



**T.C.**

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**BİYOMÜHENDİSLİK VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**CaCO<sub>3</sub> İLAVESİNİN Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> KOMPOZİT KÖPÜKLERİNİN  
MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE OLAN ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NEBİ DEMİRBAĞ**

**Tez Danışmanı**

**Dr. Öğr. Üyesi SERKAN ABALI**

**ÇANAKKALE – 2022**





T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BİYOMÜHENDİSLİK VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

**CaCO<sub>3</sub> İLAVESİNİN Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> KOMPOZİT KÖPÜKLERİNİN MEKANİK  
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE OLAN ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NEBİ DEMİRBAĞ

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi. SERKAN ABALI

ÇANAKKALE – 2022



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



Nebi DEMİRBAĞ tarafından Dr. Öğr. Üyesi Serkan ABALI yönetiminde hazırlanan ve **12/01/2022** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**CaCO<sub>3</sub> İlavesinin Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kompozit Köpüklerinin Mekanik Özellikleri Üzerine Olan Etkileri**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**İmza**

Dr. Öğr. Üyesi Serkan ABALI

.....

(Danışman)

Dr. Öğr. Üyesi Burak BİROL

.....

Dr. Öğr. Üyesi Emin YAKAR

.....

Tez No : .....

Tez Savunma Tarihi : 12/01/2022

Doç. Dr. Yener PAZARCIK

Enstitü Müdürü

.././2022

## ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Nebi DEMİRBAĞ

12/01/2022

## TEŐEKKÖR

Bu tezin gerçekleŐtirilmesinde, çalışma boyunca benden yardımlarının esirgemeyen saygı değer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Serkan ABALI'ya, ve bana destek olan değerli aileme sonsuz teŐekkÖrlerimi sunarım.

Nebi DEMİRBAğ

anakkale, Ocak 2022



## ÖZET

### CaCO<sub>3</sub> İLAVESİNİN Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> KOMPOZİT KÖPÜKLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE OLAN ETKİLERİ

Nebi DEMİRBAĞ

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serkan ABALI

12/01/2022, 46

Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle kapalı hücre kompozit metal köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ağırlıkça % 5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımına öğütme işleminden sonra köpürtücü ajan olarak ağırlıkça sırasıyla % 7, % 12 ve % 17 CaCO<sub>3</sub> ilavesi yapılmıştır. CaCO<sub>3</sub> katkılı Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz karışımı yaş olarak karıştırılmış ve etüvde kurutma işleminden sonra havanda pulverize edilmiştir. Üç ayrı toz karışımı 40 MPa basınç altında şekillendirilerek ilk önce 550 °C’de 1 saat ve ikinci aşamada 1000°C’de 4 saat bekleme süresince sinterlenmişlerdir. Sinterleme işleminden sonra numunelerin yoğunlukları, mineralojik analizleri (XRD), mikroyapıları (SEM), adsorbsiyon izotermeleri ve basma dayanımları incelenmiştir. Farklı miktardaki CaCO<sub>3</sub> köpürtücü ajanların belirli üretim şartları altında kompozit metal köpük filtrenin mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Ağırlıkça % 7 CaCO<sub>3</sub> ilaveli karışımdan hazırlanan köpük malzeme en yüksek basma mukavemeti değerine ve daha homojen gözenek dağılımına sahiptir. Bunun yanında yoğunluk oranı ve gözenek miktarı CaCO<sub>3</sub> ilavesinden çok fazla etkilenmemektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Metal Köpük, Seramik, Alüminyum, Alümina, Mukavemet, Gözenek, Kalsiyum Karbonat

## ABSTRACT

### EFFECTS OF CaCO<sub>3</sub> ADDITION ON MECHANICAL PROPERTIES OF Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> COMPOSITE FOAMS

Nebi DEMİRBAĞ

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Bioengineering and Material Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Serkan ABALI

12/01/2022, 46

In this study, closed-cell composite metal foam production was carried out by the powder metallurgy method. For this purpose, CaCO<sub>3</sub> (7 wt.%, 12 wt.% and 17 wt.%, respectively) was added to the Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder mixture containing 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by weight, after the grinding process. The CaCO<sub>3</sub> doped Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder mixture was wet mixed and pulverized in the mortar after drying in the oven. Three separate powder mixtures were formed under 40 MPa and first sintered at 550 °C for 1 h and in the second stage at 1000 °C for 4 h. The density, mineralogical analysis (XRD), microstructure (SEM), adsorption isotherms and compressive strength of the samples were investigated. The effects of CaCO<sub>3</sub> agent on the mechanical and microstructural properties of the composite metal foam filter under certain production conditions were investigated. The foam material prepared from the mixture with the addition of 7% by weight of CaCO<sub>3</sub> has the highest compression strength value and a more homogeneous pore distribution. In addition, the density ratio and the pore amount are not affected much by the addition of CaCO<sub>3</sub>.

**Keywords:** Metal Foam, Ceramic, Aluminum, Alumina, Strength, Porosity, Calcium Carbonate



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
SİMGE ve KISALTMALAR.....	viii
TABLOLAR DİZİNİ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x

## BİRİNCİ BÖLÜM

### GİRİŞ

Giriş .....	1
-------------	---

## İKİNCİ BÖLÜM

### KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Kompozit Malzemeler .....	6
2.1.1. Metal Matrisli Kompozitler .....	9
2.1.2. Katkı/Dolgu Malzemeler .....	11
2.2. Metalik Köpükler .....	12
2.3. Metalik Köpüklerin Üretimleri .....	14
2.4. Metalik Köpüklerin Sınıflandırılması.....	17
2.4.1. Açık Hücreli Metalik Köpükler.....	19
2.4.2. Kapalı Hücreli Metalik Köpükler.....	19
2.5. Metalik Köpüklerin Kullanım Alanları .....	21
2.6. Alüminyum Köpük Malzemeler.....	22
2.7. Alüminyum.....	23
2.8. Alümina .....	24
2.9. Alüminyum Köpük Malzemeler.....	24

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM  
ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL YÖNTEM

3.1. Kullanılan Hammaddeler .....	25
3.2. Hammadde Hazırlama .....	25
3.3. Basma Testi.....	29
3.4. Çok Noktalı BET .....	29
3.5. Mineralojik Analiz .....	29
3.6. Mikroyapı Görüntüleme .....	29
3.7. Yoğunluk .....	29

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM  
ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Basma Testi Sonuçları .....	31
4.2. Yüzey Alan Analizi .....	33
4.3. Mineralojik Analiz .....	36
4.4. Mikroyapısal Analiz Sonuçları .....	37
4.5. Yoğunluk Testi Sonuçları .....	39

BEŞİNCİ BÖLÜM  
SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Çalışma Sonuçları .....	40
5.2. Öneriler .....	40
KAYNAKLAR .....	41

## SİMGELER VE KISALTMALAR

SEM	Taramalı elektron mikroskobu
XRD	X-ışını kristalografisi
BET	Yüzey alanı ölçümü analizi
ÇOBİLTUM	Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
rpm	Dakikadaki devir sayısı
$\mu\text{m}$	Mikrometre
MPa	Megapaskal
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat
nm	Nanometre
mm	Milimetre
dk	Dakika
IUPAC	Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği
Al	Alüminyum
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alüminyum oksit (Alümina)
SiC	Silisyum karbür
$\text{TiH}_2$	Titanyum hidrür
$\text{CaCO}_3$	Kalsiyum karbonat
Si	Silisyum
Ca	Kalsiyum
PVA	Polivinil alkol
kBN	Kübik bor nitrür

## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo No</b>	<b>Tablo Adı</b>	<b>Sayfa No</b>
<b>Tablo 1</b>	Endüstride kullanılan metal matris kompozit sistemleri	10
<b>Tablo 2</b>	Hazırlanan numunelerin bileşenler ve ağırlıkça % miktarları	25
<b>Tablo 3</b>	Farklı oranlarda köpürtücü ile hazırlanmış Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> köpüklerinin kantitatif analizleri	36
<b>Tablo 4</b>	Farklı oranlarda köpürtücü ile hazırlanmış Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> köpüklerinin deneysel yoğunlukları	39

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Kompozit malzeme üretiminde sınıflandırma	7
Şekil 2	Metalik köpük kronolojisinde yaşanan gelişmeler	13
Şekil 3	Üretim yöntemleri	14
Şekil 4	Toz metalürjisi tekniği ile üretim	15
Şekil 5	Alcan alüminyum köpük metal tekniği ile üretim	16
Şekil 6	Kapalı ve açık hücre yapılı köpük metal malzemeler	18
Şekil 7	Alüminyum köpük malzemenin hafifletme ve darbe sönümlenme amaçları için otomotiv sektöründe kullanımı	18
Şekil 8	Açık hücreli duocel alüminyum köpük gösterimi	19
Şekil 9	Kapalı hücreli alüminyum köpük gösterimi	20
Şekil 10	Alüminyum köpük malzeme özelliği olarak plato gerilmesinin ve sıkışma eğrisinin gösterimi	23
Şekil 11	Analitik terazi	26
Şekil 12	Diskli öğütücü	26
Şekil 13	Manyetik karıştırıcı	27
Şekil 14	Vakumlu etüv fırın	27
Şekil 15	Tozların yarı mamul haline getirildiği pres	28
Şekil 16	Disk şeklindeki yarı mamüller	28

<b>Şekil 17</b>	Farklı miktarlarda köpürtücü ile hazırlanmış Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> metal seramik köpüklerin basma mukavemeti sonuçları	32
<b>Şekil 18</b>	Köpürtücü olarak ağırlıkça % 7 CaCO <sub>3</sub> 'ün kullanıldığı Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> metal seramik köpük malzemenin adsorbsiyon izoterm eğrisi	33
<b>Şekil 19</b>	Köpürtücü olarak ağırlıkça % 17 CaCO <sub>3</sub> 'ün kullanıldığı Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> metal seramik köpük malzemenin adsorbsiyon izoterm eğrisi	34
<b>Şekil 20</b>	Köpürtücü olarak ağırlıkça % 12 CaCO <sub>3</sub> 'ün kullanıldığı Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> metal seramik köpük malzemenin adsorbsiyon izoterm eğrisi	35
<b>Şekil 21</b>	Farklı oranlarda köpürtücü ile hazırlanmış köpüklerin X-ışınları difraktometre grafiği	36
<b>Şekil 22</b>	Köpürtücü olarak ağırlıkça % 7 CaCO <sub>3</sub> 'ün kullanıldığı Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> metal seramik köpük malzemenin SEM görüntüsü	38
<b>Şekil 23</b>	Köpürtücü olarak ağırlıkça % 17 CaCO <sub>3</sub> 'ün kullanıldığı Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> metal seramik köpük malzemenin SEM görüntüsü	38

## BİRİNCİ BÖLÜM

### GİRİŞ

Mekanik özelliklerde olan köpük malzemeleri genelde, yüksek gaz geçirgenliğine sahiptir. Aynı şekilde yüksek termal iletkenliğe sahip olmakla birlikte, düşük ağırlıklarda yüksek dayanımı ifade etmektedir. Bu özellikler doğrultusunda köpük malzemelerin genel olarak kullanım alanları da artmaktadır. Köpük materyaller de aynı şekilde bu çerçevede incelenmektedir. Metal köpük malzemeler genel olarak yüksek düzeyde gözeneğe sahiptir. Mühendislik uygulamalarında da yeni bir malzeme olarak kabul edilmiş, faydalı özellikleri kullanılmaya başlanmıştır. Uygulama olanakları içerisinde birçok örnekten bahsedilebilir. Bunlar arasında ısı değiştirgeci veya filtre kullanılmaları yaygındır. Aynı şekilde otomotiv sektör uygulamalarında kullanımlar fazladır. Enerji sönümleyici olarak tercih edilmektedir. Diğer yandan birçok alan için yeni uygulamalar da geliştirilmektedir.

Metalik köpükler, yoğun polimerlerle, seramik ve seramik köpüklerin, metallerle elde edilemeyecek özellikler kombinasyonlarına sahiptir. Örnek olarak mekanik mukavemet ve enerji absorpsiyonu polimerik köpüklere kıyasla metalik köpüklerde daha yüksektir. Termal ve elektriği iletirler ayrıca yine polimerlere göre çok yüksek sıcaklıklara karşı mekanik özelliklerini korumaktadırlar (Lefebvre vd., 2008).

Köpük metal malzemelerin özelliklerinden yola çıkıldığında, kullanımlar için tercih edilme nedenlerine de değinilebilmektedir. Burada en önemli özellikler, hafifliği, dayanıklı olması, kendine özgü lineer olmayan deformasyon davranışları şeklinde belirtilebilmektedir. Diğer yandan bu özelliklerinin bir sonucu olarak çeşitli avantajlarından da bahsedilebilir. Bu açıdan, özellikle polimer köpük veya ağaçların kullanım imkânlarının olmadığı durumlardan bahsedilebilir. Köpük metal malzemeler böyle durumlarda, ciddi anlamda görev üstlenirler. Ancak günümüze bakıldığında firmaların hâlâ çok küçük olmasının bir sonucu olarak, köpük üreten firmaların da az olduğu bilinmektedir. Gelişmeler ve genişlemeler, yavaş bir süreci takip etmektedir. Ürün süreçlerini de daha güvenilir kılmak amacıyla köpük özelliklerinin etkisini artırıcı faktörler, bilimsel çalışmaları da bu hedef çerçevesinde desteklemeyi gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda genelde köpük stabilizasyonu iyi bilinmeli ve uygulamalarda da aynı şekilde metal köpürtmelerin fiziki özelliklerini geliştirme ya da belirleme çalışmaları hedeflenmelidir. Çünkü metal köpürtme fiziği amacıyla yapılan çalışmalar da sınırlı düzeyde

kabul edilebilir. Bu çalışmada  $Al_2O_3$  takviyesi ile mukavemetlendirilmiş süneklik ve tokluk gibi önemli özelliklere sahip Al metal köpüğünün hazırlanması aşamasında köpürtücü olarak çeşitli miktarlarda  $CaCO_3$  ilavesinin Al/ $Al_2O_3$  metal-seramik kompozit köpüğünün mekanik özellik, gözenek yapısı, mineralojik özellik ve mikroyapısal davranışları üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Araştırma kapsamında belirlenen metotlar ise, öncelikli olarak literatür taramasından ve bu kapsamda yapılmış çalışmaları inceleme sürecinden oluşacaktır. Sonraki aşamada ise kompozit köpüklerin mekanik özelliklerine olan etkileri tespit edilecektir. Böylece  $CaCO_3$  ilavesinin Al: $Al_2O_3$  kompozitlerine yönelik etkisi değerlendirilecektir. Bu yönde araştırma süreci tamamlanacak ve literatüre, kompozit köpüklerin kullanım olanaklarını artıran ilave malzeme potansiyeline ilişkin değerlendirmelerde bulunulacaktır.



