



**SENTAKTİK ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN  
MODELLENMESİ VE MEKANİK  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alev YILDIRIM

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. İbrahim YAVUZ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Ocak, 2017

Bu tez çalışması 14.FEN.BİL.40 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SENTAKTİK ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN MODELLENMESİ VE  
MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Alev YILDIRIM**

**DANIŞMAN**

**Yrd. Doç. Dr. İbrahim YAVUZ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Ocak, 2017**

## TEZ ONAY SAYFASI

Alev YILDIRIM tarafından hazırlanan "SENTAKTİK ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN MODELLENMESİ VE MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 19/01/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Yrd. Doç. Dr. İbrahim YAVUZ  
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi,  
Otomotiv Mühendisliği

İmza  


**Başkan** : Doç. Dr. Serhat BAŞPINAR  
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi,  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

İmza  


**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Fatih ÇOLAK  
Uşak Üniversitesi Teknik Bilimler MYO,  
Kaynak Teknolojisi

İmza  


Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. Hüseyin ENGİNAR  
Enstitü Müdürü

**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım  
bu tez çalışmasında;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı beyan ederim.

19/01/2017

**İmza**

**Alev YILDIRIM**



**ÖZET**  
Yüksek Lisans Tezi

**SENTAKTİK ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN MODELLENMESİ VE MEKANİK  
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Alev YILDIRIM  
Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. İbrahim YAVUZ

Bu çalışmada, sentaktik alüminyum metalik köpüklerin modellenmesi ve gözenek boyutunun mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Araştırma kapsamında kapalı hücre metalik köpük imalatı yapılmış olup üretim esnasında iki farklı boyutta sentaktik köpük malzeme kullanılmıştır. Elde edilen numunelerin, önce bilgisayar destekli çizim programı (SOLIDWORKS) kullanılarak modellenmesi yapılmış ve daha sonra sonlu elemanlar paket programı (ANSYS) kullanılarak analizler yapılmıştır. Ayrıca basma testi makro ve mikro yüzey incelemeleri , SEM analizleri yapılmıştır.

Üretilen numunelere basma deneyi ile sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki analizde de benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

**2017, xi + 91 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Metal Köpük, Bilgisayar Destekli Çizim, Sentaktik Köpük.

**ABSTRACT**  
M.Sc Thesis

INVESTIGATION OF MODELING AND MECHANICAL  
BEHAVIOR OF SYNTACTIC ALUMINUM FOAMS

Alev YILDIRIM

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Asst. Prof. İbrahim YAVUZ

In this study, the modeling of the syntactic aluminum metallic foams and the effect of the mechanical properties of the pore size were investigated. In this context, closed-cell metallic foam manufacture and in the production process two different diameter syntactic raw foam materials were used as raw materials. Firstly, the obtained samples were modeled by Computer Aided Drawing Program (SOLIDWORKS) and then analyzed using the finite element package program (ANSYS). In addition, compression test macro and micro surface analyzes and SEM analyzes were performed.

The results of the analysis of the produced samples and the results of the finishing element analysis were compared. Similar results were obtained in both analyzes.

**2017, xi + 91 pages**

**Keywords:** Metal Foam, Computer Aided Drawing, Syntactic Foam

## TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Yrd. Do. Dr. İbrahim YAVUZ 'a; numune üretimi ve laboratuvar çalışmalarımda bilgileriyle yol gösteren Sayın Doç. Dr. Serhat BAŞPINAR 'a; araştırma ve modelleme süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Özgür VERİM 'e, tez çalışmasına 14.FEN.BİL.40 numaralı proje ile, maddi kaynaklarından dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma, anneme ve sevgili eşim Öğr. Grv. Gökhan YILDIRIM 'a teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca uzak kaldığım oğlum Rahim Gökhan YILDIRIM 'a teşekkür ederim.

Alev YILDIRIM  
AFYONKARAHİSAR, 2017

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç ve Kapsam.....	2
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	4
3. METALİK KÖPÜKLER.....	14
3.1 Metalik Köpüklerin Tarihsel Gelişimi.....	15
3.2 Metalik Köpük Çeşitleri .....	18
3.3 Metalik Köpüklerin Özellikleri .....	19
3.3.1 Elastik Modül .....	20
3.3.2 Basma Davranışı.....	22
3.3.3 Enerji Emilimi ve Darbe Davranışı .....	25
3.3.4 Gerinim Davranışı .....	27
3.3.5 Burulma Davranışı.....	29
3.3.6 Termal, Elektriksel Davranış.....	30
3.4 Metalik Köpük Üretim Yöntemleri .....	32
3.4.1 Ergitme Bazlı Metalik Köpük Üretimi .....	32
3.4.1.1 Boşluk Tutucu Teknik İle Metalik Köpük Üretimi (Sentaktik Köpük).....	33
3.4.2 Toz Bazlı Metalik Köpük Üretimi.....	35
4. MATERYAL ve METOT .....	37
4.1 Silika jellerin Hazırlanması .....	37
4.1.1 Kullanılan Alüminyum Malzemenin Özellikleri.....	39
4.2 Metalik Köpük Üretiminde Kullanılan Cihazlar .....	40
4.3 Vakum Döküm Yöntemi ile Köpük Üretimi .....	43
4.3.1 Vakum Döküm Yöntemi İle Numune Üretim Prosesi.....	43



4.4 Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Yapılan Deneyler .....	45
4.4.1 Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi .....	45
4.4.2 Yoğunluk Ölçümü .....	46
4.4.3 Basma Deneyleri.....	46
4.4.4 Hücre Duvarı Analizleri .....	47
4.5 Metalik Köpüklerin Tasarımı ve Analizi.....	47
4.5.1 Alüminyum Köpük Malzemelerin Modellenmesi.....	51
4.5.2 Metal Köpüklerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi .....	53
4.5.2.1 ANSYS Yazılımı .....	53
5. BULGULAR .....	55
5.1 Sentaktik Köpük Malzemelerin Üretilmesi .....	55
5.2 Numunelerin Kesitleri ve Yoğunluk Ölçümü.....	57
5.3 Sentaktik Köpük Malzemelerin Basma Deney Sonuçları .....	58
5.3.1 Silika Jel Çaplarının Basma Dayanımına Etkisi.....	59
5.4 Sentaktik Köpüklerin SEM Analizi İçin Numune Hazırlığı ve Sonuçları.....	61
5.5 Hücre Duvarı Analizleri .....	62
5.6 Sentaktik Köpüklerin SolidWorks' te Modellenmesi.....	63
5.7 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları .....	68
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	77
6.1 Sonuçlar ve Tartışma .....	77
6.2 Öneriler.....	79
7. KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	91

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

$Al_2O_3$	Alüminyum oksit
$TiH_2$	Titanyum hidrat
$NaCl$	Sodyum klorür(sofra tuzu)
mm	Milimetre
$g/cm_3$	Gram bölü santimetre küp
GPa	Çığa paskal
MPa	Mega paskal
Ti	Titanyum
Al	Alüminyum
AlSi10	Alüminyum silikon
AlMg3	Magnezyumlu alüminyum alaşımı
SiC	Silisyum karbür
$CO_2$	Karbondioksit
$Na_2CO_3$	Sodyum karbonat
$K_2CO_3$	Potasyum karbonat
K	Kelvin
AlSi8Mg0,8	Alüminyum silisyum magnezyum alaşımı
Si	Silisyum
Mg	Magnezyum
$^{\circ}C$	Santigrat derece
m/s	Metre bölü saniye
w/km	Watt bölü kilometre
$E^*$	Köpük metalinin elastik modülü
$E_s$	Hücre metalinin elastik modülü
$\rho$	Nispi yoğunluk
$\rho^*$	Köpüğün yoğunluğu
$\rho_s$	Hücre metalinin yoğunluğu
$C_1$	Hücre geometrisine bağlı sabit sayı
$\Phi$	Gözenek duvarlarındaki katı oranını
$\ell$	Hücrelerin boyutu
$t_e$	Hücre köşesi
$t_w$	Hücre duvarı
$\epsilon D$	Yoğunlaşma gerinimi
A	Enerji emilim verimliliği
W	Basma gerinimi
r0	Dış yarıçap
r1	İç yarıçap

### Kısaltmalar

CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CAE	Bilgisayar destekli mühendislik
EDM	Tel erezyonla kesim yöntemi
SHPB	Yüksek hızlı deformasyonlarda basma testi

### **Kısaltmalar (Devam)**

---

TGC	İnteraktif bilgisayar grafiği
MÖ	Milattan önce
ERG	Enerji üretim araştırma
SDP	Sinterleme ve çözme tekniği

---



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1 Metalik köpük kronolojik gelişimi.....	17
Şekil 3.2 Hücre modelleri .....	19
Şekil 3.3 Sünek bir alüminyum köpük ve gevrek bir alüminyum köpük için basmada gerilim-gerinim eğrisi .....	23
Şekil 3.4 Gibson ve Ashby modeline göre kapalı hücreli yapı .....	24
Şekil 3.5 Bir Al-12Si köpüğün basma gerilimi ve enerji emilim verimi. ....	25
Şekil 3.6 İki farklı enerji emicinin basma gerilim-gerinim eğrisi. ....	27
Şekil 3.7 Yük kaldırma modülü ile alüminyum köpüğün çekmedeki gerilim-gerinimi. ....	29
Şekil 3.8 Bükmede aksenal çekme gerilimi ve aksenal olmayan gerilim ile alüminyum köpüğün gerilim-gerinim eğrisi. ....	30
Şekil 3.9 Yoğunluğa bağlı elektrik iletkenliği .....	31
Şekil 3.10 Temel alaşım elemanı ve yoğunluğa bağlı termal iletkenlik .....	31
Şekil 3.11 Mikrobalon şematik gösterimi .....	34
Şekil 3.12 Sentaktik köpüklerde faz durumunun şematik gösterimi.....	35
Şekil 4.1 Silika jellerin TG ve DSC analizi .....	38
Şekil 4.2 Al-Si denge diyagramı .....	44
Şekil 4.3 Döküm yöntemiyle elde edilecek alüminyum köpüğün akım şeması.....	44
Şekil 4.4 Modelleme ve Analiz protokolü.....	48
Şekil 5.1 Basma deneyi örnek grafiği .....	58

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1 1100 °C genişleme sıcaklığına bağlı silika jel yoğunlukları. ....	39
Çizelge 4.2 Etial-160 alüminyum külçesinin kimyasal kompozisyonu (% Ağırlık).....	40
Çizelge 4.3 Etial-160 alüminyum külçesinin standart gösterimleri. ....	40
Çizelge 4.4 Döküm yöntemi ile elde edilen alüminyum köpük serileri.....	45
Çizelge 5.1 Malzeme üretiminde kullanılan basınç ve sıcaklık değerleri.....	55
Çizelge 5.2 Vakum döküm yöntemi ile üretilen numunelerin yoğunlukları.....	58
Çizelge 5.3 Numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen plastik yıkım gerilimleri .....	61
Çizelge 5.4 Randomize programına girilen küre çap ve adetleri .....	63

## RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

<b>Resim 3.1</b> Köpük metal hücre yapısı. ....	18
<b>Resim 3.2</b> Köpük metal yapıları .....	19
<b>Resim 3.3</b> Alüminyum köpüğün gerinimdeki hasar mekanizması. ....	28
<b>Resim 4.1</b> Silika jel görüntüleri .....	37
<b>Resim 4.2</b> Silika jel yüzeyi gözenekli silika jel küre yapısı .....	38
<b>Resim 4.3</b> Farklı sıcaklıklarda işlem görmüş silika jellerin gözenek ve duvar yapıları	39
<b>Resim 4.4</b> Pota sıcaklığının ölçülmesinde kullanılan cihaz .....	41
<b>Resim 4.5</b> Vakum döküm tertibatı .....	42
<b>Resim 4.6</b> Vakum hattında kullanılan çelik filtre .....	42
<b>Resim 4.7</b> Kalıbın açık görünüşü .....	43
<b>Resim 4.8</b> Hazırlanan deney numunelerine ait görüntüler.....	45
<b>Resim 4.9</b> Basma cihazı ve cihaza numunenin bağlanması .....	47
<b>Resim 4.10</b> BT cihazından analiz sonucu .....	48
<b>Resim 4.11</b> Hazırlanan program silindirik kalıp .....	50
<b>Resim 4.12</b> Hazırlanan program dikdörtgen kalıp .....	50
<b>Resim 4.13</b> Elde edilen koordinatların ekran görüntüsü .....	51
<b>Resim 5.1</b> Üniform dağılıma sahip olmayan N1 kodlu köpük malzeme. ....	55
<b>Resim 5.2</b> N1 kodlu ikinci numune görüntüsü.....	56
<b>Resim 5.3</b> Boyuna kesilen alüminyum köpük numunelerin yüzeyi.....	57
<b>Resim 5.4</b> Basma cihazı ve cihaza numunenin bağlanma.....	58
<b>Resim 5.5</b> Alüminyum köpük numunenin farklı büyütmeleme sahip SEM görüntüleri .	61

<b>Resim 5.6</b> Hücre duvar fotoğrafları verilen köpük numunelerin görüntüleri .....	62
<b>Resim 5.7</b> Randomize programından alınan EXCEL dosyası .....	64
<b>Resim 5.8</b> SolidWorks macro programının görüntüsü.....	64
<b>Resim 5.9</b> SolidWorks macro programında hazırlanmış olan küre görüntüsü .....	65
<b>Resim 5.10</b> SolidWorks’ te montajlama işleminin görüntüsü .....	65
<b>Resim 5.11</b> SolidWorks’ te küreler ve kütüğün aynı part dosyası içerisinde görüntüsü	66
<b>Resim 5.12</b> SolidWorks’ te combine işlemi görüntüsü.....	66
<b>Resim 5.13</b> SolidWorks’ te combine-subtract işlemi sonrası alüminyum kütüğün görüntüsü .....	67
<b>Resim 5.14</b> SolidWorks’ te alüminyum kütüğün numune boyutundaki görüntüsü .....	67
<b>Resim 5.15</b> Üretilen ve tasarlanan numune görüntüleri.....	68
<b>Resim 5.16</b> Ansys 16.0 –Workbench’te Static Structural menüsünün açılması.....	69
<b>Resim 5.17</b> ANSYS içerisindeki malzeme oluşturma işlemi görüntüsü .....	70
<b>Resim 5.18</b> ANSYS ‘te “Geometry” segmesi ve “File-Import External Geo. File.”.....	71
<b>Resim 5.19</b> ANSYS’ te geometriye malzeme atanması görüntüsü.....	71
<b>Resim 5.20</b> “Connections” sekmesi altında ki “contacts” özelliğinin seçilmesi .....	72
<b>Resim 5.21</b> ANSYS’ te modelin meshleme işlemi görüntüsü .....	73
<b>Resim 5.22</b> ANSYS’ te parçanın “displacement” işlemi görüntüsü.....	74
<b>Resim 5.23</b> ANSYS’ te parçaya kuvvet uygulama işlemi görüntüsü .....	74
<b>Resim 5.24</b> Sonlu elemanlar ve basma testi sonucunda oluşan şekil değişimi.....	75
<b>Resim 5.25</b> Analiz sonucunda oluşan Von misses gerilim değerleri.....	76

## 1. GİRİŞ

Mühendislik alanlarında kullanılan metallerin birçoğu su, oksijen, sülfürlü bileşikler gibi birçok maddeyle tepkime vererek metalik doğalarını değiştirirler. Endüstride demir ve alaşımlarından sonra, en çok kullanılan ikinci metal alüminyumdur. Saf alüminyumun çekme dayanımı düşüktür fakat pek çok elementle alaşımlandırılarak mekanik özellikleri geliştirilebilir. Alüminyumun yüzeyinde oksit ( $Al_2O_3$ ) oluşumuyla metalin korozyona karşı dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Günümüzden yüz yirmi dört yıl önce endüstriyel çapta üretimine başlanılan alüminyum, günlük yaşantımızın her yerinde kullanım alanı bulmuştur (Kasaplar 2007).

Çağımızda teknolojinin hızla gelişmesi, sanayinin temel girdisi olan malzeme ve malzeme bilimindeki gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. Yeryüzündeki hammadde kaynaklarının sınırlı olması ve bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal açıdan yetersizliği, insanoğlunu yeni malzemeler geliştirme arayışına sürüklemektedir (Bilhan, 2005). Metalik köpükler bu malzeme arayışı sonucu ortaya çıkan yeni ürünlerdir. Metalik köpükler polimer köpüklerin ve ağaçların kullanılmadığı özel ortamlarda ve sıcaklıklarda mühendislik uygulamaları için bazı sıra dışı avantajlar sunarlar (Song *et al.* 2007). Metalik köpüklerin, polimerik olanlara göre çeşitli mühendislik özellikleri daha üstündür. Daha serttirler, yüksek sıcaklıklarda daha stabildirler, üstün yanma direncine sahiptirler, yangında zehirli dumanlar üretmezler. Metalik köpükler çevreye zararlı atık oluşturmadan geri dönüştürülerek tekrar kullanılabilirler. Hücresel metaller çarpma yönüne bağlı olmaksızın yüksek çarpma enerjisi emme yeteneğine sahiptirler. Ayrıca ses emme, elektromanyetik perdeleme, titreşim sönümlemede oldukça verimlidirler (Degischer *et al.* 2002).

Metalik köpükler; hücresel yapıya sahip malzemelerdir. Fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyi olması, düşük yoğunlukları, enerji absorbe edebilmeleri gibi özelliklerinden dolayı son zamanlarda ilgi çeken malzemelerdendir. Metalik köpüklerin en önemli özellikleri yüksek enerji absorbe kabiliyeti, düşük yoğunluk, ısı izolasyon, titreşim sönümlemedir (Seitzberger *et al.* 1997). Metal köpükler alüminyum, titanyum, nikel gibi farklı materyalden yapılabilirler. Metalik köpüğün kullanılacağı yere ve kullanıldığı yerdeki taşıması istenen özelliğe göre üretileceği materyal belirlenir.



Metalik köpükler, süngerler gibi gözenekli yapıya sahiptir. Doğal bir ürün değildir. Gözenekli yapı, bazı işlemler uygulandıktan sonra meydana gelir. Doğal köpük ile hiçbir ilgisi olmamasına rağmen görünüm ve bazı özelliklerinden dolayı "metalik köpük" diye adlandırılırlar. Gözenekli yapılar yalıtım, kaplama veya filtreleme işlemleri için kullanışlı malzemelerdir. Fakat yapısal uygulamalarda çok yararlı ve verimli olabileceğine inanılmamaktadır. Yük taşıyan yapılarda (kirişler, metalik parçalar) bulunan poroziteyi azaltmak için birçok bilimsel çalışmalar yapılmaktadır. Buna ek olarak döküm, toz metalürjisi, kaynak ve kaplama işlemleri sonucunda üretilmiş parçalar üzerinde poroziteyi azaltma çalışmaları büyük bir hızla devam etmektedir (Yavuz, 2012).

Metalik köpükler yapısal olarak sahip oldukları gözeneğin şekline, boyutuna, yoğunluğuna, anizotropik özelliklerine, açıklık ve kapalılık özelliklerine göre karakterize edilirler. Bu bağlamda sahip oldukları gözeneğin yapısına bağlı olarak sınıflandırıldığında açık veya kapalı olmak üzere ikiye ayrılır (Ozan *et al.* 2008).

Özellikle alüminyum esaslı metalik köpükler, çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen malzemeler olarak son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir. Alüminyum köpükler, darbe enerjisini plastik enerjiye dönüştürebilirler ve birçok metalden daha fazla enerji absorbe edebilirler. Metal tüpler içerisine dolgu malzemesi olarak konulduklarında emilen toplam enerji köpük ve tüpün ayrı ayrı emdiği enerjinin toplamından daha büyüktür (Hanssen *et al.* 2000, Elbir *et al.* 1999).

Düşük yoğunlukları ve düşük yüklerde nispeten yüksek deformasyon enerjisi emme özellikleri nedeniyle kapalı hücreli alüminyum köpüklere ilgi son yıllarda artmaktadır. Metalik köpükler makine imalatı, uçak-uzay endüstrisi ve otomotiv endüstrisi alanları dışında gemi yapımı, inşaat endüstrisi, biyomedikal gereçler, spor ekipmanları gibi birçok alanda da kullanılmaktadır (Banhart 2001).

## **1.1 Amaç ve Kapsam**

Üreticiler, daha hafif ancak daha mukavemetli tasarımlar elde etmek için maliyeti çok

yüksek araştırmalar yapmaktadırlar. İyapının köpük Şeklinde olması darbe yönünü dikkate almadan yüksek darbe enerjisini sönümlemesini ve aynı zamanda hafifliği sağlamaktadır. Ayrıca metalik köpük malzemelerin çeşitli mekanik özellikleri polimerik köpük malzemelere kıyasla çok üstündür. Yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek sıcaklarda yapısını koruması buna örnek olarak verilebilir. Metalik köpük üretiminde genellikle düşük yoğunluklu metaller kullanılmaktadır. Bu metallerin başında alüminyum ve magnezyum bulunmaktadır. Endüstride alüminyumun kullanımına baktığımızda en çok kullanılan ikinci metal olduğu görölmektedir.

Tez çalışmasında ilk olarak, sentaktik alüminyum metalik köpük CAD programı ortamında tasarlanmıştır. Tasarlanan modelin CAE analiz programı ile analizleri yapılmıştır. Daha sonra sentaktik alüminyum köpük malzeme üretiminde kullanılacak olan sarf malzemeler ve cihazlar temin edilmiş ve iki farklı boyutta sentaktik köpük üretimi yapılmıştır. Üretimler sonunda deney numuneleri hazırlanarak basma testi yapılmıştır. Ayrıca numuneler üzerinden makro ve mikro fotoğraflar alınarak yapı üzerinde incelemelerde bulunulmuştur. CAE analizleri ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Endüstri ürünlerinin üretimi de teknolojik gelişmelere paralel olarak hergün yenilenmektedir. Yeni ürünlerin üretilmesinde en önemli değişken genellikle malzeme olmaktadır. Firmalar, daha hafif ve yüksek dayanımlı yapılar elde ederek maliyetleri düşürebilmek için çok yüksek bütçeli araştırmalar yapmaktadırlar. Bu çalışmaların sonucunda metalik köpük (hücreli) malzemeler ön plana çıkmaktadır.

Metalik köpükler düşük yoğunluk, mükemmel mekanik, ısı, elektriksel ve akustik özelliklerine sahip yeni bir malzeme grubudur. Köpük metaller birçok iyi özelliğinden dolayı makine imalatı, uçak-uzay endüstrisi ve otomotiv endüstrisi alanları dışında gemi yapımı, inşaat endüstrisi, biyomedikal gereçler, spor malzemeleri gibi birçok alanda kullanılmakta ve daha yaygın kullanılabilmesi için yoğun çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalardan bazıları tarihsel sırasıyla şunlardır;

Baumeister ve arkadaşları alüminyum köpüklerle ilgili yapmış oldukları çalışmalarında; Alüminyum köpüklerin %90 gözenekli yapıya kadar oluşturulabildiğini, kapalı gözenekli yapıların yoğunluğu  $0,4-1\text{g/cm}^3$  olarak kullanıldığını belirlemiştir. Alüminyum köpüklerin taşımacılık sektöründe enerji absorbe edici olarak kullanıldığını belirtmektedirler (Baumeister *et al.* 1997).

Hall ve arkadaşları Fraunhofer Center adına Delaware tarafından alınan patentli toz metalürjisi ile köpüklü metalik malzeme üretmişlerdir. Köpük malzemesi olarak 6062 alüminyum alaşımı ve köpürtücü ajan olarak  $\text{TiH}_2$  (Titanyum Hidrat) kullanmışlardır.  $50 \times 100\text{mm}$  ölçülerinde dikdörtgen şeklinde kapalı hücreli köpük malzeme imal etmişlerdir. Hücre büyüklüğü 4–5 mm ve orta bölümler ise 2-3 mm civarındadır. Üretilen köpük malzemelerine gerilme analizi yapmışlar analizler sonucunda; Düşük basma gerilmesi uygulandığında bağıl yoğunluğun işlevi düşük veya gerilme duyarlılığı kaybolmuştur. Enerji absorpsiyonunda da benzer sonuçlar gördüklerini bildirmişlerdir. Köpük malzemesinin sıkıştırılması süresindeki deformasyonun metalografik gözlemi süresince genel süreç kademeli bir şekilde hücre sınırlarında ezilmeler, bükülümeler meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Hall *et al.* 2000).

Wei ve arkadaşları saf alüminyum matris içine saf katı sofr tuzu (NaCl) ekleyerek basınçlı infiltrasyon yöntemiyle metalik köpük üretmişlerdir. Üretilen metalik köpük malzemelerden alınan numuneler ile saf alüminyumun enerji sönümlleme davranışlarını incelemişlerdir. Deneyler sonucunda; çapı 1 mm ve hacim olarak %69 dolulukta basınçlı infiltrasyonla üretilen metalik köpüklerin saf alüminyuma göre sönümlleme miktarlarının 3 kat fazla olduğunu tespit etmişlerdir (Wei *et al.* 2002).

Çinici yapmış olduğu tez çalışmasında toz metalürjisi tekniği ile alüminyum esaslı köpük metal üretmeye çalışmıştır. Çalışmasında köpürtme sıcaklığı, köpürtme süresi, köpürtücü madde miktarının alüminyum köpüğün özelliklerine etkisini belirlemiştir. Köpürtme süresi ve sıcaklığının artması ile gözenek ebatlarının ve lineer genişlemenin daha fazla olduğunu tespit etmiştir. Gözenek ebatlarının ve lineer genişleme oranının köpürtücü madde miktarına bağlı olarak arttığını gözlemlemiştir (Çinici 2004).

Onck ve arkadaşları açık ve kapalı hücre alüminyum köpüklerin kırılma davranışlarını incelemişlerdir. Hasar sürecinde açık hücreli köpük metalin daha sünek olduğunu, kapalı hücre köpük metalin ise daha kırılğan olduğunu gözlemlemiştir. Hasar sürecindeki enerji harcanımının baskın gelmesinin sebebinin nikel krom alaşımının saflığı ile alakalı olduğunu ileri sürmüşlerdir. Kapalı hücre köpüklerindeki kırılğanlıklar plastik deformasyon miktarının limitinin aşılması nedeniyle hücre duvarlarındaki mikro yapıların çökmesi sonucunda meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Onck *et al.* 2005).

Tunçer yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında ticari saflıkta titanyum köpükleri yer tutucu ilavesiyle köpüklendirme yöntemi kullanarak üretmiştir. Yaptığı çalışmada göreceli yoğunluk, içyapı özellikleri ve basma davranışı gibi özelliklerin başlangıç toz boyutu, yer tutucu cinsi ve miktarı, sinterleme sıcaklığı gibi süreç parametreleri kullanılarak kontrol edilebilirliğini araştırmıştır. Çalışma kapsamında % 30 - 70 arasında değişen oranlarda gözeneklilik ve 4 – 90 GPa arasında değişen elastik modülüne sahip titanyum köpükler üretmiş ve karakterize etmiştir. Yaptığı deney sonuçlarına göre Ti köpüklerin göreceli yoğunluk, içyapı özellikleri ve basma davranışı gibi özelliklerinin başlangıç toz boyutu, yer tutucu cinsi ve miktarı, sinterleme sıcaklığı gibi süreç parametreleri kullanılarak kontrol edilebildiğini saptamıştır (Tunçer 2006).

Kırca yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında mikro hücreli karbon köpüklerin mekanik davranışlarını incelemiştir. Bu amaçla çalışmanın ilk aşamasında karbon köpük modelini CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) ortamında tasarlamıştır. Rasgeleliğin sağlanması amacıyla mevcut istatistiksel karakterizasyon sonuçlarını kullanan bilgisayar programları geliştirmiştir. Bu programları kullanarak CAD tasarımı elde edilmiştir. Daha sonra modele basma yüklemesi uygulamış ve mekanik davranışlarını incelemiştir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle köpük modelin mekanik davranışlarını hesaplamıştır. Sonlu elemanlarla ulaşılan değerlerin deneylerle ulaşılanlara yakın olduğunu tespit etmiştir (Kırca 2006).

Dou ve arkadaşları yaptıkları çalışmada boşluk tutucu malzeme olarak cenosphere, metal malzeme olarak ise saf alüminyum kullanmışlardır. Ürettikleri numunelerin deformasyon gerilim eğrilerini çıkartmışlar ve enerji absorbe kapasitelerini araştırmışlardır. Deneyler sonunda 65–120 Mpa arasında plastik deformasyon gerilim değeri tespit etmişlerdir. Enerji absorbe kapasitesinin ise %50–70 oranında arttığı sonucuna varmışlardır (Dou *et al.* 2007).

Csilla ve arkadaşları çalışmalarında replika yöntemiyle alüminyum köpük üretmişlerdir. Üretmiş oldukları numunelerde farklı gözenek boyutları, farklı hücre duvarlarının gerilimi esnasında akustik emisyon tepkisi deformasyon süreçlerini değerlendirmişlerdir. 1,5 mm civarı gözenek boyutundaki köpükler için hücre duvar malzemenin etkisi önemliyken 3,5 mm civarı gözenek boyutlu köpükler için hücre duvarı malzemesi önemli olmadığı sonucuna varmışlardır. Çünkü 3,5 mm civarı gözenek boyutlu köpüklerin deformasyonunun yapı tarafından kontrol edilebildiğini ifade etmişlerdir (Csilla *et al.* 2007).

Zhang ve Zhao 20-500 mikron boyutunda alümina silikat seramik kürecikler ile basınçlı infiltrasyon yöntemi kullanarak alüminyum matrisli sentaktik köpüklerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir (Zhang and Zhao 2008).

Zhu ve arkadaşları kare metalik sandviç paneller üzerine darbe (impact) analizleri üzerine nümerik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Nümerik analizlerinde LS-DYNA

yazılım kullanmışlardır. Sonuçlar iki aşamada incelemiş olup, bunlardan birincisi deformasyon-hasar modelleri üzerine ikincisi panel üzerinde meydana gelen desenler üzerinedir. Deneyler sonucunda nümerik ve deneysel çalışmalarda benzer sonuçlara varmışlardır (Zhu *et al.* 2009 ).

Tao ve Zhao alüminyum matrisli sentaktik köpük imalatı yapmışlar ve basma testine tabi tutmuşlardır. Köpük üretimini infiltrasyon yöntemi ile gerçekleştirmişler ve köpüğün sünekliğinin önemli ölçüde arttığını, basma dayanımının ise %30 oranında arttığı sonucuna varmışlardır. Enerji absorbe miktarını ise 50 Kj/kg olarak ölçmüşlerdir (Tao ve Zhao 2009).

Oka yapmış olduğu doktora tez çalışmasında alüminyum köpük metalinin farklı yüklenme koşullarındaki mekanik özelliklerini deneysel ve matematiksel modellenmesi ile tespit etmeye çalışmıştır. Deneysel çalışmada Al-7 matris içine %7 saf silisyum ve %0,5 titanyum hidrür ile karıştırarak alüminyum köpük üretmiştir. Üretilen malzemelere darbe ve basma deneyleri uygulamıştır. İkinci aşamada ise deney numunelerinin modellenmesini yaparak sonlu elemanlar yönteminde mekanik değerleri hesaplama işlemi yapmış ve deneysel sonuçlarla kıyaslayarak doğruluk oranının yakın olduğunu tespit etmiştir (Oka 2009).

Toksoy yapmış olduğu doktora tez çalışmasında kısmi olarak alüminyum kapalı hücreli köpük (Alulight AlSi10) ile doldurulmuş 1050H14 Al ezilme kutularının ezilme davranışlarını quasi-statik ve dinamik deformasyon hızlarında incelemiştir. Boş ve dolu ezilme kutularının quasi-statik ezilme davranışlarını LS-DYNA kullanarak simüle etmiştir. Araştırılan tüp kalınlığı ve nispi köpük yoğunluğu aralığında, 1050H14 Al kutuları 3 mm kalınlıkta ve 0,1114 (Alulight) ve 0,0508 (Hydro) köpük nispi yoğunluğunda optimize etmiştir. 1050H14 ezilme kutusunun spesifik enerji absorpsiyonu artış oranı Alulight köpükler için %5,6 Hydro köpükler için %21,9 olarak hesaplamıştır. Kısmi köpük doldurma işlemi kutu kesitinin artırılması durumunda kritik köpük yoğunluğunun düşmesine neden olduğunu tespit etmiştir (Toksoy 2009).

