

**TM YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM ESASLI KÜRESEL ŞEKLİ
METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN
İNCELENMESİ**

Arif UZUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2009
ANKARA**

Arif UZUN tarafından hazırlanan TM YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM ESASLI KÜRESEL ŞEKİLLİ METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

.....

Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İbrahim USLAN

Makine Mühendisliği A.D. Gazi Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

Metal Eğitimi A.D. Gazi Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

Metal Eğitimi A.D. Gazi Üniversitesi

.....

Tarih: 03/06/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Arif UZUN

**TM YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM ESASLI KÜRESEL ŞEKLİ
METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN
İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Arif UZUN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2009**

ÖZET

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile alüminyum esaslı küresel şekilli metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim parametrelerinden köpürtme sıcaklığı, köpürtme süresi, köpürtücü madde miktarı ve deformasyon miktarının küresel şekilli metalik köpük üretimi üzerine etkileri belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada Alümix 231 tozlarına köpürtücü madde miktarının köpürmeye etkisini incelemek amacıyla %0,5-0,75-1 ve 1,5 oranlarında TiH_2 ilave edilerek 30 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra karışım tozlar kalıp içerisinde tek yönlü preste 600 MPa basınç uygulanarak preslenmiş ve belirli ölçülerde numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numuneler 550°C sıcaklıkta ısıtılıp 180 dakika süreyle bekletilmiştir. Fırın içerisinden alınan numuneler deformasyonun köpürmeye etkisini incelemek amacıyla %10-30-50 ve 70 oranlarda deforme edilip, belirli boyutlarda kare şeklinde kesilerek köpürmeye hazır numuneler elde edilmiştir. Daha sonra kesilmiş numuneler fırın içerisine ayrı ayrı yerleştirilip 650°C, 670°C, 690°C ve 710°C’da 2 ile 5 dakika arasında 30 saniye aralıklarla bekletilerek köpürtme işlemine tabii tutulmuştur. Bu işlem sırasında herhangi bir kalıp kullanılmadan serbest köpürtme yapılmıştır. Elde edilen Al köpük numunelerde, üretim parametrelerinin lineer genişlemeye, yoğunluğa ve gözenek yapısına etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar

sonucunda deformasyon miktarındaki artış (%70) ile beraber gözenek sayısının azaldığı, gözenek boyutunun, lineer genişleme oranının ve boşluk miktarının ise arttığı tespit edilmiştir. Köpürtme sıcaklığının, köpürtme süresinin ve köpürtücü madde miktarının aynı anda artırılması numunelerde homojen olmayan gözenek yapısı oluşumuna, yer yer çöküntülere, boşluk ve lineer genişleme oranlarının azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla bu parametrelerin ara değerlerde seçilmesi (690°C, %1 TiH₂, 3-3,5 dak) köpürebilirliğe olumlu yönde etki etmektedir.

Bilim Kodu : 710.1.092
Anahtar Kelimeler : Toz metalurjisi, küresel Al köpük, lineer genişleme
Sayfa Adedi : 105
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

**PRODUCTION OF ALUMINUM BASED SPHERICAL FOAMS BY
POWDER METALLURG ROUTE AND INVESTIGATION OF THEIR
PRODUCTION PARAMETERS**

(M.Sc. Thesis)

Arif UZUN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2009

ABSTRACT

In this study, aluminum based spherical shape foams were produced by using powder metallurgy techniques. Effect of production parameters such as; foaming temperature, foaming time, amount of foaming agent and deformation rate on the production of foam were determined. In experimental study, various amount of powdered foaming agent (0.5, 0.75, 1, and 1.5% TiH₂) were added to Alumix 231 powder and mixed for 30 minutes. Mixed powders were compacted at 600 MPa pressure by using a uniaxial action press to produce powder blanks. Blanks were then preheated to 550 °C in a furnace for 180 min and then deformed by 10, 30, 50 and 70% and then cut into square shape to produce spherical foams. Samples were foamed without any mold at 650°C, 670°C, 690°C and 710°C between 2 to 5 minutes with the interval of 30 seconds. Effect of production parameters on the pore size, shape, linear expansion and density of spherical shape aluminum foam were investigated. It was found that pore size, linear expansion rate and the amount of porosity increased with increasing the deformation rate (70%) however, it reduced the pore number. Increasing the foaming temperature, foaming time and the amount of foaming agent together, resulted in inhomogeneous pore structure together with collapsing of foam structure. This also reduced the amount of porosity and linear expansion rate of

the foams. Choosing a suitable parameters (such as 690 °C foaming temperature, 1% TiH₂ foaming agent and 3-3.5 min foaming duration) resulted in a positive effect on foamability

Science Code : 710.1.092

Key Words : Powder metallurgy, spherical Al foam, linear expansion

Page Number: 105

Adviser : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER
TEEKKR

Tez konusunun belirlenmesinde, araştırma ve deneysel çalışma aşamasında yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Mehmet TÜRKER' e teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım. Ayrıca bu çalışmaya Bilimsel Araştırma Projesi (No: 106M513) kapsamında destek sağlayan TÜBİTAK'a, yine kıymetli tecrübelerinden yararlandığım değerli hocalarım Doç. Dr. Yusuf ZÇATALBA'a, Yard. Doç. Dr. Hasan OKUYUCU'ya, Ar. Gör. Hanifi ÇİNİCİ'ye, laboratuvar çalışmalarında desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Uğur GÖKMEN'e ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan eşim Sülün Erta UZUN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xix
1. GİRİŞ	1
2. METALİK KÖPÜKLER	3
2.1. Üretim Yöntemleri	7
2.1.1. Gaz enjeksiyon yöntemi	7
2.1.2. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi	10
2.1.3. Toz metalurjisi (TM) yöntemi	13
2.1.4. FORMGRIP yöntemi	18
3. METALİK KÜRESEL ŞEKİLLİ YAPILAR	21
3.1. Üretim Yöntemleri	21
3.1.1. Georgia tekniği	21
3.1.2. Polisitren kaplama işlemi	22
3.1.3. İleri gözenek morfolojisi (APM) tekniği	24

Sayfa

4. METAL KÖPÜKLERİN UYGULAMA ALANLARI.....	30
4.1.Köpük Metallerin Yapısal Uygulamaları	31
4.1.1.Otomotiv endüstrisi	31
4.1.2. Hava ve uzay endüstrisi.....	36
4.1.3. Makine gövde imalatı	36
4.1.4. Diğer uygulama alanları	37
4.2. Köpük Metallerin Fonksiyonel Uygulamaları.....	37
4.2.1. Susturucular.....	37
4.2.2. Filtreler	38
4.2.3. Diğer uygulama alanları	38
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39
5.1. Malzemeler	39
5.2. Numune Hazırlama ve Köpürtme İşlemi.....	39
5.3. Karakterizasyon.....	41
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	43
6.1. Deformasyon Miktarının Lineer Genişlemeye Etkisi	43
6.2. Deformasyon Miktarının Gözenek Yapısına ve Boşluk Miktarına Etkisi	45
6.3. Deformasyon Miktarının Yoğunluğa Etkisi	47
6.4. Sıcaklığın ve Köpürtücü Madde Miktarının Lineer Genişlemeye Etkisi	49
6.5. Sıcaklığın ve Köpürtücü Madde Miktarının Gözenek Yapısı ile Boşluk Miktarına Etkisi	53
6.6. Sıcaklığın ve Köpürtücü Madde Miktarının Yoğunluğa Etkisi	60

6.7. Köpürtme Süresinin Lineer Genişlemeye Etkisi	62
	Sayfa
6.8. Köpürme Süresinin Gözenek Yapısına ve Boşluk Miktarına Etkisi	66
6.9. Köpürme Süresinin Yoğunluğa Etkisi.....	68
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR	75
EKLER.....	80
EK – 1 Deney sonucu elde edilen lineer genişleme – zaman grafikleri.....	81
EK – 2 Deney sonucu elde edilen yoğunluk – zaman grafikleri.....	89
EK – 3 Deney sonucu elde edilen boşluk miktarı – zaman grafikleri.....	97
ÖZGEÇMİŞ	105

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Toz metalurjisi yönteminin özellikleri.....	18
Çizelge 6.1. Küresel şekilli alüminyum köpük üretiminde kullanılan değişken üretim parametreleri	43

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Cymat firması tarafından kullanılmış gaz enjeksiyon yöntemi	8
Şekil 2.2. Gaz enjeksiyonu ile ergiyik metalin doğrudan köpürtülmesi yönteminde parçacık boyutunun ve hacimsel oranının seçimi	9
Şekil 2.3. Köpürtücü madde ilavesi ile ergiyik metalin doğrudan köpürtülmesi.....	10
Şekil 2.4. Temas açısı = (θ). Temas açısı $\theta < 90^\circ$ olduğunda sıvının katıyı ıslattığı söylenebilir, eğer temas açısı $\theta > 90^\circ$ ise ıslatma olmamaktadır, x ise batma derinliğini gösterir	11
Şekil 2.5. Viskozite ve karıştırma zamanı arasındaki ilişki	12
Şekil 2.6. Toz metalurjisi yönteminin üretim aşamaları (Fraunhofer ve Alulight)...	14
Şekil 2.7. 750°C sıcaklıkta köpürtme işlemine tabi tutulan Al/TiH ₂ karışımının lineer genişleme davranışı.....	15
Şekil 2.8. Köpük enjeksiyon işlemi	17
Şekil 2.9. FORMGRIP yöntemi	19
Şekil 3.1. Georgia tekniği	22
Şekil 3.2. Polisitren kaplama işlemi	23
Şekil 3.3. APM köpük ile doldurulmuş profillerin basma yüklemeleri karşısında tipik davranışı.....	28
Şekil 4.1. Gözeneklilik oranına göre metalik köpüklerin fonksiyonel ve yapısal kullanım alanları	30
Şekil 4.2. Metalik köpüklerin otomobil endüstrisinde uygulama kategorileri.....	31
Şekil 6.1. %0,5 TiH ₂ içeren ve 650°C sıcaklıkta köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerin lineer genişleme grafiği	44
Şekil 6.2. Toz dövmede, yoğunlaşma ve taslağın yeniden şekillendirilmesi.....	45

Şekil	Sayfa
Şekil 6.3. Farklı oranlarda deforme edilmiş, içerisinde %1 TiH ₂ bulunan ve 670°C sıcaklıkta köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerdeki boşluk miktarının zamana göre değişim grafiği	46
Şekil 6.4. Farklı oranlarda deforme edilmiş, içerisinde %0,5 TiH ₂ bulunan numunelerin 650°C sıcaklıkta farklı sürelerde köpürtülmeleri sonucu elde edilen yoğunluk grafiği	48
Şekil 6.5. %70 oranda deforme edilmiş numunelerin süre gözetmeksizin sıcaklığa ve köpürtücü madde miktarına bağlı ortalama lineer genişleme grafiği....	49
Şekil 6.6. 650°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin maksimum oranda lineer genişleme sergilemeleri sonucu yapı içerisinde oluşan boşluk miktarının köpürtücü madde miktarına göre değişim grafiği	54
Şekil 6.7. 670°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin maksimum oranda lineer genişleme sergilemeleri sonucu yapı içerisinde oluşan boşluk miktarının köpürtücü madde miktarına göre değişim grafiği.....	56
Şekil 6.8. 690°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin maksimum oranda lineer genişleme sergilemeleri sonucu yapı içerisinde oluşan boşluk miktarının köpürtücü madde miktarına göre değişim grafiği.....	57
Şekil 6.9. 710°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin maksimum oranda lineer genişleme sergilemeleri sonucu yapı içerisinde oluşan boşluk miktarının köpürtücü madde miktarına göre değişim grafiği.....	59
Şekil 6.10. %70 oranda deforme edilmiş numunelerin süre gözetmeksizin sıcaklığa ve köpürtücü madde miktarına bağlı ortalama yoğunluk grafiği	60
Şekil 6.11. Farklı oranlarda deforme edilmiş ve içerisinde %1 TiH ₂ bulunan numunelerin 690°C sıcaklıkta köpürtülmeleri sonucu elde edilen lineer genişleme grafiği.....	63
Şekil 6.12. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan numunelerin 690°C sıcaklıkta farklı sürelerde köpürtülmeleri sonucu elde lineer genişleme grafiği.....	64
Şekil 6.13. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde %1 TiH ₂ bulunan numunelerin değişik sıcaklıklarda ve farklı sürelerde köpürtülmeleri sonucu elde edilen köpük yapıların lineer genişleme grafiği.....	66
Şekil 6.14. Farklı oranlarda deforme edilmiş, içerisinde %1 TiH ₂ bulunan ve	

	690°C sıcaklıkta köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerdeki boşluk miktarının zamana göre değişim grafiği.....	68
Şekil		Sayfa
Şekil 6.15.	Farklı oranlarda deforme edilmiş ve içerisinde %1 TiH ₂ bulunan numunelerin 690°C sıcaklıkta köpürtülmeleri sonucu elde edilen yoğunluk grafiği.....	70
Şekil 6.16.	%70 oranda deforme edilmiş, içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 690°C sıcaklıkta farklı sürelerde köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin yoğunluk grafiği.....	71
Şekil 6.17.	%70 oranda deforme edilmiş, içerisinde %1 TiH ₂ bulunan, değişik sıcaklıklarda ve farklı sürelerde köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin yoğunluk grafiği.....	72

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Alüminyum köpüğün tomografik görüntüsü	3
Resim 2.2. Farklı gözenek morfolojisine sahip metal köpükler a) Kapalı gözenekli metal köpük ve tetragonal gözenek modeli, b) Açık gözenekli köpüğün SEM görüntüsü ve tetragonal gözenek modeli.....	5
Resim 2.3. Farklı hücrel metaller a) Alüminyum köpük (50 mm), b) Bakır lotus yapı (8mm), c) İnfiltrasyon yöntemi ile üretilmiş döküm Al. sünger (3mm) d) Polimer bir kaplama ile üretilmiş açık gözenekli nikel yapı (2 mm), e) Sinterlenmiş bronz tozları (0,8 mm) f) Toz metalurjisi yöntemi üretilmiş hücrel bir malzeme (1,8 mm).....	6
Resim 2.4. Gaz enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş Cymat köpüğün makro yapıları a) Homojen olmayan gözenek yapısı (yaklaşık yoğunluk 0,3 g/cm ³), b) Köpük yüzey (yaklaşık yoğunluk 0,05 g/cm ³)	9
Resim 2.5. <i>Alporas</i> yöntemiyle üretilmiş köpüğün gözenek yapısı.....	13
Resim 2.6. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş köpük parçalar a) Mekanik testler için üretilmiş alüminyum köpük bloklar, b) Elektrikli bir trenin korna çalma aparatı	16
Resim 2.7. Karman ve Fraunhofer tarafından haddelenerek üretilmiş 10 mm kalınlığında alüminyum sandviç köpük	17
Resim 2.8. FORMGRIP yöntemi ile üretilmiş Al-9Si alaşımlı köpükte SiC parçacıklarının hücre duvarındaki dağılımı a) Hücre duvarı, b) Plateu sınırı	19
Resim 2.9. Farklı koşullar altında <i>FORMGRIP</i> yöntemi ile üretilmiş numunelerin gözenek yapıları P = gözeneklilik oranı, d = gözenek ebadı, a) P = %69, d = 1,1 mm, b) P= %78, d = 1,9 mm, c) P = %88, d = 3,1 mm	20
Resim 3.1. Polisitren kaplama ile üretilmiş küresel şekilli yapılar	23
Resim 3.2. Yapıştırılmış metalik küresel şekilli yapılar a) Yapıştırıcı içine gömülmüş MHSS, b) Dış yüzeyleri yapıştırıcı ile birleştirilmiş MHSS.....	24

Resim 3.3. Farklı boyutlardaki küresel alüminyum köpüklerin kesitleri.....	25
--	----

Resim

Sayfa

Resim 3.4. Poliamid 12 (PA) ve Araldite AT 1–1 (EP) ile yapıştırılmış küresel şekilli alüminyum köpükler a) PA yapıştırıcı, b) EP yapıştırıcı	26
---	----

Resim 3.5. Alüminyum köpük küreler ve örnek uygulamaları a) Yaklaşık 10 mm çapında alüminyum köpük küreler, b) Köpük kürelerle doldurulmuş yapı, c) Alüminyum köpük-polimer hibritten yapılmış araçlarda kullanılan güç aktarma ünitesi	27
---	----

Resim 3.6. İçi boş ekstrüze edilmiş alüminyum profil ile APM köpük parçalarla doldurulmuş profillerin basma yüklemeleri karşısında deforme olmuş kesitleri.....	29
---	----

Resim 3.7. APM köpük parçalardan üretilmiş sandviç yapı.....	29
--	----

Resim 4.1. %58 oranda deforme edilmiş, içerisi alüminyum köpük ile doldurulmuş ve boş olan paslanmaz çelik profillerin kesitleri.....	32
---	----

Resim 4.2. Metal köpüklerin otomobil şaselerinde kullanıldığı yerlerden bazıları ...	33
--	----

Resim 4.3. LKR ve BMW tarafından geliştirilmiş motor blok örneği, soldan sağa; bos döküm, alüminyum köpük çekirdek içeren yekpare parça, kesit görüntü	33
--	----

Resim 4.4. Karman tarafından üretilmiş alüminyum köpük sandviç (AFS).....	34
---	----

Resim 4.5 Alüminyum sandviç panelden yapılmış bir kaldırma kolu	35
---	----

Resim 4.6. Patlamalara karşı integral zırh malzemesi olarak performansı değerlendirilmiş alüminyum köpüğün kesiti.....	35
--	----

Resim 4.7. Ariane 65 isimli roketle kullanılan alüminyum köpükten yapılmış koni biçimli adaptör	36
---	----

Resim 4.8. Çelik-alüminyum sandviç köpükten imal edilmiş freze makinesinin enine giriş resmi	37
--	----

Resim 4.9. Alüminyum köpükten yapılmış susturucular	38
---	----

Resim 4.10. Farklı gözenek boyutuna sahip alüminyum sünger	38
--	----

Resim 5.1. Turbula T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcı.....	39
--	----

Resim 5.2. Protherm PLF 120/12 tipindeki fırın.....	40
---	----

Resim	Sayfa
Resim 5.3. Sırasıyla %10, %30, %50 ve %70 oranlarda deforme edilmiş köpürmeye hazır numuneler.....	40
Resim 5.4. Küresel şekilli köpüğün üretimi esnasında sahip olduğu geometrik yapının aşamaları (IFAM).....	41
Resim 6.1. 690°C sıcaklıkta 3,5 dakika köpürtme işlemine tabii tutulmuş numuneler a) %10 def., b) %30 def., c) %50 def., d) %70 def.....	45
Resim 6.2. İçerisinde %1 TiH ₂ bulunan ve 670°C’da 4 dakika köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerin gözenek yapıları a) %10 def., b) %30 def., c) %50 def., d) %70 def.....	47
Resim 6.3. İçerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 650°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numuneler.....	50
Resim 6.4. Köpürtme işlemi sırasında yapıda meydana gelen yırtılma	51
Resim 6.5. İçerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan, 670°C ve 690°C sıcaklıklarda köpürtme işlemine tabii tutulmuş numuneler	52
Resim 6.6. İçerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 710°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numuneler.....	52
Resim 6.7. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 650°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin gözenek yapıları	54
Resim 6.8. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 670°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin gözenek yapıları	55
Resim 6.9. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 690°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin gözenek yapıları	57
Resim 6.10. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 710°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin gözenek yapıları	58
Resim 6.11. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde %1 TiH ₂ bulunan ve 690°C sıcaklıkta farklı sürelerde köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin gözenek yapıları	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklama

ρ^*	Köpük yoğunluğu, g/cm ³
m^*	Köpüğün havadaki ağırlığı, g
m_s	Köpüğün su içerisindeki ağırlığı, g
V^*	Köpüğün hacmini, cm ³
V	Köpürtme öncesi numunenin ilk hacmini, cm ³

Kısaltmalar

Açıklama

AFS	Alüminyum Sandviç Köpük
APM	İleri Gözenek Morfolojisi
IFAM	Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü
IMMM	Malzeme ve Makine Mekaniği Enstitüsü
MHSS	Metalik Küresel Şekilli Yapı
TM	Toz Metalurjisi

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişimine bağlı olarak hafif ve dayanımı yüksek olan malzemelere ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. İnsanoğlu bu özellikleri bir arada bulunduran malzemeleri elde edebilmek için çeşitli arayışlar içerisine girmiş ve tabiatı örnek almıştır. Hücresel malzemeler ise bu olgu içerisinde önemli bir yere sahiptir. Çünkü köpüklerin veya diğer yüksek gözenekliliğe sahip hücresel malzemelerin enerji sönümlene kapasitesi, yüksek rijitlik, düşük yoğunluk gibi fiziksel ve mekaniksel özelliklerin birleşimine sahip oldukları bilinmektedir [1, 2]. Dolayısıyla tabiat tarafından da hücresel malzemeler yapısal ve işlevsel amaçlarla sıklıkla kullanılmaktadır (bileği taşı, kemikler, mantar ve odun gibi doğal malzemeler) [1, 3]. Gözenekli malzemelerin yalıtım, paketlenme ve filtreleme gibi uygulamalar için çok uygun olduğu bilinmektedir. Ancak bu malzemelerin yapısal uygulamalarda etkili bir şekilde kullanılabileceğine inanılamıyordu. Bilim adamları yıllardır dökümle üretilen malzemelerde, toz metalurjisi (TM) ürünlerinde, kaynak dikişlerinde veya kaplamalarda meydana gelen gözenekleri minimize edebilmek için binlerce bilimsel araştırma yapmışlardır [4].

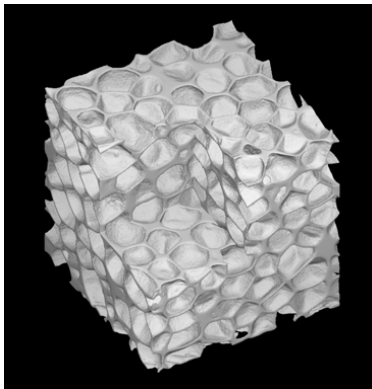
Seramikler, polimerler ve metalik köpükler insanoğlu tarafından yapay olarak üretilmiş gözenekli malzemelerdir. Geçmiş yıllarda sınırlı uygulama alanına sahip olan bu malzemeler, günümüzde özellikle polimer esaslı malzemelerden yapılmış köpükler teknolojinin hemen hemen bütün alanlarında kullanılmaktadır [3, 5]. Örneğin strafor veya poliüretan köpükler çok geniş alanda paketlenme, ses ve ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır [3]. Metalik köpükler ise yüksek dayanım, düşük ağırlık, titreşim azaltma, ses ve darbe sönümlene gibi özelliklerinden dolayı yapısal ve fonksiyonel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [6-8]. Alüminyum, metalik köpük üretiminde en yaygın kullanılan alaşım türüdür. Bu malzemeler kendilerine has fiziksel ve mekaniksel özellikleri bir arada bulundurmalarından dolayı diğer yoğun metallere kıyasla fonksiyonel uygulamalarda daha çok ilgi çekmektedir.

Geçmişten günümüze kadar metalik köpük üretiminde birçok yöntem geliştirilmiş ve bunların bir kısmı üretici firmalar tarafından patentleşmiştir. Ergiyik metal içerisine gaz enjektisi, ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ve toz metalurjisi (TM) endüstriyel boyutta en fazla kullanılan üretim yöntemleridir.

Bu çalışmada ise TM yöntemi ile hücresel metaller arasında yeni sayılabilen alüminyum esaslı, küresel şekilli metalik köpük üretimi gerçekleştirilerek, köpürtme sıcaklığı, köpürtme süresi, köpürtücü madde miktarı ve deformasyon oranı gibi üretim parametrelerinin etkileri incelenmiştir.

2. METALİK KÖPÜKLER

Metalik köpüklerin tarihi geçmişi 1940'lı yıllara dayanmaktadır. 1950'den 1970'li yıllara kadar çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmiş ve bu yöntemlerin bazıları patentleşmiştir. Ancak o yıllarda basılı patentler dışında fazla bilimsel yayın çıkartılmamıştır. Daha sonra 1980'li yıllarda bilimsel çalışmaların başlaması, eski üretim tekniklerinin tekrar gözden geçirilmesine ve çok sayıda bilimsel yayının çıkarılmasına neden olmuştur. Bugünlerde ise bazı üretim yöntemlerinin uygulandığı ve bunların bir kısmının ticarileştirildiği görülmektedir. Geçmişte metalik köpükler üzerine yapılan çalışmalarda, köpürtme işleminin mekanizması yeterince araştırılmamıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda bu durum birtakım sınırlamalara neden olmuştur [9]. Metalik köpükler mekaniksel, fiziksel ve akustik özellikleri son derece iyi olan ve üretim yöntemleri hızla geliştirilen [10] yeni bir malzeme grubudur [11, 12]. Dolayısıyla bu malzemelere karşı olan ilgide gün geçtikçe artmaktadır [11]. Günümüzde ergiyik içerisine gaz enjekte edilmesi (Cymat), ergiyik içerisine köpürtücü madde ilavesi (Alporas) ve toz metalurjisi (Alulight) yöntemleri başta olmak üzere birçok üretim yöntemi bulunmaktadır [13]. Resim 2.1'de metalik köpüğün tomografik görüntüsü gösterilmiştir.



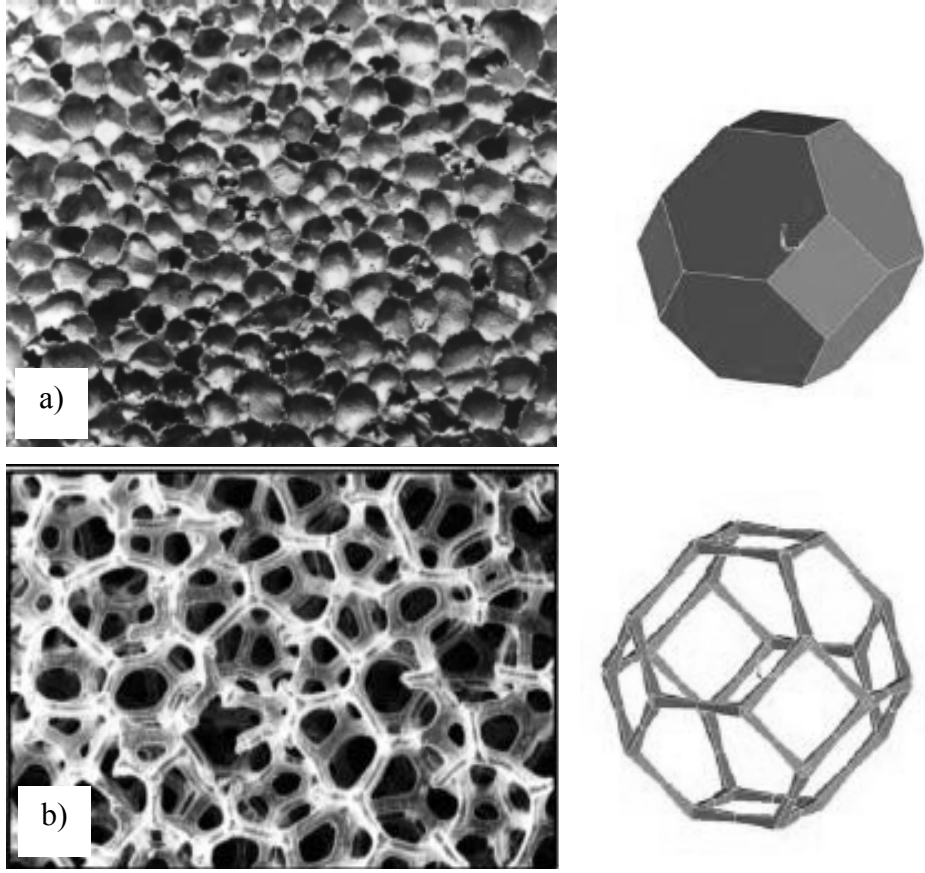
Resim 2.1. Alüminyum köpüğün tomografik görüntüsü [14]

Son yıllarda metalik köpük üretiminde çok farklı metal ve alaşımları kullanılmıştır. Örneğin Al, Al-Si [1], Pb [15], Ti, Fe ve süper alaşımlar [16], Ni [17]. Diğer taraftan üretilen bu malzemeler (sandviç paneller, enerji sönmleme cihazları, ses yalıtım

panelleri vb.) otomotiv, demir yolu taşımacılığı, gemi yapımı, ağırlıkça hafif konstrüksiyonlar, uçak ve uzay sanayi gibi farklı alanlarda potansiyel uygulamalar için kullanılmaktadır [10, 11]. Bu alanlarda özellikle alüminyum ayrı bir öneme sahiptir [18]. Son zamanlarda metalik köpükleri konu alan araştırma projelerinin büyük çoğunluğu alüminyum ve alaşımları üzerinedir. Bu malzemelerin üretimi dünyada yalnızca birkaç firma tarafından yapılmaktadır [19].