## İKİNCİ BÖLÜM

### KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kompozit metal köpük malzemelerin de aynı şekilde takviye oranlarında ve boyutlarında değişimler, mekanik özellikleri dikkate alınarak geliştirilmelidir ve köpürme davranışları incelenmelidir. Bu amaçla geliştirilen birtakım çalışmalar üzerinde durulabilir. Esmaeelzadeh ve diğerleri (2006), yaptıkları bir çalışmada SiC takviyesinin AlSi<sub>7</sub> metal köpüklerin köpürme davranışı ve basma özelliklerine etkisini incelemiştir. Araştırmada, Al, Si, SiC ve TiH<sub>2</sub> saf tozları karıştırılmış, sıcak olarak preslenmiş ve 750-810 °C arasında köpürtülmüştür. Hacimsel oranı %10'un üzerinde SiC ve (3, 8, 16 µm) parçacık boyutunun etkisi incelenmiştir. AlSi<sub>7</sub> alaşımının köpürme davranışları hakkında, maksimum köpük lineer genişmesinin ve stabilitesinin SiC parçacık boyutuna ve hacimsel oranına bağlı olduğu belirlenmiştir. Seramik parçacık miktarını arttırmak ve/veya seramik parçacık boyutunu düşürme durumunda, ergiyikteki drenajı azaltmasına rağmen hücre yapısı üniformalıktan uzaklaşmıştır. Bu seramik parçacıkların alüminyum ergiyiğinin viskozitesi üzerindeki etkisine ve hücre duvar kalınlıkları oranına bağlanmıştır. Ayrıca SiC ilavesinin etkisinin köpürme sürecinde kullanılan sıcaklıkla yakından ilişkili olduğu fark edilmiştir. Bunun yanı sıra, basma yükü altındaki mekanik özelliklerde az miktarda düşüş gözlenmiştir. Köpük stabilizasyonu ile birlikte en iyi köpürme ve uygun mekanik özellikler hacimce %3 SiC (3 µm) oranına sahip ve 810 °C'de köpürtülen prekürsörlerden elde edilmiştir. Gui ve diğerleri (2000) yaptıkları bir çalışmada ise %20 SiC takviyeli AlSi<sub>7</sub>Mg 0.4 alüminyum alaşımını TiH<sub>2</sub> kullanarak köpürtmüşlerdir. Elde edilen kompozit metal köpükten (14x14x28) mm boyutlarında basma numuneleri çıkararak 2.4 mm/dk hızla basma deneyi uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda kompozit köpüğün kırılma bir basma davranışı sergilediği ve elastik bölgenin ise sadece düşük genişleme oranlarında ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir. Gerilme-genişleme eğrilerinde çökme bölgesinde inişli çıkışlı bir eğri yapısı oluşmuştur. Kompozit köpüğün mekanik özelliklerinin bağlı yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir. Deney sonucunda elastiklik modülü ve basma dayanımında bağlı yoğunluğun artmasıyla doğru orantılı artış olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kompozit köpüğün yaygın alüminyum alaşımının köpüklerden daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.

An ve arkadaşları (2021) seçici lazer eritme yöntemi kullanarak kapalı hücreli alüminyum köpük üretmişlerdir. Köpürtücü ajan olarak kullandıkları  $\text{CaCO}_3$ 'ın farklı oranlarda (ağırlıkça %5, %10 ve %15  $\text{CaCO}_3$ ) kullanılması ile alüminyum köpüğün gözeneklilik yapısı ve mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Çalışmalar sonucunda, köpürtücü madde olan  $\text{CaCO}_3$  miktarının artması ile gözeneklerin sayısı ve çaplarının arttığı ve bununla birlikte de gözenekler arası birleşmenin daha fazla olduğu sonucuna varmışlardır. Bu çalışmada kullanılan SLM teknolojisi, diğer yöntemlere oranla gözeneklilik sayısı ve boyutu daha azdır, bu da metalin yoğunluğunun daha fazla olması demektir. Fakat köpürtücü ajan miktarının artması metal matrisin mikro-sertlik değerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür (An vd., 2021).

Mirzai-Solhi ve arkadaşları (2018) sıklıkla köpürtücü ajan olarak kullanılan  $\text{TiH}_2$  yerine üretim maliyetini azaltmak için kalsiyum karbonat kullanmışlardır. Bununla birlikte titanyum hidrür yerine kullanılacak olan kalsiyum karbonat köpürtücü ajanın saf alüminyum köpürme işlemi koşulları üzerinde etkisini de incelemişlerdir. Ayrıca köpüklere eklenen Ca ilavesinin gözeneklere etkisi de incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda ağırlıkça eklenen %1,5 Ca ilavesini, maksimum %70 gözeneklilik ve minimum olarak  $0,8 \text{ g/cm}^3$  yoğunluk ile sonuçlanmıştır. Köpürtücü ajan olarak kullanılan  $\text{CaCO}_3$  miktarının % 2'ye çıkarılması ve karıştırma hızının 2000 rpm'e artırılması ile porozitenin artmasına ve hücre boyutlarının azalmasına sebep olmuştur. Titanyum hidrür yerine kullanılan kalsiyum karbonatın üretim maliyetini azaltmak için kullanılmıştır. Ayrıca köpük yoğunluğunu azaltmak ve ortaya çıkan zararlı hidrojen gazı oluşumunu ortadan kaldırmak için kullanılan kalsiyum karbonat başarılı bir köpürtücü ajandır (Mirzaei-Solhi vd., 2018). Alüminyum köpükler için morfolojik özellikler önemlidir ve homojenlik üretilen köpüğün kalitesini arttırmaktadır. Yapılan literatür çalışmalarında gözeneklerin küresel olması basınç dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple küresel gözenekler elde etmek amacıyla Bin ve arkadaşları (2007) küresel gözenekli köpükler elde etmek için bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışma için yer tutucu olarak farklı boyutlarda karbamid partiküller seçmişlerdir. Kullanılan karbamid parçacıkları ile köpükteki gözenek boyutlarının ve yoğunluğun istenilen şekilde amaca uygun olarak homojen bir dağılım elde etmek mümkündür. Elde edilen alüminyum köpüklerde artan gözenek boyutu ve bağıl yoğunluk ile birlikte basma gerilmesi eğilimi artmıştır (Bin vd., 2007).

Alüminyum köpüklerde köpürtücü ajanlar olarak hidrit veya karbonatlar kullanılır fakat karbonatlar kullanılarak üretilen köpükler hidritlerle üretilen köpüklere kıyasla maliyeti daha uygundur ve ayrıca daha güvenlidir. Yapılan bir çalışmada alüminyum köpüklerde hidrit takviye olarak silisyum karbür kullanılmış ve kalsiyum karbonat ve titanyum hidrür köpürtücü ajanlar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuç olarak kalsiyum karbonat kullanılarak üretilen alüminyum köpüklerin titanyum hidrür kullanılarak üretilen metal köpüklerden daha hafif olduğu ve yüksek basınca karşı dayanımı daha yüksek olduğu görülmüştür. Titanyum hidrür köpüklerinin gözeneklilik yüzdesi %95-98 aralığında olup daha fazladır. Gözeneklilik boyutu ise daha fazla ve keskin bir şekle sahiptir. Silisyum karbürün eklenmesi ise alüminyum köpüklerde basınç dayanımını daha da arttırdığı görülmüştür (Thulasikanth ve Padmanabhan, 2021).

Kara (2012) çalışmasında, sandviç kompozitlerin her geçen gün farklı alanlarda kullanımlarının yaygınlaşması sonucunda yapılan genel değerlendirme, sandviç kompozitlerin mekanik davranışlarını belirlemektir. Çalışma ile beraber sandviç kompozitin mevcut ağırlıklarına oranla rijitlikleri ve mukavemetleri yüksek gözlemlenmiştir. Ayrıca araştırmada basma ve eğilme test yöntemleri uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda, farklı oryantasyon açılarında incelemeler yapılmıştır. Bütün oryantasyon açıları için değerlendirme yapıldığında, akma mukavemeti değerleri genel olarak sandviç yüzeyi için uygulanan testlere oranla fazla düzeydedir. Ayrıca ayrı ayrı alüminyum köpüğün akma dayanımından daha fazla olduğu belirlenmiştir. Onuklu (2015) çalışmasında ise, seramik katkı alüminyum esaslı köpük kompozit üretimi yapılmış ve karakterizasyonu incelenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla ise çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle alüminyum ve mekanik alaşımlama sonucunda üretilen alüminyum 2024 alaşımı olmak üzere, iki çeşit matris malzemesine, kübik bor nitrür (kBN) ve alümina ( $Al_2O_3$ ) katkıları yapılmıştır. Böylece ise kompozit köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Diğer yandan geleneksel köpürtücü malzeme kullanımından ziyade, borik asit kullanımına yönelmişlerdir. Matris malzemelerine seramik ilaveleri, %2, %5 ve %10 oranlarında yapılmıştır. Daha sonra bilyalı değirmende öğütme işlemi uygulanmıştır. Oluşturulan kompozitler ise ağırlıkça %50 oranında, borik asit eklenip karıştırılmıştır. 150 ve 300 barlık farklı basınçlarda presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu durumun yanı sıra, polivinil alkol bağlayıcılığını tespit etmek amacıyla bazı numunelere köpürtücü malzeme ilavesinden önce PVA kaplaması yapılmış ve kaplanarak kurutulmuştur. Preslenen numuneler, sinterleme işlemine tabi tutulmuş ve borik asit uzaklaştırılarak köpük

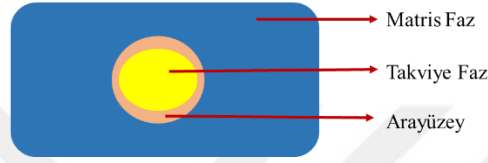
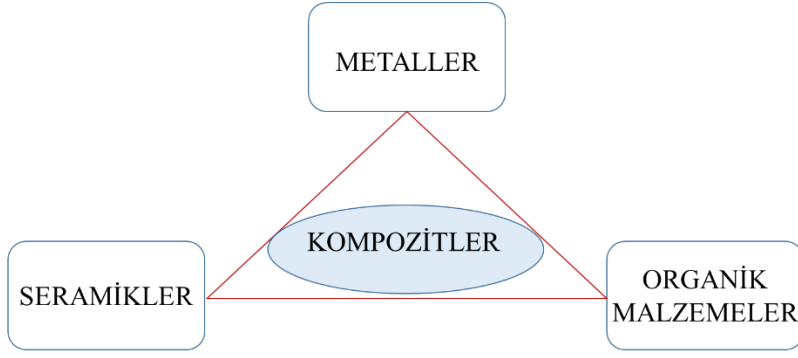
elde edilmiştir. Burada sinterleme sıcaklığı da önemlidir. Alaşımlar için bu değer 550 °C, alüminyum için ise 620 °C'dir. Bu çalışma sonucunda borik asitin de köpürtücü bir malzeme olarak kullanılabilceği belirlenmiştir. Bu kapsamda özellikle de ağırlıkça %10 kBN katkılı alüminyum esaslı köpükler, mekanik özelliklerde önemli bir gelişme olarak yakalanmıştır.

Yapılan farklı bir çalışmada TiH<sub>2</sub> ve CaCO<sub>3</sub> olmak üzere iki farklı köpürtücü ajanın bir arada kullanılarak Al-SiC metal matrisli kompozit köpükler oluşturulmuştur. Oranlar olarak ağırlıkça %3 CaCO<sub>3</sub> ve %0,6 TiH<sub>2</sub> kullanılmıştır (Ghose vd., 2010). Başka bir çalışmada Al köpüklerde köpürtücü ajan olarak ağırlıkça %1 TiH<sub>2</sub> ve %3 CaCO<sub>3</sub> kullanılmış ve gözeneklilik açısından değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda TiH<sub>2</sub> kullanılan örneğin gözenegin iç yüzey tabakasındaki oksit kalınlığı 10-15 nm arasında değer alırken, CaCO<sub>3</sub> kullanılan örnekte bu değer 90-125 nm arasında olduğu görülmüştür. İlave oksit tabakası ve seramik parçaların etkisiyle alüminyum bazlı köpüklerde CaCO<sub>3</sub> kullanabilmesine fırsat verdiği görülmüştür. Literatürdeki çalışmalarını da destekler nitelikte CaCO<sub>3</sub> ile gözeneklerin daha stabil ve mukavim olduğu sonucuna ulaşılabilir (Paulin, 2015).

Bu doğrultuda köpüklerin mekanik özelliklerinde farklı malzemelerin de kullanılabilceği ifade edilebilmektedir. Bu araştırma kapsamında da bu açıdan bir değerlendirme dikkate alınacaktır.

## **2.1. Kompozit Malzemeler**

Kompozit malzemeler, birbiri içerisinde çözünmeyen en az iki farklı malzemenin makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Burada temel amaç, mevcut bileşenlerde tek başına olmayan bazı özelliklerin geliştirilmesini sağlamaktır. Bunlar ise dayanım, esneklik, hafiflik olarak belirtilebilmektedir. Bu şekilde malzemelerin geliştirilmek istenmesinde ilk hedef ise, sanayi ve teknolojide kullanım kolaylığının sağlanmasıdır. Özellikle de uçak ve otomotiv sanayisinde uygulamalar yaygındır (Zor, 2018). Buna göre ise kompozit malzeme üretimindeki malzeme sınıfları, Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Kompozit malzeme üretiminde sınıflandırma (Kaya, 2016)

Kompozit malzemelerin kullanımları doğrultusunda geliştirilen çalışmalar arasında birçok alan için analizler ve uygulamalar yapılmaktadır. Bu hedef doğrultusunda kompozit malzemeler aynı şekilde birtakım özelliklere sahiptir. Bunlar şu şekilde sıralanabilmektedir (Sönmez, 2009):

- Kompozit kavramı, karışım anlamına gelmektedir. Ancak çözünen ve çözen bileşeni olarak oluşmamaktadır.
- Kimyasal açıdan kompozit bileşenler birbirilerini etkilememektedir.
- Malzemelerin birbiri içerisinde çözünme durumu söz konusu olursa şayet, bu tür malzemeler alaşım şeklinde ifade edilir.
- Nanometre düzeyinde partiküller oluşursa şayet, bu tip kompozitler nano kompozit olarak adlandırılır.
- Kompozitler, matris adı verilen ana malzemedan ve takviye elemanı şeklinde ifade edilen mukavim malzemedan oluşmaktadır.
- Kompozit malzemenin mukavemeti ve yük taşıma özellikleri, takviye malzeme ile sağlanmaktadır. Matris özellikler ise, plastik deformasyonun yaşanabileceği ya da çatlak ilerlemelerinin olabileceği durumları önleme amaçlıdır.

Kompozit malzemeler ve kullanım amaçları açısından değerlendirilen unsurlar, bu süreçte maddeler halinde sıralanan özelliklerinden yola çıkılarak performansın artırılmasını hedefleyen uygulamalara ilişkin dikkate alınır. Aynı şekilde özelliklere ilişkin gelişmeler, yüzey kalitesini iyileştirme, üretimi hızlandırma ve kolaylaştırma odaklıdır (Scwartz, 1996). Kompozit malzemelerin dış ve çevresel etkilere yönelik korunmasını sağlama ya da kompozit malzeme üzerinde yükün takviye elemanlarına iletilmesini destekleme başarısı, malzemeyi birçok yönden avantajlı konuma ulaştırmaktadır. Diğer bir ifadeyle elde edilen avantaj, kompozit malzeme üzerine gelen yükün takviye elemanlarına iletilmesini ya da kompozit yapının bir arada olmasını sağlamaktır (Şahin, 2006). Bu açıdan bakıldığında kompozit malzemelerin niteliği, bileşenlerin özelliklerinden daha farklı bir malzemenin ortaya çıkması ve dolayısıyla da bu malzemenin özelliklerinin birçok açıdan işlevsellik göstermesi olarak yorumlanabilir. Söz konusu bu işlevsellikler ise Güneş (2010) tarafından şu şekilde sıralanmıştır:

- Yüksek oranda mukavemet,
- Aşınmaya karşı dayanıklılık,
- Yorulmaya karşı dayanıklılık,
- Kırılma tokluğu,
- Korozyona karşı dayanım,
- Yüksek sıcaklıklarda etkin performans,
- Düşük maliyet,
- İletkenlik açısından hem ısı hem de akustik nitelik,
- Estetik açıdan görünüm,
- Üretim açısından kolaylık.

Kompozit malzemelerin kullanım alanlarına yönelik değerlendirme yapıldığında ise Gülmez (2018), günlük ve ticari hayatta, askeri alanda, uzay ve havacılık sanayisinde, silah, roket ve diğer malzemelerin kullanımları içerisinde tercih edildiğini ifade etmektedir. Başçı (1999) ise kompozit malzemeleri belirli şekillerde sınıflandırmaktadır. Bunlar ise şu şekilde sıralanabilir:

- Temel malzemeye ilişkin kombinasyon sınıflandırması: Metal-organik ya da metal-inorganik,

- Bileşen fazlarına ilişkin sınıflandırma: Matriks sistemleri ya da tabakalı yapılar,
- Bileşen dağılımlarına ilişkin sınıflandırma: Sürekli ya da süreksiz,
- Fonksiyonlarına göre sınıflandırma: Yapısal ya da elektriksel.

