



**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM ESASLI ÇİNKO  
TAKVİYELİ METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ**

**Özge CEYLANOĞLU**

**YÜKSEK LİSANSTEZİ  
METL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2014**

Özge CEYLANOĞLU tarafından hazırlanan “TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM ESASLI ÇİNKO TAKVİYELİ METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Metal Eğitimi Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:**Prof.Dr. Mehmet TÜRKER

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği A.B.D., Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum .....

**Başkan :**Doç.Dr.Yusuf USTA

Makine Mühendisliği A.B.D., Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum .....

**Üye :**Yrd. Doç. Dr.Henifi ÇİNİCİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği A.B.D., Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum .....

TezSavunmaTarihi: 04/09/2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....  
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

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

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

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

Özge CEYLANOĞLU



# TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM ESASLI ÇİNKO TAKVİYELİ METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Özge CEYLANOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2014

## ÖZET

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ve sıcak presleme işlemi ile alüminyum esaslı çinko takviyeli metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiş ve işlem parametrelerinin köpürtmeye etkileri araştırılmıştır. Metalik köpük üretimi için Al metal tozu, %10-15-20 oranlarında Zn metal tozu ve %1,25 oranında TiH<sub>2</sub>köpürtücü madde tozu ile karıştırılmıştır. Karışım tozlar önce 45MPa basınç altında ve oda sıcaklığında, daha sonra 350°C sıcaklıkta 400 MPa basınç altında köpürebilir kompakt numune haline getirilmiştir. Elde edilen numuneler 690-710-730°C köpürtme sıcaklıklarında ve 5-7,5-10 dakika köpürtme sürelerinde cam boru içerisinde köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Köpürtme süresi ve sıcaklığın artması ile gözenek boyutu, gözeneklilik oranı ve lineer genleşme oranı artarken, yoğunluğun düştüğü gözlenmiştir. Köpük malzemeler üzerinde mekanik test olarak basma testi yapılmış, gözenek boyutu ve lineer genleşme oranı fazla olan numunelerde basma dayanımlarının düşük olduğu tespit edilmiştir.

BilimKodu : 710  
AnahtarKelimeler : Al-Zn köpük, metalik köpük, toz metalurjisi  
SayfaAdedi : 75  
Danışman : Prof.Dr. Mehmet TÜRKER

PRODUCTION OF ALUMINIUM BASED ZINC REINFORCED METAL FOAM BY  
POWDER METALLURGY METHODS

(M. Sc. Thesis)

Özge CEYLANOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2014

ABSTRACT

In this thesis, aluminum based zinc reinforced metallic foams were produced by powder metallurgy route and effect of process parameters on foaming was investigated. In order to produce metallic foam, Al powders were mixed with 10-15-20 % of Zn powders and 1.25% of  $TiH_2$  powders as foaming agent. The mixture was compacted at room temperature under 45 MPa pressure and then was compacted at 350°C temperature under 400 MPa pressure to produce foamable precursor. The compacts were foamed at 690, 710 and 730°C foaming temperatures and for 5, 7,5 and 10 minutes in glass tubes. It was found that increasing the foaming temperature and foaming duration resulted in an increase in pore size and the amount of porosity whereas resulted in a decrease in density. Compression test was conducted on the foamed samples as a mechanical test and it was found that the sample with a large pore size and high linear expansion ratio showed lower compression strength.

ScienceCode : 710

KeyWords : Al-Zn foams, metal foams, powder metallurgy

PageNumber : 75

Supervisor : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

## TEŞEKKÜR

Tez konusu seçiminde, araştırma ve deneysel çalışma sürecinde bilgisini ve tecrübesini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Mehmet TÜRKER' e teşekkür eder, şükranlarımı sunarım. Deneysel çalışmalarında yardımları ve deneyimleriyle gösterdiği destekten dolayı değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ, sıcak presleme konusunda yardımını eksik etmeyen Öğr. Gör. Halil KARAKOÇ ve tez konum hakkında bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen Öğr. Gör. Dr. Uğur GÖKMEN' e ve Yrd. Doç. Dr. Arif UZUN' a; manevi desteğinden dolayı Yrd. Doç. Dr. Uğur ARABACI, araştırma görevlilerimiz Arş. Gör. İrem Burcu ALGAN ve Arş. Gör. Yasemin DÜNDAR'a ve arkadaşım Gökhan ERİAN' a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu çalışmam boyunca göstermiş oldukları sabır ve anlayışlarından ve manevi sonsuz desteklerinden dolayı beni yalnız bırakmayan aileme çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
<b>1.GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2.METALİK KÖPÜKLER.....</b>	<b>3</b>
2.1.Metalik Köpük Üretim Yöntemleri .....	8
2.1.1.Açık gözenekli metalik köpüklerin üretim yöntemleri .....	9
2.1.2.Kapalı gözenekli metalik köpüklerin üretim yöntemleri .....	13
<b>3. MEKANİK ÖZELİKLER VE UYGULAMA ALANLARI .....</b>	<b>23</b>
3.1.Mekanik Özellikler .....	23
3.2.Uygulama Alanları .....	25
3.2.1.Yapısal uygulama alanları .....	25
3.2.2.Fonksiyonel uygulama alanları .....	31
<b>4.DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>33</b>
4.1.Materyal ve Metot .....	33
4.1.1.Tozların karıştırılması.....	33
4.1.2.Presleme işlemi .....	33
4.1.3.Köpürtme işlemi.....	34

	<b>Sayfa</b>
4.1.4.Yoğunluk ve gözeneklilik oranının belirlenmesi .....	35
4.1.5.Lineer genişleme oranının belirlenmesi.....	36
4.1.6.Mekanik özelliğinin belirlenmesi .....	36
<b>5.DENEYSEL BULGULAR.....</b>	<b>37</b>
5.1. Gözenek Morfolojileri .....	37
5.2. Gözenek Duvarlarının Karakterizasyonu .....	43
5.3. Zn Oranının Yoğunluk Değerlerine Etkisi .....	44
5.4. Zn Oranının Lineer Genleşme Oranlarına Etkisi .....	48
5.5. Zn Oranının Gözeneklilik Oranlarına Etkisi .....	53
5.6. Zn Oranının Gözenek Boyutuna Etkisi.....	57
5.7. Al-Zn Köpüklerin Basma Dayanımları .....	62
<b>6.SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>65</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>67</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>75</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. TM yönteminin özellikleri .....	22
Çizelge 3.1. Farklı firmalara ait metalik köpüklerin özelliklerinin incelenmesi .....	23
Çizelge 4.1. Kullanılan tozların fiziksel özellikleri .....	33
Çizelge 4.2. Sıcak presleme işlemi parametreleri .....	34
Çizelge 4.3. Köpürtme işlemi parametreleri .....	35

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Metalik köpüklerin kronolojik gelişimi .....	4
Şekil 2.2. Metalik köpüklerin çok fonksiyonluluğu.....	5
Şekil 2.3. Köpüğün kararlılığını sınırlayan faktörler .....	8
Şekil 2.4. Katı-gaz ötektik katılma yönteminin şematik gösterimi .....	10
Şekil 2.5. İnfiltrasyon yöntemi (Duocel) .....	11
Şekil 2.6. Yer tutucu malzemelerin arasına hassas döküm yöntemi.....	12
Şekil 2.7. Gaz enjekte edilerek doğrudan köpük üretim yöntemi.....	13
Şekil 2.8. Tercih edilebilir oran ve boyuttaki parçacıklar.....	14
Şekil 2.9. Alporas metalik köpük üretim yöntemi .....	15
Şekil 2.10. Formgrip yönteminin şematik gösterimi .....	17
Şekil 2.11. Toz metalurjisi üretim yöntemi işlem sırası .....	18
Şekil 2.12. 750°C sıcaklıkta köpürtme işlemine tabi tutulan Al/TiH <sub>2</sub> karışımının lineer genişleme davranışı.....	19
Şekil 2.13. Tek eksenli preslemenin kesit görünüşü.....	21
Şekil 3.1. Alüminyum alaşımlı metalik köpüğün gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.....	24
Şekil 3.2. Metalik köpüğün kullanım alanlarının gözenek ve uygulama türüne göre gruplandırılması .....	25
Şekil 3.3. Metalik köpüklerin otomotiv endüstrisinde uygulama kategorileri.....	26
Şekil 5.1. Al-Zn denge diyagramı.....	43
Şekil 5.2. 690°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak yoğunluk değerlerinin değişimi .....	45
Şekil 5.3. 710°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak yoğunluk değerlerinin değişimi .....	46
Şekil 5.4. 730°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak yoğunluk değerlerinin değişimi .....	47

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.5. %10-15-20 Zn ilavelerine göre köpürtme sıcaklıklarına bağlı olarak yoğunluk değerlerinin değişimi .....	48
Şekil 5.6. 690°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak lineer genleşme oranlarının değişimi .....	49
Şekil 5.7. 710°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak lineer genleşme oranlarının değişimi .....	50
Şekil 5.8. 730°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak lineer genleşme oranlarının değişimi .....	51
Şekil 5.9. %10-15-20 Zn ilavelerine göre köpürtme sıcaklıklarına bağlı olarak lineer genleşme oranlarının değişimi .....	53
Şekil 5.10. 690°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak gözeneklilik oranlarının değişimi .....	54
Şekil 5.11. 710°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak gözeneklilik oranlarının değişimi .....	55
Şekil 5.12. 730°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak gözeneklilik oranlarının değişimi .....	56
Şekil 5.13. %10-15-20 Zn ilavelerine göre köpürtme sıcaklıklarına bağlı olarak gözeneklilik oranlarının değişimi .....	57
Şekil 5.14. 690°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak gözenek boyutlarının değişimi .....	58
Şekil 5.15. 710°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak gözenek boyutlarının değişimi .....	59
Şekil 5.16. 730°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak gözenek boyutlarının değişimi .....	60
Şekil 5.17. %10-15-20 Zn ilavelerine göre köpürtme sıcaklıklarına bağlı olarak gözenek boyutlarının değişimi .....	61
Şekil 5.18. 710 ve 730°C köpürtme sıcaklığında 7,5 dakika ve 10 dakika köpürtme sürelerindeki %10 Zn ilaveli köpük numunelere ait basma dayanımları.....	63
Şekil 5.19. 710 ve 730°C köpürtme sıcaklığında 7,5 dakika ve 10 dakika köpürtme sürelerindeki %15 Zn ilaveli köpük numunelere ait basma dayanımları.....	64

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Optik mikroyapı görüntüleri .....	5
Resim 2.2. Metalik köpüğe ait X-ray radyografik görüntü.....	6
Resim 2.3. Farklı hücreli metallere ait mikroyapılar .....	7
Resim 2.4. Farklı gözenek morfolojisinde metalik köpükler.....	7
Resim 2.5. Farklı üretim yöntemlerine ait mikroyapılar .....	9
Resim 2.6. Gasar yöntemine ait gözenek yapıları .....	10
Resim 2.7. Duocel yöntemiyle elde edilmiş bir gözenek yapısının optik mikroskop görüntüsü ve bu yöntemle elde edilmiş parça .....	12
Resim 2.8. Yer tutucu malzemeler kullanılarak hassas döküm yöntemiyle üretilen hücreli alüminyum malzeme ve üretilen parça .....	13
Resim 2.9. Gaz enjeksiyon yöntemiyle üretilen bir metalik köpüğün optik mikroskop görüntüsü .....	14
Resim 2.10. Alporas yöntemiyle üretilen köpük malzemeye ait gözenek yapısı .....	16
Resim 2.11. Formgrip yöntemiyle üretilen Al-9Si/SiC <sub>p</sub> kompozit köpükteki SiC miktarını gösteren ve uygulanan ısıl işlemleri içeren optik mikroskop görüntüleri .....	17
Resim 2.12. Farklı metaller için gözenek yapılarının optik mikroskop görüntüleri.....	19
Resim 2.13. TM yöntemiyle üretilen alüminyum köpük parçaları ve alüminyum sandviç köpük .....	21
Resim 3.1. Araç sistemleri için çarpma enerjisi sönmüleyici .....	26
Resim 3.2. Karmann tarafından üretilmiş alüminyum sandviç köpük (ASK).....	27
Resim 3.3. Ariane 5 roketinin koni prototipi, soldaki parçanın roketteki konumu .....	28
Resim 3.4. Dövme ASK den elde edilen bisiklet krank kolu prototipi.....	28
Resim 3.5. Metalik köpük kaskların ön ve üst darbelere karşı test edilmesi .....	29
Resim 3.6. Al köpüğün integral zırh malzemesi olarak tasarımı.....	30

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.7. Farklı gözenek boyutunda alüminyum süngerden yapılmış filtreler ve alüminyum köpükten yapılmış susturucular .....	31
Resim 3.8. Isı değiştirici kanallar .....	32
Resim 3.9. Farklı Al köpük tasarımları .....	32
Resim 4.1. Hidrolik pres ve ekipmanları .....	34
Resim 4.2. Basma testi düzeneği .....	36
Resim 5.1. 690°C köpürtme sıcaklığında elde edilen köpük numuneler .....	38
Resim 5.2. 710°C köpürtme sıcaklığında elde edilen köpük numuneler .....	40
Resim 5.3.730°C köpürtme sıcaklığında elde edilen köpük numuneler .....	42
Resim 5.4. 10 dakika köpürtme süresinde elde edilen köpük numunelerin SEM görüntüleri .....	44

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklamalar

<b>D</b>	viskozite, $\text{mN.s/m}^2$
<b><math>\rho^+</math></b>	köpüğün yoğunluğu, $\text{g/cm}^3$
<b>P</b>	gözeneklilik oranı
<b>L</b>	numune boyu, mm
<b>LG</b>	lineer genleşme oranı
<b><math>\rho_s</math></b>	köpürtme sonrası yoğunluk, $\text{g/cm}^3$
<b><math>\rho^*</math></b>	köpürtme öncesi yoğunluk, $\text{g/cm}^3$
<b><math>m_h</math></b>	köpüğün havadaki ağırlığı, g
<b><math>m_s</math></b>	köpüğün sudaki ağırlığı, g

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>ASK</b>	Alüminyum Sandviç Köpük
<b>IFAM</b>	Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü
<b>MMK</b>	Metal Matrisli Kompozit Malzeme
<b>TM</b>	Toz metalurjisi

## 1.GİRİŞ

Gözenekli yapılar, geçmişten günümüze kadar gelen, filtreleme, paketlenme ve yalıtım gibi farklı ortamlarda uygulama alanı olarak yerini bulan önemli malzemelerdir (Türker, Uzun, Gökmen, 2009). Yüksek dayanıma sahip ve aynı zamanda hafif olan metalik köpüklerin son zamanlarda yapısal ve fonksiyonel malzeme olarak kullanımı artmıştır (Gökmen, Özçatalbaş, Türker, 2008; Karakoç, Çinici, Çıtak, 2012). Metalik köpüklerin mekanik özellikleri polimerik köpük malzemelere oranla daha üstündür. Yüksek sıcaklık dayanımı ve bu sıcaklıklarda yapısını koruması önemli özelliklerindedir. Bu özelliklerinin yanında yüksek sertlik ve yüksek miktarda enerji sönümlenme özellikleri, otomotiv ve savunma sektöründe metalik köpükleri cazip kılan özelliklerdir (Kovacık, Simancık). Ayrıca yüksek dayanım ve gözenekli yapısı plastik deformasyon özelliklerinin kombinasyonunu sağlar (Kovacık, Simancık). Kullanım alanları arasında otomotiv, demir yolu taşımacılığı, gemi yapımı, hafif konstrüksiyonlar, uçak ve uzay sanayi yer almaktadır (Türker). Bunlara ek olarak; darbe emiciler, integral zırh malzemesi, tasarım ve mimari dekorasyonda ve motosiklet kaskı üretiminde büyük bir öneme sahiptir (Türker, 2010; Türker, Çinici, 2010).

Metalik köpüklerin üretim yöntemleri arasında toz metalurjisi(TM) yöntemi en yaygın kullanılan yöntemdir (Karakoç ve diğerleri; Türker, Çinici, 2010).TM yöntemiyle köpürebilir malzeme üretmek için farklı iki metot mevcuttur. Bunlardan biri sıcak presleme, diğeri ise soğuk preslemedir. Sıcak presleme işlemi alüminyum veya alüminyum esaslı alaşımlarla uygun köpürtücü maddenin karıştırılması ile başlar. Bu yöntemin soğuk preslemeye göre avantajı işlem sırasında sinterlemenin gerçekleşmesidir. Soğuk presleme işlemi de sıcak preste olduğu gibi toz karıştırma işlemiyle başlar, ancak sinterleme işlemi sıkıştırma işleminden sonra uygulanır ve ekstrüzyon ile haddeleme işlemlerine tabi tutulur. Karışım toz, kalıp içerisinde sıkıştırılarak yoğunluk kazandırılıp preform malzeme elde edilir. Elde edilen preform malzeme alüminyum ergime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta köpürtme işlemi uygulanarak metot sonuçlanır.

Al esaslı metalik köpükler, kapalı hücre yapısı ve hafifliği ile ilgi odağı olmaktadır (Türker ve diğerleri, 2009; Başpınar, Yurtçu, 2011). Metalik köpükler darbe enerjisini plastik enerjiye çevirebilmekte ve birçok metale göre daha çok enerji absorbe edebilmektedir. Yüksek dayanım ve homojen dağılımlı gözenek yapısına sahip olmalarından dolayı metalik köpükler arasında önemli bir yere sahiptir (Başpınar, Yurtçu). Bu şekilde

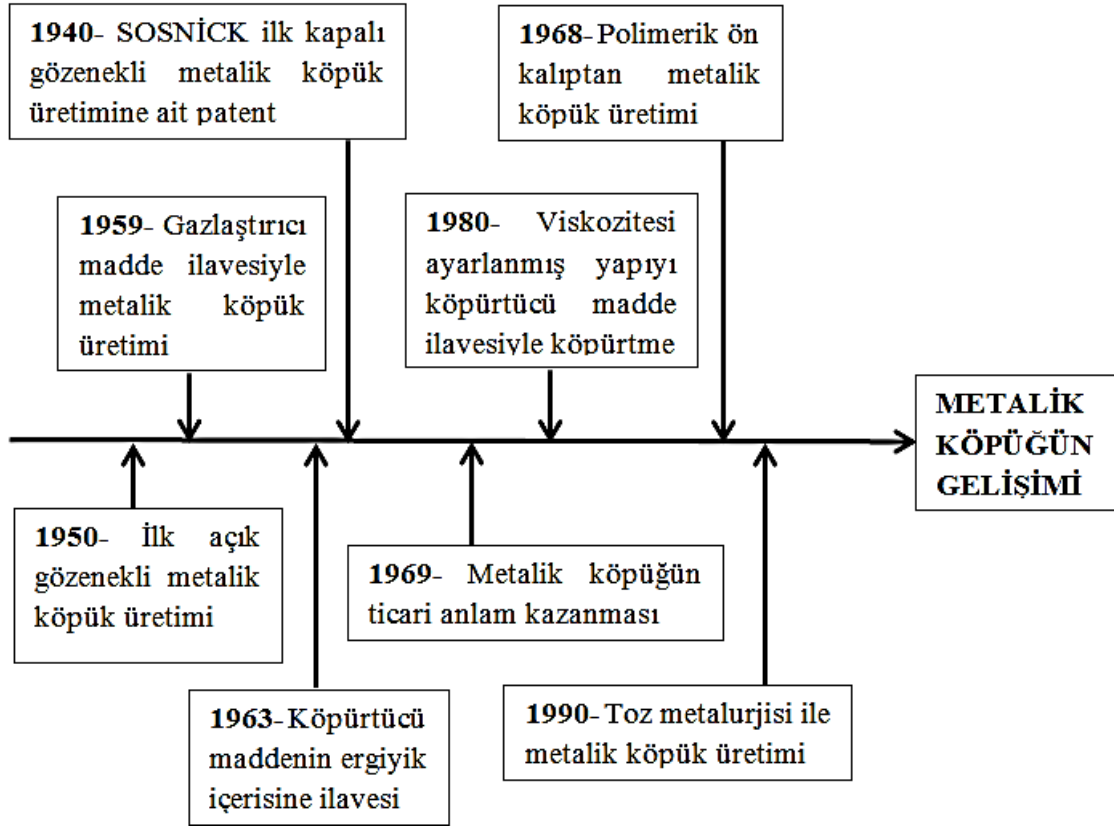
metallerin sahip oldukları özgün özelliklerle metalik köpük elde edilerek bu özelliklerin kombinasyonu sağlanmış olur.

Bu çalışmada Al matris malzemesi içerisine farklı oranlarda çinko ilave edilerek toz metalurjisi yöntemiyle ve sıcak presleme metoduyla metalik köpük preform malzeme üretilmiştir. Bu üretilen preform malzeme farklı köpürtme sıcaklıklarında ve farklı köpürtme sürelerinde köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Köpürtme işlemi sonucunda metalik köpük malzemelerin farklı köpürtme sıcaklıkları, farklı köpürtme sürelerinin ve farklı Zn oranlarının lineer genleşme miktarları, yoğunluk değerleri, gözeneklilik oranları ve gözenek boyutları tespit edilmiştir. Ayrıca mekanik test olarak basma testi uygulanıp basma dayanımları ölçülmüştür.

## 2. METALİK KÖPÜKLER

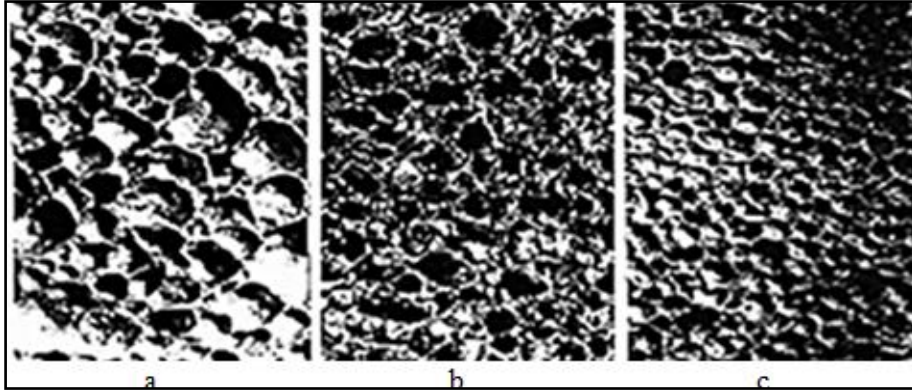
Metalik köpük üretimi ve karakterizasyonu üzerine çalışmalar son on yılda ivme kazanmıştır. Ülkemizde ise köpük oluşum mekanizmaları ve özelliklerini karakterize etme amaçlı faaliyetler yoğun bir şekilde sürdürülmektedir (Ozan, Katı; Güven). Metalik köpük üzerine yazılı kaynak ilk olarak 1940 yılında Sosnick firması tarafından yayınlanmıştır (Banhart, 2006). 1960 lı yıllarda farklı bir yaklaşımla United Aircraft Corporation metalik köpük üretiminin patentini almıştır. 1963 yılında Hardy ve Peiskerköpürtücü maddelerin yarı ergimiş metale direkt olarak ilave edilmesi yöntemini içeren proseslerin patentine sahiptirler. 1968 yılında Kaliforniya’ da Enerji Üretim ve Araştırma firması (ERG), Duocel ticari adıyla bilinen polimerik kalıp içerisinden süzme yoluyla açık hücreli metalik köpük üretim yöntemini geliştirmiştir.

1986 yılında Japon Shinko Wire firması tarafından Alporas olarak adlandırılan ilk alüminyum metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde kalsiyum ilavesiyle viskozitesi artırılmış sıvıya  $TiH_2$  ün direkt enjekte edilmesiyle metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir (Güven, 2011) (Şekil 2.1). Hydro ve Cymat firmaları tarafından ilk kez gaz enjeksiyon metodu ile alüminyum ve alaşımlarından metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir (Karakoç, 2009; Uzun, 2009). Ardından Foaminal ve Alulight firmalarının üretimde öncü olduğu toz metalürjisi yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde metal veya alaşım tozları köpürtücü madde tozları ile karıştırılarak kalıp içerisinde preslenmiştir. Elde edilen karışım ekstrüze edilerek yarı mamul haline getirilip, istenen şekilde kesildikten sonra ergime noktasının biraz üstünde bir sıcaklıkta köpürtülerek metalik köpük malzeme elde edilmektedir (Türker, 2010).



Şekil 2.1: Metalik köpüğün kronolojik gelişimi (Güven, 2011)

Metalik köpük içinde gaz kabarcıklarının ince metal filmle ayrıldığı (Yang, Hur, He, Yang, 2000; Papadopoulos, Konstantinidis, Papanastasiou, Skolionos, Lefakis, Tsipas, 2004), yaklaşık %70 oranında gözenek içeren gaz ve katı halde maddelerin birleşimi olarak tanımlanır (Karakoç). Metalik köpük üretiminde farklı metal ve alaşımlar kullanılmaktadır: Al, Al-Si, Al-Si-Cu (Banhart, Seeliger, 2008), Pb (Banhart,2001), Al-Zn (Lafrance, Isac, Jalilian, Waters, Drew, 2011; Kitazono, Takiguchi, 2006; Liu, Yu, Zhu, Wei, Luo, Liu, 2008) (Resim2.1), Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Alizadeh, Aliabadi, 2012), Zn (Banhart,2001; Kovacik ve diğerleri, 2004,2001), Ti, Fe ve süper alaşımlar (Bram, Stiller, Buchremer, Störer, Daur, 2000), Ni (Wadley,2002) ...



Resim 2.1: Optik mikro yapı görüntüleri: a) alüminyum(4:1), b) çinko(6:1), c) Kurşun(4:1) (Banhart,Baumeister, Weber, 1995)

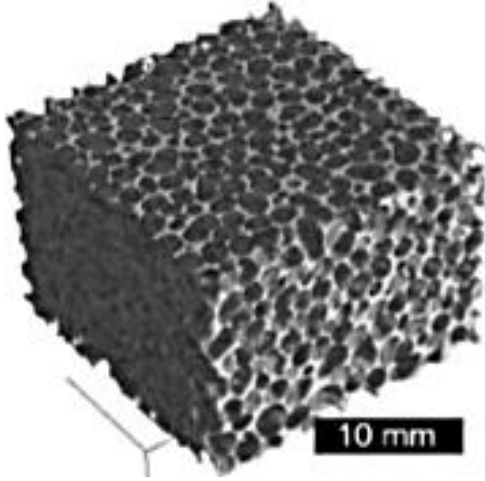
Metalik köpükler, hafifliği ile yüksek sertliğe sahip olması ve iyi enerji sönümlene karakteri ile yüksek basma dayanımı gibi mekanik ve fiziksel özelliklerin kombinasyonu ile bilinir (Banhart,2000-2001). Bunun dışında sahip olduğu özellikler; düşük yoğunluk, mükemmel dayanım, iyi ses ve termal izolasyon (Perales, Jung, Drew, 2012; Saadatfar, Mukherjee, Madadi, Schröder, Garcia, Shaller, Hutzler, Sheppard, Banhart, Ramamurty, 2012), elektromanyetik koruma, ateşe dayanıklılıktır (Başpınar, Yurtçu, 2011). Böylece, metalik köpüklerin genel özellikleri için, özgün fiziksel, mekanik, termal, elektriksel ve akustik özelliklerin kombinasyonu olduğu söylenebilir.