Metalik köpükler yapısal olarak sahip oldukları gözeneğin; şekline, boyutuna, yoğunluğuna, anizotropik özelliklerine, açıklık ve kapalılık özelliklerine göre karakterize edilirler. Bu bağlamda sahip oldukları gözeneğin yapısına bağlı olarak sınıflandırıldığında açık veya kapalı olmak üzere ikiye ayrılır [20]. Resim 2.2’de kapalı ve açık gözenekli köpük yapılar gösterilmektedir. Gözenekler birbirlerinden izole halde, bir başka deyişle her bir gözenek hücre duvarı ile birbirinden ayrılmış ise bu tip köpükler *kapalı hücreli köpükler* olarak adlandırılır. *Açık hücreli köpük* ise gözenekleri arasında bağlantı olan köpüklere denir.

Hücre malzemelerin özellikleri, köpüğü oluşturan ana metalin alaşımına, topolojisine (açık-kapalı gözenek, gözenek boyutu, gözenek duvar kalınlığı vb) ve göreceli yoğunluğuna bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu tür köpüklerin birbirlerine karşı üstün özellikleri söz konusudur. Örneğin kapalı gözenekli metalik köpükler açık gözenekli yapılara nazaran daha rijit, dayanıklı, darbe ve ses sönümleme kabiliyetleri daha yüksektir [17]. Bu köpükler araçlarda ve binalarda güvenlik duvarı malzemesi olarak yerini almıştır. Yangınları önlemek için yapılan uygulamalarda kapalı gözenekli malzemeler ısı yalıtımı sağladığı için açık gözenekli köpüklere oranla daha fazla kullanılmaktadır. Bunun nedeni kapalı gözenekli köpüklerde yapı içerisinde bulunan gazın gözenek içerisinde hapsedilmesidir. Böylelikle gaz yalıtıcı görev üstlenerek ısının diğer tarafa geçmesini engellemektedir. Ayrıca köpük metal üzerine gelen darbe veya sıkıştırma kuvvetleri, yapı içerisinde bulunan gazların sıkışmasıyla minimize hale getirilir. Açık gözenekli köpükler ise enerji sönümleme özellikleri iyi olmasına rağmen ısı değiştirici veya soğutucu olarak kullanılmaları yaygındır. Bu malzemelerin ısıl iletkenlik katsayıları oldukça yüksektir. Çünkü gözenekler arasındaki boşluklar ve yüzey alanı oldukça fazladır [21].



Resim 2.2. Farklı gözenek morfolojisine sahip metal köpükler [21, 22]

a) Kapalı gözenekli metal köpük ve tetragonal gözenek modeli, b) Açık gözenekli köpüğün SEM görüntüsü ve tetragonal gözenek modeli

Hücre malzemelere karşı ilgi her geçen gün artsa bile, metalik köpük terimi ile ilgili olarak bazı yanlış anlamalar mevcuttur. Metalik köpük terimi sıklıkla malzemeleri tanımlamada kullanılan bir ifade olup köpükleri tam anlamıyla ifade etmez. Metalik bir köpüğü tanımlamak için hücre malzemeleri, gözenekli metalleri, katı metalik köpükleri ve metal süngerleri ayırt etmek gerekir [23].

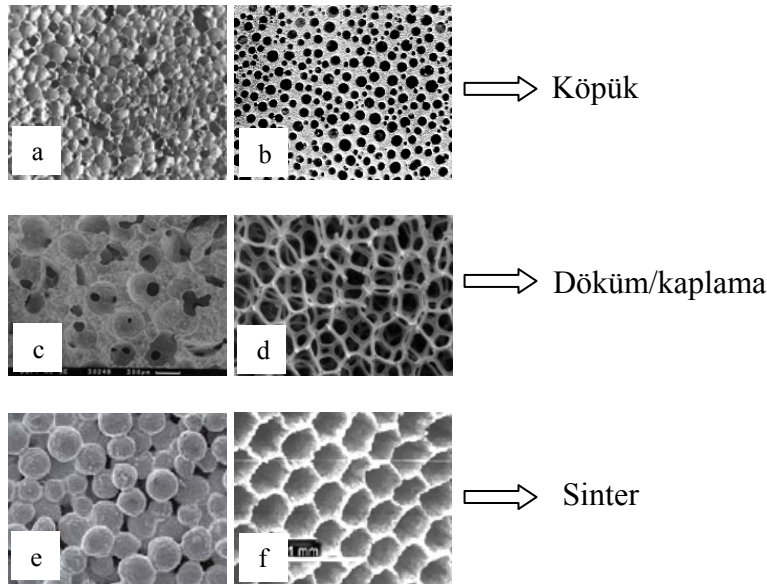
Hücre malzemeleri: İçerisinde birçok gaz boşluğu bulunan metalik bir yapıyı tanımlayan en genel ifadedir. Metalik faz, gaz fazı içeren kapalı hücrelerle bölünmüştür.

Gözenekli metalller: Belirli tip boşluklarla sınırlandırılmış, hücresele metallerin özel bir türüdür. Gözenekler genellikle küresel ve her biri bir birinden yalıtılmış şekildedir.

Katı metal köpükler: Sıvı metal köpüklerden esinlenerek oluşturulan hücresele metallerin özel bir türüdür. Bu yüzden sınırlı bir morfolojiye sahiptir. Gözenekler kapalı, küresel veya çok yüzeyli ve ince bir film tabakasıyla her biri birbirinden ayrılmış durumdadır.

Metal süngerler: Genellikle boşlukları bir biri ile bağlantılı olan hücresele bir metal biçimidir [23].

Resim 2.3’de çeşitli metal ve alaşımların çok sayıda morfolojik özellikleri gösterilmektedir. Bu malzemeler günümüzde metalik köpükler olarak önem kazanmıştır [24].



Resim 2.3. Farklı hücresele metalleri [24,25]

a) Alüminyum köpük (50 mm), b) Bakır lotus yapısı (8 mm), c) İnfiltrasyon yöntemi ile üretilmiş döküm Al. Sünger (3 mm) d) Polimer bir kaplama ile üretilmiş açık gözenekli nikel yapısı (2 mm) e) Sinterlenmiş bronz tozları (0,8 mm) f) Toz metalurjisi yöntemi üretilmiş hücresele malzeme (1,8 mm)

2.1. Üretim Yöntemleri

Bu bölümde daha çok kapalı gözenekli metalik köpüklerin üretim yöntemlerine değinilmiştir. Üretim yöntemleri arasında en fazla kullanılan teknikler; gaz enjeksiyon yöntemi, ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi, toz metalurjisi (TM) ve formgrip yöntemleridir.

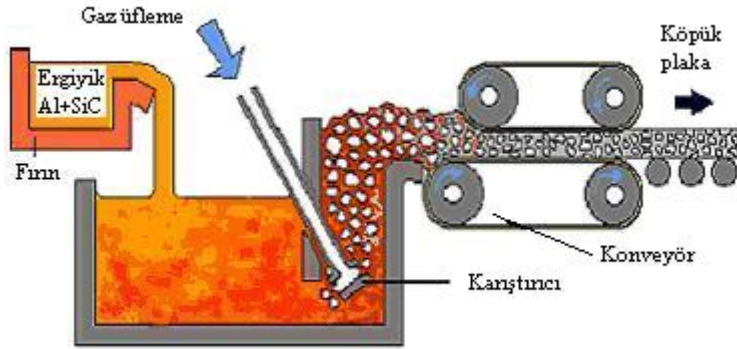
2.1.1. Gaz enjeksiyon yöntemi

Bu yöntem 1980-1990 yılları arasında Hydro Aluminium (Norveç) ve Alcan firmaları tarafından ilk defa alüminyum ve alaşımlarının köpürtülmesinde kullanılmıştır [4]. Şu anda ise Cymat Aluminium (Kanada) firması tarafından güncel olarak kullanılmaktadır [4, 8, 23-25].

Üretimin ilk aşamasında matrisi oluşturan malzeme bir pota içerisinde ergiyik hale getirilir. Daha sonra silisyum karbür, alüminyum oksit veya magnezyum oksit gibi seramik parçacıkları ergiyik metal içerisine ilave edilir. Böylece ergiyik metalin viskozitesi artırılmış olur [8, 9, 23-26]. Çünkü viskozitenin düşük olması durumunda sıvı içerisinde oluşan gaz baloncukları rahatlıkla hareket edebilmektedir. Bu durumda gözeneklerin birbirleriyle birleşmesi kaçınılmaz hale gelmektedir [26] Dolayısıyla ilk aşamada bu parçacıklar ergiyik metal içerisine ilave edilerek özel bir karıştırıcı ile karıştırılır. Karıştırmayla birlikte ergiyik metal içerisinde parçacık dağılımı ve gözenek oluşumu homojen hale getirilir.

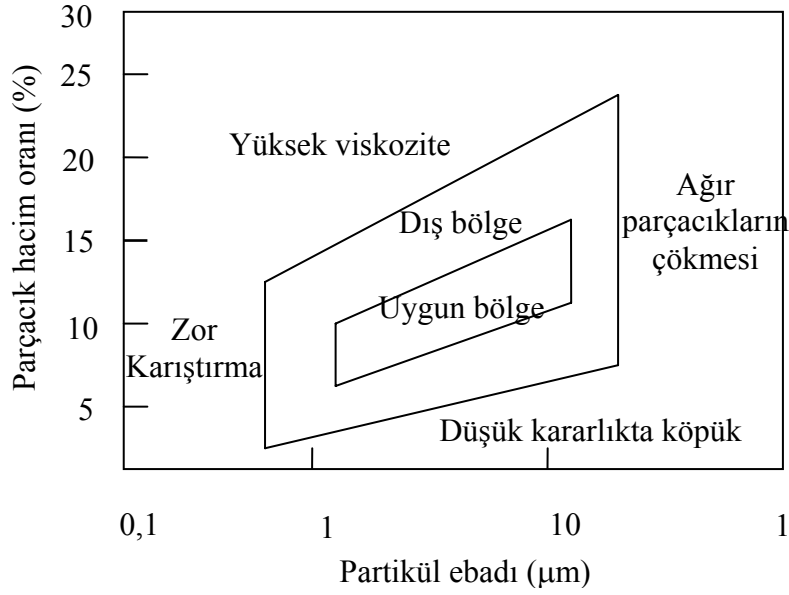
İkinci aşamada ergiyik metal içerisine, özel olarak tasarlanmış pervane veya titreşimli bir nozul yardımı ile gaz (hava, karbon, azot) enjekte edilir. Bu sayede yapı içerisinde homojen olarak dağılmış gaz baloncukları oluşturur. Daha sonra ergiyik ve gaz karışımından oluşan bileşke taşıyıcı bir bant yardımı ile yukarı doğru çekilir. Bu işlem esnada ergiyik metal soğutulurak katı metal köpüğü oluşturur [25]. Üretim aşamasında gaz baloncuklarının boyutu, gaz akış hızı, pervane tasarımı (nozul sayısı-boyutu) ve pervanenin dönüş hızıyla ayarlanabilmektedir [4]. Elde edilen numunelerin nispi yoğunluğu ise işlem parametreleri (pervane dönme hızı, gaz

debisi, parçacık miktarı ve soğutma koşulları) ile ayarlanmaktadır. Bu yöntemle üretilen köpüklerin ortalama yoğunlukları $0,069-0,54 \text{ g/cm}^3$, ortalama gözenek boyutu 3-25 mm, hücre duvarı kalınlığı ise 50-85 μm arasında değişiklik göstermektedir [23]. Üretimin şematik gösterimi Şekil 2.1’de verilmektedir.



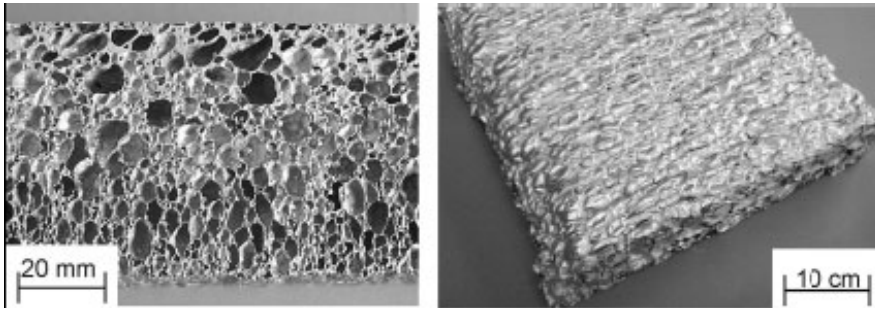
Şekil 2.1. Cymat firması tarafından kullanılmış gaz enjeksiyon yöntemi [4]

Üretimde kullanılan seramik parçacıkların hacimsel oranı %10 ile %20 arasında, parçacık boyutu ise 5-20 μm arasında değişmektedir [8, 9, 23-26] Bu oranlar dışında, köpürtme işlemi sırasında birtakım güçlüklerle karşılaşmaktadır. Örneğin parçacık boyutunun 1 μm ’den küçük olması karışımı zorlaştırırken, 20 μm ’den büyük olması durumunda ise parçacıkların ergiyik içerisinde çökmesi söz konusudur. Hacimsel olarak parçacık dağılımının %20’den fazla olması ergiyik metal içerisine gaz enjektesini zorlaştırırken, %10’dan az olması durumunda ise köpük yapının kararlılığı düşmektedir (Şekil 2.2) [26]. Seramik parçacıklar, hücre duvarlarında gaz boşluklarını çevreleyerek gözeneklerin birleşimine ve hızla büyümesine engel olur. Böylelikle gaz baloncuklarının büyüme esnasındaki kinetik enerjilerinin düşmesi ile mekanik yırtılmalar önlenir [4].



Şekil 2.2. Gaz enjeksiyonu ile ergiyik metalin doğrudan köpürtülmesi yönteminde parçacık boyutunun ve hacimsel oranının seçimi [26]

Cymat firması tarafından 1,5 m genişliğinde, 25-150 mm kalınlığında köpük parçalar bu yöntemle üretilmektedir (Resim 2.4). Fakat parçalarda üretim esnasında çekimsel drenaj etkisi görülmektedir. Büyük boyutlarda köpüklerin üretilmesi yöntemin en büyük avantajı olarak göze çarpmaktadır. Bunun dışında diğer üretim yöntemlerine oranla daha ekonomiktir [26, 27]. Seramik parçacıkların köpük yapıyı gevrek hale getirmesi ise en önemli dezavantajı olarak görülmektedir [26].

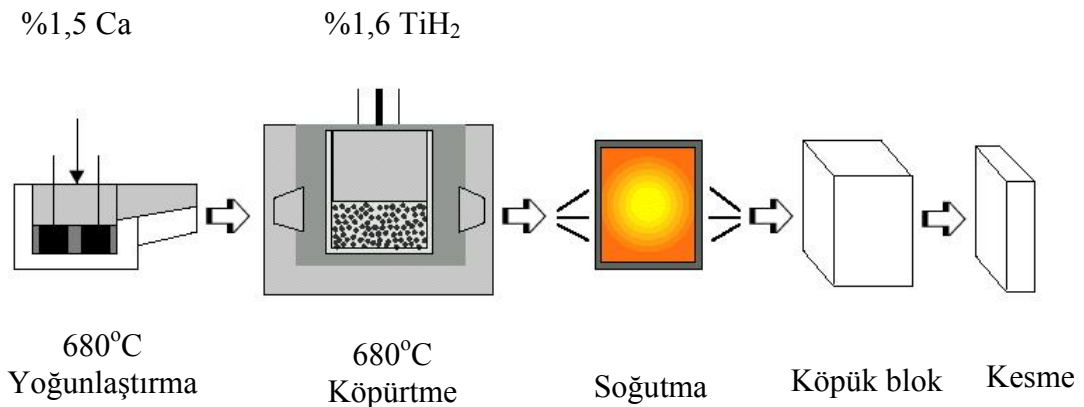


Resim 2.4. Gaz enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş Cymat köpüğün makro yapıları [4]
 a) Homojen olmayan gözenek yapısı (yaklaşık yoğunluk 0,3 g/cm³),
 b) Köpük yüzeyi (yaklaşık yoğunluk 0,05 g/cm³)

2.1.2. Ergiyik metal içerisinde köpürtücü madde ilavesi

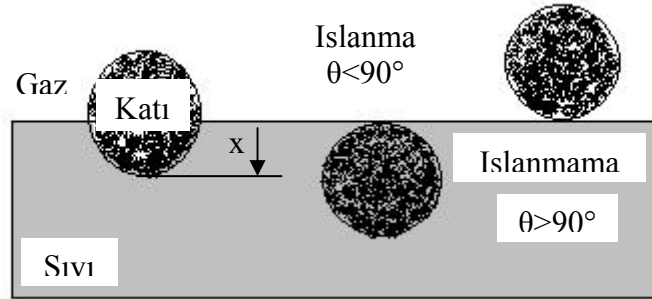
Bu yöntem, ergiyik metal içerisinde gaz enjektörü ile yapılan köpük üretimine alternatif bir yöntem olarak geliştirilmiştir [26, 28]. Üretimin ilk aşamasında alüminyum 680°C 'da ergiyik hale getirilir [21]. Daha sonra ergiyik içerisinde %1,5 kalsiyum ilave edilerek atmosfer ortamında birkaç dakika ($\sim 8-12$ dak.) karıştırılır. Bu esnada kalsiyum, alüminyum ve oksijen ile reaksiyona girerek kalsiyum oksit (CaO), kalsiyum-alüminyum oksit (CaAl_2O_4) ve Al_4Ca metaller arası bileşik oluşturularak sıvı metalin viskozitesi artırılır [1, 4, 8, 21, 23, 25].

Daha sonra viskozite istenilen kıvama getirildikten sonra %1.6 oranında TiH_2 parçacıkları ergiyik içerisinde ilave edilerek yaklaşık 15 dakika karıştırılır. Böylelikle ergimiş metal içerisinde köpürtücü madde uygun sıcaklıkta çözünerek hidrojen gazı açığa çıkarır. Köpürtme işlemiyle birlikte artan sıcaklık, hidrojen gazının yavaşça genişlemesini ve ergiyik metal içerisinde gözenekli yapının oluşmasını sağlamaktadır [1, 4, 8, 9, 21, 23, 25]. Daha sonra kalıp içerisindeki köpük yapı fanlarla soğutulur ve kalıptan çıkartılır ve gerekli boyutlarda kesilir [21] Şekil 2.3'de üretim yönteminin şematik gösterimi verilmiştir [23]. Bu yöntemde köpürtücü madde olarak TiH_2 yerine aynı zamanda ZrH_2 'de kullanılabilir. Bu durumda ZrH_2 oranı %0,5-0,6, köpürtme sıcaklığı ise $670-700^{\circ}\text{C}$ arasında değişiklik göstermektedir [26].

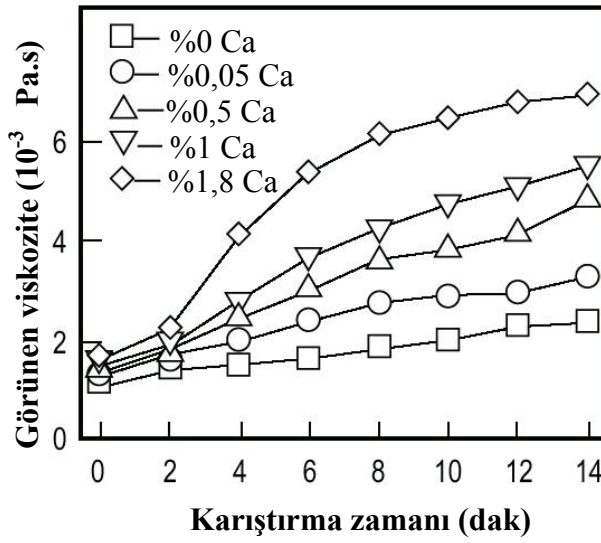


Şekil 2.3. Köpürtücü madde ilavesi ile ergiyik metalin doğrudan köpürtülmesi [23]

Üretimde homojen bir köpük yapı elde etmek için parametrelerin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekmektedir [1, 4, 8, 23, 25, 26]. Bunun için ergiyik metalin sıcaklığının sabit tutulması, viskozitenin ayarlanması ve TiH_2 parçacıklarının homojen olarak dağıtılması gerekmektedir [26]. Örneğin ergiyik metalin viskozitesi, ortalama hücre çapına ve köpük yoğunluğuna etki etmektedir [1, 4, 8, 23, 25]. Bundan dolayı ergiyik içerisine Ca ilavesi yapılmaktadır. Ayrıca viskoziteyi artırmak için Ca dışında oksijen, hava veya diğer gazlar alüminyum içerisine ilave edilerek, Al_2O_3 oluşumu sağlanmaktadır. Böylelikle hücre duvarlarında da ince bir oksit tabakası oluşturularak gözeneklerin kararlılığı artırılır [29] Ancak Al_2O_3 parçacıklarının ergiyik metal içerisinde yeterince ıslanmaması hücre duvarlarında kararsızlığa neden olmaktadır. Bunun için Mg gibi yüksek reaktif elementler ergiyik metal içerisine ilave edilerek Al_2O_3 parçacıklarının ıslanabilirliği ve köpük yapının kararlılığı artırılmaktadır [30]. Islanabilme genellikle katı ile sıvı yüzey arasındaki temas açısıyla karakterize edilir (Şekil 2.4) [27]. Şekil 2.5’de değişik oranlarda kalsiyum içeren ergiyik alüminyumun viskozitesi ve karıştırma süresinin etkisi gösterilmektedir [23].



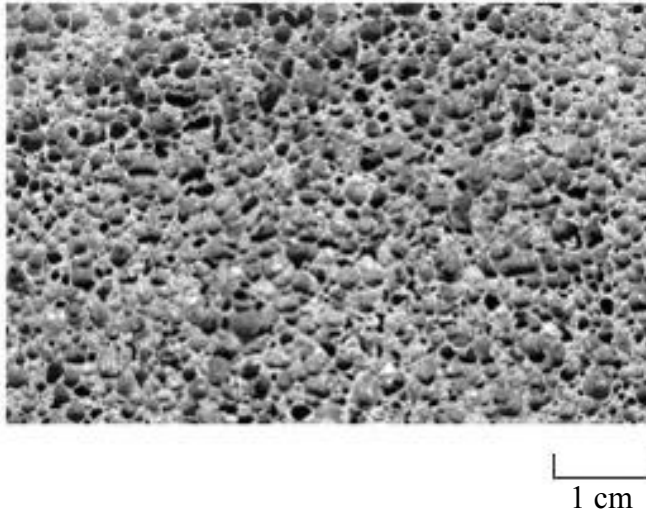
Şekil 2.4. Temas açısı = (θ). Temas açısı $\theta < 90^\circ$ olduğunda sıvının katıyı ıslattığı söylenebilir, eğer temas açısı $\theta > 90^\circ$ ise ıslatma olmamaktadır, x ise batma derinliğini gösterir [27]



Şekil 2.5. Viskozite ve karıştırma zamanı arasındaki ilişki [23]

Bazı durumlarda sıcaklık dönüşümündeki dengesizlik ve mekanik karışım, işlemin kontrollünü zorlaştırmaktadır [1, 4, 8, 23, 25]. Örneğin TiH_2 parçacıklarının ergiyik içerisinde çok hızlı bir şekilde çözünmesi, karışımı güçleştirebilmektedir. Bu durumdan kaçınmak için Al-Si, Al-Cu veya Al-Mg gibi ötektik bileşikler kullanılmaktadır [26].

Bu yöntemle bir defada 2050x650x450 mm boyutlarında alüminyum döküm bloklar üretilmektedir. Bu blokların ortalama yoğunlukları $0,18-0,24 \text{ g/cm}^3$, ortalama gözenek boyutları ise 2-10 mm arasında değişmektedir [1, 4, 8, 23, 25]. Ayrıca demir alaşımları da bu yöntemle köpürtülebilmektedir. Bu durumda köpüğün kararlılığı için tungsten tozları, köpürtücü madde olarak da $MgCO_3$, $SrCO_3$ kullanılmaktadır. Bu maddeler yaklaşık 1300°C 'da CO_2 gazı açığa çıkartarak gözenek oluşumunu sağlarlar [26]. Yöntemin ticari adı *Alporas* olarak bilinmektedir. Resim 2.5'de Alporas yöntemiyle üretilmiş köpüğün gözenek yapısı gösterilmektedir. Bu yöntem 1986 yılından beri Japon Sinko wire şirketi tarafından kullanılmaktadır. Günlük üretim hacmi 1000 kg'ın üzerindedir [1, 4, 8, 23, 25].



Resim 2.5. *Alporas* yöntemiyle üretilmiş köpüğün gözenek yapısı [23]

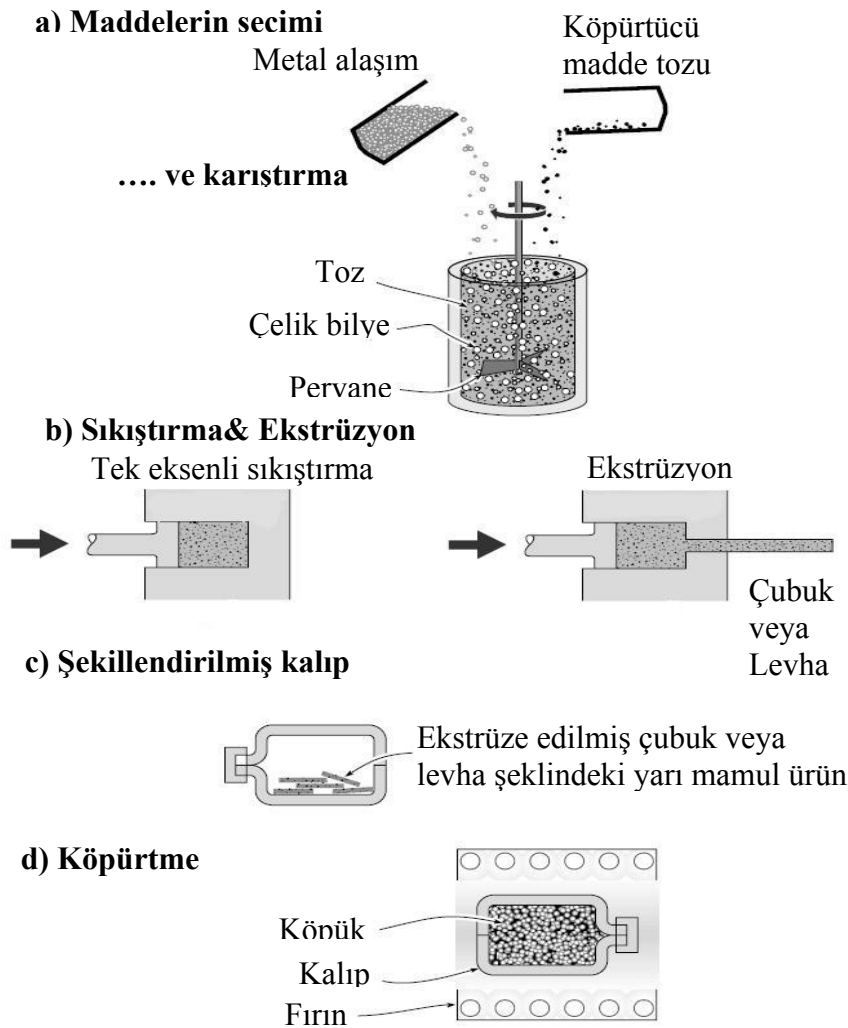
2.1.3. Toz metalurjisi (TM) yöntemi

Toz metalurjisi (TM), metalik köpük üretiminde en iyi bilinen yöntemlerden bir tanesidir [31]. Bu yöntem, Almanya’da Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü (IFAM) tarafından geliştirilmiştir. Ancak yöntemin geliştirilmesinde referans alınan teknik ilk defa 1963 yılında bulunmuştur [18].