Kompozit malzemelere ilişkin sınıflandırmalar genelde malzemelerin genel özelliği doğrultusunda geliştirilmektedir. Örneğin Schwartz (1984), fiberli, levhasal ya da partikül kompozit şeklinde sınıflandırmayı yapmıştır. Ancak temelde malzemeler, metal matrisli kompozitler ya da katkı/dolgu malzemeler şeklinde değerlendirilebilmektedir. Bu araştırma özelinde sınıflandırma şekilleri, bu kapsamda incelenecektir.

### **2.1.1. Metal Matrisli Kompozitler**

Ürünlerin kaliteli ve düşük maliyetle üretimleri önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle de rekabet edebilme açısından endüstride çoğu firma, mühendislik uygulamalarına bağlı olarak daha düşük yoğunluklu ve yüksek dayanımlı ürün üretimlerini tercih etmektedir. Bu amaçla ise metal matris kompozitler, klasik alaşımlar için iyi bir alternatiftir. Metal alaşımlar ve kullanımlar açısından ise grafit, silikon karbür ve alümina ile yüksek dayanımlı seramik fazlar önemli bir performans göstermektedir (Uygur ve Saruhan, 2004). Metal matrisli ürün üretimleri açısından gelişmeler, Evert ve diğerleri (1991) tarafından da ifade edildiği üzere, 1970'lerden sonra önemli bir yer edinen metal matrisli kompozitler, çeşitli mühendislik alanı için uygulanabilir form kazanmıştır. Bu amaçla birtakım çalışmalar, özelliğini ve niteliğini iyileştirme odaklıdır. Yeni üretim teknikleri açısından malzeme geliştirilmesini, kullanımını hedeflemektedirler. Araştırmacıların bu yönelimleri arasında metal matrisli kompozitlerin etkinliği, daha düşük maliyetlerle üretimleri sağlama avantajı olarak da kabul edilebilir. Bir başka açıdan ise metal matrisli kompozit kullanımları ile elde edilen avantajlar, Uygur ve Saruhan (2004) tarafından, çekme dayanımı ve elastik modülün yüksek olmasına, uygun çarpma ve tokluk değerine, tasarımlara, üretimlere, birleştirmeye, şekillendirmeye, talaşlı üretim için uygunluğuna yönelik değerlendirilmiştir. Diğer yandan Tablo 1'de, endüstride kullanılan metal matris kompozitleri ile ilgili bilgi verilmiştir.

Tablo 1

Endüstride kullanılan metal matris kompozit sistemleri (Uygur ve Saruhan, 2004)

<b>Takviye</b>	<b>Matrisler</b>
Boron lifi	Al, Ti
Grafit lifi	Al, Mg, Cu
Alümina lifi	Al, Mg
Silisyum Karbür lifi	Al, Ti
Silisyum Karbür kedi bıyığı	Al, Mg
Silisyum Karbür ve Alümina Parçacık	Al, Mg, Ti

Metal matrisli kompozitlerin sundukları avantajlar, kullanım açısından yaygınlığın kazanılmasına ortam hazırlamaktadır. İyi mekanik özelliklerle sınırlı olmayan ve hafifliğiyle ön planda yer alan metal matrisli kompozitler, birçok sistem bileşeniyle de kullanımlarda yer almaktadır. Görener (2011) tarafından metal matrisli kompozit kullanımını, teknolojinin ilerlemesiyle birçok alan için de yeni çalışmalarda bir gereklilik olarak değerlendirilmiştir. Artık konvansiyonel malzemelerin ötesinde bir kullanım ihtiyacının olması, bu açıdan metal matrisli kompozit kullanımlarını da artırmıştır. Bu malzemelerin üretilmesinde işlemler, seramik, karbon ya da metalik takviye aracılığıyla olmaktadır. Ayrıca bu sistemler, takviye elemanlarını, sürekli ve süreksiz olarak da içermektedirler. Metal matrisli kompozitler için bu tür üretimler, kompozite bağlı özelliklerin geliştirilmesine de yardımcı olmaktadır. Buna göre ise malzemelerin özellikleri, takviye sistemleri ya da bileşenlere yönelik gelişmektedir. Bu amaçla kullanılan takviyelerin de performansı ürün için dikkate alınmalıdır. Ayrıca bu malzemelerin üretilmesinde çeşitli yöntemler vardır. Bunlardan toz metalürjisi yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozit malzemelerde aynı şekilde, takviye elemanının düzenli veya düzensiz şekilde dağıtılmasına bağlı değerlendirmeler de vardır. Bu konuda Köseadağ ve Ekici (2019), partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeleri incelemiştir. Genellikle seramik takviye elemanlarının dağıtımları sonucunda oluşturulan bu malzemeler, düzenli veya düzensiz geometri bulundurmaktadır. Diğer yandan İbrahim ve diğerleri (1991), partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin genel özelliklerine bağlı araştırma yapmışlardır. Buna göre, izotropik özellikleriyle bu tür malzemeler, diğer metal kompozit malzemelerinden daha çok performans kazanılmasına olanak tanımaktadır.



Böylece metal kompozit malzemelerin üretimleri ya da birçok sistemler içerisinde üretilmesi gibi konular, farklı birer çalışmalar olarak kabul edilebilir. Daha nitelikli ve etkin malzeme üretimleri, birçok konu için araştırma yapmayı gerektirmektedir.

### **2.1.2. Katkı/Dolgu Malzemeler**

Katkı ve dolgu malzemeleri, kullanım amaçlarına göre pekiştiriciler şeklinde de ifade edilebilmektedir. Dolgu malzemelerinin kullanımı, kompozit malzeme özelliklerine göre belirtilebilmektedir. Örneğin Şardan (2009) tarafından yapılan çalışmada, plastiklerin pekiştirilmesi amacıyla karbon, bor, cam, kevlar fiberleri ve bu malzemelerden üretilen çeşitli malzemelerin yanı sıra, karbonatlar, silikatlar, bazı oksitler gibi bileşenler de dolgu malzemeleri olarak kullanılabilir. Buna göre malzemenin özelliklerine göre tercihler vardır. Dolgu ilaveleri, ürünün kullanım performansını artırmak için elverişli malzemelerdir. Bu amaçlar dikkate alındığında malzemelerin potansiyelleri ise genel çerçevede, mükemmel parça elde edilmesi için kontrollerin sağlanmasını gerektirmektedir. Bu gelişmeler dikkate alındığında bir başka çalışma ise, Şahan (2010) tarafından kompozitlerin yapay kemik olarak kullanımına ilişkin incelenmiştir. Bu çeşit kompozitler genelde, doğal kemiğin yapısal özelliğindedir. Ancak dolgu malzemesinin nitelikleri açısından değerlendirmeler dikkat çekicidir. Seramik dolgu ile polimer matrisi arasında ara yüzey etkileşimleri yetersiz olduğu zaman, zayıf özelliklerde kompozit malzeme üretimleri gelişmektedir. Bu nedenle kullanılan malzemeler ve dolgu malzemesinin de niteliklerine bağlı olarak birçok açıdan karakteristik yön kazandırmaktadır.

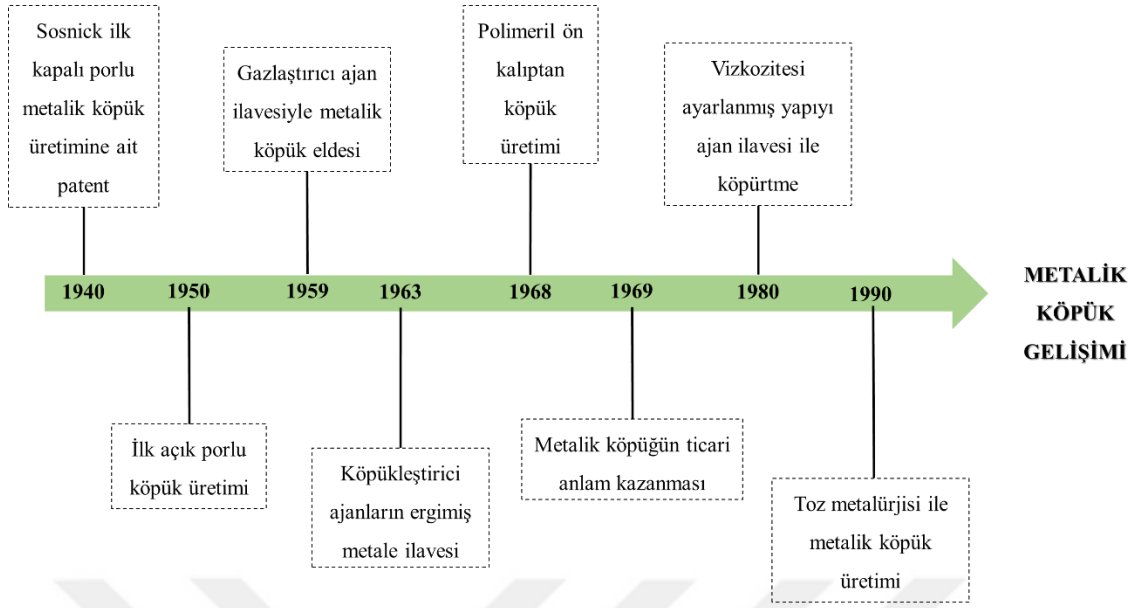
İlhan ve Feyzullahoğlu (2019) çalışmasında kompozitler için dolgu maddeleri kullanımları ise malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla incelenmiştir. Çalışmalarında, cam elyaf takviyeli polyster kompozit malzemesinin üretim süreçlerinde, iyi mekanik dayanımlar, ekonomiklik, korozyonlara dayanım gibi birçok yönden önemli bir yer tutan malzemenin niteliğini artırma amacıyla çeşitli dolgu malzemeleri kullanmışlardır. Bu amaçla kullanılan dolgu malzemesi arasında, cam kürecik, alümina, grafit gibi malzeme aracılığıyla üretimler gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonucunda takviye ve dolgu maddeleri kullanımları ile elde edilen kompozit malzeme niteliklerinde iyileştirici özelliklerin geliştiği belirlenmiştir. Diğer yandan maliyet açısından da önemli bir avantaj kazandırmaktadır. Bu çalışmalar doğrultusunda dolgu ya da katkı malzemeleri, kompozit malzemelerin üretimleri

açısından önemli bir yer tutmaktadır. Günümüzde artık saf malzemelerin performanslarının istenilen kriterleri karşılayamaması ile beraber başlayan sorunlar, kompozit malzemelerin üretimlerinde farklılaştırılmış malzeme kullanımlarını gerekli göstermiştir. Yapılan çalışma ve araştırmalar da önemli birer gelişmelerdir. Örneğin Zhang ve diğerleri (1999) tarafından geliştirilen çalışmada, seramik takviyeli kompozit malzemelerin geliştirildiği alüminyum malzemelerin bileşenleri, ergitme kaynak metodu sırasında sorunlar meydana getirmektedir. Bu nedenle dolgu malzemesi kullanılarak sorunların çözümlenmesi hedeflenmektedir. Buna göre temel sorunun ergitme sırasında malzemenin etkin performans gösterememesi ve dolgu malzemesinin bu durumda dayanıklılığı artırmak için önemli bir unsur olarak görülmesine işaret edilebilmektedir. Bu şekilde ise, kalite açısından yaşanan problemlerin giderilmesi sağlanabilir. Dolgu malzemesi kullanımı bu açıdan önem taşımaktadır. Bu şekilde kompozit malzeme üretimlerinde özellikleri iyileştirilmiş malzemeler de aynı yönde artırılmıştır.

## **2.2. Metalik Köpükler**

Köpük malzemelerin temelde önemi ve özellikleri, hücre sel mukavemetin metallere taşınması ile gelişir. Bu işlemi ise genel olarak organik yük taşıyıcılarını taklit ederek yapar. Bu açıdan sahip olduğu eşsiz özellikler vardır. Malzemeyi daha ideal bir malzeme niteliğine dönüştürür. Köpük metaller birçok alan ve uygulamalar için önemli bir potansiyele sahiptir. Bu kapsamda özellikle de otomotiv, askeri, havacılık, transport alanlarında ve uygulamaları içerisinde kullanımlar yaygındır (Sığırtmaç, 2010). Örnek olarak kapalı gözeneklere sahip köpüklü alüminyum metaller oldukça hafif özelliktedir. Düşük ağırlıkta olmaları ve bunun yanında yüksek sertliğe sahip olmaları otomobil sektöründe kullanılır olmasını sağlamaktadır (Fathi, 2012).

Metalik köpüklerin üretim süreçlerinde tarihsel gelişimler ise bu tür kullanımların ve gerekliliğin sonucu olarak geliştirilmiştir. Bu doğrultuda metalik köpüklerin elde edilmesi amacıyla yapılan çalışmalar ve uygulamalar ise Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Metalik köpük kronolojisinde yaşanan gelişmeler (Güven, 2011)

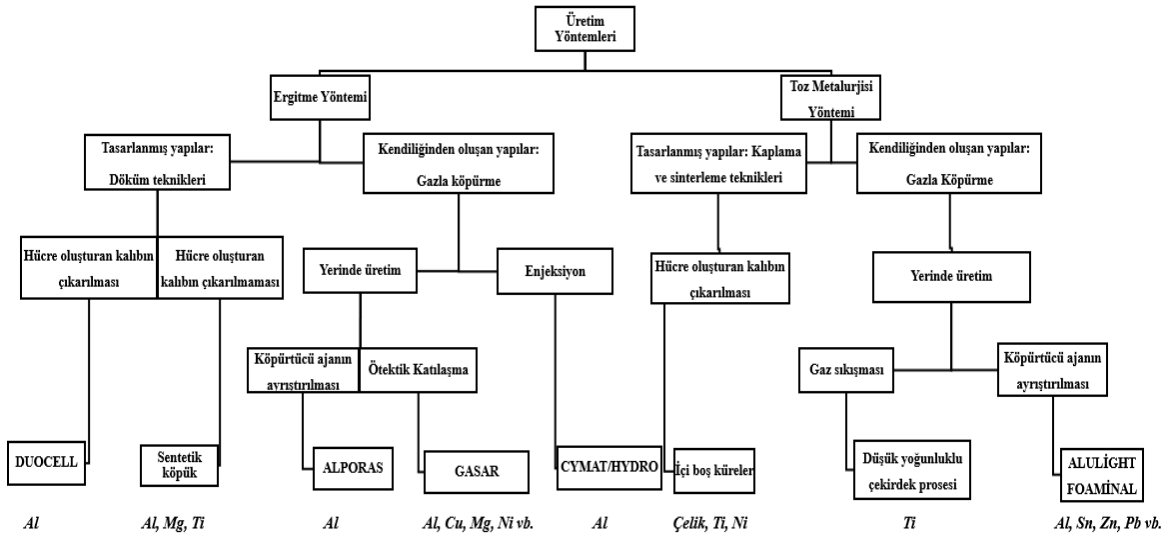
Metalik köpük malzemeler ve kullanım imkânları açısından yapılan değerlendirmeler, teknolojinin gelişmesinin bir sonucu olarak üretilebilen malzemelerdir. Bu malzemeler, %75-90 oranlarında gözeneye sahip olan saf metal veya alaşım özelliğindeki yapıdan oluşmaktadır. Farklı işlevselliklere bağlı olarak bu malzemelerin performansları, gözenekli yapılarından kaynaklı olarak özgül ağırlıkları, iyi düzeyde enerji absorbe edebilme kabiliyetleri, yüksek dayanımlarda olmalarının sonucu olarak avantajlı malzemeler grubu arasında bulunur (Yavuz vd, 2011).