Çağlar yüksek lisans tez çalışmasında AlMg<sub>3</sub> alüminyum alaşımına farklı miktarlarda

TiH<sub>2</sub> köpürtme ajanı katarak farklı sürelerde bekleterek köpürtmüştür. Köpük malzemesi farklı oranlarda SiC ile takviye edilerek, takviyenin köpük stabilizasyonuna etkisini incelemiştir. Yaptığı deneysel çalışmalarla SiC takviyenin köpük malzemede hücre stabilizasyonu sağladığını tespit etmiştir. Köpük oluşumunda; köpürtme süresi, takviye boyutu ve oranı, sıcaklık ve köpürtücü madde özelliklerinin köpük oluşumunu etkileyen başlıca parametreler olduğunu tespit etmiştir. Takviye oranındaki artışla birlikte yoğunluğun azaldığı, metal köpüğün lineer genleşme miktarının arttığı, gözenek boyutlarının küçüldüğü ve düzgün dağılım sergilediğini belirlemiştir. Yine köpürtme süresinin artmasıyla yoğunluğun azaldığı ve belli bir süreyi aşan uygulamalarda köpük yapısının bozulduğunu tespit etmiştir (Çağlar 2009).

Yıldırım yüksek lisans tez çalışmasında toz metalürjisi yöntemi ile kapalı hücreli, alüminyum bazlı ve ferrokrom parçacık takviyeli kompozit metal köpükler ve saf alüminyum köpük üretmiştir. Yapmış olduğu makro ve mikro boyutlu incelemeler ve mekanik testlerle, kompozit yapıli köpüklerin fiziksel özelliklere ve basma davranışına etkisinin, saf alüminyum köpükle karşılaştırmış sonuç olarak ferrokrom takviye oranının artmasıyla birlikte hücre boyutlarında artış ve nispi yoğunlukta azalma meydana geldiğini tespit etmiştir. Nispi yoğunluğu yüksek olan köpüklerin daha yüksek basma gerilimine ulaştığını ve daha stabil davrandıklarını belirlemiştir (Yıldırım 2010).

Sığırtmaç yapmış olduğu doktora çalışmasında alüminyum köpük malzemelerin ikincil işleme yöntemleri olan; CO<sub>2</sub> lazer kesme teknolojisiyle kesimi, tel erozyonla kesim (EDM) yöntemi ve mekanik dairesel döner testereyle kesim yöntemleri ile işlenebilirliklerini incelemiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen değerleri, köpük malzemenin çekme mukavemeti formülleri ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonuçları ile kıyaslamıştır. Lazer kesim yöntemiyle 20 mm kalınlığa kadar hassas olmayan yerlerde kullanımının mümkün olduğunu tespit etmiştir. Lazerde kesme hızının tel erozyon ile kesme yöntemine göre 200 kat daha hızlı olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca herhangi bir karmaşık şeklin lazerle kesilmesinin mümkün ama mekanik kesme yöntemlerinden biri olan testere ile karmaşık şekilli parçaları kesmenin mümkün olmadığını tespit etmiştir (Sığırtmaç 2010).

Başpınar ve Yurtcu yapmış oldukları çalışmada metalik köpük malzemelerin mekanik özelliklerinden; gerilme birim şekil değişim miktarı ve enerji emebilme özelliği üzerinde durmuşlar. Göreceli yoğunluğun, gözenek boyutunun ve gözenek şeklinin mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Metalik köpüklerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan matematiksel modeller; açık ve kapalı gözenekli köpüklerde kübik hücre modeli, gözenek miktarının Archimedes prensibi ile hesaplanması, gözenekliliğin ısı iletkenlik üzerindeki etkisini incelemişlerdir (Başpınar ve Yurtcu 2011).

Jha ve arkadaşları alüminyum cenesphore ile köpüklü malzeme ve Al içerisine % 10 SiC karıştırarak alüminyum sentaktik köpük üreterek SiC katkılı ve katkısız numunelerin 3 kg yükte sürtünme aşınma davranışını incelemişlerdir. Sürtünme aşınma oranının SiC katkısız köpükte kuru ve yağlı ortamlarda ve sıcaklık arttığında SiC katkılıya göre daha çok olduğunu tespit etmişlerdir (Jha *et al.* 2011).

Yılmaz yapmış olduğu “Otobüs devrilme analizlerinde değişik özellikteki malzeme ve köpük uygulaması” isimli yüksek lisans çalışmasında hazır tasarlanmış bir otobüs üzerine malzeme olarak üç farklı malzemeyi atayarak her malzeme için çarpma testleri ve kullanılacak malzeme kalınlığı belirlemeye çalışmıştır (Yılmaz 2011).

Yavuz, 2011 yılında yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında kaybolan ve kaybolmayan boşluk tutucu malzemeler kullanılarak alüminyum esaslı metalik köpük üretimini incelemiştir. Deneysel çalışmalarda iki farklı yöntem uygulamıştır. Birinci yöntemde boşluk tutucu malzeme olarak suda çözünebilen formdaki malzemeler (NaCl, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ve toz metalürjisi yöntemi kullanmıştır. İkinci yöntemde ise kaybolmayan tip boşluk tutucu malzeme (genleşmiş silika jel) ve vakum döküm yöntemi kullanmıştır. Sonuçta, toz metalürjisi ile üretilen numunelerin özelliklerinin üretim parametrelerine çok duyarlı olduğu, suda çözünen boşluk tutucu tipinin çözünme hızının köpük üretimini yakından etkilediği sonucuna varmıştır. Vakum döküm yöntemi ve kaybolmayan boşluk tutucu malzeme yöntemi ile daha başarılı ve özellikleri kontrol edilebilir alüminyum esaslı köpükler üretildiğini bildirmiştir (Yavuz 2011).



Kocatürk yapmış olduğu çalışmada basma testlerini kullanmıştır. Bu testlerde SiC katkılı ve katkısız Al köpükler şekil değiştirme hızına duyarlılık gösterirken, Alulight köpükler şekil değiştirme hızına duyarsız plato gerilmesi gösterdiğini tespit etmiştir. Katman konfigürasyonunun Al sandviç plakaların deformasyonunda etkili olduğunu bildirmiştir. Basma yükleri altında hücre duvarlarında kırılmalar oluşan cam köpük malzemelerde beklendiği üzere mukavemet artışı olduğunu tespit etmiştir. Sonuç olarak, boşluklu ve hücreli Al yapılarıdaki mikro atalet etkisini araştırmak için basit bir test yöntemi göstermiştir (Kocatürk 2011).

Zaman; yüksek lisans çalışmasında çamur köpüklendirme (polimer emdirme) yöntemi kullanarak açık hücreli alüminyum ile %2 ve %4 bakır takviyeli alüminyum köpük üretmiştir. Belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılan saf su içerisinde polivinil alkol çözündürüp sonra metal tozları ekleyerek bir çamur karışımı hazırlamıştır. Belirli ebatlarda kestiği açık hücreli poliüretan süngeri bu karışıma daldırarak çamur karışımı ile kaplamıştır. Çamur karışımı ile kaplanan köpükleri oda sıcaklığında ve etüvde kurutup son olarak da poliüretan süngeri gidererek, yapıyı sinterlemiştir. Çalışmada, % 51-60 katı oranına sahip çamur karışımları hazırlanmış, yapılan viskozite ve sementasyon testleri sonucunda en ideal çamurun % 60 katı oranına sahip olan çamur karışımına ait olduğunu tespit etmiştir (Zaman 2011).

Polat ve arkadaşları yaptıkları bir araştırmada başta alüminyum olmak üzere metalik köpüklerin özellikleri ve üretim teknikleri, dünyada ve Türkiye’de köpük araştırmaları ve üretimindeki gelişmeleri incelemişlerdir. Yaptıkları makalede metalik köpükleri tanıtmış, açık ve kapalı metalik köpüklerin özelliklerini açıkladıktan sonra bunlara ait kullanım alanlarına örnekler vermişlerdir (Polat *et al.* 2011).

Orbulov ve Ginsztler sekiz farklı metal matris sentaktik köpüklerin basma davranışlarını araştırmışlardır. Basma testini etkileyen üretim faktörleri olarak; metal matrisin kimyasal kompozisyonu, mikro hücrelerin büyüklüğü, ısıl işlem ve sıkıştırma basıncı gibi konular olduğunu bahsetmişlerdir. İnce duvar küçük mikro hücrelerin daha kusursuz olması nedeniyle yüksek basma dayanımı ve daha iyi mekanik stabilite sağlandığını tespit etmişlerdir (Orbulov ve Ginsztler 2012).

Fan ve arkadaşları alüminyum köpük üretiminde 4,2 – 8,3 Mpa basınç aralığında 273,2°K sıcaklığında metan hidrat üretimi ve ısı analizini yapmışlardır. Sonuçlara bakıldığında metan hidrat oluşumu ile ısı transferi arttığı için alüminyum köpüğün çekirdeklenmesini olumlu olarak geliştirdiğini tespit etmişlerdir. Alüminyum köpüğün hidrat oluşumu için çok sayıda mikro metal hücreleri içerdiğini belirlemişlerdir (Fan *et al.* 2012).

Yavuz yapmış olduğu doktora çalışmasında metalik köpüklerin üretim parametrelerini araştırmıştır. Araştırma kapsamında açık ve kapalı hücre metalik köpük imalatı yapmış olup üretim esnasında farklı malzemeler ve üç farklı metot kullanmıştır. Birinci yöntemde boşluk tutucu malzeme olarak suda çözünebilen formdaki malzemeler (NaCl, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ve toz metalürjisi yöntemi kullanmıştır. İkinci yöntemde köpürtücü ajan tekniği kullanarak metalik köpük üretimi gerçekleştirmiş olup köpürtücü ajan olarak mermer tozu kullanmıştır. Üçüncü yöntemde ise kaybolmayan tip boşluk tutucu malzeme (genleşmiş silika jel) ve vakum döküm yöntemi kullanmıştır. Sonuç olarak vakum döküm yöntemi ve kaybolmayan boşluk tutucu malzeme yöntemi ile daha başarılı ve özellikleri kontrol edilebilir alüminyum esaslı köpüklerin üretilbildiğini tespit etmiştir (Yavuz 2012).

Bahçeci yaptığı doktora çalışmasında Al esaslı kapalı hücreli metalik köpüklerde hücre morfolojisinin mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. AlSi8Mg0,8 alaşımı metalik köpük malzemeleri Toz Metalürjisi (TM) yöntemiyle üretmiştir. Ağırlıkça %8 Si, %0,8 Mg, %0,8-1,2 TiH<sub>2</sub> oranlarındaki tozlar ve kalanı Al tozu olmak üzere üç eksenli Turbula cihazında 45 dakika süreyle karıştırmış karışım tozlar oda sıcaklığında 300 MPa basınçta silindirik biçimde preslenmiş, 500 °C’de 1 saat süreyle sinterlemiş ve ardından 8/1 oranında 450 °C’de sıcak ekstrüzyon işlemi uygulamıştır. Ekstrüze edilmiş malzemelere 400 °C’de %50 deformasyon oranına kadar sıcak/ılık haddeleme işlemi uygulamış ve köpürmeye hazır lama biçimli preform numuneler üretmiştir. Preform lama malzemeleri, ön ısıtmasız ve yaklaşık 400°C’de ön ısıtılmalı kalıp içerisinde 720 ve 760 °C fırın sıcaklıklarında köpürtmüştür. Metalik köpük malzemenin akma gerilmesine kadar gözenek duvarlarında oluşan gerilme dağılımlarını fotoelastisite yöntemiyle belirlemiştir (Bahçeci 2012).

Duan ve arkadaşları alüminyum köpük malzemelerini tahribatsız muayene yöntemlerinden optik kilitli ve darbeli termografik yöntemleriyle incelemişler ve niceleyici değerlendirmesini yapmışlardır. Sonuç olarak optik kilitli ve darbeli termografik yöntemler ile ulaşılan sonuçları yakın bulunmuştur (Duan *et al.* 2013).

Buffel ve arkadaşları köpük malzemelerin üretiminde Weaire–Phelan şeklinde köpük katkılarının diğer şekilli katkılardan daha iyi sonuçlar vereceğini bir modelleme ve analizle açıklamayı denemişlerdir. Modeli yapılan açık hücreli köpük yapısının özelliklerini optik, taramalı elektron mikroskobu kullanarak belirlemişlerdir. Ve köpükler üzerine çalışan diğer kişilerin sonuçları ile bu köpük şeklinin model değerlerini karşılaştırarak inceleme yapmışlardır (Buffel *et al.* 2014).

Taherisharg ve arkadaşları alüminyum 356 serisi alüminyum köpüğüne T6 ısıl işlemi uygulanarak perlit yapıya gelmesini sağlamışlardır. Isıl işlemin etkisiyle perlit fazındaki köpük malzemenin mikro yapı, deformasyon davranışındaki değişiklik ve hücre duvarı kırılma mekanizmasındaki değişimlerini incelemişlerdir. Isıl işlem plato bölgesinde önemli bir stres artışına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Basınç altında ısıl işlem gören köpükler daha homojen deformasyon gösterdiğini tespit etmişlerdir. Isıl İşlem hücre çeperinin kolon dendritik yapısı döküm kusurlarının mekanik özelliklere olumsuz etkisini azalttığını tespit etmişlerdir. Bu Al matris içinde Si partiküllerinin en boy oranı ve parçalar arası mesafeyi arttırarak çatlak yayılmasını sınırladığını bildirmişlerdir (Taherisharg *et al.* 2014).

Barnes ve arkadaşları alüminyum (Al-6101-T6) açık hücreli köpük üzerinde dinamik kırma ve şok oluşumunu incelemişlerdir. Dinamik kırma ve şok oluşumunun eksiksiz bir karakterizasyonu sağlamak için deney cihazı tasarlamışlar ve deneyler yapmışlardır. Bunun için silindirik köpük malzemeye 20-160 m/s hızda darbe deneyleri denenmiş ve malzemenin yaklaşık %90 yük taşıyabildiğini tespit etmişlerdir. Şok oluşumunu, şok özelliklerini, şokla ilişkili sismik hızları ve malzeme değişimini yüksek hızlı kamera ve foto detektörle tespit etmişlerdir. Bu çalışmanın bir sonraki aşamasında elde ettikleri sonuçlarla köpük malzemelerin darbe deneyleri ve kırılma özelliklerini simüle etmeyi planlamışlardır (Barnes *et al.* 2014).

August ve arkadaşları açık hücreli köpük malzemelerin phase-field (faz-alan) yöntemiyle ısı iletkenliklerinin öngörülmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada alüminyum açık hücreli köpük malzemelerin daha önceki yapılan çalışmalarından girilecek değerlerini alarak ara yüze girmişler ve sonuçları incelemişlerdir. Mevcut simülasyonda, farklı gözenekli yedi açık hücreli köpük yapı tanımlamışlardır. Daha küçük bir ortalama gözenek boyutunun, doğal olarak daha iyi ısı difüzyonu sağladığını tespit etmişler ve kabul edilen gözenek yapılarının hesaplamalarla belirlenen etkin ısı iletkenliklerinin 5 W/Km ve 13 W/Km arasında olduğunu belirlemişlerdir. Bu aralığın, hava ısı iletkenliğini 200 kat aştığını tespit etmişlerdir (August 2015).

Bağcı yaptığı doktora çalışmasında nükleer santrallerin soğutma üniteleri, pistonlu içten yanmalı motorlar, ısı boruları, rejeneratörler, stirling motorları gibi birçok salınımlı akış ve ısı geçişine rastlanan yerlerde kullanılan açık hücreli 6061-T6 kodlu silindirik alüminyum köpüğün akış ve ısı geçişini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Silindirik köpüğe hidrodinamik ve ısı geçiş testleri uygulamıştır. Metal köpük içinde suyun düz akışını ve ısı geçişini, gerçek hacmin dörtte biri olarak 3 boyutlu modellemiştir. ANSYS Fluent isimli ticari akış analizi koduyla çözümlenerek hidrodinamik analiz sonuçları ile deney sonuçlarının uyduğunu tespit etmiştir. Deneysel olarak bulunması oldukça güç olan hidrodinamik giriş uzunluğunun kestirimini yapabirmiştir. Diğer taraftan ısı geçiş sonuçları düşük hızlarda deneysel sonuçlarla benzeşirken yüksek hızlarda deneysel sonuçlardan uzaklaştığını tespit etmiştir (Bağcı 2015).

Shih ve arkadaşları ortası yuvarlak katı alüminyum esaslı köpük üretmişler ve bu numunelerin ısı transfer karakteristiklerini araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre ortalama boyutsuz sıcaklık farkı nedeniyle alüminyum köpük ve soğutma havası arasındaki geliştirilmiş konvektif ısı transferi Reynolds sayısının artması ile azaldığını tespit etmişlerdir. Bu iletişim oranı 0,00676 daha büyük olduğunda termal dengenin yerel bir bölgede oluştuğunu, ama iletim oranı 0,00676'dan daha az olduğunda termal dengenin yerel olmayan hale geldiğini gözlemişlerdir (Shih *et al.* 2016).

### 3. METALİK KÖPÜKLER

Metalik köpükler, süngerler gibi gözenekli bir yapıya sahip fakat doğal olmayan istenerek kontrollü bir şekilde üretimi yapılan bir malzemedir. Gözenekli yapı, bazı işlemler uygulandıktan sonra meydana gelir. Doğal köpükle hiçbir ilgisi olmamasına rağmen görünüm ve bazı özelliklerinden dolayı “metalik köpük” olarak adlandırılırlar. Köpükler, tamamen çözülmeyen bir gaz ile bir sıvının dağılımını kapsayan, farklı işlemler ile oluşturulmuş iki faz karışımının sonucudur. Bu işlem emülsiyon işlemine çok benzemektedir. Fakat köpük içerisinde gaz fazının bulunmasından dolayı farklılık gösterir (Çinici 2004, Hernández 2005, Yavuz 2012).

Metal köpükler; henüz çok iyi karakterize edilmemiş, düşük yoğunluklu ve alışılmışın dışında fiziksel, mekanik, termik, elektriksel ve akustik özellikli malzemeler sınıfındadır. Hafif ağırlıklı yapıları, enerji emilimi ve termal yönetim bakımından potansiyel sunmaktadırlar. Metalik köpüklerin bir kısmı çok uygun fiyatlara sahiptir (Ashby *et al.* 2000, Yıldırım 2010).

“Metal köpük” veya “metalik köpük” kavramları günümüzde boşluk içeren bütün metal yapılar için kullanılan bir terim haline gelmiştir. Metalik köpük teriminin yanı sıra hücreli metal (cellular metal), gözenekli metal (porous metal), metal sünger (metallic sponge) terimleri köpük tanımlamalarında sıkça kullanılmaktadır. Bu terimler arasındaki temel ayırım gözeneklerin morfolojilerinden oluşmaktadır. Ayırt edilebilen ve kendi içinde düzenli gözeneklere sahip yapılar köpük veya hücreli metal olarak sınıflandırılırken, diğerleri gözenekli veya sünger olarak nitelendirilebilir. Metalik köpüklerin ne olduğunu anlayabilmemiz için değişik ifadeleri ayırt etmek yararlı olacaktır (Polat *et al.* 2011, Yavuz 2012):

- **Hücreli Metaller:** En genel kullanılan terimdir. Çeşitli gazların metalik gövde içerisinde dağılarak boşluk oluşturduğu yapıyı kapsamaktadır. Metalik faz, gaz fazı içeren kapalı hücrelerden oluşur ve hücreli metaller genellikle %70'den daha fazla boşluk içerir.

- **Gözenekli Metaller:** Metal yapı çok sayıda gözenek tarafından oluşmuştur. Gözenekler genellikle küreseldir ve birbirlerinden yalıtılmış halde bulunurlar. Gözeneklilik yaklaşık %20'den daha düşüktür.
- **(Kati) Köpük Metaller:** Hüresel metallerin özel bir sınıfıdır. Hücreler kapalı, küresel veya çokyüzlü (polihedral) ve her biri birbirinden ince bir filmle ayrılmıştır.
- **Metalik Süngerler:** Hüresel metallerin yapıbilimidir. Genellikle birbirine bağlı gözenekten oluşur.

Bu terimler birbirinden bağımsız değildir. Örneğin köpük metal, gözenekli ve hüresel bir yapıya sahip olmakla beraber sünger metal hücrelere sahip olmak zorunda değildir. Bazen malzemeleri ayırt etmek o kadar kolay değildir (Banhart 2000a, b, Banhart 2003, Polat *et al.* 2011, Zaman 2011, Yavuz 2012 ).

### 3.1 Metalik Köpüklerin Tarihsel Gelişimi

Köpükler ve diğer yüksek gözenekliliğe sahip hücreli malzemeler yüksek mekanik enerji emebilme kapasitesi, yüksek rijitlik ve çok düşük özgül ağırlık gibi fiziksel ve mekanik özelliklerin birleşimine sahip oldukları için doğa tarafından da yapısal ve işlevsel amaçlarla sıkça kullanılmaktadır (ör. Kemik ve ağaç yapıları). İnsanoğlu yüzyıllardır doğal gözenekli malzemeleri yapısal amaçlarla kullanmaktadır. 5000 yıllık ahşap malzeme içeren Mısır piramitleri buna bir örnektir. Roma zamanından ( M.Ö. 27) bu yana şarap şişelerinde kullanılan mantar tıpalarda diğer bir örnektir (Gibson and Ashby 1997, Banhart 2001).

Dünyada son 15 yılda metalik köpüklerin üretimi ve karakterizasyonu üzerine yapılan araştırma-geliştirme faaliyetleri oldukça çoğalmıştır (Banhart and Weaire 2002). Ülkemizde ise endüstriden daha çok, köpük oluşum mekanizmalarını ve üretilen köpüklerin özelliklerini karakterize etme ve geliştirme amaçlı araştırma-geliştirme faaliyetleri üniversitelerde yoğun olarak sürdürülmektedir (Karakuş 1998, Avarisli ve Uğuz 2003, Kavi *et al.* 2006, Polat *et al.* 2011).

Metalik köpük hakkında ilk yazılı belge 1940 yılında Sosnik firması tarafından kapalı hücreli köpük üretimi üzerine yayınlandığı söylenmektedir. 1950'lere gelindiğinde ise kapalı hücreli köpüklerin yanı sıra, mühendislik araştırmasından öte bir merak konusu olarak ergimiş alüminyum içerisine tuz ilavesi ile açık hücre köpük üretimi üzerinde araştırma faaliyetleri başlamıştır (Çinici 2004). Hemen ardından, 1960'lı yıllarda tamamen değişik bir yaklaşım United Aircraft Corporation tarafından uygulanmış, köpüklenme ajanları kullanarak metal köpük üretim patentini almışlardır (Polat *et al.* 2011).

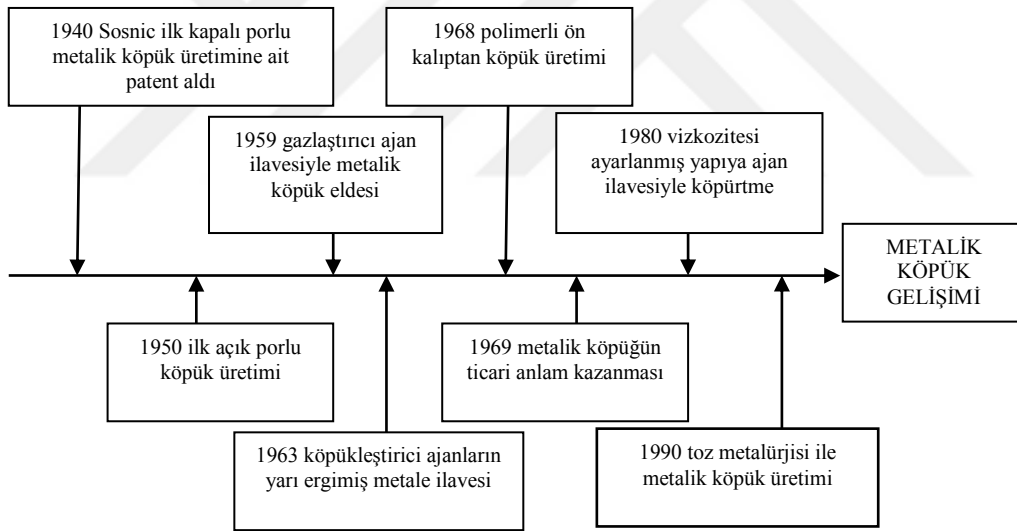
Patentlerin büyük bir bölümü 1950'ler ile 1970'lerin sonlarına kadar verilmiş ve köpürtme işlemlerinin çeşitli türevleri önerilmiştir. 1980'lerin sonlarında başlayan bilimsel faaliyetlerdeki ikinci bir dalgalanma eski tekniklerin bazılarının yeniden kurulmasına ve daha yüksek araştırma faaliyetlerine yol açmıştır (Uçak 2003).

1963'de ise Hardy ve Peisker köpüklenme ajanlarının yarı erimiş metale direkt olarak ilave edilmesi yöntemini içeren prosesleri için patent başvurusunda bulunmaları, hemen ardından da 1968 yılında Kaliforniya'da Enerji Üretim ve Araştırma (ERG) (İnt. Kyn. 1) şirketi tarafından polimerik kalıp içerisinden süzme yoluyla açık hücreli metalik köpük üretiminin (Duocel ticari adıyla bilinir) gerçekleşmesiyle konu hakkında çalışmalar çeşitlendirilmeye ve geliştirilmeye devam edilmiştir. Karakterizasyon sırasında fark edilen metalik köpüğün avantajları ile sektörel üretime geçilmek istenmiş olsa da, metalik köpükler o dönem için yüksek maliyetleri nedeniyle ticari anlam kazanmaktan çok akademik araştırmalarda sınırlı kalmaya devam etmiştir. Bazı üniversiteler ve firmalar köpüklerin avantajlarından daha çok faydalanmak ve seri üretime geçebilmek adına maliyeti düşürecek alternatif üretim yöntemleri bulmaya çalışmış; süzülme, çökme ve katılaşma gibi işlemlere dayanan maliyet-kalite ihtiyacına optimum cevap verebilen bir çok proses geliştirmişlerdir (Polat *et al.* 2011).

Tüm bu geliştirme-iyileştirme çalışmalarının sonucu olarak 20. yüzyılın son çeyreğinde dünyada birçok firma alüminyum köpük üretimine başlamıştır. Bunlardan en önde gelenlerinden biri Japonya'da Shinko Wire Company şirkettir. 1986 yılından beri kalsiyum ilavesiyle viskozitesi artırılmış sıvıya TiH<sub>2</sub>'nin direkt enjekte edilmesiyle

üretileen metalik köpük üretimini patentli (Alporas) olarak gerçekleştirmektedir (Polat *et al.* 2011). Aynı dönemde Norveç'teki Hydro (İnt. Kyn. 2) ve Toronto'daki Cymat (İnt. Kyn. 3) firmaları da erimiş metale gazın direkt enjekte edilmesiyle sıvı fazdan köpük elde etme prosesini geliştirmişlerdir. İlerleyen zamanda Cymat Hydro'yu bünyesine katarak ilk yüksek hızlı üretim bandını geliştirip üretimlerine devam etmiştir (Polat *et al.* 2011).

1948 yılında ilk patenti alınan köpük malzeme üretim zorluğu, pahalı olması ve en önemlisi tekrar edilebilirlik özelliğinin zayıf olması nedeniyle 1990'lı yılların başına dek unutulmuş ya da ihmal edilmiştir. Bu nedenle metalik köpükler önemli bir ivme kazandığında, üretimi ve performansı üzerine yapılan araştırmalar 1990'lara kadar düşük bir seviyede kalmıştır. Şekil 3.1'de metalik köpüklerin tarihsel gelişimiyle ilgili bir diyagram verilmiştir (Degischer and Kristz 2002, İnt. Kyn.4).



Şekil 3.1 Metalik köpük kronolojik gelişimi (Yavuz 2012).

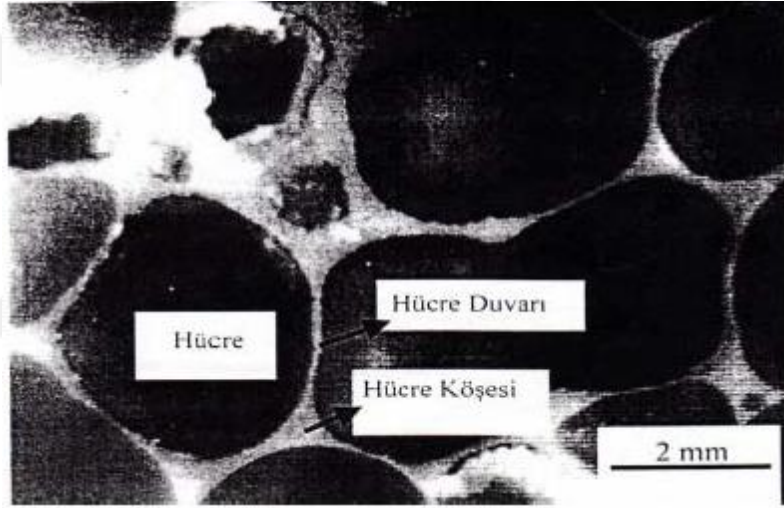
Alüminyum köpük üretiminde 70-80 yıl önceleri başlanmış olup köpük üretimi ile ilgili birçok metot denenmiştir. Günümüze gelinene kadar alüminyum köpüklerin üretilmesinde yoğunluk, homojenlik, hücre boyutu gibi özelliklerinin kontrolleri zor olması sebebiyle uygulama sahasına pek girememişlerdir. Günümüzde firmalar bilgisayar kontrollü üretimin kolaylıkları sayesinde alüminyum köpük üretimi ve kullanımı ile ilgili çalışma yapmaktadırlar. Yapılan bu çalışmalar sonucunda gün geçtikçe köpüklerin kullanım alanlarının tıbbi cihazlar, spor aletlerinde kullanımına



kadar genişlemesi sağlanmıştır.

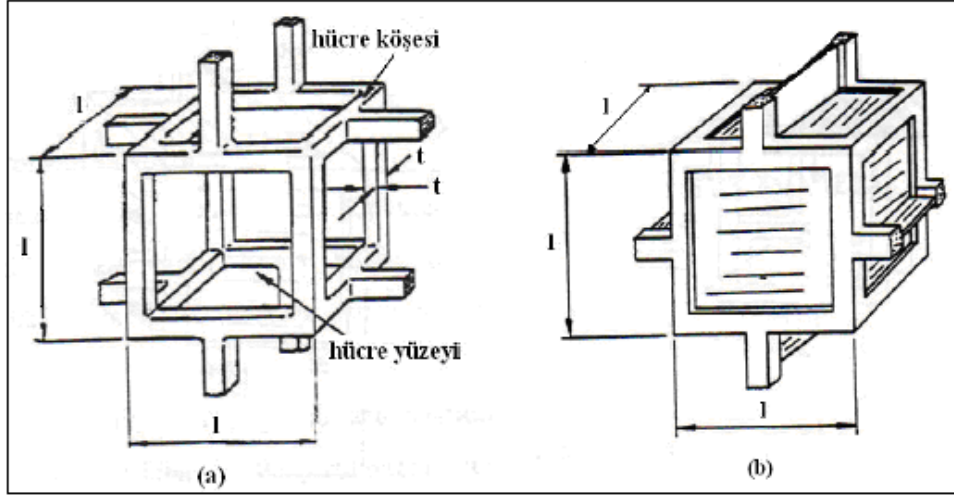
### 3.2 Metalik Köpük Çeşitleri

Yapısında dağılmış küçük boyutlu gaz kabarcıkları bulunan sıvılar, sıvı köpük olarak tanımlanır. Sıvı metal köpük, katılaşma noktasının altında bir sıcaklığa getirilirse katı metal köpük oluşur. Metal köpükte her bir gaz kabarcığının oluşturduğu hacim hücredir. Hücre, hücre duvarları ve hücre köşelerinden oluşur. Hücre duvarı iki gaz kabarcığının oluşturduğu sınır, hücre köşesi ise üç gaz kabarcığının kesiştiği yerdir. Hücre köşesi hücre duvarından daha kalındır (Resim 3.1).