Şekil 2.2: Metalik köpüklerin çok fonksiyonluluğu (Raj, Daniel, 2007)

Metalik köpük malzemeler, sahip olduğu mekanik ve fiziksel özellikler sayesinde birçok yapısal ve fonksiyonel uygulama alanında yerini almıştır. Bu yapısal uygulama alanları arasında otomotiv, demiryolu ve inşaat endüstrileri, uzay araçları, gemi ve spor

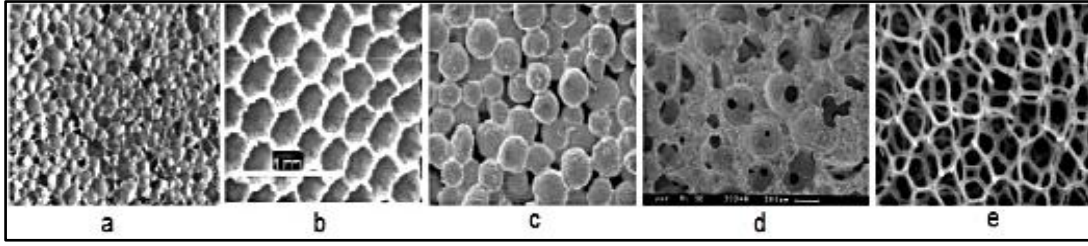
malzemeleri yapımı, biyomedikal uygulamalar; fonksiyonel uygulama alanları arasında ise filtreleme ve ayırma, ısı dönüştürücü, soğutma sistemleri, elektrokimyasal uygulamalar, tasarım ve mimari uygulamalar sayılabilir (Başpınar, Yurtçu, 2011).



Resim 2.2: Metalik köpüğe ait X-ray radyografik görüntü (Banhart, 2013)

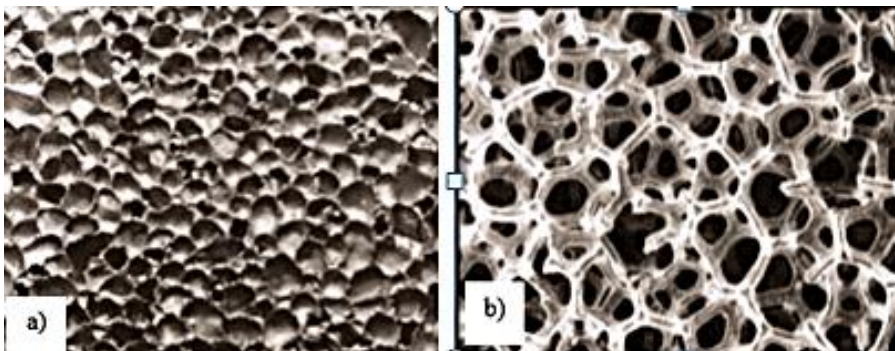
Literatürde “metalik köpük” terimi ile ilgili anlam karmaşası söz konusudur. Bu karmaşayı gidermek için metalik köpüklerle benzer olan diğer malzemelerin tanımını yapmak sağlıklı ve doğru bir yol gösterici yöntem olacaktır.

- ✓ *Hüresel metaller:* Herhangi bir gaz boşluğunun metalik gövde içerisinde dağılmasını kaynak gösteren en genel terimdir (Banhart, 2000).
- ✓ *Gözenekli metaller:* Genel bir terimdir; ancak, gözeneklerin genellikle yuvarlak ve birbiriyle bağlantısı olmadığı %70 ten az küresele yakın gözenek seviyesine sahip malzeme grubudur (Banhart, 2000; Babcsan, Banhart,2003).
- ✓ *Metalik köpükler(katı):*Gözenekli metallerin özel sınıfıdır. Metalik gövdedeki hücreler kapalı, küresel veya polihedral(çok yüzlü) yapıdadır(Resim 2.3). Diğerlerinden ayıran özelliği, herbir hücrenin birbirinden ince bir tabaka ile ayrılmış olmasıdır (Banhart, 2001).
- ✓ *Metal süngerler:* Genellikle birbirine bağlı gözeneklerin oluşturmuş olduğu hüresel metallerin özel morfolojisidir. (Banhart, 2006; Babcsan,2003)



Resim 2.3: Farklı hüresel metaller; a) alüminyum metalik köpük, b) demir esaslı hüresel metal, c) metal sünger formunda sinterlenmiş bronz tozu, d) alüminyum sünger e) nikel sünger (Banhart, 2003)

Metalik köpükler sahip oldukları gözeneğin şekline, boyutuna, anizotropik özelliklerine, açıklık ve kapalılık özelliklerine göre karakterize edilir. Böylece sahip oldukları gözeneklerin yapısına bağlı olarak *açık ve kapalı hücreli* olmak üzere iki grupta incelenir. Gözenekler birbirinden hücre duvarı ile ayrılmış ise **kapalı gözenekli metalik köpük** (Resim 2.4), birbiriyle bağlantılı olan gözeneğe sahip yapıya da **açık gözenekli metalik köpük** denir (Ozan, Taksin). Kapalı hücreli metalik köpük, açık hücreli, metalik köpüklere göre rijit, dayanıklı, darbe ve ses sönümleme kabiliyeti yüksektir. Bu özelliklerinden dolayı araçlarda ve binalarda güvenlik duvarı malzemesi olarak kullanılır (Queheillalt, Katsumura, Wadley, 2004). Ayrıca, yapı içerisinde gazı hapsedebildiği için kapalı gözenekli metaller gaz yalıtıcı görev de üstlenebilir. Açık gözenekli köpüklerin ısı iletkenlik katsayısı yüksek olduğu için, enerji sönümleme kabiliyeti yüksek olmasına rağmen ısı değiştirici veya soğutucu olarak kullanılabilir (Azzi, 2004).



Resim 2.4: Farklı gözenek morfolojisinde metalik köpükler; a) kapalı gözenekli metalik köpük, b) açık gözenekli metalik köpük (Pawlicki, Koza, Zurawski, Leonowicz, 2003; Banhart, Baumeister, 1998)

Metalik köpüklerin oluşum safhasında köpüğün kararlılığını etkileyen bazı faktörler söz konusudur. Bu faktörleri açıklamak, oluşum safhasında meydana gelen değişimleri anlaşılır hale getirir. Bu faktörler Şekil 2.3' te şematize edilmiştir.



Şekil 2.3: Köpüğün kararlılığını sınırlayan faktörler (Banhart, 2006)

*Gözenek hareketleri:* Köpürtme esnasında dış kuvvetlerin etkisi ve iç gaz basıncının değişimi gibi faktörlerden dolayı gözeneklerin birbirine doğru hareket etmesidir.

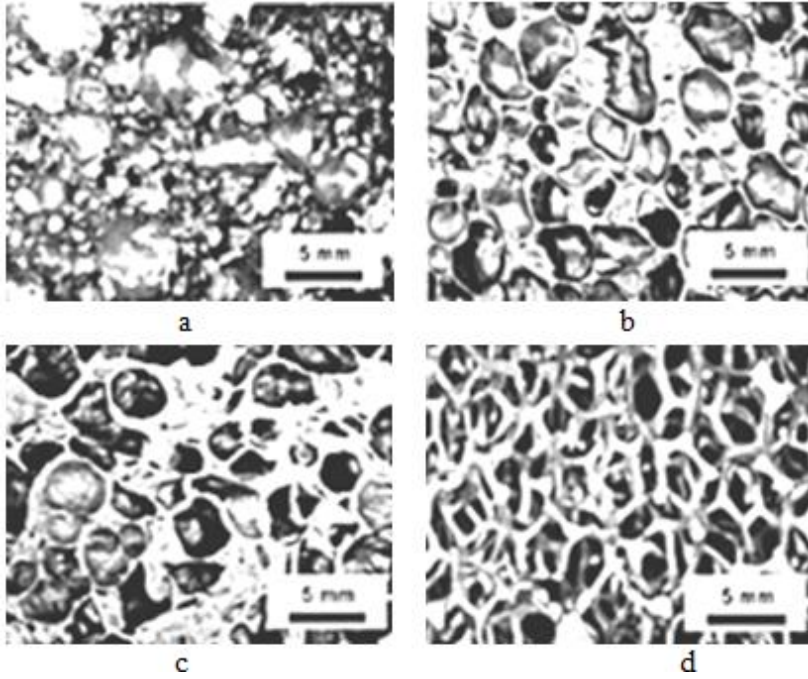
*Drenaj:* Ergiyik metalin yerçekimi kuvvetlerinden dolayı, özellikle gözeneğin alt kısımlarında bulunan üç gözeneğin birleştiği plato sınırlarına doğru hareketidir.

*Kırılma veya birleşme:* Köpük duvarının kaybolmasına yol açan ani bir kararsızlıktır.

*Gözenek irileşmesi:* Oluşan gazın küçük gözenekten büyüğe doğru yavaşça difüzyonu ile gerçekleşir.

## 2.1. Metalik Köpük Üretim Yöntemleri

Metalik köpük üretim yöntemleri açık ve kapalı gözenekli metalik köpüklerin üretimi olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Bunlar içerisinde en çok kullanılan teknikler, kapalı gözenekli metalik köpük üretim yöntemleri içerisinde ergiyik içerisine köpürtücü madde ilavesi (Alporas) veya gaz enjekte edilmesi (Hydro-Cymat), TM yöntemi (Foaminal/Alulight); açık gözenekli metalik köpük üretim yöntemleri içerisinde ise katı-gaz ötektik katılma yöntemi (Gasar) ve döküm yöntemi (Duocel) dir.



Resim 2.5: Farklı üretim yöntemlerine ait mikroyapılar: a) Cymat, b) Alporas, c) Foaminal/ Alulight, d) Duocel (Wadley, 2002)

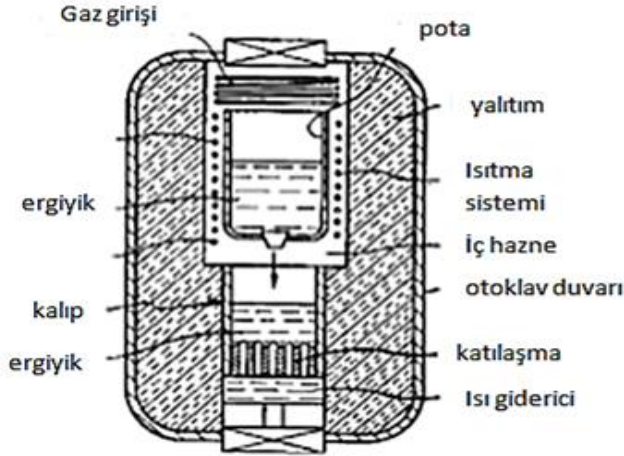
### 2.1.1. Açık gözenekli metalik köpük üretim yöntemleri

#### Katı- gaz ötektik katılaşma yöntemi

Katı-gaz ötektik katılaşma yöntemi, hidrojen gazı yardımıyla bazı ötektik sisteme sahip bazı metalik yapılar için kullanılmaktadır. Bu metallere birinin 50 bar civarında hidrojen gazı ortamında ergitilmesi sonucunda hidrojenle şarj edilmiş daha homojen bir ergiyik elde edilir. Daha sonra sıcaklığı düşürüldüğünde, ergiyik (katı + gaz) heterojen ikili faz sistemi ötektik dönüşüme geçer (Banhart,2000). Sistemin bileşimi ötektik konsantrasyona yeterince yakın olduğu zaman o sıcaklıkta segregasyon gerçekleşecektir (Banhart,2001). Çünkü ötektik bileşim, sistemin basıncına ve dış basınca bağlıdır ve hidrojen miktarı sistemle uyumlu olmalıdır. Ergiyikten ısının uzaklaştırılması direkt olarak katılaşmaya yol açar. Katılaşma hızı 0,05 ile 5 mm/s arasındadır. Hidrojen miktarı katılaşma yüzeyine doğru artmaya başlar ve gaz kabarcıkları oluşur (Banhart,2000; Babcsan, Leitmeier,2003).

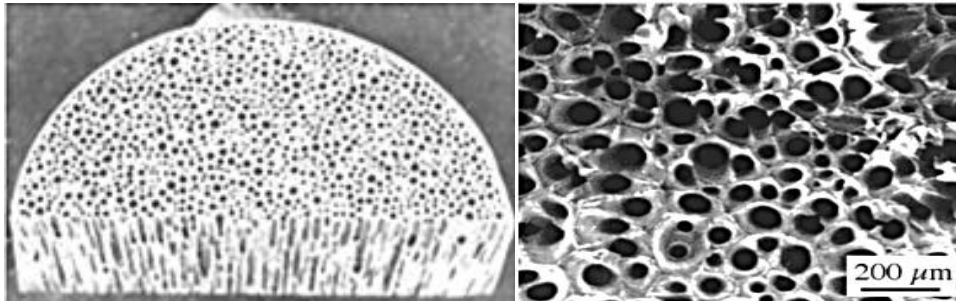
Gasar olarak adlandırılan bu yöntemde, metal üst kısımdaki tankın içinde ergitilir. Sonradan düzeneğe gönderilen hidrojen gazı ergiyik içerisine hapsolarak metali bozunmaya uğratar ve gaz kabarcıkları oluşturur. Ergiyik içerisindeki hidrojen gazının çözme etkisi dış basıncın artmasıyla artar. Gazı sönmülemiş olan sıvı metal, alt kısmı

soğutulmuş başka bir tanka aktarılır, tankın tabanının soğuk olmasının etkisiyle, sıvı metal tabandan başlayarak yukarı doğru katılaşmaya başlar (Banhart, 2000). Düzeneğin hemen her tarafı kontrol edilebilen basınçlı gaz (Argon) ile sarılmıştır (Ashby, Evans, Fleck, Gibson, Hutchinson, Wadley, 2000). Gasar yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.4’ te gösterilmiştir.



Şekil2.4: Katı-gaz ötektik katılama yöntemi şematik gösterimi(Gasar) (Banhart,2001)

Bu yöntemle elde edilen köpük malzemelerin gözenek yapısı açık gözeneklidir ve genel olarak küresel şekillidir. Gözeneklerin şekli ve ebatları, kullanılan metal veya alaşımların kimyasal bileşimi, ergiyik sıcaklığı, gaz basıncı ve soğutma hızına bağlıdır. Bu yöntemde daha çok Al, Be, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn ve Ni bazlı alaşımlar tercih edilmiştir (Banhart,2001; Ashby ve diğerleri). Resim 2.6’da bu yöntemden elde edilen gözenek yapıları gösterilmiştir.Elde edilen gözeneklerin boyutları, 10  $\mu\text{m}$ - 10 mm çapında, 100  $\mu\text{m}$  ila 300 mm uzunluğundadır. Gözeneklilik oranı %5 ila 75 arasındadır.



Resim 2.6: Gasar yöntemine ait gözenek yapıları (Banhart, 2000; Gergely, Degischer, Clyne, 2003)

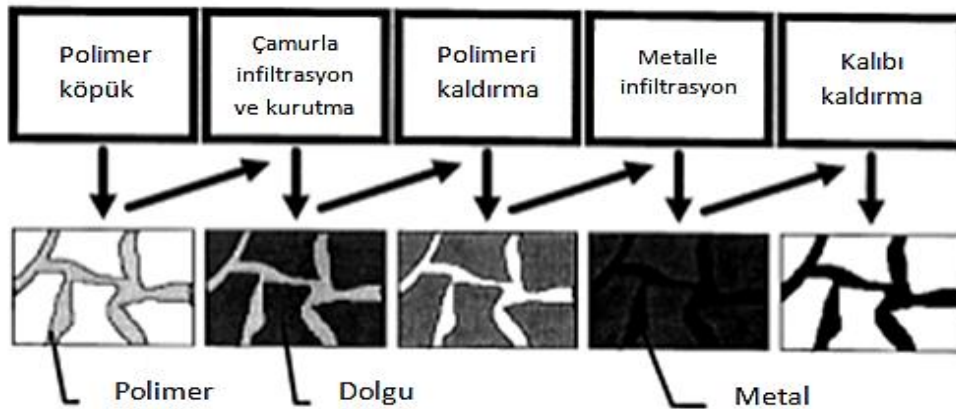
## Hassas döküm yöntemleri

Hassas döküm yöntemi açık gözenekli metalik köpük elde etmek için en çok tercih edilen üretim yöntemlerinden biridir. Hassas döküm yönteminin iki farklı metodu vardır.

- ❖ İnfiltrasyon
- ❖ Boşluk tutucu malzemelerin etrafına hassas döküm

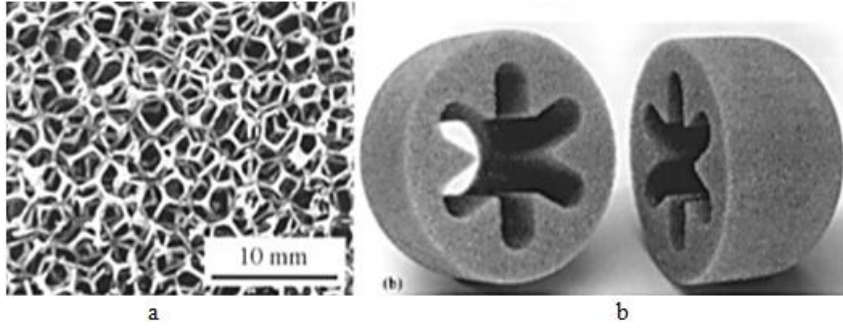
### *İnfiltrasyon yöntemi*

Hassas döküm ile açık gözenekli metalik köpük üretim yönteminin bir türüdür. Bu yöntem infiltrasyon yöntemi olarak adlandırılır ve Duocel ticari adıyla bilinir. Metalik köpük üretimi için istenilen gözenek boyutu ve nisbi yoğunluğu sağlayacak polimer model hazırlanır. Ergiyik metal gözenek şeklini belirtecek olan kalıp içerisine dökülür. Hazırlanan polimer model kuma gömülür ve döküm çamuru ile kaplanır. Kalıp döküm malzemeyi katılaştırmak için fırın içerisinde pişirilir. Son olarak kalıp soğutulur metal alaşımı ile doldurulur. Soğutulduktan sonra orijinal polimer köpüğe benzemiş olan metalik köpük ayrıştırılarak alınır (Amjad, 2001). Şekil 2.5'te infiltrasyon yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.5: İnfiltrasyon yönteminin şematik gösterimi (Duocel) (Banhart,2001)

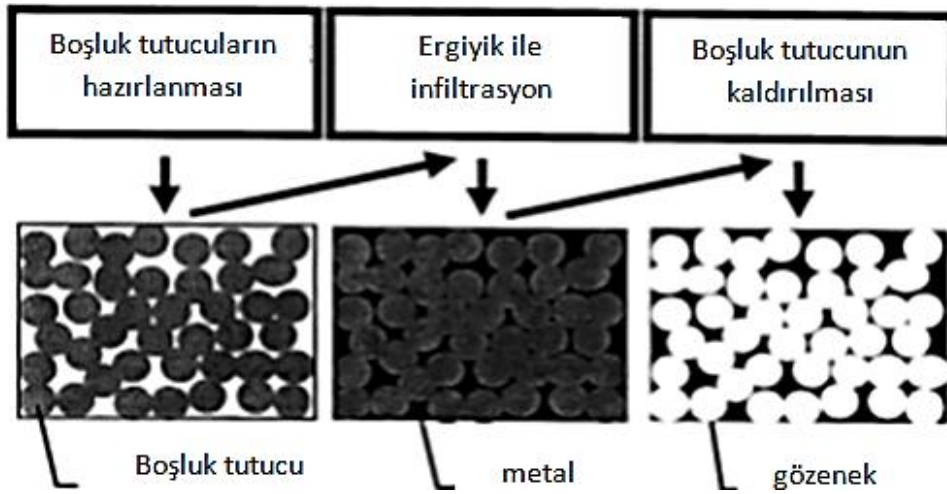
Bu yöntemde en çok kullanılan alüminyum alaşımı AlSi7Mg (A356) veya 6101 alaşımıdır (Gergely, Degischer, Clyne, 2000; Banhart, 2001). Elde edilen gözenek boyutları 0,5-4 mm arasındadır ve gözeneklilik oranı %88-92 arasında değişmektedir. Metalik köpüğün homojenliği iyidir, ancak maliyetinden dolayı kullanımı sınırlıdır (Gergely, Clyne, 2000). Resim 2.7'de infiltrasyon yöntemiyle elde edilen gözenek yapısının mikroskopik görüntüsü ve bu yöntemle yapılmış bir parça gösterilmiştir.



Resim 2.7: a) Duocel yöntemiyle elde edilmiş bir gözenek yapısının optik mikroskop görüntüsü, b) Duocel yöntemi ile yapılmış bir parça (Gergely, Degischer, Clyne)

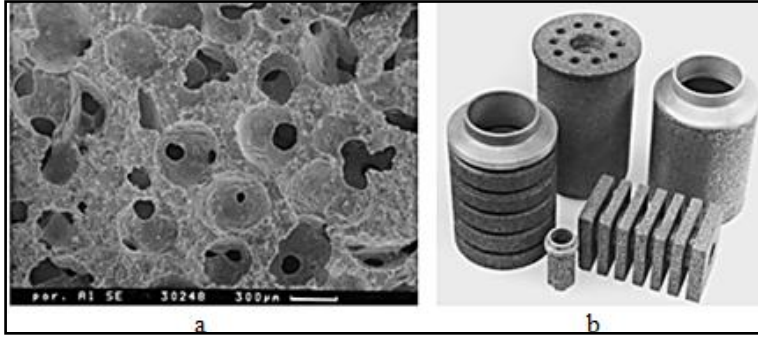
#### *Yer tutucu malzemelerin arasına hassas döküm*

Metalik köpükler, inorganik/organik tanecikler veya içi boş düşük yoğunluğa sahip küreciklerin arasına sıvı metal dökülerek üretilebilir. İşlemden sonra tanecikler ya parça içinde kalır, ya da ısıl işleme veya uygun asit veya çözücü ile çıkarılır (Banhart, 2001). Şekil 2.6'da bu yöntem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Yer tutucu malzemelerin arasına hassas döküm yöntemi (Gergely ve diğerleri, 2000)

Bu yöntemin en önemli avantajı, taneciklerin boyutları ayarlanarak gözeneklerin boyut dağılımının kontrol altına alınabilmesidir. Elde edilen gözenek yapısı homojen ve köpük özellikleri neredeyse izotropiktir. Tespit edilen yoğunluk  $1,1 \text{ g/cm}^3$  kadar düşük olmasına karşın, gözeneklilik oranı %80 ile sınırlıdır. Resim 2.8 de bu yönteme ait bir gözenek yapısı ve elde edilen parçalar gösterilmiştir.

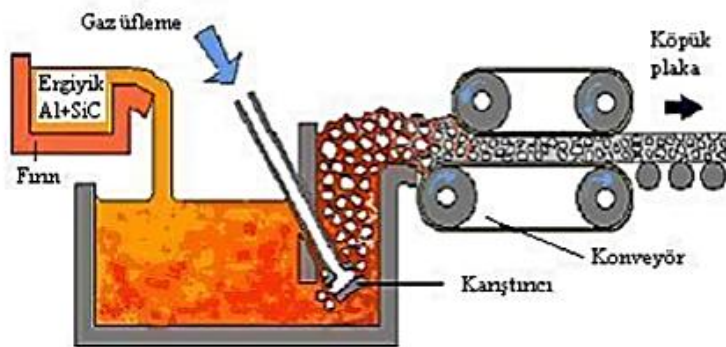


Resim 2.8: Yer tutucu malzemeler kullanılarak hassas döküm yöntemiyle üretilen hücresel alüminyum malzeme ve üretilen parça (Banhart, 2003)

### 2.1.2. Kapalı gözenekli metalik köpük üretim yöntemleri

#### Ergiyik metal içerisine gaz enjektisi ile metalik köpük üretimi

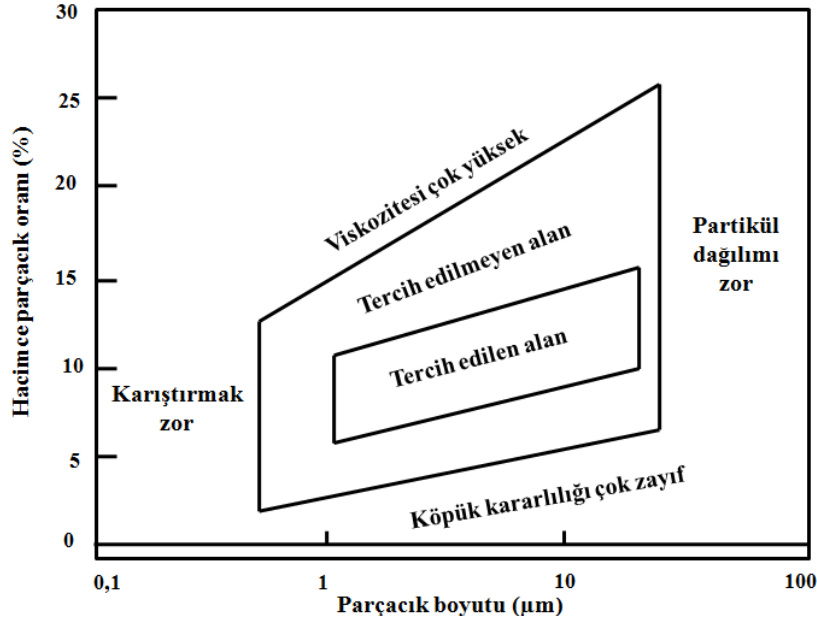
Bu yöntem patenti Alcan International firmasına ait olup, Hydro Aluminium (Norveç) ve Cymat Aluminium (Kanada) firmaları tarafından kullanılmakta olan bir üretim yöntemidir(Wood,1997). Bu yöntemde ilk adım silisyum karbür, alüminyum oksit ya da magnezyum oksit gibi seramik parçacıklar ilave edilerek ergiyik metalin viskozitesini artırmak ve hazır hale getirmektir. İkinci adım ise ergiyik içerisine özel pervane veya titresim nozulu yardımıyla gaz (hava, azot, argon) enjekte edilmesidir. Böylece ergiyik içerisinde homojen olarak dağılmış çok ince gaz baloncukları oluşur (Şekil 2.7). Baloncukların ve ergiyik metalin oluşturmuş olduğu karışım konveyör yardımıyla çekilerek soğumaya bırakılır.



Şekil 2.7: Gaz enjekte edilerek doğrudan köpük üretim yöntemi (Banhart, 2000)

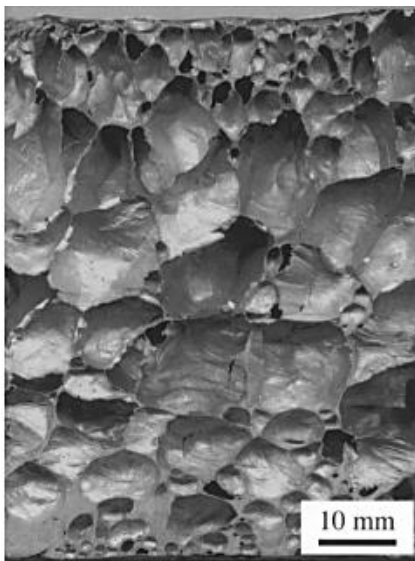
Bu yöntemde elde edilen seramik parçacıklar ve ergiyik metalden oluşan MMK'in (metal matrisli kompozitlerin) gözenek yapısının homojen olmasını sağlamak için seramik parçacıkların hacimsel oranının %10-20 ve boyutlarının 5-20  $\mu\text{m}$  olması istenir (Babcsan,

Banhart, Leitmeier). Partikül hacim oranı ve partikül tane boyutun bağılı olarak çok küçük veya çok büyük gözenek boyutu elde edilebilir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8: Tercih edilebilir oran ve boyuttaki parçacıklar (Karakoç, 2012; Prakash, Sang, Embury, 1995)

Elde edilen MMK'in gözenek boyutu 3-25 mm; izafi yoğunluk değerleri 0,069-054 g/cm<sup>3</sup> (Banhart, 2000; Banhart, 2001); gözeneklilik oranı %80-98; hücre duvarı kalınlığı ise 50-85 µm dir.