Malzemelerin kullanım niteliklerine uygun yapıda üretimler, çeşitli mühendislik çalışmaları için önemli kabul edilmektedir. Alüminyum esaslı metalik köpükler için bu konuda inceleme yapıldığında, özelliklerin sonucu olarak kullanım alanlarının artış gösterdiği ifade edilebilir. Tercih edilmesinde genel niteliği ise dayanıklılıktır. Bu tür köpük malzemeler aynı şekilde, darbe enerjisini şekil değiştirerek plastik enerjiye dönüştürebilmektedir. Köpüklü malzeme grupları içerisinde aynı şekilde bu malzemeler, birçok metal grubundan da daha fazla oranda enerji absorbe edebilmektedirler (Davies ve Zhan, 1983). Bu açıdan değerlendirildiğinde metalik köpükler, birçok özellikleri ve avantajı ile karşımıza çıkmaktadır. Metal köpük yapısı içerisinde katı metal ve hacimce gaz oranı yüksek gözenekler vardır. Kapalı hücre köpükleri ve açık hücre köpükleri olarak adlandırılan bu gözenekler, bu tür köpük malzemelerin gözenekleşme oranlarının da fazla olduğunu ifade etmektedir. Bu kapsamda gözeneklerin oranları ise %80'den fazladır (Sezer, 2009). Bu tür

malzemelerde köpük yapma metotları farklı yöntemlerle üretimlerin yapılmasını destekler. Buna göre köpükleştirme ile geliştirilen işlemler, sıvının içerisinde bulunan gaz balonunun kaçmasını önleme ve sıvının soğutulmasıyla sıvı köpüğünü stabil duruma ulaştırması şeklinde belirtilebilmektedir (Duarte ve Banhart, 1983).

### 2.3. Metalik Köpüklerin Üretimleri

Metalik köpüklerin üretimleri amacıyla geliştirilen çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler çok farklı şekilde sınıflandırılabilir. Şekil 3’de detaylı olarak yer almaktadır.



Şekil 3. Üretim yöntemleri (Körner ve Singer, 2000)

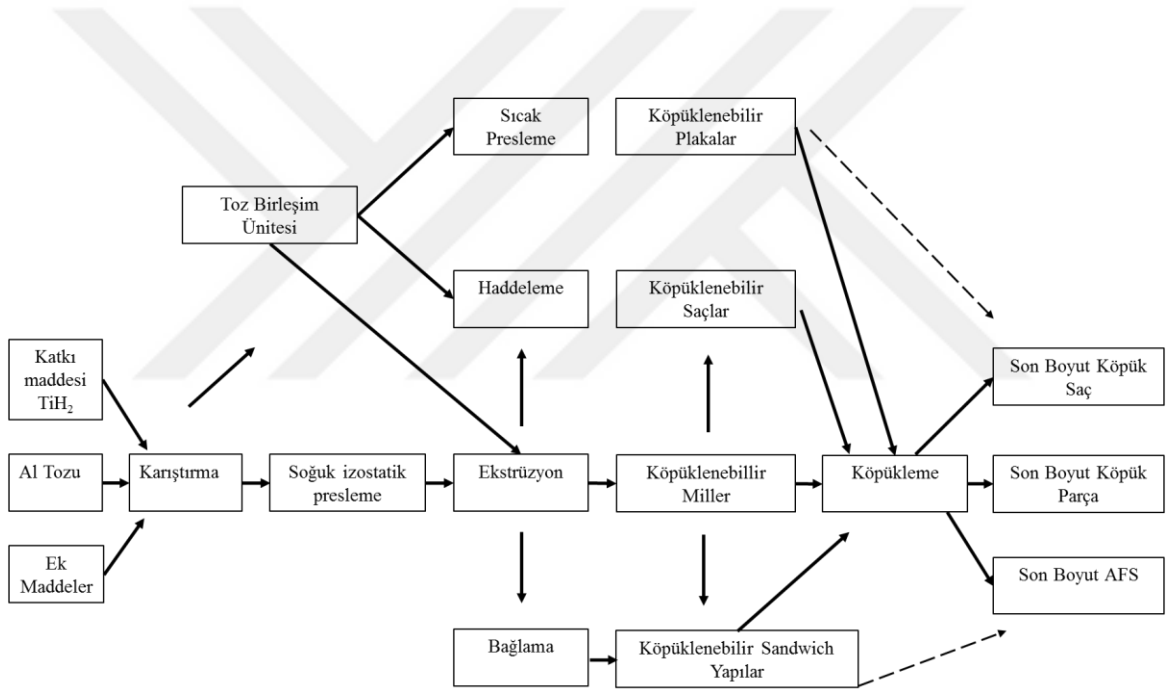
Her üretim yönteminin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Üretim yöntemleri kendine has hücre yapısı topoloji ve yoğunluk aralığını kapsar. Bazı yöntemlerde karmaşık şekiller elde edilirken bazılarında büyük levhalar elde edilir ve bazılarının da maliyetleri düşüktür. Bu kadar çok yöntem varken gözenek oluşturma esasları iki şekilde oluşabilmektedir. Bu yöntemler kendi kendine ve ön yapısal olarak denilebilmektedir.

Kendi kendine oluşan gözenekler de fizik yasalarına bağlıdır, tahmin edilemez, kontrol edilemez. Saf metallerin yüzeylerinde enerjilerinin yüksek olması ve akışa karşı dirençlerin az olması nedeniyle köpürmediğinden hücre duvarlarının daha kararlı olması için Silisyum ve Alümina gibi kararlı yapıya geçirecek ve viskoziteyi arttıracak katkı elemanlarına ihtiyaç duyulur. Ön yapısalda ise hücre duvarları kalıplar yardımıyla kararlı olduğundan

yüzey enerjisini düşürecek viskoziteyi arttıracak elemana ihtiyaç olmamaktadır (Körner ve Singer, 2000).

En çok kullanılan ve ticari olan yöntemler toz metalürjisi, ergitme yöntemi, içi boş küreler yöntemi, Cymat/Hydro, Alporas, Alulight/Foaminal teknikleridir.

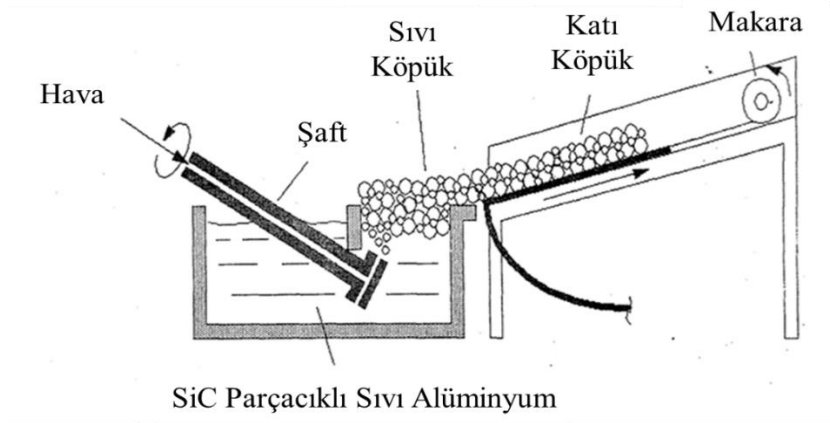
Toz metalürjisi yöntemi ile üretim metodu, yaygın şekilde tercih edilmektedir (Simone ve Gibson, 1998). Bu teknik, toz metalürjisi tekniği şeklinde ifade edilse de genel olarak sıkılaştırılmış-toz köpükleme tekniği olarak bilinmektedir. Bu teknik ile üretim metodu ise Şekil 4’de gösterilmektedir.



Şekil 4. Toz metalürjisi tekniği ile üretim (Avarisli ve Uğuz, 2004)

Köpük malzeme üretiminde dikkate alınması gereken faktörlerden birisi, malzemede mekanik özelliklerdir. Bu açıdan malzemelerde gözenekli ve köpük yapılar dikkate alınarak üretim yapılmalıdır. Polimer malzemelerin veya seramik malzemelerin nitelikleri önemli bir yer tutmaktadır. Polimer malzemelerin yeterince rijit olması önem taşımaktadır. Seramik malzemelerin ise kırılğan bir yapıda olmamasına dikkat edilmelidir (Feng vd., 2002). Bu tür değerlendirmeler ve özelde ise çalışmalar, köpük metal malzemelerin üretim metodlarında birçok tekniğin de kullanılan malzemeye göre değiştiğini göstermektedir. Uygun malzeme kullanımları önemli yer tutmaktadır. Bu konuda Elbir ve diğerleri (1999), köpük malzeme

üretimini 1970'lerle başladığını ve üretim metotlarının da sıvı metali doğrudan köpük hale getirme, hassas döküm işlemleri, dolgu malzemesi kullanılarak sentetik köpüklerin üretimi, toz metalürjisi metotları, katı-gaz ötektik katılaşması gibi uygulamalarla yapıldığını ifade etmektedir. Bu açıdan köpükleştirme işlemleri ve uygulamaları birçok açıdan değerlendirme kazanmaktadır. Sıvı metalden direk köpük üretimine ilişkin bir uygulama örneği ise Şekil 5'de sunulmaktadır.



Şekil 5. Alcan alüminyum köpük metal tekniği ile üretim (Elbir vd., 1999)

Şekilde gösterilen metot, sıvı metale gazın üflenmesiyle köpük metalin oluşturulması şeklinde belirtilebilmektedir. Köpükleşme işlemi, köpük yapıcı malzemenin kullanımıyla olmaktadır. Köpük yapıcı malzeme kullanımında titanyum hidrat ( $TiH_2$ ) kullanılmaktadır. Köpük malzemelerin üretimlerinde bu açıdan birçok metottan bahsedilebilir. Burada işlem süreçleri ve istenilen özelliklerde ürün üretimlerinin sağlanması açısından değerlendirmeler yapılmalı ve çalışma süreçleri geliştirilmelidir.

Metalik köpük üretiminde kullanılan yöntemlerden biri olan ergitme yöntemi uygun maliyetle yapılabilmektedir. Yöntemde kullanılan alaşım elementleri ve takviye edici partiküllerin ilavesi ile metal köpüğün mekanik özelliklerinin kontrol edilmesi mümkündür (Fathi vd., 2012). Ergitme yönteminde takviye edici partiküllerin ortalama boyutları 5-20  $\mu m$  arasında değişmektedir. Genelde hava ile yapılan gaz enjeksiyonu özel olarak tasarlanan kılcal borular fritler ile yapılmaktadır (Banhart, 2006a). Gaz enjeksiyonu sırasında eriyikte oluşan gaz kabarcıkları yüksek yoğunluğa sahip sıvıda kaldırma kuvveti sebebiyle hızlıca yüzeye çıkar. Bu artış eriyik metalin viskozitesinin artırılması ile engellenebilir. Bu durum

ise eriyik içerisinde parçacıklar oluşturan seramik tozları, alaşım elementleri eklenerek kabarcıkların içerisinde kalması sağlanabilir (Banhart ve Baumeister, 1998b).

İçi boş küreler yöntemi ile köpük üretimi metodu iyi derece enerji absorpsiyonu, ısı transfer özellikleri, yüksek mukavemet/ağırlık oranları ile birlikte düşük yoğunluklarda metalik köpükler üretilebilir. Kullanılan kürelerin geometrisine bağlı olarak gözenek boyutları önceden tahmin edilerek istenilen morfolojiye ve özelliklere göre üretilmesini mümkün kılması bu yöntemi avantajlı kılmaktadır (Yıldırım, 2018; Lim vd., 2002).

Cymat (Kanada)/Hydro (Norveç) yönteminde başlangıçta metal matris kompozit ve katkı maddeleri eritilir ve havanın verildiği bir tandişe aktarılır. Ortaya çıkan köpük transfer edilir gözeneklilik ve yoğunluk ters orantılıdır sürekli köpük paneller üretimi için uygundur (Körner ve Singer, 2000).

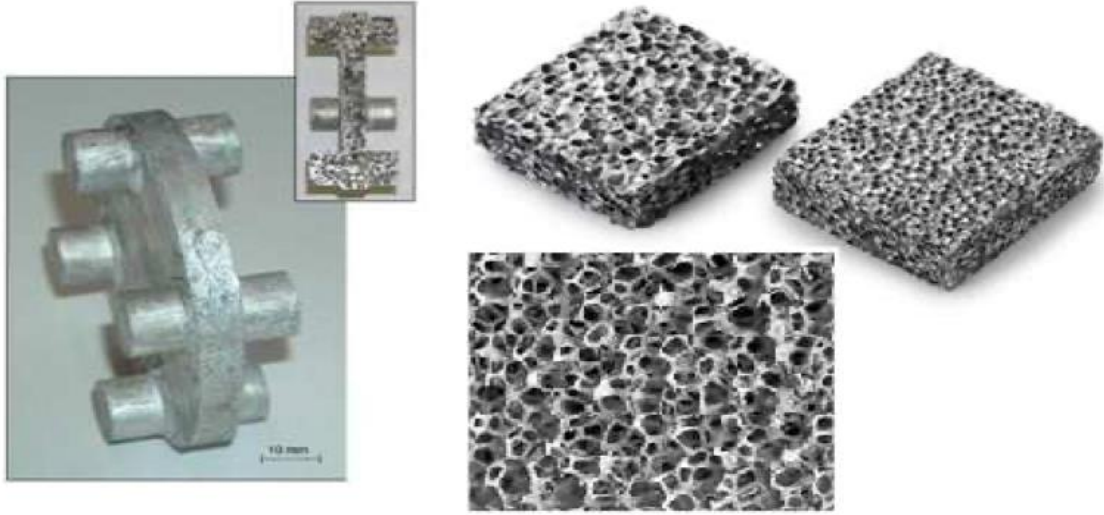
Alporas yöntemi ise bir döküm işlemidir. Burada yüzey enerjisini düşürmek viskoziteyi ayarlamak amacıyla erimiş alüminyuma 680°C'de ve %1,5 oranında kalsiyum eklenir ve normal hava şartlarında 6 dakika karıştırılır, kalsiyumun yüksek oksijen ilgisi oksijenleşmeyi hızlandırır. Köpürtücü olarak %1,6 titanyum hidrür eklenir ve kalıp dolar ve köpüğün soğutulması sağlanır (Körner ve Singer, 2000).

Alulight/Foaminal yöntemi temel olarak toz metalürjisi yöntemine dayanmaktadır. Metal tozları bu malzemeleri köpürtücü malzeme ile karıştırılır ve preslenerek sıkıştırılıp şekil verilir. Bu yöntem de daha sonra ısıtma işlemi uygulanır köpürtücü madde uzaklaşmak isteyip gaz salınımı ile metal tozlarını genişlemeye zorlar.Köpük parçalar kabukları yoğunlaşır. Genişleyen köpük enjekte edilmeye elverişli oldukları için çok karmaşık şekiller elde edilebilmektedir (Körner ve Singer, 2000).

#### **2.4. Metalik Köpüklerin Sınıflandırılması**

Köpük malzeme çeşitleri, açık ve kapalı hücre olarak iki ayrı şekilde gruplandırılır. Metalik köpük çeşitlerinin kullanılmasına ilişkin değerlendirme genelde, kullanım alanlarına yöneliktir. Endüstrideki mukavemet özelliklerine bağlı kalındığında bu tür çalışmalar ve de uygulamalar, malzemenin hücre yapısına ilişkin incelenebilir. Örneğin hafif olmasına ya da

enerji sönümlenme özelliklerine bağlı kalınarak malzemeler, ağır metallerin yerini tutabilen bir öneme sahiptirler. Hafiflik ve enerji sönümlenme ihtiyaçlarına bağlı kalındığında birçok değerlendirme yapılabilir. Örneğin araçlarda yakıt verimliliği de sağlanabilmektedir. Hücre yapılı alüminyum köpüklerin özellikleri bu durumda etkisini daha belirgin şekilde gösterir (Sığırtmaç, 2010). Bu açıdan gösterimler ise Şekil 6 ve Şekil 7’da sunulmaktadır.