Üretime ilk olarak metal tozları (alaşım tozları, takviye elemanları) ile köpürtücü madde tozlarının karıştırılması ile başlanır [1, 8, 23-25]. Daha sonra karışım tozlar, yarı mamul ürün elde etmek için sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi ekstrüzyon, presleme (tek yönlü, çift yönlü) veya haddeleme gibi farklı teknikler kullanılarak yapılabilir [4, 8, 24, 32] Bu işlemler sırasında çok dikkatli olunması gerekmektedir [1, 24]. Çünkü yapıdaki herhangi bir hata, daha sonra yapılacak olan işlemleri olumsuz yönde etkilemektedir [1, 8, 23-25]. Sürecin şematik görünümü Şekil 2.6’da verilmiştir [33].

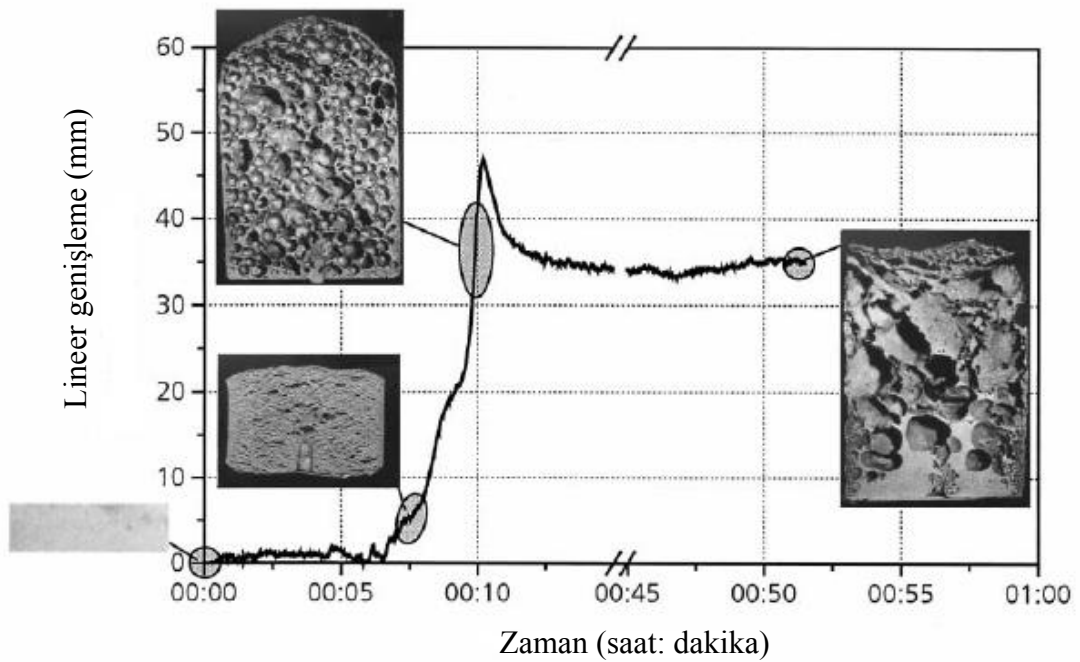
İkinci aşamada, yarı mamul ürün matris malzemesinin ergime derecesine yakın bir sıcaklıkta ısıtılır. Böylelikle metal matris içerisine homojen olarak dağılmış köpürtücü madde çözünmeye başlar. Çözünme işlemi sırasında açığa çıkan gaz, numunenin genişlemesine ve yapı içerisinde çok sayıda gözenegin oluşumuna neden

olur [1, 8, 23, 24]. Köpürtme işlemi sırasında numenin maksimum oranda genleşmesi birkaç dakika sürebilir [8, 24]. Bu süre köpürtme sıcaklığına, numune boyutuna ve sayısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Köpürtme işlemi sırasında çok dikkatli olunması gerekmektedir. Çünkü artan gözenekler ve diğer hatalar, kalitesiz ürün oluşumuna sebep olmaktadır. Matijasevic ve Banhart çok kirli tozların kullanımı veya yapı içerisinde bulunan nemin köpürmeye ters yönde etki ettiğini belirtmişlerdir. Bu kalıntılar köpürtücü maddenin ayrılarak gaz oluşturduğu ilk aşamadan itibaren büyük boşlukların çekirdeği gibi davranış sergiledikleri ve gözenek oluşumunu engelledikleri düşüncesindedirler [34].



Şekil 2.6. Toz metalurjisi yönteminin üretim aşamaları (Fraunhofer ve alulight) [33]

Şekil 27’de 750°C sıcaklıkta köpürtme işlemine tabi tutulan Al/TiH₂ karışımının lineer genişleme eğrisi gösterilmektedir [1]. Şekle bakıldığında köpükte hacimsel oranda genişlemenin zamana göre değişkenlik gösterdiği ve bu süreler içerisinde farklı morfolojik yapıların oluştuğu görülmektedir. Ayrıca homojen köpük yapının maksimum genişleme neticesinde elde edildiği ve bu noktadan sonra köpükte çöküntünün meydana geldiği görülmektedir.

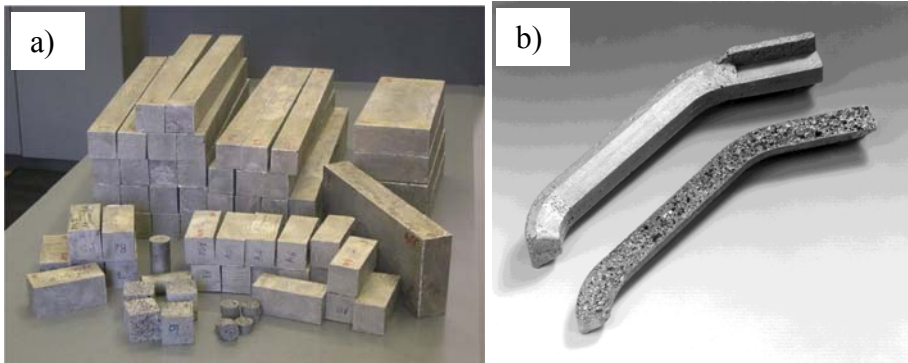


Şekil 2.7. 750°C sıcaklıkta köpürtme işlemine tabi tutulan Al/TiH₂ karışımının lineer genişleme davranışı [1] (Köpürme öncesi numune boyutu 9 mm, köpürme sonrası maksimum boy 32 mm)

TM yönteminde köpüğün yoğunlu ve maksimum genişleme oranı köpürtücü madde miktarı ve köpürtme sıcaklığı gibi üretim parametreleriyle kolaylıkla ayarlanabilir. Örneğin çinko ve alüminyum alaşımlarında köpürtücü madde olarak genellikle TiH₂ ve ZrH₂, çeliklerde ise SrCO₃ gibi karbonatlar kullanılır. Çalışmalarda köpürtücü madde olarak %1’den biraz daha az metal hidrür kullanımı daha başarılı sonuçlar vermiştir [1]. Üretim yalnızca alüminyum ve alaşımları köpürtülmesi ile sınırlı değildir. Titanyum, çinko, kurşun, altın ve diğer metal/alaşımları da uygun üretim parametreleri ve köpürtücü madde seçimiyle köpürtülebilmektedir [4, 8, 23, 24, 32].

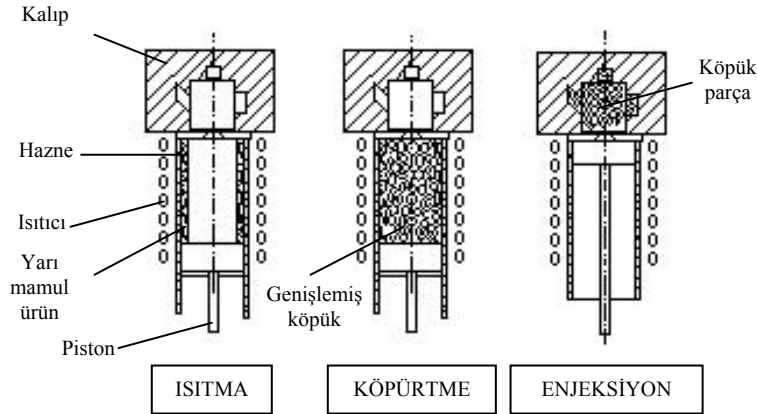
Alüminyum köpüklerde genellikle saf alüminyum, dövme alüminyum alaşımları (2xxx ve 6xxx), ve döküm alaşımları (AlSi7, AlSi12) kullanılmaktadır [1, 4, 24, 32].

Bu yöntemle düzgün geometrilere sahip parçalar (Resim 2.6.a) üretilebildiği gibi karmaşık şekilli parçalarda üretilebilmektedir [1, 4, 8, 32]. Şekil 2.8’de karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi için kullanılan yöntemin şematik gösterimi verilmiştir. İşlem, klasik yöntemde olduğu gibi köpürmeye hazır numunenin ergime derecesinin üstündeki bir sıcaklıkta ısıtılması ve köpürtülmesi ile başlar. Daha sonra yarı ergiyik halde bulunan köpük, hareketli piston yardımı ile içi boş bir kalıp içerisine enjekte edilerek doldurulur. Böylelikle karmaşık şekilli köpük yapıların üretimi gerçekleştirilir (Resim 2.6.b). Ancak üretimde işlem parametrelerinin yeterince kontrollü olmaması, köpüğün gözenek yapısında önemli ölçüde hasara neden olmaktadır [1].



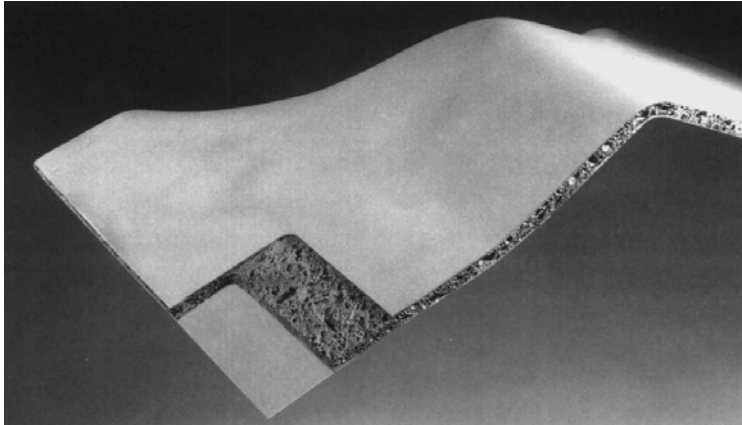
Resim 2.6. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş köpük parçalar [32, 35]

- a) Mekanik testler için üretilmiş alüminyum köpük bloklar,
- b) Elektrikli bir trenin korna çalma aparatı



Şekil 2.8. Köpük enjeksiyon işlemi [1]

Bu yöntem alman firmaları Schunk , ALM ve Avusturya firması Alulight tarafından ticari amaçla kullanılmaktadır. Yöntem ticari ismi *Foam-in-Al* veya *Alulight* olarak bilinmektedir [23, 24, 32]. Alüminyum sandviç paneller (Resim 2.7) ise AFS olarak adlandırılır [24, 32]. Yöntemin bazı avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.1’de verilmiştir.



Resim 2.7. Karman ve Fraunhofer tarafından haddelenerek üretilmiş 10 mm kalınlığında alüminyum sandviç köpük [1]

Çizelge 2.1. Toz metalurjisi yönteminin özellikleri [32]

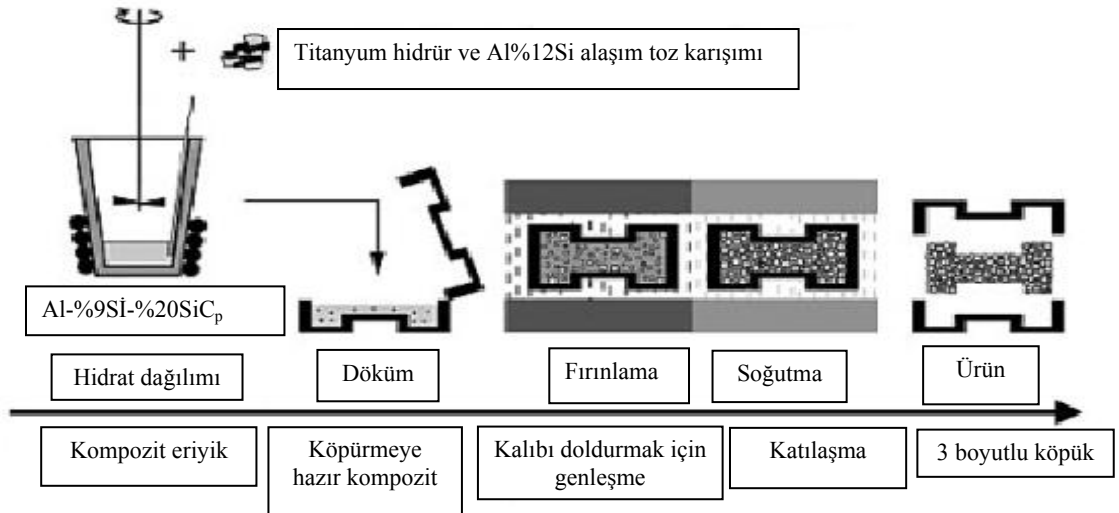
Avantaj	Problem	Dezavantaj
Farklı geometrilere sahip köpükler üretilebilir	Gözenek yapısı tam olarak homojen değildir	Tozların aşırı maliyeti
Kompozitler üretilebilir	Süreç denetimi geliştirilmeli	Çok büyük parçaların üretimi zordur
Farklı alaşım elementleri kullanılabilir		
Köpük kararlılığını dengeleyici parçacıklara ihtiyaç yoktur		
Seramikler ve fiberler eklenebilir		

2.1.4. FORMGRIP yöntemi

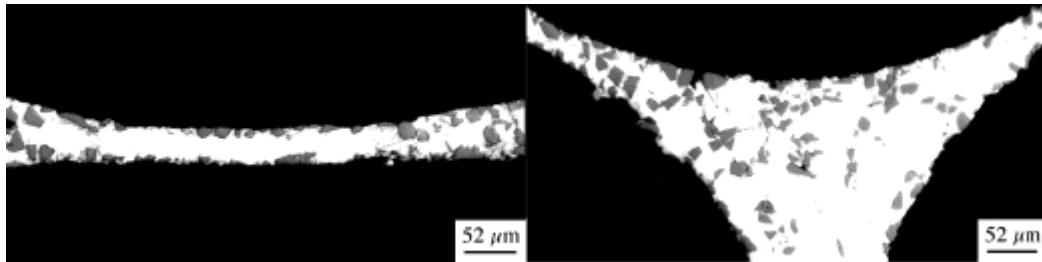
Bu yöntem toz metalurjisi ve ergitme yöntemlerinden esinlenerek ortaya çıkmıştır [4]. İşlemin ilk aşamasında TiH_2 ($\sim 30 \mu m$) tozları atmosfer ortamında ($400^\circ C$ / 24 saat + $500^\circ C$ / 1 saat) ısıtılmaktadır. Böylece yüzeyde titanyum oksit bir film tabakası oluşumu sağlanır (sadece hidrojen geçirgenliği ile sınırlı) ve bu tabaka çözünmeyi geciktirici bir bariyer rolü oynar. Daha sonra ısıtılma tabii tutulmuş TiH_2 ($\sim 30 \mu m$) tozları, $Al\%12Si$ ($\sim 150 \mu m$) tozları ile ağırlıkça 1/4 oranında karıştırılır (Şekil 2.9). Ardından karışım tozlar yaklaşık $620^\circ C$ 'da ergiyik hale getirilmiş ve yavaş yavaş soğutulmuş $Al\%9Si/SiC_p$ kompozit içerisine ilave edilir. Bu işlem sırasında parçacıkların ergiyik içerisinde homojen dağılımını sağlamak için 1200 rpm hızla dönen konvansiyonel bir mekanik karıştırıcı kullanılır. Ergiyik kompozit içerisindeki SiC_p parçacıkları köpüğün kararlılığı için oldukça önemlidir [4, 8]. SiC_p parçacıkları hücre duvarları içerisine yerleşerek (Resim 2.8) köpüğün dayanımını, lineer genişleme oranını ve ergiyik metalin viskozitesini artırdığı bilinmektedir [36].

İşlemin ikinci aşamasında ise köpürmeye hazır malzemeler grafit bir kalıp içerisine yerleştirilerek solidüs sıcaklığının üstünde fırınlama işlemine tabii tutulur. Böylelikle

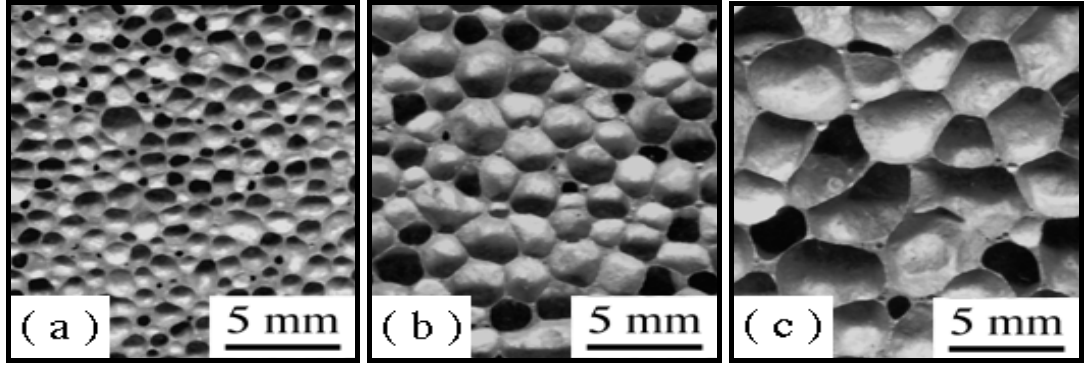
titanyum hidrürün hidrojen gazı salıp çözünmesi ile yapıda gaz baloncukları oluşumu sağlanır. Daha sonra soğutma işlemi ile köpük yapı elde edilir [4, 8]. Resim 2.9'da *FORMGRIP* yöntemi ile üretilmiş numunelerin kesitleri gösterilmektedir [4].



Şekil 2.9. FORMGRIP yöntemi [4]



Resim 2.8. FORMGRIP yöntemi ile üretilmiş Al-9Si alaşımlı köpükte SiC parçacıklarının hücre duvarındaki dağılımı [4] a) hüre duvarı, b) plateau sınırı



Resim 2.9. Farklı koşullar altında *FORMGRIP* yöntemi ile üretilmiş numunelerin gözenek yapıları [4] P = gözeneklilik oranı, d = gözenek ebadı, a) P = %69, d = 1,1 mm, b) P = %78, d = 1,9 mm, c) P = %88, d = 3,1 mm

3. METALİK KÜRESEL ŞEKİLLİ YAPILAR

Gözenekli metaller yüksek rijitlik, enerji sönümlene kabiliyeti, ses ve ısı yalıtımı gibi özellikleri ile karakterize edilirler. Ancak alüminyum köpükler gibi hücreli metallerde içyapı geometrisinin farklılık göstermesi, bölgesel yoğunlukta homojen olmayan bir durumu ortaya çıkartmaktadır. Bu durum köpüğün kararlılığına olumsuz yönde etki etmektedir. Dolayısıyla problemin çözümü için farklı türde malzeme arayışına girilmiştir. Bu malzemeler arasında en fazla ilgiyi geometrik şekillerden dolayı metalik küresel şekilli yapılar çekmektedir [37].

Metalik küresel şekilli yapılar hücreli metallerin yeni bir grubudur. Üretimleri oldukça kolay olan bu malzemeler, geometrik yapıları ile karakterize edilirler [3, 38-40]. Aynı anda birden çok üretimi yapılan bu malzemelerin çapları milimetre seviyesinde değişkenlik göstermektedir [3]. Metalik küresel şekilli yapılar, çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak elde edilirler. üretiminde genellikle bakır, nikel, çelik, titanyum, alüminyum gibi metal ve alaşımları kullanılmaktadır [1, 38, 41].

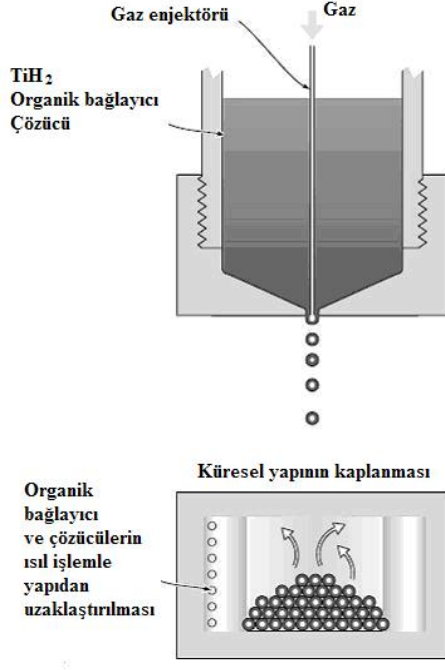
3.1. Üretim Yöntemleri

3.1.1. Georgia tekniği

Georgia tekniğinin ilk aşamasında çözünebilir metal hidrürler (TiH_2 vb), organik bağlayıcılar ve çözücüler ile karıştırılarak bulamaç haline getirilir. Daha sonra bir nozul yardımı ile bulamaç içerisine gaz üflenerek mikro kürelerin oluşumu sağlanır. Bu işlem esnasında nozulun uç kısmından çıkan bulamaç, yüzey gerimi neticesinde küresel şekli almaktadır. Daha sonra kalıp dışına çıkan küresel şekilli yapılar düşme esnasında sertleşerek katılaşır. Böylelikle toz metalurjisi yönteminde olduğu gibi köpürmeye hazır yarı mamul ürünler elde edilir (Şekil 3.1).

Yöntemin ikinci aşamasında ise mikro küreler (yarı mamul ürün) ısıtma işlemine tabii tutulmaktadır. Bu işlem esnasında organik bağlayıcılar ve çözücüler buharlaşarak ortamdan uzaklaşırken, TiH_2 'de çözünerek gözenek oluşumunu sağlamaktadır. Daha

sonra küresel şekilli yapılar birbirleriyle birleştirmek için sinterleme işlemine tabii tutularak hücresel yapılar oluşturulur. Georgia tekniğinin geliştirilmesiyle yalnızca metal hidrürlerin kullanımı sınırlı kalmamış, aynı zamanda $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ gibi metal oksit karışımı ile paslanmaz bir çeliğin üretimi gerçekleştirilmiştir [33].

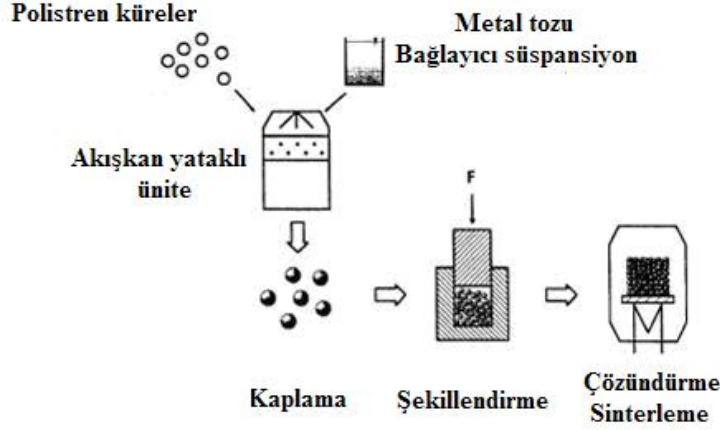


Şekil 3.1. Georgia tekniği [33]

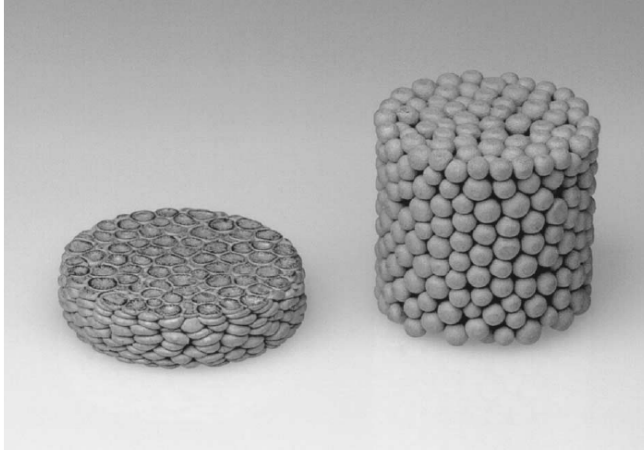
3.1.2. Polisitren kaplama işlemi

Polisitren kaplama işlemi Almanya'da Fraunhofer Enstitüsü (IFAM) tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir [33]. Georgia tekniği ile benzerlik gösteren bu yöntemde ilk olarak polisitren küreler, bağlayıcı süspansiyon ve metal tozları ile akışkan yataklı üniteye kaplanır (Şekil 3.2) [1, 3]. Daha sonra kaplanmış numuneler, bir kalıp içerisinde Baravais kafes sistemine benzer şekilde dizilerek sinterleme işlemine tabii tutulurlar. Fakat bu işlem öncesinde ve devamında numuneler üzerine hafif bir sıkıştırma kuvveti uygulanarak temas noktalarındaki boşluklar giderilir. Sinterleme işlemiyle birlikte yapı içerisinde bulunan polisitren çözünerek ortamdan uzaklaşır.

Böylelikle metalik küresel şekilli hücrel malzemelerin oluşumu sağlanır (Resim 3.1) [1].



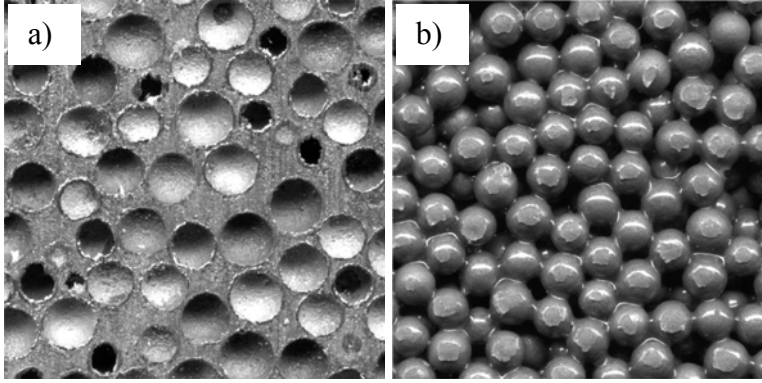
Şekil 3.2. Polisitren kaplama işlemi [1]



Resim 3.1. Polisitren kaplama ile üretilmiş küresel şekilli yapılar [1]

Genellikle bu yöntemlerle üretilen metalik küresel yapıların ortalama çapı 0,8-8 mm, hücre duvar kalınlığı ise 10-100 μm arasında değişmektedir [1]. Metalik küresel şekilli yapıların birleştirilmesinde sinterleme, lehimleme ve yapıştırma gibi teknikler kullanılmaktadır [3, 38, 39]. Örneğin yapıştırma tekniği, diğerlerine oranla daha ekonomik bir yöntemdir. Bunun dışında, birleştirme tekniğinin morfolojisi ve mekanik davranışı yapıştırma tekniği ile kolaylıkla ayarlanabilmektedir [3].

Metalik küresel şekilli yapılarda iki tür morfolojiden bahsetmek mümkündür. Birincisi tamamen yapıştırıcı matris içerisine gömülmüş küresel şekilli yapı, ikincisi ise yapıştırıcının yalnızca kürelerin birleşme noktalarına uygulanmasıyla elde edilmektedir (Resim 3.7). Sonuç olarak her iki morfoloji türünde metalik küresel şekilli yapıların (MHSS) birbirine birleştirildiği görülmektedir (Resim 3.2). Epoksi reçineler ile yapıştırılmış çelik küreler için makroskobik yoğunluk ortalama 0,3-0,6 g/cm³, reçine içerisine gömülmüşler için ise makroskobik yoğunluk ortalama 0,8-1,2 g/cm³ arasında değişmektedir [38].