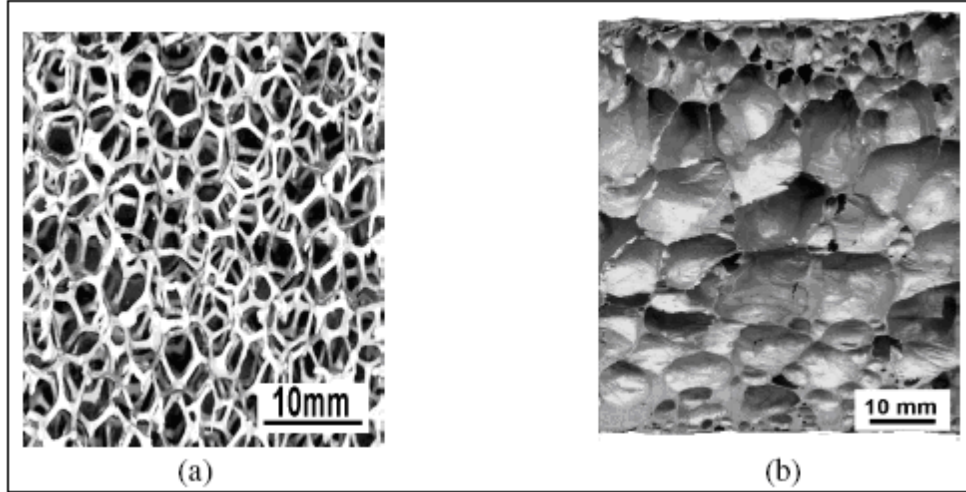


**Resim 3.1** Köpük metal hücre yapısı (Yavuz 2012).

Köpük metallerin “açık hücreli” ve “kapalı hücreli” olmak üzere iki çeşidi vardır. Köpük metaller incelenmeden önce bu terimlerin ne anlama geldiğinin anlaşılması gerekir. Metalik köpüklerin %80-90’ı gözeneklerden oluşmaktadır. Eğer gözenekler birbiriyle bağıntılı bir şekilde bulunuyorsa bu yapıya açık hücreli köpük metal adı verilmektedir. Kapalı hücreli köpük metallerde ise hücrelerin her birinin içerisinde gaz hapsedilmiştir ve birbirinden yalıtılmış bir halde bulunmaktadır. Şekil 3.2’de açık ve kapalı hücreli köpük metal hücre modelleri verilmiştir. Resim 3.2’de de açık ve kapalı köpük metallerin hücre yapıları görülmektedir (Özer 2005, Yıldırım 2010).



Şekil 3.2 Hücre modelleri (a) Açık hücre ; (b) Kapalı hücre (Özer 2005, Yıldıırım 2010).



Resim 3.2 Köpük metal yapıları (a) Açık hücreli; (b) Kapalı hücreli (Özer 2005, Yıldıırım 2010).

Metalik hüresel malzemelerin mühendislik uygulamaları arttıkça, kullanılan üretim yöntemleri bununla birlikte gelişmektedir. Kullanılan üretim yöntemleri hücrelerin büyüklüğüne, hücre büyüklüğünün değişkenliğine, gözenek tipine ve üretilen hüresel malzemenin yapısına göre sınıflandırılmaktadır (Wadley 2002, Yıldıırım 2010, Yavuz 2012).

### 3.3 Metalik Köpüklerin Özellikleri

Düşük yoğunluklu köpüksü metaller mühendislik uygulamalarında özellikle iki özelliğinden dolayı tercih edilirler. İlk tercih edilme nedenleri yüksek elastiklik

modülü ve akma dayanımları sayesinde, dış yüzeyleri hacimli metalle kaplanmış oldukça hafif yapılar üretilebilmektedir. Diğer uygulamaları ise sabit basma gerilimi altında gösterdikleri yüksek yığılma özelliklerinden dolayı var olan yüksek enerji emme kapasiteleri, çarpışma ve darbelerde güvenilirlikle kullanımlarına olanak sağlamaktadır (Bor *et al.* 2010, Yavuz 2012).

Metalik köpük yapılar, polimer esaslı olanlarına kıyasla daha katı bir yapıya sahip; yüksek sıcaklıklarda iç yapısını daha iyi koruyabilen (stabil), ısı mukavemeti yüksek olan ve toksin etkili gaz oluşturmeyen yapılardır. Metalik köpükler doğaya herhangi bir atık malzeme bırakarak zarar vermezler ve geri dönüştürülerek kullanılabilirler. En önemli avantajları ise ağırlıklarının düşük olmasıdır (Yıldırım 2010). Bunun yanı sıra metalik köpüklerin özelliklerini anlayabilmek ve kullanım alanlarını tayin edebilmek için aşağıdaki özelliklerinin bilinmesi gerekir;

- Elastik modül,
- Enerji emilimi ve darbe davranışı,
- Burulma davranışı,
- Basma davranışı,
- Gerinim davranışı,
- Termal, elektriksel davranış.

### 3.3.1 Elastik Modül

Doğrusal bölgedeki elastik davranış mekanizması hücrelerin kapalı veya açık olmasına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Bor *et al.* 2007). Gibson ve Ashby, basit çubuk modelleri kullanarak, ideal kapalı hücreli köpüklerin elastik modülleri için aşağıdaki Formül 3.1' i türetmişlerdir.

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 p \quad (3.1)$$

Bu formülde sırasıyla,  $E^*$  ve  $E_s$  köpük ve hücre metalinin elastik modülleridir. Nispi yoğunluk ( $p$ ) ise Formül 3.2' de gösterilmektedir.

$$\rho = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (3.2)$$

Yukarıdaki formüllerde;  $\rho^*$  köpüğün yoğunluğu  $\rho_s$  hücre metalinin yoğunluğudur.  $C_1$  hücre geometrisine bağlı sabit sayıdır.  $C_1$  izotropik kapalı hücre köpükler için 0,33 açık hücreler ve içi boş kürelerin yüzey merkezli kübik şeklinde paketlenmesi için 0,35 ve bal peteği için 1 olarak hesaplanmıştır. (Gibson and Ashby 1997, Yılmaz *et al.* 2001, Yavuz 2012).

Kapalı hücreli Al köpüklerde, hücre yüzlerinin gerilmesi beraberinde hücre köşelerinin bükülmesini de getirir. Bu yüzden elastiklik modülü eşitliği, yüzey gerilmesi ve kenar bükülmesi ile ilgili lineer yoğunluk evresine sahip olur. Bu durumda yukarıdaki denklem genişletilerek aşağıdaki Formül 3.3'ü önermişlerdir. Bu formülde  $\Phi$ , gözenek duvarlarındaki katı oranını ifade eder (Yılmaz *et al.* 2001).

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \phi^2 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + C_1 (1 - \phi^2) \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (3.3)$$

Ticari üretilen kapalı hücreli alüminyum köpüklerin özellikle düşük yoğunluklu köpüklerin deneysel elastiklik modülleri Formül 3.1' de hesaplanandan oldukça düşüktür. Modül azalması kısmen hücre köşelerinin hücre duvarlarından daha kalın olmasından kaynaklanmaktadır. Bu ise yüzey gerilmelerinin sıvı metali hücre köşelerine doğru çekmesinden dolayı oluşmaktadır (Yılmaz *et al.* 2001).

Deneysel olarak tespit edilen köpüklerin modül verileri genellikle aşağıda verilen Formül 3.4' e uyar.

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (3.4)$$

Alüminyum köpükler için n değeri 1,5-2 ve C, yüksek kalite köpükler için 3, düşük

kalite köpükler için 0,5 olarak kullanılır. Gözeneklerin eğilmesi, gözenek kenarının delik olması veya homojen olmayan gözenekler alüminyum köpüklerin mekanik özelliklerini azaltan unsurlardır. Ayrıca açık gözenekli alüminyum köpüklerin elastik deformasyon özellikleri farklıdır (Çinici 2004, Yıldırım 2010).

Köpüklerin nispi yoğunlukları arttıkça ( $p^*/p_s > 0,1$ ) hücre duvarlarının gerilimi veya basılmasından kaynaklanan etki daha belirgin hale gelmektedir. Kapalı hücreli köpüklerde hücre köşeleri eğilmekte ve genişmekte veya daralmaktadır. Diğer yandan hücre yüzlerini oluşturan membranlar gerilmekte ve eksenel hücre duvar elastikiyetinin elastik modülüne etkisini arttırmaktadır (Bor et al. 2007).

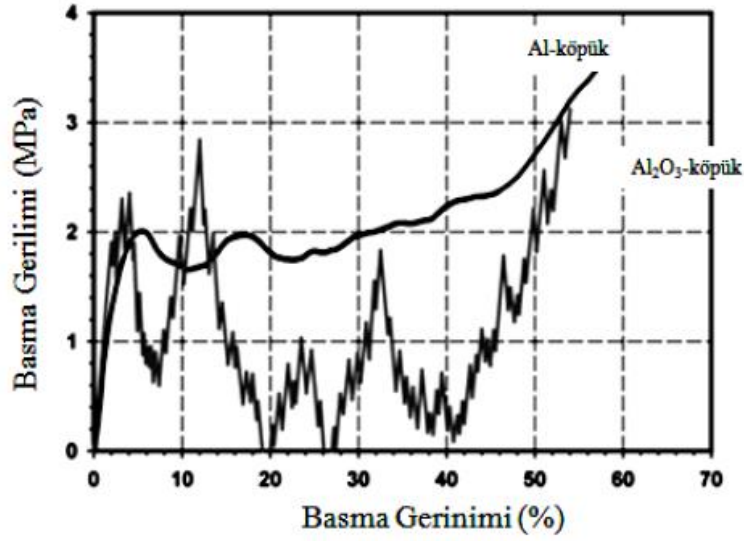
### 3.3.2 Basma Davranışı

Hücrel metaller basma testinde Şekil 3.3' te gösterildiği gibi bir “plato bölgesi” ile benzersiz bir gerilim-gerinim eğrisi göstermektedir. Buna göre gerilim, gerinimin geniş bir bölümü dışında neredeyse eşittir. Bu davranış, enerji absorpsiyon uygulamaları için nispeten sabit düşük gerilme ile deformasyonun büyük bir miktarı absorbe edildiğinden dolayı hücrel metalleri ilginç kılar. Malzemede, hangi köpükten yapıldığına bağlı olarak farklı deformasyon mekanizmaları (elostemerik, kırılğan ve sünek davranış) gözlemlenebilir. Metalik köpükler genellikle büyük bir sünek davranış gösterirler.

Plato gerilmesinin köpüğün enerji emme kapasitesine etkisi oldukça fazladır. Mükemmel bir kapalı hücreli köpük yapısında plastik deformasyonun, hücrelere uygulanan basma kuvvetine dik bir yönde hücre duvarlarının genişmesi şeklinde oluşması beklenmektedir.

Bu durumda plato gerilmesi aşağıdaki Formül 3.5 ile ifade edilebilir. Burada C, geometriye bağlı sabit,  $\sigma_s$  ise köpük metalinin akma gerilmesidir (Yılmaz *et al.* 2001).

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} = C_2 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} \quad (3.5)$$



**Şekil 3.3** Sünnek bir alüminyum köpük ve gevrek bir alüminyum köpük için basmada gerilim-gerinim eğrisi (Yavuz 2012).

Hücre genişlemesinin hücre duvarı bükülmesiyle eş zamanlı oluşması durumunda ise, plato gerilmesinin hesaplanmasında Formül 3.6 kullanılabilir. Eğer hücre duvarları uygulanan yük yönünde bükülecek kadar ince ise plato gerilmesi hücre duvarı bükülmesi ile belirlenir.  $C_2$  geometriye bağlı sabittir ve yaklaşık 0,3 olarak alınabilir (Andrews *et al.* 1999).

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} = C_2 \left( \phi \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + C_2' (1 - \phi) \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (3.6)$$

Gibson ve arkadaşları yapmış oldukları sonlu elemanlar analizleri sonucunda tetrakaidekahedral hücre yapısına ait bir köpüğün formülasyonlarını Formül 3.7'de olduğu gibi sadeleştirmişlerdir (Gibson and Ashby 1997, Yavuz 2012).

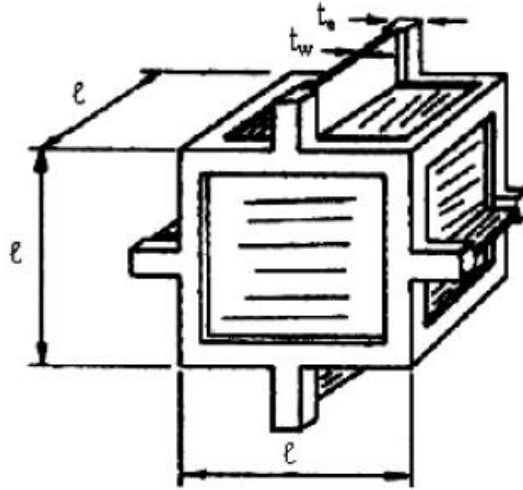
$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} = 0,33 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + 0,44 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (3.7)$$

Gibson ve Ashby, köpükleri katı direkler ve direklerin orta noktalarında bulunduğu tabakalar içeren küplerden oluşan yapı ile modellemişlerdir. Bu modele göre, plato

gerilmesi sadece hücrelerin boyutuna ( $\ell$ ) ve hücre köşesi ( $t_e$ ) ile hücre duvarı ( $t_w$ ) kalınlıklarına bağlıdır.  $B_1$  ve  $B_2$  sabitlerdir.

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = B_1 \left( \frac{t_e}{\ell} \right)^3 + B_2 \left( \frac{t_w}{\ell} \right) \quad (3.8)$$

Formül 3.8 iyi bir tahmin sunmaktadır. Ancak, kesin bir tasarım için yetersizdir. Model, özdeş kübik hücreleri varsaymaktadır. Nitekim ne hücre boyut dağılımı, hücre köşesi ve hücre duvarı kalınlıkları ne de farklı kusurlar (kırılmış hücre duvarları ile hücre köşeleri ve duvar eğrilikleri gibi) göz önüne alınmıştır (Şekil 3.4).



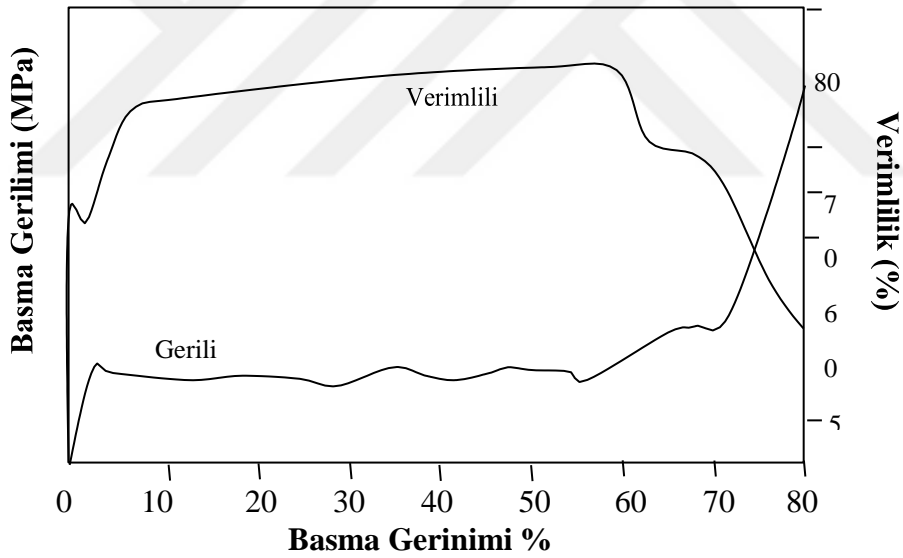
**Şekil 3.4** Gibson ve Ashby modeline göre kapalı hücreli yapı (Kadar *et al.* 2005, Yavuz 2012).

Basma testleri göstermektedir ki, sabit plato gerilmesi sadece bir ilk yaklaşım olarak alınabilir. Aslında plato gerilmesi, deformasyonun artmasıyla yavaşça artmaktadır. Plato gerilmesindeki bu artışın nedeni, hücre boyutu ve hücre duvarı / hücre köşe kalınlıkları dağılımı olabilir. Yoğunlaşma gerinimi için ilk tahmin Gibson ve Ashby tarafından verilmiştir. Açık ve kapalı hücreli köpüklerin her ikisi için yoğunlaşma gerinimini nispi yoğunluğun lineer fonksiyonu olarak bulmuşlardır. Buna göre yoğunlaşma gerinimi ( $\epsilon_D$ ) aşağıdaki Formül 3.9' a göre hesaplanır (Kadar *et al.* 2005, Yavuz 2012).

$$\epsilon_D = 1-1,4p$$

$$(3.9)$$

Şekil 3.5’ te basma yükü altındaki alüminyum köpüğün deformasyon davranışı gösterilmektedir. Malzeme tarafından hacim başına emilen enerji, gerilim-gerinim eğrisinin altındaki bölge ile doğrudan ilişkilidir. Köpük sabit bir deformasyon gerilimi gösterir ve bu nedenle her ikisi de belirli gerilim seviyesine kadar yüklendiğinde bütün alüminyum, bir parçasından çok daha fazla deformasyon enerjisi emebilir. Emilen enerjinin büyük bir bölümü alüminyum köpüğün büyük bir avantajı olarak geri dönüşümsüz olarak çevrilir. Yoğun matrisli malzeme aynı gerilim seviyesinde, yük kaldırıldıktan sonra depolanan enerjinin çoğunu bırakır. Tepki olmaksızın kontrollü bir darbe enerji emilimi (örnek olarak otomobil ezilme bölgelerinde) istenilirken, yoğun bir malzemenin bu elastik davranışı rahatsız edicidir (Baumeister *et al.* 1997, Yavuz 2012).



Şekil 3.5 Bir Al-12Si köpüğün basma gerilimi ve enerji emilim verimi (Baumeister *et al.* 1997, Yavuz 2012).

### 3.3.3 Enerji Emilimi ve Darbe Davranışı

Enerji emilim sistemlerindeki uygulamalar, metal köpükleri kullanmak için büyük potansiyel sunmaktadır. Yüksek derecede gerilme ortaya koymadan enerji emebilme özelliği, metal köpüğe çeşitli yapısal uygulamalar sağlar. Köpük verilen bir pik gerilme



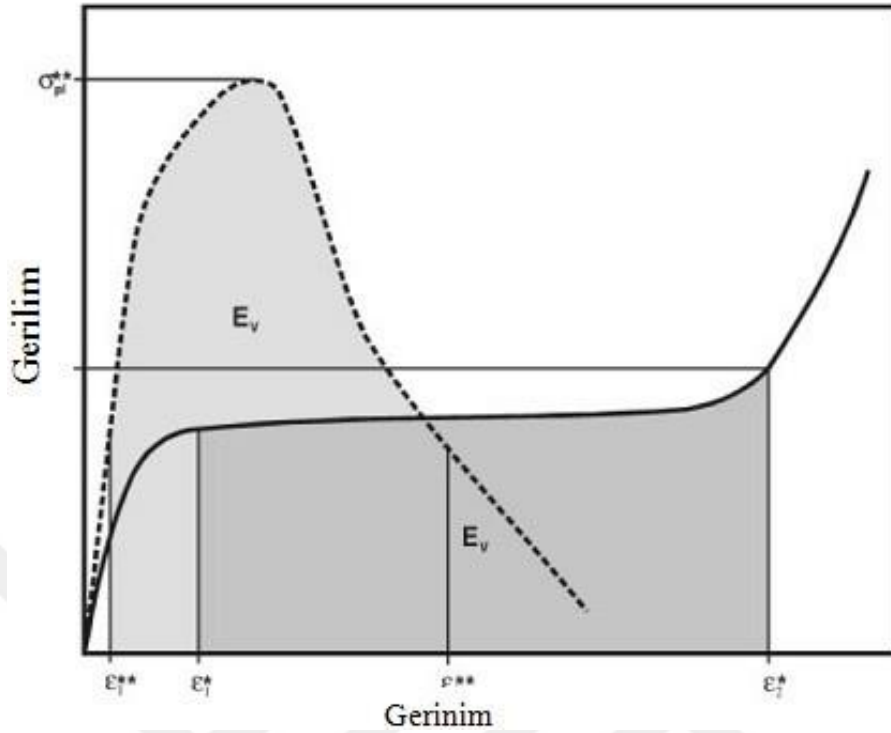
derecesinde yoğun katıdan çok daha fazla enerji emebilir. Metal köpükler, kendine özgü yüksek dayanım ve bununla birlikte yüksek miktarda enerji verimliliği sergilerler (Yu and Banhart 1997).

Hücreli metallere, geniş plato sistemi nedeniyle iyi bir enerji absorpsiyon verimine ve iyi bir enerji absorpsiyon kapasitesine sahiptir. Bir darbe anında, kinetik enerjiyi absorbe etmek için kuvvetler, gerilim seviyesi tarafından kontrol edilir. Darbe kuvvetleri, bir kişinin yaralanmasını veya bir paketin hasar görmesini engellemek için belli bir değeri aşmamalıdır. Bu nedenle Şekil 3.6' da gösterildiği gibi enerji emiliminde, yalnızca enerji absorpsiyon kapasitesi önemli değildir. Aynı zamanda malzemenin gerilim-gerinim eğrisi de büyük bir rol oynar. Belli bir gerinim aralığında hacim başına düşen emilmiş enerji miktarı  $E_v$  olarak gösterilmiştir ve iki farklı emici içinde aynıdır. Emicinin gerilim en yüksek noktası plato bölgesinin dışında daha yüksektir ve bu darbe kuvvetlerini arttıracaktır (Degischer and Kristz 2002).

Basma test verilerinden, deformasyon boyunca enerji emilimi hesaplanabilir. Enerji emilim verimliliğini ( $A$ ) tanımlayan Formül 3.10 aşağıda verilmiştir.

$$A(\epsilon) = W/W_0 = \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon / \epsilon \cdot \sigma(\epsilon) \quad (3.10)$$

Burada sırasıyla  $W$  ve  $W_0$ , basma gerinimi sonundaki (plato geriniminin sonundaki) etkin absorbe edilen enerjiyi ve gerilme-gerinim eğrisinde dikdörtgensel değişimi gösteren ideal emici maddeyi tanımlamaktadır (Yang and Nakae 2000).



Şekil 3.6 İki farklı enerji emicinin basma gerilim-gerinim eğrisi (Degischer and Kristz 2002).

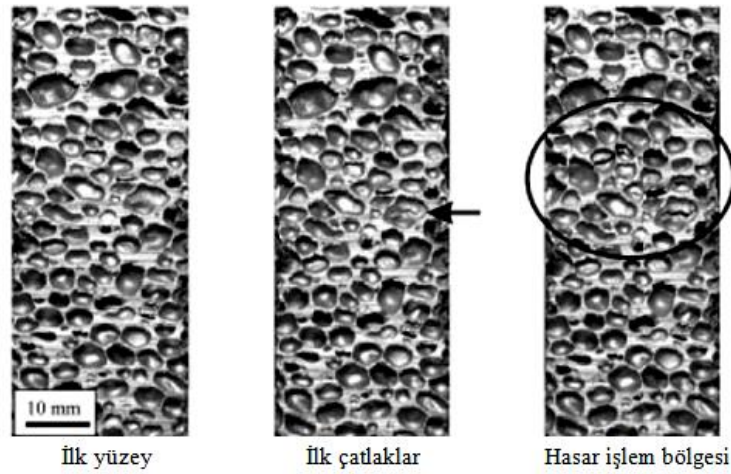
### 3.3.4 Gerinim Davranışı

Metal köpüklerin üretim işlemlerindeki iyileştirmeler, metalik köpüklerin kalitesini arttırmıştır ve gerçek bir yapısal malzeme olarak yeni uygulamalar ortaya çıkarmıştır. Mekaniksel özelliklerden dolayı, gerinim ve kırılma gibi davranışlara ek olarak basma ve enerji absorpsiyon performansının da bilinmesi gerekmektedir (Degischer and Kristz 2002).

Başlangıçtaki deformasyon modu, açık hücreli köpüklerdeki hücre kenarlarının esnemesi ve basma eğrisi, kapalı hücreli köpüklerdeki hücrelerdeki basma eğrisine çok benzerdir. Ancak akma sonrasındaki aşamada, deformasyon mekanizmaları basmadan oldukça farklıdır. Basmada, hücrenin kırılma veya plastik çöküşü, aksel yüklemeye dik olarak deformasyon bantları içerisinde gerçekleşir. Gerinimde, hücre duvarları ve hücre kenarları içinde çekme geriliminin baskın olmasından dolayı bu elementlerin burulması mümkün değildir (Degischer and Kristz 2002).

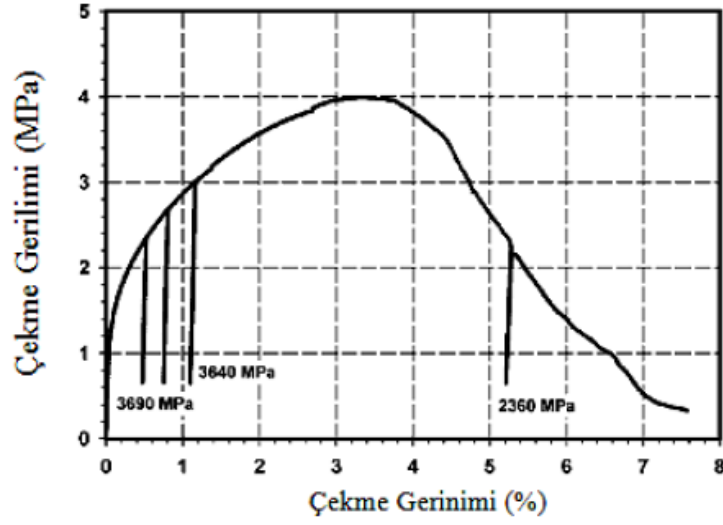
Sünek hücreli metallerde (örneğin alüminyum köpükler), hücre kenarları ve hücre duvarlarının çatlaması, bir ana çatlak yayılmaya başlamasından önce de görülebilir. Bir hasar işlem bölgesi, deformasyonun ve yoğunluğun artması ile gelişmeye başlar. Kapalı hücreli metallerde birkaç hücre duvarı bu hasar işlem bölgesi içinde yırtılır (Degischer and Kristz 2002).

Ayrıca deformasyon, hücreli yapı içindeki zayıf bir yol boyunca ana çatlak yayılmasına ve gelişmesine yol açar. Sadece güçlü hücre kenarları bozulmaz ve birlikte iki köpük parçasını tutarlar. Bu işlem, akış gerilimini düşürür. Gerilim-gerinim eğrisi içindeki olaylar, sünek bir kapalı hücreli alüminyum köpüğün hasar mekanizması ve ilgili deformasyon işlemi Resim 3.3' te gösterilmiştir (Degischer and Kristz 2002).



**Resim 3.3** Alüminyum köpüğün gerinimdeki hasar mekanizması (Degischer and Kristz 2002).

Bazı zayıf hücre duvarlarında çatlak oluşmuş ve daha sonra bir hasar işlem bölgesi gelişmiştir. Şekil 3.7' de ise bu hasar bölgesinin gerilim-gerinim eğrisi mevcuttur.



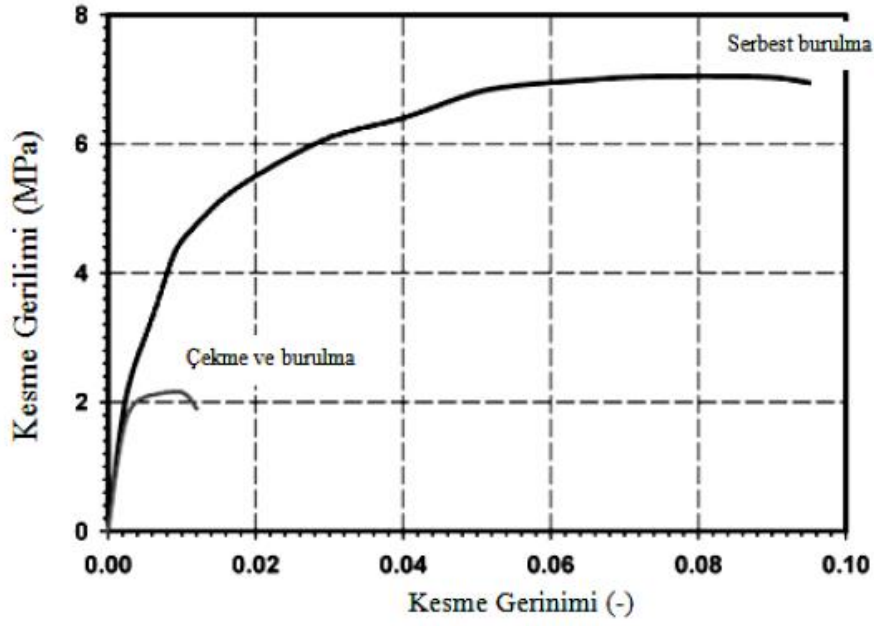
Şekil 3.7 Yük kaldırma modülü ile alüminyum köpüğün çekmedeki gerilim-gerinimi (Degischer and Kristz 2002).

### 3.3.5 Burulma Davranışı

Burulmada, hücre kenarları eğilmeye, hücre duvarları ise eğilme ve kesmenin bir kombinasyonuna maruz kalır. Kesme davranışı, malzeme yasalarının gelişimi ve ayrıca sandviç yapılardaki uygulamalar için önemlidir (Degischer and Kristz 2002).

Çoğu köpük, çekme testleri ile karşılaştırıldığında serbest bükmede önemli derecede deformasyon başarısızlığı gösterir. Tipik bir örneği Şekil 3.8’ de gösterilmiştir. Numune kırıldığında bükme testi esnasında aksenal olarak sabitse, çekme gerilmeleri numune üzerinde oluşmuştur ve hasar için gerilim, gerinim testlerinde belirlenmiş seviyede azalır.

Numune içindeki çeşitli gerilim bölgeleri, bükme testi esnasında numune üzerine çekme ve basma yükleri uygulanması ile elde edilmiştir (Degischer and Kristz 2002).



Şekil 3.8 Bükmede aksenal çekme gerilimi ve aksenal olmayan gerilim ile alüminyum köpüğün gerilim-gerinim eğrisi (Degischer and Kristz 2002).

### 3.3.6 Termal, Elektriksel Davranış

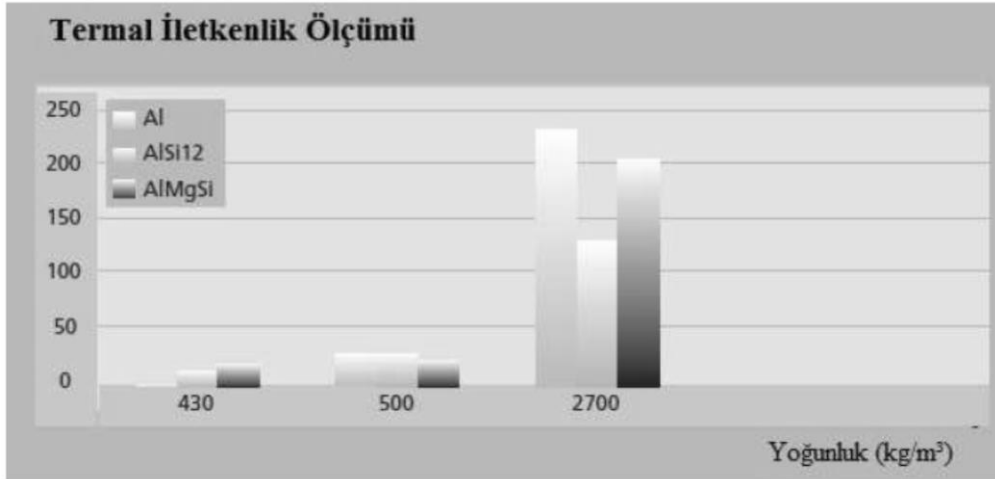
Köpük metal malzemenin kesit alanının sadece küçük bir kısmı iletkendir. Bunlar temel alaşım elemanının iletkenlik değerini taşıyan hücre duvarlarıdır. Hücre duvarları sürekli olarak iletken olmayan alümina ile kaplıdır. Kesit alanının önemli bir bölümü gözeneklerin içerisinde bulunan iletken olmayan havadan oluşur. Bundan dolayı köpük malzemeler dolu malzemelerden çok daha az iletkenliğe sahiptirler (Hutzler 1997, Ashby *et al.* 2000, Sığırtmaç 2010).