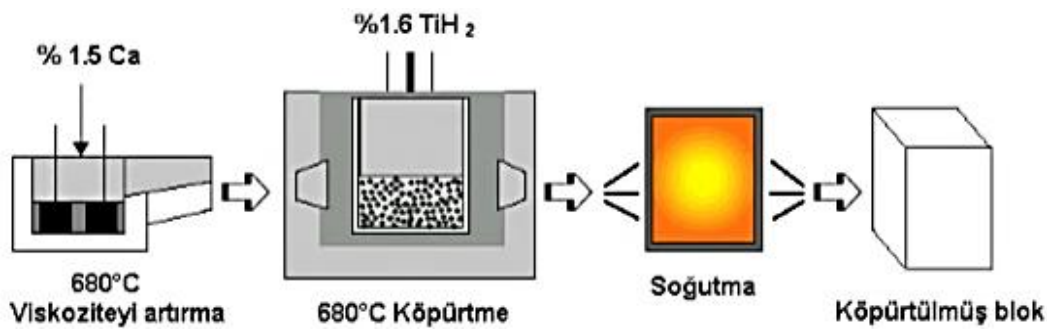
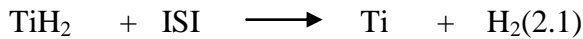
Resim 2.9: Gaz enjeksiyon yöntemiyle üretilen bir metalik köpüğün optik mikroskop görüntüsü (Gergely, Degischer, Clyne)

### Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilave edilerek metalik köpük üretimi

Alporas prosesi olarak adlandırılan ve 1986' dan beri Shinko Wire Company (Japonya) tarafından güncel olarak kullanılan bu yöntemle günde 1000 kg üretim yapılmaktadır (Babcsan, Leitmeier). Bu yöntemde ergiyik içerisine gaz enjekte etmek yerine direkt olarak  $TiH_2$ ,  $ZiH_2$  veya  $CaCO_3$  gibi köpürtücü madde ilave edilerek köpürtme işlemi gerçekleştirilir. Köpürtücü madde belli bir ayrışma sıcaklığında çözünerek gaz açığa çıkar ve köpük oluşumu sağlar (Shapovalov, 1993).

Bu yöntemde, köpürtülecek metal veya alaşım sabit sıcaklıkta ergiyik hale getirilir. Ergiyiğin viskozitesini ayarlamak için  $680^\circ C$ 'de kalsiyum, kalsiyum oksit, kalsiyum alüminyum oksit ( $CaAl_2O_4$ )veya  $Al_2O_3$  ilave edilir. Ergiyik istenen düzeye ulaştıktan sonra ergiyik içerisine köpürtmeyi sağlamak için köpürtücü madde olarak  $TiH_2$ ve  $CaCO_3$  ilave edilir.

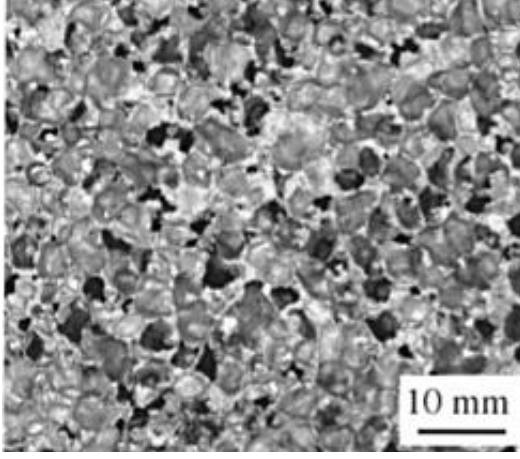
Sonradan ilave edilen  $TiH_2$  ve  $CaCO_3$  köpürtücü maddeler ayrışarak  $H_2$  ve  $CO_2$  gazı açığa çıkarır ve bu gazlar ergiyiğin köpürtmesini sağlar. Köpürtme işlemi yaklaşık 15 dakika sürer (Banhart, 2000). Şekil 2.9'da yöntem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Alporas metalik köpük üretim yönteminin şematik gösterimi (Miyoshi, 2000)

Alporas prosesiyle üretilen metalik köpük blok 2050mm x 650mm x 450mm boyutlarındadır (Banhart, 2000; Banhart, 2001). Malzemelerin izafi yoğunluk değeri 0,18 ila 0,24 g/cm<sup>3</sup> arasında olmakla birlikte, gözenek boyutu 2-10 mm ve gözeneklilik oranı %84-93 tür. Bu yöntem, homojenitesi en yüksek malzeme üretim yöntemlerinden biridir

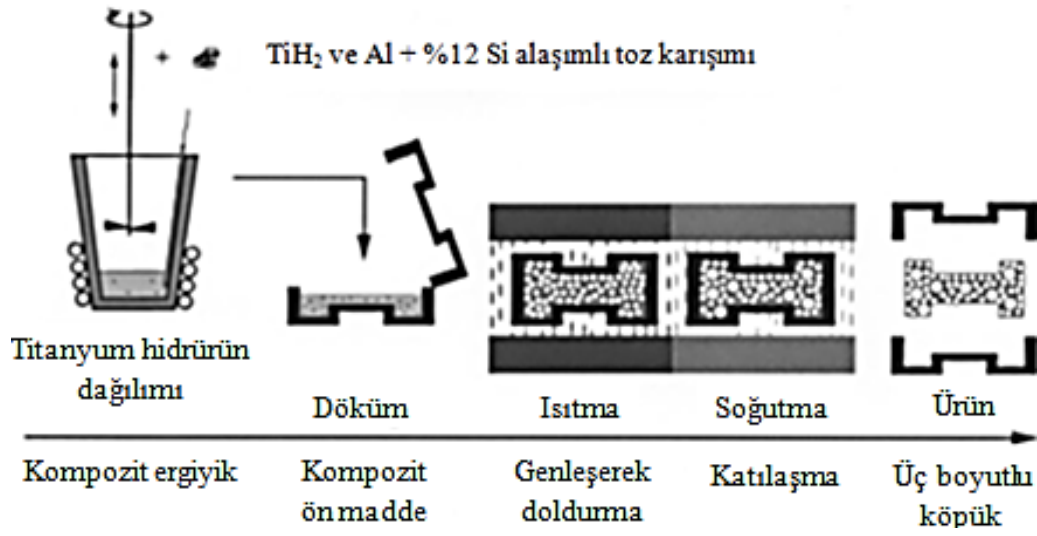
(Gergely ve diğeri). Resim 2-10 de Alporas prosesiyle elde edilmiş bir gözenek yapısı gösterilmiştir.



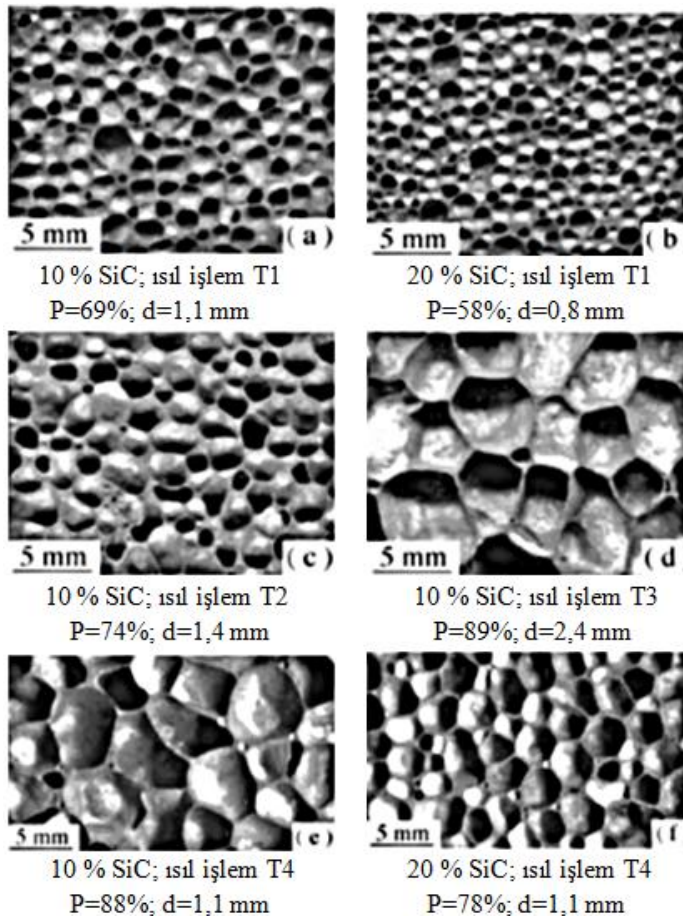
Resim 2.10: Alporas yöntemiyle üretilen köpük malzemeye ait gözenek yapısı (Banhart; Gergely ve diğeri)

### Öncü gaz salımı ile takviyelendirilmiş metalik köpük üretimi

Toz metalurjisi ve ergitme yöntemlerinin bir arada kullanılması sonucu ortaya çıkan Formgrip yöntemi, *Foaming Of Reinforced Metal By Gas Release In Precursor*'un başharflerinin kullanılmasıyla adlandırılmıştır (Amjad, 2001). Yöntemin ilk aşamasında,  $TiH_2$  tozları atmosfer ortamında ısıl işleme tabi tutulur. Bu sayede titanyum oksit filmi oluşumu sağlanır ve bu tabaka çözünmeyi geciktirici bir bariyer rolü oynar. Isıl işleme tabi tutulmuş köpürtücü tozları, Al esaslı alaşım tozları ile ağırlıkça 1/4 oranında karıştırılır ve yaklaşık  $620^{\circ}C$  de ergiyik hale getirilmiş ve yavaş soğutulmuş Al esaslı kompozit alaşımın içine ilave edilerek karıştırılır (Şekil 2.10). İkinci aşamasında, karışım  $TiH_2$ 'ün hidrojen gazının salınıp çözünmesi için ısıl işlem uygulanarak köpük elde edilir (Gergely, Clyne, 2000; Gergely, Curran, Clyne, 2003). Formgrip yöntemiyle üretilen bir metalik köpüğün gözenek yapısı Resim 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Formgrip üretim yönteminin şematik gösterimi (Gergely, Degischer, Clyne)

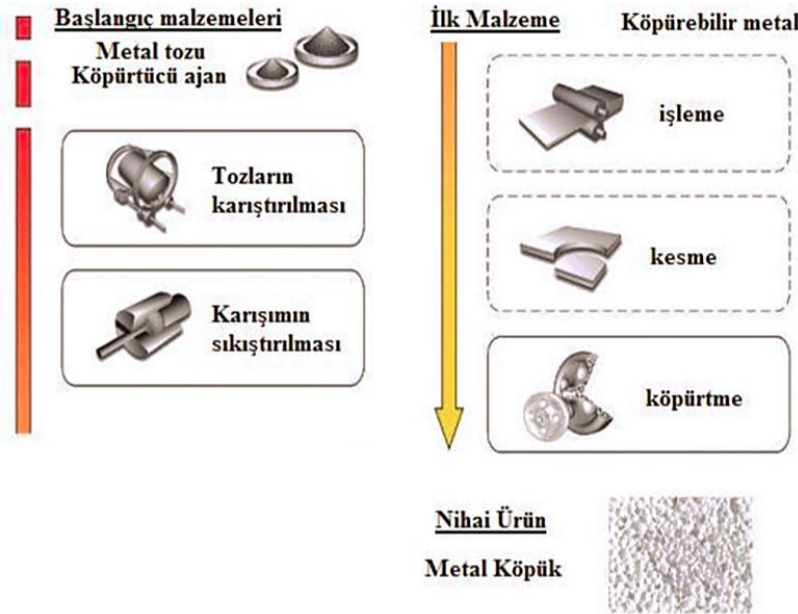


Resim 2.11: Formgrip yöntemiyle üretilen Al-9Si/SiC<sub>p</sub> kompozit köpükteki SiC miktarını gösteren ve uygulanan ısıtma işlemleri içeren optik mikroskop görüntüleri (Gergely, Clyne, Curran, 2003)

### Toz metalurjisi yöntemi

Toz metalurjisi yöntemiyle(TM) metalik köpük üretimi, patenti Allen ve arkadaşları tarafından 1963'te alınmış olup (Gergely, Degisher, Clyne, 2003; Çinici, 2012), Almanya'da Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü'nde (IFAM/Bremen) geliştirilmiştir (Türker, 2010; Çinici, 2012). Bununla birlikte Foaminal ve Alulight firmaları da bu üretime öncülük etmiştir.

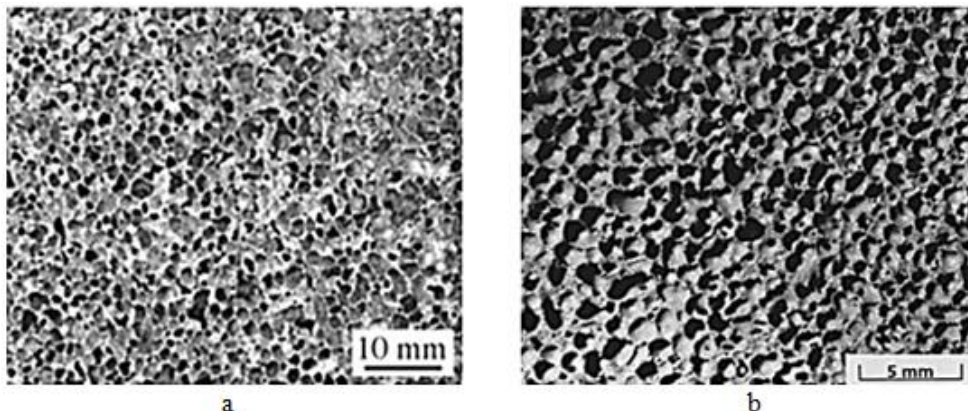
TM yönteminde üretim, metal veya alaşım tozlarının köpürtücü madde tozlarıyla (genellikle  $TiH_2$ ,  $ZrH_2$ ,  $CaCO_3$ ) karıştırılmasıyla başlar (Şekil 2.11). Karışım oda sıcaklığında veya sıcak olarak kalıpta preslenir. Preslenen karışım ekstrüze edilip yarı mamul haline getirilir ve haddelenir. Haddelenen parçada köpürtücü madde homojen olarak dağılmış olur. Daha sonra elde edilen numune, matris malzemenin ergime sıcaklığına yakın sıcaklıkta ısıtılarak içerisindeki köpürtücü madde ayrışır ve gaz çıkışı meydana gelir. Gaz çıkışı ergiyik metalin köpürtmesini ve gözenekli yapıya dönüşmesini sağlar (Yu, Eifert, Banhart, Baumeister, 1998).



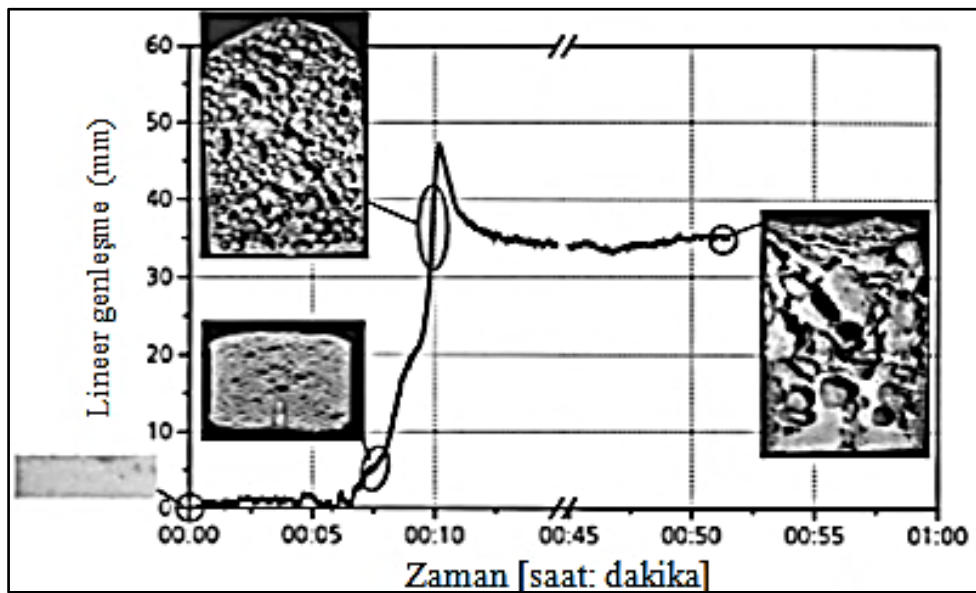
Şekil 2.11: TM üretim yöntemi işlem sırası (Stöbener, Baumeister, Lehmhus, Stanzick, Zöllmer,2003)

TM yöntemi, sadece alüminyum ve alaşımlarıyla(dövme alaşımları 2xxx ve 6xxx; döküm alaşımları AlSi7, AlSi12) (Resim 2.12.a) sınırlı kalmayıp, çinko, kalay, kurşun(Resim 2.12.b), altın gibi birçok metal ve alaşımları için de köpürtücü maddelerin ilavesiyle

uygulanabilen bir yöntemdir. Köpürtücü madde olarak  $TiH_2$  ve  $ZrH_2$  gibi hidrürlerin yanında karbonatlar ( $CaCO_3$ ,  $SrCO_3$ ), hidratlar ve hızlı buharlaşan maddeler (civa bileşikleri veya toz haline getirilmiş organik maddeler) (Çinici, 2012) kullanılmaktadır. Çinko ve alüminyum alaşımları için köpürtücü madde olarak genellikle  $TiH_2$  veya  $ZrH_2$ ; çelikler için ise  $SrCO_3$  kullanılmaktadır. Ancak köpürtme işlemi esnasında malzemede homojen gözenek yapısı edebilmek için genleşme miktarına dikkat edilmesi gerekir. Çünkü  $TiH_2$ 'ün ayrışması ile elde edilen homojen yapı maksimum genleşme seviyesinde elde edilip bu noktadan sonra malzemede çökme meydana gelir. Bu duruma örnek olarak Şekil 2.12' de  $750^\circ C$  de köpürtme işlemine tabi tutulan Al- $TiH_2$  karışımının lineer genleşme eğrisi gösterilmektedir.



Resim 2.12: Farklı metallere ait gözenek yapılarının optik mikroskop görüntüleri. a) Al alaşımlı metalik köpük, b) kurşun esaslı metalik köpük (Banhart, 2001)

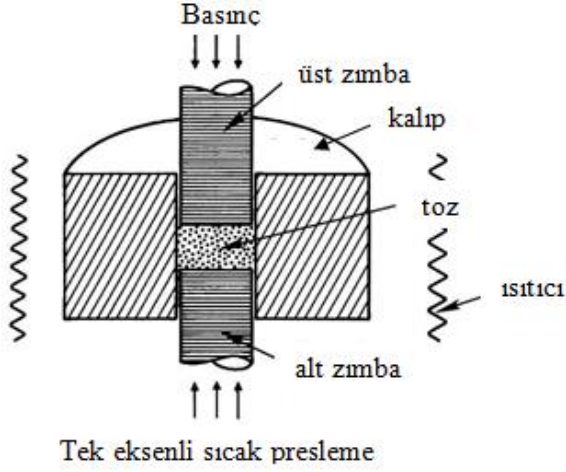


Şekil 2.12:  $750^\circ C$  sıcaklıkta köpürtme işlemine tabi tutulan Al/ $TiH_2$  karışımının lineer genişleme davranışı (Banhart, 2001)

TM yöntemiyle metalik köpük üretiminde köpürtücü maddenin köpürtme miktarında ve homojen gözenek yapısı elde etmede önemli bir role sahip olduğu belirtilmiştir. Bunun yanında köpürtmeye etki eden faktörlerden bir tanesi viskozitedir. Matris metalin viskozitesinin düşük veya yüksek olması ergiyik konumdayken çok önemlidir. Viskozitenin yüksek olması, ergiyik metalin köpürtme esnasında meydana gelecek drenaj etkisinden dolayı genişmeyi engelleyecek ve çökmeye sebep olacaktır. TM üretim yönteminde en çok kullanılan Al ve Zn metalini ele almak gerekirse, Al ergiyik metalinin viskozitesi ( $\eta=1,25 \text{ mN.s/m}^2$ ) Zn ergiyik metalinin viskozitesinden ( $\eta=3,75\text{mN.s/m}^2$ ) düşük olduğu için drenaj etkisi düşük olacağından köpürtücü maddenin ayrışması daha kolay olacak ve genişmesi Zn metal köpüğüne göre daha fazla olacaktır (Rack, Haibel, Bütow, Matijasevic, Banhart; Rack, Haibel, Matijasevic, Banhart, 2003).

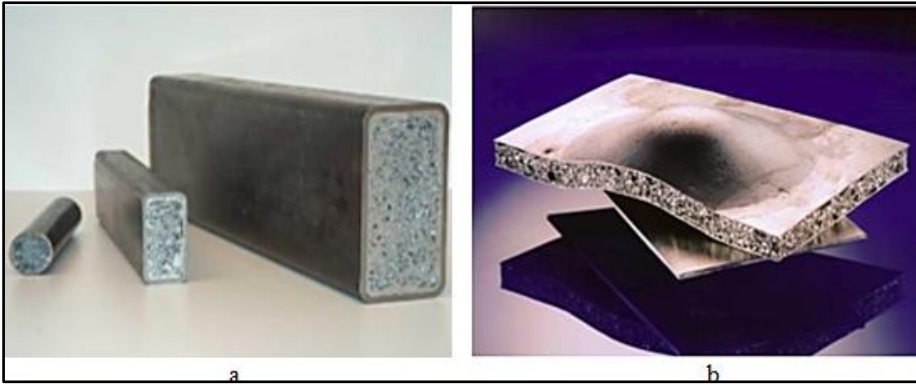
TM yönteminde preform malzeme üretimi için iki farklı metot söz konusudur. Bunlardan biri soğuk pres, diğeri sıcak pres metodudur. Soğuk pres metodunda presleme işleminden sonra sırasıyla sinterleme, sıcak ekstrüzyon ve haddeleme işlemlerinden sonra köpürtme işlemi yapılır. Sıcak pres metodunda ise presleme işleminden sonra köpürtme işlemi uygulanır. Sıcak pres metodunu soğuk pres metodundan ayıran özellik, eş zamanlı presleme ve sinterleme işlemlerinin gerçekleşmesi ve tama yakın yoğunluk(%90) elde etmektir.

Sıcak presleme sırasında ilk yoğunlaşma, parçacıkların yeniden düzenlenmesi ve parçacık temas noktalarındaki plastik akış ile olur. Etkili gerilme kendiliğinden akma gerilmesinin altına düştüğünde, daha fazla yoğunlaşma tane sınır ve hacim yayılım oranlarına bağlıdır. Tek eksenli presleme işlemi Şekil 2.13'te şematik olarak gösterilmiştir (German, 2010).



Şekil 2.13: Tek eksenli preslemenin kesit görünüşü (German, 2010)

Bu yöntemdeki avantajlardan biri, metalik köpük ile bulk malzemeyi yapıştırıcı kullanmadan birleştirerek kompozit malzeme elde etmektir (Karakoç,2012). Örneğin; metal köpük doldurulmuş profiller ve sandviç yapılar(Resim 2-13). Bunun yanında TM yöntemine ait diğer avantajlar Çizelge 2.1' de gösterilmiştir.



Resim 2.13: a) TM yöntemiyle kalıpta köpürtülerek üretilen alüminyum köpük parçalar (Davies, Zhen), b) Alüminyum sandviç köpük (Fraunhofer)

Çizelge 2.1: TM yönteminin özellikleri (Baumgartner, Duarte, Banhart, 2000)

<b>AVANTAJ</b>	<b>PROBLEM</b>	<b>DEZAVANTAJ</b>
Farklı geometrilere sahip köpükler üretilebilir.	Gözenek yapısı tam olarak homojen değildir.	Tozların aşırı maliyeti
Kompozitler üretilebilir.	Süreç denetimi geliştirilmelidir.	Çok büyük parçaların üretimi zordur.
Farklı alaşım elementleri kullanılabilir.	----	----
Köpük kararlılığını dengeleyici parçacıklara ihtiyaç yoktur.	----	----
Seramikler ve fiberler eklenebilir.	----	----

### 3. METALİK KÖPÜKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

#### 3.1.Mekanik Özellikler

Metalik köpükler, farklı mekanik ve fiziksel özelliklerin bir arada bulunması ile geniş kullanım alanına sahiptir. Bu özellikleri şu şekilde sıralanabilir.

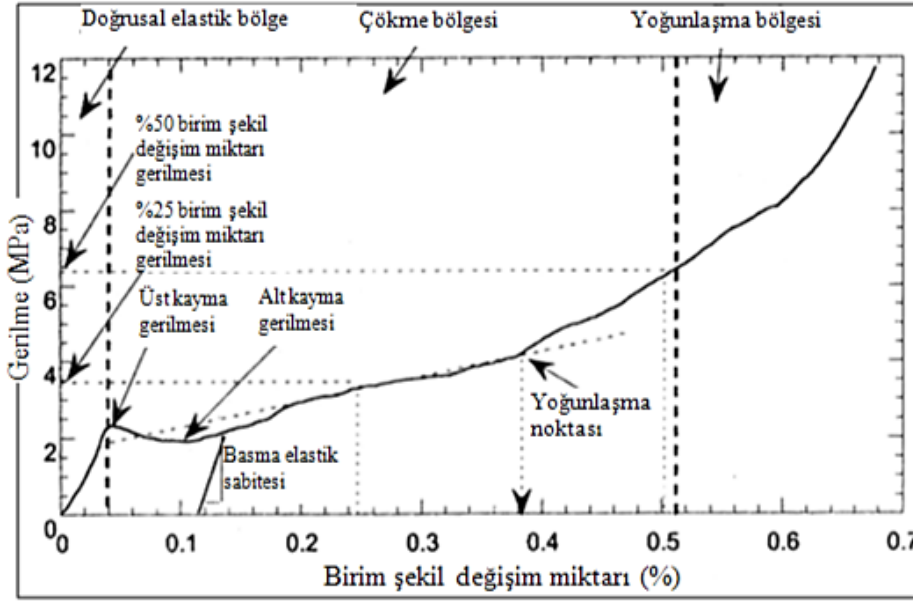
- ✓ Düşük yoğunlukta yüksek rijitlik,
- ✓ Yüksek oranda darbe enerjisini sönmleme,
- ✓ Isı izolasyonu,
- ✓ Ses sönmleme, elektromagnetik koruma ve titreşim sönmleme,
- ✓ Ateşe dayanıklılık,
- ✓ Tamamen geri dönüştürülebilir olmasıdır.