Şekil 6. Kapalı ve açık hücre yapılı köpük metal malzemeler (Alulight International GmbH, 2006)



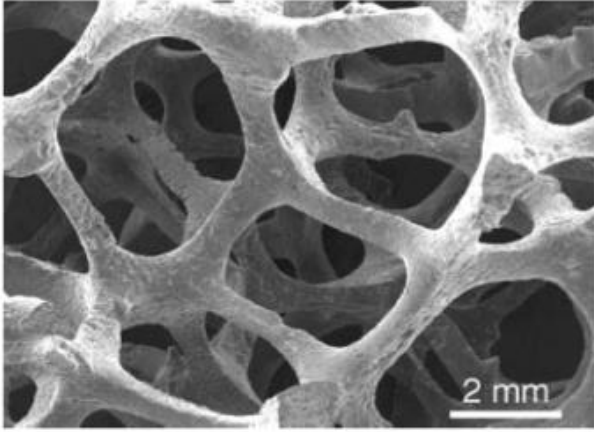
Şekil 7. Alüminyum köpük malzemenin hafifletme ve darbe sönümlenme amaçları için otomotiv sektöründe kullanımı (Alulight International GmbH, 2006)



Şekillerde görüldüğü üzere metal köpük malzemeler, hücresel gözeneklerin şekline göre ifade edilmektedir. Otomotiv sektöründe kullanımına ilişkin örnek temelde, hafiflik ve dayanıklılık özelliklerine ilişkindir. Bunların yanı sıra birçok nitelik, çeşitli alanlar için de uygulamalara yönelik belirtilebilmektedir. Metalik köpüklerin tercih edilmesinde mevcut çalışmalar, teknolojinin gelişmesiyle yaşanan gerekliliklere bağlı değerlendirmelerdir. Buna göre özellikle de bu açıdan incelemeler yapılabilmektedir.

#### **2.4.1. Açık Hücreli Metalik Köpükler**

Gözenekli ya da hücreli yapıya sahip olan köpük malzemelerden birisi, açık hücreli metalik köpüklerdir (İhvan vd., 2011). Açık hücreli yapılar temelde, dış kabuk yapısında açık gözeneklerin olmasını ifade etmektedir. Bu tür malzemelerin kullanıldıkları alanlara ise örnekler pil elektrotları, ısı değiştiriciler ve filtreler olarak belirtilebilmektedir (Yavuz vd., 2011). Açık hücre yapısının yakında görünümüne ilişkin örnekler önemli bir yer tutmaktadır. Bu kapsamda bir örnek Şekil 8’de sunulmaktadır.



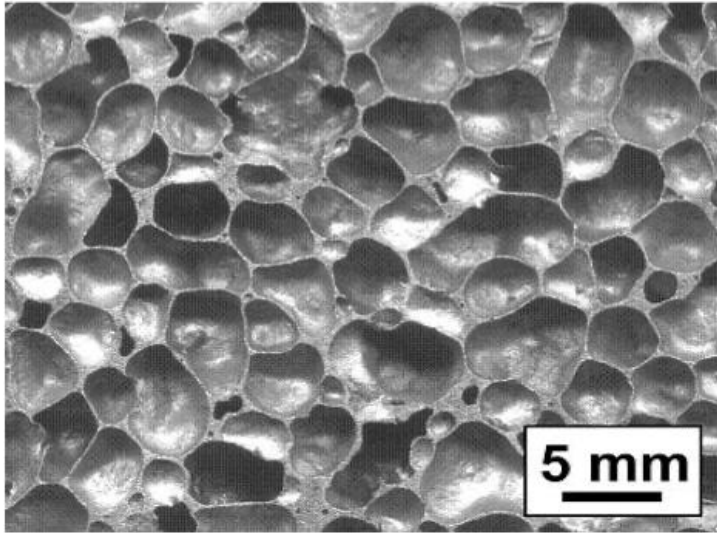
Şekil 8. Açık hücreli duocel alüminyum köpük gösterimi (Sezer, 2009)

#### **2.4.2. Kapalı Hücreli Metalik Köpükler**

Gözenekli ya da hücreli yapıya sahip olan köpük malzemelerden birisi, kapalı hücreli olanlardır. Bu malzemeler, özellikle de alüminyum köpükler çerçevesinde dikkate alınırlar. Yoğunlukları düşük, ısı işlemlerle mekanik özellikleri geliştirilen, sesi, darbeyi, titreşimi radyasyonunu sönmüleyebilen, düşük maliyetle üretilebilen gibi birçok konuya yönelik olan

metalik köpükler fonksiyonel malzeme özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu tür malzemelerin üretimleri için tercih edilen teknik, eriyik metale gazın veya köpük ajanının eklenerek köpük oluşturulmasını sağlamaktır. Ancak bu yöntem, istenilen bütün ürünlerin üretimi için yeterli değildir. Örneğin bu yöntem kullanılarak karmaşık geometrili ürün üretimleri geliştirilemez. Toz metalürjisinin karmaşık düzeydeki üretim şekilleri için uygun olması, bu metodun daha çok tercih edilmesine ortam hazırlamaktadır (İhvan vd., 2011).

Metal köpük üretimleri arasında kapalı hücreli metal köpük malzeme üretimleri her geçen gün artmaktadır. Bunun temel nedeni, alüminyum köpüklere olan ilginin artmasından kaynaklıdır. Düşük yoğunluklu ve yükler açısından yüksek deformasyon enerjisini absorbe edebilme yeteneği, sağlamlığın da artırılmasına aracılık etmektedir. Buna ilişkin bir örnek, enerji absorbe özelliğinin bir sonucu olarak araçların çarpışma durumlarında alacakları hasar ya da etkilerin, maksimum çarpma enerjisini dağıtmasına ilişkin değerlendirilmektedir. Bu amaçla ön ve arka bölgelerin korunması, bu tür malzemeler aracılığıyla sağlanabilmektedir. Hedeflenen bu tür durumlar, kapalı hücreli metal köpük malzeme kullanımını da aynı ölçüde yaygınlaştırmaktadır (Güven, 2011). Şekil 9'de kapalı hücreli köpük malzeme örneği gösterilmiştir.



Şekil 9. Kapalı hücreli alüminyum köpük gösterimi (Sezer, 2009)

## 2.5. Metalik Köpüklerin Kullanım Alanları

Metalik köpük malzemeler, ürünlerin fonksiyonunu artıran özelliklerinden dolayı, birçok alan içerisinde kullanılmaktadır. Malzemelerin servis ömürlerini ve performanslarını artıran uygulamalarıyla önemlidir. Ayrıca yeni uygulama alanlarına yönelik çalışmalar da devam etmektedir (Güven, 2011). Dolayısıyla da metalik malzemelerin kullanım alanlarına ilişkin birtakım incelemeler, aşağıda maddeler halinde sıralanabilmektedir:

- Otomotiv sektöründe kullanımlar: Metal köpükler arasında alüminyum köpük kullanımının tercih edilmesi, hafif ağırlıklı yapılarda olması, enerji absorbe özelliğini taşıması, ses sönümleme özelliğinde olması gibi uygulamalara dayalı kullanılır. Bir başka açıdan kullanım ise, güvenlik talebindeki artıştır. Daha ağır araçların kullanımı bir gereklilik olarak görülmekle birlikte, yakıt tüketimini de artırmamasına olan neden, ağırlığın azaltılmasında ek çalışmaları gerektirmiştir. Burada ise daha küçük araç ve malzeme kullanımına yönelim olmuştur. Diğer yandan araçlarda kalitenin artırılması amacıyla malzemeler geliştirilmiştir. Bu amaçla metal köpükler, düşük yoğunluk, ısı iletkenlik, enerji, ses ve titreşim absorbe etme özellikleriyle tercih edilmektedir (Onuklu, 2015).
- Havacılık endüstrisinde kullanımlar: Otomotiv ve inşaat gibi ana sektörlerin yanı sıra havacılık sektöründe de kullanımlar yaygınlaşmaya başlamıştır (Yıldırım, 2018). Havacılık sektöründe kullanımlarda tercihler, rijitlik/yoğunluk oranına ilişkindir. Bu oran, hafifliğin ve dayanımın hedeflendiği ürünlerin kullanımlarını ön plana almıştır. Ayrıca motor kısmında kullanımlar, ısı ve ses yalıtkanlığı amacıyla da tercih edilir (Güven, 2011). Bu nedenle yeni teknolojik çalışmalar yapılmakla birlikte, malzeme kullanımının da olduğu belirtilebilmektedir.
- Gemi inşa sürecinde kullanımlar: Hafif ağırlıkta malzemeler, inşa sürecinde önemli bir yere sahiptir. Bu tür uygulamalar genelde, modern yolcu gemilerinde vardır ve kullanılan malzemeler genelde alüminyum levha, bal peteği ve ekstrüzyon olarak belirtilebilir. Buna göre malzeme genelde, ambar platformları, gemi bölmeleri, anten platformları ve fişek ambarlarında kullanılmaktadır (Doğan, Atmaca ve Özbalcı, 2015).
- Makine yapım sürecinde kullanımlar: Metalik köpükler makine yapım süreçlerinde ilginç uygulamalara sahiptir. Sert köpükleştirilmiş parçalarla ya da köpük

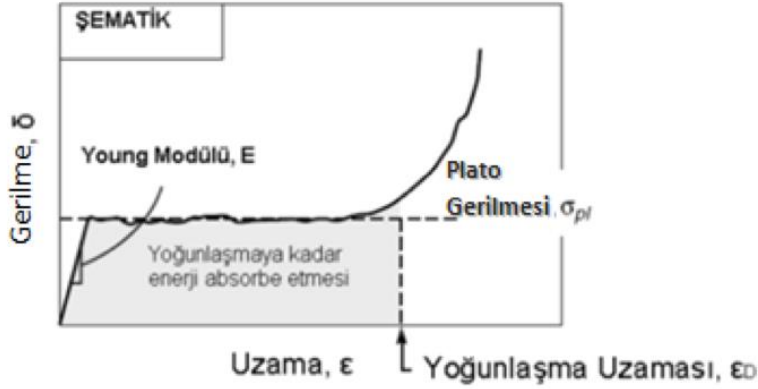
doldurulmuş sütunlarla durgunluğun azaltılması ve sönümlenmesi artırılmaktadır. Mil, merdane veya platformlarda, geleneksel metal malzemelerin yerine kullanılır. Ayrıca başka kullanım alanları da geliştirilebilir. Bunlar arasında ise sabit matkap ve öğütme makineleri vardır. Elektronik ev aletlerinde de kullanım bu açıdan yaygındır. Elektromanyetik kalkan özelliklerinin geliştirilmesi sayesinde kullanılabilir. Köpürtülmüş metaller aynı zamanda, diskin zararlı titreşimlerden de korunmasına yardımcıdır. Bunun gibi birçok kullanım alanından bahsedilebilir (Lefebvre vd., 2008).

- Biyomedikal endüstrisinde kullanımlar: Biyomedikal gereçlerin karşılanması amacıyla kullanılan malzemeler arasında metalik köpükler vardır (Yıldırım, 2017). Böyle bir amaç doğrultusunda kullanımlar ise, biyolojik uyumluluklardan yola çıkılarak malzemelerin geliştirilmesi şeklinde açıklanabilir. Örneğin protezler ve diş implant için kullanımlar yaygındır. Burada doku uyumu önemlidir. Bu amaçla dokunun iç büyümesini sağlama amacıyla aynı malzemenin ya da başka biyoyumlu malzemede gözenekli tabaka kullanılmaktadır. Ayrıca bunların yerine, mukavemet, elastisite modülü gibi birtakım mekanik özellikleri karşılama amacıyla yoğunluk dağılımının da uyarlanarak gözenekli titanyum veya titanyum köpüklerinin kullanımlarından da bahsedilebilir. Diğer yandan magnezyum köpükleri, biyo-bozunur implantlar olarak kullanılabilir. Kemik büyümesi süresince de yük taşıyan yapı olarak etkinliği göstermektedir. İyileşme sürecinde bu malzemeler, vücut tarafından emilir (Onuklu, 2015).

## **2.6. Alüminyum Köpük Malzemeler**

Alüminyum köpük malzemeler ve bu malzemelerin mühendislik uygulamalarında kullanımları, hafif olmalarının ve mukavemet birlikteliklerinin gerekliliklerini taşımalarının sonucu olarak tren, uçak, asansör, otomobil gibi hareketli araçlarda yaygın şekilde tercih edilmektedir. Alüminyum köpük malzemelerin fonksiyonlarının bir sonucu olarak kullanım yaygınlığı, çok düşük yoğunluklu olmasıyla da ilişkilidir. Aynı şekilde enerji absorbe etme özelliklerinin de yaygın olması, malzeme olarak alüminyum köpük malzeme kullanımlarını artırmaktadır (Elbir vd., 1999). Alüminyum köpük malzemeler, gözenekler sayesinde ciddi performans göstermektedir. Ezilme, sıkıştırılma gibi işlemler uygulandığında, plato gerilme özellikleri ve deformasyona bağlı poisson oranında değişiklikler olmaktadır. İyi mekanik

özellikler, çeşitli avantajların da yakalanmasına aynı şekilde ortam hazırlamaktadır. Buna göre genel olarak alüminyum köpük malzemeler, sıkışma ya da baskı işlemi uygulandığında, plastik deformasyon enerjisine dönüşmektedir (Sığırtmaç vd., 2012). Şema gösterimi, Şekil 10'da sunulmaktadır.



Şekil 10. Alüminyum köpük malzeme özelliği olarak plato gerilmesinin ve sıkışma eğrisinin gösterimi (Sığırtmaç vd., 2012)

Şekilde görüldüğü üzere, gerilmelere ve baskılara karşı dayanıklılık düzeyinin fazla olduğu dikkat çekmektedir. Düşük düzeydeki yoğunluğun etkin enerji özelliklerinde olduğu ifade edilebilmektedir. Baskı ya da sıkışma gibi durumlarda malzeme, çarpışma enerjisini, plastik deformasyon enerjisine dönüştürmektedir. Plato gerilmesi de enerji etkisinin sonucu olarak gelişen gerilmedir. Dolayısıyla alüminyum köpük malzemeler, mukavemet ve rijitlik özellikleri ile önemli bir yer tutmaktadır.

## 2.7. Alüminyum

Alüminyum periyodik tabloda 13 atom numarasına sahip, gümüşe yakın bir renkte, ağırlık olarak hafif bir elementtir. İyi bir elektriksel ve ısı iletkenlikleri vardır. Bunun yanında ısı ve ışık yansıtma özelliğine sahiptir. Korozyon dirençleri oldukça iyidir, ayrıca kolayca şekillendirilebilir. Yerkabuğunda sık rastlanan bir elementtir. Ancak yer kabuğunda bileşikler halinde bulunur. Metalik köpüklerde matris malzeme olarak kullanılması kompozit malzemeyi bir arada tutma, süneklik ve enerji absorpsiyonu için uygun bir malzemedir (Onuklu, 2015).

## 2.8. Alümina

Alümina ( $Al_2O_3$ ) kimyasal ve ısıl kararlılığı, kompozit malzemelere katılmasıyla yüksek mukavemet sağlaması, sertlik ve rijitlik özelliği, yalıtkanlık ve uygun maliyet gibi avantajlı özellikleri sayesinde başta malzeme bilimi olmak üzere mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan materyaldir (Onuklu, 2015).

## 2.9. Kalsiyum Karbonat

Molekül formülü  $CaCO_3$  olan doğada en çok bulunan bileşiklerdendir. Mühendislik uygulamalarında bir çok çalışmada yer almaktadır. Güçlü asitlerle tepkimesinde  $CO_2$  gazı açığa çıkarılır. Metalik köpükler içinde ısının etkisiyle gözenek oluşturucu olarak kullanılmaya yatkın ve maliyet açısından ucuz bir malzemedir.

Karakterizasyon işlemleri için yapılan basma ve çekme testinde malzemenin kuvvete karşı gösterdiği direnç ve mekanik özellikleri incelenmektedir. SEM analizi ya da taramalı elektron mikroskobu numune üzerine gönderilen elektronların numune üzerinden saçılması sayesinde numuneye çok daha yakından bakmamıza olanak sağlar. X ışını difaktrometresi ile her kristal yapının kendisine ait bir benzersiz kırınım açısı vardır. Bu ölçümlerle numuneler üzerinde hangi yapıların oluştuğu görülmektedir. BET (Brunauer-Emmett-Teller) analizinden gözenekli yapılarda yüzey alanı analizi, gözenek dağılımları, gözeneklilik oranı ve buna bağlı olarak absorpsiyon gibi parametreleri ölçmek yararlanılır (Koçer, 2019).