Elektrik iletkenliği, köpük metalin yoğunluğu ile azalır. Köpük malzemenin elektrik iletkenliği yoğunluğun bir fonksiyonu olarak nonlineerdir. Şekil 3.9 ve Şekil 3.10' da yoğunluğa bağlı olarak malzemelerin elektrik ve termal iletkenlikleri verilmiştir.



Şekil 3.9 Yoğunluğa bağlı elektrik iletkenliği (Sığırtmaç 2010).

Termal iletkenlik de köpük malzemelerde dolu malzemelere göre yüzey alanı azaldığı için düşüktür. Bu özelliklerin (termal / elektrik iletkenliği) ön planda olduğu uygulamalar; geri dönüşümlü ısı kalkanları, elektromanyetik ve darbe sönümleyicilerin önemli olduğu elektronik aletler için kutulardır.



Şekil 3.10 Temel alaşım elemanı ve yoğunluğa bağlı termal iletkenlik (Sığırtmaç 2010).

### 3.4 Metalik Köpük Üretim Yöntemleri

Metalik köpük üretim yöntemleri genel olarak ikiye ayrılır. Bunlar aşağıdaki gibidir.

- Ergitme bazlı metalik köpük üretimi
- Toz bazlı metalik köpük üretimi.

#### 3.4.1 Ergitme Bazlı Metalik Köpük Üretimi

Ergitme ve döküm yöntemi ile metalik köpük üretimi başlıca üç aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada köpürtülecek metal veya alaşım ergiyik hale getirilir. İkinci aşamada gözenekli yapı oluşturmak için gaz veya köpürtücü madde ilave edilir. Üçüncü aşamada soğutma işlemi yapılarak ergiyik metal katı hale getirilir (Çinici 2004).

Ergiyik metal içerisinde gaz kabarcıkları oluşturularak yapılan köpük üretiminde, sıvının yüksek kaldırma kuvvetinden dolayı yüzeye doğru hızlı kabarma eğiliminde olan gaz kabarcıklarıyla metalik köpük şekli verilmiştir. Aşırı derecede yüksek viskozite, kabarcıkların düzeninin bastırılmasına neden olurken, aşırı derecede düşük viskozite, kabarcıkların hızlı yüzdürülmesine neden olur (Ashold 1999, Yavuz 2012).

Ergitme bazlı metalik köpük üretim yöntemleri kendi içerisinde 5 farklı yöntemle ayrılır bunlar;

- Gaz enjekte ederek gözeneklendirilmesi ile metalik köpük üretimi,
- Köpükleştirici ajanlar yardımıyla metalik köpük üretimi,
- Gaz- Ötektik reaksiyonunu kullanarak metalik köpük üretimi,
- Dökme, süzme ve çoğaltma tekniği ile metalik köpük üretimi,
- Boşluk tutucu teknik ile metalik köpük üretimi (Yavuz 2012).

Yapılan bu çalışmada boşluk tutucu teknik ile metalik köpük üretimi üzerine çalışıldığı için bu yöntem detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

### 3.4.1.1 Boşluk Tutucu Teknik İle Metalik Köpük Üretimi (Sentaktik Köpük)

Sentaktik köpükler ilk olarak 1960 yılında geliştirilmiş olup deniz altlarında kullanılmışlardır (Chittineni 2009). Sentaktik köpükler polimerik ya da metal matris içine gömülü boşluk tutucu malzemeler veya seramik parçacıklara sahip kompozit malzemelerdir (Egidio *et al.* 2000). Amerikan test ve malzeme birimine göre sentaktik köpükler reçine matris içinde boşluklu küresel dolgu maddeleri içeren malzeme olarak tanımlanmaktadır (Chittineni 2009). Sentaktik köpükler üretiminde matris içine içi boş küreler katılarak yoğunluklar düşürülür. Genellikle mikro yapıda katılan bu dolgu maddeleri cam, seramik, çelik veya alüminyum gibi malzemelerden yapılabilmekte ve farklı boyutlarda olabilmektedir (Ashida 1995, Gupta *et al.* 2001)

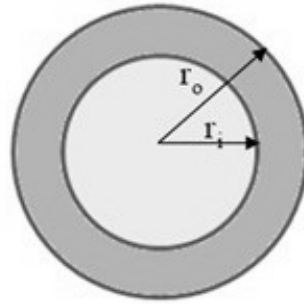
Metal matrisli sentaktik köpükler nispeten yeni malzemelerdir. Bu köpükler geleneksel metalik köpüklerden biraz farklıdır. Sentaktik köpüklerin diğer geleneksel köpüklere (infiltrasyon, ergiyik vb. yöntem ile üretilen) nazaran daha yüksek yoğunluklara sahip olmalarına rağmen izotropik özellikleri, yüksek basınç dayanımları iyi enerji emilimi ve yüksek mukavemet gibi avantajları vardır (Bahnhart 2001, Miyoshi *et al.* 2000, Marchi and Mortensen 2001, Wu *et al.* 2007). Sentaktik köpüklerde matris olarak genellikle alüminyum ve alaşımları kullanılmaktadır. Araştırmacılar sentaktik köpük üretimi için boşluk tutucu malzeme ve şekil verme teknikleri kullanmaktadır.

Sentaktik köpük kompozitler düşük ısıl iletkenlik ve yüksek spesifik mukavemete sahiptirler (Woldesenbet *et al.* 2005, Zhang and Ma 2009). Bu kompozitler çeşitli hassas ağırlık uygulamalar için sandviç yapılarda temel malzemesi olarak kullanılabilen, ayrıca yüksek özgül dayanımı, yüksek hasar toleransı, ısı ve elektrik yalıtımı ve mükemmel sönümlenme özelliklerinden dolayı üstün özelliklere sahiptirler. Sentaktik köpüklerin geniş bir mekanik özelliğe sahip olmaları ile iyi bir titreşim sönümlenme karakteristikleri sayesinde üretimlerde istenilen fonksiyonda üretilebilmektedir (Yavuz 2012).

Sentaktik köpükler bu özelliklerinden dolayı günümüzde uçak, uzay gemisi ve denizcilikte yapısal uygulamalarında kullanılmış olup uygulama alanları genişlemiş ve



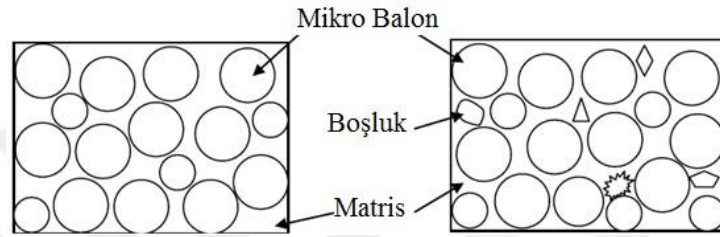
önemli malzemeler arasına girmişlerdir (Bardella and Genna 2001, Gupta *et al.* 2001). Dolgu malzemesi olarak Cenospere kullanılmış alüminyum matrisli sentaktik köpükler yangına dayanıklı ses ve darbe emici enerji gibi özelliklerinden dolayı denizaltılarda kullanılmıştır. Uygulamada matris yoğunluğu içerisine katılan boşluk tutucu malzemenin (mikrobalon) yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir (Gupta and Ricci 2006). Yapılan çalışmalara göre köpüğün yoğunluğu iki farklı şekilde değiştirilebilmektedir. Bunlardan birincisi boşluk tutucu malzeme miktarını değiştirerek veya farklı yoğunlukta boşluk tutucu malzeme kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. İkinci yöntemde sentaktik köpüğün özelliklerinde hiçbir değişiklik olmadan mikrobalonların yarıçapları ile ilgili olduğundan tasarımda daha fazla esneklik sağlamaktadır (Chittineni 2009).



**Şekil 3.11** Mikrobalon şematik gösterimi(Chittineni 2009)

Yarıçap oranı denklemde gösterildiği gibi mikro balonların dış yarıçapı ile iç yarıçapı oranı olarak tanımlanır. Mikro balonların şematik görünüşü Şekil 3.11' de gösterilmektedir. Dış yarıçap  $r_0$  ve iç yarıçap  $r_1$  arasındaki fark duvar kalınlığı olarak adlandırılmaktadır (Chittineni 2009). Mikrobalonların yoğunluk ve mukavemeti yarıçap ile ters orantılıdır. Düşük duvar kalınlığı büyük iç yarıçaplı balonlarda düşük yoğunluklu ve düşük dayanımlı sentaktik köpükler üretilebilir (Gupta *et al.* 2004). Buna karşılık yüksek yoğunluklu mikro balonlar sentaktik köpüklere yüksek basma dayanımı ve daha düşük gerinim kırılması özelliklerini kazandırır (Woldesenbet *et al.*2005, Gupta and Woldesenbet 2003). Deniz ve havacılık yapısal uygulamaları göz önüne alındığında sentaktik köpüklerde kullanılan mikro balonların iç yarıçaplarının köpüklerin mekanik özelliklerine etkileri üzerine oldukça fazla çalışmalar yapılmaktadır.

Sentaktik köpükler matris ve mikro balonları olması sebebiyle iki fazlı yapılardır. Bu köpüklerin mikro balonları içerisinde boşluk olması sebebiyle kapalı gözenek olarak sınıflandırılmaktadır. Ancak sentaktik köpük imalatı sırasında hava veya boşluk matris içerisinde sıkışıp kalabilir. Matris içerisinde hava veya boşlukların olması durumunda açık hücreli olarak adlandırılır ve böyle bir durumda sentaktik köpüklerde üç fazlı yapı oluşmaktadır. Sentaktik köpüklerin iki veya üç fazlı olması Şekil 3.12’ de şematik olarak gösterilmiştir (Chittineni 2009).



Şekil 3.12 Sentaktik köpüklerde faz durumunun şematik gösterimi (Chittineni 2009).

### 3.4.2 Toz Bazlı Metalik Köpük Üretimi

Hüresel metalik yapılar yapmak için erimiş bir metal yerine, tozlaşmış biçimdeki katı metaller kullanılmıştır. Tüm işlem boyunca kullanılan toz katı haldedir ve sadece bir sinterleme işlemi veya diğer katı hal işlemlerinden geçer. Bu, kapalı gözenek oluşumu eğilimine neden oluyorsa, yalnızca sıvı hal yüzey geriliminden beri ortaya çıkan hüresel yapısının morfolojisi için çok önemlidir. Oysaki sinterlenmiş gözenekli ürünler, sinter boyunları ile bağlanmış daha fazla veya daha az küresel parçacıklar, tipik olarak izole edilmiş açık hücreler gösterir. Günümüzde, tozlar veya fiberlerin kaybolan hacimlerinin sinterlenmesi, P/M sanayisinde belirlenmiş bir üretim yöntemi ve gözenekli metaller elde etmek için en basit yoldur. Daha ileri teknolojilerde, bir toz sıkıştırması içindeki gazın tutulmasıyla, içi boş kürecikler veya boşluk tutan doldurucu malzemeler kullanarak veya finalde, metal toz çamurlarının köpükleştirilmesiyle gözeneklilik oluşturabilir (Banhart 2001).

Toz bazlı metalik köpük üretim yöntemi de kendi içerisinde 5 farklı yönteme ayrılır bunlar;

- Öncü malzemeler karıştırılarak tozun pişirilmesi ile gözeneklendirme
- Düşük yoğunluklu çekirdeğin gaz kaynaklı büyümesi ile gözeneklendirme
- Toz ile fiber sinterleyerek köpük üretimi
- İçi boş kürelerin sinterlenmesiyle gözeneklendirme
- Sinterleme ve çözme tekniği ile metalik köpük üretimi (Yavuz 2012).



## 4. MATERYAL ve METOT

### 4.1 Silika jellerin Hazırlanması

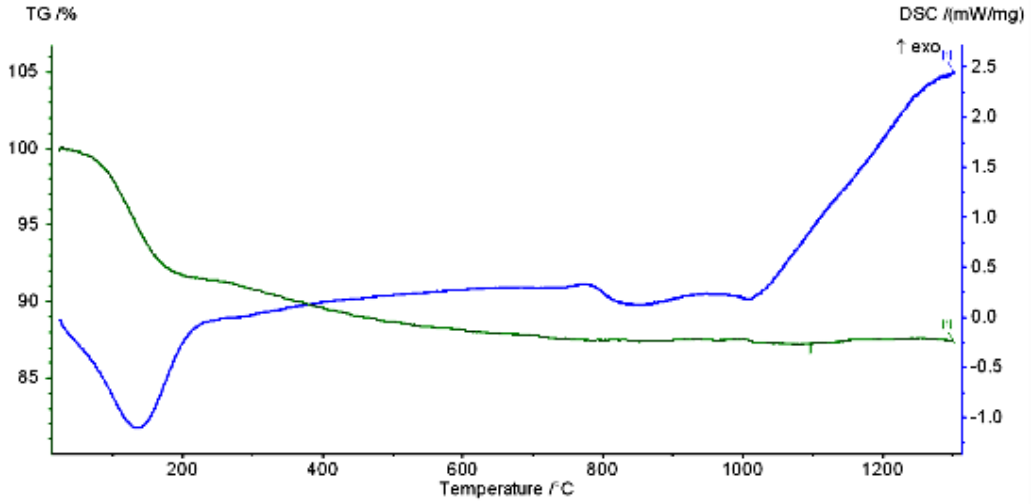
Alüminyum köpük malzeme üretimi için çözünmeyen tip boşluk tutucu malzeme olarak kullanılmak üzere Damla Kimya şirketinden 1-3 mm ve 3-5 mm boyutunda beyaz silika jeller temin edilmiştir. Döküm işlemine geçilmeden önce gözenek yerinde hacim oluşturacak malzeme olarak kullanılacak ham silika jeller bir ön işleme tabi tutulmuştur. Bu işlem için, ham silika jelden 200 gram bir paslanmaz çelik kabın içerisine yerleştirilmiştir. Kap içerisindeki silika jeller elektrikle ısınan sıcaklık rejimi sabit olacak şekilde 1100 °C 'ye kadar ısıtılmıştır. Fırın sıcaklığı istenilen değere (1100 °C) çıktıktan sonra 5 dakika aynı sıcaklıkta fırında bekletilip fırın kapatılmıştır. Daha sonra fırın kapalı iken fırın sıcaklığı 150 °C 'ye düşene kadar bekletilip fırın açılmıştır. Silika jellerin bu ön işlem ile genleşmeleri sağlanarak yoğunluğu azaltılmıştır. Resim 4.1' de işlem öncesi ve sonrasındaki paslanmaz çelik tepsi içerisindeki silika jeller görülmektedir.



**Resim 4.1** Silika jel görüntüleri; (a) Genleştirme işlemi öncesi; (b) Genleştirme sonrası

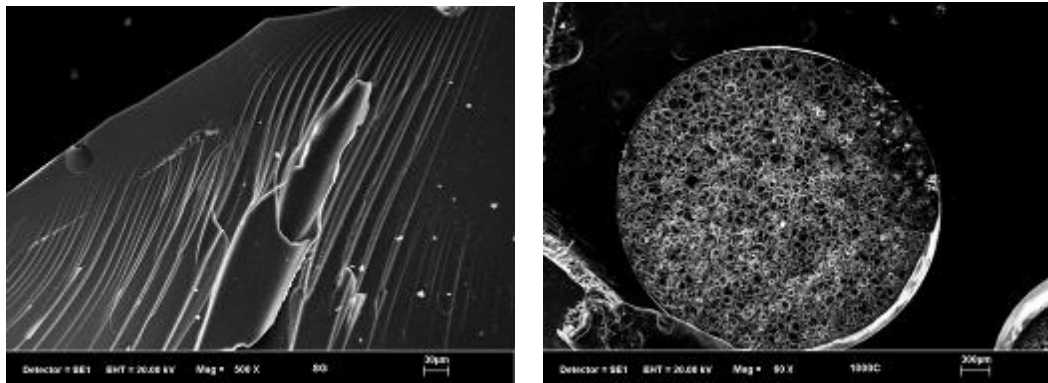
Şekil 4.1'de silika jellerin TG ve DSC analizi görülmektedir. Analizler 1300 °C'ye kadar yapılmış olup TG ve DSC analizlerinin her ikisinde de 100 °C civarında ani bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu düşüş silika jel içinde bulunan nemin kaybolmasından kaynaklanmaktadır. DSC analizindeki 800 °C ve 1000 °C civarındaki değişimler yapıdaki genleşmelerden kaynaklanmaktadır. 1000 °C den sonra ani bir yükselme görülmektedir. 1000 °C den başlayan büyük bir ekzotermik pik olduğu görülmektedir. Bu ise amorf yapıdan kristal yapıya dönüşümün işaretidir. 1100 °C 'den sonra Silika

jellerin yapısı değişerek sinterlenmiştir. Silika jellerin bu yapısal değişimi SEM analizlerinde de açık olarak görölmektedir. (Yavuz 2012)



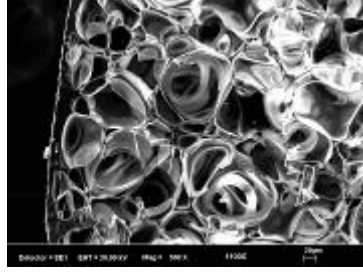
Şekil 4.1 Silika jellerin TG ve DSC analizi (Yavuz 2012)

Genleştirme öncesi silika jel kırık yüzey görüntüsü ve genleştirme işlemi sonrası gözenek yapısı görüntüleri Resim 4.2'de gösterilmiştir. Yapı incelendiğinde genleştirme öncesi yoğun silika jel yapısı gözlenirken (Resim 4.2 a), genleştirme işlemi sonrasında tamamen gözenekli hafif silika jel tane yapısı gözlemlenmektedir (Resim 4.2 b).



Resim 4.2 Silika jel yüzeyi; (a) Genleştirme işlemi öncesi silika jel kırık yüzeyi, (b) Genleştirme sonrası gözenekli silika jel küre yapısı (Yavuz 2012)

Resim 4.3'te kürenin dış çeper kalınlıkları karşılaştırıldığında, sıcaklığın artmasıyla çeper kalınlıklarının azaldığı gözlemlenmiştir.



**Resim 4.3** Farklı sıcaklıklarda işlem görmüş silika jellerin gözenek ve duvar yapıları (1100°C) (Yavuz 2012)

Yavuz (2012); yaptığı doktora çalışmasında 1200 °C'de yapılan genişletme işlemi sonrası dış çeperleri çok inceldiği ve kırılğan küreler oluştuğu görülmüştür. Bu nedenle en ideal silika jel genişletme sıcaklığı olarak 1100 °C görülmüştür. Literatür taramasından elde edilen veriler doğrultusunda tez çalışmasında 1100 °C de genişletme işlemi yapılmıştır. Çizelge 4.1'de farklı genişletme sıcaklıkları sonrasında ölçülen silika jel yoğunlukları verilmiştir. Yoğunluk ölçümü yapılırken kütle / hacim oranı kullanılmıştır. Silika jel yoğunlukları için her gruptan 20 adet küre seçilmiş ağırlık ve çapları ölçülmüştür. Hacimler hesaplandıktan sonra her küre için yoğunluk hesaplanmış ve ortalama değerler verilmiş olup Çizelge çap arttıkça silika jellerin yoğunluğu düşmektedir (Yavuz 2012).

Elde edilen genişmiş silika jeller, farklı açıklıklara sahip eleklerden geçirilerek (-6,30+4,75) ve (-4,75+ 2,00) mm sınıflara ayrılmıştır.

**Çizelge 4.1** 1100 °C genişleme sıcaklığına bağlı silika jel yoğunlukları.

Silika Jel Çapı	1100 (°C)
2,00-4,75 mm	0,59(g/cm <sup>3</sup> )
4,75-6,30 mm	0,34(g/cm <sup>3</sup> )

#### 4.1.1 Kullanılan Alüminyum Malzemenin Özellikleri

##### 4.1.1

Döküm yöntemi ile üretilmiş alüminyum köpük için alüminyum (Etial-160) kullanılmıştır. Kullanılan alüminyumun Etinormu Etial – 160 tır. Özgül ağırlığı 2,6 g/cm<sup>3</sup> tür. Ergime derecesi 540-495 °C, korozyon dayanımı orta, dökülebilirliği iyidir. Etial -160 malzemesinin işlenebilirliği gayet iyidir. Özellikle iyi yüzey özellikleri

##### 4.1.1

##### 4.1.1

##### 4.1.1

##### 4.1.1

istenen basınçlı döküm ile üretimlerde tercih edilmektedir (İnt. Kyn.7). Kullanılan alüminyuma ait kimyasal kompozisyon Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.2** Etial-160 alüminyum külçesinin kimyasal kompozisyonu(% Ağırlık).

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Pb	Sn
Etial- 160	7,5-9,0	1,0	3,0-4,0	0,5	0,3	1,0	0,2	0,2	0,1	0,1

Kullanılan alüminyumun dünya standartlarında farklı ifadeleri bulunmaktadır. Bu standart gösterimler aşağıda Çizelge 4.3’te gösterilmiştir (İnt. Kyn.8).

**Çizelge 4.3** Etial-160 alüminyum külçesinin standart gösterimleri.

ETİNORM	TSE	DIN	USA	FRANCE	ENGLAND	ISO	CSA	A.S.T.M
Etial-160	AISI8Cu3Fe	G-AISI8Cu3	A-380	A-S 9U3A	LM 24	AISI Cu3Fe	L2630	380

Yavuz (2012); doktora çalışmasında Al ve AlSi alaşımlarını kullanarak köpük malzeme üretmiştir ve üretilen bu köpük malzemelerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan Etial 160 alüminyum alaşımı aşınma ve korozyon direncinin yüksek olması sebebiyle otomotiv endüstrisinde otomotiv parçalarının üretiminde kullanılmaktadır (Kasman *et al.* 2009). Metalik köpük malzemelerin hafiflik dayanım titreşim absorbesi gibi özelliklerinden dolayı Etial 160 köpük üretimi için tercih edilmiştir. Bu çalışmada Etial 160 malzeme kullanılan metalik köpüklerin yoğunluk ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

## 4.2 Metalik Köpük Üretiminde Kullanılan Cihazlar

Fırın PC 442/6 PID kontrollü olup maksimum sıcaklığı 1300 °C’ye kadar çıkabilmektedir. Araştırmada kullanılan terazi 200 gram kapasitede ve 0,001 gram hassasiyete sahiptir. Numune üretiminde vakum döküm yöntemi kullanılmıştır. Vakum değeri 0,8 bardır.

Külçe E-160 (alüminyum-silisyum) alaşımlı malzeme, döküm işleminde kullanılacak ağırlık için ve potaya sığacak şekilde uygun boyutlarda kesilmiştir. Bu işlem için DISPA DMSY 280 marka ve model şerit testere kullanılmıştır.

Alüminyum köpük üretiminde kullanılan pota ve kalıp ısıtılmıştır. Kalıp ve silika jellerin oda sıcaklığında bulunması, döküm esnasında indüksiyonda ergitilen sıvı metalin hızlı soğumasına neden olmuş ve sıvı metalin taneler arasında ilerlemesini zorlaştırmıştır. Kalıp ve silika jellerin ısıtılması, sıvı alüminyumun silika jel taneleri arasından kolayca sızmasını kolaylaştırmıştır.

İndüksiyon ocağı belirli bir sıcaklık ölçeri olmasına rağmen K tipi (Ni-NiCr) bir termo kopul ve buna bağlı sıcak ölçer cihazla potanın içinde eritilen metalin sıcaklığı termo kopulun erimiş metale daldırılması ile hassas olarak ölçülmüştür. Ayrıca fırının içerisindeki kalıp ve pota sıcaklığı ile silika jellerin bulunduğu kabın sıcaklığı ise optik pirometre ile hassas olarak ölçülmüştür. Kullanılan bu cihaz, Resim 4.4'de gösterilmiştir.

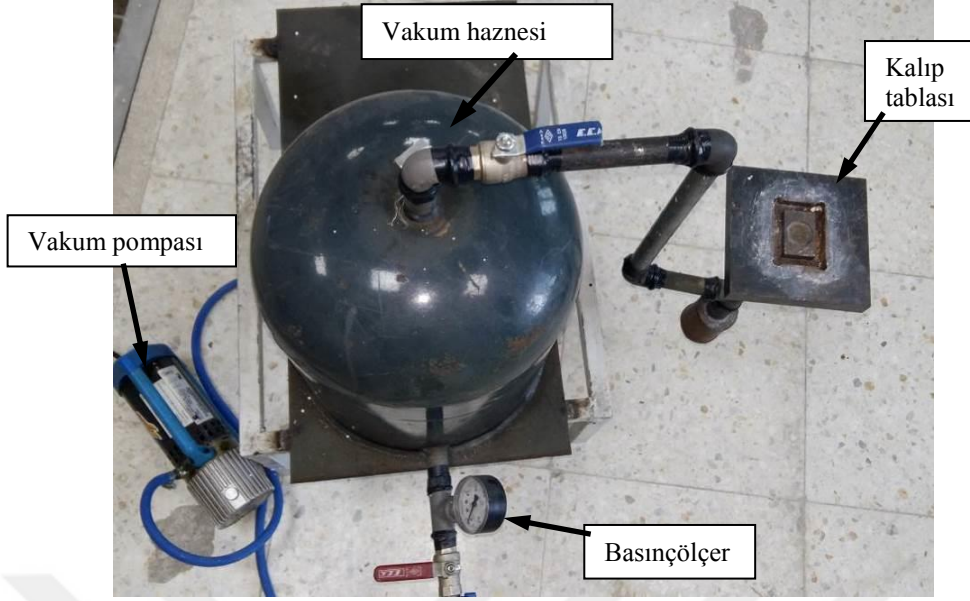


**Resim 4.4** Pota sıcaklığının ölçülmesinde kullanılan cihaz.

Kalıbın içerisine yerleştirilen silika jel taneleri arasına sıvı alüminyum vakum yöntemiyle sızdırılmıştır. Kullanılan vakum döküm sistemi Resim 4.5'te gösterilmiştir.

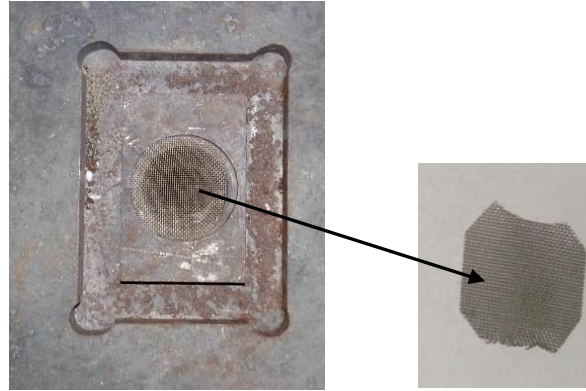
Alüminyum köpük oluşturma tertibatı; bir vakum pompası, metal bir vakum haznesi, bir basınçölçer, kalıbın oturduğu tabla ve kalıp sisteminden oluşmaktadır. Döküm işlemi için öncelikle indüksiyon ocağı çalıştırılarak içerisine, içerisinde alüminyum-silisyum alaşımı olan E-160 bulunan pota yerleştirilmiştir.





**Resim 4.5** Vakum döküm tertibatı.

Kalıp yerine konup 300-400 °C'ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta kalması sağlanmıştır. Silika jellerin bulunduğu metal kap ise fırına konulmuş ve 300 °C'ye kadar ısıtılması sağlanmıştır. Silika jellerin vakum borusuna kaçmaması için kalıbın oturduğu tablaya çelik dar gözenek yapısına sahip filtreler kullanılmıştır (Resim 4.6).



**Resim 4.6** Vakum hattında kullanılan çelik filtre.

Kalıp içerisine ısınmış olan silika jeller dökülmüş ve daha sonra vakum haznesi içerisindeki hava alınarak yaklaşık 0,8 bar basınç değerine ulaşılmış ve vanalar kapatılmıştır. Döküm sıcaklık değerine ulaşan sıvı alüminyum E-160 alaşımı, içerisinde silika jeller bulunan kalıba ilave edilmiş ve daha sonra bekleme yapılmadan vakum haznesinin vanası açılmıştır.



**Resim 4.7** Kalıbın açık görünüşü.

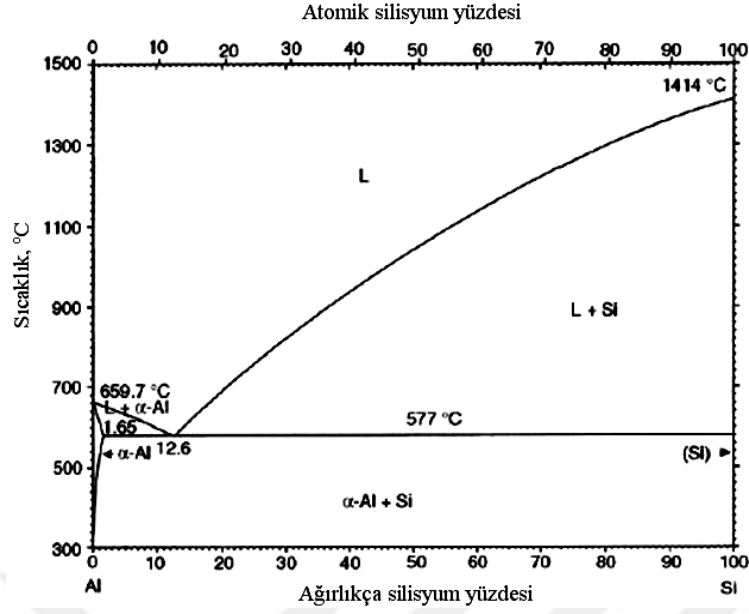
Vakumlu hava, silika jeller üzerindeki sıvı alüminyum silika jeller içerisine sızmasını sağlamıştır. Kullanılan metalik döküm kalıbının boyutları: iç dikdörtgen 30x45 mm, dış dikdörtgen 48x65 mm, boyu ise 500 mm'dir. Döküm kalıbı dört parça halinde tasarlanmış olup cıvatalar ile birleştirilebilmektedir. Dört parça olarak yapılmasının amacı soğumaya bırakılan numunenin soğuduktan sonra döküm kalıbından daha rahat çıkarabilmektedir.

### **4.3 Vakum Döküm Yöntemi ile Köpük Üretimi**

Bu yöntemde boşluk tutucu malzemeler ve ergitme ile metalik köpük üretilmiştir. Boşluk tutucu olarak genişletilmiş silika jeller kullanılmıştır. Farklı sıcaklıklarda genişletilen silika jeller eleklerden geçirilerek tane boyutlarına göre sınıflandırılmışlardır. Sınıflandırılan silika jeller arasına ergitilmiş E-160 alaşımı vakum döküm yöntemi ile sızdırılarak metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir.