Resim 3.2. Birleştirilmiş metalik küresel şekilli yapılar [38]

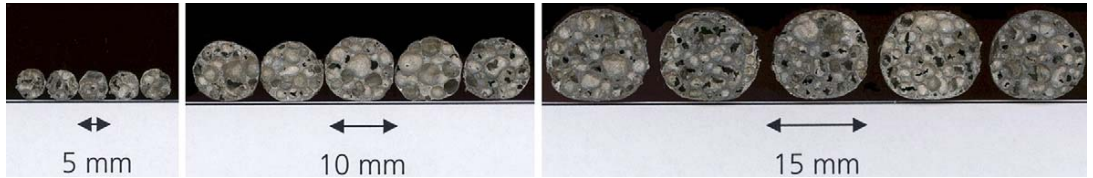
a) Yapıştırıcı içine gömülmüş MHSS b) Dış yüzeyleri yapıştırıcı ile birleştirilmiş MHSS

3.1.3. İleri gözenek morfolojisi (APM) tekniği

İleri gözeneklilik morfolojisi tekniği Almanya'da IFAM tarafından geliştirilmiş yeni bir köpük üretim yöntemidir [26, 42]. Bu yaklaşım, toz metalurjisi yönteminde kullanılan iki temel adımın birbirinden ayrılmasını esas alır. Bu iki temel adım köpüğün genişlemesi ve köpük parçaların şekillendirilmesi olarak bilinir [26, 41, 42]. Birbirinden bağımsız olan bu aşamalar, farklı zamanlarda, farklı yerlerde ve farklı firmalar tarafından gerçekleştirilebilmektedir. APM köpük parçaların IFAM ve diğer ticari firmalar tarafından tüketicilere ulaştırılması, maliyet ve iş gücü açısından tüketiciler için belirgin bir tasarruf sağlamaktadır. Bu parçalar basit bir yapıştırma tekniği ile birbirine birleştirilebilmektedir. Dolayısıyla APM köpük parça üreticileri, kullanıcılar için maksimum oranda esneklik sağlamaktadır [41].

İleri gözenek morfolojisi tekniği köpürtme kalıplarına ihtiyaç duyulmadan alüminyum köpük-polimer hibrit üretimine imkân sağlamaktadır. Bu hibritler çok sayıda küçük hacimli alüminyum köpük parçalardan meydana gelmektedir ($\text{hacim} < 1\text{cm}^3$) [43].

Üretimin ilk aşamasında klasik toz metalurjisi yönteminde olduğu gibi metal tozları ile köpürtücü madde tozları belirli oranlarda karıştırılır. Daha sonra karışım tozlar, yarı mamul ürün elde etmek için sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi ekstrüzyon, sıcak presleme (tek yönlü, çift yönlü) veya haddeleme gibi farklı teknikler kullanılarak yapılabilir [1, 4, 8, 24, 32]. Daha sonra elde edilen yarı mamul numuneler, küçük hacimlerde kesilerek fırın içerisinden geçen düz bir ızgara zemin üzerinde yerleştirilir. Ardından ergime derecesine yakın bir sıcaklıkta (yaklaşık 700°C ve 3-5 dakika) herhangi şekillendirme kalıbına ihtiyaç duyulmadan köpürtme işlemine tabi tutulur. Bu esnada yüzey gerilimi, ergiyik hale gelen köpüğün küresel şekli almasına etki etmektedir. Fakat bu parçaların geometrisi istenilen küresellikte değildir. Çünkü yerçekimi kuvveti, ergiyik halde bulunan alüminyum köpüğün deformasyonuna neden olmaktadır [43]. Resim 3.3’de oval biçimdeki numunelerin kesiti gösterilmektedir. Köpük parçacıklarının ortalama çapı 5 mm ile 15 mm arasında değişmektedir [43].



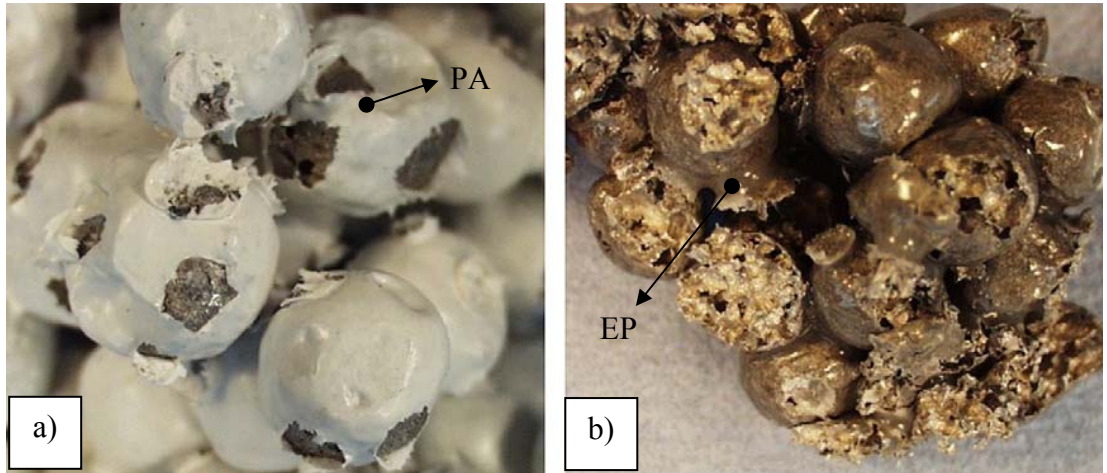
Resim 3.3. Farklı boyutlardaki küresel alüminyum köpüklerin kesitleri [43]

Köpük parçaları yapıştırarak istenilen alüminyum köpük – polimer hibrit bileşimini meydana getirmek için iki tür yapıştırıcı kullanılmaktadır [43, 44].

Poliamid 12 (PA) termoplastik bir polimer türüdür. Metal yapılarda korozyona karşı önlem almak için kullanılır. Bu malzemenin gerilme mukavemeti 49 MPa ve uzuma

değeri %311'dir. Yük altında mekanik özellikleri çok uygun değildir. Ergime derecesi 176°C ve alüminyum yüzeyi ıslatması oldukça iyidir.

Araldite AT 1-1 (EP) köpük yapıları yapıştırmak için kullanılan tek bir bileşime sahip termoplastik reaksiyon yapıştırıcısı (epoksi) olarak bilinir. Bu malzemenin enine gerilme direnci 34 MPa ve elastik gerilme sınırı 68 MPa'dır. Araldite AT 1-1 ergimesi derecesi 70°C olarak kabul edilmiştir. Hâlbuki polimer bağlar 120°C'da sertleşmeye başlamaktadır. Devamında kalan malzemeler 180°C'a kadar bozunmadan termal kararlılık sağlamaktadır [43]. Resim 3.4'de Poliamid 12 (PA) ve Araldite AT 1-1 (EP) ile yapıştırılmış alüminyum köpükler gösterilmektedir.



Resim 3.4. Poliamid 12 (PA) ve Araldite AT 1-1 (EP) ile yapıştırılmış küresel şekilli alüminyum köpükler [43] a) PA yapıştırıcı, b) EP yapıştırıcı

Kaplama için köpük parçalar, kullanılacak yapıştırıcının ergime derecesinin üstündeki bir sıcaklıkta ısıtılır. Daha sonra yapıştırıcı tozun içerisine dökülür. Ardından polimer parçacıklar sıcak köpük parçacıkların yüzeylerine temas eder ve eriyik hale geçerler. Böylece numune yüzeyinde film şeklinde tabaka oluştururlar. Kaplama kalınlığı köpük numunelerin sıcaklığı ile ayarlanabilmektedir. PA yapıştırıcı ile kaplama üç farklı kalınlıkta yapılır [43]. Bu işlem kaplama kalınlığı (b) ile köpük element çapı (D) arasında sabit oranlarda gerçekleştirilir ($b/D = 5 \times 10^{-3}$, 15×10^{-3} , 29×10^{-3}). EP yapıştırıcı ile kaplamada ise bu oran $b/D = 10 \times 10^{-3}$ 'dür.

Yapıştırıcı ile kaplanmış APM köpük hibritlerin, %80 ile %90'nını alüminyum köpük, %10 ile %20'lik kısmını da yapıştırıcı oluşturmaktadır [44].

Alüminyum köpük-polimer hibritlerin üretiminde köpük parçacıklar silindirik kalıplar içerisine dökülerek kaplama yapılır. Kalıp içerisine rasgele dökülen köpük parçacıklar titreşim yardımıyla daha da sıkı hale getirilir. Daha sonra yaklaşık 180°C'da ısıtılarak kaplama sıvı hale getirilir. Sıvı polimer kaplamalar yan yana köpük parçaları temas noktalarından birleştirir. Bu birleşme bölgelerinde sıvı polimer yapıştırıcı katılarak birleşmeleri tamamlar. Köpük parçacıklarının kalıp yüzeylerine yapışmaması için PTFE folyo kullanılmaktadır. Rasgele kalıp içerisindeki köpük parçacıklarını sıkıştırılarak daha düzenli hale gelmesinde yapıştırıcının etkisi % 10 seviyelerdedir. Yani sıvı halde bulunan kaplamanın ağırlığı, köpük parçalar arasındaki temas noktalarının değişimine, çok küçük oranda etki etmektedir [43].

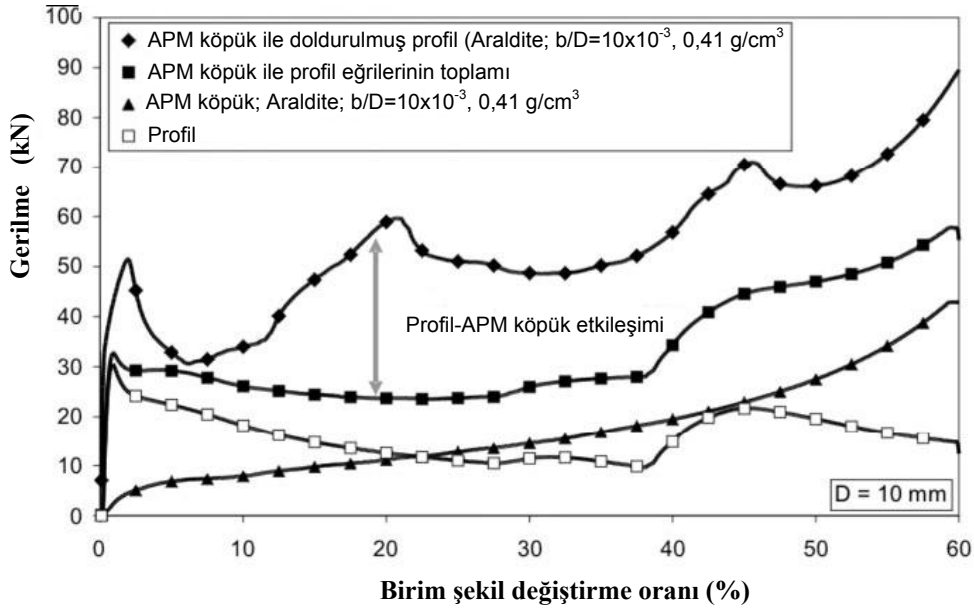
Bu basitleştirilmiş işlemler sonucu üretim, otomatik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca alüminyum köpük parçaların üretimindeki esneklik büyük ölçüde artırılmıştır. Her iki yönden alüminyum köpük uygulamalarında önemli ölçüde maliyetin azalmasına katkıda bulunulmuştur. Resim 3.5'de alüminyum köpük küreler ve örnek uygulama şekilleri gösterilmektedir.



Resim 3.5. Alüminyum köpük küreler ve örnek uygulamaları [43]

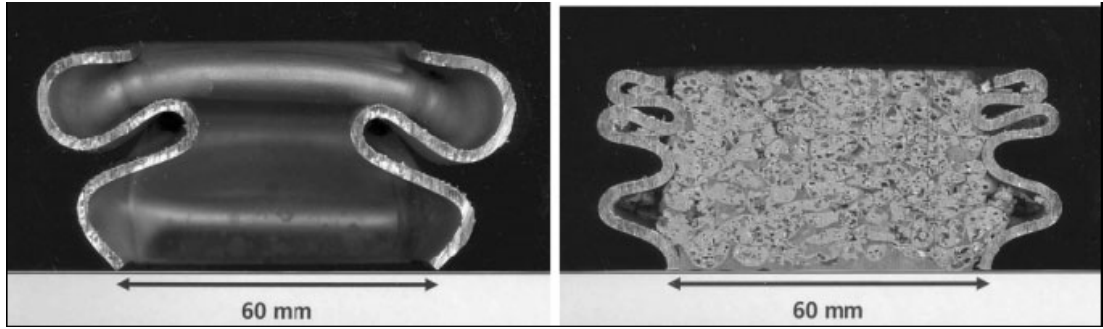
a) Yaklaşık 10 mm çapında alüminyum köpük küreler, b) Köpük kürelerle doldurulmuş yapı, c) Alüminyum köpük-polimer hibritten yapılmış araçlarda kullanılan güç aktarma ünitesi

Küresel şekilli alüminyum köpüklerin diğer önemli avantajı ise yapıştırıcı tabakanın morfolojisi ve mekanik davranışından faydalanarak özel mühendislik uygulamalarında yapının mekanik özelliklerini uygun değerlere getirmek mümkündür [38]. Örneğin içi boş bir profil ile APM köpük parçalarla doldurulmuş profillerin sıkıştırma kuvveti karşısındaki davranışları karşılaştırıldığında Şekil 3.3'deki gibi gerilim-gerinim eğrileri elde edilmektedir.



Şekil 3.3. APM köpük ile doldurulmuş profillerin basma yüklemeleri karşısındaki tipik davranışları [44]

Grafiğe bakıldığında içi boş olan profilde, APM köpük ile doldurulmuş profile oranla daha düşük yüklemelerde deformasyonun başladığı görülmektedir. Fakat içerisi köpük ile doldurulmuş profilde, kritik yükleme sonrası ani bir düşüş meydana gelmiştir. Bunun sebebi köpük parçaları ile profil duvarları arasında yapışkan bağların özelliğini kaybetmesinden kaynaklanmaktadır. Yüklemelerin devam etmesi durumunda profillerin çevre duvarlarında içe ve dışa doğru deformasyonların olduğu görülmektedir (Resim 3.6). Buna rağmen köpük ile profil arasındaki etkileşimin deformasyon direncini artırdığı görülmektedir [44].



Resim 3.6. İçi boş ekstrüze edilmiş alüminyum profil ile APM köpük parçalarla doldurulmuş profillerin basma yüklemeleri karşısında deforme olmuş kesitleri [44]

Yüksek enerji sönümleme, mükemmel ısı yalıtımı ve yüksek rijitlik gibi özellikler hücreli malzemelerin bilinen özelliklerindendir [37]. Bu özelliklerin bileşimi köpüklerin otomotiv ve uzay endüstrisi gibi geniş potansiyel uygulama alanlarında kullanımına olanak sağlamaktadır [38]. Örneğin metalik küresel şekilli yapılar çelik boruların iç kısımları doldurularak araçlarda ön takım elemanları olarak kullanılabilir [44]. Köpükle doldurulmuş hibrit yapılar ve sandviç yapılar APM yöntemiyle üretilmektedir. Bu yapılarda kullanılan alüminyum köpük parçalar hücreli bir çekirdek tabakası oluşturacak şekilde yerleştirilir (Resim 3.7) [41].

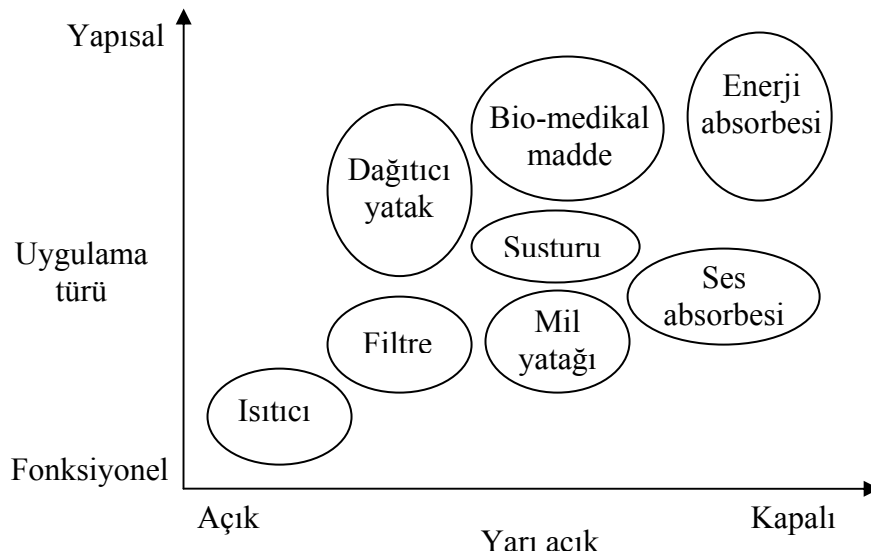


Resim 3.7. APM köpük parçalardan üretilmiş sandviç yapı [41]

4. METAL KÖPÜKLERİN UYGULAMA ALANLARI

Metalik köpükler mekaniksel, fiziksel ve akustik özellikleri son derece iyi olan bir malzeme grubudur. Bu özelliklerinden dolayı yapısal ve fonksiyonel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [6-8, 11, 12]. Özellikle otomotiv, demir yolu taşımacılığı, gemi yapımı, ağırlıkça hafif konstrüksiyonlar, uçak ve uzay sanayi gibi alanlarda oldukça ilgi çekmektedir [10, 11].

Şekil 4.1’de metalik köpüklerin açık, kapalı veya yarı açık gibi gözenek yapılarına göre çeşitli uygulama alanları gösterilmektedir. Yük taşıma gibi yapısal uygulamalarda *tam kapalı*, yüksek oranda sıvı akışı için *çok açık* gibi değişik derecelerde gözenek yapısına ihtiyaç olabilir [1].



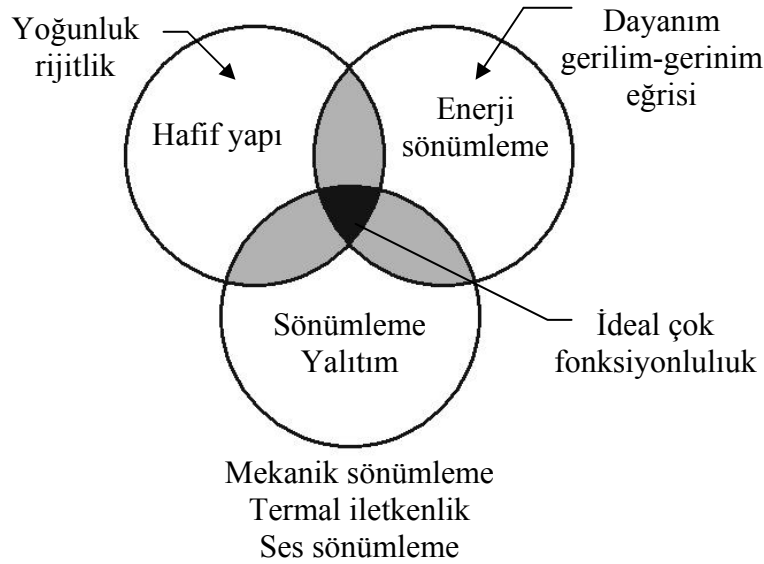
Şekil 4.1. Gözeneklilik oranına göre metalik köpüklerin fonksiyonel ve yapısal kullanım alanları [1]

4.1.Köpük Metallerin Yapısal Uygulamaları

4.1.1.Otomotiv endüstrisi

Son zamanlarda otomotiv endüstrisinde yolcu güvenliği ve yüksek yakıt verimliliği sağlamak için araştırmacılar daha hafif ve daha güvenilir yapılara yönelmişlerdir. Bu malzemeler arasında metalik köpükler hafiflikleri ile oldukça ilgi çekmektedir. Ancak metalik köpüklerin bu sektörde uygulanabilirliği, üretim maliyetine ve özelliklerine bağlıdır [45].

Son zamanlarda, İngiltere’de endüstri ve akademik kurumlar arasında ulusal fizik laboratuvarı tarafından yapılan bir ankette metalik köpüklerin potansiyel uygulamalar için uygun olduğu görüşü çıkmıştır. Ankette göre metal köpüklerin yakın gelecekte otomobil ve uzay endüstrisi için %32, imalat endüstrisi için (malzeme, makine, parça) %26, eğitim ve araştırma sektörlerinde ise %16’lık paya sahip olacağı belirtilmiştir [45]. Şekil 4.1’de metalik köpüklerin otomobil endüstrisinde uygulama kategorileri gösterilmektedir.



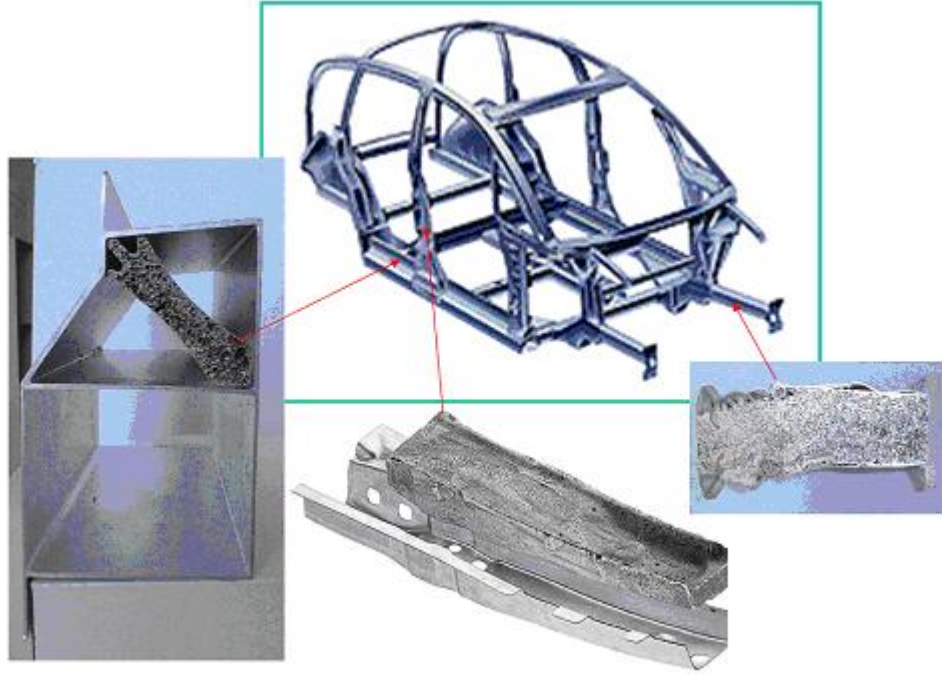
Şekil 4.2. Metalik köpüklerin otomobil endüstrisinde uygulama kategorileri [1]

Çarpışma enerjisi emilimi

Araçlarda ve trenlerde çarpışma anında oluşan maksimum etkinin dağılımı, çarpışma bölgelerindeki deformasyonun kontrolü ile sağlanabilmektedir. Bunun için araçların ön ve yan bölgelerine koruyucu parçalar takviye edilir. İçerisi metal köpük ile doldurulmuş profiller çarpışma esnasında ilginç deformasyon davranışı sergilerler (Resim 4.1). Genellikle aksenal çarpışmalarda içerisi köpük ile doldurulmuş profiller, boş profillere oranla %25-32 daha fazla enerji sönmölemektedirler [46, 47]. Resim 4.2’de metalik köpüklerin otomobil şaselerindeki çeşitli kullanım biçimi gösterilmektedir.



Resim 4.1. %58 oranda deforme edilmiş, içerisi alüminyum köpük ile doldurulmuş ve boş olan paslanmaz çelik profillerin kesitleri [47] (ilk boy: 305 mm, çarpışma uzunluğu: 177 mm)



Resim 4.2. Metal köpüklerin otomobil şaselerinde kullanıldığı yerlerden bazıları [48]

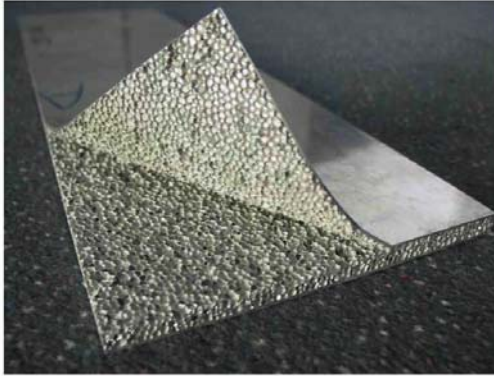
Bir başka örnek olarak LKR (Avusturya) ve BMW tarafından alüminyum köpük metali kullanılarak montaj bloğu geliştirilmiştir (Resim 4.3).



Resim 4.3. LKR ve BMW tarafından geliştirilmiş motor blok örneği, soldan sağa; boş döküm, alüminyum köpük çekirdek içeren yekpare parça, kesit görüntü [24]

Hafif yapı malzemeleri

Köpük sandviç metaller ve alüminyum köpükten yapılmış hafif ve sağlam yapılar taşıtlar için ağırlığın azaltılması ve sağlamlığın artırılmasına katkıda bulunmaktadır. Alman üretici Karman üç boyutlu sandviç panelleri yarış otomobillerinin ön ve arka tampon bölgelerde kullanılabilirliğini test etmiştir. Çünkü bu bölgeler ağırlık ve dayanım açısından araçlar için ciddi problemlere neden olmaktadır. Yapılan test sonucunda sandviç panellerin diğer çelik panellere oranla %25 ağırlık tasarrufu, %700'de dayanım artış sağladığı görülmüştür. Ancak alüminyum sandviç panellerin (AFS) diğer çelik panellere oranla daha pahalı olması, bu uygulamaları kısıtlamaktadır. Buna rağmen alüminyum köpük sandviçler araçlarda ısı yalıtımı sağlamak için yeni bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır [1]. Resim 4.4'de alüminyum sandviç yapı görülmektedir.



Resim 4.4. Karman tarafından üretilmiş alüminyum köpük sandviç (AFS) [24]

Resim 4.5'de alüminyum sandviç panelin araçlarda farklı bir kullanım şekli gösterilmektedir.



Resim 4.5 Alüminyum sandviç panelden yapılmış bir kaldırma kolu [49]

Alüminyum sandviç paneller sosyal hayatta olduğu gibi askeri alanda da yüksek performanslarından dolayı ilgi çekmektedir. Amerikan kara kuvvetleri araştırma laboratuvarında yapılan deneylerde, alüminyum köpüğün balistik performansı değerlendirilmiştir. Bu çalışmada alüminyum köpük, seramik ve elyaf takviyeli polimer bir tabaka arasına değişik kombinasyonlarda yerleştirilerek patlama testi yapılmıştır (Resim 4.6). Deney sonucu alüminyum köpük seramik zırh malzemesinin verimliliğini artırmış, balistik şok dalgalarını azaltmış ve elyaf takviyeli polimer kompozitin zarar görmesini engellemiştir. Buna göre hafif zırhlı araçlarda alüminyum köpüğün kullanımıyla daha yüksek performansların elde edilebileceği sonucu çıkartılmıştır [47].



Resim 4.6. Patlamalara karşı integral zırh malzemesi olarak performansı değerlendirilmiş alüminyum köpüğün kesiti [47]

4.1.2. Hava ve uzay endüstrisi

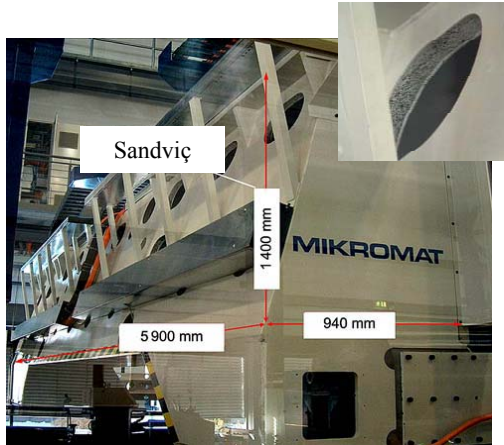
Köpük metallerin ve hafif yapıların hava-uzay endüstrisindeki kullanımı otomotiv endüstrisindeki ile benzerlik göstermektedir. Uzay endüstrisinde kullanılan petek şeklindeki yapıların maliyeti, alüminyum köpük levhalara veya metal köpük sandviç panellere oranla daha yüksektir [1]. Dolayısıyla uzay endüstrisi gözenekli malzemeler arasında yer alan alüminyum sandviç köpüklere yönelmiştir. Resim 4.7’de Ariane 65 isimli rokette kullanılan alüminyum köpükten yapılmış koni biçimli bir adaptörün genel görüntüsü verilmiştir [50].