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL YÖNTEM

#### 3.1. Kullanılan Hammaddeler

Alüminyum metal tozu (Al)  $\leq 100$   $\mu\text{m}$  tane iriliğinde ve % 99 saflıkta, alümina tozu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  $\leq 100$   $\mu\text{m}$  tane iriliğinde ve % 99 saflıkta Ege Nanotek Kimya Ltd Şti. tarafından temin edilmiştir. Kalsit tozu ( $\text{CaCO}_3$ )  $\leq 500$   $\mu\text{m}$  tane iriliğinde ve % 99 saflıkta Kale Seramik Çanakkale Kalebodur Seramik San. A.Ş. firmasından temin edilmiştir.

#### 3.2. Hammadde Hazırlama

Çalışmada Al– $\text{Al}_2\text{O}_3$  kapalı metal köpüklerin üretimi toz metalurjisi yöntemi ile sağlanmıştır. Köpürtücü ajan olarak ise  $\text{CaCO}_3$  kullanılmıştır. Üretilen numunelerin ağırlıkça % miktarları Tablo 2’de yer almaktadır. Yüzde miktarlara göre her numune tabloda kodlanmıştır.

Tablo 2

Hazırlanan numunelerin bileşenlerini ve ağırlıkça % miktarları

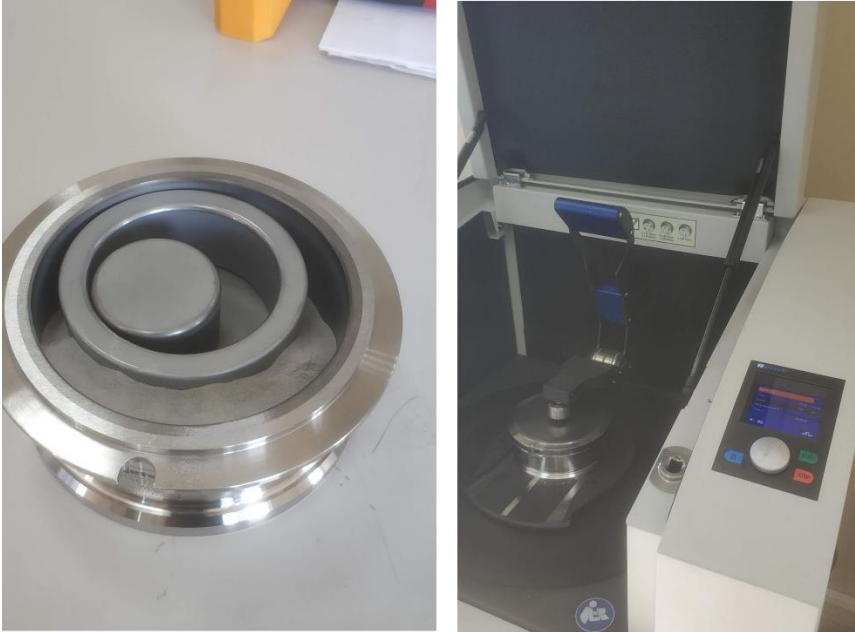
Numune	Alüminyum (Al)	Alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	Kalsit ( $\text{CaCO}_3$ )
Numune 1 (AA7C)	88	5	7
Numune 2 (AA12C)	83	5	12
Numune 3 (AA17C)	78	5	17

Tabloda yer alan bileşenlerin yüzdeler oranları, toplam 100’er gram hazırlanacak şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 11. Analitik terazi

Bileşenler oranlarına göre Şekil 11’de görülen analitik terazide tartıldıktan sonra (Unibloc AUX 320) numunelerin homojen şekilde karıştırılması için Şekil 12’de görüldüğü gibi öğütme işlemi yapılmıştır (RESTCH RS 200).



Şekil 12. Diskli Öğütücü



Daha sonra numuneler Şekil 13’de görülen manyetik karıştırıcıda (IKA C-MAG HS7) karıştırıldı ve havanda dağıtıldıktan sonra Şekil 14’deki vakumlu etüv fırınında (Nüve EV 018) 100°C de kurutulmuştur.



Şekil 13. Manyetik karıştırıcı



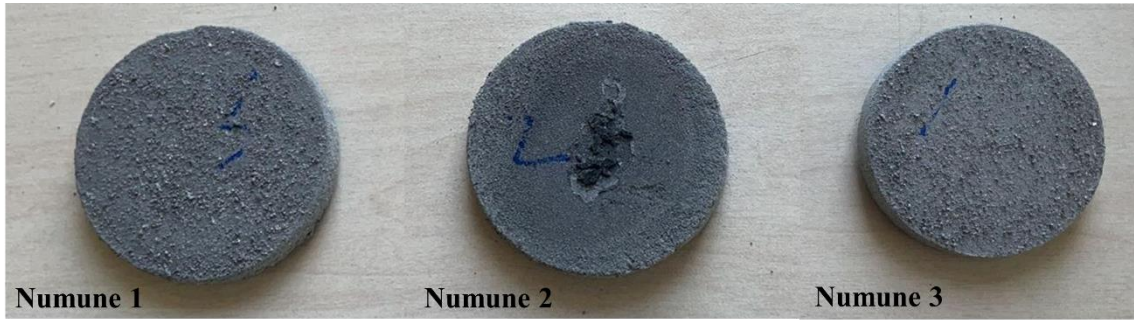
Şekil 14. Vakumlu etüv fırın

Ardından 3 ayrı toz karışımı Şekil 15’de görülen pres (Nannenti Mignon S) ile 40 MPa basınç altında şekillendirildi (Nannenti Mignon S) ve ilk aşamada 550°C’de 1 saat ve

ikinci aşamada 1000°C’de 4 saat sinterlenmesi amacıyla disk şeklinde yarı mamuller elde edildi (Şekil 16).



Şekil 15. Tozların yarı mamul haline getirildiği pres



Şekil 16. Disk şeklindeki yarı mamüller

İki aşamalı sinterleme gözenekli ve mukavim malzeme oluşumun sağlanması için yapılmıştır.

### **3.3. Basma Testi**

Basma deneyleri (Shimadzu AG-XD, Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi, TAUM) ASTM E9-89A standartlarında gerçekleştirilmiştir. Numuneleri birbirleriyle karşılaştırmak için uzunluk ve çap oranları eşit tutulmuştur.

### **3.4. Çok Noktalı BET**

Numunelerin gözenek boyut dağılımları BET yüzey alan analiz cihazı (Micromeritics Gemini VII, Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi, TAUM) ile gerçekleştirilmiştir.

### **3.5 Mineralojik Analiz**

Numunelerin mineral analizleri X-ışınları kırınımı (PANalytical Empyrean, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, ÇOBİLTUM) ile ( $2\theta = 10 - 80^\circ$ ) tamamlanmıştır.

### **3.6. Mikroyapı Görüntüleme**

Numune kompozisyonun değişimi ile iç yapıdaki gözenek ve morfolojik farklılaşmaları değerlendirmek için taramalı elektron mikroskobu (ZEISS Gemini SEM 500-71-08) kullanılmıştır.

### **3.7. Yoğunluk**

Her üç Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal seramik kompozit köpük numunelerin ortalama yoğunluk değerleri Arşimet prensibine göre ölçülmüştür. Ölçüm aşağıdaki Eşitlik 3.1'deki formül temelinde gerçekleştirilmiştir.

$$\rho = W_K / (W_D - W_A) \rho_s \quad (3.1)$$

Burada  $\rho$  ; numune yoğunluğunu,  $W_K$  ; numunenin kuru kütlesini (gr),  $W_D$  ; numunenin suya doymuş kütlesini (gr),  $W_A$  ; numunenin suda asılı kütlesini (gr),  $\rho_s$  ; suyun yoğunluğunu ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) ifade etmektedir.



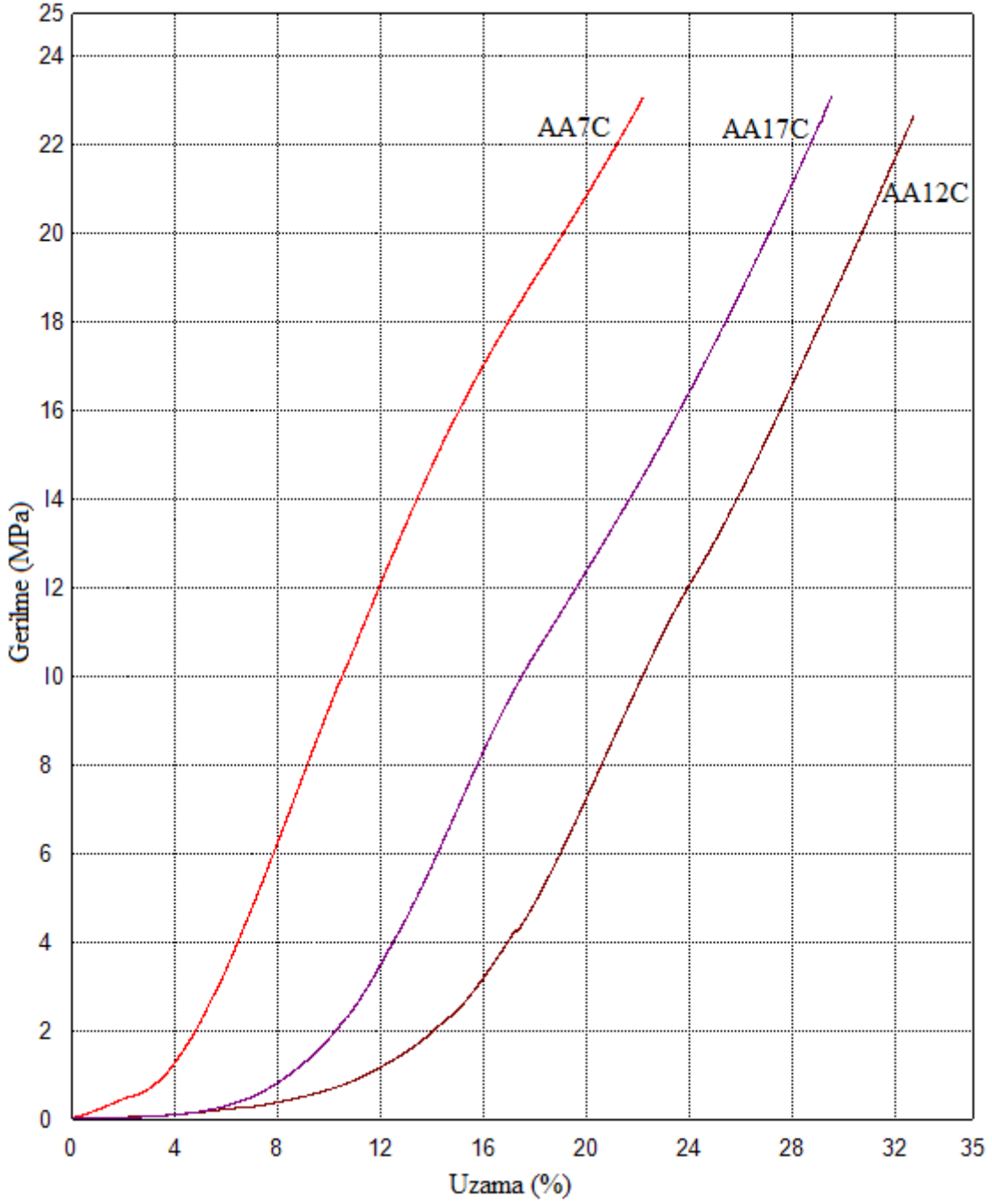
## **DÖRDÜNCÜ BÖLÜM**

### **ARAŞTIRMA BULGULARI**

Bu çalışmada Al esaslı Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit köpük üretiminde farklı oranlarda kullanılan CaCO<sub>3</sub> köpürtücü ajanın elde edilen ürünlerin mekanik, mineraloji, mikroyapısal ve fiziksel özellikleri üzerine olan etkileri değerlendirilerek sonuçlandırılmıştır.

#### **4.1. Basma Testi Sonuçları**

Şekil 17’de farklı miktarlarda köpürtücü ile hazırlanan numunelerin gerilme % uzama değerleri görülmektedir.

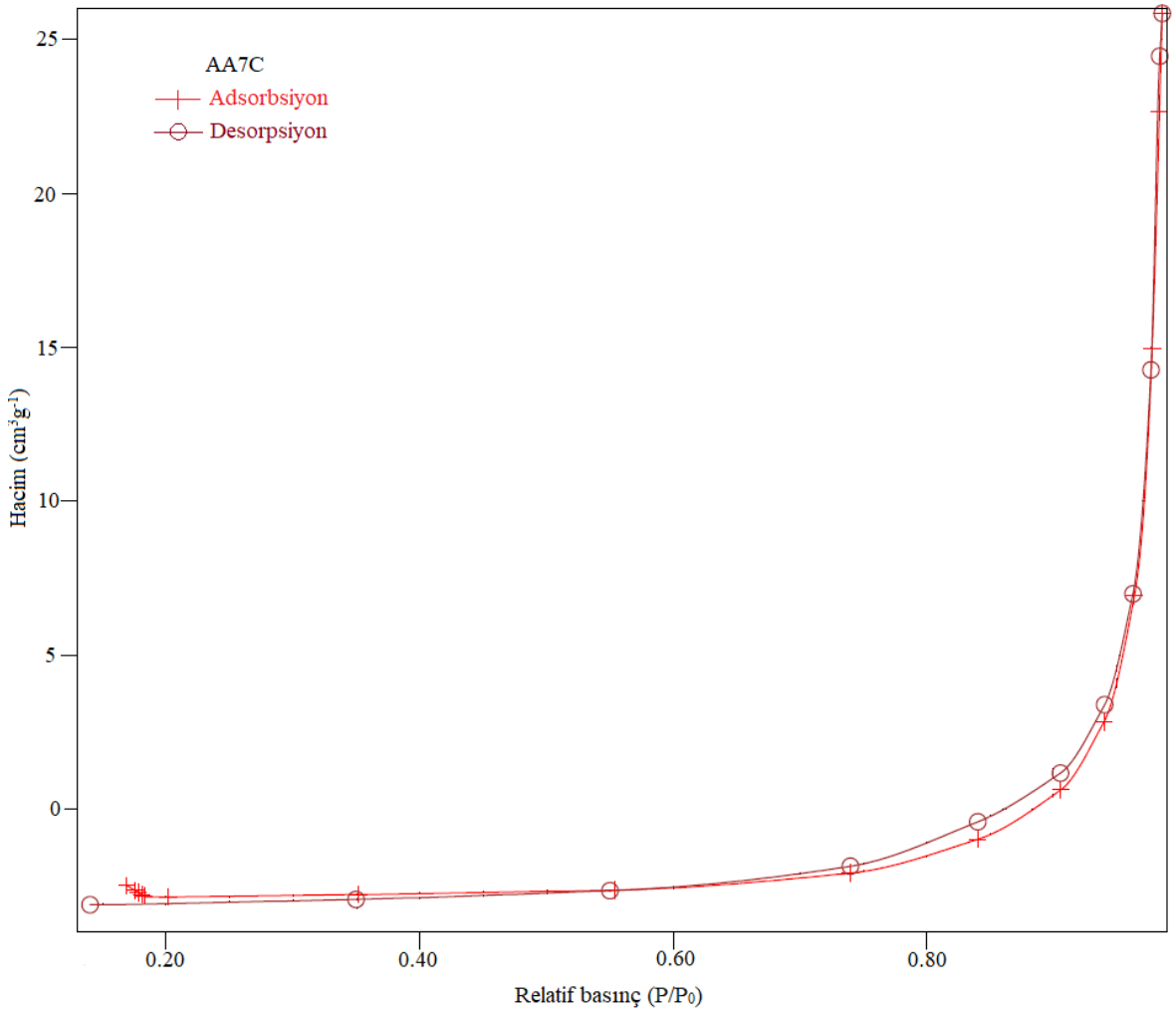


Şekil 17. Farklı miktarlarda köpürtücü ile hazırlanmış Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal seramik köpüklerin basma mukavemeti sonuçları