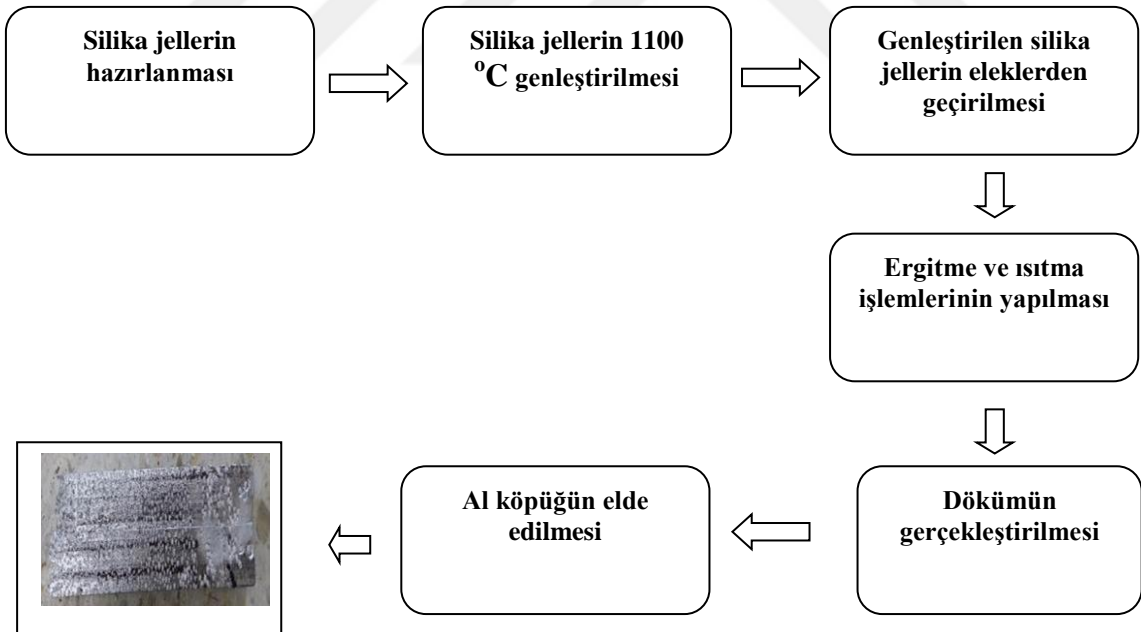
#### **4.3.1 Vakum Döküm Yöntemi İle Numune Üretim Prosesi**

Döküm sıcaklığı olarak yaklaşık 750 °C olarak belirlenmiştir. Sıcaklık değeri arttıkça alüminyum akıcılığı artmakta, tersine değer düştükçe de akıcılık azalmaktadır. Alüminyum akıcılığı içeriğindeki Si le doğrudan ilgili olup Şekil 4.2' de Al-Si denge diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Al-Si denge diyagramı (Yavuz 2012).

Vakum döküm yöntemiyle üretilen alüminyum köpüğün üretim akım şeması şematik olarak Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Döküm yöntemiyle elde edilecek alüminyum köpüğün akım şeması.

Vakum döküm yöntemi ile elde edilen alüminyum köpük numuneler ve kodları Çizelge 4.4'de görülmektedir. Üretimlerde aynı geometride farklı yoğunlukta olmak üzere üretimler yapılmıştır.

**Çizelge 4.4** Döküm yöntemi ile elde edilen alüminyum köpük serileri.

Seri Adı	Silika jel Çapı (mm)	Genleşme Sıcaklığı
N1	2,00-4,75	1100°C'de genişmiş silika jel
N2	4,75-6,30	1100°C'de genişmiş silika jel

#### 4.4 Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Yapılan Deneyler

##### 4.4

Vakum döküm yöntemi ile üretilen numuneler DİSPA marka şerit testere aracılığı ile başlama testi için 20x20x45 mm boyutlarında kesilmiştir. Kesme işleminden sonra hem çapakların giderilmesi hem de kesme işleminden oluşan hatalar eğe yardımıyla giderilerek tüm numuneler eşit hale getirilmiştir. Hazırlanan deney numunelerine ait görüntüler aşağıda Resim 4.8' de verilmiştir.

##### 4.4

##### 4.4

##### 4.4

##### 4.4

##### 4.4

##### 4.4

##### 4.4

##### 4.4

##### 4.4



**Resim 4.8** Hazırlanan deney numunelerine ait görüntüler.

#### 4.4.1 Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi

Deneylerde daha çok hücre yapısı hakkında araştırma yapılmıştır. SEM analizleri için Afyon Kocatepe Üniversitesi Uygulama ve Araştırma Merkezindeki cihaz kullanılmıştır. Cihaz LEO 1430 VP model olup W (Tungsten) filament ile çalışmaktadır. Cihaz üzerinde ikincil elektron (secondary electron), geri yansıyan elektron ve X ışınları (EDX, X-ray Spectroscopy) detektörü bulunmaktadır.

Vakumlu döküm yöntemi ile elde edilen sentaktik alüminyum köpüklerin SEM numuneleri 2-4,75 mm çapındaki sentaktik alüminyum köpük için N1 ve 4,75-6,3 mm

apındaki sentaktik alüminyum köpükler için ise N<sub>2</sub> den alınarak SEM analizleri yapılmıştır.

#### **4.4.2 Yoğunluk Ölçümü**

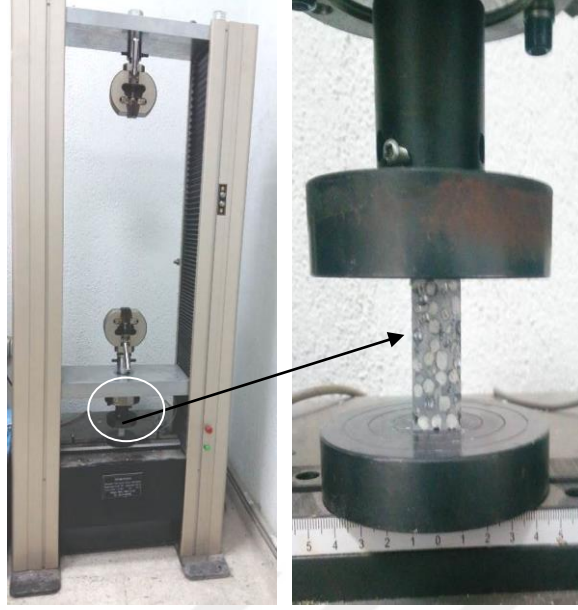
Silikajellerin su tutma özelliği olmasından ve yoğunluklarının birin altında olması sebebi ile arşimet prensibi ile yoğunluk ölçülememiştir.

Numunelerin yoğunlukları kütle/hacim formülü ile hesaplanmıştır. Silika jel çapı arttıkça yoğunluk azalmıştır.

#### **4.4.3 Basma Deneyleri**

Basma dayanımı köpüklerin mekanik özelliklerini belirlemede önemli yöntemlerden biridir. Tez kapsamında üretilen numuneler 20x20x45 mm boyutlarına getirildikten sonra MITECH marka çekme basma cihazı kullanılarak testler yapılmıştır. Cihaz 2 kN kapasitededir.

Basma deney numunelerinin boyutları 20x20x45 mm'dir. Farklı silika jel çapına sahip her köpük malzeme için üçer adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler MITECH marka çekme-basma cihazında sabitlenmiş ve üzerine kuvvet verilerek şekil değişimi incelenmiştir. Basma cihazı Resim 4.9' da görülmektedir.



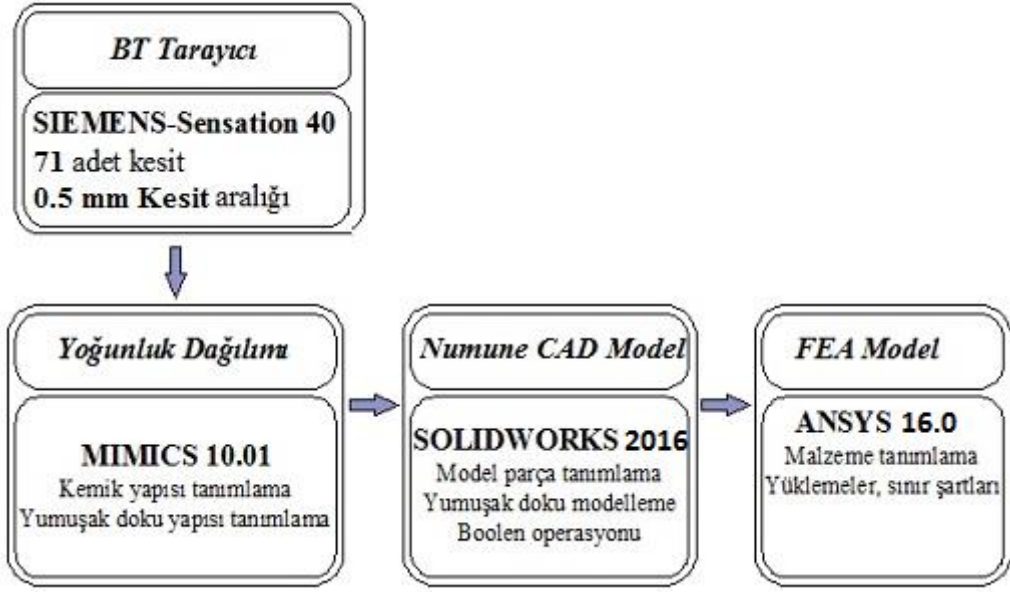
**Resim 4.9** Basma cihazı ve cihaza numunenin bağlanması.

#### **4.4.4 Hücre Duvarı Analizleri**

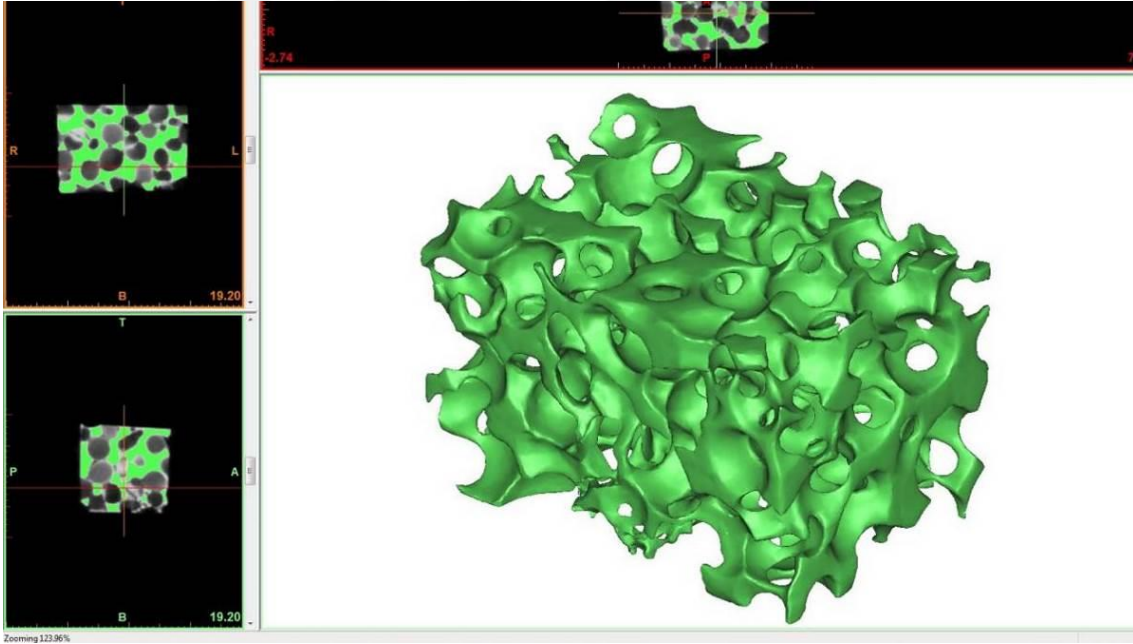
Hücre duvar analizlerinde USB mikroskop kullanılarak hücre duvarları analiz edilmeye çalışılmıştır. Alüminyum köpüklerin mikroskopik incelemeleri ENS marka USB mikroskop yardımıyla yapılmıştır. Mikroskop 640x480 pixels kamera çözünürlüğü, 50x-500x büyütme özelliklerine sahiptir.

#### **4.5 Metalik Köpüklerin Tasarımı ve Analizi**

Sonuç olarak alüminyum köpüğün geometrik modelinin oluşturulmasında göz önünde bulundurulmuş başlıca parametreler köpüğün boşluk oranı, hücre büyüklüğü, hücre koordinatlarıdır. Bu amaçla ilk olarak köpük çapları ve koordinatlarını belirlemek için alüminyum köpük malzemesinin Bilgisayarlı tomografi cihazında analizleri yapılmıştır. BT planlanan iş akış şeması Şekil 4.4' te verilmiştir. BT tarayıcısında MIMICS 10.01 programı kullanılarak analizler yapılmıştır. Üretilen numuneden 1 adet çekim yapılmış olup Resim 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.4 Modelleme ve analiz protokolü.



Resim 4.10 BT cihazından analiz sonucu.

Alüminyum köpük tasarımı için; SIEMENS – Sensation 40 model bilgisayarlı tomografi tarayıcı MIMICS 10.01 programı kullanılarak koordinat ve çap analizi yapılmıştır.

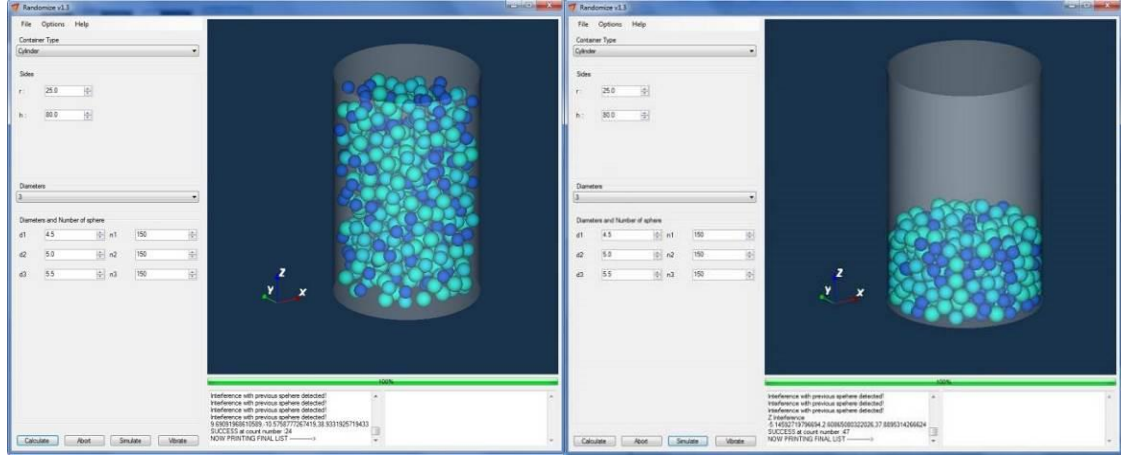
Geometrik modellemede amaç köpük yapısında bulunan rasgele koordinatlardaki rasgele büyüklüğe sahip hücreleri oluşturabilmektir. Köpüğün mikro yapısındaki

özellikleri mümkün olduğunca gerçeğe en yakın olarak modellemek için rasgele düzensizliklerin modelleme içinde yer alması önemlidir. Komşu hücre sayısı ve delik büyüklüğü de önemli mikro yapısal özellikler arasındadır. Köpük içerisindeki boşluk oranı silika jel sayısı ve çapı ile doğrudan ilgilidir. Bu yüzden belirli bir boşluk oranına sahip alüminyum köpük yapısı elde edebilmek için sentaktik jel çapı ve sayısı kontrol altında tutulmalıdır. Kürelerin kesişme özellikleri kontrol edilerek bu parametreler istenilen tarzda değiştirilebilir. Kürelerin kesişme miktarı delik büyüklüğünü doğrudan etkiler, bu nedenle kesişme miktarının belirli bir aralık içinde tutulması suretiyle hücre duvarındaki delik büyüklüğü de kontrol altına alınmış olur. Benzer şekilde köpük yapının boşluk oranı hücre büyüklüğü ve kesişim miktarıyla yakından ilgilidir. Hücre büyüklüğü belirli bir aralıkta istatistiksel dağılıma göre belirlenirken hücrelerin kesişim miktarı da aynı şekilde belirli bir aralıkta tutularak köpük yapısının boşluk oranı kontrol altına alınabilir.

BT Analizden elde edilen veriler üretilen numune ile tamamen örtüşmediği sonucuna varılmış olup tasarım için farklı yöntemler araştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda tasarımda, gerçeğe çok yakın simüle edebilecek Randomize programı aracılığıyla istenilen sınır şartları belirlenerek program hazırlanmış olup Resim 4.11' de görülmektedir.

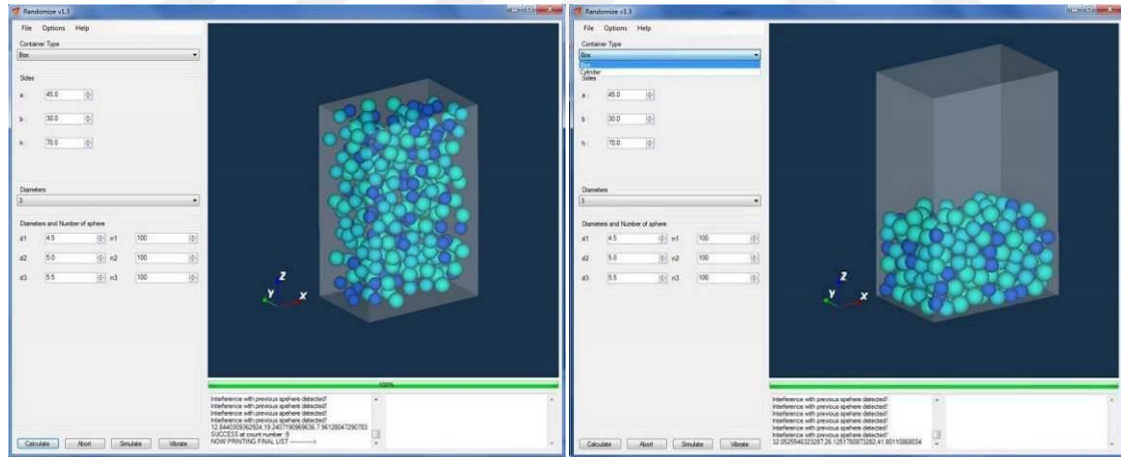
Gerçekliğe yakın olması için köpük sayısı belirlendikten sonra köpüklerin koordinatlarının belirlenmesinde rasgeleliğin yapıldığı Randomize isimli bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. Randomize verilerini alabilmek için Macro ve Microsoft Excel programları kullanılmıştır





**Resim 4.11** Hazırlanan program silindirik kalıp.

Program istenilen ölçülerde silindirik, dikdörtgen, kare kalıplar içerisinde istenilen sayıda boşluk tutucu numuneleri rastgele dağıtacak şekilde tasarlanmıştır. Sonraki aşamada ise dağıtılan numuneler yerçekimi etkisi ile kalıbın tabanına düşmektedir. Resim 4.11’de silindirik kalıp, Resim 4.12’ de ise dikdörtgen kalıp üzerinde yapılan tasarımlar görülmektedir.



**Resim 4.12** Hazırlanan program dikdörtgen kalıp.

Programda yer çekimi uygulamasından sonra her bir boşluk tutucunun koordinatları alınabilmektedir. Elde edilen veriler SolidWorks programı kullanılarak çizim gerçekleştirilecektir. Resim 4.13’ te yapılan bir çalışmadan elde edilen örnek koordinatların ekran görüntüsü görülmektedir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Diameter X	Y	Z										
2	5	42.34159	2.4943	11.98805									
3	5.5	2.785633	6.919704	24.06771									
4	4.5	27.54142	11.39903	9.870577									
5	4.5	37.98545	13.68211	25.05553									
6	5	31.1174	7.206575	2.651972									
7	4.5	10.00339	27.75009	2.25003									
8	5	2.500037	27.49809	19.66491									
9	5.5	26.27834	17.73889	19.50681									
10	4.5	38.71265	13.82558	16.60142									
11	5.5	7.321502	16.13653	15.70895									
12	4.5	22.35007	2.249111	12.59473									
13	5.5	30.17293	14.02148	19.1									
14	5	2.499995	11.25291	5.013984									
15	4.5	14.68911	22.99785	22.4865									
16	5.5	23.70504	14.33506	27.12043									
17	4.5	2.849998	15.80221	18.66436									
18	5.5	6.521484	18.0278	6.81892									
19	5	19.79418	13.02107	13.05005									
20	5.5	33.11906	8.344221	19.24605									
21	5.5	14.92222	10.19926	19.18624									
22	5	23.75346	9.395807	11.55607									
23	5.5	21.67689	27.1121	19.45028									
24	5.5	34.25184	21.07522	7.324112									
25	5.5	38.49129	2.750078	2.749373									
26	4.5	32.45972	24.85199	20.67213									

**Resim 4.13** Elde edilen koordinatların ekran görüntüsü.

Bilgisayarda tasarım yapabilmek için çok tercih edilen SolidWorks 2016 tasarım programı kullanılmıştır.

Yapılan üç boyutlu tasarımın analizlerinin yapılabilmesi için Ansys paket programının 16.0 versiyonu kullanılmıştır.

#### 4.5.1 Alüminyum Köpük Malzemelerin Modellenmesi

Tasarım (dizayn, design) bir planın, bir nesnenin ya da bir inşaa süreci içinde (mimari çizimler, mühendislik çizimleri, iş süreci vb.) meydana getirilmesine denir. Hem bir isim, hem de bir fiil (tasarlamak) olarak kullanılır (Becer 2008, Yıldırım 2016).

Tasarım bir başka tanıma göre de ürünün tamamının veya bir parçasının çizgi, şekil, renk, biçim, doku, malzemenin esnekliği veya süslemesi gibi insan duyuları ile algılanabilen çeşitli unsur ve özelliklerin oluşturduğu görünümdür. Fakat günümüzde tasarımın birçok alanı vardır. Mühendislik tasarımları ve endüstriyel tasarım en bilinenleri olmakla birlikte grafik tasarım, mimarlık, iç mimarlık, peyzaj tasarımı, moda tasarımı bu alanların diğerleri olarak sıralanabilir (Çaydere 2016).

Modelleme, gerçeğe benzer görüntüler yapmaktır. Buna dayanarak kullanılan farklı modelleme yöntemleri ve programları vardır. Modeller bizim mekanizmasını

bilmediğimiz olayları anlamamıza, kurguladığımız hipotezleri test etmemize yardımcı olurlar. Bu nedenle bilim alanında model kullanımı kaçınılmazdır. Ancak, bu çalışmalardan elde edilen verilerin çok büyük bir titizlikle değerlendirilmesi gerekir. Model seçiminde, bulguların genelleştirilebilme ve gerçeğe yaklaşabilme özelliği de mutlaka göz önüne alınmalıdır (Kanat 2015).

CAD (Computer Aided Design) bilgisayar destekli tasarım anlamına gelir. Modern CAD sistemleri, etkileşimli bilgisayar grafik sistemlerine (IGC-Interactive Computer Graphics) dayalıdır. Mühendislik tasarımları için kullanılan CAD yazılımları bulunmaktadır. En bilinenleri SolidWorks, CATIA, AutoCAD, Inventor, Unigraphics, NetCAD, ArchiCAD gibi yazılımlardır. Bu yazılımların temel amacı kağıt üzerinde ya da hayalen kurgulanmış olan tasarımı somut bir şekilde iki veya üç boyutlu uzayda görmek, gerekli geliştirmeleri düşük maliyetle gerçekleştirmektir. Aynı zamanda gerilme analizi gibi bir takım eklentilerle kurgulanan tasarımın uygulanabilirliğini test etmek için de kullanılmaktadırlar (İnt. Kyn. 5).

Bu programların içinden; SolidWorks mühendisler, tasarımcılar ve yaratıcı işlerle uğraşan diğer çalışanlara harika ürünleri tasarlamalarında gereksinim duyacakları tüm araçları sağlayan bir bilgisayar destekli çizim paket programıdır. SolidWorks ayrıca ek olarak Mechanical CAD ile geniş bir simülasyon aralığı sunarak yapılan dizaynların üretime gönderilmeden önce test edilebilmesini sağlar. Üç Boyutlu seçeneği gayet kullanışlı ve tercih edilir bir modelleme paket programıdır. Birçok mühendislik şirketinin SolidWorks' ü tercih etmelerinin nedenleri aşağıda verilmiştir;

- Düşük maliyet ve hızlı tasarım, yüksek verimlilik verir, öğrenimi çok kolaydır,
- SolidWorks iş akışı raporlama araçları, dosya yönetimi ve diğer teknolojiler ile kolay uyum sağlar,
- SolidWorks sayesinde tasarımların başkalarıyla ve dış ortaklarla paylaşımı ve birlikte çalışılması mümkündür,
- SolidWorks 'ün kütüphane seçeneğinin çok çeşitli ürünleri hazır alarak kullanıma sunması zamandan kazancı ve iş yükünün azaltılmasını sağlar,

- Diğer bilgisayar destekli çizim ve analiz paket programlarına sorunsuzca aktarım yapılmasını sağlar (Ames 2006).

Tez kapsamında da bu özelliklerinden dolayı SolidWorks programı kullanılmıştır.

#### **4.5.2 Metal Köpüklerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi**

Çözülmesi uzun zaman alan karmaşık problemlerin, daha basit ve kısa zamanda çözmek için bu problemlere eşdeğer ancak daha basit hale getirilmiş problemlerin çözüme gidilmesi sonlu elemanlar metodunun temelindeki fikirdir. Genellikle, basitleştirmeye gidilmesi sonucunda doğru sonuç yerine, yaklaşık bir sonuç bulunmaktadır. Günümüzde, sonlu elemanlar metodlarının bilgisayarlarda uygulanması sonucunda hemen her problem çözümünde istenilen ölçüler arasında yaklaşık sonuçlar elde edilmektedir.

Sonlu elemanlar metodunda, çözüm bölgesinin çok sayıda sonlu ve birbirine bağlı elemanlardan oluşmaktadır. Çözüme gidilirken, sonlu elemanların hepsi çeşitli teoriler kullanılarak, sınır koşul ve denge denklemlerin tanımlanmasıyla yaklaşık sonuçlar bulunmaktadır (Demirsöz 2005, Bedir 2007 ).

##### **4.5.2.1 ANSYS Yazılımı**

Yazılımların ilk geliştirildiği aşamalarda problem geometrisini belirleyen tüm düğüm noktaları tek tek belirlenir ve daha sonra elemanlar oluşturuldu. Bu son derece zahmetli ve hata oluşması ihtimali büyük bir işlemdir. Sonlu elemanlar analiz paket programlarında CAD modellerinin geliştirilmesi ile ön-işlemci safhasında büyük kolaylıklar elde edilmiştir.

ANSYS yazılımı çalışmaları 1971 yılından günümüze kadar gelmektedir. ANSYS, SAS (Swanson Analysis Systems) yazılım şirketinin tescilli ticari markasıdır. Bugüne kadar yaptığı yazılım yenilikleriyle sürekli kullanıcıya hizmet eden SAS yazılım şirketi 1994 yılında ISO 9001 belgesini almış, bu tarihten sonra ANSYS 5.2 ve ANSYS 5.3 1996, ANSYS 5.4 1997, ANSYS 5.5 1998 yıllarında piyasaya sürülmüş ve yıllarca kendini yenileyerek en son ANSYS 16.0 2016 olarak piyasada kullanılmaktadır. Bugün

ANSYS yazılımı eleman, düğüm ve hacim sayısı kullanımı yönünden hemen hemen sınırsız bir kullanıma sahiptir. ANSYS sonlu eleman analizi yazılımı mühendislere şu avantajları sağlar:

- Bilgisayar modeli kurar veya yapıların, ürünlerin, parçaların veya sistemlerin CAD modellerini transfer eder.
- İşletim yüklerini veya diğer tasarım yürütme durumlarını uygular.
- Gerilme seviyeleri, sıcaklık dağılımları veya elektromanyetik alan etkileri gibi fiziksel tepkileri çalıştırır.
- Üretim maliyetini azaltmak için geliştirme öncesi tasarımı optimize eder.

Ele alınan problemin ANSYS yazılımında sonlu elemanlar modelini oluşturma şu şekilde özetlenebilir.

SolidWorks ortamında problemin katı modeli oluşturulduktan sonra ANSYS yazılımına transfer edilir. Problem için eleman tipi, elastisite modülü, poisson oranı analize göre belirlenir. Eleman tipi eleman kütüphanesinden seçilir. Bu model üzerinde elde edilecek elemanların sayı ve yoğunluğu tayin edilir. İstenilen bölgelerde eleman yoğunluğunun artırılmasına imkân sağlanır. Daha sonra ANSYS yazılımı bu verilere göre sonlu elemanlar ağını oluşturur. Ayrıca sonlu elemanlar ağı CAD modülündeki hazır geometrik şekillerden faydalanılarak da elde edilebilir.

Sonlu elemanlar metodu; eleman ağı oluşturma, sınır şartlarının tatbiki, sistem denklemlerinin çözümü ve sonuçlarının değerlendirilmesi adımlarından oluşmaktadır. Bu adımlar ticari yazılımlarda; ön işlemci modül, çözümleyici modül, son işlemci modül olmak üzere üç ayrı modülde gerçekleşmektedir.

Ön –işlemci modülünde eleman tipi, malzeme özellikleri, katı modelleme, doğrudan modelleme, ağ yapısı ve ağ oluşturma modülleri bulunmaktadır. Eleman kütüphanesinde hemen her problem tipi için geliştirilmiş çok sayıda eleman vardır (Bedir 2007).

## 5. BULGULAR

### 5.1 Sentaktik Köpük Malzemelerin Üretilmesi

Vakum döküm yöntemi ile elde edilecek olan alüminyum esaslı köpük numunelerin üretimi için; 1100°C’de genleştirilen silika jel taneleri ve alüminyum-silisyum alaşımı (E-160) kullanılmıştır. Köpük üretimi için aşağıda Çizelge 5.1’ de üretilmeye üretilen numune kodları; kullanılan basınç ve sıcaklık değerleri ile çaplar verilmiştir.

**Çizelge 5.1** Malzeme üretiminde kullanılan basınç ve sıcaklık değerleri

Numune	Döküm Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Silika Jel Çapı (mm)	Silika Jel Sıcaklığı (°C)	Kullanılan E-160 Miktarı (gr)	Kullanılan Silika Jel Miktarı (gr)	Vakum Değeri (bar)
N1	750	350	2-4,75	300	390	140	0,8
N2	780	220	4,75-6,3	220	440	90	0,8

Döküm işleminin ilk denemesinde; N1 kodlu deney numunesi üretiminde silika jeller ısıtılmamıştır, kalıp 100°C’de ısıtılmış, alüminyum alaşımı da 700°C ısıtılmış ve vakum değeri olarak 0,7 bar kullanılmıştır. N1 kodlu köpük üretimi denemesinde Resim 5.1’de de görüleceği gibi vakum değerinin düşük olması, kalıbın yeterince ısınmamış olması ve silika jellerinde soğuk olması sebebiyle sıvı metal kürecikler arasında yeterli şekilde ilerleyememiş ve üniform dağılıma sahip olmayan başarısız bir köpük üretimi olmuştur. Bu nedenle daha sonraki üretim için vakum değerleri, silika jel sıcaklığı ve sıvı metalin sıcaklığında değişiklikler yapılmıştır.



**Resim 5.1** Üniform dağılıma sahip olmayan N1 kodlu köpük malzeme.

Kullanılan vakumlu döküm sisteminde, sıvı alüminyumun kalıp içerisindeki silika jel tanelerinin arasına homojen olarak sızmasını sağlamak için kalıp ısıtma, silika jel tanelerinin ısıtılması, vakum basıncının ayarlanması ve döküm sıcaklığının ayarlanması gibi ön çalışmalar gerçekleştirilerek homojen alüminyum köpükler elde edilmeye çalışılmıştır. Parametreler değiştirilerek N1 kodlu numune üretiminde vakum değerini 0,8 barda sabit tutup, silika jeller 300°C, kalıp ise 350°C ye kadar ısıtılmıştır. İkinci kez sıvı alüminyumun kalıp içerisindeki silika jel tanelerinin arasına homojen olarak sızması sağlanarak başarılı bir üretim gerçekleştirilmiştir. N1 kodlu numunenin görüntüsü Resim 5.2' de verilmiştir.