Resim 4.7. Ariane 65 isimli rokette kullanılan alüminyum köpükten yapılmış koni biçimli adaptör [50]

4.1.3. Makine gövde imalatı

İmalat makinelerinin yüksek performansta, hızlı hareket edebilmeleri için oldukça sağlam ve hafif olmaları gerekir. Fakat çalışma esnasında genellikle titreşime veya dinamik yüklere maruz kalırlar. Bu problemleri minimize edebilmek için alüminyum sandviç köpükler hafif ve yüksek enerji sönümleme kabiliyetlerinden dolayı makine imalatında yerini almıştır [51]. Resim 4.8’de çelik-alüminyum sandviç köpükten imal edilmiş freze makinesinin enine giriş resmi gösterilmektedir [52].



Resim 4.8. Çelik-alüminyum sandviç köpükten imal edilmiş freze makinesinin enine giriş resmi [52]

4.1.4. Diğer uygulama alanları

Metalik köpükler otomotiv endüstrisi, uçak-uzay endüstrisi ve makine imalatı alanları dışında gemi yapımı, inşaat endüstrisi, biyomedikal gereçler, spor ekipmanları gibi birçok alanda kullanılmaktadır [1].

4.2. Köpük Metallerin Fonksiyonel Uygulamaları

4.2.1. Susturucular

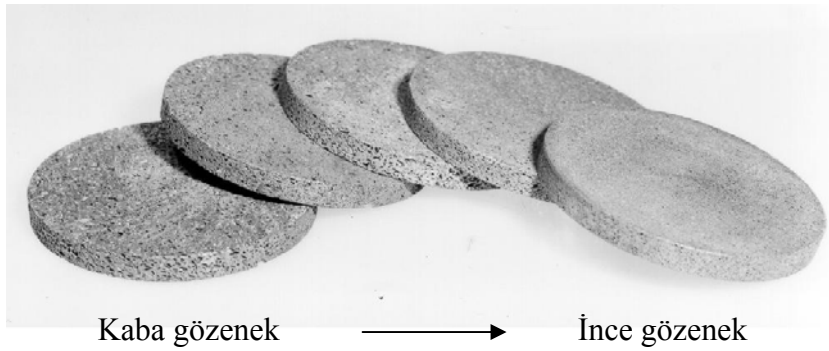
Kompresör gibi cihazlarda gaz çıkışı esmasında gürültü oluşmaktadır. Bu gibi durumlarda gaz çıkışı bölgesine alüminyum köpükten üretilmiş Resim 4.9'da gösterilen uygun susturucular takılarak gürültü azaltılabilir [53].



Resim 4.9. Alüminyum köpükten yapılmış susturucular [53]

4.2.2. Filtreler

Gaz veya sıvılardan, katı parçaların ayrılmasında geniş hacimli alüminyum süngerler kullanılabilmektedir (Resim 4.10)[53].



Resim 4.10. Farklı gözenek boyutuna sahip alüminyum sünger [53]

4.2.3. Diğer uygulama alanları

Açık gözenekli metalik köpükler susturucular ve filtreler dışında basınç azaltma, yağlama yatağı, püskürtücü, alev perdesi, buharlaşma soğutması ve ısı değiştirici olarak da kullanılmaktadır [53]

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzemeler

Deneysel çalışmalarda küresel şekilli alüminyum köpük üretimi için matris malzemesi olarak %99 saflıkta ve $<200\ \mu\text{m}$ parçacık ebadına sahip Alumix 231 tozu ($\text{Al-}\%2,5\text{Cu-}\%0,5\text{Mg-}\%14\text{Si}$) Alman Eckart firmasından temin edilirken, köpürtücü madde olarak Aldrich firmasından temin edilen $<45\ \mu\text{m}$ ve %98 saflıktaki TiH_2 tozları kullanılmıştır.

5.2. Numune Hazırlama ve Köpürtme İşlemi

Alüminyum tozlarına değişik oranlarda ($\%0,5-0,75-1$ ve $1,5$) TiH_2 tozu ilave edilerek, Teknik Eğitim Fakültesinde bulunan turbula marka T2 F tipi üç boyutlu karıştırıcıda 30 dakika boyunca karıştırılmıştır (Resim 5.1). Daha sonra karışım tozlar kalıp içerisinde tek yönlü preste $600\ \text{MPa}$ basınç uygulanarak preslenmiş ve $30\times50\times10\ \text{mm}$ ölçülerinde taslak numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numuneler protherm PLF 120/12 tipindeki fırın (Resim 5.2) içerisinde 550°C sıcaklıkta ısıtılıp 180 dakika süreyle bekletilmiştir. Fırın içerisinde alınan numuneler deformasyonun köpürmeye etkisini incelemek amacıyla friksiyon preste $\%10-30-50$ ve 70 oranlarda deforme edilip, belirli boyutlarda kare şeklinde kesilerek köpürmeye hazır hale getirilmiştir (Resim 5.3).



Resim 5.1. Turbula T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcı

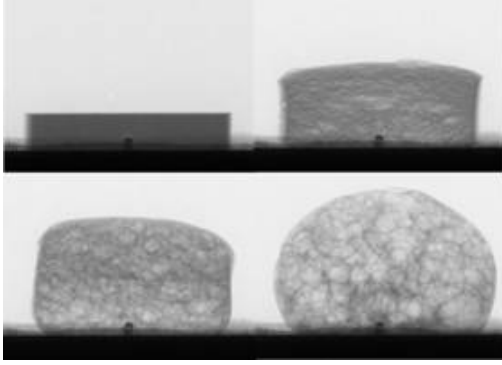


Resim 5.2. Protherm PLF 120/12 tipindeki fırın



Resim 5.3. Sırasıyla %10, %30, %50 ve %70 oranlarda deforme edilmiş köpürmeye hazır numuneler

Daha sonra kesilmiş numuneler protherm PLF 120/12 tipindeki fırın içerisine ayrı ayrı yerleştirilip 650°C , 670°C , 690°C ve 710°C 'da 2 ile 5 dakika arasında 30 saniye aralıklarla bekletilerek köpürtme işlemine tabii tutulmuştur. Bu işlem sırasında herhangi bir kalıp kullanılmadan serbest köpürtme yapılmıştır. Amaç, köpürtme işlemi sırasında ergiyik hale gelen alüminyumun yüzey gerilmesinden faydalanılarak köpüğün geometrisinin küresel şekle yakın olması istenmektedir. Resim 5.4'de küresel şekilli köpüğün üretimi esnasında sahip olduğu geometrik yapının aşamaları gösterilmektedir.



Resim 5.4. Küresel şekilli köpüğün üretimi esnasında sahip olduğu geometrik yapının aşamaları (IFAM)

5.3. Karakterizasyon

Üretilen köpük numunelerin yoğunlukları ve hacimsel olarak lineer genişleme oranları Sartorius marka 0,1 mg hassassiyetteki terazi ve yoğunluk kiti ile ölçülmüştür. Buna göre yoğunluk hesabı Eş. 5.1’de verilen Arşimet prensibi esasına göre yapılmıştır [1]. Bu eşitlikte, ρ^* köpüğün yoğunluğu, m^* köpüğün havadaki ağırlığı, m_s su içerisindeki ağırlığı ve V^* köpüğün hacmini ifade etmektedir. ($V^* = m^* - m_s$)

$$\rho^* = \frac{m^*}{m^* - m_s} \quad (5.1)$$

Lineer genişleme oranı ise Eş. 5.2’de verilen formüle göre yapılmıştır [18]. Bu formülde V^* köpüğün hacmini, V ise köpürtme öncesi numunenin ilk hacmini ifade etmektedir.

$$\text{Lineer Genişleme (LG)} = \left(\frac{V^*}{V} - 1 \right) \times 100 \quad (5.2)$$

Boşluk miktarı ise Eş.5.3’de verilen formüle göre yapılmıştır [6]

$$\text{Boşluk miktarı} = \left(1 - \frac{V}{V^*}\right) \times 100 \quad (5.3)$$

Yoğunlukları ve lineer genişleme oranları hesaplanan numuneler daha sonra makro boyutta gözenek yapıları incelenmek amacıyla, Metkon marka zımparalama cihazında 240’lık zımpara ile su altında aşındırılmıştır. Numunelerin küçük boyutlu olması kesme işlemini zorlaştırdığı için zımpara ile aşındırma tercih edilmiştir. Daha sonra elde edilen alüminyum köpüklerin gözenek şekli, gözenek boyutu ve gözenek dağılımı incelenmek amacıyla dijital kamera ile makro yapı fotoğrafları çekilmiştir.

Böylelikle köpürtücü madde miktarının yanı sıra deformasyon oranı, köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresinin küresel şekilli alüminyum köpük üretimine etkileri incelenmiştir.

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Toz metalurjisi yöntemiyle küresel şekilli alüminyum köpük üretiminde tozların karışım süresi 30 dakika, presleme basıncı 600 MPa, ön ısıtma sıcaklığı 550°C ve ön ısıtma süresi 180 dakika olarak sabit tutulmuştur. Çizelge 6.1’de verilen diğer değişken parametreler ise birbirleriyle kombine edilerek her türlü deney şartı değerlendirilmiştir. Böylece deneylerde kullanılan değişken parametrelerin, küresel şekilli köpüğün yoğunluk, lineer genişleme, gözenek yapısı ve boşluk miktarı gibi özelliklerine ne tür etkisi olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.1. Küresel şekilli alüminyum köpük üretiminde kullanılan değişken üretim parametreleri

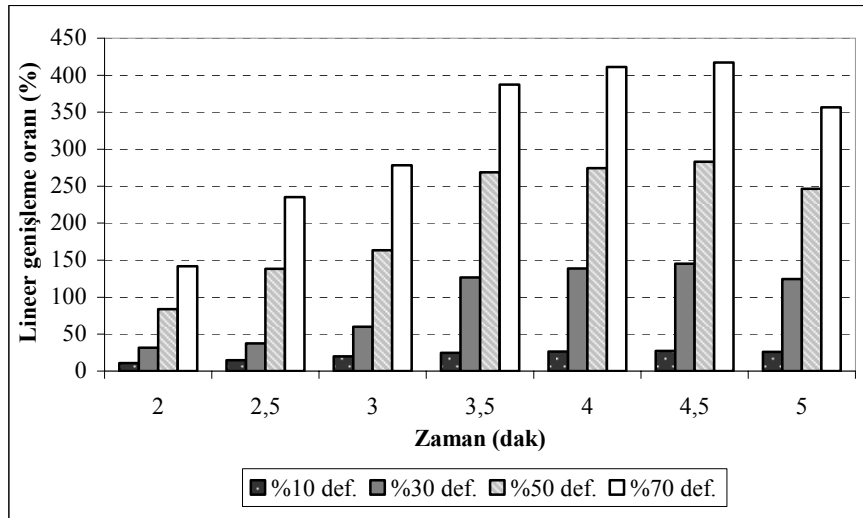
TiH ₂ miktarı (%)	Deformasyon oranı (%)				Köpürtme sıcaklığı (°C)	Köpürtme süresi (dak)
0,5	10	30	50	70	650	2-2,5
0,75						3-3,5
1						4-4,5
1,5						5
0,5	10	30	50	70	670	2-2,5
0,75						3-3,5
1						4-4,5
1,5						5
0,5	10	30	50	70	690	2-2,5
0,75						3-3,5
1						4-4,5
1,5						5
0,5	10	30	50	70	710	2-2,5
0,75						3-3,5
1						4-4,5
1,5						5

6.1. Deformasyon Miktarının Lineer Genişlemeye Etkisi

Deformasyon miktarının lineer genişlemeye etkisini incelemek amacıyla numuneler %10-30-50 ve 70 oranlarda deforme edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen lineer genişleme grafikleri bir birleri ile ilişkili olduğundan, tamamı EK-1’de verilmiştir. EK-1’deki lineer genişleme grafiklerine bakıldığında ise herhangi bir

sıcaklıkta ve sürede köpürtme işlemine tabii tutulmuş numuneler arasında maksimum lineer genişlemenin %70 oranda deforme edilmiş numunelerde meydana geldiği görülmektedir. Daha sonra en fazla lineer genişleme, sırasıyla %50, %30 ve %10 oranlarda deforme edilmiş numunelerde meydana gelmiştir.

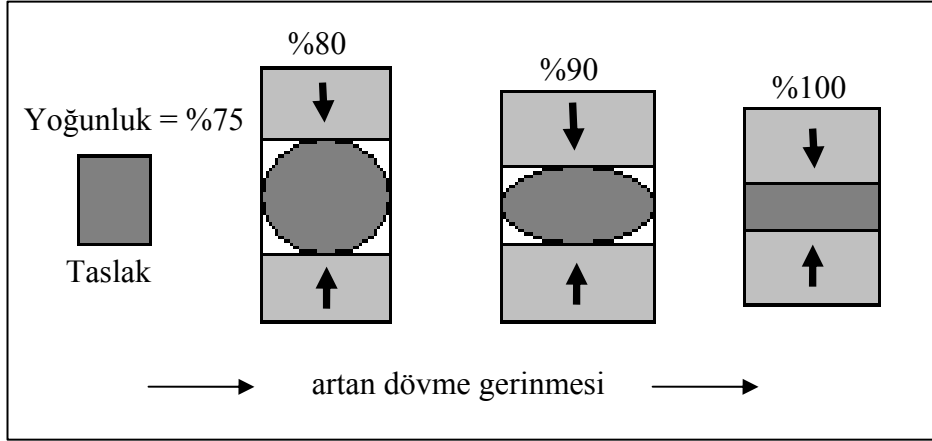
Örneğin Şekil 6.1’de farklı oranlarda deforme edilmiş, içerisinde %0,5 TiH₂ bulunan ve 650°C sıcaklıkta köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerin zamana göre lineer genişleme oranları verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numunelerdeki maksimum lineer genişlemenin 4,5 dakikada meydana geldiği görülmektedir. Bu süre içerisinde, %70 oranda deforme edilmiş numunedeki maksimum lineer genişleme oranı %417’dir. %50 deforme edilmiş numunelerde ise bu oran %283, %30 deforme edilmiş numunelerde %145 ve %10 deforme edilmiş numunelerde %27’dir.



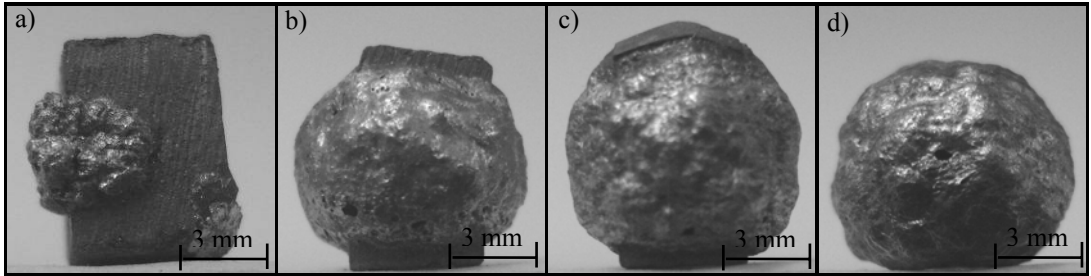
Şekil 6.1. %0,5 TiH₂ içeren ve 650°C sıcaklıkta köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerin lineer genişleme grafiği

Sonuç olarak deformasyon miktarının artması ile lineer genişleme oranının arttığı tespit edilmiştir. Literatürde deformasyon oranındaki artışın, sinterlenmiş numuneler (ön taslak) içerisinde mevcut olan gözeneklerin büyük çoğunluğunun giderilerek yoğunluklarının artırıldığı belirtilmiştir (Şekil 6.2) [54]. Dolayısıyla deformasyon oranındaki artışla birlikte, köpürtücü madde tozları matris içerisine daha iyi hapsedilmiş ve toz parçacıkları arasındaki boşluklar (gözeneklerin) minimize

edilmiştir. Böylelikle köpürtme işlemi sırasında ayrışan hidrojen gazının matris dışına çıkması engellenerek lineer genişleme oranlarının arttığı düşünülmektedir. Özellikle %10 oranda deforme edilmiş numunelerde, köpürmenin diğerlerine oranla yok denecek kadar az ve bölgesel olması bu tezi doğrulamaktadır (Resim 6.1).



Şekil 6.2. Toz dövmede, yoğunlaşma ve taslağın yeniden şekillendirilmesi [54]



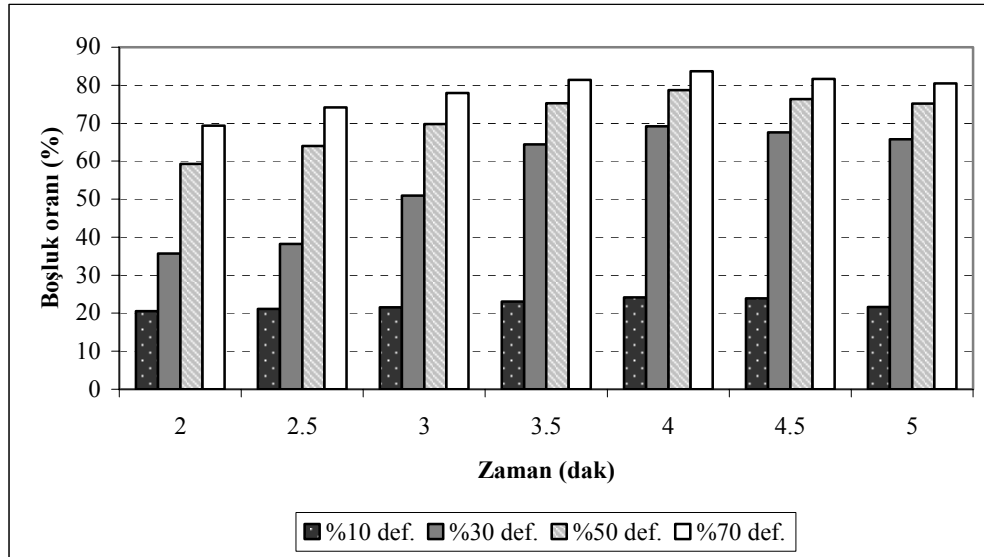
Resim 6.1. 690°C sıcaklıkta 3,5 dakika köpürtme işlemine tabii tutulmuş numuneler
a) %10 def., b) %30 def., c) %50 def., d) %70 def.

6.2. Deformasyon Miktarının Gözenek Yapısına ve Boşluk Miktarına Etkisi

Deformasyon miktarının gözenek yapısına ve boşluk miktarına etkisini incelemek amacıyla numuneler %10-30-50 ve 70 oranlarda deforme edilmiştir. Gözenek oluşumuna yalnızca deformasyon miktarının değil, aynı zamanda diğer üretim parametrelerinin de etkisinin söz konusu olduğu yapılan çalışmalar neticesinde belirlenmiştir. Ancak bu bölümde diğer üretim parametrelerinden çok, deformasyon miktarına bağlı olarak gözenek miktarı ve oluşumu incelenmiştir. Deneysel

çalışmalar sonucunda elde edilen boşluk miktarı grafikleri EK-3’de verilmiştir. Burada gözeneklerin sayısal miktarlarından çok, içerdikleri boşluğun hacimsel olarak kapladıkları yüzey alanı dikkate alınmıştır. EK-3’deki grafiklere bakıldığında herhangi bir sıcaklıkta ve sürede köpürtme işlemine tabii tutulmuş numuneler arasında maksimum oranda boşluğun, %70 oranda deforme edilmiş numunelerde meydana geldiği görülmektedir. Daha sonra en fazla boşluk sırasıyla %50, %30 ve %10 oranlarda deforme edilmiş numunelerde meydana gelmiştir.

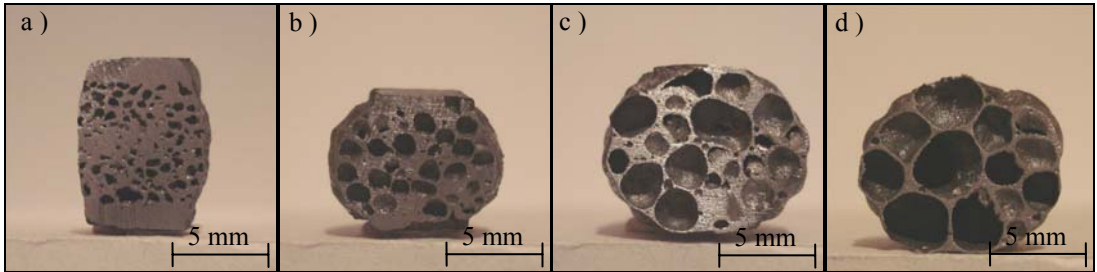
Örneğin Şekil 6.3’de farklı oranlarda deforme edilmiş, içerisinde %1 TiH_2 bulunan ve $670^\circ C$ sıcaklıkta köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerde yapı içerisindeki boşluk oranının zamana göre değişimi verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numunelerde maksimum oranda boşluğun 4 dakikada meydana geldiği görülmektedir. Bu süre içerisinde %70 oranda deforme edilmiş numunedeki maksimum boşluk oranı %83’tür. %50 deforme edilmiş numunelerde ise bu oran %78, %30 deforme edilmiş numunelerde %69 ve %10 deforme edilmiş numunelerde %24’tür.



Şekil 6.3. Farklı oranlarda deforme edilmiş, içerisinde %1 TiH_2 bulunan ve $670^\circ C$ sıcaklıkta köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerdeki boşluk miktarının zamana göre değişim grafiği

Resim 6.2’de ise içerisinde %1 TiH_2 bulunan ve $670^\circ C$ ’da 4 dakika köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerin gözenek yapıları verilmiştir. Resme bakıldığında

%10 oranda deforme edilmiş numunelerde çok sayıda küçük boyutlu gözenekğin oluştuğu, alt ve üst bölgelerde kalın cidarlı tabakaların meydana geldiği görülmektedir. %30 oranda deforme edilmiş numunelerde ise gözenek boyutunun, %10 deforme edilmiş numunelere oranla daha büyük ve az sayıda gözenekğin oluştuğu görülmektedir. %50 deforme edilmiş numunelerde %10 ve %30 deforme edilmiş numunelere oranla daha büyük boyutlarda ve daha az sayıda gözenekğin oluştuğu, çevresel her hangi bir bölgede katman şeklinde tabakaların meydana gelmediği tespit edilmiştir. %70 oranda deforme edilmiş numunelerde de benzer özellikler gözlenirken, gözenek boyutlarının diğerlerine oranla daha büyük ve az sayıda olduğu görülmektedir. Buradan deformasyon miktarındaki artış ile gözenek sayısının azaldığı, gözenek boyutunun ise arttığı tespit edilmiştir. Deformasyon oranındaki artışla sinterlenmiş numuneler içerisinde mevcut olan gözeneklerin büyük çoğunluğunun giderildiği bilinmektedir [54]. Dolayısıyla daha az deforme edilmiş numunelerde TiH_2 'den ayrılan hidrojen gazının matris içinde tutulamaması daha çok sayıda ve küçük boyutlarda gözenekğin oluşumuna etki ettiği düşünülmüştür.



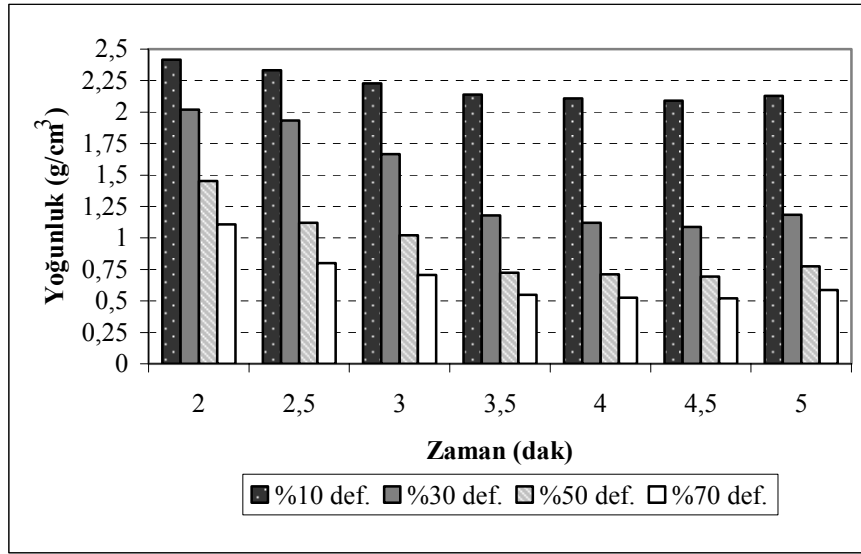
Resim 6.2. İçerisinde %1 TiH_2 bulunan ve 670°C'da 4 dakika köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerin gözenek yapıları
a) %10 def., b) %30 def., c) %50 def., d) %70 def.

6.3. Deformasyon Miktarının Yoğunluğa Etkisi

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen yoğunluk grafikleri EK-2'de verilmiştir. Numunelerin köpürtme öncesi yoğunlukları yaklaşık 2,66 g/cm³ olarak hesaplanmıştır. Köpürtme sonrası yoğunluklar ise parametrelere bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Fakat EK-2'deki grafikler incelendiğinde herhangi bir sıcaklıkta ve sürede köpürtme işlemine tabii tutulmuş numuneler arasında en düşük

yoğunluğun %70 oranda deforme edilmiş numunelerde elde edildiği görülmektedir. Buna karşın en fazla yoğunluk ise %10 deforme edilmiş numunelerde elde edilmiştir.

Örneğin Şekil 6.4’de içerisinde %0,5 TiH₂ bulunan ve 650°C sıcaklıkta köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerin deformasyon, köpürtme süresi ve yoğunluk ilişkisini gösteren grafik verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numunelerde en düşük yoğunluğun 4,5 dakikada elde edildiği görülmektedir. Bu süre içerisinde %70 oranda deforme edilmiş numunedeki yoğunluk 0,51 g/cm³ olarak hesaplanmıştır. %50 deforme edilmiş numunelerde ise bu oran 0,69 g/cm³, %30 deforme edilmiş numunelerde 1,08 g/cm³ ve %10 deforme edilmiş numunelerde 2,08 g/cm³ olarak hesaplanmıştır.



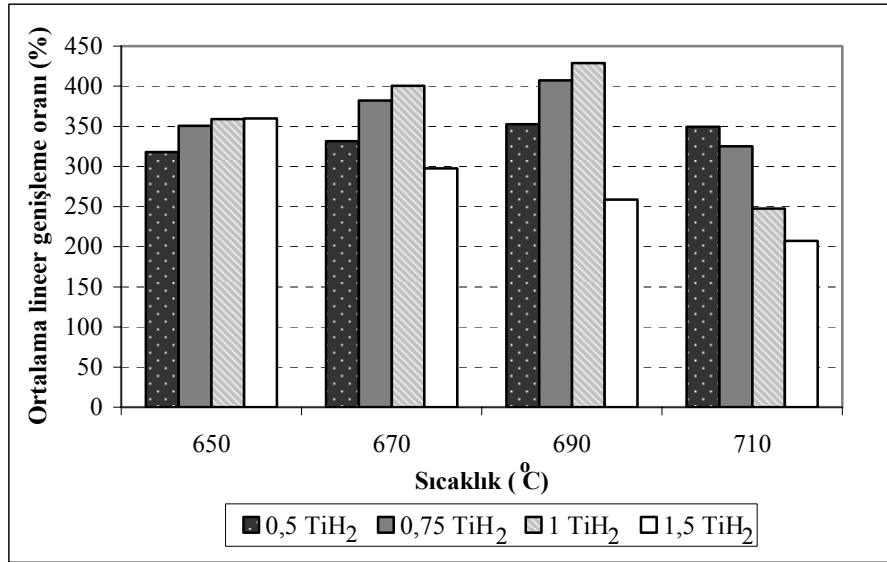
Şekil 6.4. Farklı oranlarda deforme edilmiş, içerisinde %0,5 TiH₂ bulunan numunelerin 650°C sıcaklıkta farklı sürelerde köpürtülmeleri sonucu elde edilen yoğunluk grafiği

Sonuç olarak yoğunluğun deformasyon miktarındaki artışa bağlı olarak azaldığı tespit edilmiştir. Daha önceki çalışmalarda da bahsedildiği gibi artan deformasyon miktarı ile birlikte gözenek boyutunun ve lineer genişleme oranlarının arttığı bilinmektedir. Dolayısıyla köpürme işlemi sırasında hacimsel olarak büyüyen numunelerin ağırlıklarında belirgin bir değişim olmadığından yoğunluklarında

azalmalar meydana gelmiştir. Literatürde de deformasyon miktarındaki artışın yoğunluğu düşürdüğü belirtilmektedir [55].