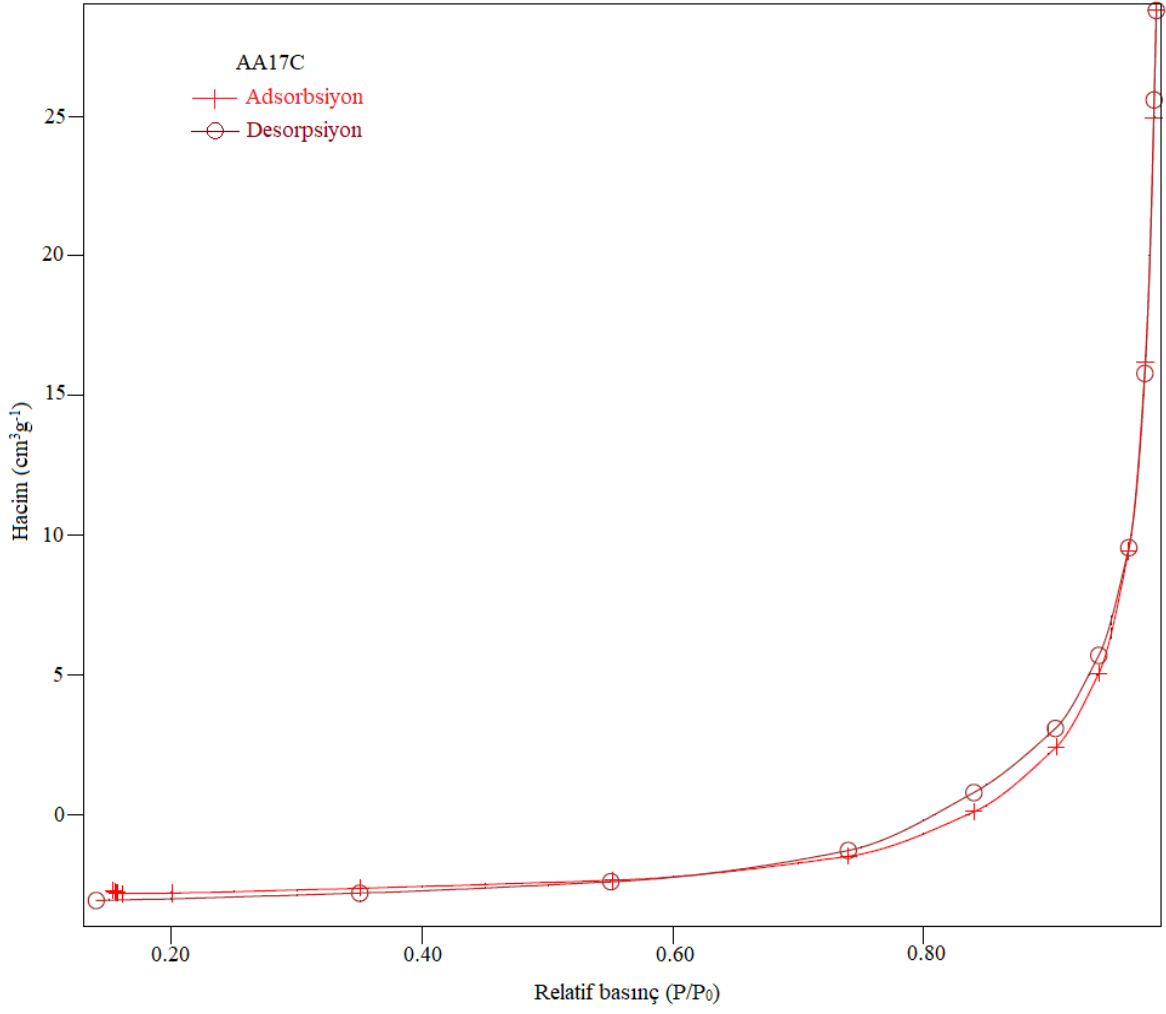
Şekildeki basma gerilme-gerinim diyagramından da görüldüğü gibi ağırlıkça % 7 CaCO<sub>3</sub> içeren hammadde karışımından elde edilen köpük numunenin diğer iki numuneye göre aynı gerilme değerinde % uzaması daha düşüktür. Bunun yanında AA7C numunesinin aynı gerinim (uzama) değeri için daha yüksek gerilme değerine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Köpürtücü CaCO<sub>3</sub> miktarı artırıldığında aynı uzama oranında basma mukavemeti

azalmakta (AA12C) daha da artırıldığında (AA17C) artmakta fakat AA7C'nin basma mukavemetinin altında kalmaktadır. Bu durumda ağırlıkça % 7 köpürtücü kullanımı basma mukavemeti açısından en iyi sonucu vermektedir. Köpürtücü oranının belirli miktarın (%7) üzerine çıkması gözenek miktarındaki sınırlamayı aşarak nihai yapının gerilme altında hücre duvarlarına çökerek deforme olmasına ve mukavemet düşmesine neden olmuş olabilir.

#### 4.2. Yüzey Alan Analizi

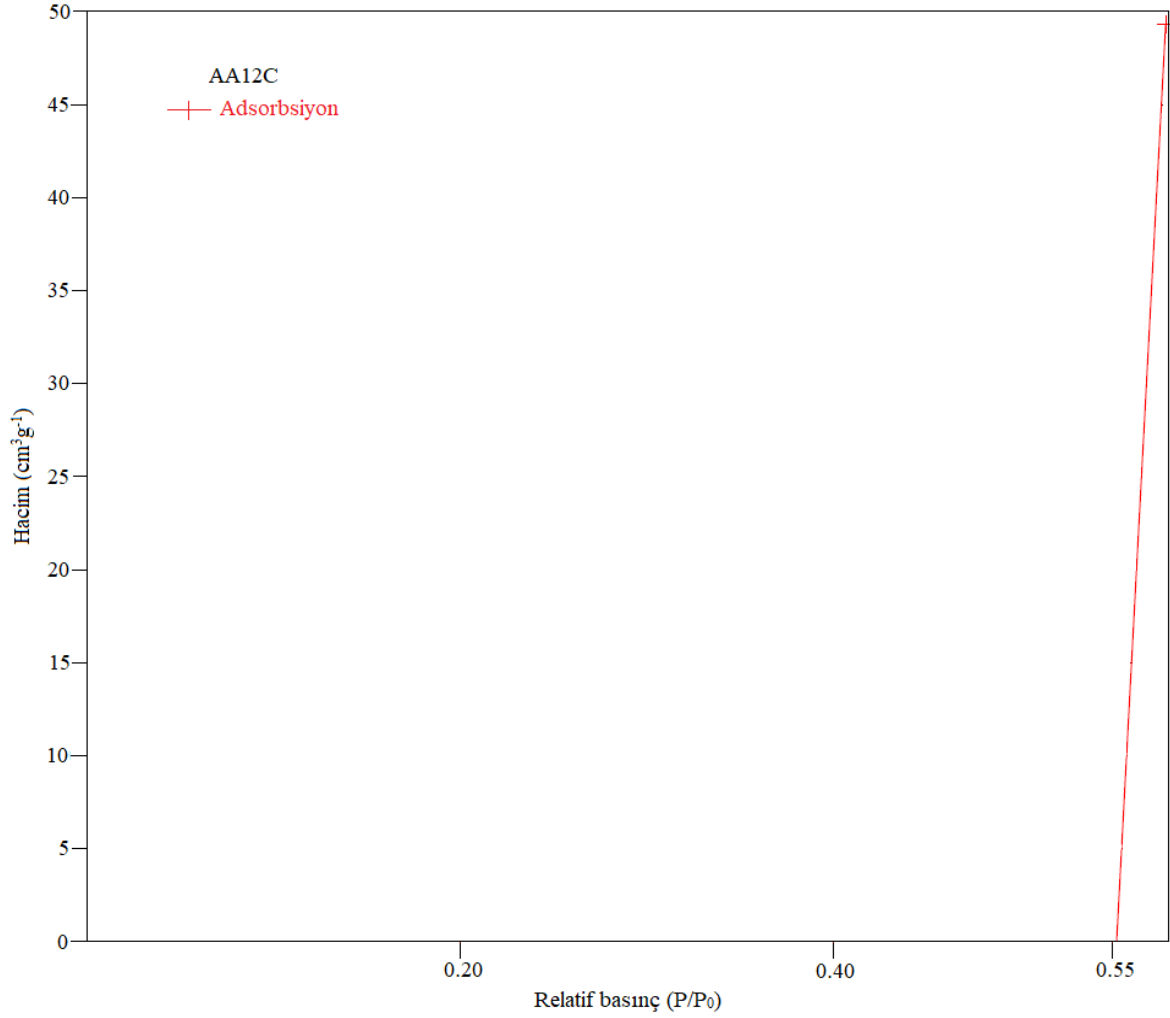


Şekil 18. Köpürtücü olarak ağırlıkça % 7 CaCO<sub>3</sub>'ün kullanıldığı Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal seramik köpük malzemenin adsorbsiyon izoterm eğrisi



Şekil 19. Köpürtücü olarak ağırlıkça % 17 CaCO<sub>3</sub>'ün kullanıldığı Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal seramik köpük malzemenin adsorbsiyon izoterm eğrisi





Şekil 20. Köpürtücü olarak ağırlıkça % 12 CaCO<sub>3</sub>'ün kullanıldığı Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal seramik köpük malzemenin adsorbsiyon izoterm eğrisi

AA7C ve AA17C numunelerinin izoterm eğrileri IUPAC sınıflandırmasına göre tip 3 izotermidir. AA12C numunesinde yeteri derecede adsorbsiyon gerçekleşmemiştir. AA7C ve AA17C numunelerinde adsorbsiyon başladıktan sonra aynı basınç şartlarında AA17C numunesinde daha yüksek değerlere çıktığı görülmektedir. Bu durumda AA17C numunesinin gözenek miktarının çok bir fark olmasa da yüksek olduğunu göstermektedir. Bu farklılık benzer oranlarda Şekil 17'deki basma mukavemeti değerleri ile de uyusmaktadır. AA7C numunesinin daha düşük olan gözenek miktarı biraz daha fazla mukavim olmasına sebebiyet vermektedir.

### 4.3. Mineralojik Analiz

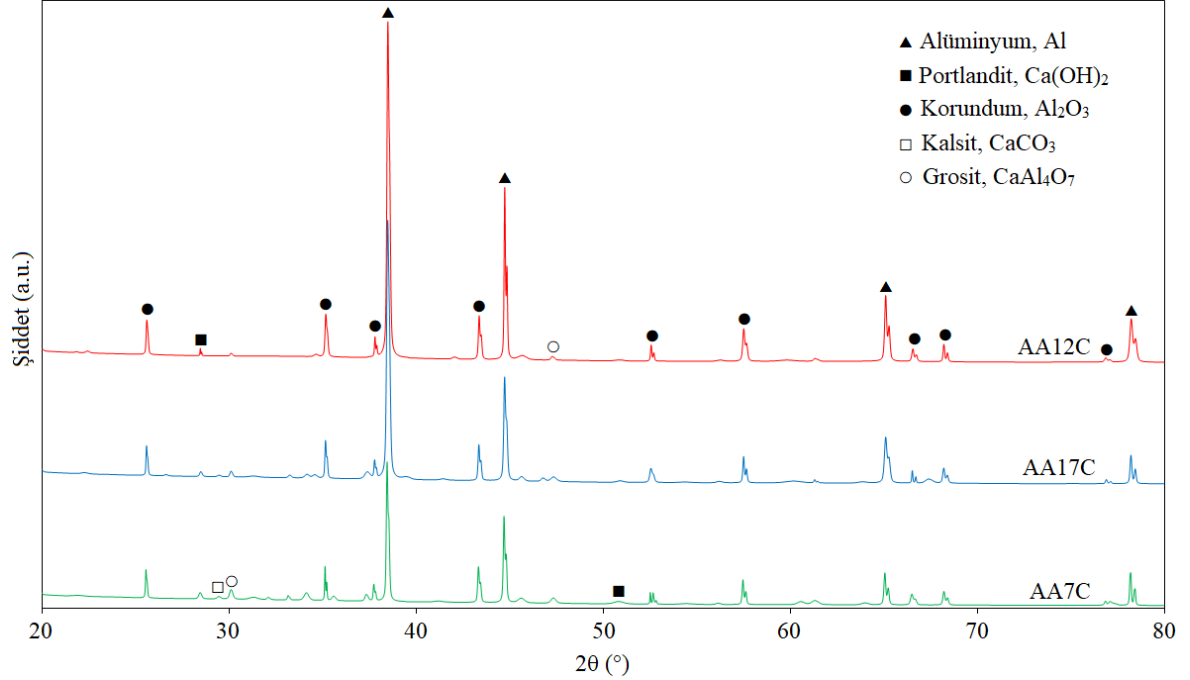
Farklı miktarlarda köpürtücü ajan ile hazırlanmış metal seramik köpüklere ait kantitatif analiz sonuçları Tablo 3’de görülmektedir.

Tablo 3

Farklı oranlarda köpürtücü ile hazırlanmış Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> köpüklerinin kantitatif analizleri

Numune kodu	Faz kompozisyonu (% Ağırlıkça)				
	Korundum	Alüminyum	Portlandit	Grosit	Kalsit
AA7C	50.4	41.9	2.2	4.7	0.8
AA17C	42.4	50.9	1.1	5.2	0.4
AA12C	42.0	56.7	-	1.2	0.1

Şekil 21 farklı köpürtücü kompozisyonları ile hazırlanan köpüklerin X-ışınları difraktogramını göstermektedir.

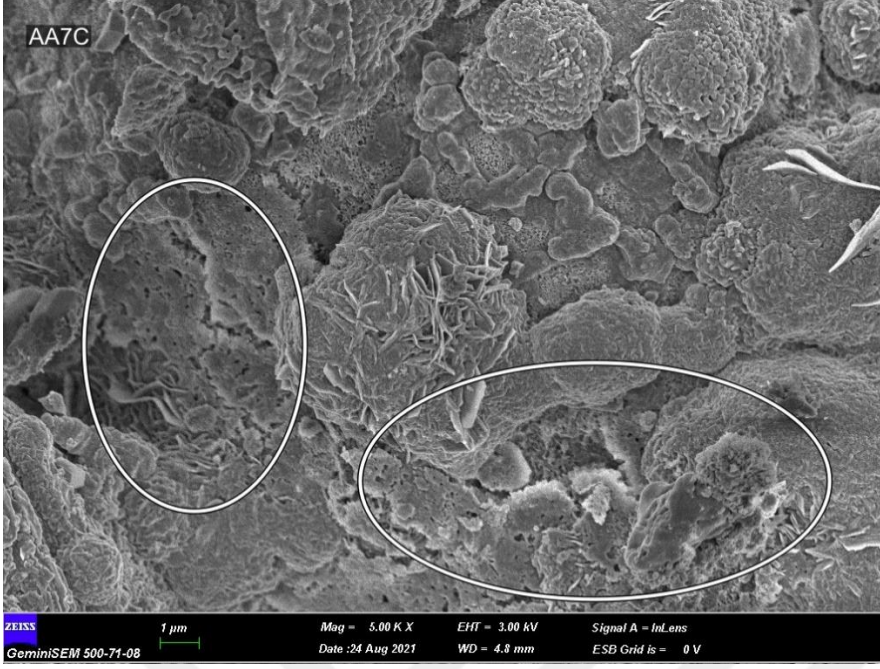


Şekil 21. Farklı oranlarda köpürtücü ile hazırlanmış köpüklerin X-ışınları difraktometre grafiği