**Resim 5.2** N1 kodlu ikinci numune görüntüsü.

Silika jellerin ve kalıp sıcaklıklarının, aynı veya yakın sıcaklıklarda olması istenilmektedir. Eğer silika jeller ile kalıp sıcaklığı arasında çok fazla sıcaklık farkı olursa (daha düşük sıcaklıklarda) kalıp çok hızlı soğumakta ve bunun sonucu olarak da alüminyum hızlı bir şekilde soğuyarak silika jeller arasına giremeden katılaşmaktadır.

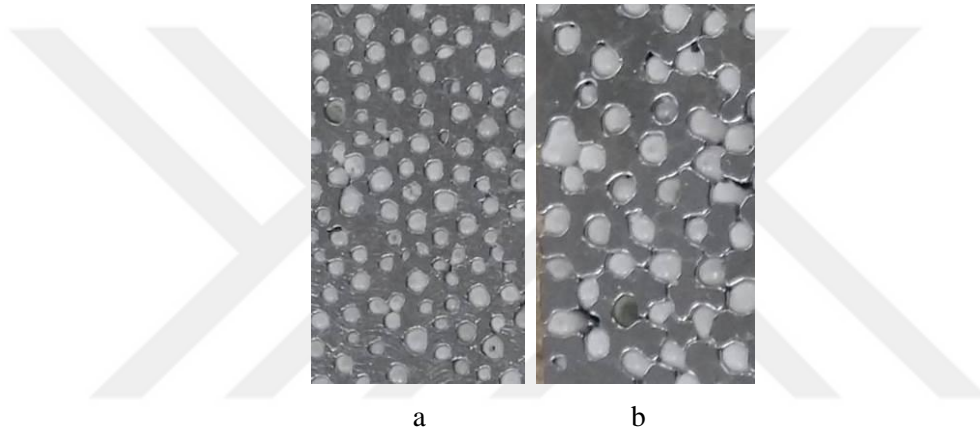
Kalıp sıcaklığı normalden fazla olduğu durumlarda sıvı metal vakum etkisi ile sistem içerisine kaçarak silika jeller arasında daha az kalmaktadır. Alüminyum silika jeller arasında homojen bir dağılım sağlanamamakta ve istenilen numune üretilmemektedir.

Üretilen numunelerdeki silika jel çapları arttıkça, kalıp sıcaklıkları ve silika jel sıcaklıkları düşmektedir. Çaplar arttıkça küreler arasındaki boşluklar arttığı için vakum daha etkili olmakta ve sıvı metal bu kısımlardan daha rahat akmaktadır. Bu nedenden

dolayı vakum değerlerinin veya döküm sistemindeki sıcaklıkları çok olan birinin veya birkaçının düşürülmesi gerekmektedir.

## 5.2 Numunelerin Kesitleri ve Yoğunluk Ölçümü

Deney için elde edilen numuneler boyuna kesilerek, iç kısımdaki alüminyum ve silika jel granüllerinin dağılımı incelenmiştir. Buna göre numunelerin hemen hemen her tarafında homojen bir dağılım gözlemlenmiştir. Resim 5.3' te numunelerin boyuna kesiti görülmektedir.



**Resim 5.3** Boyuna kesilen alüminyum köpük numunelerin yüzeyi; (a) 2-4,75 mm çapında silika jel ile üretilen numune kesit yüzeyi, (b) 4,75-6,30 mm çapında silika jel ile üretilen numune kesit yüzeyi.

Vakum döküm yöntemiyle üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluk ölçümleri, kütle/hacim olarak verilmiştir. Tespit edilen yoğunluklar, Çizelge 5.2' de görülmektedir. Literatürde klasik yöntemlerle üretilen metalik köpüklere kıyasla yoğunlukları oldukça fazladır. Ancak Sentaktik köpüklerle karşılaştırıldıklarında ise benzer sonuçlar alınmıştır. Yoğunlukların yüksek olmasının temel sebebi silika jel kürelerinin etrafında kalan boşlukların tamamen alüminyum ile doldurulmasından kaynaklanmaktadır.

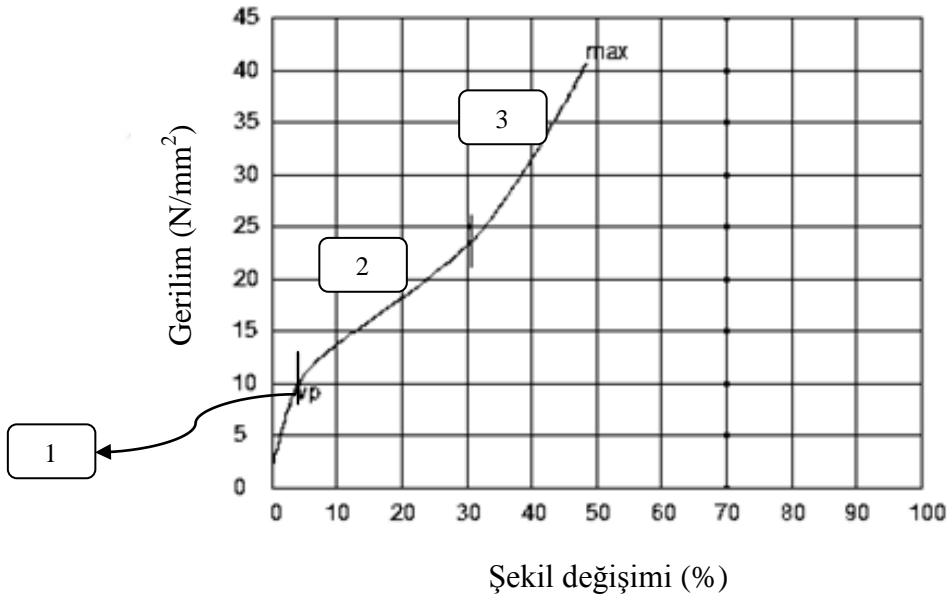


**Çizelge 5.2** Vakum döküm yöntemi ile üretilen numunelerin yoğunlukları.

Numune Adı	Silika jel Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	Silika jel Çap (mm)	Numune Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )
N1	0,59	2,00–4,75	1,19
N2	0,34	4,75–6,30	1,17

### 5.3 Sentaktik Köpük Malzemelerin Basma Deney Sonuçları

Vakum döküm yöntemi ile üretilen alüminyum köpük numunelerin basma deneyleri, her seriden 3'er numune alınarak gerçekleştirilmiş ve ortalama grafikleri çizilmiştir. Bu deneye göre her numune, 2 mm/dk hız ile yaklaşık olarak 13 dakika boyunca deformasyona maruz bırakılmış ve yaklaşık %50 deformasyona uğratılmıştır. Alüminyum esaslı köpük olan N1 ve N2 serisi numunelerin basma deney sonucu örnek grafiği Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

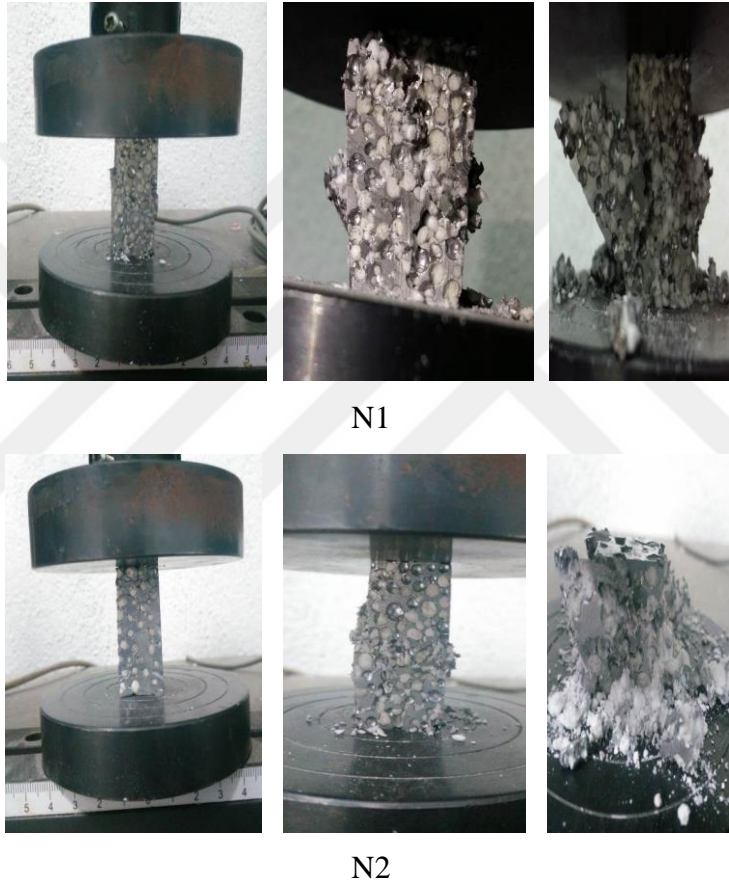


**Şekil 5.1** Basma deneyi örnek grafiği.

Şekil 5.1' de temsili olarak gösterilmiş olan grafik incelendiğinde 3 ana bölgeden oluşmaktadır. Grafiğin 1. bölgesinde numune, elastik bölgededir ve silika jeller kırılmaya başlamamıştır. 2. bölgede numune, plastik hasara maruz kalmış, hücrelerdeki silika jeller hasara uğramış ve gözenekler kapanmaya başlamıştır. 3. bölgede ise,

hücreler tamamen kapanmış ve gözenekli yapı tamamen kapanmıştır. Metalik köpüklerde 2. bölgede malzeme içerisindeki gözenekler deforme olduğunda hücre duvarları plastik deformasyona uğramaya başlar. Gerilimin azaldığı bu bölgenin eğiminin azalması ile eğri altında kalan alan artmıştır. Bu özellik malzemenin daha büyük bir enerji absorbe yeteneği olduğu anlamına gelir.

Deney sırasında başlangıç ve son hal görüntüleri Resim 5.4' te verilmiştir.

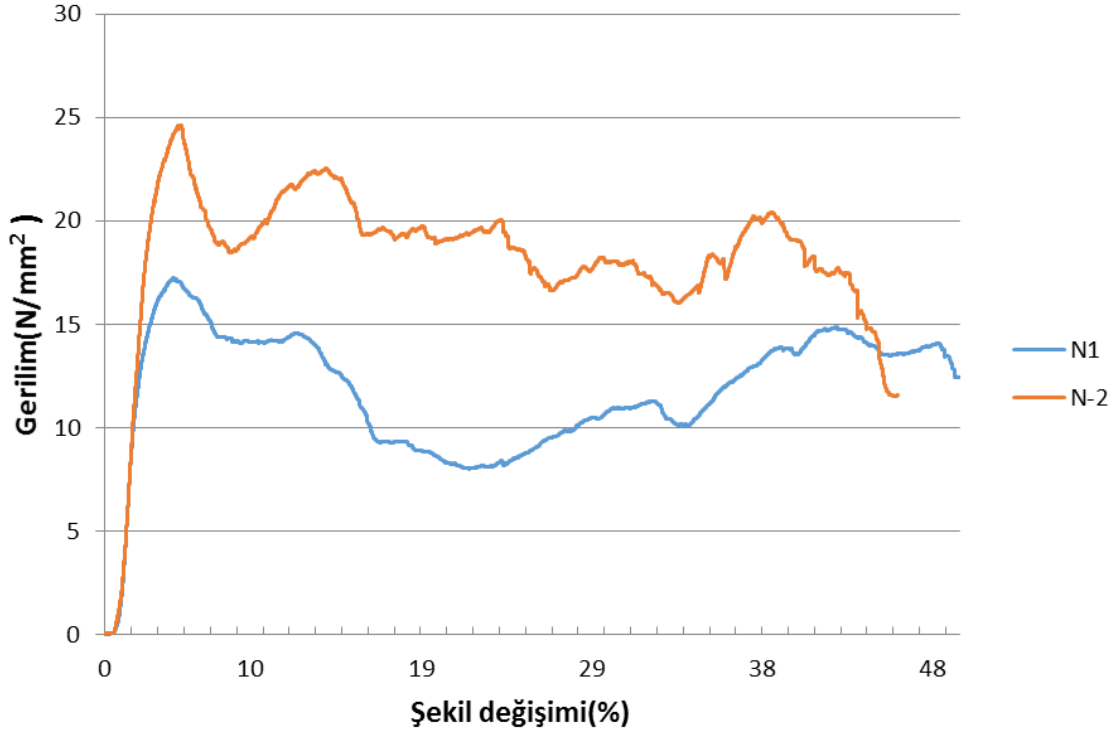


**Resim 5.4** Basma testi görüntüleri.

### 5.3.1 Silika Jel Çaplarının Basma Dayanımına Etkisi

Etial-160 esaslı 1100°C de genişletilmiş silika jeller kullanılarak üretilen numunelere uygulanan basma deneyi sonucu alınan verilerle Şekil 5.2' de görülen eğriler elde edilmiştir. Şekil 5.2 incelendiğinde küre çapları küçüldükçe malzemenin plastik yıkım geriliminde artış olduğu görülmüştür. Bunun sonucu olarak ta grafikten de görüleceği

gibi malzeme dayanımı artmaktadır. Küre çaplarına paralel olarak üretilen numunelerin yoğunlukları da değişmektedir. Ayrıca silika jel çapı küçüldükçe daha fazla gözenek oluşmasına rağmen küçük silika jellerin yoğunluklarının yüksek olmasının nedeniyle hücre duvarlarını oluşturan alüminyum miktarı azalacağından plastik yıkım gerilimi düşmektedir.



Şekil 5.2 Gerilme şekil değişimi grafiği.

Küre çapına bağlı olarak hücreler daha çok açık gözenekli yapıya dönmekte fakat hücre duvarları daha da kalınlaşmaktadır. Bunun sonucunda da dayanım artmaktadır. Deneyle sonuçunda gözlenen önemli nokta, Etial-160 esaslı numunelerin grafiklerinde 3 nolu bölge olarak belirtilen kısım elde edilememiştir. Bunun sebebi Resim 5.4 incelendiğinde çok net olarak görülebilmektedir. Etial-160 alaşımının sünekliği düşük olması nedeniyle hücre duvarlarında gevrek kırılmalar gözlemlenmiştir. Bu nedenle 3. bölgede gözlemlenmesi gereken mukavemet artışı görülemeden deney sonuçlanmıştır. Çizelge 5.3' te numunelerinin rölatif yoğunluk ile basma testinden elde edilen plastik yıkım gerilmeleri görülmektedir.

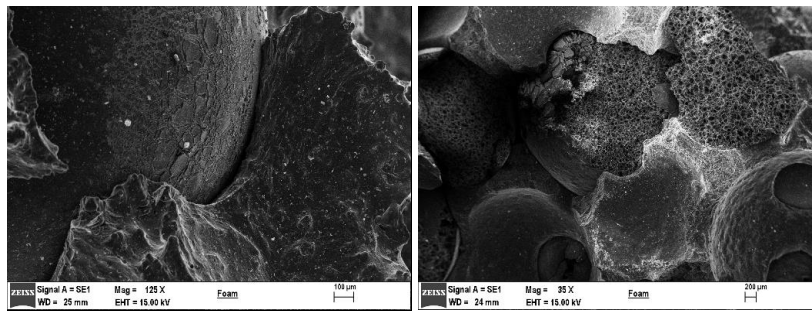
**Çizelge 5.3** Numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen plastik yıkım gerilimleri.

Seri Adı	Kullanılan Tane Boyutu (mm)	Plastik Yık.	Rölatif Yoğ.	Küre
		Ger. $\sigma_y$ (MPa)	$\rho^*/\rho_s$	Yoğunlukları (g/cm <sup>3</sup> )
N1	2,00–4,75	17,0	0,44	0,59
N2	4,75–6,30	25,0	0,43	0,34

Çizelge 5.3 incelendiğinde küre yoğunlukları arasında bariz bir fark vardır. Ancak üretilen numune rölatif yoğunlukları birbirine çok yakın çıkmıştır. Bu sonuç küre çapları büyüdüğü için küreler arasında kalan hacim artmakta ve buralara yerleşen alüminyum miktarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### 5.4 Sentaktik Köpüklerin SEM Analizi İçin Numune Hazırlığı ve Sonuçları

Numunelerden elde edilen SEM görüntüleri, vakum döküm yöntemiyle elde edilen alüminyum köpük numunenin düzenli bir hücre yapısı olduğunu göstermiştir. Genleşmiş silika jel taneleri etrafında düzenli oluşmuş, homojen hücre duvarları görülmektedir. Hücre duvar kalınlıkları değişkenlik göstermiştir. Kalıbın üst kısmına denk gelen numunenin iç yüzeyinde daha ince hücre duvarları bulunurken, alt kısmına denk gelen numunenin iç yüzeyinde daha kalın hücre duvarları gözlemlenmiştir (Resim 5.5).



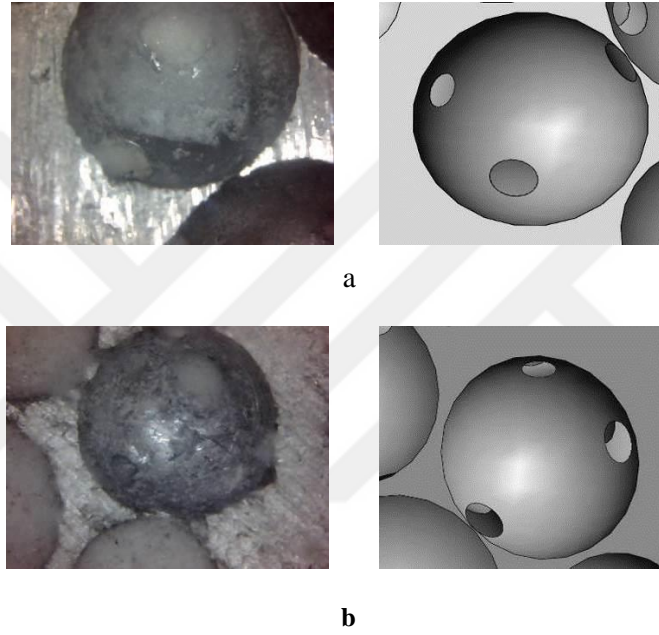
**Resim 5.5** Alüminyum köpük numunenin farklı büyütme ölçeklerine sahip SEM görüntüleri.

Resim 5.5 incelendiğinde, döküm yöntemi ile üretilmiş alüminyum köpükler, açık ve kapalı olmak üzere her iki gözenek tipini de içerisinde barındırmaktadır. Ancak ağısı yapının fazla olması silika jellerin büyük oranda birbirine temas etmesi sebebiyle alüminyum silika jelleri tamamen çevreleyememiş olması sebebiyle yapı ağırlıklı olarak

açık gözenekli olduğu gözlemlenmiştir.

### 5.5 Hücre Duvarı Analizleri

Hücre duvarlarının analizi için Bölüm 4’de bahsedilen USB mikroskop kullanılmıştır. Aynı zamanda SolidWorks programında modellenmiş olan numune kesitin de hücre duvarı analizi görülmektedir (Resim 5.6).



**Resim 5.6** Hücre duvar fotoğrafları verilen köpük numunelerin görüntüleri; (a) 2-4,75 mm çapında silika jel ile üretilen numuneler, (b) 4,75-6,30 mm çapında silika jel ile üretilen numuneler.

Resim 5.6 incelendiğinde silika jel kullanılarak üretilen numunelerin silika jel yoğunluklarının düşük olmasından dolayı yüzey düzeltme işlemi sırasında yerlerinden ayrılarak çıkmışlar ve sonrasında hücre duvarlarının beraberinde kırıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çaplar büyüdükçe hücreler arasında bir bağlantı gözlemlenmiş bunun sonucunda da açık gözenekli yapıya daha yatkın bir köpük yapısı görülmüştür. Gözenek tipi olarak küçük silika jel çapı kullanılarak üretilen numunelerde daha çok kapalı hücre tipi yapıya sahiptirler. Silika jel çapı büyüdükçe numunelerde yapı giderek açık gözenekli şekline dönüşmektedir.

Fotoğraflar incelendiğinde hücrelerin birbiri arasında temas halinde olduğu net bir şekilde görülmekte olup yapılan tasarımda da benzer sonuçlara rastlanmıştır.

## 5.6 Sentaktik Köpüklerin SolidWorks' te Modellenmesi

Sentaktik köpüklerin modellenmesi için silika jel kürelerinin ağırlık ve kalıbın hacmi kullanılarak bir numunede bulunabilecek yaklaşık küre sayısı belirlenmiştir. Küre miktarının belirlenebilmesi için kalıp içerisine belirli seviyeye kadar silika jel doldurulmuştur. Sonra silika jel ağırlığı alınmıştır. Belirli miktar silika jel ağırlığı alınıp kalıp içerisindeki silika jel ağırlığına bölünerek yaklaşık sayı tespit edilmeye çalışılmıştır. Kürelerin rastgele dağılımını oluşturabilmek için ise Randomize programı kullanılmıştır. Bu program; küre çapları ve adetleri ayrıca numunenin boyutları girildiğinde kürelerin rastgele koordinat dağılımını vermektedir. Bu program sayesinde gerçeğe daha yakın köpük modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Randomize programına girilen küre çap ve adetleri Çizelge 5.4' te verilmiştir.

**Çizelge 5.4** Randomize Programına Girilen Küre Çap ve Adetleri.

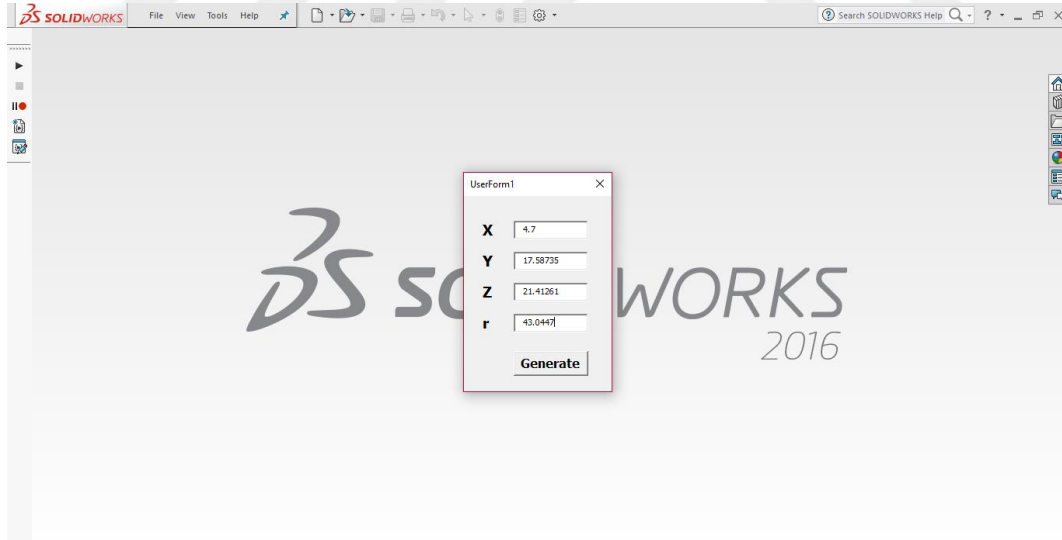
N1 Kodlu Numune			N2 Kodlu Numune		
Kürenin Çap Gösterimi (d)	Küre Çapı (mm)	Adet	Kürenin Çap Gösterimi (d)	Küre Çapı (mm)	Adet
d1	2,8	69	d1	4,7	65
d2	3,0	95	d2	5,0	152
d3	3,2	105	d3	5,3	87
d4	3,5	137	d4	5,6	22
d5	3,7	68	d5	5,8	65

Randomize programı koordinat verilerini; Microsoft EXCEL programında açılan .xlsx uzantılı dosya türünde vermektedir. Bu koordinatlar Resim 5.7'de görülmektedir.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Diamete	X	Y	Z				
2	2,8	16,37445	18,60196	16,45489				
3	2,8	4,356015	18,60091	28,10225				
4	2,8	1,4	18,60004	30,21133				
5	2,8	10,40002	18,60001	20,814				
6	2,8	11,93679	18,6	18,59249				
7	2,8	9,004498	18,6	15,99601				
8	2,8	5,268414	18,6	33,85699				
9	2,8	14,81678	18,59971	32,61938				
10	2,8	9,549519	18,59926	13,35148				
11	2,8	4,234581	18,59791	14,46045				
12	2,8	6,910456	18,5959	14,0342				
13	2,8	16,86042	18,57999	34,38073				
14	2,8	10,37544	18,04094	46,70159				
15	2,8	18,60039	17,82124	15,13838				
16	2,8	9,13444	17,40754	22,8807				
17	2,8	6,734123	15,92613	13,06183				
18	2,8	18,60029	15,8365	8,166334				
19	2,8	18,60007	15,54314	30,70362				
20	2,8	4,456607	15,43397	36,48464				
21	2,8	8,120696	15,14889	21,80256				
22	2,8	15,03433	14,63954	1,400036				
23	2,8	4,108513	13,4615	22,60481				

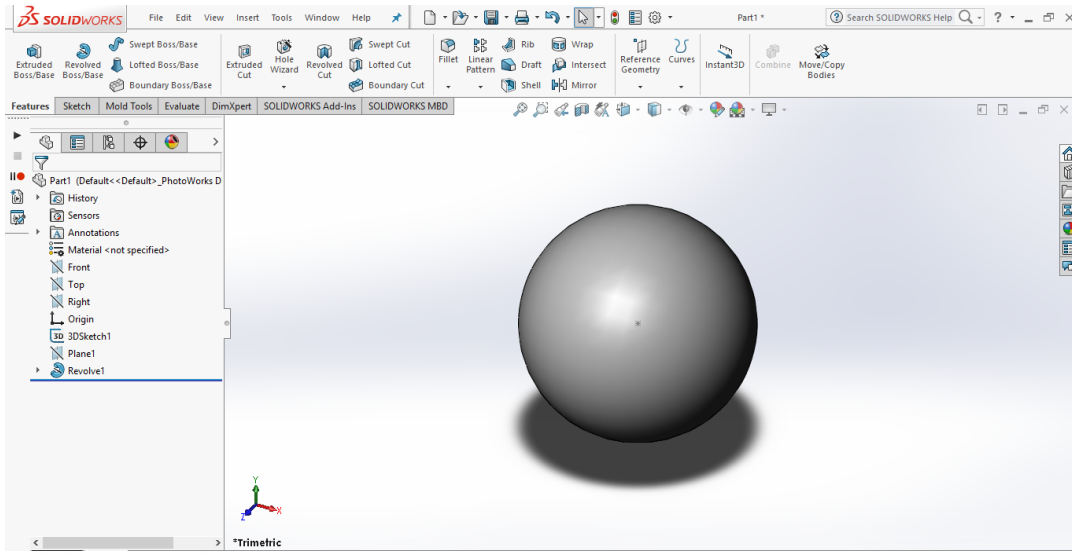
**Resim 5.7** Randomize programından alınan EXCEL dosyası.

Randomize programından alınan bu koordinatlar ile SolidWorks programında küreler tek tek oluşturulmuştur. SolidWorks'te küreleri çizebilmek için bir macro program hazırlanmıştır. Bu macro program görüntüsü Resim 5.8'de görülmektedir.



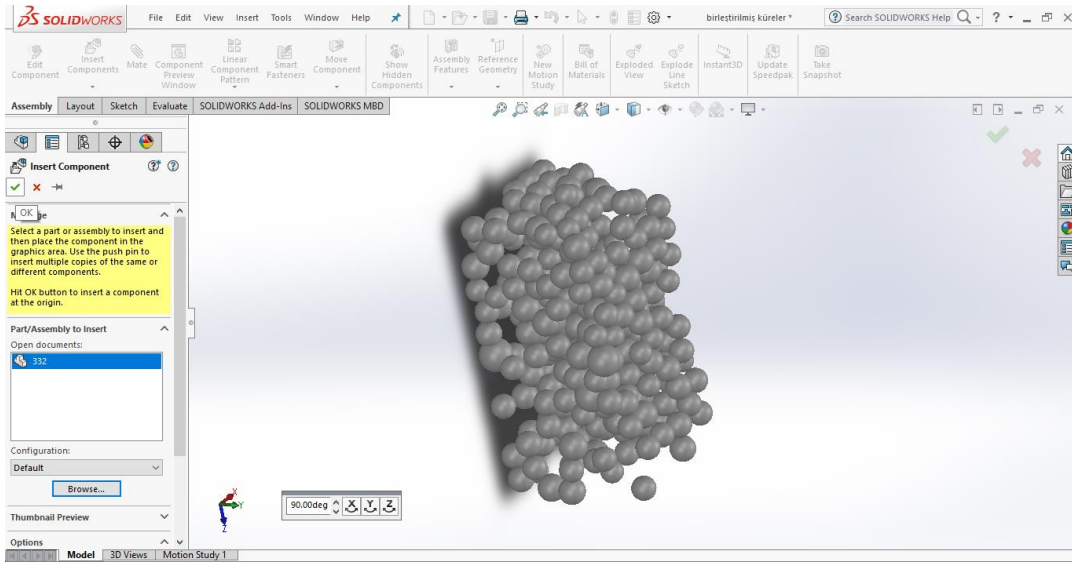
**Resim 5.8** SolidWorks macro programının görüntüsü.

Bu macro programında oluşturulmak istenen kürenin Excel dosyasından alınan koordinatları ve çapı programa girilir. Macro girilen bilgilere ait küreyi oluşturmaktadır. Resim 5.9'da macro programında hazırlanmış olan küre görülmektedir.



**Resim 5.9** SolidWorks macro programında hazırlanmış olan küre görüntüsü.

SolidWorks macro programı vasıtasıyla üretilen küreler, montaj sayfası açılıp insert components'tan çağırılır. Çağırılan kürenin çizilmiş olduğu kendi koordinatlarında gelmesi için açılan menüden “OK” düğmesine tıklanması gerekir. Çağırılan küre gösterilen menüde kendi koordinatlarında montajlanıp birleştirilmiştir. Resim 5.10’ da montajlama işlemi görülmektedir.

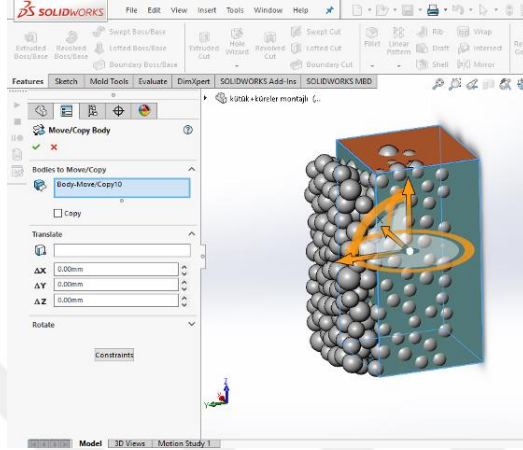


**Resim 5.10** SolidWorks’ te montajlama işleminin görüntüsü.

SolidWorks programında montajlanan küreler farklı kaydet denilerek “part” (parça) uzantılı olarak kaydedilmiştir. Başka bir part dosyası açılarak bir dikdörtgenler

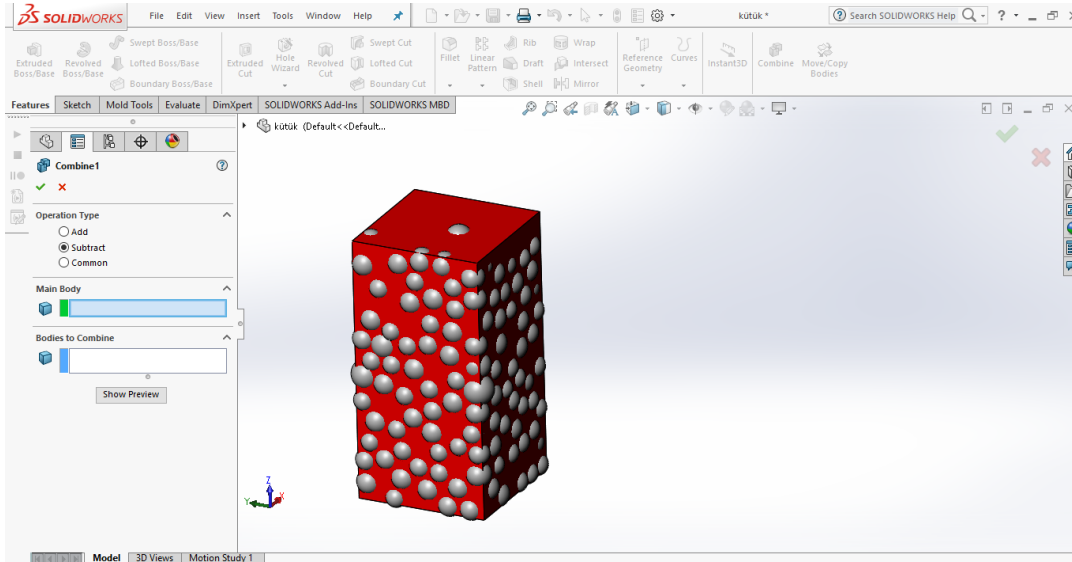


prizması çizilir sonra part dosyası açık iken araç çubuğundan insert-part seçeneği tıklanıp küre montajı seçilmelidir. Aynı part içinde bulunan küre montajı ve alüminyum kütüğü move (taşıma) sekmesiyle üst üste getirilir. Küreler ve kütüğün aynı part dosyası içerisinde görüntüsü Resim 5.11’ de gösterilmiştir.