6.4. Sıcaklığın ve Köpürtücü Madde Miktarının Lineer Genişlemeye Etkisi

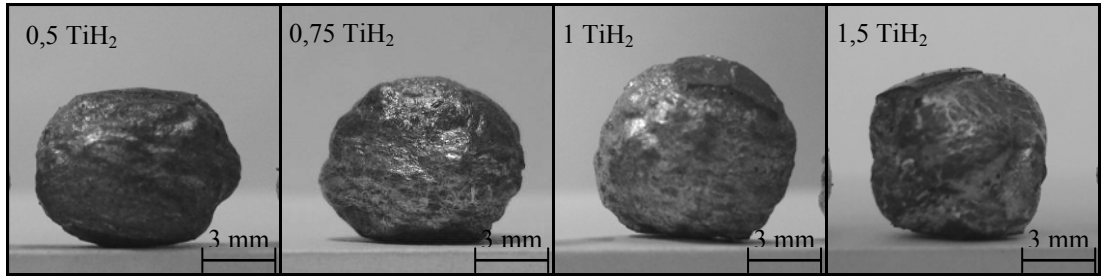
Sıcaklığın ve köpürtücü madde miktarının lineer genişlemeye etkisi incelenmek amacıyla farklı sıcaklıklarda (650°C, 670°C, 690°C, 710°C) ve değişik oranlarda (%0,5-0,75-1-1,5) köpürtücü madde içeren numuneler birbirleri ile kombine edilerek farklı deney şartlarında köpürtme işlemine tabii tutulmuştur. Bu iki parametrenin aynı anda ele alınmasının sebebi, doğrudan birbiri ile bağlantılı olmalarından kaynaklanmaktadır. Deformasyon miktarı ise %70 oranında sabit tutulmuştur. Bunun sebebi ise daha önceki çalışmalarda da bahsedildiği gibi en fazla lineer genişlemenin %70 oranda deforme edilmiş numunelerde elde edilmiş olmasıdır. Şekil 6.5’de %70 oranda deforme edilmiş numunelerin süre gözetmeksizin sıcaklığa ve köpürtücü madde miktarına bağlı olarak ortalama lineer genişleme oranları verilmiştir.



Şekil 6.5. %70 oranda deforme edilmiş numunelerin süre gözetmeksizin sıcaklığa ve köpürtücü madde miktarına bağlı ortalama lineer genişleme grafiği

Grafiğe bakıldığında 650°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numuneler arasında ortalama en fazla lineer genişlemenin %360 ile içerisinde %1,5 TiH₂ içeren

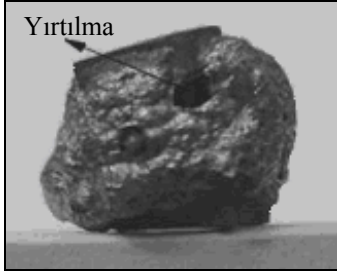
numunelerde meydana geldiği görülmektedir. Bu sıcaklıkta en düşük ortalama lineer genişleme ise %318 ile içerisinde %0,5 TiH₂ bulunduran numunelerde elde edilmiştir. 650°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerde köpürtücü madde miktarındaki artışın, lineer genişlemeyi artırıcı yönde etki ettiği görülmektedir. Lineer genişlemedeki bu fark, köpürtücü maddenin hidrojen içeriğine bağlı olarak değişkenlik göstermesinden kaynaklanmaktadır. Yani köpürtücü madde miktarının artması ile açığa çıkan hidrojen gazı artışı lineer genişlemeyi artırmaktadır. Benzer şekilde ilave edilen TiH₂ miktarı arttıkça lineer genişleme oranının arttığı literatürde de verilmektedir [48, 56]. Resim 6.3’de içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 650°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerin maksimum lineer genişleme sonucunda elde edilmiş köpük yapıları verilmektedir.



Resim 6.3. İçerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 650°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numuneler

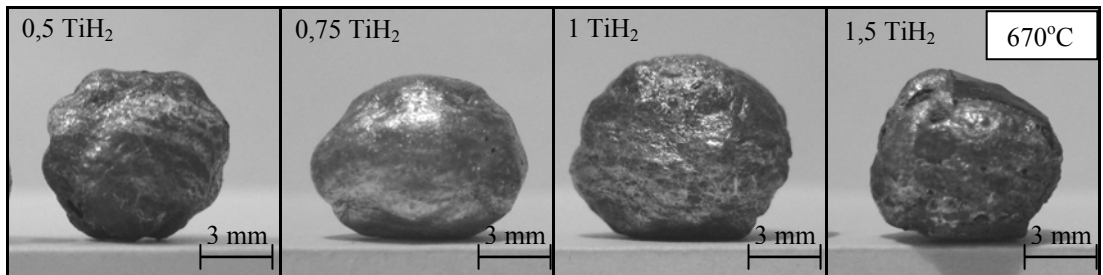
670°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numuneler arasında en fazla lineer genişlemenin %400 ile içerisinde %1 TiH₂ içeren numunelerde meydana geldiği görülmektedir. Bu sıcaklıkta en düşük lineer genişleme ise %297 ile içerisinde %1,5 TiH₂ bulunduran numunelerde elde edilmiştir. Benzer şekilde 690°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numuneler arasında da en fazla lineer genişlemenin %428 ile içerisinde %1 TiH₂ içeren numunelerde meydana geldiği görülmektedir. Bu sıcaklıkta en düşük lineer genişleme ise %258 ile içerisinde %1,5 TiH₂ bulunduran numunelerde elde edilmiştir. Burada dikkat çekici husus %1,5 TiH₂ içeren numuneler 650°C’da maksimum lineer genişleme oranına sahipken, 670°C ve 690°C sıcaklıklarda en düşük lineer genişleme oranlarına sahiptir. Bu fark lineer genişlemeye yalnızca köpürtücü madde miktarın değil, aynı zamanda sıcaklığında

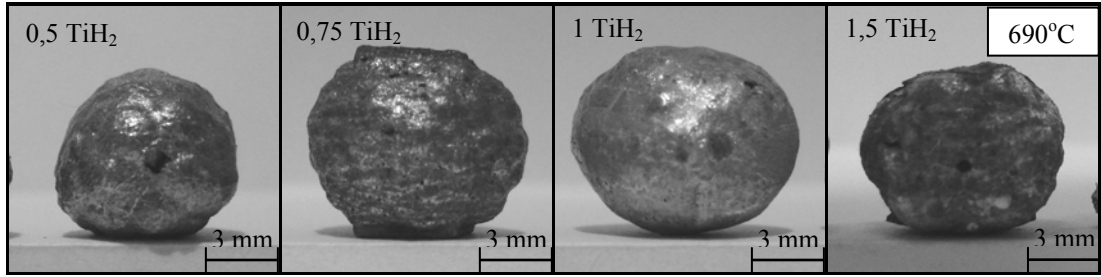
etkisi olduğunu göstermektedir. Literatürde lineer genişleme oranının sadece köpürtücü madde miktarına bağlı olmadığı aynı zamanda ergiyik viskozitesine ve yüzeyden ayrılan köpürtücü madde miktarına bağlı olduğu belirtilmiştir [6]. Bu doğrultuda sıcaklıktaki artışın, köpürme işlemi sırasında ergiyik halde bulunan numunenin viskozitesini düşürdüğü, böylelikle yapı içerisinde bulunan hidrojen gazının daha rahat genişleme gösterdiği anlaşılmıştır. Ancak bu genişlemenin devam etmesi, köpük yapıda hücre zarının incelmesine ve zarın yırtılmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla yapı içerisinde hapsedilmiş hidrojen gazının bu bölgelerden rahatlıkla uzaklaştığı ve çöküntülerin başladığı görülmüştür (Resim 6.4). Bunun sonucu olarak %1,5 TiH_2 içeren numunelerin artan sıcaklıkla beraber lineer genişleme oranlarında azalmalar ve yapıda düzensizlikler meydana gelmiştir.



Resim 6.4. Köpürtme işlemi sırasında yapıda meydana gelen yırtılma

Resim 6.5’de içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan, 670°C ve 690°C sıcaklıklarda köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerin maksimum lineer genişleme neticesinde elde edilen köpük yapıları verilmektedir.

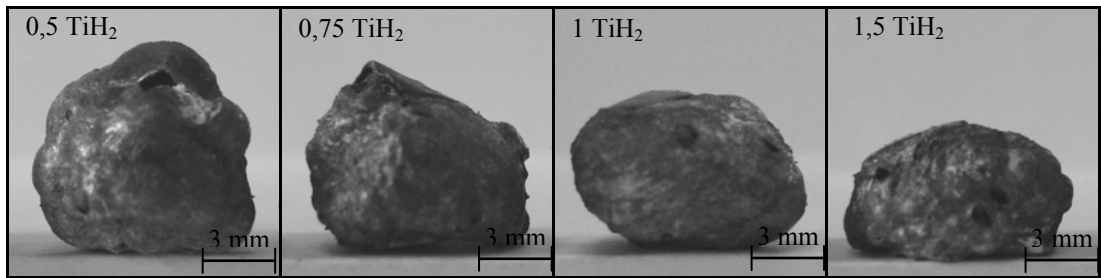




Resim 6.5. İçerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan, 670°C ve 690°C sıcaklıklarda köpürtme işlemine tabii tutulmuş numuneler

710°C'da köpürtme işlemine tabii tutulan numuneler arasında en fazla lineer genişlemenin %349 ile içerisinde %0,5 TiH₂ içeren numunelerde meydana geldiği görülmektedir. Bu sıcaklıkta en düşük lineer genişleme ise %207 ile içerisinde %1,5 TiH₂ bulunduran numunelerde elde edilmiştir. Hem köpürtücü madde miktarındaki artış, hem de sıcaklıktaki artış birlikteliği daha önce bahsedilen nedenlerden dolayı köpük yapının lineer genişleme oranını düşürdüğü belirtilmiştir.

Resim 6.6'da içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 710°C'da köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerin maksimum lineer genişleme neticesinde elde edilen köpük yapıları verilmektedir.



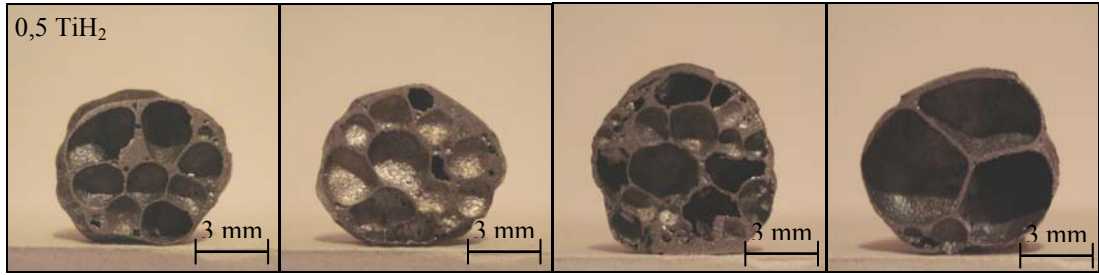
Resim 6.6. İçerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 710°C'da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numuneler
Netice itibariyle sıcaklığın veya köpürtücü madde miktarının tek başına lineer genişlemeye etki etmediği anlaşılmıştır. Yukarıdaki sonuçlara bakıldığında en ideal köpüğün, içerisine %1 köpürtücü madde ilave edilerek 690°C'da köpürtme işlemine tabii tutulması ile elde edilebileceği anlaşılmıştır.

6.5. Sıcaklığın ve Köpürtücü Madde Miktarının Gözenek Yapısı ile Boşluk Miktarına Etkisi

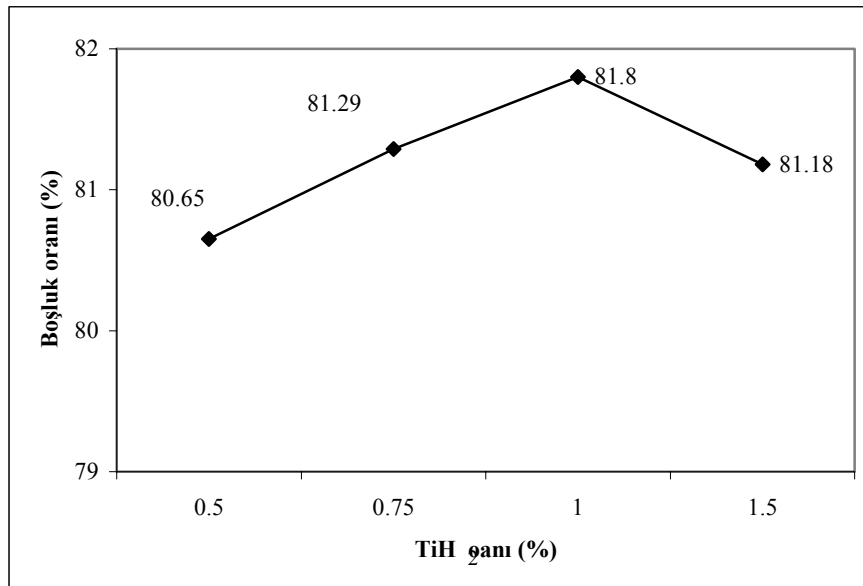
Sıcaklığın ve köpürtücü madde miktarının gözenek yapısı ve boşluk oranına etkisi incelenmek amacıyla %70 oranda deforme edilmiş ve değişik oranlarda (%0,5-0,75-1-1,5) köpürtücü madde içeren numuneler birbirleri ile kombine edilerek farklı sıcaklıklarda (650°C, 670°C, 690°C, 710°C) köpürtme işlemine tabii tutulmuştur. Deneysel çalışmalar neticesinde maksimum oranda lineer genişleme gösteren numunelerin gözenek yapıları aşağıdaki resimlerde gösterilmektedir.

Resim 6.7’de %70 oranda deforme edilmiş ve içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan numunelerin 650°C sıcaklıkta köpürtülmesi sonucunda elde edilen gözenek yapıları gösterilmektedir. Genel olarak numunelerin gözenek yapılarına bakıldığında, köpürtücü madde miktarındaki artışla beraber gözenek boyutlarında irileşmenin meydana geldiği görülmektedir. Yakından incelendiğinde ise içerisinde %0,5 ve %0,75 TiH₂ bulunan numunelerde gözeneklerin homojen dağılımlı ve küresele yakın düzgün geometrik şekillerde olduğu görülmektedir. %1 TiH₂ içeren numunelerde ise daha düzensiz bir yapının meydana geldiği, %1,5 TiH₂ içeren numunelerde gözeneklerin birleşmesi neticesinde daha iri yapıların oluştuğu görülmektedir. Şekil 6.6’da değişik oranlarda köpürtücü madde içeren ve 650°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin maksimum oranda lineer genişleme sergilemeleri sonucu yapı içerisinde oluşan boşluk miktarı verilmektedir. Grafiğe bakıldığında numuneler arasında boşluk miktarının çok fazla farklılık göstermediği, bütün numunelerde ortalama %81 boşluğun oluştuğu görülmektedir. Ancak Resim 6.7’ye bakıldığında numunelerin gözenek sayısı ve boyutunda farklılıkların olduğu açıkça görülmektedir. O halde 650°C’da köpürtme işlemine tabi tutulan numunelerde köpürtücü madde miktarındaki artışın boşluk miktarına çok fazla etkisi olmadığı, gözeneklerin şekline ve boyutuna etki ettiği anlaşılmaktadır.

0,75 TiH₂1 TiH₂1,5 TiH₂



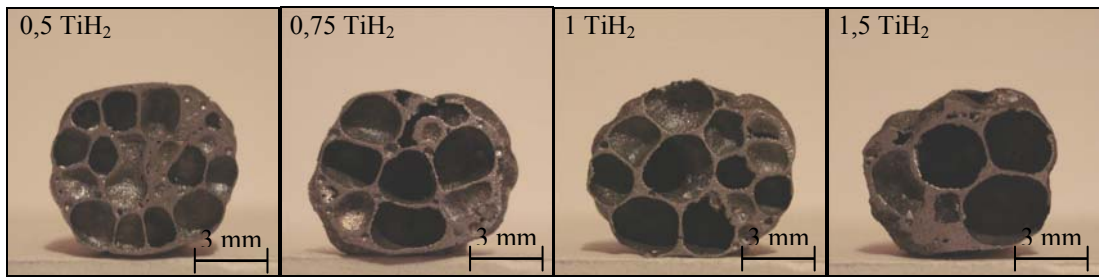
Resim 6.7. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 650°C'da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin gözenek yapıları



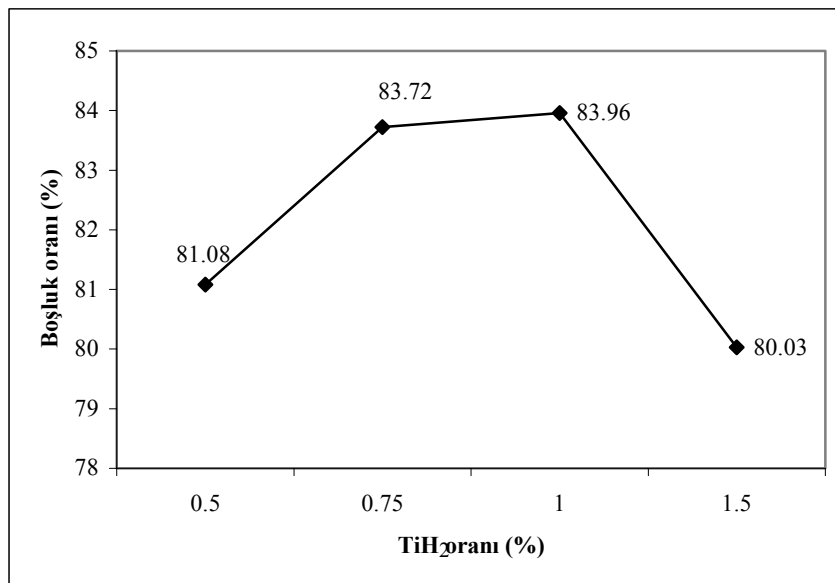
Şekil 6.6. 650°C'da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin maksimum oranda lineer genişleme sergilemeleri sonucu yapı içerisinde oluşan boşluk miktarının köpürtücü madde miktarına göre değişim grafiği

Resim 6.8'de %70 oranda deforme edilmiş ve içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan numunelerin 670°C sıcaklıkta köpürtülmesi sonucunda elde edilen gözenek yapıları gösterilmektedir. Genel olarak numunelerin gözenek yapılarına bakıldığında içerisinde %0,5 TiH₂ bulunan numunelerde oluşan gözeneklerin homojen dağılımlı ve boyutlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. %0,75 ve %1 TiH₂ içeren numunelerde ise yapı içerisinde her bölgede gözenegın olduğu ancak %0,5 TiH₂ içeren numunelere kıyasla gözenek boyutlarının birbirinden farklı ve daha iri olduğu görülmektedir. %1,5 TiH₂ içeren

numunelerde ise gözeneklerin birleşmesi neticesinde daha iri yapıların oluştuğu görülmektedir. Şekil 6.7’de değişik oranlarda köpürtücü madde içeren ve 670°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin maksimum oranda lineer genişlemeleri sonucu yapı içerisinde oluşan boşluk miktarı verilmektedir. Grafiğe bakıldığında %1 TiH₂ içeren numunelerde %83,96 ile en fazla boşluk miktarının yapıda oluştuğu görülmektedir. Buna karşın en az boşluğun %80,03 ile %1,5 TiH₂ içeren numunelerde elde edildiği görülmektedir. Boşluk oranındaki ani düşüş numunelerde meydana gelen çöküntülerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Köpürtücü madde miktarındaki artışla birlikte numunelerin gözenek sayısında azalma, boyutlarında ise irileşmelerin meydana geldiği açıkça görülmektedir.

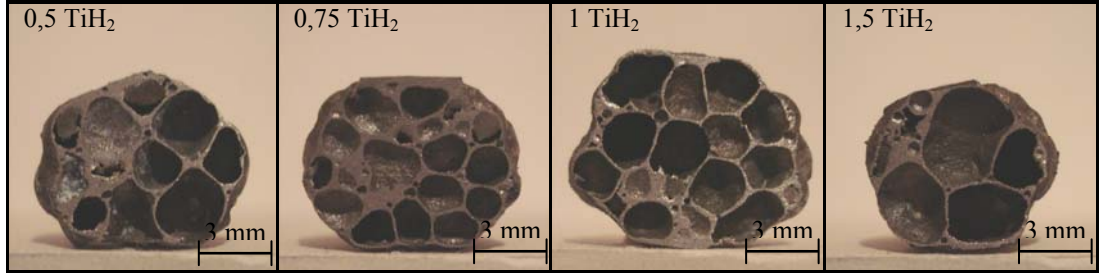


Resim 6.8. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 670°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin gözenek yapıları

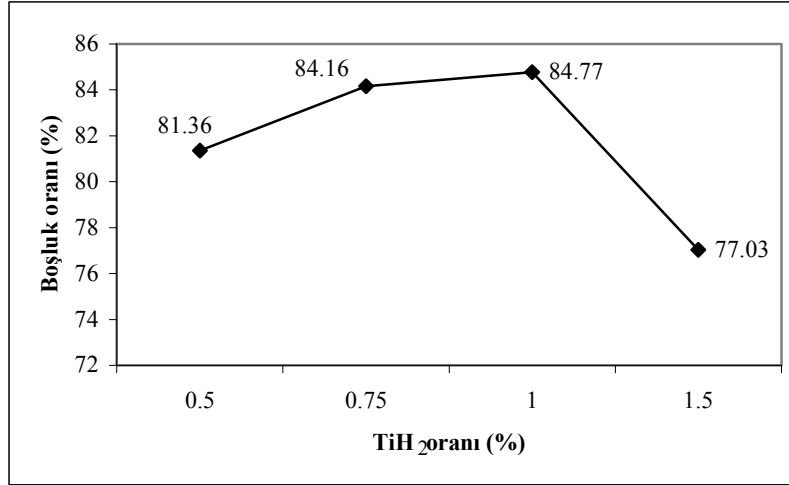


Şekil 6.7. 670°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin maksimum oranda lineer genişleme sergilemeleri sonucu yapı içerisinde oluşan boşluk miktarının köpürtücü madde miktarına göre değişim grafiği

650°C ve 670°C sıcaklıklarda elde edilen köpüklerin gözenek yapıları ve boşluk miktarları birbiriyle kıyaslandığında, içerisinde %0,5-0,75 ve 1 TiH₂ bulunan numunelerin gözenek ebatlarında irileşme ve boşluk miktarlarında artış meydana gelmiştir. %1,5 TiH₂ içeren numunede ise gözeneklerde küçülmelerin ve boşluk miktarlarında azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Resim 6.9’da %70 oranda deforme edilmiş ve içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan numunelerin 690°C sıcaklıkta köpürtülmesi sonucunda elde edilen gözenek yapıları gösterilmektedir. İçerisinde %0,5 TiH₂ bulunan numunelere bakıldığında yapı içerisinde her yerde gözenegin oluştuğu, ancak gözenek boyutlarının bazı bölgelerde iri, bazı bölgelerde ise ufak olduğu görülmektedir. Bundan dolayı çok homojen bir boyut dağılımından söz etmek mümkün değildir. %0,75 TiH₂ içeren numunelerde gözenek dağılımının %0,5 TiH₂ içeren numuneye kıyasla homojen olduğu ve gözenek boyutlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. %1 TiH₂ içeren numunelerde ise gözenek boyutlarının birbirine çok yakın olduğu ve homojen bir dağılım sergilediği dikkat çekmektedir. Ayrıca %0,75 TiH₂ içeren numune ile gözenek dağılımı açısından benzerlik varken, gözenek boyutunda belirgin bir farkın olduğu görülmektedir. %1,5 TiH₂ içeren numunelerde ise gözeneklerin birleşmesi neticesinde daha iri yapıların oluştuğu gözlenmiştir. Şekil 6.8’de değişik oranlarda köpürtücü madde içeren ve 690°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin maksimum oranda lineer genişleme sergilemeleri sonucu yapı içerisinde oluşan boşluk miktarı verilmektedir. Grafiğe bakıldığında %1 TiH₂ içeren numunelerde %84,77 ile en fazla boşluk miktarının yapıda oluştuğu görülmektedir. Ancak %1,5 TiH₂ içeren numunelerde ise boşluk miktarlarında belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebi, artan sıcaklık ve köpürtücü madde miktarı köpürtme işlemi sırasında gözeneklerin birleşmesine ve yer yer çöküntülere neden olmasıdır (Bkz. Resim 6.9).



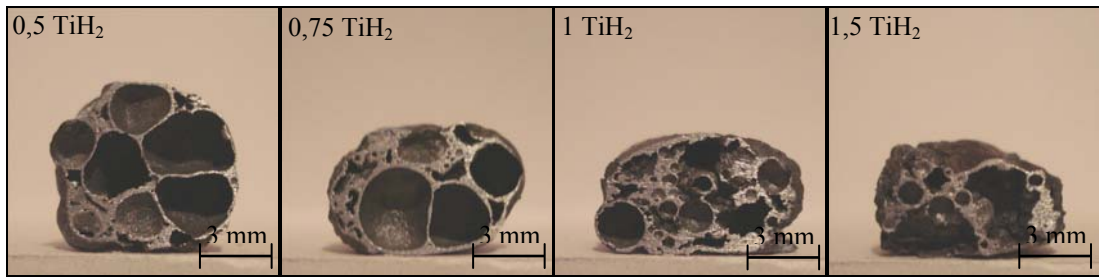
Resim 6.9. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 690°C'da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin gözenek yapıları



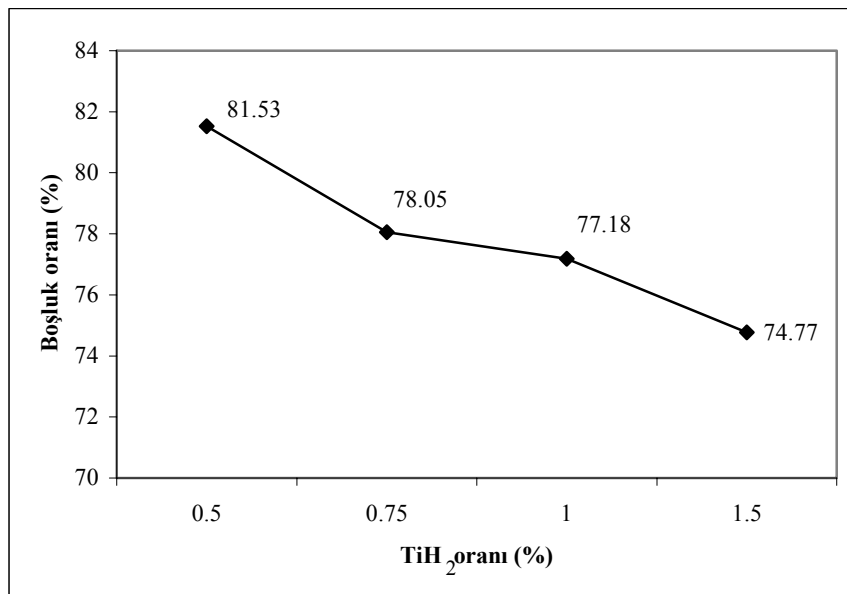
Şekil 6.8. 690°C'da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin maksimum oranda lineer genişleme sergilemeleri sonucu yapı içerisinde oluşan boşluk miktarının köpürtücü madde miktarına göre değişim grafiği

Resim 6.10'da %70 oranda deforme edilmiş ve içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan numunelerin 710°C sıcaklıkta köpürtülmesi sonucunda elde edilen gözenek yapıları gösterilmektedir. Numunelerin gözenek yapılarına bakıldığında köpürtücü madde miktarındaki artışın, gözenek ebatlarında küçülmeye neden olduğu görülmektedir. İçerisinde %0,5 TiH₂ bulunan numunelere bakıldığında, yapı içerisinde iri ve az sayıda gözenek oluştuğu görülmektedir. %0,75 TiH₂ içeren numunelerde gözenek dağılımının %0,5 TiH₂ içeren numuneye kıyasla daha düzensiz olduğu, yer yer çökmelerin meydana geldiği görülmektedir. %1 ve %1,5 TiH₂ içeren numunelerde ise daha fazla çöküntünün meydana geldiği, bunun neticesinde de gözenek boyutlarının küçüldüğü ve gözeneklerin kapandığı

gözlenmiştir. Şekil 6.9’da değişik oranlarda köpürtücü madde içeren ve 710°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin maksimum oranda lineer genişlemeleri sonucu yapı içerisinde oluşan boşluk miktarı verilmektedir. Grafiğe bakıldığında en fazla boşluk oranının %81,53 ile %0,5 TiH₂ içeren numunelerde , en az boşluk oranının ise %74,77 ile içerisinde %1,5 TiH₂ bulunduran numunelerde olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda sıcaklıktaki ve köpürtücü madde miktarındaki artış ile birlikte köpürme işlemi sırasında ergiyik halde bulunan numunelerde çöküntülerin başladığı görülmüştür. Bunun sonucu olarak %1 ve %1,5 TiH₂ içeren numunelerin artan sıcaklıkla beraber boşluk miktarlarında azalmalar ve yapıda düzensizlikler meydana gelmiştir (Bkz. Resim 6.10).