Farklı metalik köpük üretim yöntemleri kullanılarak elde edilen açık veya kapalı gözenekli metalik köpükler, üretim parametrelerinden dolayı, mekanik ve fiziksel özellikleri farklılık göstermektedir. Üretim yöntemlerine öncülük eden Cymat, Alulight, Alporas ve Duocel firmalarının ürettikleri metalik köpüklerin özellikleri Çizelge 3.1’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.1: Farklı firmalara ait metalik köpüklerin özelliklerinin karşılaştırılması (Polat, Keleş, Taptık)

ÖZELLİKLER	CYMAT	ALULIGHT	ALPORAS	DUOCEL
<b>Malzeme</b>	Al-SiC	Al	Al	Al
<b>İzafi Yoğunluk</b>	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-0,1	0,05-0,1
<b>Hücre Yapısı</b>	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık
<b>Young Modülü</b>	0,02-2,0	1,7-12	0,4-1,0	0,06-0,3
<b>Poisson Oranı</b>	0,31-0,34	0,31-0,35	0,31-0,36	0,31-0,37
<b>Basma Mukavemeti</b>	0,04-7,0	1,9-14,0	1,3-1,7	0,9-3,0
<b>Çekme Mukavemeti</b>	0,05-8,5	2,2-3,0	1,6-1,9	1,9-3,5
<b>Kırılma Tokluğu</b>	0,03-0,5	0,3-1,6	0,1-0,9	0,1-0,2
<b>Isıl İletkenlik</b>	0,3-10	3,0-35	3,5-4,5	6,0-11

Metalik köpük belli bir plastik şekil değişimine sahiptir. Bu plastik bölge lineer elastik bölge üzerindeki yüklemelerde plastik çökme ile başlar. Köpüklerin lineer elastik deformasyon özellikleri Youngmodülü ile hesaplanabilir (Harte, Fleck, Ashby; Çinici,2012). Lineer elastik deformasyon mekanizması açık gözenekli köpüklere nazaran kapalı gözenekli metalik köpüklerde daha komplekstir. Plastik çökme gözenek duvarlarında meydana gelir ve basma yönünde katlanmasıyla oluşur. Şekil 3.1’ de alüminyum alaşımlı (Al 6061) metalik köpük için gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde farklı üç bölge gösterilmiştir. Bu üç bölge “*lineer elastik bölge, plastik çökme (plato bölgesi) ve yoğunlaşma bölgesi*” dir. Lineer elastik bölgede gerilme ve gerinim gözenek duvarları kontrol edilir ve gözenek duvarının bükülmesi ve yırtılması ile sona erer. Plastik çökme, deformasyonun sınırlandırıldığı bölgeden deforme olmamış bölgeye geçmesiyle devam eder. Son olarak gözenek duvarları birbirine değmeye başlar ve yoğunlaşma meydana gelir (Çinici, 2012).

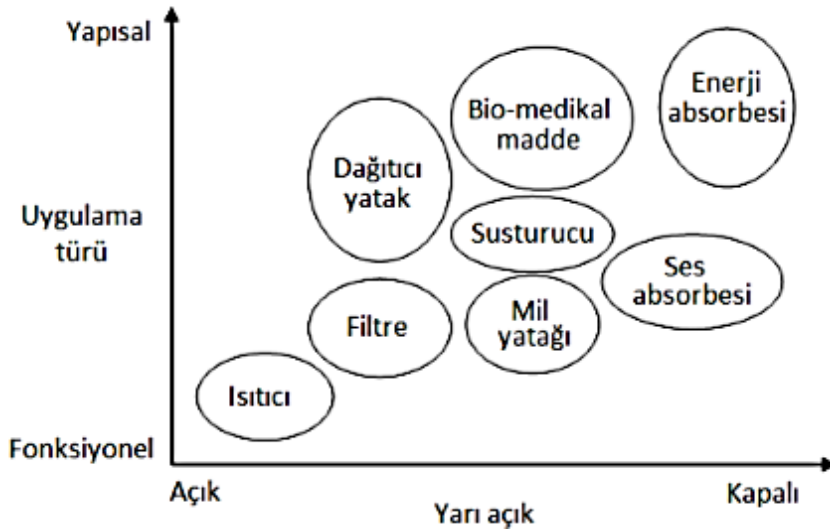


Şekil 3.1:Alüminyum alaşımlı metalik köpüğün gerilme-birim şekil değiştirme grafiği (Başpınar, Yurtçu)

Metalik köpük malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde açık veya kapalı gözenekli olması kadar gözenegin şeklinin de önemli rolü vardır. Eşeksenli gözenek yapısında olan malzeme izotropik özellik gösterirken, az miktarda uzamış ve düzleşmiş gözenek yapısında olan malzeme ise yöne bağlı özellik değişimi gözlenir (Degischer, Krist, 2002).

### 3.2.Uygulama Alanları

Metalik köpükler, sahip oldukları özellikleri sayesinde günden güne önem kazanmakta ve birçok uygulama alanında yerini almıştır. Açık ve kapalı gözeneklilik gibi sahip olduğu hücre yapısına bağlı olarak *yapısal ve fonksiyonel uygulama alanları* şeklinde sınıflandırmak mümkündür. Yapısal uygulamalar; otomotiv, demiryolu ve inşaat endüstrileri, uzay araçları, gemi ve spor malzemeleri yapımı ve biyomedikal uygulamalardır(Şekil 3.2). Fonksiyonel uygulamalar ise, filtreleme ve ayırma, ısı dönüştürücü, soğutma sistemleri, elektrokimyasal uygulamalar, su arıtma, sıvı muhafaza ve iletimi gibi uygulamalardır(Srivastava, Sahoo, 2006).



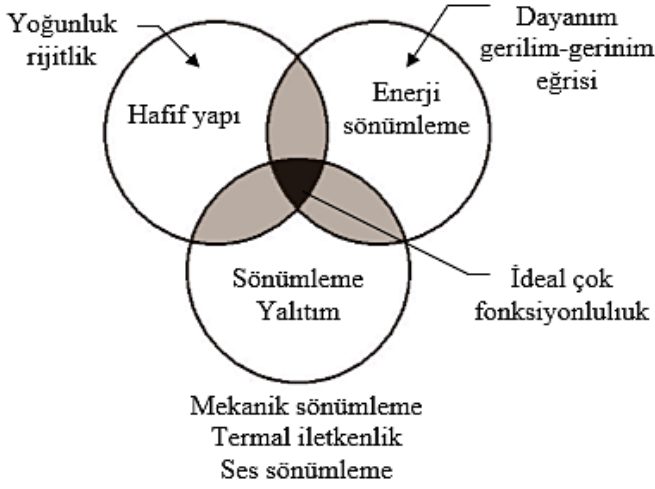
Şekil 3.2: Metalik köpüklerin kullanım alanlarının gözenek ve uygulama türüne göre gruplandırılması (Polat, Keleş, Taptık)

#### 3.2.1.Yapısal uygulama alanları

Günümüzde otomotiv endüstrisinde yolcu güvenliği ve yakıt verimliliği için hafif ve güvenilir yapılara yönelme artmıştır. Bunu sağlamak için hafifliğinden dolayı metalik köpüklere ilgi artmıştır.

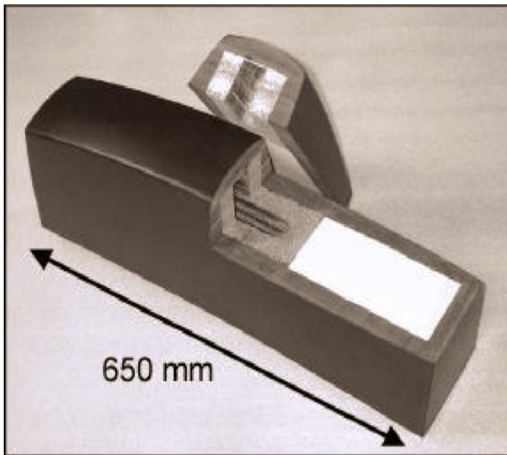
İngiltere’de bulunan Ulusal Fizik Laboratuvarı çeşitli sektörlerde metal köpüklere dair potansiyel beklentileri hakkında bilgi sahibi olmak için anket düzenlemiştir. Bunun sonucunda; otomotiv ve uzay endüstrisi %32, makine, malzeme ve parça imalatı %26, eğitim ve araştırma sektörü %16, diğer sektörlerin ise %18 oranında paya sahip olacağı

belirtilmiştir. Şekil3.3’ te otomotiv endüstrisinin uygulama kategorileri gösterilmiştir (Srivastava, Sahoo).



Şekil 3.3: Metalik köpüklerin otomotiv endüstrisinde uygulama kategorileri (Uzun,2009)

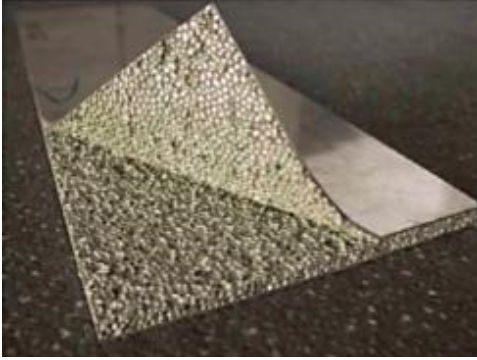
- *Çarpışma Enerjisi Emilimi:* Araçlarda çarpışma esnasında maksimum etkinin dağılımı, çarpışma bölgelerindeki deformasyonun kontrolü ile sağlanmaktadır. Bu yüzden araçların öne ve yan bölgelerine koruyucu parça ilave edilir. İçerisi metalik köpük ile dolu profiller çarpma anında yüksek deformasyon davranışı sergiler. Böylece aksel çarpışmalarda içi metal köpük ile dolu profil, boş profile göre %25-30 daha fazla enerji sönümler(Resim 3.1) (Schaeffler,2005).



Resim 3.1: Araç sistemleri için çarpma enerjisi sönümleyici (Banhart,2007)

- *Hafif Konstrüksiyon:* Hafif konstrüksiyon, geri dönüşümlü olup yarı elastik deformasyon sergilemesi ve sertlik-ağırlık oranının yüksek olması gibi iki özelliğe bağlıdır. Alman otomobil üretici firması Karmann sandviç panelleri (Resim 3.2) ön ve

arka tampon bölgelerde kullanılabilirliğini test etmiş ve sandviç panellerin çelik panellere oranla %20 ağırlık tasarrufu ve %700 e yakın dayanımda artış sağladığı görülmüştür (Banhart, 2001).



Resim 3.2: Karmann tarafından üretilmiş ASK (Banhart, 2003)

- *Akustik Kontrol:* Belirli koşullar altında metalik köpük malzemeler sesi sönümleyip, titreşimi engelleyebilir. Ses yalıtım malzemesi olarak polimer esaslı köpük malzemeler metalik köpük malzemelere oranla daha iyi olabilir, ancak metalik köpük malzemeler sahip oldukları diğer özelliklerinin kombinasyonu sayesinde verimlidir.

### Uzay endüstrisi

Metalik köpüklerin uzay endüstrisindeki hafif konstrüksiyon sağlama özelliği otomotiv endüstrisiyle benzerlik gösterir. Uzay endüstrisine kullanılan bal peteği şeklindeki yapıların maliyeti, alüminyum köpük levhalara oranla daha yüksektir. Maliyeti mümkün olduğunca azaltmak için alüminyum sandviç köpüklere yönelim artmıştır (Banhart, PMS; Uzun, 2009).

The European Ariane 5 roket prototipinin yapımında taşıdığı yükü destekleyen iki koni şekilli adaptör kullanılmıştır (Resim 3.3). Günümüze kadar bunlar yüksek maliyetli Al bal peteğinden üretilmektedir. Maliyeti azaltmak ve imalatı kolaylaştırmak için bu koniler 12 parça eğimli alüminyum sandviç köpük yapılar üretilip TIG kaynağıyla birleştirilerek üretilmesi planlanmıştır. Koni üzerinde yapılan testlerde prototipe 100 kN üzerinde yük uygulanmış, sonuç olarak malzeme yeterli dayanımı göstermiştir (Schwingel, Seeliger, 2007).



Resim 3.3: Ariane 5 roketinin koni prototipi, soldaki parçanın roketteki konumu (Banhart, Seeliger, 2008)

### Bisiklet krank kolu prototipi

Bisiklet krank kolu prototipi, dövülerek şekillendirilen alüminyum sandviç köpük uygulamasının ilk örneğidir (Resim 3.4). Genel olarak kullanılan alüminyum 6082 alaşımının dövülmesiyle elde edilen en hafif parçanın ağırlığı 300 g iken, alüminyum köpük malzemeyeyle elde edilen parça 222 g dır ve %30 daha hafiftir. Dövülerek şekillendirilen alüminyum sandviç köpüklerin tasarım ve maliyet açısından geliştirilmesi geleceğe yönelik kullanım potansiyelinin artmasını sağlar (Banhart, Seeliger, 2008).



Resim 3.4: Dövme ASK den elde edilen bisiklet krank kolu prototipi (Banhart,Seeliger,2008)

Motosiklet kazalarında kasklar, insan kafasına gelebilecek darbeleri absorbe eder veya bir noktaya gelen darbeyi geniş alana yayarak etkiyi azaltır. Sıradan kaskların dış kabuğu sert ve rijit olan ABS (akrilonitrilbütadienstiren) veya polikarbonat gibi termoplastiklerden imal edilir (Resim 3.5). Bu malzemelerin imal edilmesindeki amaç, hafiflik ve keskin

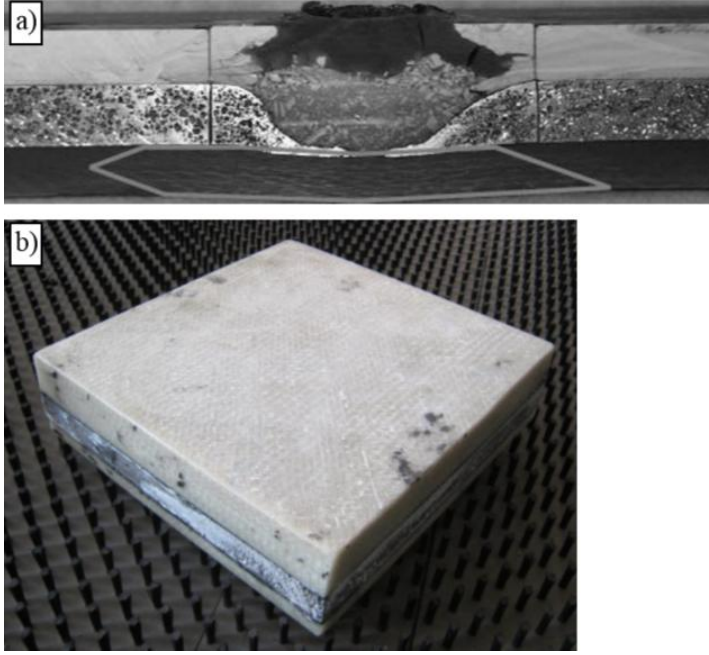
nesnelere karşı kafayı korumaktır. Metalik köpükler, ağırlık azaltma ve enerji absorpsiyonu yönünden öne çıkan bir malzeme olduğundan yeni nesil motosiklet kaskı olarak kullanılması hedeflenmiştir. Bu nedenle metal köpük ile üretilen kask prototipi, ISO standartlarına göre test edilip ABS ile üretilmiş kaskla karşılaştırıldığında, kafayı etkileyen toplam kuvvet ABS kasklara göre metalik köpüklerde daha düşük çıkmış, ağırlık %30 azalmıştır (Pinnoji, Mahajan, Bourdet, Deck, Willinger, 2010).



Resim 3.5: Metalik köpük kaskların ön ve üst darbelere karşı test edilmesi (Pinnoji, Mahajan, Bourdet, Deck, Willinger, 2010)

### İntegral zırh malzemesi

Metalik köpüklerin en dikkat çekici özelliklerinden biri olan enerji absorbe edebilme özelliği integral zırh malzemelerinde yararlanılan bir özelliktir. Zırh malzemesinin imal edilmesindeki temel amaç, uygulanan enerjiyi emme veya direnç göstermesidir. Bu durumda integral zırh malzemesi geliştirilmesinde metalik köpükler gerekli potansiyele sahiptir. Bu konuda Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesinde yapılan çalışmalar, elyaf takviyeli kompozitlerle metalik köpükten oluşan integral zırh malzemesi üretilmiştir (Resim 3.6). Böylece Al esaslı metalik köpüğün dayanımı artırılmış ve farklı tasarımlar uygulanarak zırhın performansı yükseltilmiştir. Seramik, köpük ve polimerden oluşan integral zırh malzemesine uygulanan test sonucunda deneysel ve sayısal analizler alüminyum köpüğün dinamik deformasyonunun tamamen yoğunlaşana kadar dağıtmayı sürdürdüğünü göstermiştir. Diğer bir deyişle, aradaki köpük malzeme tamamen yoğunlaşana kadar darbe yükünü dağıtır ve daha sonra alt tabakaya aktarır (Schaeffler, Rajner).



Resim 3.6: Al köpüğün integral zırh malzemesi olarak tasarımı (Bazle, Travis, Bruce, Chin-je, Dennis, Harald, John, 2001)

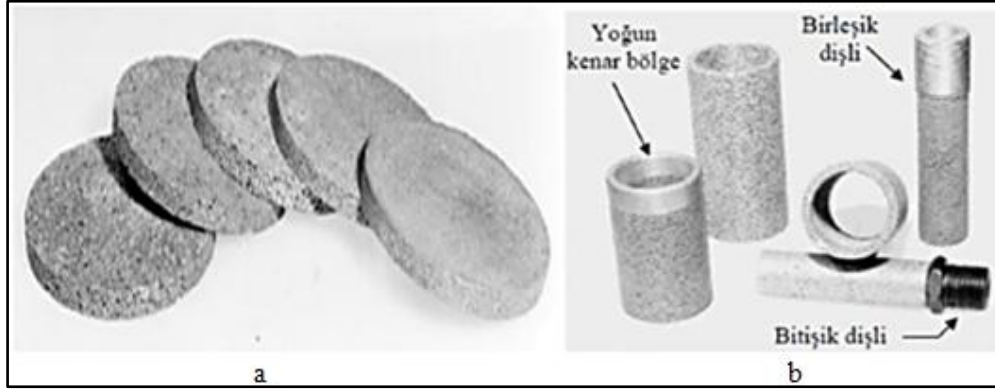
Diğer yapısal uygulama alanları, metalik köpüklerin özellikleriyle birlikte şu şekilde açıklanabilir:

- **Denizcilik sektörü:** kullanılan alüminyum köpüklerin bu sektöre sağladığı en büyük avantaj, düşük yoğunluğa bağlı hafiflik ve korozyon direncidir. Özellikle seri üretim yerine özel üretimi yaygın olduğu gemicilik sektöründe alüminyum köpük tüm koşullara uygun olarak şekillendirilebilecek malzemelerdir (Banhart, Ashby, Fleck, MIT, 1999).
- **İnşaat sektörü:** Alüminyumun en çok kullanıldığı bu sektörde, bina cephelerine giydirme amaçlı, ara bölme ve çatı kaplamalarında ise yalıtım amaçlı kullanılmaktadır. Ayrıca ses izolasyonu ve absorbesi sayesinde viyadüklerde, otopanlarda ses emici bariyer olarak kullanılmaya başlanmıştır. Böyle durumda, hareketli köprü ve prefabrik yapıların inşasında alüminyum köpük kullanımı sisteme avantajlı özellikler kazandırmaktadır (Grosse, 2007).

### 3.2.2. Fonksiyonel kullanım alanları

#### *Filtreler ve susturucular*

Filtreler, gaz veya sıvıların katı parçalardan ayrılmasında kullanılan malzemelerdir ve bunun için geniş hacimli alüminyum süngerler uygun malzemelerdir (Resim 3.7).



Resim 3.7: a) Farklı gözenek boyutunda alüminyum süngerden yapılmış filtreler, b) alüminyum köpükten yapılmış susturucular (Banhart, 1999)

Susturucular, kompresör gibi cihazlarda gaz çıkışı esnasında çıkan gürültüyü engellemek için, gaz çıkışı bölgesine uygun bir şekilde yerleştirilir. Buna örnek olarak alüminyum köpük malzemedan yapılmış susturucu Resim 3.7' de gösterilmiştir (Karakoç, 2012).

Isı değiştirciler, kapalı hücreli metal köpükler ise düşük termal iletkenliklerinden dolayı termal kalkan olarak kullanılırlar. Açık hücreli alüminyum veya bakır bazlı metal köpükler; korozyon direnci ve yüksek termal iletkenlik gibi özelliklerinden dolayı ısı değiştirciler için uygun malzemelerdir. Örnek olarak, yüksek sıcaklık radyatörü ve güç elektroniği için mikroelektronik cihazlar verilebilir (Resim 3.9) (Banhart, 2003).



Resim 3.8: Isı değiştirici kanallar(Zhao, 2012).

Metalik köpüklerin estetik görüntü, düşük termal iletkenlik, rutubet ve UV ışınlarına direnç, ses ve elektromagnetik dalgaları emme gibi fiziksel özellikleri mimar ve dekoratrlerin ilgi odağı olmuştur (Resim 3.10). Böylece yapı endüstrisinin birçok alanında kullanıma elverişli hale gelmiştir. Ekolojik olarak zararsız ve geri dönüşümlü olma özelliği de evre yönünden büyük bir avantaj sağlamaktadır (Simancik, 2001).



Resim 3.9:Farklı Al köpük tasarımları (Türker, 2010)

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Materyal ve Metot

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi kullanılarak sıcak presleme ile Al esaslı Zn takviyeli metalik köpük üretilmiştir. Matris malzemesi olarak ECKA firması tarafından üretilen <math><160\mu\text{m}</math> boyutunda Al tozu ile takviye malzemesi olarak <math><50\mu\text{m}</math> boyutunda ve Zn tozu kullanılmıştır. Köpürtücü madde olarak ise ALDRICH firması tarafından üretilen <math><45\mu\text{m}</math> boyutunda  $\text{TiH}_2$  tozu kullanılmıştır. Kullanılan tozların özellikleri Çizelge 4.1 de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Kullanılan tozların fiziksel özellikleri

Malzeme	Fiziksel Özellikler		
	Yoğunluk( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Ergime Sıcaklığı( $^{\circ}\text{C}$ )	Toz boyutu ( $\mu\text{m}$ )
Al	2,7	660	<math><160</math>
Zn	7,14	419	<math><50</math>
$\text{TiH}_2$	3,91	<math><400</math>	<math><45</math>

#### 4.1.1. Tozların karıştırılması

Metalik köpük üretiminin hazırlık aşamasında Al tozu, ağırlıkça %10-15-20 oranlarında Zn tozu ve köpürtücü madde olarak ağırlıkça %1,25 oranında  $\text{TiH}_2$  tozları ile 0,1 mg hassasiyete sahip Sartorius marka terazide tartılmış ve Turbula marka T2 F tipi üç boyutlu karıştırıcıda 1 saat karıştırılmıştır.

#### 4.1.2. Presleme işlemi

Hazırlanan karışım tozların presleme işlemi ( $\text{Al}+\text{Zn}+\text{TiH}_2$ ), Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü TM Laboratuvarında 280 ton presleme kapasitesine sahip özel yapım hidrolik preste (Resim 4.1) gerçekleştirilmiştir. Karışım tozlar önce 45 MPa basınç altında oda sıcaklığında tek yönlü sıkıştırılmış, daha sonra  $350^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 400 MPa basınç altında 45 dakika süre ile preslenmiştir. İşlem sonucunda çapı 30 mm, yüksekliği 9 mm olan köpürebilir kompakt numuneler elde edilmiştir. İşlem parametreleri Çizelge 4.2 de gösterilmiştir.



Resim4.1: Hidrolik pres ve ekipmanları

Çizelge 4.2: Sıcak presleme işlemi parametreleri

Karışım tozlar	Ön Presleme Basıncı (MPa)	Presleme Sıcaklığı (°C)	Presleme Basıncı(MPa)	Bekleme Süresi(dk)
Al+%10Zn+%1,25TiH <sub>2</sub>	45	350	400	45
Al+%15Zn+%1,25TiH <sub>2</sub>				
Al+%20Zn+%1,25TiH <sub>2</sub>				

### 4.1.3. Köpürtmeişlemi

Sıcak presleme işlemi sonucunda elde edilen %10, 15 ve 20 Zn oranlarına sahip köpürebilir kompakt numuneler Protherm marka 1000°C kapasiteli kamara tipi fırın içerisinde atmosfer ortamında (koruyucu gaz olmadan) 690, 710 ve 730°C sıcaklıklarda ve 5, 7.5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde ayrı ayrı köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Köpürtme işleminin parametreleri Çizelge 4.3' te verimiştir.

Çizelge 4.3: Köpürtme işleminin parametreleri

KARIŞIM TOZLAR	SICAKLIK		
	690 °C	710 °C	730 °C
Al + %10 Zn + %1,25 TiH <sub>2</sub>	5dk / 7,5dk / 10dk		
Al + %15 Zn + %1,25 TiH <sub>2</sub>	5dk / 7,5dk / 10dk		
Al + %20 Zn + %1,25 TiH <sub>2</sub>	5dk / 7,5dk / 10dk		

#### 4.1.4. Yoğunluk ölçümü ve gözeneklilik oranının belirlenmesi

Elde edilen metalik köpük numunelerin 0,1 mg hassasiyete sahip Sartorius marka terazide Arşimet prensibine göre yoğunluk hesabı yapılmıştır. Yoğunluk hesabı için kullanılan Arşimet formülü Eşitlik 4.1 de verilmiştir.

$$\rho^+ = m_h / (m_h - m_s) \quad (4.1)$$

Bu eşitliğe göre,  $\rho^+$  köpüğün yoğunluğunu ( $\text{g/cm}^3$ ),  $m_{\text{hava}}$  havadaki (kuru) ağırlığını (g),  $m_{\text{su}}$  sudaki ağırlığını (g) ifade etmektedir.

Metalik köpük numunelerin gözeneklilik oranı ise Eşitlik 4.2' de verilen formülle hesaplanmıştır.

$$P = (\rho_s - \rho^*) / \rho_s \quad (4.2)$$

Bu eşitliğe göre,  $P$  gözeneklilik oranını,  $\rho^*$  köpürtme öncesi yoğunluğunu ve  $\rho_s$  ise köpürtme sonrası yoğunluğunu ifade etmektedir.

#### 4.1.5. Lineer genleşme oranının belirlenmesi

Üretilen metalik köpük numunelerin lineer genleşme oranları Eşitlik 4.3' te verilen formüle göre hesaplanmıştır.

$$LG=(L_s-L_i)/L_i(4.3)$$

Bu eşitliğe göre, LG lineer genleşme oranını,  $L_i$  numunenin ilk boyu ve  $L_s$  ise son boyunu ifade etmektedir.

#### 4.1.6. Mekanik özelliğinin belirlenmesi

Metalik köpüklerin basma dayanımının incelenmesi için uygulanan basma testi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği laboratuvarlarında yapılmıştır. Kullanılan cihaz 10 ton kapasiteli Instron marka cihazdır (Resim 4.2). Basma testi ASTM C 365 standardına göre numunelere 0,5 mm/dk hızında uygulanmıştır.