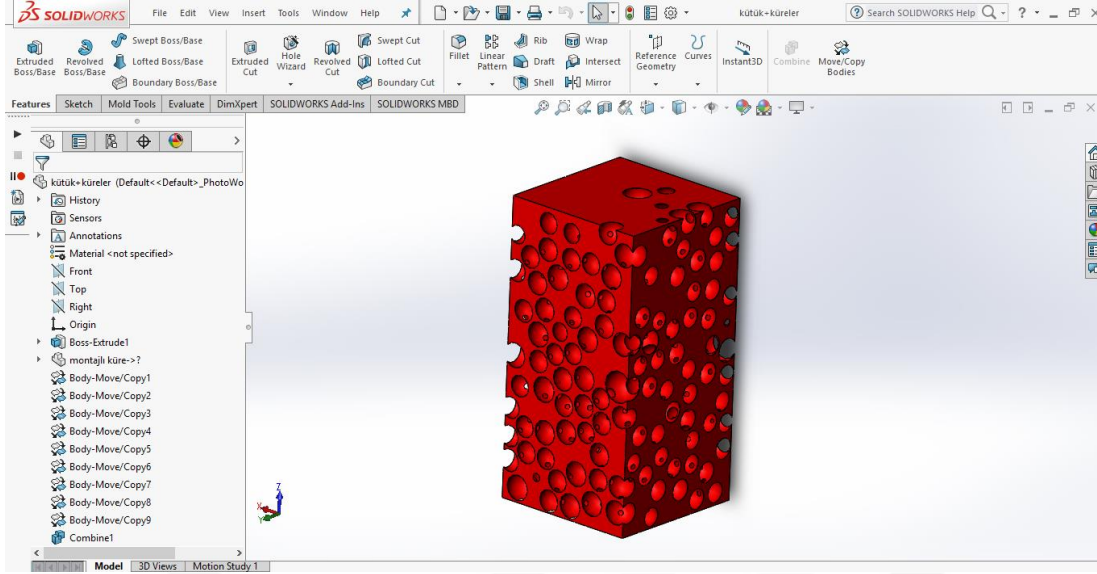
**Resim 5.11** SolidWorks’ te küreler ve kütüğün aynı part dosyası içerisinde görüntüsü.

Aynı part dosyası içerisinde küreler kütüğün içine girecek şekilde yerleştikten sonra combine (birleştir) komutu çalıştırılır ve küre montajı subtract(çıkart) komutu çalıştırılarak kütükten çıkartılır. Combine işlemi Resim 5.12’ de görülmektedir.



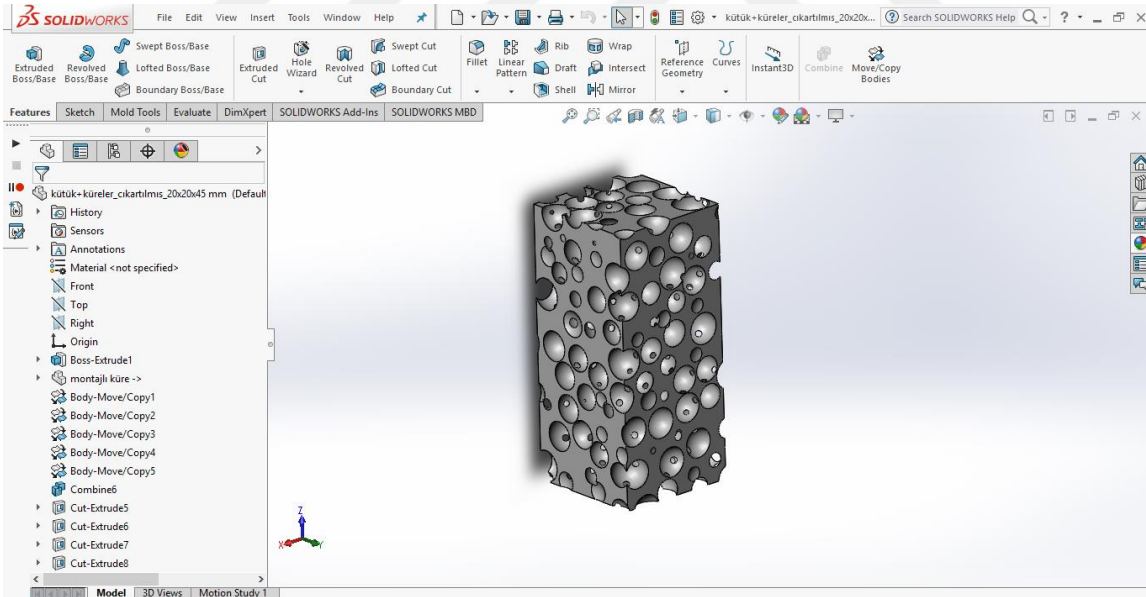
**Resim 5.12** SolidWorks’ te combine işlemi görüntüsü.

Combine-subtract işlemi ile kütükten çıkartılan kürelerin görüntüsü Resim 5.13’ te verilmiştir.



**Resim 5.13** SolidWorks’ te combine-subtract işlemi sonrası alüminyum kütüğün görüntüsü.

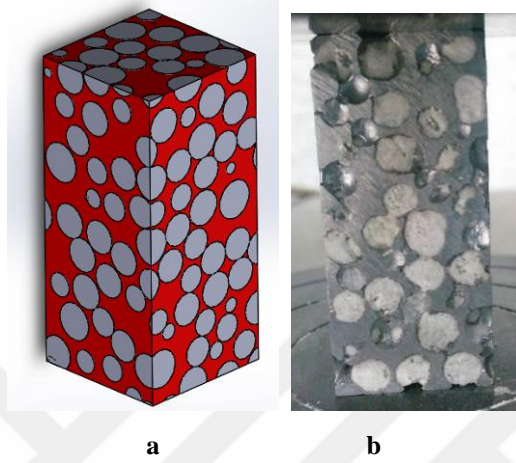
Subtract işlemi de yaptıktan sonra numune boyutuna göre extrude cut işlemi ile kütük kesilmiştir. Resim 5.14’ te kütüğün extrude cut işlemi ile numune boyutuna getirilmiş görüntüsü bulunmaktadır.



**Resim 5.14** SolidWorks’ te alüminyum kütüğün numune boyutundaki görüntüsü.

SolidWorks’ te yeni bir montaj sayfası açılır ve montaj sayfasına kürelerini çıkarttığımız kütük çağırılmıştır. Aynı montaj sayfasına montajlanmış kürelerde çağırılır ve “Concentric” komutu ile montaj yapılır. Önce mate-concentric komutuna tıklanır ve en üstteki küreye tıklanarak, küreler birbirine montajlı olduğundan hepsi beraber

hareket edip istediğimiz yere montajlanmaktadır. Oluşturulan montaj istenilen sentaktik alüminyum köpük modelidir. İstenilen model montajına ulaştıktan sonra numune boyutlarına göre montaj cut extrude komutu ile küçültülmüştür. İstenilen numune boyutlarındaki sentaktik alüminyum köpük montajı Resim 5.15’ te görülmektedir.



**Resim 5.15** Üretilen ve tasarlanan numune görüntüleri; (a) Tasarım görüntüsü, (b) Numune resmi.

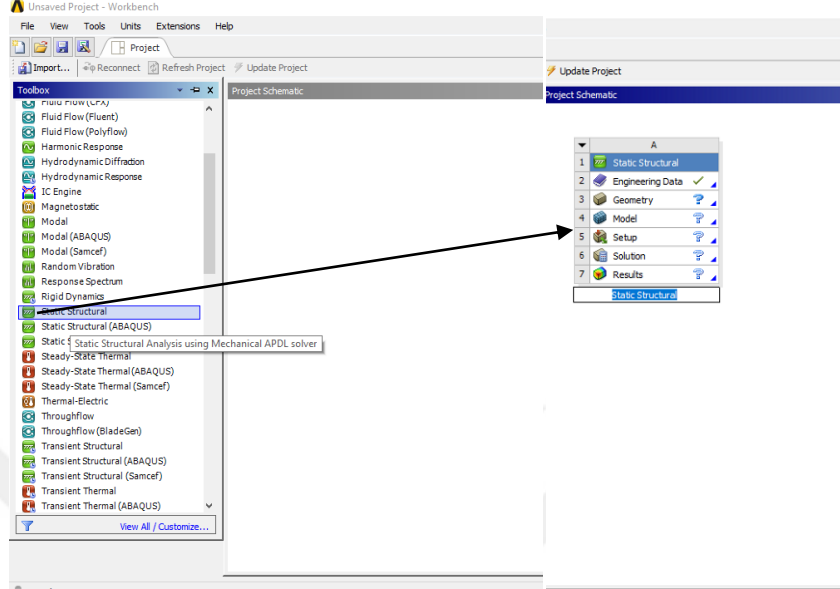
İstatiksel dağılımın kullanıldığı bilgisayar programı ile elde edilen makro programının Solid Works programında kullanılmasıyla köpüğe ait geometrik CAD modeline ulaşılır. Kullanılan köpük modelinin boyutları olup, 2-4,75 silika jel kullanılan numunelerde boşluk oranı yaklaşık olarak %82 olarak 4,75-6,30 silika jel kullanılan numunelerde boşluk oranı yaklaşık olarak %84 olarak ölçülmüştür.

Gözenekli yapıya sahip olduğu için hacim sınırları sürekli yüzeylere sahip olmayan köpük modeline yükleme ve sınır koşullarının düzgün ve homojen olarak verilebilmesi için köpük yapıya uygulanacak olan kuvvetlerin etkideği yüzeylere temas edecek şekilde prizmatik katı yapılar eklenmiştir. Böylece çekirdek elemanı köpük olan sandviç bir yapı elde edilmiştir.

### 5.7 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

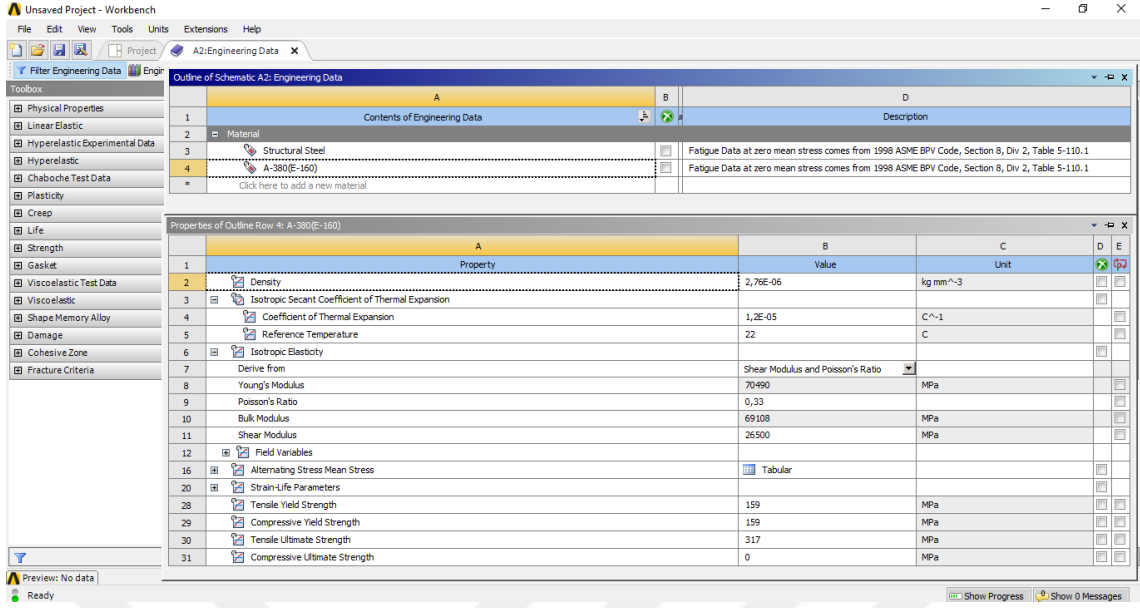
SolidWorks’te modeli yapılan sentaktik alüminyum köpük numunenin parasolid(.xt) uzantılı kopyası kayıt edilmiştir. Analizi için ANSYS 16.0 programı kullanılmıştır. Ansys 16.0 – Workbench 16.0 açılır ve “toolbox” tan Static Structural sekmesine

tıklanır. Ansys 16.0 –Workbench’te Static Structural menüsünün açılması Resim 5.16’da görüntülenmiştir.



**Resim 5.16** Ansys 16.0 –Workbench’te Static Structural menüsünün açılması.

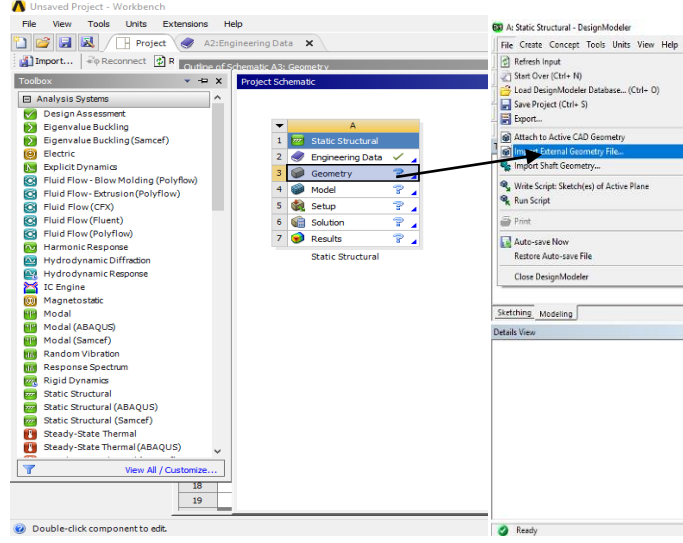
Static Structural tıklandığında açılan menüdeki işlemler sırasıyla yapılır. İlk önce Engineering Data bölümünden kullanılacak malzeme seçilir eğer malzeme yoksa malzemenin mekanik özellikleri yazılarak yeni malzeme oluşturulur. Alüminyum alaşımı olan E-160 malzemesi ANSYS’te kayıtlı olmadığı için E-160 (A-380)’a ait mekanik özellikler bulunan kaynaktan programa girilmiştir (İnt.Kyn.6). ANSYS’te malzeme oluşturmak için “Engineering Data”yı sağ tıklanır “Edit” denir açılan menüden herhangi bir malzeme seçilerek sağ tıklanır. Açılan menüden “Duplicate” sekmesi seçilir yapılan bu işlemle malzeme kopyalanmış olur. Kopyalanan malzemenin adı değiştirilip E-160(A-380) olarak yazılmıştır. Daha sonra alt taraftaki “Properties of outline row” bölümünde deney malzemesi olarak kullanılan E-160(A-380)’ın değerleri yazılıp değiştirilmiştir. Resim 5.17’de ANSYS içerisindeki malzeme oluşturma işlemi görülmektedir.



**Resim 5.17** ANSYS içerisindeki malzeme oluşturma işlemi görüntüsü.

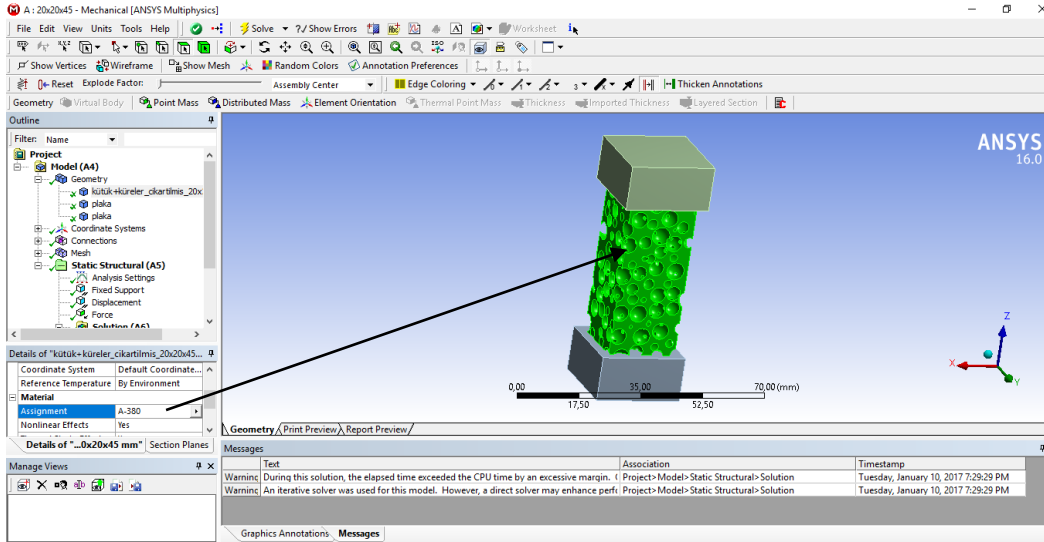
Silikajellerin yoğunlukları  $1\text{gr/cm}^3$  ün altında olması sebebiyle analizlerde bu bölgeler ihmal edilmiştir. Bu nedenle alüminyum kütük içerisinde küreleri çıkartılmış olan model kullanılmıştır.

ANSYS'te malzeme oluşturma işlemi bittikten sonra "Project Schematic" içerisinde yer alan "Engineering Data" sekmesinin altındaki "Geometry" seçeneği çift tıklanır ve açılan sayfadan "File-Import External Geometry File.." ile .xt uzantısında kayıt edilmiş olan numune programa çağırılır. Resim 5.18'de "Geometry" segmesi ve "File-Import External Geometry File.."in bulunduğu görüntüler bulunmaktadır.



**Resim 5.18** ANSYS 'te "Geometry" segmesi ve "File-Import External Geometry File."

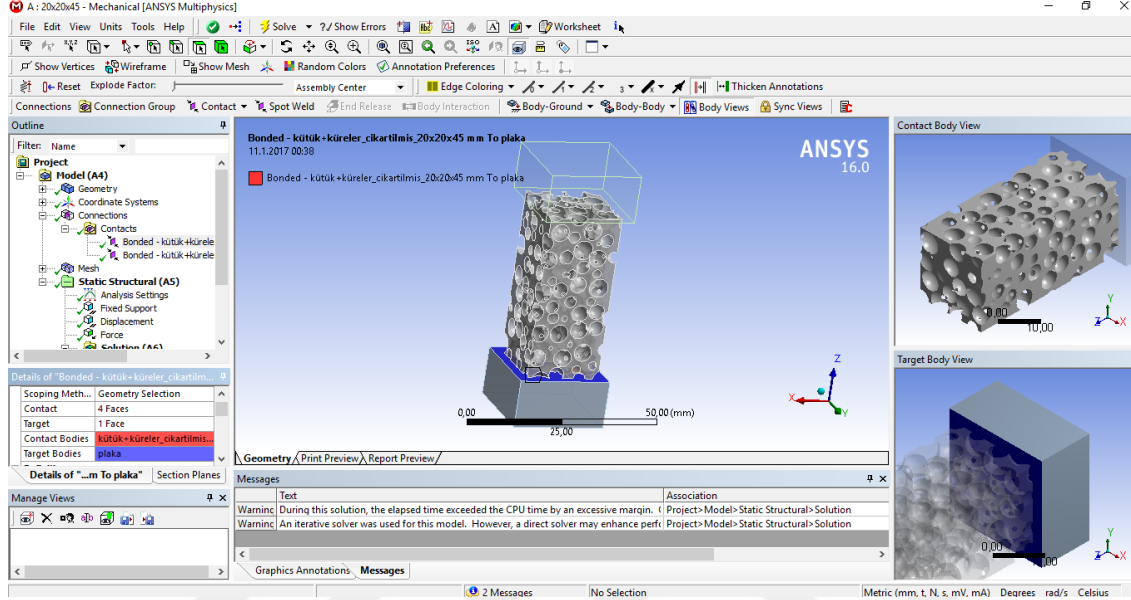
Numune kayıtlı olduğu yerden çağırıldıktan sonra açılan sayfada "Generate" sekmesi seçilir ve numune geometrisi ekrana gelir. Açılan geometri sayfası kapatılır daha sonra "Project Schematic" menüsü içerisinde "Geometry" sekmesi altındaki "Model" çift tıklanır. Model çağırıldıktan sonra "Geometry" sekmesi altındaki bölmeden parçalar seçilip malzemeleri atanır. Resim 5.19' da geometriye malzeme atanması gösterilmiştir.



**Resim 5.19** ANSYS' te geometriye malzeme atanması görüntüsü.

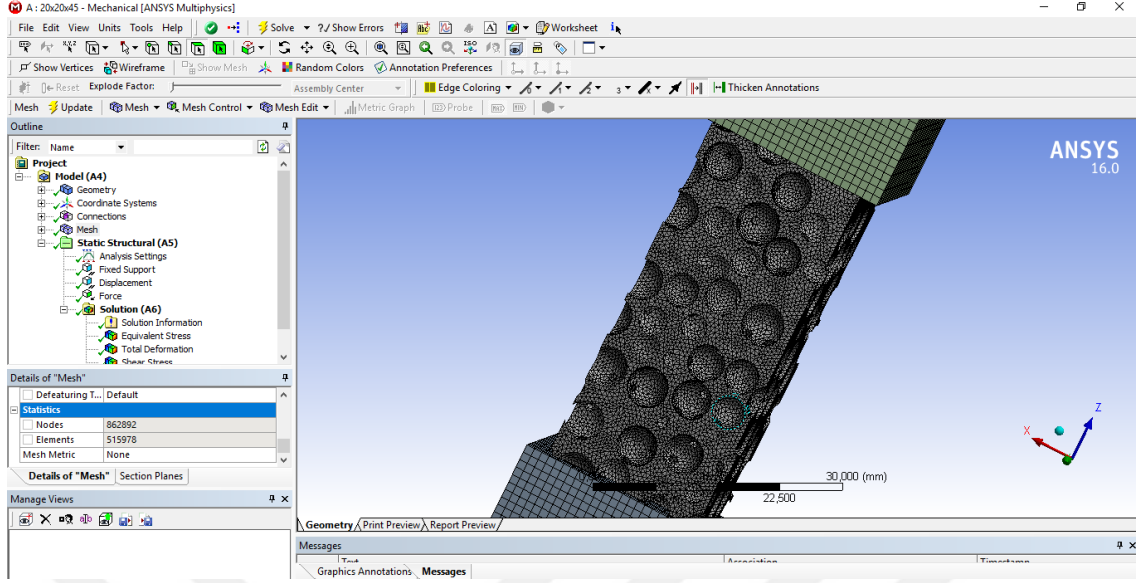
Prizmatik katı yapıların köpük yapıya göre çok daha rijit olması sağlanarak yük aktarımının ideale yakın olması sağlanır. Ayrıca köpük ve prizmatik katı yapıların temas halinde olan yüzeyleri arasında yük aktarımını sağlayacak ve oluşan sandviç

yapının ayrılmasını önleyecek bir temas ilişkisi kurulmuştur. Malzemeler seçildikten sonra malzeme üzerine eklemiş olduğumuz plakalar ile köpük numune arasında “contacts” (ilişki) belirtilmiştir. Bu işlem için “Connections” sekmesi altında ki “contacts” seçilerek Resim 5.20’de gösterilmiştir.



**Resim 5.20** “Connections” sekmesi altında ki “contacts” özelliğinin seçilmesi.

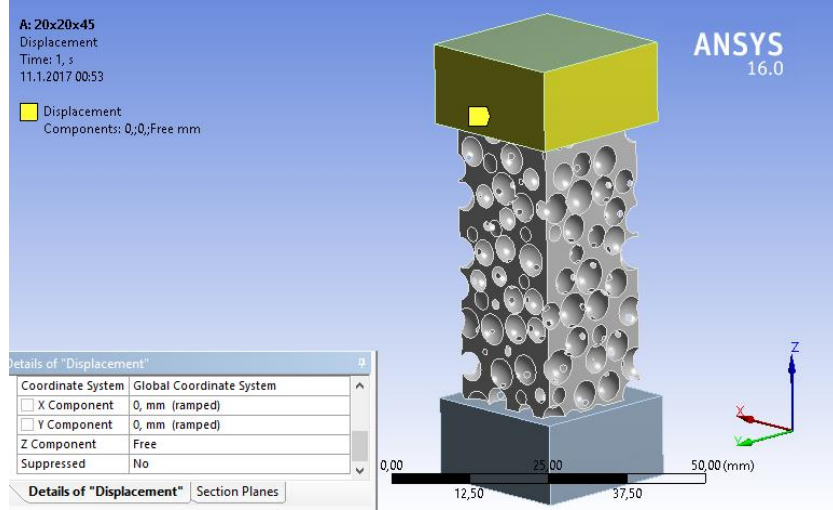
Contact işlemi bittikten sonra “mesh” sekmesine gelinmiştir. Sonlu elemanlara ayrıklaştırma işlemi gerçekleştirilmesi için eleman tipi seçilir. Bu analiz için 862.892 düğüm noktasına sahip trigonel eleman tipi seçilerek yaklaşık olarak 515.978 adet düğüm noktalı sonlu eleman ağı elde edilmiştir. Sandviç yapının yüzey elemanları olan prizmatik katılar için daha az eleman sayısı kullanılmıştır. Bu işlemler öncelikle “mesh sizing” bölümünden sonuçların daha gerçekçi olabilmesi için alüminyum kütük malzemesinin mesh boyutu daha küçük seçilmiştir. Resim 5.21’ de modelin mesh yapılmış hali görülmektedir.



**Resim 5.21** ANSYS’ te modelin meshleme işlemi görüntüsü.

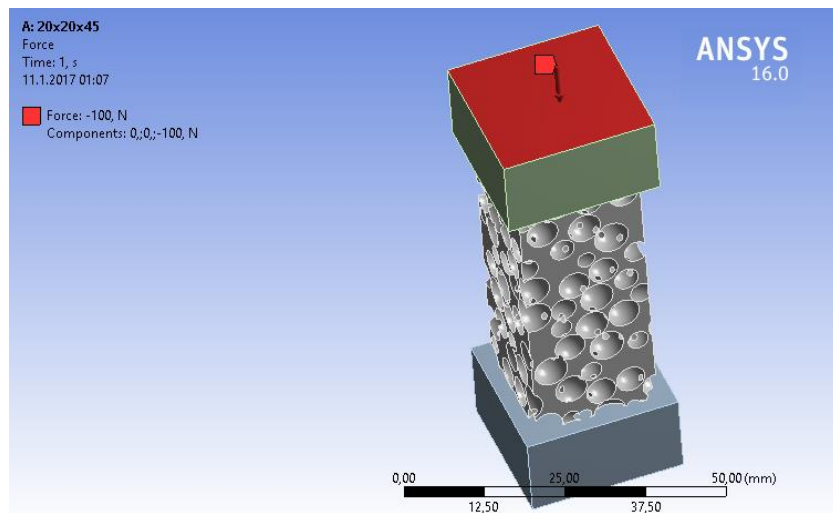
ANSYS’te köpük malzemeye ait modelde mesh işlemi yapıldıktan sonra parça bir yüzeyinden sabitlenir. Sabitleme işlemi için “Support” menüsündeki “Fixed support” sekmesi tıklanır ve parçanın sabitlenmesini istediğimiz yüzey olan alt tarafı seçilerek onaylanır. Alt plaka sabitlenir, üst plaka ise yer değiştirme işlemi için konum belirlenir. Bu işlem için “Displacement” seçeneği seçilip aşağı yön(z) hariç tüm yüzeyler seçilir ve “x,y” koordinatlarına “0” değeri girilir. “z” ise “free” yani serbest bırakılıp yer değiştirmesi sağlanmıştır. Bu temas ilişkisinde köpük yapısının temas yüzeyine paralel olarak hareket etmesine izin verilirken iki yapı arasında boşluk oluşmasına izin verilmez. Böylelikle yük transferinin sürekliliği sağlanırken köpük yapısının yüklemeye doğrultusuna dik olan doğrultudaki deformasyonu prizmatik katıların varlığından etkilenmez. Resim 5.22’ de “Displacement” işlemi görülmektedir.





**Resim 5.22** ANSYS' te parçanın "displacement" işlemi görüntüsü.

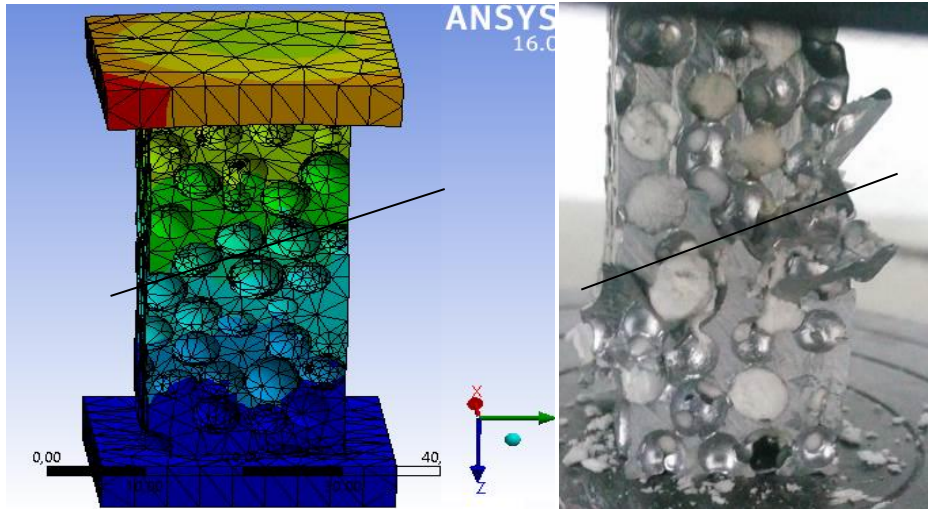
Alüminyum köpük modelinin sandviç yapı haline getirilmesinden sonra basma elastisite modülünün belirlenmesi için gerekli olan sınır şartları uygulanmıştır. Buna göre bir taraftan basma yükü uygulanırken karşı yüzeyin bütün serbestlik dereceleri ankastre olarak mesnetlenir. Sabitleme işlemi yapılan parçanın üst tarafından kuvvet uygulanması gerekmektedir. Basma deney numunesi modeline kuvvet uygulamak için "Loads" menüsünün alt sekmesi olan "Force" sekmesi seçilir ve basma numunesinin üst yüzeyi seçilir. Üst yüzeye 100 N kuvvet değeri girilmiştir. Resim 5.23' te kuvvet uygulama işlemi görülmektedir.