Resim 6.10. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 710°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin gözenek yapıları



Şekil 6.9. 710°C’da köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin maksimum oranda lineer genişleme sergilemeleri sonucu yapı içerisinde oluşan boşluk miktarının köpürtücü madde miktarına göre değişim grafiği

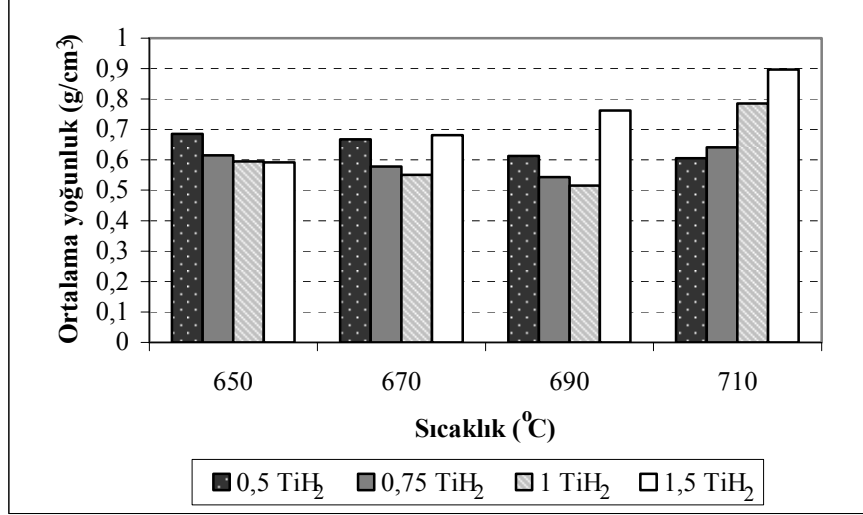
Yapılan çalışmayı özetlemek gerekirse, sıcaklık ve köpürtücü madde miktarındaki artışın köpük yapıda daha iri gözeneklerin oluşumuna neden olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi köpürtme sıcaklığındaki artışın, ergiyik halde bulunan metalin viskozitesini düşürmesi ile açıklanabilir. Viskozitenin azalmasıyla gözenek üzerine etki eden drenaj etkisi azalacağından, gözenek içerisindeki hidrojen gazının basıncı, numune direncinden fazla olmakta ve gözenekler daha kolay büyümektedir [56-58]. Bu nedenle 710°C sıcaklıkta üretilen alüminyum köpüğün gözenek boyutu düşük sıcaklıklara kıyasla daha iri oluşmuştur. Bundan dolayı 650°C, 670°C ve 690°C sıcaklıklarda elde edilen gözenek yapılarının alüminyum köpük için ideal olduğu sonucu çıkarılabilir. Ancak lineer genişleme oranları dikkate alındığında en ideal köpüğün 690°C’da elde edildiği görülmektedir.

Köpürtücü madde miktarındaki artış ise (%1,5 TiH₂) serbest kalan H₂ gazı miktarının artmasına ve gözenek ebatlarının büyümesine neden olmaktadır. Bu nedenle hidrojen gazının yüzeyden dışarı çıkma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Ancak genleşmenin devam etmesi, köpük yapıda hücre zarının incelmeye ve zarın yırtılmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla yapı içerisinde hapsedilmiş hidrojen gazının bu bölgelerden rahatlıkla uzaklaştığı ve çöküntülerin başladığı görülmüştür (Bkz. Resim 6.4). Bunun sonucu olarak %1,5 TiH₂ içeren numunelerin artan sıcaklıkla beraber lineer genişleme oranlarında da azalmalar meydana gelmiştir. Yapılan çalışmada küresel şekilli alüminyum köpük için %0,5–0,75 ve %1 TiH₂ ilavesinin uygun olduğu, ancak lineer genişleme oranları dikkate alındığında en ideal köpüğün %1 TiH₂ ile elde edildiği tespit edilmiştir.

6.6. Sıcaklığın ve Köpürtücü Madde Miktarının Yoğunluğa Etkisi

Sıcaklığın ve köpürtücü madde miktarının yoğunluğa etkisi incelenmek amacıyla farklı sıcaklıklarda (650°C, 670°C, 690°C, 710°C) ve değişik oranlarda (%0,5–0,75–

1–1,5) köpürtücü madde içeren ve %70 oranda deforme edilmiş numunelerin yoğunlukları karşılaştırılmıştır. Şekil 6.10’da %70 oranda deforme edilmiş numunelerin süre gözetmeksizin sıcaklığa ve köpürtücü madde miktarına bağlı olarak ortalama yoğunlukları verilmiştir.



Şekil 6.10. %70 oranda deforme edilmiş numunelerin süre gözetmeksizin sıcaklığa ve köpürtücü madde miktarına bağlı ortalama yoğunluk grafiği

Grafiğe bakıldığında 650°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numuneler arasında ortalama en düşük yoğunluğun 0,59 g/cm³ ile içerisinde %1,5 TiH₂ içeren numunelerde elde edildiği görülmektedir. Bu sıcaklıkta en fazla ortalama yoğunluk ise 0,68 g/cm³ ile içerisinde %0,5 TiH₂ bulunduran numunelerde elde edilmiştir. 650°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerde köpürtücü madde miktarındaki artışın, yoğunluğa azaltıcı yönde etki ettiği görülmektedir. Bu etkinin nedeni ilave edilen TiH₂ miktarındaki artışın lineer genişle oranını artırması ile açıklanabilir.

670°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numuneler arasında ortalama en düşük yoğunluk 0,59 g/cm³ ile içerisinde %1 TiH₂ içeren numunelerde hesaplanmıştır. Bu sıcaklıkta en fazla yoğunluk ise 0,68 g/cm³ ile içerisinde %1,5 TiH₂ bulunduran numunelerde elde edilmiştir. Benzer şekilde 690°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numuneler arasında da en düşük yoğunluğun 0,51 g/cm³ ile içerisinde %1

TiH₂ içeren numunelerde meydana geldiği görülmektedir. Bu sıcaklıkta en fazla yoğunluk ise 0,76 g/cm³ ile içerisinde %1,5 TiH₂ bulunduran numunelerde elde edilmiştir. Burada dikkat çekici husus %1,5 TiH₂ içeren numunelerin 650°C’da ortalama en düşük yoğunluğa sahipken, 670°C ve 690°C sıcaklıklarda yoğunluklarının maksimum seviyede olmasıdır. Bu fark, yoğunluğa yalnızca köpürtücü madde miktarın değil, aynı zamanda sıcaklığında etkisi olduğunu göstermektedir. Sıcaklık ve köpürtücü madde miktarındaki artışın, yoğunluğu düşürmesi doğrudan lineer genişleme miktarıyla ilişkilendirilebilir. Daha önceki çalışmalarda sıcaklıktaki artışın, köpürme işlemi sırasında ergiyik halde bulunan numunenin viskozitesini düşürdüğü, artan köpürtücü madde miktarıyla yapı içerisinde bulunan hidrojen gazının daha fazla genleşme gösterdiği belirtilmiştir. Ancak bu genleşmenin devam etmesi, köpük yapıda hücre zarının incelmeye ve zarın yırtılmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla yapı içerisinde hapsedilmiş hidrojen gazının bu bölgelerden rahatlıkla uzaklaştığı ve çöküntülerin başladığı daha önceki çalışmalardan dolayı bilinmektedir. Bunun sonucu olarak %1,5 TiH₂ içeren numunelerin artan sıcaklıkla beraber yoğunluklarında da artış meydana gelmiştir.

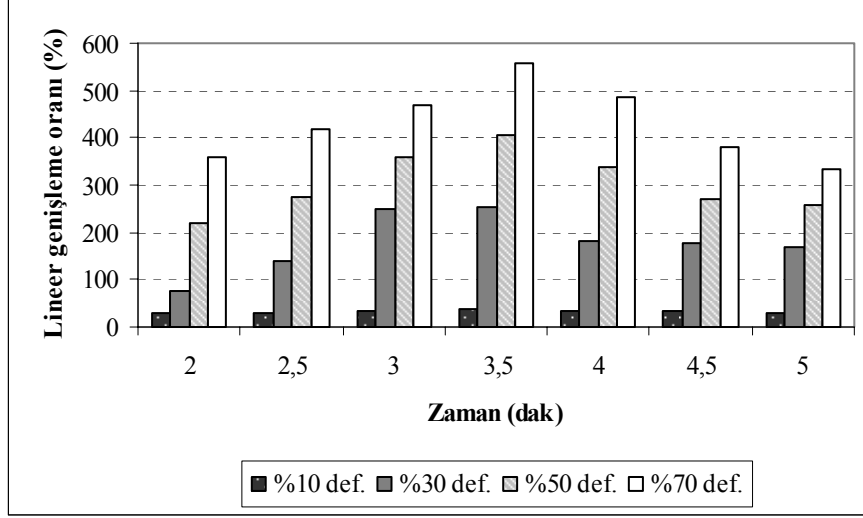
710°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numuneler arasında en düşük ortalama yoğunluk 0,60 g/cm³ ile içerisinde %0,5 TiH₂ içeren numunelerde elde edilmiştir. Aynı sıcaklıkta en fazla yoğunluk ise 0,89 g/cm³ ile içerisinde %1,5 TiH₂ bulunduran numunelerde elde edilmiştir. Hem köpürtücü madde miktarındaki, hem de sıcaklıktaki artışın birlikteliği daha önceden bahsedildiği gibi köpük yapının lineer genişleme oranını düşürdüğü, bundan dolayı yoğunluğu artırdığı bilinmektedir. Buradan en ideal köpüğün, içerisine %1 köpürtücü madde ilave edilerek 690°C’da köpürtme işlemine tabii tutulması ile elde edilebileceği sonucu çıkartılmıştır.

6.7. Köpürtme Süresinin Lineer Genişlemeye Etkisi

Ek-1’de verilen lineer genişleme grafiklerine bakıldığında, köpürtme süresine deformasyondan daha çok sıcaklığın ve köpürtücü madde miktarının etkisi olduğu görülmektedir. Örneğin Şekil 6.11’de verilen 690°C sıcaklıkta ve %1 TiH₂ içeren numunelerin lineer genişleme grafiğine bakıldığında 2 dakika köpürtme işlemine

tabii tutulan numuneler arasında en fazla lineer genişlemenin %357 ile %70 deforme edilmiş numunelerde elde edildiği görülmektedir. Aynı sürede %50 deforme edilmiş numunelerde %217, %30 deforme edilmiş numunelerde %78 ve %10 deforme edilmiş numunelerde %30 oranlarında lineer genişleme elde edilmiştir. 3,5 dakikada ise %556 ile %70 oranda deforme edilmiş numunelerin maksimum, %37 ile %10 deforme edilmiş numunelerin minimum lineer genişleme sergiledikleri görülmektedir. Benzer şekilde 5 dakika köpürtülen numunelerde de en fazla lineer genişlemenin %70 deforme edilmiş numunelerde, en az lineer genişlemenin ise yine %10 deforme edilmiş numunelerde elde edildiği görülmektedir. Buradan köpürtme süresi değişse de numuneler arasında lineer genişleme oranlarındaki farkın değişmediği tespit edilmiştir. Bunun sebebi daha önceki “Deformasyon Miktarının Lineer Genişlemeye Etkisi” konulu çalışmada açıklanmıştır.

Grafiğe bakıldığında sabit bir deformasyonda artan süreyle birlikte lineer genişleme oranının belirli bir süreye kadar arttığı, bu noktadan sonra tekrardan azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Örneğin %70 oranda deforme edilmiş numunelerde 2 dakikada %357, 2,5 dakikada %416, 3,5 dakikada %556 lineer genişleme elde edilmiştir. Burada lineer genişlemenin 3,5 dakikaya kadar maksimum seviyeye ulaştığı görülmektedir. Dolayısıyla köpürtme süresindeki artışın serbest kalan H_2 gazının belirli bir seviyeye kadar genişlemesine etki ettiği tespit edilmiştir. Ancak genişlemenin devam etmesi, köpük yapıda hücre zarının incelmeye ve zarın yırtılmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla yapı içerisinde hapsedilmiş hidrojen gazının bu bölgelerden rahatlıkla uzaklaştığı ve çöküntülerin başladığı görülmüştür (Bkz. Resim 6.4). Bunun sonucu olarak %70 deforme edilmiş numunelerde 3,5 dakikadan sonra lineer genişleme oranlarında azalmalar meydana gelmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür [57].

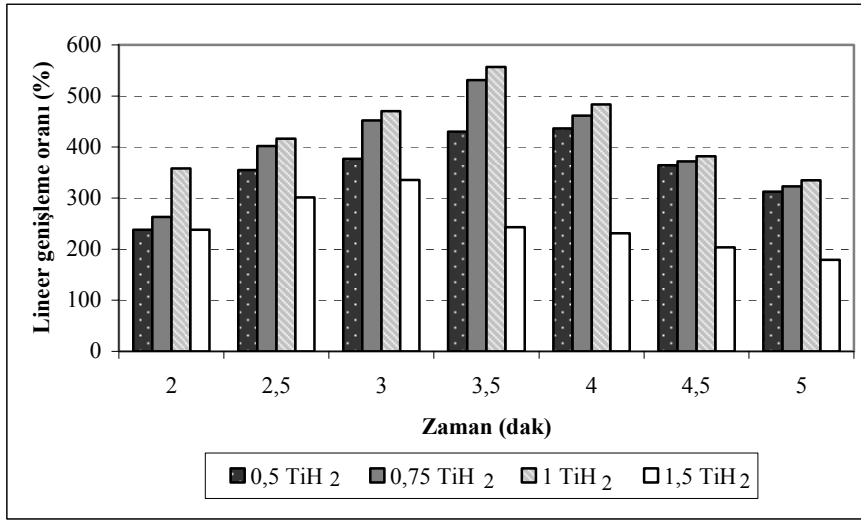


Şekil 6.11. Farklı oranlarda deforme edilmiş ve içerisinde %1 TiH₂ bulunan numunelerin 690°C sıcaklıkta köpürtülmeleri sonucu elde edilen lineer genişleme grafiği

Şekil 6.12’de %70 oranda deforme edilmiş ve içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan numunelerin 690°C sıcaklıkta farklı sürelerde köpürtülmeleri sonucu elde edilen köpük yapıların lineer genişleme grafiği verilmiştir. Burada köpürtücü madde miktarı ile köpürtme süresi arasındaki ilişki irdelenerek lineer genişlemeye etkisi incelenmiştir. Köpürtme sıcaklığının 690°C, deformasyon miktarının %70 olarak belirlenmesinin nedeni daha önceki çalışmalarda ideal sonuçların bu oranlarda elde edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Grafiğe bakıldığında %0,5 TiH₂ içeren numuneler arasında en fazla lineer genişleme 4 dakikada %436 oranında, %0,75 TiH₂ içeren numuneler arasında ise en fazla lineer genişlemenin 3,5 dakikada %531 oranında elde edildiği görülmektedir. Ancak maksimum lineer genişleme 3,5 dakikada %556 ile %1 TiH₂ içeren numunelerde, minimum lineer genişleme ise 3 dakikada %336 ile %1,5 TiH₂ içeren numunelerde elde edilmiştir. Burada TiH₂ miktarındaki artışın, %1’e kadar lineer genişlemeyi artırdığı, köpürtme süresini kısalttığı görülmektedir. TiH₂ oranı %1,5’a çıkartıldığında ise lineer genişleme oranında ve köpürtme süresinde azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Köpürtme süresinin kısa tutulması, yapı içerisinde bulunan hidrojen gazının genişmesi için yeterli gelmediği ve maksimum lineer

genişleme için daha fazla süreye ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır. Ancak köpürtücü madde miktarındaki artışla birlikte yapıda bulunan hidrojen gazı oranının artması, kısa sürede maksimum lineer genişlemeye ulaşılacağını göstermektedir. Bundan dolayı kısa sürede maksimum oranda lineer genişleme sergileyen köpük yapıların elde edilebilmesi için, köpürtücü madde miktarlarının da artırılması gerektiği sonucu çıkarılmaktadır.

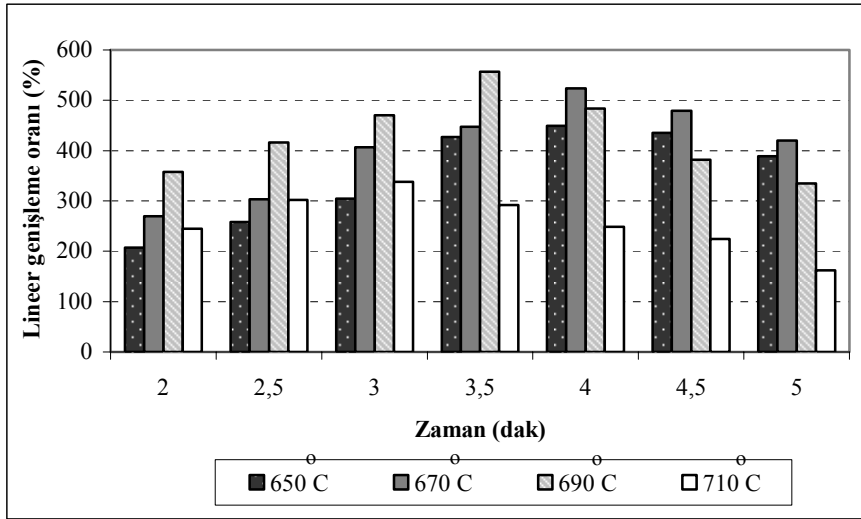


Şekil 6.12. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan numunelerin 690°C sıcaklıkta farklı sürelerde köpürtülmeleri sonucu elde lineer genişleme grafiği

Şekil 6.13’de %70 oranda deforme edilmiş ve içerisinde %1 TiH₂ bulunan numunelerin değişik sıcaklıklarda farklı sürelerde köpürtülmeleri sonucu elde edilen köpük yapıların lineer genişleme grafiği verilmiştir. Burada sıcaklık ile köpürtme süresi arasındaki ilişki irdelenerek lineer genişlemeye etkisi incelenmiştir.

Grafiğe bakıldığında 650°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numuneler arasında en fazla lineer genişleme 4 dakikada %449 oranında, 670°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numuneler arasında ise en fazla lineer genişlemenin 4 dakikada %523 oranında elde edildiği görülmektedir. Ancak maksimum lineer genişleme 3,5 dakikada %556 ile 690°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerde, minimum lineer genişleme ise 3 dakikada %338 ile 710°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerde elde edilmiştir. Burada sıcaklıktaki artışın, 690°C’a kadar lineer

genişlemeyi artırdığı, köpürtme süresini kısalttığı görülmektedir. Sıcaklık 710°C'a çıkartıldığında ise lineer genişleme oranında ve köpürtme süresinde azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Köpürtme süresinin kısa tutulması, yapı içerisinde bulunan hidrojen gazının genişmesi için yeterli gelmediği ve maksimum lineer genişleme için daha fazla süreye ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır. Ancak sıcaklıktaki artışla birlikte ergiyik halde bulunan metalin viskozitesinin düşmesi gözenek üzerine etki eden drenaj etkisi azaltacağından, gözeneklerin daha kolay büyümesine neden olmaktadır [13]. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda daha hızlı köpürmenin meydana geldiği, böylece köpürtme süresini kısalttığı tespit edilmiştir. O halde kısa sürede maksimum oranda lineer genişleme sergileyen köpük yapıların elde edilmesi için, sıcaklığın artırılması gerektiği sonucu çıkarılmaktadır. Yapılan benzer bir çalışmada da artan sıcaklıkla gözenek ebatlarının arttığı ve köpürtme süresinin azaldığı sonucu bulunmuştur [48].



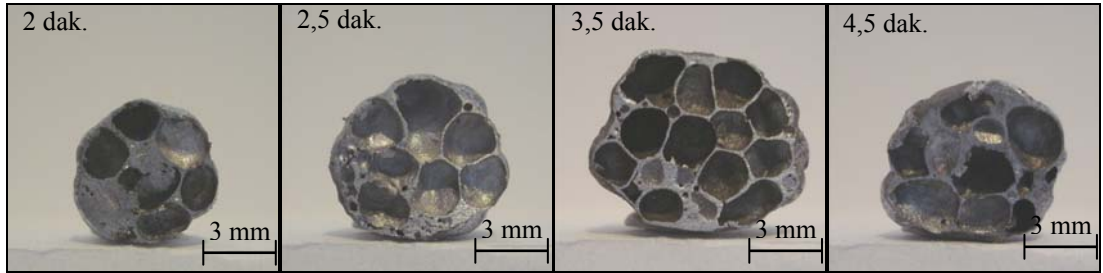
Şekil 6.13. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde %1 TiH₂ bulunan numunelerin değişik sıcaklıklarda ve farklı sürelerde köpürtülmeleri sonucu elde edilen köpük yapıların lineer genişleme grafiği

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda küresel şekilli alüminyum köpük için %70 oranda deforme edilmiş numunelerin, 690°C sıcaklıkta 3,5 dakika köpürtülmesiyle maksimum oranda lineer genişlemenin elde edilebileceği anlaşılmıştır.

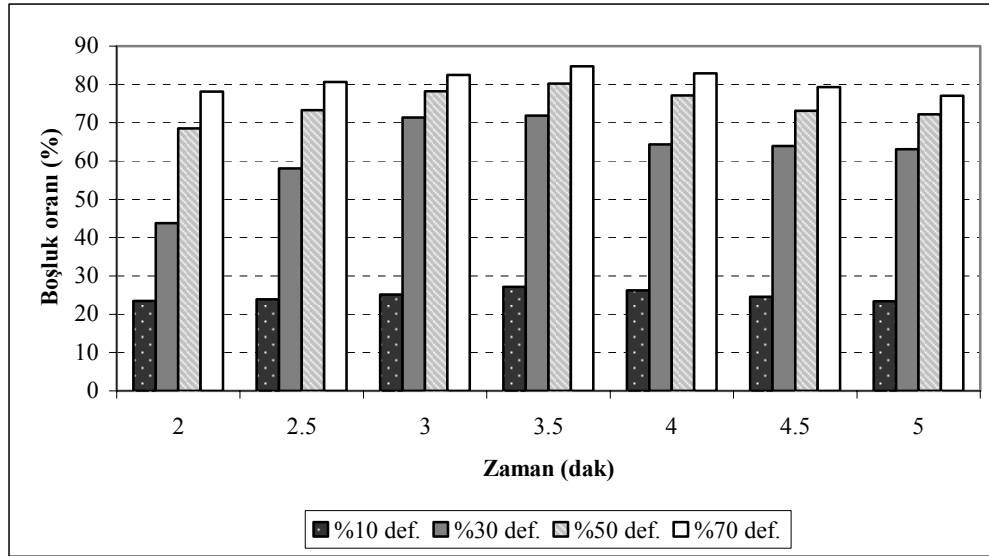
6.8. Köpürme Süresinin Gözenek Yapısına ve Boşluk Miktarına Etkisi

Resim 6.11’de %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde %1 TiH₂ bulunan numunelerin 690°C sıcaklıkta farklı sürelerde köpürtülmesi sonucu elde edilen köpük numunelerin gözenek yapıları verilmiştir. Resme bakıldığında 2 dakika köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerde homojen dağılımlı gözeneklerin oluştuğu, hücre duvarı kalınlıklarının diğerlerine nazaran biraz daha kalın olduğu görülmektedir. 2,5 dakika köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerde ise daha iri ve daha fazla gözenegin oluştuğu görülmektedir. Köpürme süresinin 3,5 dakikaya çıkartılması ile numunelerde diğerlerine kıyasla çok sayıda gözenegin oluştuğu, gözenek ebatlarının birbirine yakın ve küresel şekillerde olduğu görülmektedir. 4,5 dakikada ise gözeneklerde birleşmelerin meydana geldiği, bazı bölgelerde çok küçük boyutlarda gözenegin oluştuğu görülmektedir. Bu gözeneklerin oluşumuna aşırı derecede genişmiş hidrojen gazının etki ettiği düşünülmektedir. Çünkü hidrojen gazının artan süreyle birlikte genişlemeye devam etmesi, köpük yapıda hücre zarının incelmeye ve zarın yırtılmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla bu boşluklardan gaz çıkışına engel olunamadığı için ergiyik haldeki metalin çıkan gazın yerini doldurmasıyla çöküntülerin ve küçük boşlukların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bundan dolayı köpürtme süresi aşırı derce de fazla olan numunelerde irili ve ufaklı gözenekler elde edilmiştir. Şekil 6.14’de içerisinde %1 TiH₂ bulunan ve 690°C sıcaklıkta farklı sürelerde ve sıcaklıklarda köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin boşluk miktarı verilmektedir. Grafiğe bakıldığında bütün numuneler arasında en fazla boşluğun 3,5 dakikada elde edildiği görülmektedir. Bu süre içerisinde %70 oranda deforme edilmiş numunelerde boşluk miktarı %84,77’dir. Aynı süre içerisinde deformasyon miktarındaki azalmanın boşluk miktarında da azalmaya etki ettiği görülmektedir. %50 oranda deforme edilmiş numunelerde boşluk miktarı %80,21, %30 deforme edilmiş numunelerde %71,85 ve %10 deforme edilmiş numunelerde ise bu oran %27,11 olarak hesaplanmıştır. Daha önceki çalışmalarda da bahsedildiği

gibi artan deformasyon miktarı ile yapı içerisinde daha çok boşluğun oluşumu sağlanmaktadır. Ancak bu bölümde deformasyon miktarından daha çok köpürtme süresinin boşluk miktarına etkisi incelenmiştir. Dolayısıyla maksimum oranda boşluk içeren numuneler arasında %70 oranda deforme edilmiş numuneler ele alınmıştır. Örneğin Şekil 6.14’de verilen grafiğe bakıldığında Resim 6.11’de gösterilen numunelerin boşluk miktarı 2 dakika köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerde %78,16 olarak hesaplanmıştır. 2,5 dakikada ise bu oran %80,63, 3,5 dakikada %84,77 ve 4,5 dakikada %79,26 olarak hesaplanmıştır. Buradan köpürtme süresinin belirli bir seviyeye kadar artması numunelerde maksimum oranda boşluk oluşumuna etki ettiği sonucu çıkarılmaktadır. Ancak köpürtme süresinin maksimum lineer genişleme süresini aştığı anda numunelerin içerdiği boşluk miktarında azalmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda lineer genişleme oranındaki değişimin, yapı içerisinde mevcut olan boşluk miktarı ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. EK-1 ve EK-3’de verilen lineer genişleme grafikleri ile boşluk miktarı grafikleri kıyaslandığında bu sonuç doğrulanmaktadır.