Resim 4.2: Basma testi düzeneği

## 5. DENEYSEL BULGULAR

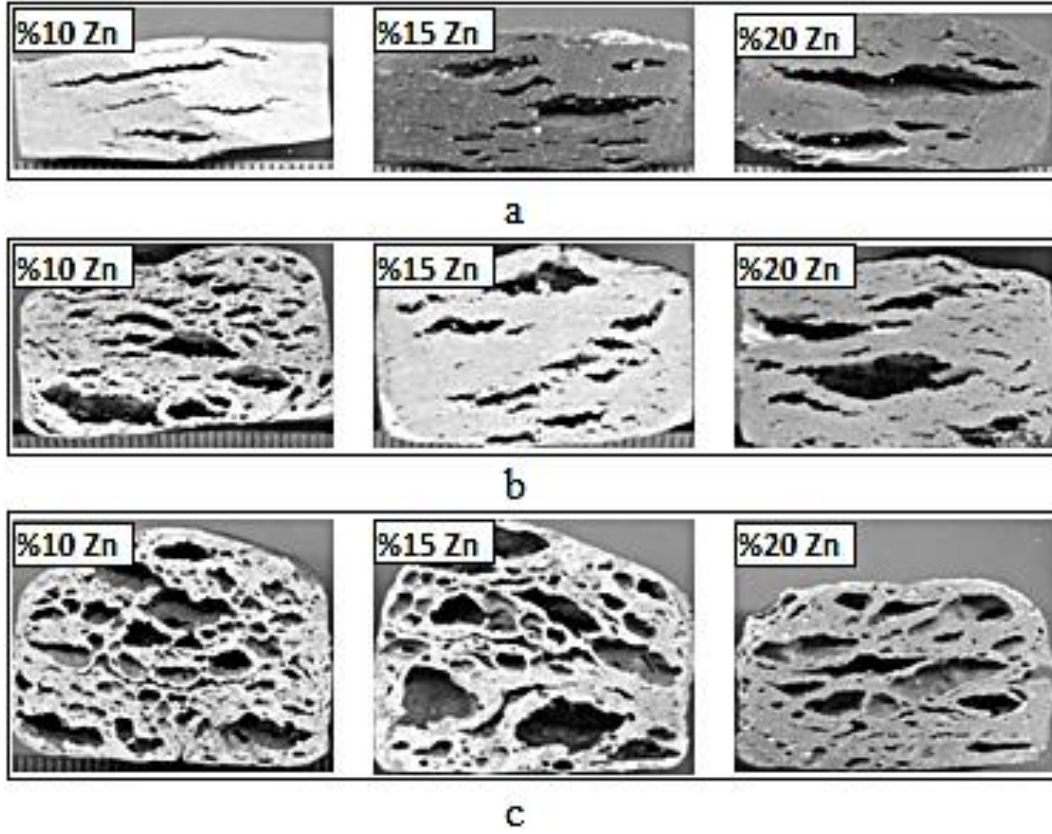
### 5.1. Gözenek Morfolojileri

690°C köpürtme sıcaklığında farklı köpürtme sürelerinde elde edilen köpük numunelerin gözenek yapıları Resim 5.1' de gösterilmiştir. 5 dakika köpürtme süresinde %10 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek yapısının çatlak şeklinde olduğu ve belirli bölgelerde süreklilik gösterdiği görülmüştür. %15 Zn ilaveli köpük numunenin 5 dakika köpürtme süresinde gözenek yapısının farklı boyutlarda daha kalın çatlak şeklinde olduğu, %20 Zn ilaveli köpük numunede ise çatlak şeklinde oluşan boşlukların boyutunun arttığı ve yönlendirilmiş çatlakların olduğu tespit edilmiştir (Resim 5.1.a).

7,5 dakika köpürtme işlemi sonrasında, %10 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek miktarının arttığı, homojen dağılım sergilediği ve belirli bölgelerde kalın çatlaklar şeklinde olduğu, %15 ve %20 Zn ilaveli köpük numunede ise daha az sayıda gözeneklerin irili ufaklı çatlaklar şeklinde, yapıda yönlendirilmiş olarak dağıldığı ve katı faz oranının fazla olduğu tespit edilmiştir (Resim 5.1.b).

10 dakika köpürtme işleminin sonunda %10 ve %15 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek yapılarının daha homojen dağılımlı ancak yapının karmaşık şekilli olduğu görülmüştür. %20 Zn ilavesi köpük numunelerde gözenek yapısının homojen olmasına, gözeneklerde yönlenebilirliğe ve katı faz oranının artmasına neden olmuştur.(Resim 5.1.c).

690°C köpürtme sıcaklığında elde edilen köpük numunelerde gözenek yapısının çatlak biçiminde olmasının sebebinin, özellikle 5 dakika köpürtme süresinde, bu sıcaklıkta ergiyik metalin direncinin  $TiH_2$  ayrışması sonucu ortaya çıkan ve köpürtmeyi sağlayan hidrojen gazının direncinde yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Perales ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada Al içerisine %1-3-5 oranlarında Sn ilave etmiş ve 700, 725 ve 750°C köpürtme sıcaklıklarının köpürebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda 700°C köpürtme sıcaklığında gözenek yapılarının çatlak biçiminde elde edildiği belirlenmiştir. 725°C köpürtme sıcaklığında ise Al-Sn köpük numunelerin gözenekleri eliptik biçimde ve eşit boyutlarda olmakla birlikte 750°C köpürtme sıcaklığında gözeneklerde kısmen irileşme olduğu rapor edilmiştir.



Resim 5.1:690°C köpürtme sıcaklığında elde edilen köpük numuneler, a)5 dakika, b)7,5 dakika, c)10 dakika

710°C köpürtme sıcaklığında ve farklı köpürtme sürelerinde elde edilen köpük numunelerin gözenek yapıları Resim 5.2'de gösterilmiştir. 5 dakika köpürtme sonrasında %10 Zn ve %15 Zn ilaveli köpük numunelerde gözeneklerin karmaşık yapıda ve homojen dağılımlı olduğu belirlenmiştir. %20 Zn ilaveli köpük numunede ise gözenekten daha ziyade büyük boşluklar meydana gelmiştir (Resim 5.2.a).

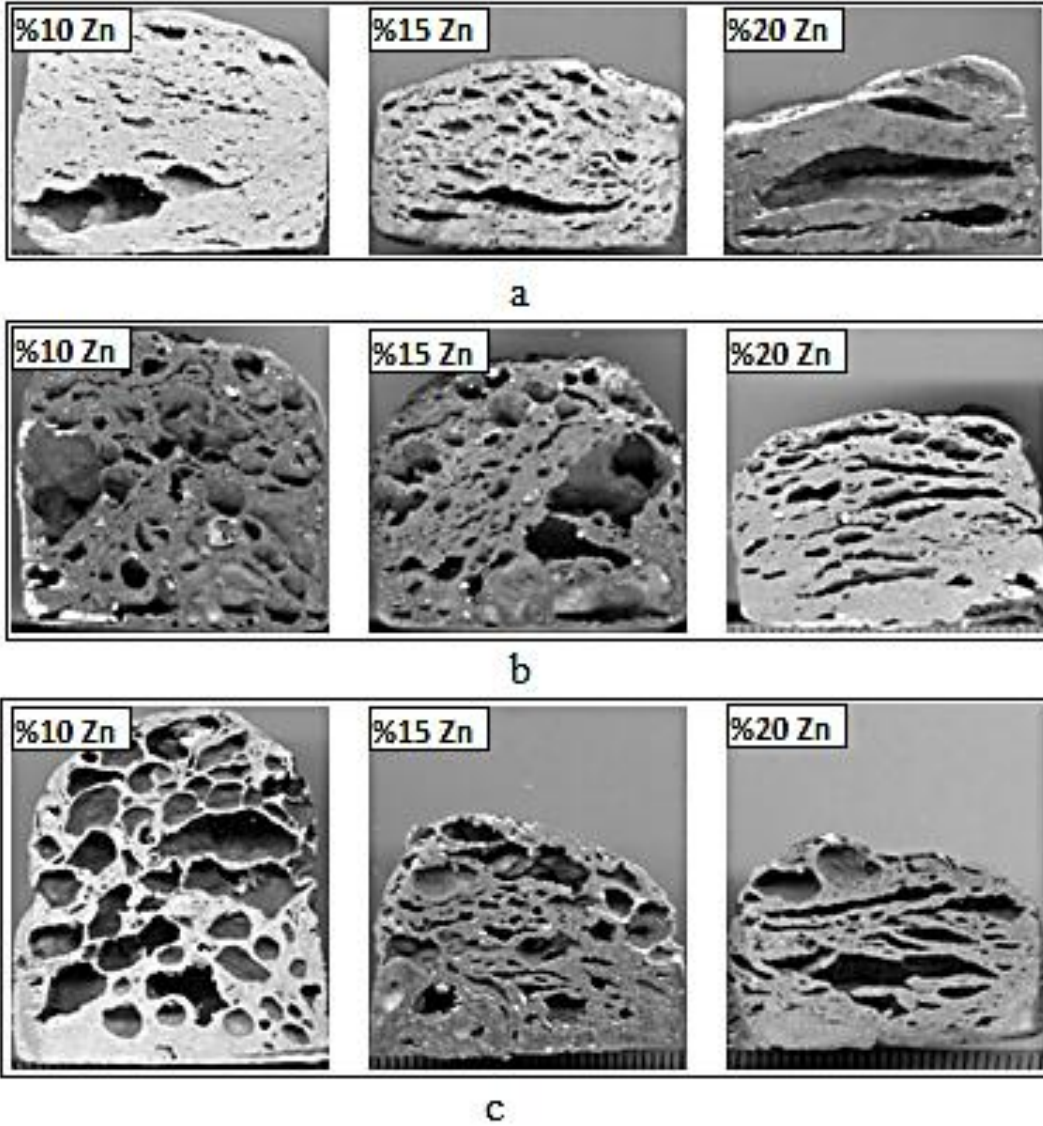
7,5 dakika köpürtme süresi %10 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek dağılımının homojen, karmaşık şekilli ve farklı boyutlarda olmasına neden olmuştur. %15 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek yapısı genel olarak küçük boyutlu ve homojen dağılımlı, ancak belirli bölgelerde küçük gözeneklerin birleşmesinden kaynaklanan büyük boyutlu gözeneklerden oluşmuştur. %20 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek yapısı ise yönlendirilmiş çatlak biçimindedir (Resim 5.2.b).

10 dakika köpürtme işlemi sonrasında %10 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek yapısının homojen ve karmaşık şekilli olduğu görülmektedir. %15 Zn ilaveli köpük numunenin homojen dağılımlı ve küçük boyutta eliptik biçimde olduğu, %20 Zn ilaveli köpük

numunenin ise 7,5 dakika köpürtme süresinde olduğu gibi gözenek yapısının yönlendirilmiş çatlak biçiminde olduğu belirlenmiştir (Resim 5.2.c).

710°C köpürtme sıcaklığında elde edilen köpük numuneler birlikte değerlendirilecek olursa, %10 ve 15 Zn ilaveli köpük numunelerde 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen gözenek yapısı 5 dakika köpürtme süresine göre daha homojendir. Ancak %20 Zn ilaveli köpük numunelerin gözenek yapısında köpürtme süresinin artmasına bağlı fazla değişim olmamakla birlikte kısmi çökme meydana geldiği görülmektedir. Köpürtme süresinin artmasına bağlı olarak köpük numunenin fırın içerisinde daha fazla H<sub>2</sub> gazı absorbe edecek, bu yüzden hem gözeneklilik oranı hem de gözenek boyutu artacaktır. Bununla birlikte artan Zn ilavesi gözenek yapılarının eliptik biçimde olmasına neden olmuştur. Bunun sebebi, gözenek duvarındaki Zn oranının artması H<sub>2</sub> gazına etki eden kuvveti artırması ve bundan dolayı H<sub>2</sub> gazının yanlara doğru genişlemesidir.

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Çünkü Lafrance ve diğerleri, saf Al ve %10-33-50 Zn ilaveli Al-Zn köpük numunelerle vakum ortamında yapmış oldukları çalışmada, 620, 640, 690 ve 710°C köpürtme sıcaklıklarını kullanarak köpürebilirliği incelemişlerdir. 710°C köpürtme sıcaklığında 6 ve 9 dakika köpürtme süresinde saf Al köpük numunenin belirli bölgesinde küçük boyutta gözenekler, %10 Zn ilaveli köpük numunede yine 6 ve 9 dakika eliptik biçimde ve homojen bir gözenek yapısı elde edilmiştir.



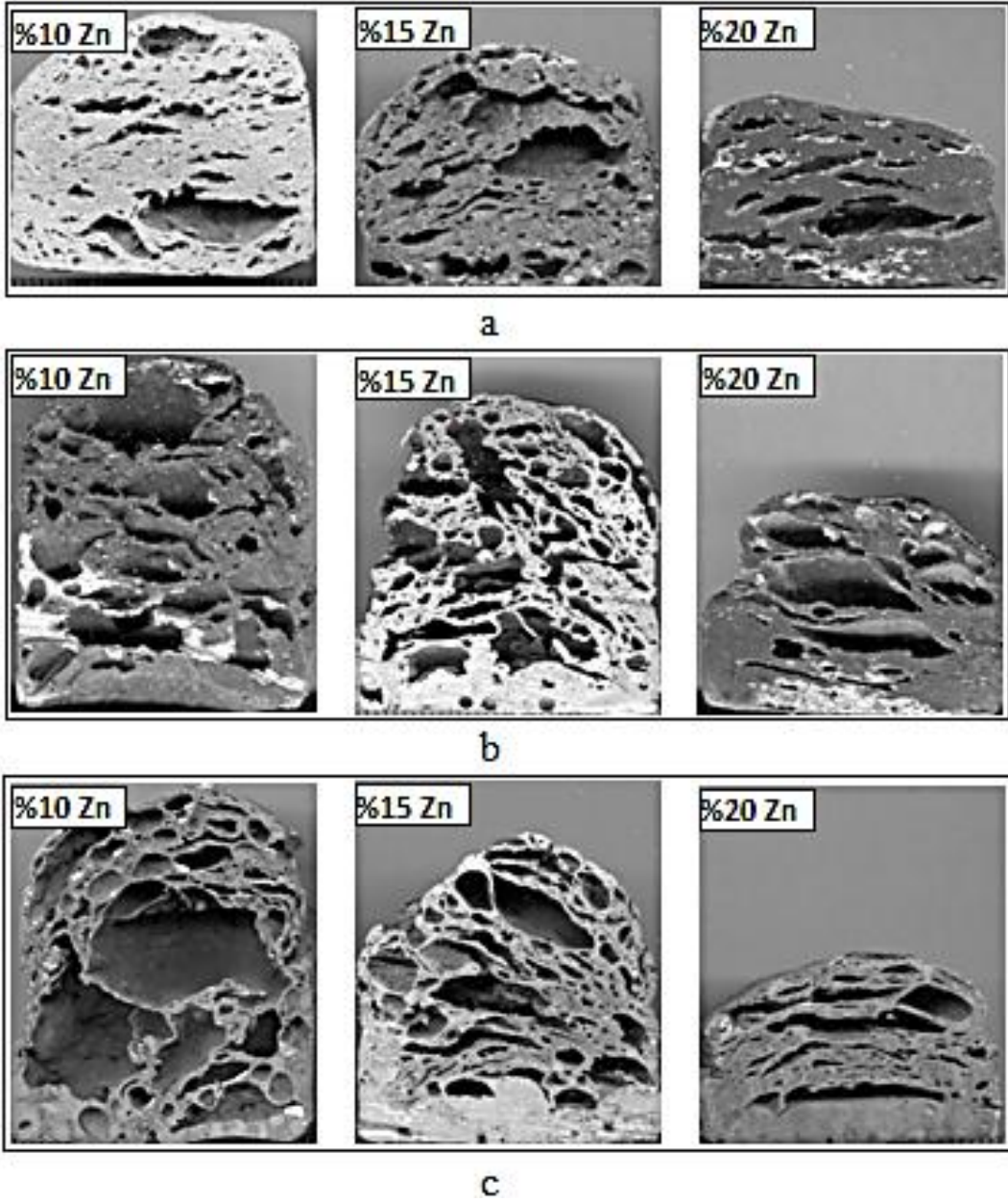
Resim 5.2: 710°C köpürtme sıcaklığında elde edilen köpük numuneler, a)5 dakika, b)7,5 dakika, c)10 dakika

730°C köpürtme sıcaklığında ve farklı köpürtme sürelerinde elde edilen köpük numunelerinin gözenek yapıları Resim 5.3'te gösterilmiştir. 5 dakika köpürtme işlemi sonrasında %10, 15 ve 20 Zn ilaveli köpük numuneler homojen dağılımlı ve yönlenmiş çatlak şeklinde gözeneklerin oluştuğu görülmüştür. Bununla birlikte bölgesel olarak çatlakların büyüdüğü görülmektedir(Resim 5.3.a).

7,5 dakika köpürtme işlemi sonrasında %10 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek yapısının homojen ve karmaşık şekilli olduğu, %15 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek yapısının yönlenmiş ve homojen dağılımlı olduğu ve %20 Zn ilaveli köpük numunenin gözeneklerinin levha halinde olduğu belirlenmiştir(Resim 5.3.b).

Köpürtme süresinin 10 dakikaya çıkarılmasıyla %10 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek duvarlarının incelmesi ve gözeneklerin birleşmesinden kaynaklanan büyük boyutta gözeneklerden oluştuğu, %15 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek yapısının homojen ve eliptik biçimde olduğu, %20 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek yapısının ise yönlendirilmiş halde olduğu tespit edilmiştir(Resim 5.3.c).

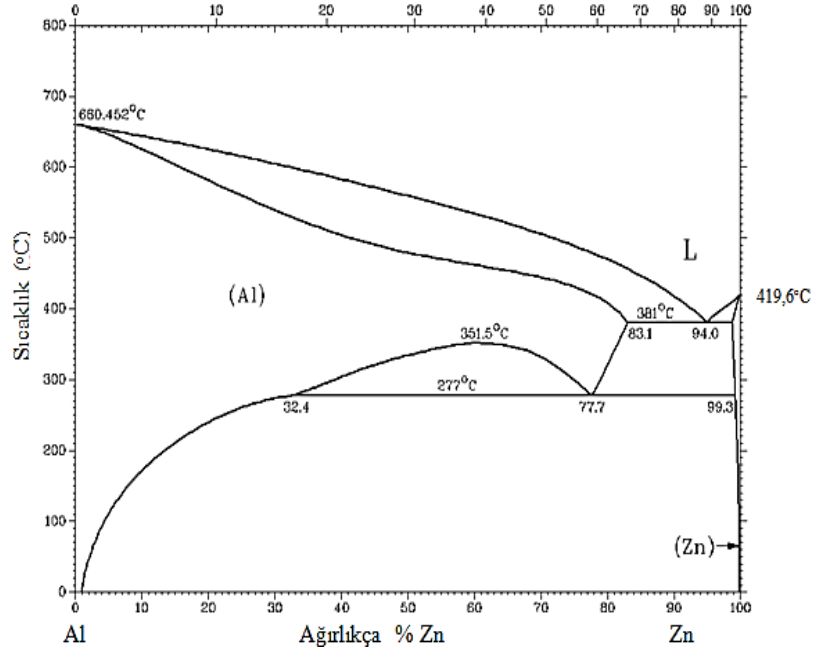
730°C köpürtme sıcaklığında elde edilen köpük numuneler birlikte değerlendirildiğinde, %20 Zn ilaveli köpük numunelerin ise gözenek yapılarının yönlendirilmiş şekilde olmasının sebebinin artan Zn oranına bağlı olarak gözenek duvarının yoğunluğu artmış ve gözenekler üzerinde artan drenaj etkisinin gözeneklerin büyümesini engellediği düşünülmektedir.



Resim 5.3: 730°C köpürtme sıcaklığında elde edilen köpük numuneler: a)5 dakika, b)7,5 dakika, c)10 dakika

690,710 ve 730°C köpürtme sıcaklıklarındaki 5, 7.5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen köpük numuneler birlikte değerlendirildiğinde, en homojen ve küresele yakın gözenek yapısı 710°C köpürtme sıcaklığı ve 10 dakika köpürtme süresinde %10 Zn ilaveli köpük numunede görülmüştür. Genel olarak ilave edilen %20 Zn oranının eliptik gözeneklerin oluşmasına ve katı faz oranının artmasına neden olduğu söylenebilir. %10 ve %15 Zn ilaveli köpüklerde ise köpürebilirlik özelliklerinin daha iyi olduğu görülmüştür (Şekil 5.1). Zn ilavesi Al ergime sıcaklığını azaltması sonucu ergiyik metalin viskozitesi azalacağı için köpürtme esnasında ergiyik metalin gözenek üzerindeki drenaj etkisi

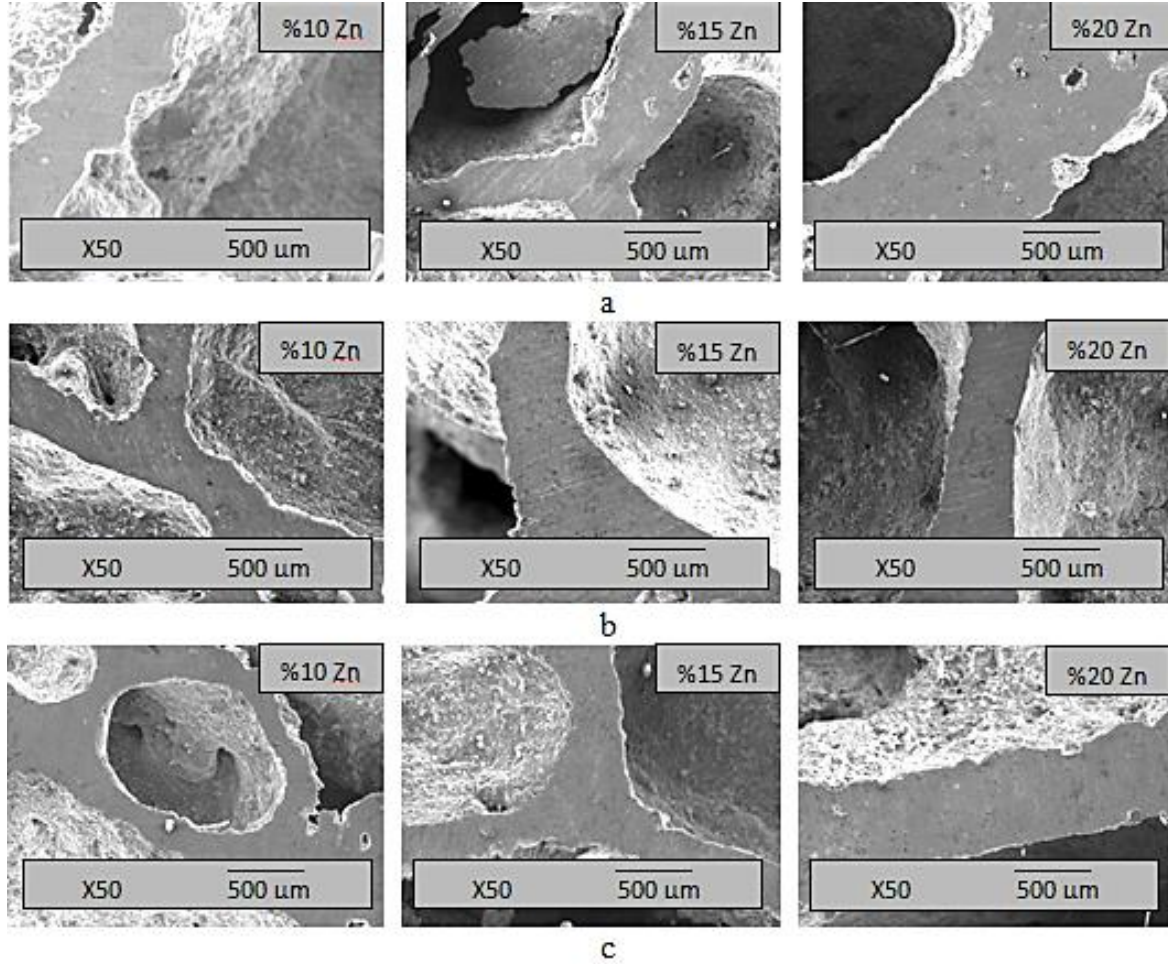
azalarak gözeneklerin hareketliliğini artırdığı ve gözeneklerin presleme yönünde büyümesinin kolaylaştığı düşünülmektedir.



Şekil 5.1: Al-Zn denge diyagramı

## 5.2. Gözenek Duvarlarının Karakterizasyonu

690, 710 ve 730°C köpürtme sıcaklıklarında ve 10 dakika köpürtme süresinde elde edilen köpük numunelerin gözenek duvarlarına ait SEM görüntüleri Resim 5.4'te gösterilmiştir. Resimler incelendiğinde, Zn ilavesinin artmasıyla birlikte gözenek duvarlarının kalınlaştığı, sıcaklığın artmasına bağlı olarak da gözenek duvarlarının incelmesi tespit edilmiştir. Gökmen, yaptığı çalışmada ön alaşımlı Alumix 231 kullanmış ve  $TiH_2$  köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının köpürtmeye etkisini incelemiştir. Yaptığı çalışma sonucunda düşük sıcaklıkta veya düşük köpürtme miktarında gözenek duvarının kalın olduğunu belirlemiştir. Yapılan mikroyapı incelemesi sonucunda gözenek duvarlarındaki Zn miktarının artması, köpürme esnasında ayrılan  $H_2$  gazının büyümesini engelleyici rol oynayacağı için gözenek duvarlarının kalınlaşması beklenen bir sonuçtur. Deqing ve Ziyuan (Deqing, Ziyuan, 2003), partikül oranının köpürebilirliğe etkilerini araştırmışlar ve gözenek boyutu ve gözenek kalınlığının büyük oranda SiC ve  $Al_2O_3$  partikül ilavesine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bunun nedeninin partiküllerin gözenek duvarındaki drenajı geciktirmesi olduğunu vurgulamışlardır.