**Resim 5.23** ANSYS' te parçaya kuvvet uygulama işlemi görüntüsü.

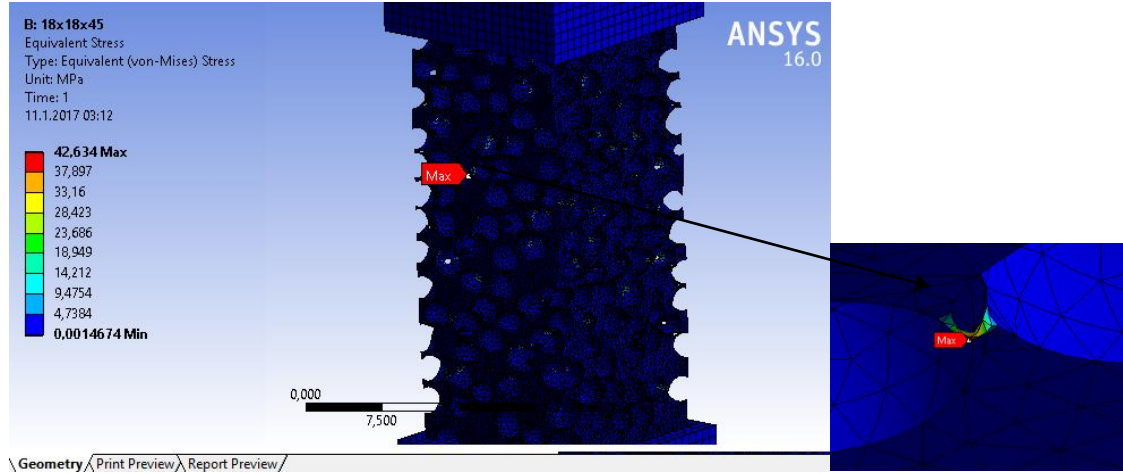
Parçaya kuvvet uygulama işlemleri bittikten sonra sıra analizlerin çözümlenmesi gelmektedir. Bu amaçla “Solution” bölümünden “Deformation-total”, “strain-equivalent (von-mises)” analizleri seçilir ve en son olarak ta “solve” yani çözümlenme yaptırılır.

Basma elastisite modülünün elde edilebilmesi için uygulanan sınır şartları ve sonlu eleman ayrıklaştırmasından sonra statik sonlu eleman analizi gerçekleştirilir. Analiz sonucunda alüminyum köpük modelinin yükleme doğrultusundaki toplam yer değiştirmesi tespit edilerek mühendislik birim yer değiştirmesi ( $\Delta L/L$ ) hesaplanır. Uygulanan basma kuvvetinin yüzey alana bölünmesiyle elde edilen mühendislik gerilmesi ( $F/A$ )’de elde tespit edilir. Hooke yasasından hareket edilerek lineer elastik malzeme davranışı için mühendislik gerilmesi ile mühendislik birim şekil değiştirmesi arasındaki orantı katsayısı olarak basma elastisite modülü elde edilir. Poisson oranı da benzer şekilde Poisson oranının tanımından yola çıkılarak elde edilebilir. Buna göre basma kuvvetinin olduğu doğrultuya dik yönlerdeki birim şekil değiştirmelerin basma doğrultusundaki birim şekil değiştirmesine olan oran Poisson oranını ifade etmektedir. Resim 5.24’ te sonlu elemanlar ve basma testi sonucunda oluşan şekil değişimi görülmektedir.

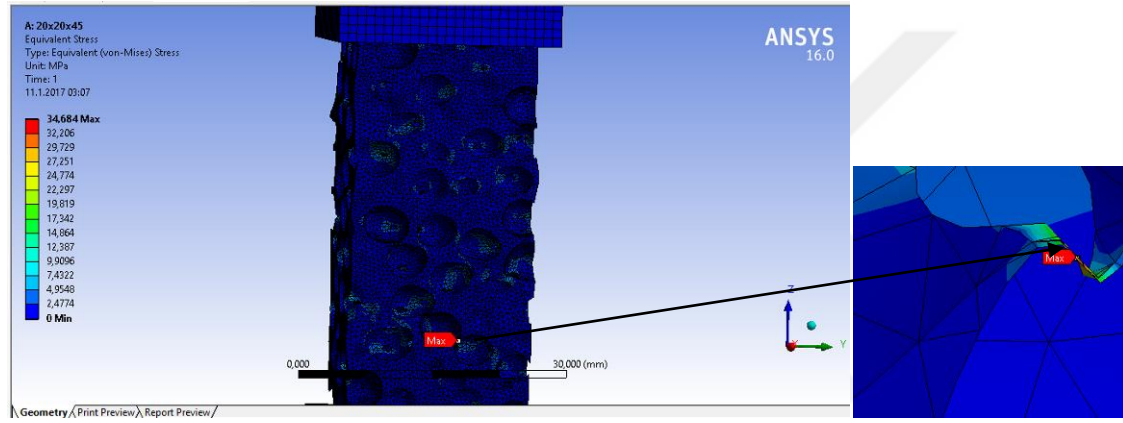


**Resim 5.24** Sonlu elemanlar ve basma testi sonucunda oluşan şekil değişimi.

Resim 5.24’te görüldüğü gibi şekil değişimleri birbirine benzemektedir. Oluşturulan model gerçeğe yakın sonuçlar vermiştir. Analiz sonucunda oluşan Von mises gerilim değerleri Resim 5.25’ te görülmektedir.



(a)



(b)

**Resim 5.25** Analiz sonucunda oluşan Von misses gerilim değerleri; (a) Silikajel çapı 2-4,75 mm olan numune, (b) Silikajel çapı 4,75-6,30 mm olan numune.

Resim 5.24 ve 5.25 incelendiğinde maksimum gerilmelerin hücre duvarlarında meydana geldiği görülmektedir. Bu sonuç köpük yapılarında beklenen bir durumdur.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1 Sonuçlar ve Tartışma

Döküm sıcaklığı malzeme içerisinde kullanılan silika jel çapına göre değişmektedir. 2 – 4,75 mm arasında yapılan dökümlerde 700 °C, 4,75- 6,30 arasındaki dökümlerde ise 780 °C olarak tespit edilmiştir.

Dökümde kullanılan silika jel sıcaklıklarında 2 – 4,75 mm arasında yapılan dökümlerde 300 °C, 4,75- 6,30 arasındaki dökümlerde ise 220 °C olarak tespit edilmiştir. Döküm yöntemiyle elde edilen alüminyum köpüklerin çekilen SEM görüntülerinden, açık ve kapalı olmak üzere her iki hücre tipini de gösterdiği fakat numunelerde ağırlıklı olarak hücre duvarlarının bulunması açık hücreli alüminyum köpüğe yakın bir ürün elde edildiğini göstermiştir.

Döküm yöntemi ile üretilmiş metalik köpüklerin vakum değerine göre alüminyum homojen olarak dağılımında değişimler gözlemlenmiştir. Vakum değeri arttıkça numune alt bölgelerde daha fazla yoğunlaşmakta ve üst bölgede kalmamaktadır. Tersine vakum değeri düşürüldüğünde ise alt bölgelere alüminyum inmeden üst tarafta katılaşmaktadır.

Genleştirilmiş silika jel kullanımı ve vakum döküm yöntemi kullanılarak hücre yapısı ve yoğunluğu kontrol edilebilir, özellikleri tahmin edilebilir köpüklerin yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

Sentaktik köpüklerin yoğunlukları klasik yöntemlerle üretilen köpüklere göre çok yüksek olmasına rağmen literatürdeki araştırmalara göre sentaktik köpüklerin yoğunlukları  $1\text{g/cm}^3$  fazla olmaktadır. Bu veriler ışığında literatürdeki sentaktik köpüklere yakın bir yoğunluk değeri sonucuna varılmıştır. Bu kullanılan boşluk tutucu malzemelerin yoğunluğu ile doğrudan ilgili bir durumdur.

İstenilen boyutta ve istenilen sayıda hücre boyutlarına sahip kapalı hücreli köpük yapısının mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla taşıyan bu çalışmada öncelikle köpük geometrisinin CAD ortamında modellenmesi yapılmıştır. Literatürdeki mevcut karakterizasyon bilgileri yazılan bilgisayar programında girdi olarak kullanılmıştır. Çıktı olarak ise belirli değer aralığında normal dağılıma sahip olan rasgele koordinatlarda rasgele büyüklükte birbiriyle kesişen küreler elde edilmiştir. Köpük yapısına ait mikro fotoğraflardan doğruluğuna inanılan küresel hücre geometrisi kabulü bu modellemede kolaylık sağlamıştır. Birbiriyle kesişen küre topluluğunun belirli bir şekle sahip katı hacimden çıkarılmasıyla söz konusu katı hacim şekline sahip köpük modeli elde edilmiştir. Elde edilen köpük modelin izafi yoğunluğunun veya boşluk oranının ayarlanabilir olması değişik boşluk oranında köpük modellerinin üretilebilmesini sağlamaktadır.

Küre çapı büyüdükçe üretilen numunelerin daha düşük yoğunlukta olduğu gözlemlenmiştir. Küre çapına bağlı olarak hücreler daha çok açık gözenekli yapıya dönmekte fakat hücre duvarları daha da kalınlaşması sebebiyle küçük çaplı silika jel kullanılan numuneler göre daha yüksek gerilme değerleri tespit edilmiştir

Deney sonuçlarında alüminyum alaşımının sünekliği düşük olması nedeniyle hücre duvarlarında gevrek kırılmalar gözlemlenmiştir. Bu nedenle 3. bölgede gözlemlenmesi gereken mukavemet artışı görülemeden deney sonuçlanmıştır.

Köpüğün hücre şeklinin küresel olması yapılan bu çalışmadaki modellemeyi kolaylaştırmıştır. Fakat gelişen CAD modelleme teknikleriyle homojen köpük yapılarının geometrik modellerinin CAD ortamında üretilebilmesi mümkündür. Dolayısıyla homojen köpük yapılarının parametrik modellerinin oluşturulmasına yönelik çalışmalar da yapılabilir.

Köpük yapısının geometrik modeli gerçeğe mümkün olduğunca yakın bir şekilde elde edildikten sonra yapılan sonlu eleman analizleri ile köpük yapısının basma test sonuçlarında benzerlikler görülmüştür.

## 6.2 Öneriler

1. Bu çalışmanın devamı olarak tasarlanan metalik köpükler farklı bir analiz programı ile de analiz edilerek hangi analiz programının daha gerçekçi sonuçlar verdiği araştırılabilir.
2. Bu çalışmanın devamı olarak mesh yapısı sıklaştırılarak daha gerçekçi ANSYS sonuçlarına ulaşıp ulaşılamayacağı araştırılabilir.
3. Ayrıca kullanılan farklı silikajel çaplarıyla çalışılarak çap boyutu değişikçe analiz sonuçlarına etkisi araştırıla bilir.
4. Alüminyum köpükleri farklı boyutlarda üreterek analizleride bu farklı boyutlar için yaptırılıp boyut değişimi ile basma analiz sonuçları arasındaki bağıntının tespit edilmesi araştırılabilir.
5. Alüminyum köpükleri farklı boyutlarda üreterek ağırlıkları ölçülüp bilgisayar destekli modelin ağırlık analizi yaptırılıp analizin boyuta göre sapma miktarı araştırılabilir.

## 7. KAYNAKLAR

- Abdullatef, E.N. and Haber, M.A. (2009). Preparation of Al-12si foam using liquid technique. *Engineering & Technical Journal*, **27**:2479-2493.
- Ames, E. B. (2006). Productivity and return on investment for SolidWorks® 3D CAD software. MIT Sloan School of Management, Cambridge.
- Andrews, E., Sanders, W. and Gibson, L.J. (1999). Compressive and tensile behaviour of aluminium foams, *Material Science and Engineering*. **A270**:113-124.
- Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N. A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W. and Wadley, H.N.G. (2000). Metal foams a design guide. *Butterworth -Heinemann* publication.
- Ashold, P. (1999). Metal foams and porous metal structures, MIT-Verlag, German, 13ANSYS Theory Manual. 1999. ANSYS Inc., Pits burg, 6:1-3.**
- Ashida, K. (1995). Hand book of plastic foams: types, properties. Manufacture and Applications, Noyes Publications,147-163.**
- August, A., Ettrich, J., Rölle, M., Schmid, S., Berghoff, M., Selzer, M. and Nestler, B. (2015). Prediction of heat conduction in open-cell foams via the diffuse interface representation of the phase-field method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **84**:800–808.
- Avarisli, O. ve Uğuz, A. (2003). Metalik köpük malzemelerin otomotiv endüstrisinde kullanılması, VIII. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu, Bursa.
- Bağcı, Ö. (2015). Salınlı akış koşullarında açık hücreli metal köpükte akış ve ısı geçişinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul
- Bahçeci, E. (2012). Kapalı hücreli metalik köpüklerde hücre morfolojisinin mekanik özelliklere etkisi ve fotoelastisite yönteminin kullanılabilirliği. Gazi Üniversitesi, Doktora Tezi, Ankara.
- Banhart, J. (2000). Manufacturing routes for metallic foams, *Journals of Materials*, **52**: 22–27.

- Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, **46**:559–632.
- Banhart, J. and Weaire, D. (2002). On the road again: metal foams find favour. *Physics Today*, **55**: 37–42.
- Banhart, J. (2003). Aluminium foams: On the road to real applications. *MRS Bulletin*, **28**: 290-295.
- Banhart, J. (2005). Aluminium foams for lighter vehicles. *Int. J. Vehicle Design*, **37**:2-3.
- Barnes, A.T., Ravi-Chandar, K., Kyriakides, S. and Gaitanaros, S. (2014). Dynamic crushing of aluminium foams: Part I – Experiments. *International Journal of Solids and Structures*, **51**:1631–1645.
- Bardella, L. and Genna, F. (2001). On the elastic behaviour of syntactic foams, *Int J Solids Stru*; **38**: 7235–7260.
- Başpınar, M.S., Yurtcu, Ş. (2011). Metalik köpük malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan matematiksel modeller *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt: 8, No: 1, (69-78).
- Baumeister, J., Banhart, J. and Weber, M. (1997). Aluminium foams for transport industry. *Materials & Design*, Vol. 18, Nos. 4+6, pp.217–220.
- Becer, E. (2008). İletişim ve Grafik Tasarım. (6. Basım), Ankara, Dost Kitabevi Yayınları.
- Bedir, S. (2007). Çift yönlü asansör fren bloklarının modellenmesi ve sonlu elemanların analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Bilhan, S. (2005). Alüminyum metal köpüklerin difüzyon kaynağı (TLP) davranışının incelenmesi. Fırat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ
- Bor, Ş., Tahran, E., Esen, Z. ve Kotan, G. (2007). Toz metalurjisi yöntemiyle köpüksü saf titanyum ve Ti6Al4V alaşım üretimi ve karakterizasyonu. Tübitak projesi, 104M121
- Bryant, J.D., Crowley, M., Wang, W., Wilhelmy, D. and Kallivayalil, J. (2007). Development of Alcoa Aluminium Foam Products. *Metal Foam*, 2007, 19–22.



- Buffel, B., Desplentere, F., Bracke, K. and Verpoest, I. (2014). Modelling open cell-foams based on the Weaire–Phelan unit cell with a minimal surface energy approach. *International Journal of Solids and Structures*, **51**: 3461–3470.
- Çağlar, S.İ. (2009). Alüminyum esaslı kompozit köpük üretimi ve karakterizasyonu. Trakya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Edirne.
- Çaydere, O. (2016). Yaşam boyu öğrenme ve grafik tasarım. *International Journal of Human Sciences*, **13(1)**: 787-797.
- Chittineni, K. (2009). Ally Gradient Syntactic Foams. Jawaharlal Nehru Technological University, Master of Science, India
- Çinici, H. (2004). Toz metalürjisi yöntemi ile alüminyum esaslı metalik köpük üretimi, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Csilla, K., Franti, S.C., Janos, L., Gyorgy, V., Zsuzsanna R. (2007). Acoustic emission of metal foams during tension. *Materials Science and Engineering*, **462**: 316–319.
- Davies, G.J., Zhan, S. (1983). Review metallic foams, their production, properties and applications. *Mat ScL*, **18**:1899-1911
- Degischer, H.P. and Kristz, B. (2002). Handbook of Cellular Metals: *Production, Processing, Applications*.
- Demirsöz, R. (2005). Asansör Kılavuz Rayların Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Despois, J.F. Marmottant, A., Salvo, L., Mortensen, A. (2007). Influence of the infiltration pressure on the structure and properties of replicated aluminium foams, *Materials Science and Engineering*, **A 462**, 68–75.
- Dou, Z.Y., Jiang, L.T., Wu, G.H., Zhang, Q., Xu Z.Y., Chen, G. Q. (2007). High strain rate compression of cenosphere-pure aluminium syntactic foams. *Script a Materialia*, **57**: 945-978.

- Duan, Y., Huebner, S., Hassler, U., Osman, A., Ibarra- Castanedo, C. and Maldague, X.P.V. (2013). Quantitative evaluation of optical lock-in and pulsed thermography for aluminium foam material. *Infrared Physics & Technology*, **60**: 275–280.
- Dumais, J. (2009). Lectures on Biomechanics, Lecture 3: Cellular Solids, Lesson notes.
- Egidio, R., Enrico, P., Alberto, C. (2000). Mechanical behaviour of a syntactic foam: Experiments and Modelling. *Int. J. of Solids and Structure*, **37**: 5773-5794
- Elbir, S., Yılmaz, S. ve Güden, M. (1999). Kapalı hücre alüminyum köpük metallerin üretim metotları ve mekanik özellikleri. *TMMOB Metalürji Dergisi*, **23 (120)**: 35-42,
- Erkoç, C.N. (2000). Autocad ve Ansys yazılımlarını kullanarak mil tasarımı. Selçuk Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Fan, S., Yanh, L., Lang, X., Wang, Y. and Xie, D. (2012). Kinetics and thermal analysis of methane hydrate formation in aluminium foam. *Chemical Engineering Science*, **82**: 185–193.
- Fernandes, H.R., Tulyaganov, D.U. and Ferreira, J.M.F. (2009). Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *Ceramics International*, **35**: 229–235.
- Gibson, L.J. and Ashby, M.F. (1997). Cellular solids: Structure and properties, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN 0-521-49560-1.
- Gupta, N., Kishore, E., Woldesenbet, E. and Sankaran S. (2001). Studies on compressive failure features in syntactic foam material. *Journal of Materials Science*, **36**: 485- 449.
- Gupta, N., Brar, B.S. and Woldesenbet, E. (2001). Effect of filler addition on the compressive compressive and impact properties of glass fibre reinforced epoxy, *Bulletin of Materials Science*, **2**: 219-223.
- Gupta, N. and Woldesenbet, E. (2003). Hygrothermal studies on syntactic foams and compressive strength determination, *Composite Structures*, **61(4)**: 311-320.

- Gupta, N., Woldesenbet, E. and Mensah P. (2004). Compression Properties of Syntactic Foams: Effect of Cenosphere Radius Ratio and Specimen Aspect Ratio, *Composites: Part A*, **35**:103-111.
- Gupta, N. and Ricci, W. (2006). Comparison of compressive properties of layered syntactic foams having gradient in micro balloon volume fraction and wall thickness, *Materials Science and Engineering*, **A 427**: 331–342.
- Güden, M. and Kavi, H. (2006). Quasi-static axial compression behaviour of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminium foam-filled aluminium multi- tubes. *Thin-Walled Structures*, **44**: 739–750.
- Güden, M., Yüksel, S., Taşdemirci, A. and Tanoğlu, A. (2007). Effect of aluminium closed- cell foam filling on the quasi-static axial crush performance of glass fiber reinforced polyester composite and aluminium/composite hybrid tube. *Composite Structures*, **81**: 480-490.
- Günay, D. (1993). Mühendisler için sonlu elemanlar metodunun temelleri. Sakarya Üniversitesi Yayınları, 236.
- Haesche, M., Lehmus, D., Weise, J., Wichmann, M. and Mocellin, M.C.I. (2010). Carbonates as foaming agent in chip-based aluminium foam precursor. *J. Mater. Sci. Technol.*, **26 (9)**: 845-850.
- Hall, I.W., M. Guden, M., Yu, C.J. (2000). Crushing of aluminium closed cell foams: Density And Strain Rate Effects. *Scripta a mater*, **43**: 515–521.
- Hanssen, A.G., Langseth, M. and Happerstad, O.S. (2000). Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminum foam filler. *Int J. Of Impact Eng*, **24 (5)**: 475-507.
- Hernandez, A.R.A. (2005). Combined flow and heat transfer characterization of open cell aluminium foams. University of Puerto Rico, Master of Science, Puerto Rico.
- Hutzler, S. (1997). The physics Of Foams phd thesis, University Of Dublin, Mitverlag Bremen.

- Jha, N., Badkul, A., Mondal, D.P., Das, S. and Singh M. (2011). Sliding wear behaviour of aluminium syntactic foam: A comparison with Al-10 wt% SiC composites. *Tribology International*, **44**: 220–231.
- Jiang, B., Zhao, N.Q., Shi, C.S., Du, X.W., Li, J.J and Man, H.C. (2005a). A novel method for making open cell aluminium foams by powder sintering process. *Materials Letters*, **59**: 3333–3336.
- Kadar, Cs., Kenesei, P., Lendvai, J. and Rajkovits, Zs. (2005). Energy absorption properties of metal foams. *Materials World*, VI. Evfolyam 1.szam
- Kanat U. (2015). Ortodontide görüntüleme yöntemleri. Ege Üniversitesi, Bitirme Tezi, İzmir.
- Kanahashi, H., Mukai, T., Yamada, Y., Shimojima, K., Mabuchi, M., Aizawa, T. and Higashi, K. (2001). Experimental study for the improvement of crash worthiness In AZ91 magnesium foam controlling its microstructure. *Materials Science and Engineering A308*, 283–287.
- Karakuş, S. (1998). Al-Cu Metalik köpük üretimi. Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Kasaplar G. (2007). Alüminyum yüzeyindeki oksit tabakasını nokzalik asit anodizing yöntemi ile geliştirilmesi, Çukurova Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana
- Kasman Ş., Gençalp S., Saklakoğlu N. ve Uçar Ş. (2009). Döküm yönteminin etial 160 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
- Kavi H., Toksoy K. and Guden M.,(2006). Predicting energy absorption in a foam-filled thin-walled aluminium tube based on experimentally determined strengthening coefficient. *Materials & Design*, **27**: 4-263.
- Kevorkijan, V. (2010). Low Cost Aluminium foams made by CaCO<sub>3</sub> articulates. Association of Metallurgical Engineers of Serbia, 549.74:621.762.
- Kırca. M. (2006). Mikro hücreli karbon köpüklerin istatistiksel ve sayısal olarak modellenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

- Kocatürk. O. (2011). Alüminyum metal köpüklerde atalet etkisi. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Marchi, C.S. and Mortensen, A. (2001). Deformation of open-cell aluminium foam. *Acta mater*, **49**: 3959–3969.
- Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S. and Kitahara, A. (2000). Alporas Aluminium foam: production process, properties, and applications. *Advanced Engineering Materials*, **4**: 179-183.
- Mondal, D.P., Das, S., Remakrishan, N. and Bhasker, U.K. (2009). Cenosphere filled aluminum syntactic foam made through stir-casting technique. *Composites Part A*, **40**: 279-288.
- Nakamura, T., Gnyloskurenko, V.S., Sakamoto, K., Byakova, V.A., Ishikawa, R. (2002). Development of new foam in agent for metal foam. *Materials Transaction*, **43**: 1191–1196.
- Oka. S.H. (2009). Alüminyum köpük metalinin farklı yükleme koşullarındaki mekanik özelliklerinin deneysel ve matematik modellemesi. Uludağ Üniversitesi, Doktora Tezi, Bursa.
- Onck, P.R.R., Merkerk, V., Raaijmakers, A. and De Hosson, J.T.H.M. (2005). Fracture of open- and closed-cell metal foams. *Journal Of Materials Science*, **40**: 5821–5828.
- Orbulov, N.I. and Ginzhtler, J. (2012). Compressive characteristics of metal matrix syntactic foams. *Composite: Part A*, **43**: 553-561.
- Ozan, S. and Çay, V. (2006). Effect of fabrication parameters on the pore concentration of the aluminium metal foam, manufactured by powder metallurgy process. *Technology*, **4**: 245–250.
- Ozan, S., Taksin, M., Kolukisa, S. and Özerdem, M.S. (2008). Application of ANN in the prediction of the pore concentration of aluminium metal foams manufactured by powder metallurgy methods. *Int J Adv Manuf Technol*, **39**: 251-256 ,
- Özer. G. (2005). Alüminyum esaslı köpük metal üretimi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

- Palmer, R.A., Gao, K., Doan, T. M., Green, L. and Cavallaro, G. (2007). Pressure infiltrated syntactic foams-Process development and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, **464**: 85–92.
- Polat, B.D., Keleş, Ö. Ve Taptık, Y. (2011). Metalik köpükler, alüminyum metalik köpük ve üretim yöntemleri. *Metal Dünyası*, **205**: 2-7.
- Rajendran, R., Prem, S.K., Chandrasekar, B., Gokhale, A. and Basu, S. (2009). Impact energy absorption of aluminium foam fitted AISI 304l stainless steel tube. *Materials and Design*, **30**: 1777–1784.
- Seitzberger, M., Rammerstorger, F.G. and Degbcher, H.P. (1997). Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam. *Act a Mechanical*, **125**: 95-103
- Sertkaya, A.A. (2008). Alüminyum köpüğün ısı değiştirici olarak tasarımı ve ısı transferi modeli. Selçuk Üniversitesi, Doktora Tezi, Konya.
- Shih, W.H., Liu, C.C. and Hsieh, W.H. (2016). Heat-transfer characteristics of aluminium-foam heat sinks with a solid aluminium core. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **97**: 742–750.
- Sığırtmaç, T. (2010). Metal köpük malzemelerin üretim sonrası kesme ve birleştirme işlemlerinin deneysel verilerden yararlanarak modellenmesi. Uludağ Üniversitesi, Doktora Tezi, Bursa.
- Simone, A.E. and Gibson, L.J. (1998). Effects of Solid Distribution on the Stiffness and Strength of Metallic Foams. *Act a Metallurgical Inc.*, **6**: 2139-2150.
- Simancik, F., Jerz, J., Kovacik, J. and Minar, P. (1997). Aluminium foam- a new light weight structural material. *Kovove Materialy*, **35**: 265-277.
- Song, Z. and Nutt S.R. (2007). Rheology of Foaming Aluminium Melts. *Materials Science and Engineering*, **A 458** 108–115.
- Sun, D.X. and Zhao, Y.Y. (2005). Phase changes in sintering of Al/Mg/NaCl compacts for manufacturing Al foams by the sintering and dissolution process. *Materials Letters*, **59**: 6–10.

- Surace, R., De Filippis, L.A.C., Niini, E., Ludovico, A. D. and Orkas, J. (2009). Morphological investigation of foamed aluminum parts produced by melts gas injection. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering Volume*, Article ID 506024, 9.
- Taherishargh, M., Belova, I.V., Murch, G.E. and Fiedler, T. (2014). On the mechanical properties of heat-treated expanded perlite–aluminium syntactic foam. *Materials and Design*, **63**: 375–383.
- Tao, X.F. and Zhao, Y.Y. (2009). Compressive behaviour of Al matrix syntactic foams toughened with Al particles. *Scripta Materialia*, **61**: 461-464.
- Toksoy, A.K. (2009). Kapalı hücreli Alüminyum köpük doldurulmuş kaynaklı 1050 Al kare kesitli ezilme kutularının optimizasyonu. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Tunçer, N. (2006). Metalik köpük malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu. Anadolu Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Uçak, T. (2003). The effects of process parameters on the cell morphology of the aluminium foam. Istanbul Technical University, Master of Science, Istanbul.
- Wadley, H.N.G. (2002). Cellular metals manufacturing. *Advanced Engineering Materials*, **4**: 10, 726–733.
- Wei, J.N., Gong, C.L., Cheng, H.F., Zhou, Z.C., Li, Z.B., Shui, J.P. and Han, F.S. (2002). Low-frequency damping behaviour of foamed commercially pure aluminium. *Materials Science and Engineering*, **A332**: 375–381.
- Woldesenbet, E., Gupta, N., Jerro, H.D. (2005). Effect of Micro balloon Radius Ratio on Syntactic Foam Core Sandwich Composites. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, **7**: 95–111.
- Wu, G.H., Dou, Z.Y., Sun, D.L., Jiang, L.T., Ding, B.S. and He, B.F. (2007). Compression behaviours of cenosphere–pure aluminium syntactic foams. *Scripta Materialia*, **56**: 3,221–224.
- Yang, C.C. and Nakae, H. (2000). Foam structure effect on the compression behaviour of foamed aluminium alloy. *ISIJ International*, **40**: 12, 1283-1286.

- Yavuz, A. (2011). Boşluk tutucu tekniği ile alüminyum esaslı metal köpük üretimi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon.
- Yavuz, İ. (2012). Taşıtlarda Kullanılan Metal Köpüklerin Yapısal Özelliklerinin İyileştirilmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Doktora Tezi, Afyon.
- Yıldırım, Ş. (2010). Parçacık takviyeli alüminyum köpük metalinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Dumlupınar Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
- Yılmaz, S., Güden, M. ve Elbir, S. (2001). Kompozit alüminyum köpük malzemesinin hazırlanması ve mekanik özelliklerinin karakterizasyonu. Tübitak projesi, Misag- 135.
- Yılmaz, M. (2011). Otobüs devrilme analizlerinde değişik özellikteki malzeme ve köpük uygulaması. Çukurova Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Yu, C.J. and Banhart, J. (1997), Mechanical properties of metallic foams. Fraunhofer USA Metal Foam Symposium, 37-48.
- Yüksel, S. (2010). Toz tabletlerin köpükleştirilmesi ile üretilen alüminyum kapalı hücreli köpüklerde SİC parçacık katkısının köpükleşme ve mekanik özelliklere etkileri. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Zhang, L.P., Zhao, Y.Y., (2008). Mechanical response of Al matrix syntactic foams produced by pressure infiltration casting. *J. Compos. Mater*, **41**:2105–2117.
- Zhang, L. and Ma J. (2009). Processing and characterization of syntactic carbon foams containing hollow carbon microspheres. *Carbon vol*, **47**:1451–1456.
- Zhu, F., Zhao, L., Lu, G. and Gad, E. (2009). A numerical simulation of the blast impact of square metallic sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*, **36**: 687–699.
- Zaman. E. (2011). Açık hücreli alüminyum köpük üretimi ve karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.



## İnternet Kaynakları

## Erişim Tarihi

1- <a href="http://www.ergaerospace.com/index.html">www.ergaerospace.com/index.html</a>	09.09.2016.
2- <a href="http://www.hydro.com/">http://www.hydro.com/</a>	09.09.2016
3- <a href="http://www.cymat.com/">http://www.cymat.com/</a>	09.09.2016.
4- <a href="http://www.mmo.org.tr">http://www.mmo.org.tr</a>	09.09.2016
5- <a href="http://www.catiaturk.com/tasarim/cad/1/cad-nedir-15.html">http://www.catiaturk.com/tasarim/cad/1/cad-nedir-15.html</a>	19.09.2016
6. <a href="http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=568dd76f95094ab2ad63726be36ce1dd">http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=568dd76f95094ab2ad63726be36ce1dd</a>	01.12.2016
7- <a href="http://ilkerkalip.com.tr/teknik_bilgi.htm">http://ilkerkalip.com.tr/teknik_bilgi.htm</a>	31.01.2017
8- <a href="http://www.etialuminyum.com/tr-tr/Urunler/Ham-Aluminyum-Urunleri/Sayfalar/Dokumhane-Urunleri.aspx">http://www.etialuminyum.com/tr-tr/Urunler/Ham-Aluminyum-Urunleri/Sayfalar/Dokumhane-Urunleri.aspx</a>	31.01.2017

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Alev YILDIRIM  
Doğum Yeri ve Tarihi : KEŞAN / 19.03.1985  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon/e-posta) : 0505 585 75 44/ alevktef@hotmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Edirne Anadolu Öğretmen Lisesi, Edirne (2000-2003)  
Lisans : Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik  
Eğitim Fakültesi Tasarım ve Konstrüksiyon  
Öğretmenliği, Karabük (2005-2009)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2013-2017)