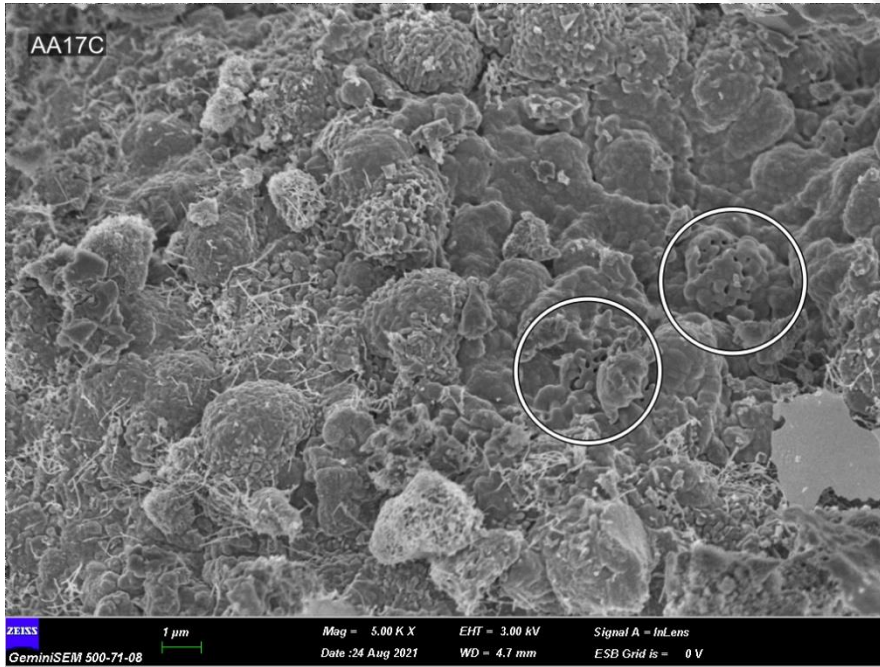
Tablo 3'den de görüldüğü gibi AA7C numunesi korundum miktarı en yüksek numunedir. Bu sonuç Şekil 17'de görülen gerilme-uzama eğrisindeki en yüksek basma mukavemeti değeri ile uyum içindedir. Aynı zamanda AA7C numunesinde adsorbsiyon izotermi değerlendirildiğinde en düşük gözenek oranı da bu numunedir. AA7C numunesinde alüminyum oranı da AA12C ve AA17C numunelerine göre daha düşüktür. AA7C ve AA12C numuneleri karşılaştırıldığında kullanılan  $\text{CaCO}_3$  köpürtücü miktarının ağırlıkça % 7'den % 12'ye çıkması gözenek miktarını artırmıştır ancak bu artış adsorbsiyon izoterm eğrilerden de görüldüğü üzere farkedilir derecede değildir. Köpürtücü miktarının artması sonucu oluşan reaksiyonlar korundum miktarını düşürmüş olmalıdır. Bu nedenle bir köpük malzemesi için gerekli kabul edilebilir gözenek miktarı ve yüksek mukavemet AA7C numunesini ön plana çıkarmaktadır. Bununla birlikte AA7C numunesinde alüminyum miktarının daha düşük olması malzeme sünekliği açısından bir dezavantaj yaratabilir. Ancak her iki numunenin alüminyum içerikleri arasındaki fark mukavemet değerleri kadar yüksek değildir. Bu nedenle AA7C numunesin hem en iyi mukavemet hem de kabul edilebilir süneklik ve gözenek miktarları bakımından endüstriyel ölçekte değerlendirilebileceği görülmektedir.

### **4.3. Mikroyapısal Analiz Sonuçları**

Şekil 22 ve Şekil 23'de sırasıyla ağırlıkça % 7 ve % 17  $\text{CaCO}_3$  kullanılarak hazırlanmış Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  kompozit köpüğün taramalı elektron mikroskop görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 22. Köpürtücü olarak ağırlıkça % 7  $\text{CaCO}_3$ 'ün kullanıldığı Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  metal seramik köpük malzemenin SEM görüntüsü



Şekil 23. Köpürtücü olarak ağırlıkça % 17  $\text{CaCO}_3$ 'ün kullanıldığı Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  metal seramik köpük malzemenin SEM görüntüsü

Her iki numunenin de SEM görüntüleri incelendiğinde AA17C numunesinde gözeneklerin belirli bölgelerde toplandığı, AA7C numunesinde ise daha homojen bir yayılım

gösterme eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır. Gözeneklerin yayılım göstermesi AA7C numunesinin mukavemetini de olumlu etkileyebilecek bir unsurdur. Hem korundumun kantitatif olarak yüksek olması hem de gözeneklerin kısmen de olsa daha az ama daha homojen bir yayılım göstermesinin de AA7C numunesinin AA17C numunesinden daha yüksek bir mukavemete sahip olmasını açıklamaktadır.

#### 4.4. Yoğunluk Testi Sonuçları

Tablo 4’de farklı oranlarda köpürtücü ile hazırlanmış Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> köpüklerin deneysel yoğunluk değerleri görülmektedir. Gözenek oranlarında olduğu gibi üç numune arasında bariz bir yoğunluk farkı bulunmasa da AA7C numunesinin yoğunluk miktarı daha fazladır. Bu sonuç mukavemet değerleri ile de orantılıdır. Ancak AA7C numunesindeki yoğunluk miktarı Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> malzemesinin köpük işlevselliği üzerinde olumsuz etki yapacak yükseklikte değildir.

Tablo 4

Farklı oranlarda köpürtücü ile hazırlanmış Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> köpüklerinin deneysel yoğunlukları

Numune	Deneysel yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )
AA7C	2.71
AA12	2.65
AA17C	2.63

## BEŞİNCİ BÖLÜM

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 5.1. Çalışma Sonuçları

Kapalı hücre Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit köpük toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiştir. Köpüklerin basma mukavemeti, adsorbsiyon izotermleri, mineralojik ve mikroyapısal analizleri ile yoğunluk testleri değişen oranlarda alüminyum ve kalsiyum karbonat içeriklerine göre araştırılmıştır. Otomotiv endüstrisinde kullanılan metal esaslı köpük filtrelerde hafiflik ve dayanım aranan özellikler içindedir. Köpürtücü olarak ağırlıkça % 7 CaCO<sub>3</sub> ilavesinden hazırlanan metal esaslı kompozit köpük malzeme basma testi sonuçları için en iyi sonucu vermiştir. Bu oran mukavemet açısından en yüksek değeri vermektedir.

AA7C numunesinde korundum miktarının yüksek olması basma testi sonuçlarını da desteklemiştir. AA7C numunesinin köpük oluşumu için yeterli gözenek ve mukavemet içinde yüksek korundum fazını oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte AA7C numunesinde gözeneklerin daha uniform bir yapıda bulunması ilave edilen köpürtücü miktarı da göz önüne alındığında mukavemeti artırıcı bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Köpürtücü miktarının daha da artırılması gözenek dağılımını olumsuz yönde etkilemiştir.

#### 5.2. Öneriler

Köpürtücü olarak farklı kimyasallar arasında karşılaştırma yapılması CaCO<sub>3</sub> malzemenin işlevselliğini daha da ön plana çıkartabilir. Çalışmada CaCO<sub>3</sub> artışı ile gözenek miktarının arttığı bilinmektedir. Fakat köpürtücü oranının daha da artırılmasının gözenek dağılımı üzerindeki mekanizmasını anlamada daha da aydınlatılması gerekmektedir. Bunun yanında gözenek miktarlarında çok fark olmasa da CaCO<sub>3</sub> artışı ile mukavemet artışının da sağlanabileceği mekanizmaların tartışılması gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

- Alulight International GmbH. (2006). *Alinium Foam Products*, Product Technical Datasheet.
- An, J., Chen, C., Zhang, M. (2021). "Effect of CaCO<sub>3</sub> content change on the production of closed-cell aluminum foam by selective laser melting". *Optics and Laser Technology*, 141, s. 107097.
- Avarisli, O. ve Uğuz, A. (2004). "Metalik köpük malzemelerin otomotiv endüstrisinde kullanılması, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası*.
- Banhart, J. (2006a). "Metal Foams: Production and Stability". *Advanced Engineering Materials*, 8(9), s. 781-794.
- Banhart, J., Baumeister, J. (1998b). "Production methods for metallic foams". *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 521, s. 121-132.
- Başcı, Ü.G. (1999). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Partikül Takviyeli Al-Cu Esaslı Metal Matriksli Kompozit Malzeme Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bin, J., Zejun, W., Naiqin, Z. (2007). "Effect of pore size and relative density on the mechanical properties of open cell aluminum foams". *Scripta Materialia*, 56(2), s. 169-172.
- Davies, G.J. ve Zhan, S. (1983). "Review metallic foams, their production, properties and applications". *Materials Sciences and Engineering*, 18, s. 1899-1911.
- Doğan, A., Atmaca, İ. ve Özbacı, O. (2015). "Metal köpük malzemeler ve yüzey soğutmada kullanımı". *12. Uluslararası Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 8-11 Nisan, İzmir, s. 2641-2652.

- Duarte, I. ve Banhart, J. (1983). "A study of aluminium foam formation – kinetics and microstructure". *Acta Materialia*, 48 (9), s. 2349-2362.
- Elbir, S., Yılmaz, S. ve Güden, M. (1999). "Kapalı hücreli alüminyum köpük metallerin üretim metotları ve mekanik özellikleri". *UCEAT Chamber of Metallurgical Engineers*, 120, s. 35-42.
- Esmaeelzadeh, S., Simchi, A. ve Lehmhus, D. (2006). "Effect of ceramic particle addition on the foaming behavior, cell structure and mechanical properties of P/M AlSi<sub>7</sub> Foam". *Materials Sciences and Engineering*, 424 (1-2), s. 290-299.
- Evert, R.K. ve Arsenault, R.J. (1991). *Metal Matrix Composites; Mechanism and Properties*, Academic Press Inc., USA.
- Fathi, H., Emadoddin, E., Habibolahzadeh, A. (2012). "Manufacture of aluminum closed-cell foam by arb process using CaCO<sub>3</sub> as the blowing agent". *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 9(3), s. 40-48.
- Feng, Y., Zheng, H., Zhu, Z. ve Zu, F. (2002). "The microstructure and electrical conductivity of aluminium alloy foams". *Material Chemistry and Physics*, 78, s. 196-201.
- Ghose, J., Sharma, V., Kumar, S. (2010). "Multi Functional Behavioural Analysis Of Al-SiC Metal Matrix Composite Foam Produced By (TiH<sub>2</sub>-CaCO<sub>3</sub>) Dual Foaming Agent". *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 12-15 October, Erie, Pennsylvania, USA.
- Görener, A. (2011). "AHP ve TOPSIS yaklaşımlarıyla metal matrisli kompozit imalat makinelerinin seçimi". *Mühendis ve Makina*, 52 (613), s. 59-71.
- Gui, M.C., Wang, D.B., Wu, J.J., Yuan, G.J. ve Li, C.G. (2000). "Deformation and damping behaviors of foamed Al-Si-SiC<sub>p</sub> composite". *Materials Sciences and Engineering*, 286 (2), s. 282-288.



- Gülmez, S. (2018). Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler. Yüksek Lisans Projesi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Güneş, D. (2010). Al Matrisli SiC<sub>p</sub> Takviyeli Kompozit İle Ç1030 Çeliğinin Sürtünme Kaynak Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Güven, Ş.Y. (2011). “Toz metalürjisi ve metalik köpükler”. *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 1 (2), s. 22-28.
- Hull, D. ve Clyne, T.W. (1996). *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A. ve Lavernia, E.J. (1991). “Particulate reinforced metal matrix composites – a review”. *Journal of Materials Sciences*, 26, s. 1137-1156.
- İhvan, S., Polat, B.D., Sezer, D. ve Keleş, Ö. (2011). “Alüminyum köpük üretiminde alaşım elementlerinin etkisi”. *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi*, 10 (2), s. 149-157.
- İlhan, R. ve Feyzulloğlu, E. (2019). “Cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozit malzemelerde kullanılan doğal elyaflar ve dolgu maddeleri”. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6 (2), s. 355-381.
- Kara, E. (2012). Çeşitli Elyaf Dizilimleriyle Oluşturulmuş Metal Köpük Çekirdekli Sandviç Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.
- Kaya, A.İ. (2016). “Kompozit Malzemeler ve Özellikleri”. *Putech & Composites*, Temmuz-Ağustos-Eylül, s. 38-45.

- Koçer, Ş.Ş. (2019). Alümina Esaslı Hammadde ve Atıklardan Alümina Esaslı Aerojel Tozu Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Körner, C., Singer, R.F. (2000). "Processing of Metal Foams-Challenges and Opportunities". *Advanced Engineering Materials*, 2(4), s. 159-165.
- Kösedağ, E. ve Ekici, S. (2019). "Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin darbe davranışları üzerine bir derleme". *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (1), s. 384-393.
- Lefebvre, L.P., Banhart, J. ve Dunand, D.C. (2008). "Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments". *Advanced Engineering Materials*, 10 (9), s. 775-787.
- Lim, T.J., Smith, B., McDowell, D.L. (2002). "Behavior of a random hollow sphere metal foam". *Acta Materialia*, 50(11), s.2867-2879.
- Freng, Y., Zheng, H., Zhu, Z., & Zu, F. (2018). "Fabrication of aluminum foams by using CaCO<sub>3</sub> foaming agent". *Materials Research Express*, 5(9), 4454.
- Mirzaei-Solhi, A., Khalil-Allafi, J., Yusefi, M., Yazdani, M., Mohammadzadeh, A. (2018). (2018). "Fabrication of aluminum foams by using CaCO<sub>3</sub> foaming agent". *Materials Research Express*, 5(9), 096526.
- Onuklu, E. (2015). Seramik Katkılı Alüminyum Esaslı Köpük Kompozit Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Paulin, I. (2015). "Stability Of Close-Cell Al Foams Depending On The Usage Of Different Foaming Agents". *Materials and Technology*, 49(6), 983.988.

- Schwartz, M.M. (1984). *Composites Materials Handbook*, Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- Sezer, Ş.D. (2009). Kompakt Toz Ergitme Tekniği İle Alüminyum Köpük Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sığırtmaç, T. (2010). Metal Köpük Malzemelerin Üretim Sonrası Kesme ve Birleştirme İşlemlerinin Deneysel Verilerden Yararlanarak Modellenmesi. Doktora Tezi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Sığırtmaç, T., Çakır, M.C., Uğuz, A. ve Ensariođlu, C. (2012). “Alüminyum köpük malzemelerinin ikincil işlemleri ve bu işlemlerin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi”. 3. *Ulusal Tasarım ve İmalat ve Analiz Kongresi*, 29-30 Kasım, Balıkesir, s. 160-174.
- Simone, A.E. ve Gibson, L.J. (1998). “The effects of cell face curvature and coruscations on the stiffness and strength of metallic foam”. *Acta Materialia*, 46, s. 3926-3935.
- Sönmez, M. (2009). Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi ve Geleceđi: Türkiye’den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Şahan, B.G. (2010). Hidroksiapatit Katkılı Yapay Kemik Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Bağlayıcı Ajanların Etkileri. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Şahin, Y. (2006). *Kompozit Malzemelere Giriş*, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Şardan, B. (2009). Plastik Matrisli Hibrit Kompozitlerde Doku Bileşenlerinin Mekanik Özelliklere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Thulasikanth, V., Padmanabhan, R. (2021). "Processing and testing of closed cell aluminium hybrid composite foams". *Materials Today: Proceedings*, 46(2), s. 1437-1440.
- Uygur, İ. ve Saruhan, H. (2004). "Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri". *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1), s. 167-174.
- Wolfgang Tegethoff, F., Rohleder, J., Kroker, E. (2001). *Calcium Carbonate: From the Cretaceous Period Into the 21st Century*. Birkhäuser Verlag: Berlin.
- Yavuz, İ., Başpınar, M.S. ve Bayrakçeken, H. (2011). "Ergitme yöntemi ile üretilen alüminyum köpüklerde değişik ortamlarda SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesinin köpürme üzerindeki etkisi". *6th International Advanced Technologies Symposium*, 16-18 May, Elazığ, s. 121-125.
- Yıldırım, A. (2017). Sentantik Alüminyum Köpüklerin Modellenmesi ve Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Yıldırım, Ç.V. (2018). "Metalik köpük malzemelerin üretim yöntemleri, uygulama alanları ve malzeme özellikleri". *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7 (2), s. 100-116.
- Zhang, X.P., Quan, G.F. ve Wei, W. (1999). "Preliminary investigation on joining performance of SiC-reinforced aluminium metal matrix composite (Al/SiC-MMC) by vacuum brazing". *Composites: Part A*, 30, s. 823-827.
- Zor, M. (2018). Kompozit Malzemelerle İlgili Genel Bilgiler. Kompozit Malzeme Mekanik Ders Notları. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.