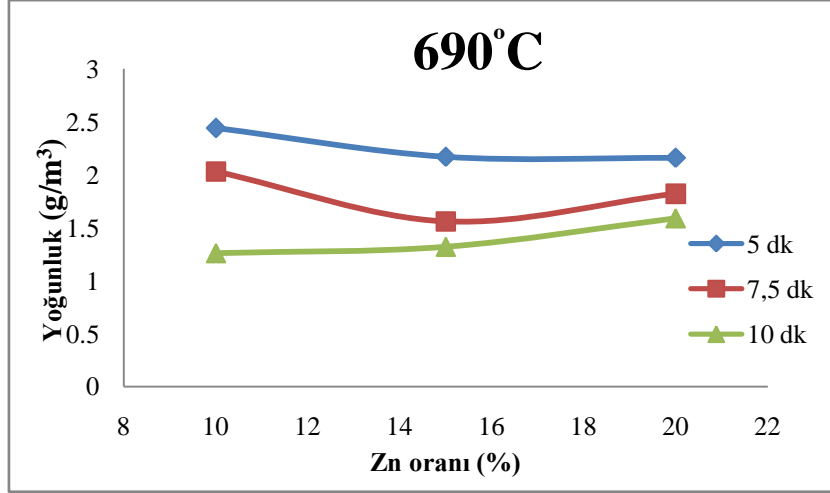


Resim 5.4: 10 dakika köpürtme süresinde elde edilen köpük numunelerin SEM görüntüleri. a)690°C, b)710°C ve c)730°C köpürtme sıcaklıkları

### 5.3. Zn Oranının Yoğunluk Değerlerine Etkisi

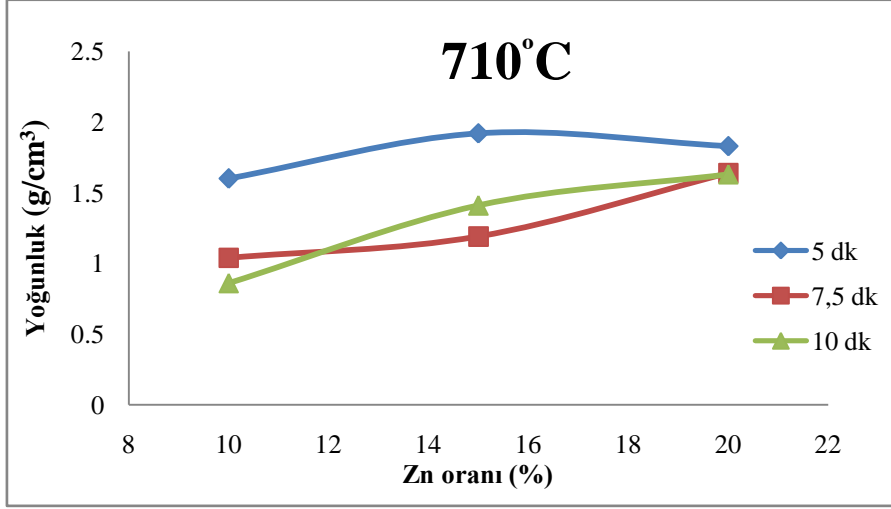
690°C köpürtme sıcaklığında ve 5, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde Zn oranının değişmesine bağlı olarak değişen yoğunluk değerleri Şekil 5.1' de grafikte gösterilmiştir. %10, 15 ve %20 Zn ilaveli köpük numunelerde köpürtme süresinin artmasıyla lineer genişleme miktarlarının artmasına paralel olarak yoğunlukta kısmi azalma görülmektedir. 5 dakikalık köpürtme süresinde Zn oranı arttıkça yoğunluk değerlerinde kısmi azalma söz konusudur. Çünkü, metalik köpüklerin üretiminde gözenek morfolojisine yerçekimi ve ayrışan H<sub>2</sub> gazı etki etmektedir. Bundan dolayı metalik numunelerin fırın içerisinde kaldığı süreye bağlı olarak gözeneklilik oranı artar ve yoğunluk değerleri düşer. Yang ve Nakae tarafından yapılan çalışmada H<sub>2</sub> gazının genişlemesine ergiyik metlin viskozitesinin etki ettiği vurgulanmaktadır. Bu nedenle köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığı ile artan gözenekliliğin sandviç metalik köpüklerin yoğunluğunda azalmaya neden olduğu tespit

edilmiştir. 7,5 dakikalık köpürtme süresinde Zn oranının artmasıyla önce azalma, sonra çok az artma meydana gelmiştir. 10 dakikalık köpürtme süresinde ise Zn oranının artmasına bağlı olarak kısmi bir artış mevcuttur.



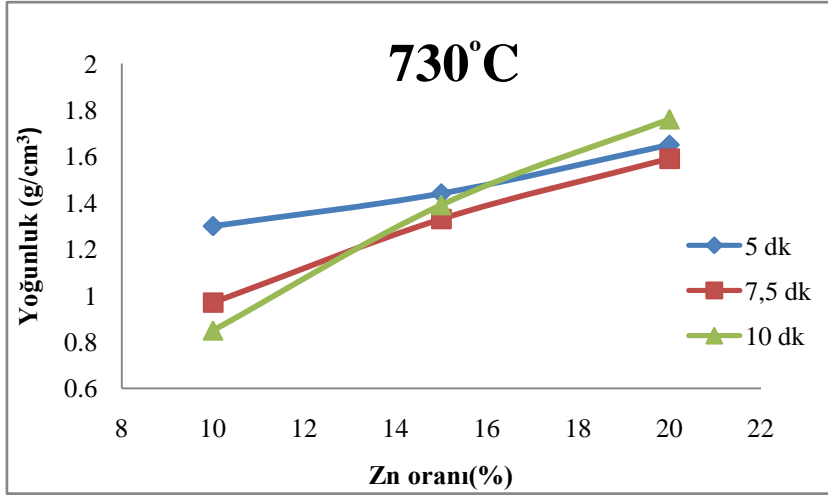
Şekil 5.2:690°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak yoğunluk değerlerinin değişimi

710°C köpürtme sıcaklığında meydana gelen %10, 15 ve 20 Zn ilaveli köpük numunelerin yoğunluk değerlerinin değişimi Şekil 5.3' teki grafikte verilmiştir. Buna göre 5, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde Zn ilavesinin artmasıyla birlikte yoğunluk değerlerinde artış gözlenmiştir. %10 Zn ilaveli köpük numunede köpürtme süresinin artmasına bağlı olarak yoğunluk değerlerinde sürekli bir azalma söz konusudur. %15 Zn ilaveli köpük numunede 5 dakika köpürtme süresinde yoğunluk değeri yüksektir, ancak köpürtme süresinin artmasıyla yoğunluk değerinde azalma beklenirken 10 dakika köpürtme süresine ait yoğunluk değerinin 7,5 dakika köpürtme süresinde elde edilen yoğunluk değerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, ergiyik metale etkileyen yerçekimi etkisinin 10 dakika köpürtme süresinde daha fazla olması ve buna bağlı olarak bir miktar çökme olmasından kaynaklanmaktadır. %20 Zn ilaveli köpük numunede 5 dakika köpürtme süresinde yoğunluk değerinin yüksek olduğu, 7,5 ve 10 dakikalık köpürtme sürelerinde ise yoğunluk değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Genel olarak artan Zn oranına göre değerlendirildiğinde, Zn ilavesinin ergiyik viskozitesini artırması ve bu yüzden köpürtme esnasında numune üzerinde yaptığı basınçtan dolayı (Şekil 5.1) köpürtmeyi engellemeye bağlı yoğunluk değerlerinin arttığı gözlenmiştir.



Şekil 5.3: 710°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak yoğunluk değerlerinin değişimi

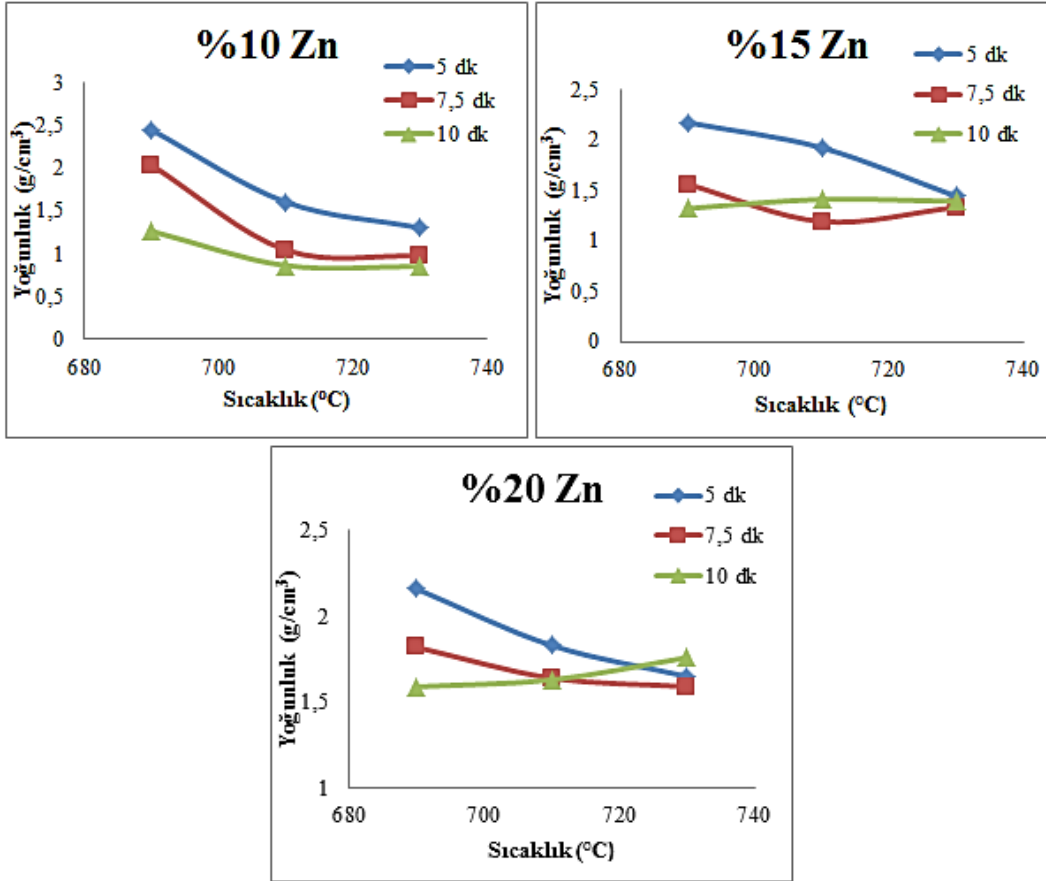
730°C köpürtme sıcaklığında elde edilen %10, 15 ve 20 Zn ilaveli köpük numunelerin köpürtme sürelerine göre yoğunluk değerlerindeki değişim Şekil 5.4' teki grafikte verilmiştir. 710°C de köpürtme sıcaklığında olduğu gibi Zn ilavesinin artmasıyla birlikte yoğunluk değrlerinde artış görülmektedir. Yoğunluk değerlerindeki bu artış, Al tozlarına ilave edilen Zn' nun yoğunluğunun yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla matris içerisine ilave edilen Zn oranı artması yoğunluk değerini artıracaktır. %10 Zn ilaveli köpük numunede köpürtme süresinin artmasıyla yoğunluk değerlerinde azalma söz konusudur (Şekil 5.5). %15 Zn ilaveli köpük numunenin 5, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen yoğunluk değerleri birbirine yakın olup 10 dakika köpürtme süresinde elde edilen yoğunluk 7,5 dakika köpürtme süresinde elde edilen yoğunluktan fazladır (Şekil 5.5). %20 Zn ilaveli köpük numunede ise 10 dakika köpürtme süresinde elde edilen yoğunluk değeri 5 ve 7,5 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen yoğunluk değerlerinden daha yüksektir.



Şekil 5.4: 730°C köpürtme sıcaklığına ait Al-Zn metalik köpük numunelerin farklı köpürtme sürelerinde Zn oranına bağlı olarak yoğunluk değerlerinin değişimi

%10 Zn ilaveli köpük numunede 5, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde köpürtme sıcaklığının artmasıyla yoğunluk değerlerinin azaldığı görülmektedir. %15 Zn ilaveli köpük numunede 5 dakika köpürtme süresinde sıcaklığın artmasıyla yoğunluk değerlerinde azalma görülürken, 710°C köpürtme sıcaklığında 10 dakika köpürtme süresindeki yoğunluk değeri 7,5 dakika köpürtme süresindeki yoğunluk değerinden yüksek olduğu ve 730°C'de 5, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerindeki yoğunluk değerleri birbirine yakındır. %20 Zn ilaveli köpük numunede ise 690°C de köpürtme süresinin artmasına bağlı olarak yoğunluk değerlerinin azaldığı, 710°C köpürtme sıcaklığında 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerindeki yoğunluk değerlerinin aynı olduğu, 730°C köpürtme sıcaklığında ise yoğunluk değerlerinin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir.

Uzun ve arkadaşlarının yapmış oldukları deneysel çalışmada toz metalurjisi yöntemiyle Al esaslı %2, 4, 8, 12 ve 16 oranlarında Si ilaveli köpük numune üretmişlerdir. Deney sonucunda köpük numunelerin yoğunluklarının %2 oranında Si ilavesinden %8 oranına kadar azaldığı, %8 den %12 ye kadar kısmen değiştiği ve %12 oranından %16 Si oranına kadar önemli derecede artış olduğu tespit edilmiştir. Buradan yola çıkarak, mevcut deneysel çalışmada %10 Zn oranına aityoğunluk değeri minimum 0,5-1 g/cm<sup>3</sup>, %15 Zn oranına ait değeri 1-1,5 g/cm<sup>3</sup> ve %20 Zn oranına ait değer ise 1,5-2 g/cm<sup>3</sup> arasında olup literatürle desteklenmektedir.

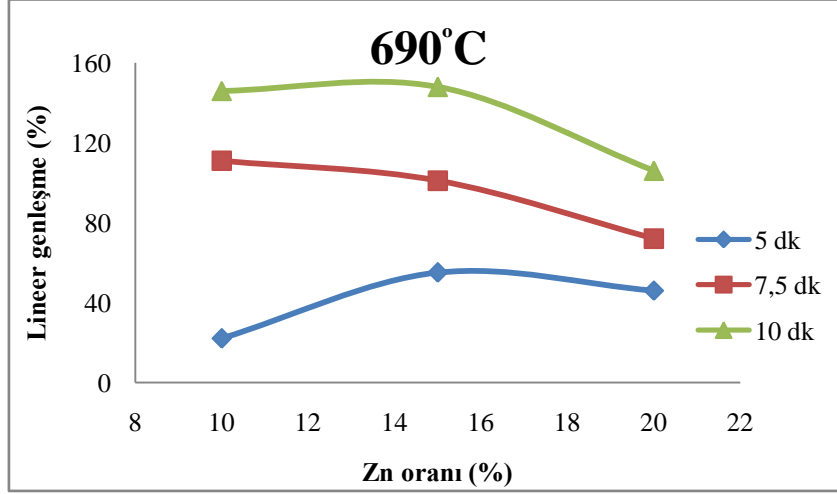


Şekil 5.5: %10-15-20 Zn ilavelerine göre köpürtme sıcaklıklarına bağlı yoğunluk değerlerinin değişimi

#### 5.4. Zn Oranının Linear Genleşme Oranlarına Etkisi

690°C köpürtme sıcaklığında elde edilen %10,15 ve %20 Zn ilaveli köpük numunelerin linear genleşme miktarlarının değişimi Şekil 5.6' daki grafikte gösterilmiştir. Grafikte köpürtme süresinin artmasıyla birlikte linear genleşme oranlarında artış görülmektedir. 5 dakika köpürtme süresinde Zn ilavesi artarken linear genleşme miktarında önce bir artış ve sonrakısmi oranda düşüş görülmektedir. 7,5 ve 10 dakikalık köpürtme sürelerinde ise %20 Zn ilaveli köpük numunenin linear genleşme miktarlarının Zn ilavesinin ergiyik viskozitesini yükseltmesinden dolayı %10 ve %15 Zn ilaveli köpük numunelerden daha düşük olduğu gözlenmiştir. Buna karşın %20 Zn ilaveli köpük numunenin linear genleşme miktarında köpürtme süresine paralel olan artış söz konusudur. %10 Zn ilaveli köpük numunenin linear genleşme miktarındaki değişimde 5 dakika köpürtme süresinden 7,5 dakikaya kadar büyük bir fark olduğu görülmektedir. %15 Zn ilaveli numunede ise köpürtme süreleri linear genleşme miktarı değişim neredeyse eşit miktardadır. %15 ve %20 Zn içeren numunelerde 5 dakika ile 7,5 dakika köpürtmesindeki linear genleşme

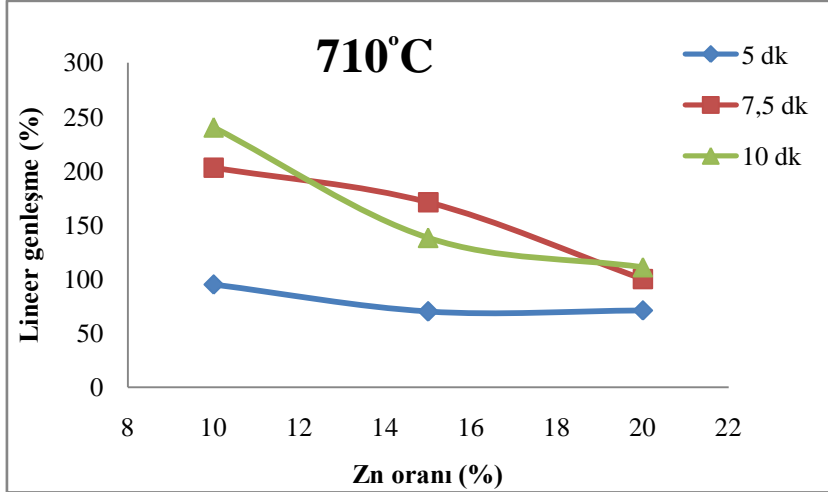
oranı daha azdır. Bunun nedeninin Zn oranının ergime derecesini azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.6: 690°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak lineer genleşme oranlarının değişimi

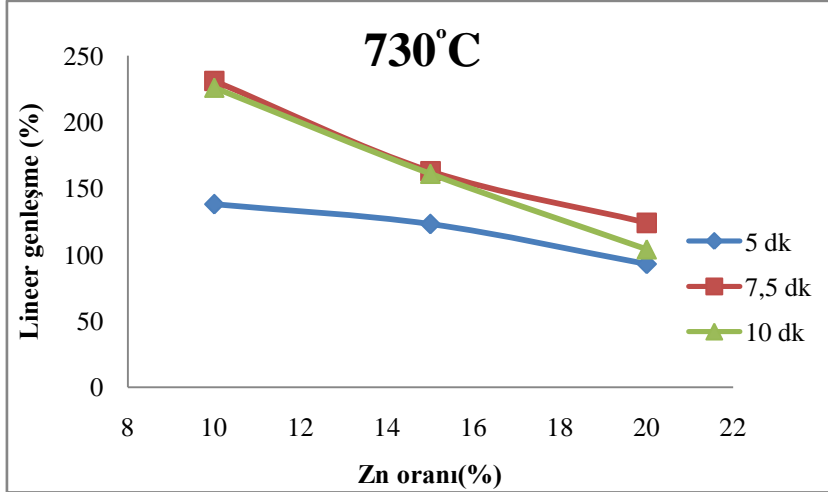
710°C köpürtme sıcaklığında elde edilen köpük numunelerin lineer genleşme miktarındaki değişim Şekil 5.7 de gösterilmiştir. Lineer genleşme miktarının en düşük olduğu köpürtme süresi 5 dakikadır ve bütün köpürtme sürelerinde en düşük lineer genleşme miktarına sahip numuneler %20 Zn ilaveli köpük numunelerdir. %10 Zn ilaveli köpük numunede köpürtme süresinin artmasıyla birlikte lineer genleşme miktarlarında artış görülmektedir. %15 Zn ilaveli köpük numunede 7,5 dakika köpürtme süresinde elde edilen köpük numunenin lineer genleşme miktarı 10 dakika köpürtme süresinde elde edilen köpük numunenin lineer genleşme miktarından daha fazladır. Sebebinin ergiyik metalin 10 dakikalık köpürtme süresinde yerçekimine maruz kalıp çökmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. %20 Zn ilaveli köpük numunenin ise köpürtme süresinin artmasıyla birlikte lineer genleşme miktarlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Resim 5.2' ye bakıldığında %20 Zn ilaveli köpük numunede gözenek yapıları yönlenmiş şekildedir ve 10 dakika köpürtme süresinde lineer genleşme miktarındaki azalma bir miktar çökme olduğunun göstergesidir.

Garcia-moreno ve Banhart (Garcia, Banhart, 2007) yaptıkları çalışmada lineer genleşme oranının bir süre artıp sonra azalmasının köpürtme süresine bağlı olarak ergiyik metale etki eden yerçekimi kuvvetinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.



Şekil 5.7: 710°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak lineer genişleme oranlarının değişimi

730°C’ de köpürtme sıcaklığındaki %10-15-20 Zn ilaveli köpük numunelerin lineer genişleme miktarlarının değişimi Şekil 5.8’ deki gibidir. Buna göre lineer genişleme miktarı değişiminin en az olduğu köpürtme süresi 5 dakikadır ve yine %20 Zn ilaveli köpük numunelerin lineer genişleme miktarları %10 ve %15 Zn ilaveli köpük numunelerden daha düşüktür. 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde ise %10 ve %15 Zn ilaveli köpük numunelerin lineer genişleme miktarı hemen hemen aynıdır, ancak %20 Zn ilaveli köpük numunenin 10 dakika köpürtme süresindeki lineer genişleme miktarı 7,5 dakikadakinin düşüktür. Sebebinin, Resim 5.3’ e bakıldığında 10 dakikada elde edilen gözenek boyutunun daha küçük ve basık olmasından ve dolayısıyla çökmeden kaynaklandığı düşünülmektedir. %10 Zn ilaveli köpük numunenin lineer genişleme miktarı %15 Zn ilaveli köpük numunenin lineer genişleme miktarından daha fazladır. Çünkü 7,5 dakika köpürtme süresinde %15 Zn ilaveli köpük numunede köpürtme esnasında gözenek hareketlerinin etkisiyle numunenin bir tarafına doğru çökme meydana gelmiştir(bkz Resim 5.3). 10 dakika köpürtme süresinde ise köpük numunenin alt kısımlarında kısmi çökme söz konusudur(bkz. Resim 5.3). Zn oranlarına göre farklı köpürtme sürelerine ve Farklı köpürtme sıcaklıklarına bağlı olarak değişimleri Şekil 5.9’ da verilmiştir.



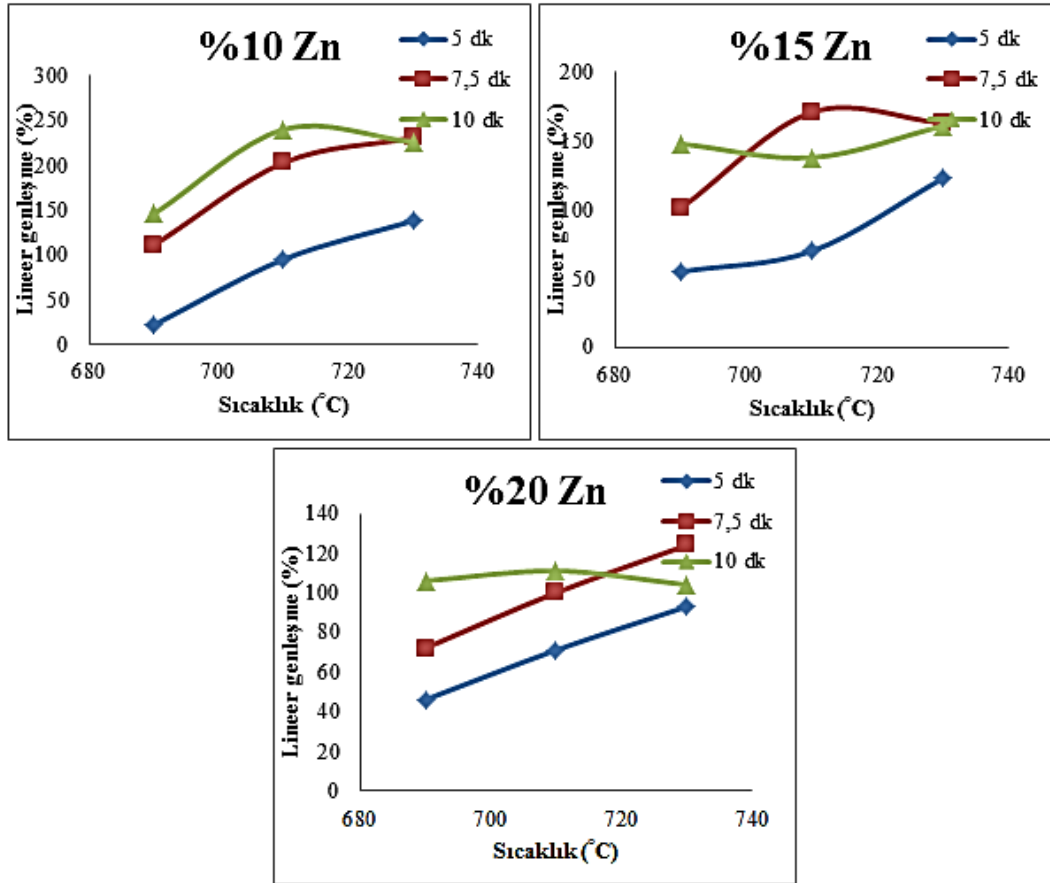
Şekil 5.8: 730°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak lineer genişleme oranlarının değişimi

%10 Zn ilaveli köpük numunede 5, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde köpürtme sıcaklığının artmasıyla birlikte ergiyik viskozitesinin azalmasına bağlı olarak lineer genişleme miktarlarında artma olduğu görülmektedir. 730°C' de 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen lineer genişleme oranlarının aynı olduğu ve 690 ve 710°C köpürtme sıcaklıklarında aynı köpürtme sürelerinde kısmi değişim olduğu belirlenmiştir. %15 Zn ilaveli köpük numunede 5 dakika köpürtme süresinde sıcaklığın artmasıyla lineer genişleme oranlarının arttığı ve 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen lineer genişleme oranlarına kıyasla minimum olduğu görülmektedir. 710°C köpürtme sıcaklığında 10 dakika köpürtme süresindeki lineer genişleme oranının 7,5 dakika köpürtme süresindeki lineer genişleme oranından düşük olduğu ve 730°C köpürtme sıcaklığında 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerindeki lineer genişleme oranları aynıdır. %20 Zn ilaveli köpük numunede ise 690°C köpürtme sıcaklığında köpürtme süresinin artmasına bağlı olarak lineer genişleme oranlarının arttığı ve 730°C köpürtme sıcaklığında 10 dakika köpürtme süresinde elde edilen lineer genişleme oranının 7,5 dakika köpürtme süresinde elde edilen lineer genişleme oranından düşük olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.9).

Asavavisithchai ve Kennedy (Asavavisithchai, Kennedy, 2006), %6 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilave ederek yaptıkları çalışmada 6 dakika köpürtme süresinde %500 civarında lineer genişleme elde etmişlerdir ve sonuç olarak artan köpürtme süresinin lineer genişleme oranını azalttığını belirtmişlerdir. Esmaelzadeh ve diğerleri (Esmaelzadeh, Simchi, 2007), yaptıkları çalışmada AlSi7 alaşımına %3 SiC ilave ederek 750 ve 800°C köpürtme sıcaklıklarında %500 civarında lineer genişleme elde etmişlerken 810°C sıcaklıkta %550 elde etmişlerdir.

Sonuç olarak köpürtme sıcaklığının artmasının lineer genleşme oranını artırdığını belirtmişlerdir.

Benzer şekilde Türker, yapmış olduğu deneysel bir çalışmada saf Al ile ve %1,2,4,8,12,16 ve 20 oranlarında SiC ilave edilmiş toz karışımı ile elde ettiği metalik köpüklerin lineer genleşme miktarlarını incelemiş ve saf Al ile elde edilen köpük numunenin lineer genleşme oranının maksimum %500 olduğu ve %4-8 oranında SiC ilaveli köpük numuneler içerisinde lineer genleşme oranının %450, %12-20 aralığındaki SiC ilavesiyle gözenek duvarlarında birikerek meydana getirdiği dayanımın artmasından dolayı lineer genleşme oranı %125 e kadar düşmüştür. Benzer şekilde mevcut deney çalışmasında da Zn oranının artmasına bağlı olarak %20 Zn ilaveli köpük numunenin lineer genleşme oranının azaldığı tespit edilmiştir. %10 Zn ilaveli köpük numuneye ait maksimum lineer genleşme oranı yaklaşık %250 iken, %15 Zn ilaveli köpük numunenin %200, %20 Zn ilaveli köpük numunenin ise yaklaşık %140 olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların ortak nedeni; takviye oranındaki artışın gözenek duvarlarında biriktiği ve dayanımı artırarak hidrojen gazı çıkışını engellemesi ve köpürtme esnasında lineer genleşmeyi azaltmasıdır.

