Manufacturing Routes for Metallic Foams. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 52(12), pp. 22-27. DOI: 10.1007/s11837-000-0062-8
- [45] **Banhart, J.** (2007). Metal Foams – From Fundamental Research to Applications. In Matthew, M.D., Raj. B., Ranganathan, S., Rao, K.B.S., & Shankar, P. (Eds.), *Fronteriers in the Design of Materials*. (pp.279-289).
- [46] **Dukhan, N.** (2013). Chapter 1 – Introduction. *Metal Foams: Fundamentals and applications*. (pp. xv).
- [47] **Selivanov, V.V., Silnikov, M.V., Markov, V.A., Popov, Y.V., & Pusev, V.I.** (2021). Using highly porous aluminium alloys and honeycomb strctures in spacecraft landing gear. *Acta Astronautica*, 180, 105-109.
- [48] **Yıldırım, Ç.V.** (2018). Metalik Köpük Malzemelerin Üretim Yöntemleri, Uygulama Alanları Ve Malzeme Özellikleri. *Journal of Advanced Technology Sciences*, 7(2), (pp. 100-116). Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/duzceitbd/issue/39375/435644>
- [49] **Rajak, D.K., & Gupta, M.** (2020). *Chapter 2- An Insight Into Metal Based Foams: Processing, Properties and Applications*. (pp. 28).
- [50] **Smith, B. H., Szyniszewski, S., Hajjar, J. F., Schafer, B. W., & Arwade, S. R.** (2012). Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties. *Journal of Constructional Steel Research*, 71, 1-10.
- [51] **Şahin. B.** (2019). Genleştirilmiş Cam Takviyeli Sintaktik Köpük Malzemenin Üretimi, İçyapı ve Mekanik Özelliklerinin incelenmesi. [Unpublished master thesis]. Istanbul Technical University.

- [52] **John, B., Nair, C.P.R.** (2012). Syntactic Foams. In Dodiuk, H., Goodman, S.H (Eds.). *Handbook of Thermoset Plastics*. pp. 511-554. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3107-7.00013-0>
- [53] **Afolabi, L.O., Alomayri, T.S., Ariff, Z.M. Hashim, S.F.S., Kamarudin, K.A., Mahzan, S. et al.** (2020). Syntactic Foams Formulations, Production Techniques, and Industry Applications: A Review. *Journal of Materials Research and Technology*. 9(5). pp. 10698-10718. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.074
- [54] **Gupta, N., Zeltmann, E.S., Chakravarthy, S., & Pinisetty, D.** (2006). Applications of Polymer Matrix Syntactic Foam. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 66, 2
- [55] **Lü, W.J., Xue, X.B., Wang, L.Q., Wang, M.M. & Zhang, D.** (2012). Manufacturing, Compressive Behaviour and Elastic Modulus of Ti Matrix Syntactic Foam Fabricated By Powder Metallurgy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 22(1). pp. 188-192. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61707-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61707-5)
- [56] **Ahsan, M.U., Gupta, N., Kumar, A., Luong, D.D., Pan, L., Rohatgi, P.K. et al.** (2018). Zn-Matrix Syntactic Foams: Effect of Heat Treatment on Microstructure and Compressive Properties. *Materials Science and Engineering: A*. 731. pp. 413-422. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.06.072>
- [57] **Gupta, M., Parande, G. & Manakari, V.** (2016). Effects of Hollow Fly-Ash Particles on the Properties of Magnesium Matrix Syntactic Foams: A Review. *Materials Performance and Characterization*. 5(1). pp. 116-131. DOI: 10.1520/MPC20150060
- [58] **Gupta, N., Rohatgi, P.K.** (2012). Metal Matrix Syntactic Foams. *Comprehensive Composite Materials II*, 364–385. doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.09971-9
- [59] **Gupta, N., Rohatgi, P.K.** (2012). Metal Matrix Syntactic Foams. *Comprehensive Composite Materials II*, 364–385. doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.09971-9





## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad : ENGİN KARAMAN**

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, İTÜ, Makina Fakültesi , Makina Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Direksiyon Sistemleri Geliştirme Mühendisi – Ford Otosan (2021 - halen)
- Ticari Araçlar Gövde Sistemleri Tasarım Mühendisi - Otokar Otomotiv Savunma Sanayi A.Ş. (2018-2021)