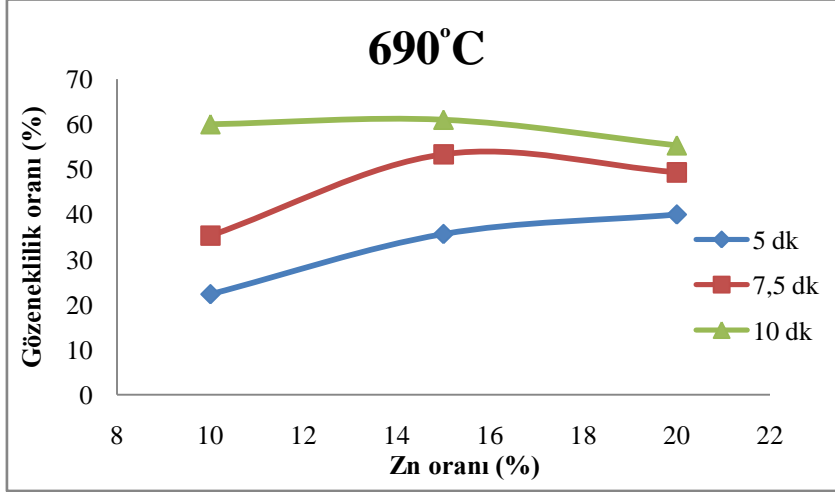


Şekil 5.9: %10-15-20 Zn ilavelerine göre köpürtme sıcaklıklarına bağlı olarak lineer genişleme oranlarının değişim grafikleri

### 5.5. Zn Oranının Gözeneklilik Oranlarına Etkisi

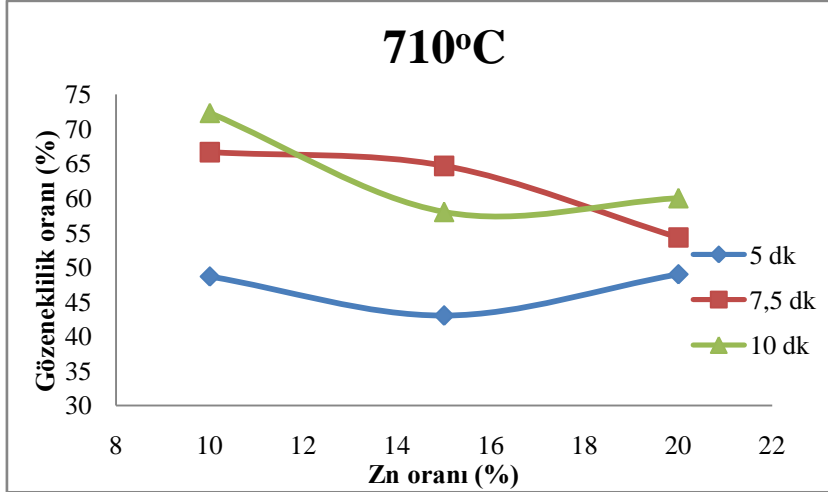
Şekil 5.10' da 690°C köpürtme sıcaklığında ve 5, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen %10, 15 ve %20 Zn ilaveli köpük numunelerin gözeneklilik oranı değişimi verilmiştir. Köpürtme süresinin artmasıyla birlikte gözenek miktarında artış görülmektedir. Zn ilaveli köpük numunelerin herbiri için de aynı durum söz konusudur. 5 dakika köpürtme süresinde Zn ilavesinin artmasıyla gözeneklilik oranında artış gözlenmiştir. 7,5 dakikada %10 ve %15 Zn ilaveli köpük numunelerin gözeneklilik oranları arasında önemli derecede fark vardır. 10 dakika köpürtme süresinde %10 ve %15 Zn ilaveli köpük numunelerin gözeneklilik oranları birbirine çok yakın, ancak %20 Zn ilaveli köpük numunenin gözeneklilik oranı düşüktür. Artan Zn oranı ergiyik viskozitesini artıracığı için ergiyik metalin basıncı ayrılan H<sub>2</sub> gazının basıncından yüksek olacak ve gözenekliliği düşürecektir. %10 Zn ilaveli köpük numunede 5 dakikave 7,5 dakika arasındaki gözeneklilik farkı %10 iken, köpürtme süresi 7,5 dakikadan 10 dakikaya çıkarak gözeneklilik %30 artmıştır. %15 Zn ilaveli köpük numunede köpürtme süresinin

artmasıyla hemen hemen aynı miktarda artış gözlenmiştir. %20 Zn ilaveli köpük numunenin gözeneklilik oranının ise köpürtme süresinin artmasıyla arttığı görülmektedir.



Şekil 5.10: 690°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak gözeneklilik oranlarının değişimi

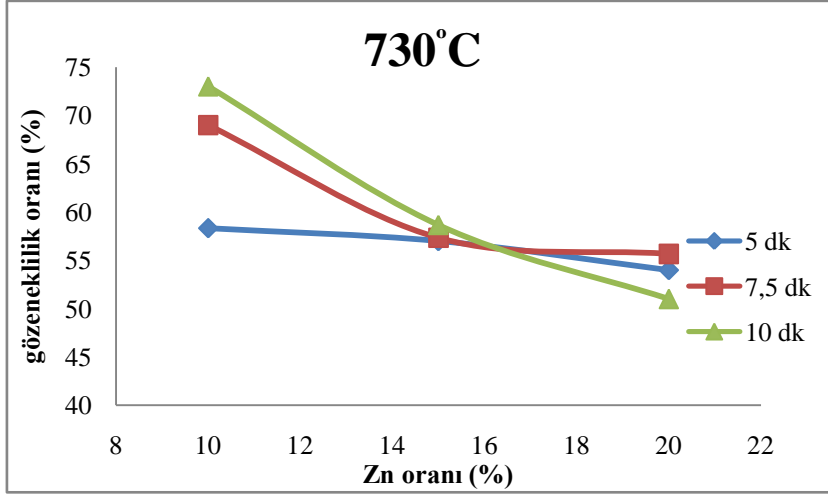
Şekil 5.11' de 710°C köpürtme sıcaklığına ait farklı köpürtme sürelerinde elde edilen %10, 15 ve %20 Zn ilaveli köpük numunelerin gözeneklilik oranlarındaki değişim verilmiştir. 5 dakika köpürtme süresinde elde edilen gözeneklilik oranları 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerindeki gözeneklilik oranlarından daha düşüktür. %10 Zn ilaveli köpük numunede gözeneklilik oranının köpürtme süresinin artmasıyla birlikte arttığı görülmektedir. %15 Zn ilaveli köpük numunede 7,5 dakika köpürtme süresinde elde edilen gözeneklilik oranı 10 dakika köpürtme süresinde elde edilenden daha fazladır. Bunun sebebi; 10 dakika köpürtme süresinde Al ergiyiğinin yerçekimine maruz kalıp H<sub>2</sub> gaz basıncını etkilemesi ve gözenek oluşumunu kısmen engellemesi olduğu düşünülmektedir. %20 Zn ilaveli köpük numunede ise gözeneklilik oranı köpürtme süresinin artmasıyla artmıştır ve 5 dakika köpürtme süresinde %10 Zn ilaveli köpük numunenin gözeneklilik oranı, 10 dakika köpürtme süresinde ise %15 Zn ilaveli numunenin gözeneklilik oranıyla hemen hemen aynıdır, ancak 7,5 dakika köpürtme süresinde en düşük gözeneklilik oranına sahiptir.



Şekil 5.11: 710°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı gözeneklilik oranlarının değişimi

730°C köpürtme sıcaklığında 5, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen köpük numunelerin gözeneklilik oranlarındaki değişim Şekil 5.12' de gösterilmiştir. Köpürtme sürelerinin ve Zn oranının artmasıyla gözeneklilik oranlarında artış olduğu gözlenmiştir. %10 Zn ilaveli köpük numunede köpürtme süresinin artmasıyla birlikte gözeneklilik oranlarında artış olduğu, %15 Zn ilaveli köpük numunenin üç farklı köpürtme süresinde gözeneklilik oranlarının birbirine yakın değerde olduğu belirlenmiştir. %20 Zn ilaveli köpük numunenin gözeneklilik oranlarında kısmi değişme söz konusudur.

Andrade ve Hirai (Andrade, 1934; Hirai, 1993), yaptıkları çalışmaya dayanarak köpük kararlılığının büyük oranda sıvının viskozitesine bağlı olduğunu, sıvının viskozitesinin ise sıcaklığa bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Şekil 5.13 te farklı Zn oranlarına göre köpürtme süreleri ve köpürtme sıcaklıklarına bağlı gözeneklilik oranı değişimleri verilmiştir.

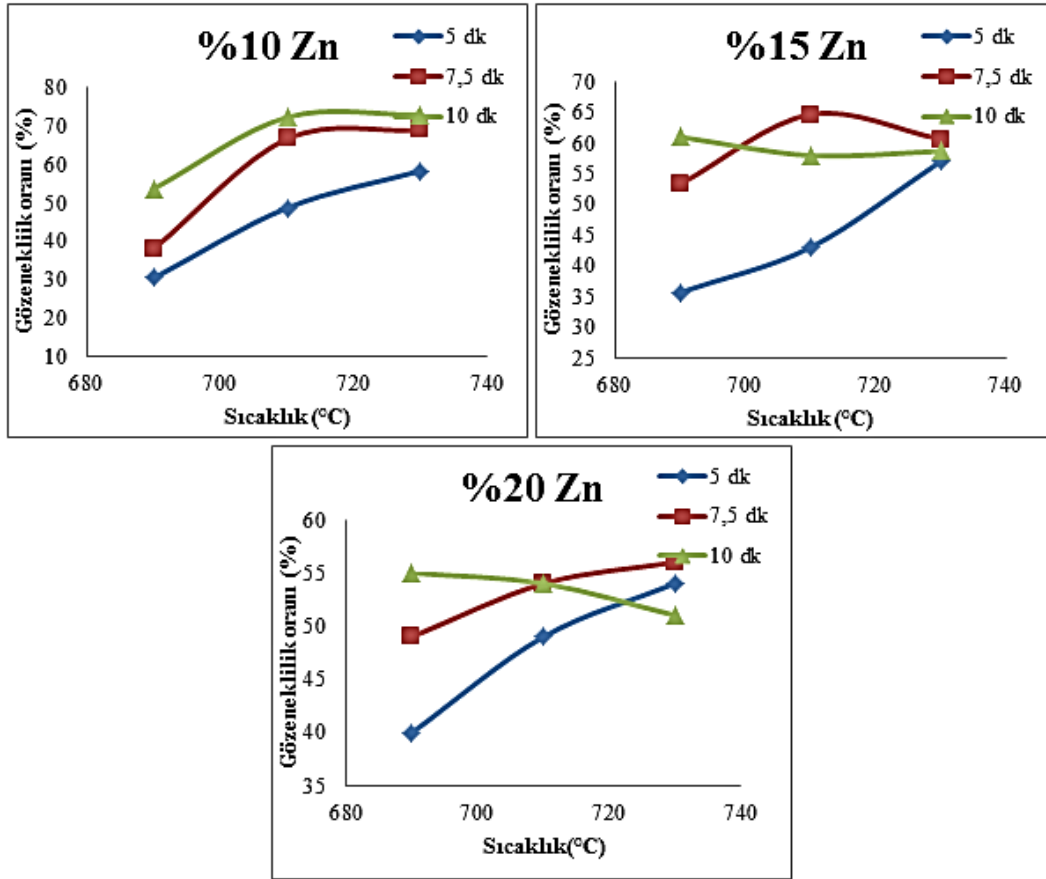


Şekil 5.12: 730°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı olarak gözeneklilik oranlarının değişimi

%10 Zn ilaveli köpük numunede 5, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde köpürtme sıcaklığının artmasıyla gözenek miktarlarının arttığı ve bu köpürtme sürelerindeki gözenek miktarlarında kısmi değişim olduğu görülmektedir. %15 Zn ilaveli köpük numunede 690°C köpürtme sıcaklığında köpürtme süresinin artmasıyla birlikte gözenek miktarında artma olduğu, 710°C köpürtme sıcaklığında 10 dakika köpürtme süresindeki gözenek miktarının 7,5 dakika köpürtme süresindeki gözenek miktarından daha az olduğu ve 730°C köpürtme sıcaklığında 5, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerindeki gözenek miktarları birbirine çok yakındır. %20 Zn ilaveli köpük numunede ise 690°C de köpürtme süresinin artmasına bağlı olarak gözenek miktarlarının arttığı, 710°C köpürtme sıcaklığında 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerindeki gözenek miktarlarının aynı olduğu, 730°C köpürtme sıcaklığında ise yoğunluk değerlerinin birbirine yakın olduğu ve 10 dakika köpürtme süresindeki gözenek miktarının minimum olduğu belirlenmiştir.

Türker ve Çinici; yaptıkları çalışmada toz metalurjisi yöntemiyle Al, %7 Si, %0,6 Mg tozları ile elde ettiği köpük numuneler üzerinde 650, 670, 690 ve 710°C köpürtme sıcaklıklarının ve 6-16 dakika aralığındaki köpürtme süresinin etkisiyle gözeneklilik oranındaki değişimi incelemişlerdir. Sonuç olarak köpürtme süresinin ve sıcaklığın artmasıyla birlikte ergiyik metalin drenaj etkisinin azaldığı ve gözenek içerisindeki gaz basıncına etki eden direncin azaldığı belirtilmiştir. Yürütülen deneysel çalışmada da benzer sebepten dolayı köpürtme süresinin ve sıcaklığının artmasıyla birlikte gözeneklilik

oranında artış olduğu, ancak 10 dakika köpürtme süresindeki sapmanın ergiyiğin köpürtme esnasında yerçekimi etkisine maruz kaldığı düşünülmektedir.

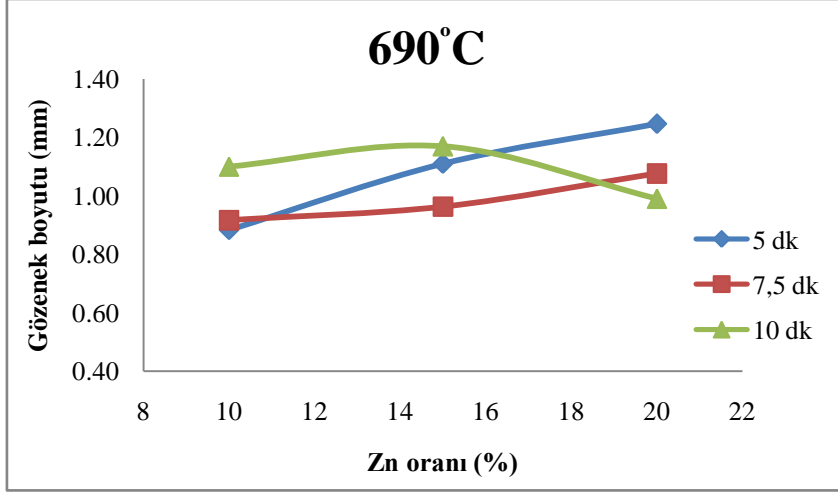


Şekil 5.13: %10-15-20 Zn ilavelerine göre köpürtme sıcaklıklarına bağlı olarak gözeneklilik oranlarının değişimi

## 5.6. Zn Oranının Gözenek Boyutuna Etkisi

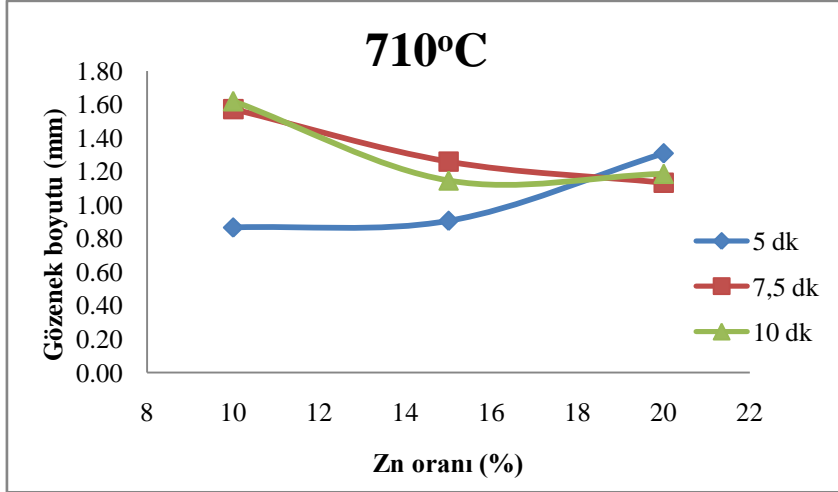
Şekil 5.14'te 690°C köpürtme sıcaklığında farklı köpürtme sürelerinde elde edilen Zn ilaveli köpük numunelere ait gözenek boyutları gösterilmiştir. 5 dakika ve 7,5 dakika köpürtme sürelerinde Zn ilavesinin artmasıyla birlikte artma olduğu, ancak 10 dakika köpürtme süresinde önce artma, daha sonra azalma olduğu belirlenmiştir. %10 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek boyutu 5 dakika ve 7,5 dakika köpürtme sürelerinde birbirine yakın değerlerde olup 10 dakika köpürtme süresinde elde edilen gözenek boyutu daha büyüktür. %15 Zn ilaveli köpük numunenin 5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde hemen hemen aynıdır, 7,5 dakika köpürtme süresinde elde edilen gözenek boyutu daha küçüktür. %20 Zn ilaveli köpük numunede ise köpürtme süresinin artmasıyla gözenek boyutunun azaldığı tespit edilmiştir. %10 Zn ilaveli köpük numunenin ortalama gözenek boyutu 1 mm, %15 Zn ilaveli köpük numunenin ortalama gözenek boyutu 1,10 mm, %20 Zn ilaveli

köpük numunenin ise ortalama gözenek boyutunun 1,20 mm olduğu görülmektedir . Bu değerlendirmeye göre de Zn oranının artmasıyla gözenek boyutunun arttığı anlaşılmaktadır.



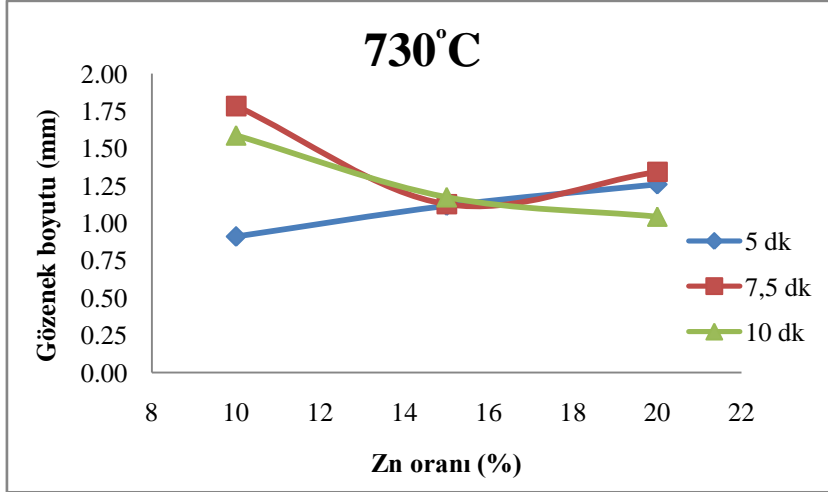
Şekil 5.14: 690°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı gözenek boyutlarının değişimi

710°C köpürtme sıcaklığında ve farklı köpürtme sürelerinde elde edilen farklı Zn oranlarına sahip köpük numunelerin gözenek boyutları Şekil 5.15' te gösterilmiştir. 5 dakika köpürtme süresinde Zn oranının artmasıyla birlikte gözenek boyutunda büyüme belirlenmiştir. 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde ise Zn oranının artmasına bağlı olarak gözenek boyutunda küçülme söz konusudur. %10 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek boyutu 5 dakikada 0,8 mm iken 7,5 ve 10 dakikada birbirine çok yakın olup 1,6 mm dir. %15 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek boyutları 5 dakikada 0,90 mm olarak diğerlerine göre daha küçük boyuttadır. 7,5 dakika köpürtme süresindeki gözenek boyutu 10 dakika köpürtme süresinde elde edilen numunenin gözenek boyutundan büyük olduğu ve 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen gözenek boyutunun yaklaşık olarak 1,30 mm olduğu görülmektedir. %20 Zn ilaveli köpük numunenin 5, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen gözenek boyutları arasında çok fark olmadığı ve 1,20 mm civarında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.15: 710°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı gözenek boyutlarının değişimi

730°C köpürtme sıcaklığında ve farklı köpürtme sürelerindeki %10-15-20 Zn ilaveli köpük numunelerin gözenek boyutu değişimi Şekil 5.16 daki grafikte gösterilmiştir. 5 dakika köpürtme süresinde Zn oranının artmasıyla gözenek boyutunda sürekli olarak büyüme, 7,5 dakika köpürtme süresinde küçülme ve sonrasında büyüme, 10 dakika köpürtme süresinde ise sürekli olarak küçülme olduğu belirlenmiştir. %10 Zn ilaveli köpük numunelerde köpürtme süresinin artmasıyla birlikte gözenek boyutunda büyüme görülmüştür, ancak 7,5 dakikada elde edilen gözenek boyutu 10 dakikada elde edilen gözenek boyutuna yakın olup yaklaşık 1,70 mm boyutundadır. %15 Zn ilaveli köpük numunelerin 5, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerindeki gözenek boyutları aynıdır ve 1,20 mm dir. %20 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek boyutu ise 5 ve 7,5 dakika köpürtme sürelerinde birbirine yakın, 10 dakika köpürtme süresinde ise gözenek boyutu biraz daha küçük olmakla birlikte bu köpürtme sürelerinde elde edilen gözenek boyutlarında çok fazla bir değişim görülmediği ve 1,25-1,30 mm civarlarında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.17 de Zn oranlarına göre köpürtme sıcaklığına ve köpürtme süresine bağlı gözenek boyutu değişimleri gösterilmiştir.



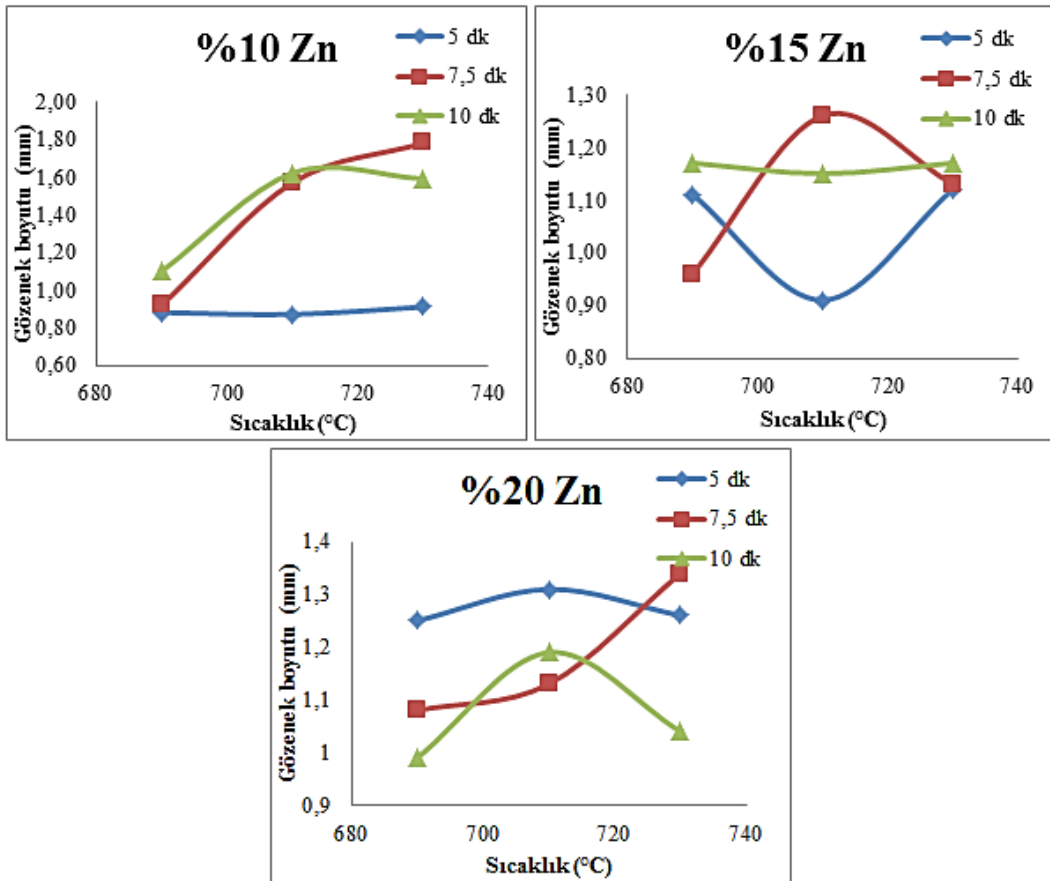
Şekil 5.16: 730°C köpürtme sıcaklığına ait köpük numunelerin Zn oranına bağlı gözenek boyutlarının değişimi

%10 Zn ilaveli köpük numunede 5 dakika köpürtme süresinde gözenek boyutları minimum düzeydeyken, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen gözenek boyutları arasında kısmi değişim olduğu ve 710°C köpürtme sıcaklığında aynı olduğu tespit edilmiştir. %15 Zn ilaveli köpük numunede 690°C köpürtme sıcaklığında 5, 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen gözenek boyutlarında kısmi değişim olduğu, 710°C köpürtme sıcaklığında 7,5 dakika köpürtme süresinde gözeneklerin maksimum olduğu ve 730°C de köpürtme sürelerinde elde edilen gözenek boyutları birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. %20 Zn ilaveli köpük numunede ise 690°C köpürtme sıcaklığında maksimum gözenek boyutunun 5 dakika köpürtme süresinde elde edildiği ve köpürtme süresinin artmasının aksine gözenek boyutunda küçülme olduğu, 710°C köpürtme sıcaklığında 10 dakika köpürtme süresinde elde edilen gözenek boyutunun 7,5 dakikada elde edilen gözenek boyutundan büyük olduğu, 730°C köpürtme sıcaklığında ise 7,5 dakika köpürtme süresinde elde edilen gözenek boyutunun maksimum olduğu ve 10 dakikada elde edilen gözenek boyutunun minimum olduğu belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalarda, 5 dakika köpürtme süresinde Zn ilavesinin artmasına bağlı olarak gözenek boyutu artarken 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde gözenek boyutları kısmen azalmıştır. Bilindiği üzere, köpürtücü maddeden ayrılan gaz miktarı, ergiyik metalin viskozitesi, matris malzemenin yoğunluğu ve köpürebilir malzemenin köpürtme süresince ortamdaki absorbe ettiği hidrojen miktarı gözenek boyutunu etkileyen faktörlerdir.

Dolayısıyla 5 dakika köpürtme süresinde gözenekler büyümek için yeterli iç basınca ulaşamamış ve birleşme eğilimine girmiştir.

Gökmen, yapmış olduğu tez çalışmasında (Al+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) partikül oranının artmasıyla gözenek boyutunun azaldığını tespit etmiştir. Bunun sebebinin, partiküllerin ergiyik metal içerisinde dağılarak vizkozitesini artırdığı ve metal-gaz arayüzeyinde bulunarak gözeneklerin birleşmesini engellemesinden kaynaklandığını tahmin etmektedir. Buna benzer şekilde, bu deneysel çalışmada Zn oranının artmasıyla birlikte gözenek boyutlarında azalma olduğu belirlenmiştir. %10 Zn ilaveli köpük numunede maksimum gözenek boyutu yaklaşık 1,8 mm iken, %15 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek boyutu yaklaşık 1,3 mm ve %20 Zn ilaveli köpük numunenin gözenek boyutu ise yaklaşık 1,3 mm dir. Böylece yapılan deneysel çalışmanın literatürle hemen hemen benzerlik gösterdiği söylenebilir.

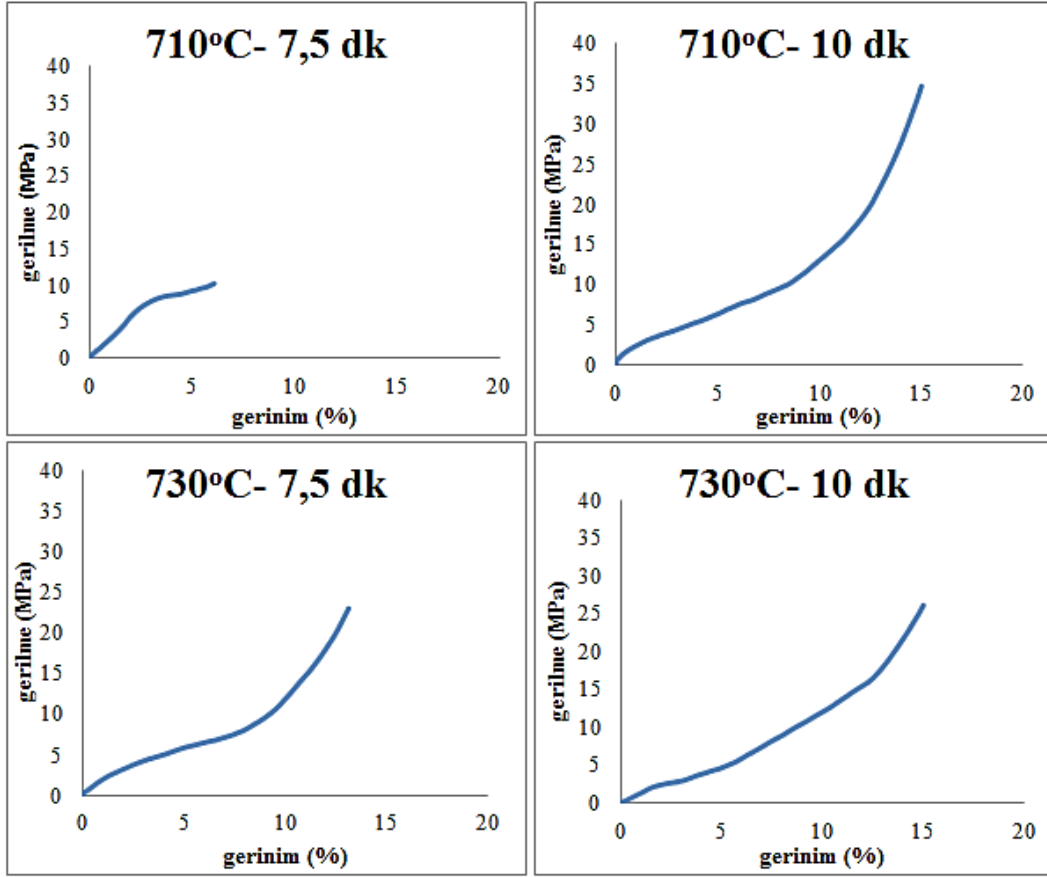


Şekil 5.17: %10-15-20 Zn ilavelerine göre köpürtme sıcaklıklarına bağlı olarak gözenek boyutlarının değişim

### 5.7. Al-Zn Köpüklerin Basma Dayanımları

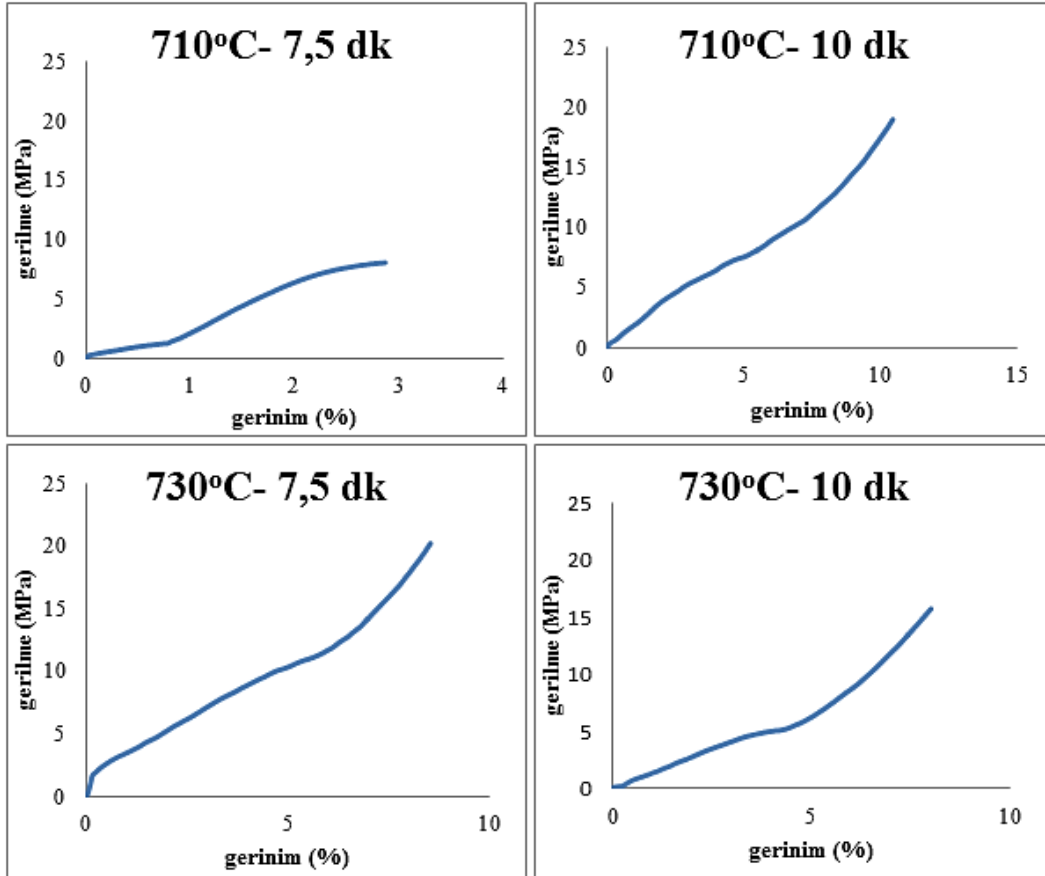
Farklı köpürtme sıcaklıklarında ve farklı köpürtme sürelerinde üretilmiş olan metalik köpük numuneleri içerisinde %10 ve %15 Zn ilaveli köpük numunelerin 710 ve 730°C köpürtme sıcaklıklarında ve 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen köpük numuneler basma testine tabi tutulmuştur. Kullanılan diğer parametreler ile elde edilen köpüklerde, gözenek morfolojisi ve lineer genişleme açısından yeterli köpürme gerçekleşmediğinden basma testi uygulanmamıştır.

%10 Zn ilaveli köpük numunenin 710°C köpürtme sıcaklığında ve 7,5 ile 10 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen basma dayanımları Şekil 5.18 de gösterilmiştir. 7,5 dakika köpürtme süresinde çökme 8 MPa gerilmeden sonra başlamış ve %1 oranında deformasyonla 10 MPa dan sonra da yoğunlaşma başlamıştır. 10 dakika köpürtme süresinde ise 1,5 MPa gerilmede çökme, %8 oranında deformasyonla 10 MPa gerilme uygulandıktan sonra yoğunlaşma başlamıştır. Bu durumda 7,5 dakikalık köpürtme süresinde çökme evresine kadar olan lineer deformasyon bölgesinin eğimi (elastisite modülü) 10 dakika köpürtme süresinde elde edilen elastisite modülünden daha büyüktür. Benzer durum 730°C köpürtme sıcaklığındaki köpük numunelerin basma dayanımları için de geçerlidir. 7,5 dakika köpürtme süresinde numune 5 MPa gerilmeden sonra çökmeye başlamış ve yaklaşık %5 oranında deformasyonla 7,5 MPa gerilmeden sonra da yoğunlaşmaya başlamıştır 10 dakika köpürtme süresinde ise 2 MPa gerilmeden sonra çökme ve %3,5 deformasyondan sonra 5 MPa gerilmeden itibaren yoğunlaşma başlamıştır.



Şekil 5.18: %10 Zn ilaveli köpük numunelere ait basma dayanımları

%15 Zn ilaveli köpük numunelerin 710 ve 730°C köpürtme sıcaklıklarında ve 7,5 ve 10 dakika köpürtme sürelerindeki basma dayanımı grafikleri Şekil 5.19 da verilmiştir. 710°C köpürtme sıcaklığında ve 7,5 dakika köpürtme süresinde 0,4 MPa gerilmeden itibaren çökme, %0,75 deformasyonla birlikte 1,45 MPa gerilmeden itibaren yoğunlaşma başlamıştır 10 dakika köpürtme süresinde ise 5 MPa gerilmeden itibaren çökme olayı, %4 deformasyonla birlikte 10 MPa dan sonra yoğunlaşma başlamıştır. 730°C köpürtme sıcaklığındaki 7,5 dakika köpürtme süresinde 4,8 MPa gerilmeden itibaren çökme, %0,6 deformasyon ile 5 MPa gerilmeden sonra yoğunlaşma başlangıcı söz konusudur. %10 Zn ilaveli köpük numunelerde tespit edilen elastisite modüllerinin aksine, %15 Zn ilaveli köpük numunelerdeki 710 ve 730°C de köpürtme sıcaklıklarında 10 dakika köpürtme süresindeki elastisite modülü, 7,5 dakika köpürtme süresindeki elastisite modülünden yüksek olduğu tahmin edilmektedir. Bu da, elastisite modülü yüksek olan 10 dakika köpürtme süresindeki %15 Zn ilaveli köpük numunenin dayanımının 7,5 dakikaki numunenin dayanımından yüksek olduğunun göstergesidir.



Şekil 5.19: %15 Zn ilaveli köpük numunelere ait basma dayanımı grafikleri

Kovacik ve Simancik, yapmış oldukları deneysel çalışmada Al esaslı köpük numuneler ile saf Al dan elde edilen köpük numunelerin basma dayanımlarını karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, saf Al köpük numunenin basma dayanımının (3 MPa), AlSi12 (7,5 MPa), AlMg1Si0,6 nın (5,1 MPa) basma dayanımlarından daha düşük olduğu belirlenmiştir. Sebebi ise Al içerisine ilave edilen Si ve Mg miktarının Al yoğunluğunu artırarak daha gevrek hale getirdiği için dayanımını artırmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmada da yoğunluğu Al yoğunluğunun yaklaşık üç katı olan Zn miktarının artmasıyla birlikte karışım yoğunluğunun artmasından dolayı basma dayanımının arttığı belirlenmiştir.

## 6. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle alüminyum esaslı çinko takviyeli metalik köpük üretim gerçekleştirilmiş ve çinko miktarı, köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresinin köpürtme üzerine etkileri incelenerek aşağıdaki sonuçlar belirlenmiştir.

1. Zn oranı arttıkça köpürebilirlik özellikleri azalmıştır. Artan Zn oranı köpük malzemenin viskozitesini artıracak için bu beklenen bir sonuçtur.
2. Köpürtme sıcaklığının artmasıyla ergiyik viskozitesi azaldığı için H<sub>2</sub> gazının çıkışı kolaylaşmış ve lineer genişleme oranı artmıştır, bununla birlikte yoğunluk değerleri azalmış, gözeneklilik oranı artmıştır.
3. Köpürtme süresinin artmasıyla köpük numunenin fırın içerisinde kalma süresine bağlı olarak daha fazla H<sub>2</sub> gazı absorbesinden dolayı gözeneklilik oranları artmış, bununla birlikte yoğunluk değerleri azalmış, lineer genişleme oranı ise artmıştır.
4. Minimum yoğunluk değeri 730°C köpürtme sıcaklığında ve 10 dakika köpürtme süresinde %10 Zn ilaveli köpük numunede elde edilmiştir.
5. Maksimum lineer genişleme oranı 710°C köpürtme sıcaklığında ve 10 dakika köpürtme süresinde %10 Zn ilaveli köpük numunede elde edilmiştir.
6. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresinin artmasıyla basma dayanımı azalmıştır. Bunun sebebi, artan köpürtme sıcaklığının gözenek boyutunu artırması ve gözenek duvarlarını inceltmesinden kaynaklanmıştır.
7. Artan Zn oranı basma dayanımını artırmıştır. Bunun sebebi, Zn'nun dayanımının Al' dan daha yüksek olduğundan köpük numunenin gözenek duvarlarındaki dayanımı artırmasıdır.



## KAYNAKLAR

- Alizadeh, M., Aliabadi, M. M., “Compressive properties and energy absorption behaviour of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite foam synthesized by space-holder technique”, *Materials and Design*, 35: 419-424 (2012)
- Azzi, W. E., “A systematic study on the mechanical and thermal properties of open cell metal foams for aerospace applications”, Yüksek Lisans Tezi, North Carolina State University, Raleigh North Carolina, 2-109 (2004)
- Amjad, S., “Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams”, Adissertation submitted for the degree of Master of Philosophy in Materials Modelling at the University of Cambridge, 3-7 (2001)
- Andrade, E. N., “Theory of viscosity of liquids”, *Phil. Mag.*, 17, 698-702 (1934)
- Asavavisitchai, S., Kennedy, A. R., “The effect of Mg addition on the stability of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foams made by a powder metallurgy route”, *Scripta Materialia*, 54: 1331-1334 (2006)
- Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., Wadley, H. N. G., “Metal Foams: A Design Guide”, Butterworth-Heinemann, Boston, USA, 1-233 (2000)
- Aquirre-Perales, L. Y., Jung, In-Ho, Drew, R. A. L., “Foaming behavior of powder metallurgical Al-Sn foams”, *Acta Materialia*, 60: 759-769 (2012)
- Banhart, J., “Metal foams: production and stability”, *Advanced Engineering Materials*, 8 (9): 781-794 (2006)
- Banhart, J., Seeliger, H. W., “Aluminium sandwich panels :manufacture, metallurgy and applications”, *Advanced Engineering Materials*, 10 (9):793-802 (2008)
- Banhart, J., “Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams”, *Progress in Materials Science*, 46: 559-632 (2001)
- Banhart, J., “Investigation of metal foam formation by microscopy and ultra small-angle neutron scattering”, *Acta Materialia*, 49: 3409-3420 (2001)
- Bram, M., Stiller, C., Buchremer, H. P., Störer, D., Dour, H., “High porosity titanium, stainless steel and super alloy parts”, *Advanced Engineering Materials*, 2: 196-199 (2000)

- Banhart, J., Baumeister J., Weber, M., “Powder metallurgical technology for the production of metallic foams”, *European Conference on Advanced PM Materials*, 201-208 (1995)
- Banhart, J., “Light-Metal Foams-History of Innovation and Technological Challenges”, *Advanced Engineering Materials*, 15 (3): 82-111 (2013)
- Banhart, J., “Metallic foams: challenges and opportunities”, *EuroFoam 2000*, 13-20 (2000)
- Babcsan, N., Banhart, J., Leitmeier, D., “Metal foams-manufacture and physics of foaming”, *International Conference Advanced Metallic Materials*, Slovakia, 5-15 (2003)
- Banhart, J., “Aluminium foams for lighter vehicles”, *International Journal of Vehicle Design*, 1-19 (2003)
- Banhart, J., Baumeister, J., “Deformation characteristics of metal foams”, *Journal of Materials Science*, Germany, 33: 1431-1440 (1998)
- Banhart, J., “Manufacturing routes for metallic foams”, *Journal of Materials*, 52: 22-27 (2000)
- Baumgartner, F., Duarte, I., Banhart, J., “Industrialization of powder compact foaming process”, *Advanced Engineering Materials*, 168-174 (2000)
- Banhart, J., “Metal foams-from fundamental research to applications”, *Frontiers In The Design of Materials*, 279-289 (2007)
- Banhart, J., Ashby, M. F., Fleck, N., “Metal foams and porous metal structures”, *Metal Innovation Technologie (MIT)*, p: 83-255(1999)
- Banhart, J., “Properties and applications of cast aluminium sponges”, *First International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures (MetFoam’99)*, Bremen, Germany, 159-162 (1999)
- Başpınar, S., Yurtçu, Ş., “Metalik köpük malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan matematiksel modeller”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8 (11): 69-78 (2011)
- Bazle, A.G., Travis, A. B., Bruce K. F., Chin-jye, Y., Dennis, C.T., Harald, H.E., John, W. G., “Aluminium foam integral armor: a new dimension in armor design” *Composite Structures*, 52: 381-395 (2001)

- Çinici, H., “Toz metalurjisi yöntemi ile alüminyum esaslı metalik köpük üretimi”, Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2004)
- Çinici, H., “Toz metalurjisi yöntemi ile al esaslı parçacık takviyeli sandviç metalik köpük üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2012)
- Davies, G.T., Zhen, S., “Metallic foams: their production, properties and applications”, *Journal of Materials Science*, 18: 1899-1911 (1983)
- Degischer, H. P., Kriszt, B., “Handbook of cellular metals: production, processing and applications”, *Wiley-WCH, Weinheim*, 1-363 (2002)
- Deqing, W., Ziyuan, S., “Effect of ceramic particles on cell size and wall thickness of aluminium foam”, *Materials Science and Engineering A*, 361: 45-49 (2003)
- Esmaeelzadeh, S., Simchi, A., “Foamability and compressive properties of AlSi7-3 vol.%SiC-0,5 wt.%TiH<sub>2</sub> powder compact”, *Materials Letter*, 112-116 (2007)
- Garcia, M. F., Banhart, J., “Foaming of blowing agent-free aluminium powder compact”, *Colloids and Surfaces*, 309: 264-269 (2007)
- Gergely, V., Clyne, B., “The FORMGRIP process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors”, *Advanced Engineering Materials*, 2 (4): 175-178 (2000)
- Gergely, V., Curran, D. C., Clyne, B., “The FOAMCARP process: foaming of aluminium MMC’ s by the chalk-aluminium reaction in precursors”, *Composite Science and Technology*, 63: 2301-2310 (2003)
- Gergely, V., Degischer, H. P., Clyne, T. W., “Recycling of MMC s and production of metallic foams”, *Comprehensive Composite Materials*, 3: 797-820 (2000)
- German, R.M., “Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri”, *Türk Toz Metalurjisi Derneği*, Ankara, 299-324 (2007)
- Gökmen, U., “Toz metalurjisi yöntemi ile al esaslı parçacık takviyeli metalik köpük üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2009).
- Gökmen, U., Özçatalbaş, Y., Türker, M., “Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli metalik köpüğe köpürtme sıcaklığı ve köpürtücü miktarının etkisinin araştırılması”, *The Fifth International Powder Metallurgy Conference*, Ankara (2008)

- Groose, C., “Advance Construction Materials”, *Springer*, 700 (2007)
- Güven, Ş. Y., “Toz metalurjisi ve metalik köpükler”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, Isparta, 1 (2): 22-28 (2011)
- Harte, A. M., Fleck, N. A., Ashby, M. F., “Sandwich panel design using aluminium foam”, *Advanced Engineering Materials*, 2 (4): 175-178 (2000)
- Hirai, M., “Structural changes of jack bean unreaase induced by addition of surfactans studied with synchrotron radiation small-angle X-ray cattering”, *European Journal of Biochemistry*, 215: 55-61 (1993)
- Karakoç, H., Çinici H., Çıtak, R., “Sıcak presleme yöntemiyle Al esaslı metalik köpük üretimine presleme basıncının etkileri”, *Mesleki Bilimler Dergisi*, 1 (4): 14-19 (2012)
- Karakoç, H., “ Sıcak presleme yöntemiyle alüminyum esaslı köpük malzeme üretimi”, Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2009)
- Kitazono, K., Takiguchi, Y., “Strain rate sensitivity and energy absorption of Zn-22Al foams”, *Scripta Materialia*, 55: 501-504 (2006)
- Kovacik, J., Simancik, F., “Comparison of zinc and aluminium foam behavior”, *Institute of Materials and Machine Mechanics*, Slovakia (2004)
- Kovacik, J., Simancik, F., “Use of zinc foam for filling of hollow steel profiles”, *International Conference MetFoam*, Slovakia (2001)
- Lafrance, M., Isac, M., Jalilian, F., Waters, K. E., Drew, R. A. L., “There active stabilization of Al-Zn foams using a powder metallurgy approach”, *Materials Science and Engineering*, 528: 6497-6503 (2011)
- Liu, J., Yu, S., Zhu, X., Wei, M., Luo, Y., Liu, Y., “The compressive properties of closed-cell Zn-22Al foams”, *Materials Letters*, 62: 683-685 (2008)
- Miyoshi, T., Hoh, M., Akiyama, S., Kitahara, A., “ALPORAS Aluminium foams: production process, properties and applications”, *Advanced Engineering Materials*, 2 (4): 179-183 (2000)
- Ozan, S., Kati, N., “Metalik köpükler”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS)*, Elazığ (2011)
- Ozan, S., Taksin, M., Kolukisa, S., Özerdem, M. S., “Application of ANN in the prediction of the pore concentration of aluminium metal foams manufactured by

- powder metallurgy methods”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39: 251-256 (2008)
- Papadopoulos, D. P., Konstantinidis, I. C., Papanastasiou, N., Skolionos, S., Lefakis, H., Tsipas, D. N., “Mechanical properties of Al metal foams”, *Materials Letters*, 58: 2574-2578 (2004)
  - Pawlicki, J., Koza, E., Zurawski, P., Leonowicz, M., “Mechanical properties of closed cell, Al foams based on tetrakaidecahedral model of structure”, *International Conference Advanced Metallic Materials*, Smolenice, Slovakia, 235-238 (2003)
  - Pinnoji, P. K., Mahajan, P., Bourdet, N., Deck, C., Willinger, R., “Impact dynamics of metal foam shells for motor cycle helmets: experiments and numerical modelling”, *International Journal of Impact Engineering*, 37: 274-284 (2010)
  - Prakash, G. O., Sang, H., Embury, J. D., “Structure and properties of Al-Si foams”, *Materials Science and Engineering A* 1999: 195-203 (1995)
  - Polat, D., Keleş, Ö., Taptık, Y., “Metalik köpükler, alüminyum köpük ve üretim yöntemleri”, *Metal Dünyası*, İstanbul (2010)
  - Queheillat, D. T., Katsumura, Y., Wadley, H. N. G., “Synthesis of stochastic open-cell Ni-based foams”, *Scripta Materialia*, 50: 313-317 (2004)
  - Rack, A., Haibel, A., Matijasevic, B., Banhart, J., “Synchrotron tomography on zinc and aluminium foams”, *MetFoam2003 Conference Book*, Berlin, 295-300 (2003)
  - Rack, A., Haibel, A., Bütow, A., Matijasevic, B., Banhart, J., “Characterization of metal foams with synchrotron-tomography”, *Hahn-Meitner-Institut*, Berlin (2003)
  - Raj, R. E., Daniel, B. S. S., “Aluminium melt foam processing for light-weight structure”, *Materials and Manufacturing Processes*, 22 (4): 525-530 (2007)
  - Saadatfar, M., Mukherjee, M., Madadi, M., Schröder, G. E., Garcia-Merono, F., Shaller, F. M., Hutzler, S., Sheppard, A. P., Banhart, J., Ramamurty, U., “Structure and deformation correlation of closed-cell aluminium foam subject to uniaxial compression”, *Acta Materialia*, 60: 3604-3615 (2012)
  - Schaeffler, P., Rajner, W., Claar, D., Trendelenburg, T., Nishimura, H., “production, properties and applications of Alulight closed cell aluminium foams”, *The Fifth International Workshop on Advanced Manufacturing Technologies*, London, 1-6 (2005)

- Schwingel, D., Seeliger, H. W., Vecchionacci, C., Alwes, D., Dittrich, J., “Aluminium foam sandwich structures for space applications”, **Acta Astronautica**, 61: 326-330, (2007)
- Shapovalov, V., “Porous and cellular materials for structural applications”, **Phys. Metals Metallogr.**, 76: 335-337 (1993)
- Simancik, F., “Metallic foams: ultra light materials for structural applications”, **Inzynrema Materiatawa**, 5: 823-828 (2001)
- Srivastava, V. C., Sahoo, K. L., “Metallic foams: current status and future prospects”, **IIM Metal News**, 9: 9-13 (2006)
- Stöbener, K., Baumeister, J., Lehnhus, D., Stanzick, H., Zöllmer, V., “Composites based on metallic foams: phenomenology, production, properties and principles”, **International Conference Advanced Metallic Materials, Smolenice, Slovakia**, 281-286 (2003).
- Türker, M., Uzun, A., Gökmen, U., “Toz Metalurjisi yöntemiyle üretilen alüminyum esaslı metalik köpükte Si ilavesinin köpürtmeye etkisi”, **International Advanced Technologies Symposium (IATS)**, Karabük (2009)
- Türker, M., “Metalik köpüklerin kullanım alanları”, **Metal Dünyası**, 206: 122-130 (2010)
- Türker, M., Çinici, H., “AlSi7Mg0,6 esaslı sandviç metalik köpüğün köpürtme özelliklerinin incelenmesi” (2010)
- Uzun, A., “TM yöntemiyle alüminyum esaslı küresel şekilli metalik köpük üretimi ve üretim parametrelerinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü** (2009)
- Wadley, H. N. G., “Cellular metals manufacturing”, **Advanced Engineering Materials**, 4 (10): 726-733 (2002)
- Wood, J. T., “Production and applications of continuously cast, foamed aluminium”, **Fraunhofer USA Metal Foam Symposium**, Delaware, 31-35 (1997)
- Yang, D. H., Hur, B. Y., He, D. P., Yang, S. R., “Effect of decomposition properties of titanium hydride on the foaming process and pore structures of all alloy melt foam”, **Materials Science and Engineering**, 415-426 (2007)

- Yang, C. C., Nakae, H., “Foaming characteristics control during production of aluminum alloy foam”, *Journal of Alloys and Compounds*, 313: 188-191 (2000)
- Yu, C. F., Eifert, H. H., Banhart, J., Baumeister, J., “Advanced materials and processes”, 11: 45-47 (1988)
- Zhao, C. Y., “Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55: 3618-3632 (2012)



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :CEYLANOĞLU, Özge  
 Uyuğu :T.C.  
 Doğumtarhiveyeri :26.01.1988, Ankara  
 Medenihali :Bekâr  
 Telefon :0(505)608 97 38  
 e-mail :ocyn.2601@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Metal Eğitimi	Devam ediyor
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi/ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2011
Lise	Keçiören Lisesi	2006

### YabancıDil

İngilizce

### Yayımlar

Türker, M., Çinici, H., Ceylanoğlu, Ö., “Al-Zn Esaslı Metalik Köpüklerin Üretiminde Zn Oranının Köpürebilirliğe Etkisi”, 7. *Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı*, Ankara, 2014



*GAZİ GELECEKTİR..*