Resim 6.11. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde %1 TiH_2 bulunan ve $690^{\circ}C$ sıcaklıkta farklı sürelerde köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin gözenek yapıları

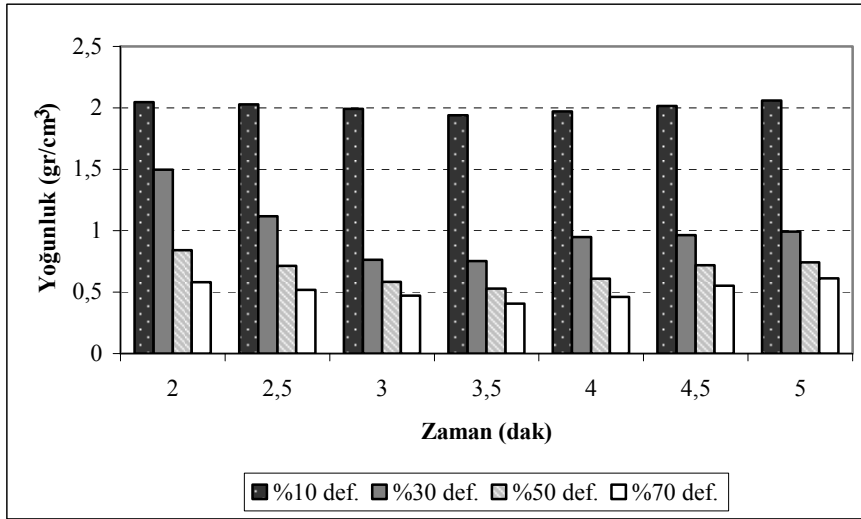


Şekil 6.14. Farklı oranlarda deforme edilmiş, içerisinde %1 TiH_2 bulunan ve $690^\circ C$ sıcaklıkta köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerdeki boşluk miktarının zamana göre değişim grafiği

6.9. Köpürme Süresinin Yoğunluğa Etkisi

EK-2’de verilen yoğunluk grafiklerine bakıldığında köpürtme süresine, daha önce bahsedildiği gibi deformasyondan daha çok sıcaklığın ve köpürtücü madde miktarının etkisi olduğu görülmektedir. Örneğin Şekil 6.15’de verilen $690^\circ C$ sıcaklıkta ve %1 TiH_2 içeren numunelerin yoğunluk grafiğine bakıldığında 2 dakika köpürtme işlemine tabii tutulan numuneler arasında en düşük yoğunluğun $0,58 \text{ g/cm}^3$ ile %70 deforme edilmiş numunelerde elde edildiği görülmektedir. Aynı sürede %50 deforme edilmiş numunelerde yoğunluk $0,84 \text{ g/cm}^3$, %30 deforme edilmiş numunelerde $1,49 \text{ g/cm}^3$ ve %10 deforme edilmiş numunelerde $2,04 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. 3,5 dakikada ise $0,40 \text{ g/cm}^3$ ile %70 oranda deforme edilmiş numunelerde minimum, $1,94 \text{ g/cm}^3$ ile %10 deforme edilmiş numunelerde ise maksimum oranda yoğunluk elde edilmiştir. Benzer şekilde 5 dakika köpürtülen numunelerde de en düşük yoğunluğun %70 deforme edilmiş numunelerde, en fazla yoğunluğun ise yine %10 deforme edilmiş numunelerde elde edildiği görülmektedir. Yani köpürtme süresi değişse de numuneler arasındaki yoğunluk farkı değişmemektedir.

Grafiğe bakıldığında sabit bir deformasyonda artan süreyle birlikte yoğunlukta belirli bir süreye kadar düşüş, bu noktadan sonra tekrardan bir artışın meydana geldiği görülmektedir. Örneğin %70 oranda deforme edilmiş numunelerde 2 dakikada 0,58 g/cm³, 2,5 dakikada 0,51 g/cm³ ve 3,5 dakikada 0,40 g/cm³ yoğunluk elde edilmiştir. Burada yoğunluğun 3,5 dakikaya ulaşıldığında minimum seviyede olduğu görülmektedir. Numunelerdeki lineer genişleme oranındaki artışın, yoğunluğa azaltıcı yönde etki etmesi, bunun sebebi olarak gösterilebilir. Köpürtme işlemi sırasında maksimum oranda lineer genişleme sergilemiş olan numunelerin köpürtme öncesi ve köpürtme sonrası ağırlıkları arasında belirgin bir farkın olmadığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla hacimsel farkın artması, yoğunluğun düşmesine neden olmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda köpürtme süresindeki belirgin bir artışın lineer genişlemeyi artırdığı, artan süreyle birlikte numunelerde çökmelerin meydana geldiği belirtilmiştir. Bunun sonucunda köpürtme süresindeki belirgin bir artışın yoğunluğa azaltıcı yönde etki ettiği, artan süreyle birlikte ise yoğunluk miktarında tekrardan artışların meydana geldiği tespit edilmiştir

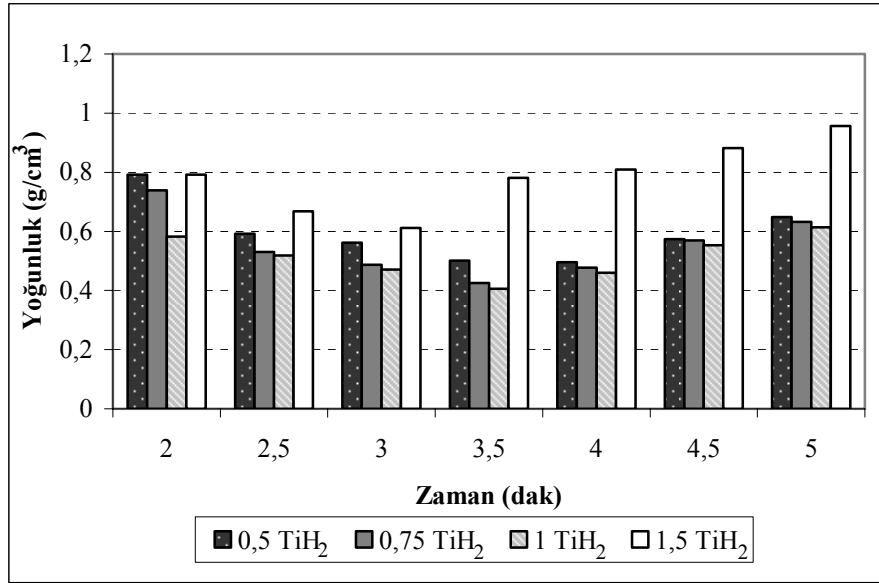


Şekil 6.15. Farklı oranlarda deforme edilmiş ve içerisinde %1 TiH₂ bulunan numunelerin 690°C sıcaklıkta köpürtülmeleri sonucu elde edilen yoğunluk grafiği

Şekil 6.16'da %70 oranda deforme edilmiş ve içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan numunelerin 690°C sıcaklıkta farklı sürelerde

köpürtülmeleri sonucu elde edilen köpük yapıların yoğunluk grafiği verilmiştir. Köpürtme sıcaklığının 690°C , deformasyon miktarının %70 olarak belirlenmesinin nedeni daha önceki çalışmalarda ideal sonuçların bu oranlarda elde edilmesinden kaynaklanmaktadır.

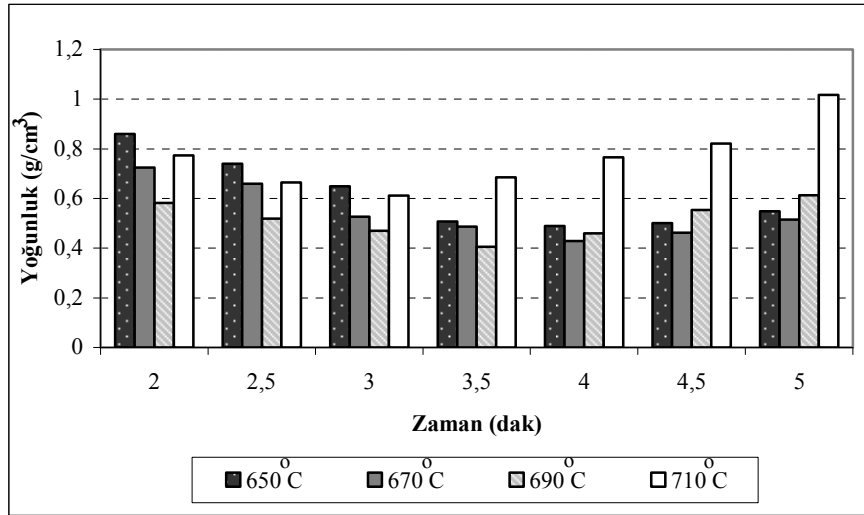
Grafiğe bakıldığında %0,5 TiH_2 içeren numuneler arasında en düşük yoğunluğun 4 dakikada $0,50 \text{ g/cm}^3$, %0,75 TiH_2 içeren numuneler arasında ise en düşük yoğunluğun 3,5 dakikada $0,42 \text{ g/cm}^3$ olarak elde edildiği görülmektedir. Ancak bütün numuneler arasında ise en düşük yoğunluğun 3,5 dakikada $0,40 \text{ g/cm}^3$ ile %1 TiH_2 içeren numunelerde, en fazla yoğunluğun ise 3 dakikada $0,78 \text{ g/cm}^3$ ile %1,5 TiH_2 içeren numunelerde elde edilmiştir. Burada TiH_2 miktarındaki artışın, %1'e kadar yoğunluğu düşürdüğü, köpürtme süresini kısalttığı görülmektedir. TiH_2 oranı %1,5'a çıkartıldığında ise yoğunlukta artışın ve köpürtme süresinde kısılmanın meydana geldiği görülmektedir. Köpürtme süresinin kısa tutulması, yapı içerisinde bulunan hidrojen gazının genleşmesi için yeterli gelmediği ve maksimum lineer genişleme için daha fazla süreye ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla lineer genişleme oranının yeterli olmaması, yoğun artmasına neden olmaktadır. Ancak köpürtücü madde miktarındaki artışla birlikte yapıda bulunan hidrojen gazı oranının artması, kısa sürede maksimum lineer genişlemeye ulaşılacağını göstermektedir. Bundan dolayı daha az zamanda minimum yoğunlukta köpük yapıların elde edilebilmesi için, köpürtücü madde miktarlarının da artırılması gerektiği sonucu çıkarılmaktadır.



Şekil 6.16. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde değişik miktarlarda köpürtücü madde bulunan ve 690°C sıcaklıkta farklı sürelerde köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin yoğunluk grafiği

Şekil 6.17’de %70 oranda deforme edilmiş ve içerisinde %1 TiH₂ bulunan numunelerin değişik sıcaklıklarda farklı sürelerde köpürtülmeleri sonucu elde edilen köpük yapıların yoğunluk grafiği verilmiştir. Grafiğe bakıldığında 650°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numuneler arasında en düşük yoğunluk 4 dakikada 0,48 g/cm³, 670°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numuneler arasında ise en düşük yoğunluğun 4 dakikada 0,42 g/cm³ olarak elde edildiği görülmektedir. Ancak bütün numuneler arasında en düşük yoğunluk 3,5 dakikada 0,40 g/cm³ ile 690°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerde, en fazla yoğunluk ise 3 dakikada 0,61 g/cm³ ile 710°C’da köpürtme işlemine tabii tutulan numunelerde elde edilmiştir. Burada sıcaklıktaki artışın, 690°C’a kadar yoğunluğu ve köpürtme süresini düşürdüğü görülmektedir. Sıcaklık 710°C’a çıkartıldığında ise yoğunlukta artışın ve köpürtme süresinde azalmanın meydana geldiği görülmektedir. Köpürtme süresinin kısa tutulması, düşük sıcaklıklarda yapı içerisinde bulunan hidrojen gazının genişmesi için yeterli gelmediği düşünülmektedir. Çünkü düşük sıcaklıklarda ergiyik halde bulunan numunelerin viskozitesinin fazla olması, gözenek üzerine etki eden drenaj etkisi artıracağından, gözeneklerin daha zor büyümesine neden olmaktadır. Buda maksimum lineer genişleme için daha fazla süreye ihtiyaç

duyulduğu anlamına gelmektedir. Bilindi gibi lineer genişleme oranındaki artış, yoğunluğun azalmasına neden olmaktadır. O halde kısa sürelerde düşük sıcaklıklarda, minimum oranda yoğunluğun elde edilmesi zordur. Ancak yüksek sıcaklıklarda kısa sürede düşük yoğunluğa sahip numunelerin elde edilmesi mümkündür. Çünkü sıcaklıktaki artışla birlikte ergiyik halde bulunan metalin viskozitesinin düşmesi gözenek üzerine etki eden drenaj etkisi azaltacağından, gözeneklerin daha kolay büyümesine neden olmaktadır [56]. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda daha hızlı köpürmenin meydana geldiği, böylece köpürtme süresini kısalttığı tespit edilmiştir. Sürenin artması ise gözeneklerde birleşmeye ve yer yer çöküntülere neden olacağından yoğunlukta da artışların meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 6.17. %70 oranda deforme edilmiş, içerisinde %1 TiH₂ bulunan, değişik sıcaklıklarda ve farklı sürelerde köpürtme işlemine tabii tutulmuş numunelerin yoğunluk grafiği

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile küresel şekilli alüminyum köpük üretilmiş ve köpürtücü madde miktarı, köpürtme sıcaklığı, köpürtme süresi ve köpürtme işlemi öncesi deformasyon miktarının köpük üretimi üzerine etkileri incelenerek aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir.

1. Deformasyon miktarındaki artış ile beraber lineer genişleme oranının arttığı tespit edilmiştir. Maksimum lineer genişleme %70 oranda deforme edilmiş numunelerde elde edilmiştir.
2. Deformasyon miktarındaki artış ile beraber gözenek sayısının azaldığı, gözenek boyutunun ve boşluk miktarının ise arttığı tespit edilmiştir. Bunun sonucu olarak yoğunlukta da düşüşler meydana gelmiştir.
3. Düşük sıcaklıklarda köpürtücü madde miktarındaki artış, köpüğün lineer genişleme oranına artırıcı yönde etki ederken, yüksek sıcaklıklarda ise azaltıcı yönde etki ettiği belirlenmiştir.
4. Fazla miktarda köpürtücü madde içeren numunelerde lineer genişleme oranı, artan sıcaklıkla birlikte azalırken, az miktarda köpürtücü madde içeren numunelerde ise lineer genişleme oranı artmaktadır.
5. Köpürtücü madde miktarının ve sıcaklığın aynı anda artırılması numunelerde homojen olmayan gözenek yapısı oluşumuna, yer yer çöküntülere, boşluk ve lineer genişleme oranlarının azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla köpürtme sıcaklığının ve köpürtücü madde miktarının ara değerlerde seçilmesi (690°C, %1 TiH₂ gibi) küresel şekilli alüminyum köpük üretimi için uygun olacağı düşünülmektedir.
6. Boşluk miktarının lineer genişleme oranına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir.
7. Düşük sıcaklıklarda köpürtücü madde miktarındaki artışla birlikte yoğunlukta düşüş, yüksek sıcaklıklarda ise yoğunlukta artış meydana gelmiştir.
8. Az miktarda köpürtücü madde içeren numunelerde yoğunluk, artan sıcaklıkla birlikte azalırken, fazla miktarda köpürtücü madde içeren numunelerde ise yoğunluk artmaktadır.

9. Köpürtme süresinin, sıcaklık ve köpürtücü madde miktarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.
10. Kısa süreli köpürtme işleminde sıcaklığın veya köpürtücü madde miktarının artırılması, uzun süreli köpürtme işlemlerinde ise köpüğün kararlılığı için sıcaklığın veya köpürtücü madde miktarının azaltılması gerektiği sonucu çıkartılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Banhart, J., ‘‘Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams’’, *Progress in Materials Science*, 46:559-632 (2001).
2. Oliveira, B.F., Cunda, L.A.B., Öchsner, A., Creus, G. J., ‘‘Hollow sphere structures: a study of mechanical behaviour using numerical simulation’’, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 40:144-153 (2009).

3. Öchsner, A., “Materials Letters special issue on hollow sphere structures”, *Materials Letters*, (63):1107–1108 (2009).
4. Degischer, H.P., Kriszt, B., “Handbook of Cellular Metals: Production, Processing and Applications”, *Wiley-VCH*, Weinheim, 1-363 (2002).
5. Kádár, C., Chmelík, F., Lendvai, J., Vörös, G., Rajkovits, Z., “Acoustic emission of metal foams during tension”, *Materials Science and Engineering A*, 462:316–319 (2007).
6. Sirong, Y., Jiaan, L., Yanru, L., Yaohui L., “Compressive behavior and damping property of ZA22/SiCp composite foams”, *Materials Science and Engineering A*, 457:325–328 (2007).
7. Raj, R.E., Daniel, B.S.S., “Aluminum Melt Foam Processing for Light-Weight Structures”, *Materials and Manufacturing Processes*, 22: 525–530 (2007).
8. Banhart, J., “Metallic foams: Challenges and Oportunities”, *Eurofoam 2000*, MIT-Verlag Bremen, 13-20 (2000).
9. Banhart, J., “Metal Foams: Production and Stability”, *Advanced Engineering Materials*, 8:781-794 (2006).
10. Gibson, L.J., Simone, A.E., “[Aluminum foams produced by liquid-state processes](#)”, *Acta Mater.*, 46:3109-3123 (1998).
11. Montanini, R., “Measurement of strain rate sensitivity of aluminium foams for energy dissipation”, *International Journal of Mechanical Sciences* 47:26–42 (2005).
12. Baumeister, J., Banhart, J., Weber, M., “Aluminium foams for transport industry”, *Materials & Design*, 18:217-220 (1997).
13. Wadley, H.N.G., “Cellur Metals Manufacturing”, *Advanced Engineering Materials*, 4:726-733 (2004).
14. Banhart, J., Weaire, D., “On the road again - metal foams find favor” *Pyhsics Today*, 55: 37-42 (2002).
15. Irretier, A., Banhart, J., “Lead and lead alloy foams”, *Acta Materialia*, 53:4903-4917 (2005).
16. Bram, M., Stiller, C., Buchkremer, H.P., Stöver, D., Baur, H., “High-Porosity Titanium, Stainless Steel, and Superalloy Parts”, *Advanced Engineering Materials*, 2:196-199 (2000).

17. Queheillalt, D.T., Katsumura, Y., Wadley, H.N.G., “Synthesis of stochastic open cell Ni-based foams, Synthesis of stochastic open cell Ni-based foams”, *Scripta Materialia*, 50:313–317 (2004).
18. Surace, R., Filippis, L.A.C.D., Ludovico, A.D., Boghetich, G., “Experimental analysis of the effect of control factors on aluminium foam produced by powder metallurgy”, *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 13:56–167 (2007).
19. Orhan, A., Gür, A.K., “Al/SiC Metal Köpüklerin Üretimi ve Mikroyapısı”, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 3:530-537 (2008).
20. Ozan, S., Taksin, M., Kolukisa, S., Ozerdem, M.S., “Application of ANN in the prediction of the pore concentration of aluminum metal foams manufactured by powder metallurgy methods”, *Int J Adv Manuf Technol*, 39:251–256 (2008).
21. 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).
22. 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).
23. Banhart, J., “Manufacturing Routes for Metallic Foams”, *Journals of Materials*, 52:22-27 (2000).
24. Banhart, J., “Aluminium Foams for Lighter Vehicles”, *International Journal of Vehicle Design*, 1-19 (2003).
25. Banhart, J., “Aluminium Foams: On the road to Road to Road Applications”, *Mrs Bulletin*, 290-295 (2003).
26. Srivastava, V. C., Sahoo, K. L., “Processing, stabilization and applications of metallic foams. Art of science”, *Materials Science*, 25:733-753 (2007).
27. Özer, G., Ekrem, A., “Alüminyum Köpük Metal Üretiminde Sıcaklığın Köpük Oluşumuna Etkisinin Araştırılması”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, 774-778 (2009).
28. Babcsan, N., Banhart, J., Leitmeier, D., “Metal Foams – Manufacture and Physics of Foaming”, *International Conference Advanced Metallic Materials*, Slovakia, 5-15 (2003).
29. Babcsan, N., Leitmeier, D., Degischer, H.P., “Foamability of Particle Reinforced Aluminium Melt”, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 34:22-29 (2003).

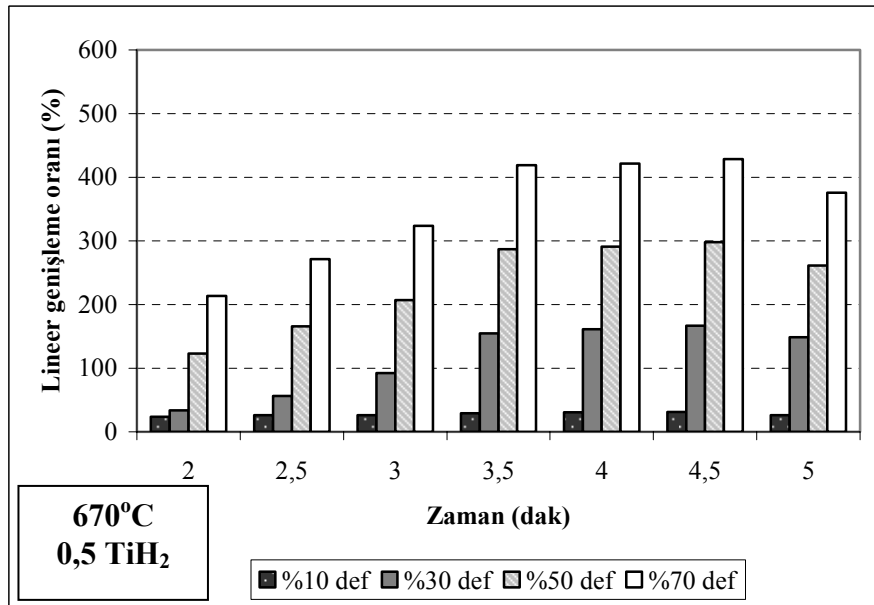
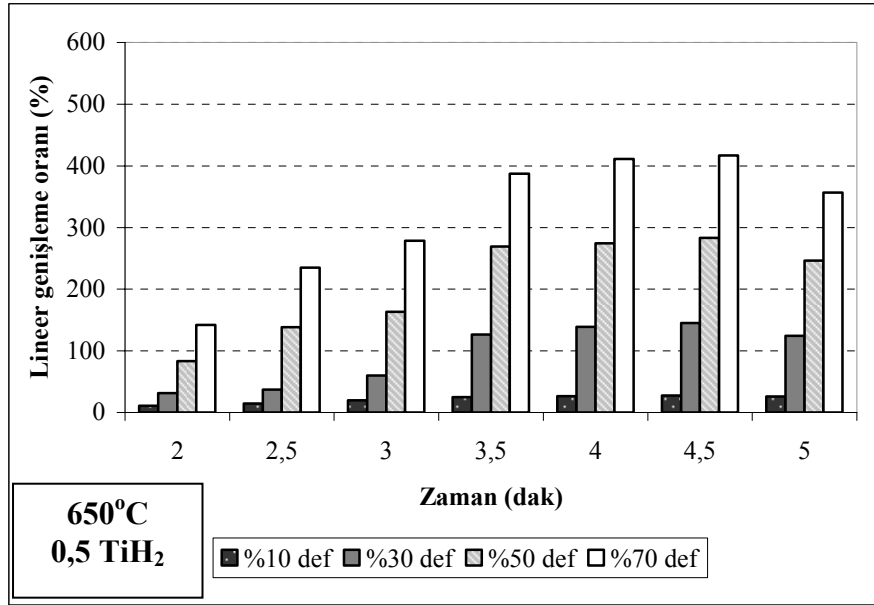
30. Asavavisithchai, S., Kennedy, A.R., “The effect of Mg addition on the stability of Al–Al₂O₃ foams made by a powder metallurgy route”, *Scripta Materialia*, 54:1331-1334 (2006).
31. Moreno, F.G., Banhart, J., “Foaming of blowing agent-free aluminium powder compacts”, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 309:264–269 (2007).
32. Baumgärtner, F., Duarte, I., Banhart, J., “Industrialization of Powder Compact Foaming Process”, *Advanced Engineering Materials*, 2:168-174 (2000).
33. Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., and Wadley, H. N. G., “Metal Foams: A Design Guide”, *Butterworth-Heinemann*, Boston, USA, 1-233 (2000).
34. Matijasevic, B., Banhart, J., “Improvement of Aluminium Foam Technology by Tailoring of Blowing Agent”, *Scripta Materialia*, 54:503-508 (2006).
35. Peroni, L., Avallè, M., Peroni, M., “The mechanical behaviour of aluminium foam structures in different loading conditions”, *International Journal of Impact Engineering*, 35:644-655 (2007).
36. Esmaeelzadeh, S., Simchi, A., “Foamability and compressive properties of AlSi7–3 vol.% SiC–0.5 wt.% TiH₂ powder compact”, *Materials Letters*, 62:1561-1564 (2007).
37. Fiedler, T., Solórzano, E., Öchsner, A., “Numerical and experimental analysis of the thermal conductivity of metallic hollow sphere structures”, *Materials Letters*, 62:1204–1207 (2008).
38. Vesenjaj, M., Fiedler, T., Ren Z., and Öchsner, A., “Behaviour of Syntactic and Partial Hollow Sphere Structures under Dynamic Loading” *Advanced Engineering Materials*, 10:185-191 (2008).
39. R. Winkler, R., M. Merkel, M., Öchsner, A., “Experimental and numerical analyses of diffusion bonded hollow sphere structures”, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 40:133-138 (2009).
40. T. Fiedler, T., Öchsner, A., “On the anisotropy of adhesively bonded metallic hollow sphere structures”, *Scripta Materialia*, 58:695-698 (2008).
41. Stöbener, K., Baumeister, J., Rausch, G., Busse, M., “[Forming metal foams by simpler methods for cheaper solutions](#)”, *Met. Powder Repor*, 60:12-16 (2005).
42. Stöbener, K., Baumeister, J., Weise, J., Busse, M., “Investigations on 4 New Methods For Aluminium Foam Production”, *5th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams*, Canada, 11-14 (2007).

43. Stöbener, K., Lehmhus, D., Avasse, M., Peroni, L., Buse, M., “Aluminum foam-polymer hybrid structures (APM aluminum foam) in compression testing”, *International Journal of Solids and Structures*, 45:5627-5641 (2008).
44. Stöbener, K., Baumeister, J., Rausch, G., Busse, M., “Mechanics of AluminumFoam-Polymer Hybrids”, *Advanced Engineering Materials*, 10:853-857 (2008).
45. Srivastava, V. C., Sahoo, K. L., “Metallic Foams: Current Status and Future Prospects”, *IIM Metal News*, 9:9-13 (2006).
46. Yu C.J., Eifert, H.H., Banhart, J., Baumeister, J., “Metal foaming by a powder metallurgy method: Production, properties and applications”, *Mat Res Innovat*, 2:181–188 (1998).
47. Schaeffler, P., Rajner, W., Claar, D., Trendelenburg, T., Nishimura, H., “Production, Properties, and Applications of Alulight® Closed-Cell Aluminum Foams”, *The Fifth International Workshop on Advanced Manufacturing Technologies*, London, 1-6 (2005).
48. Çinici, H., “Toz Metalurjisi Yöntemi İle Alüminyum Esaslı Metalik Köpük Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enst.* , Ankara, 1-71 (2004).
49. Seeliger, H.W., “Aluminium Foam Sandwich (AFS) Ready for Market Introduction”, *Advanced Engineering Materials*, 6:448-451 (2004).
50. Banhart, J., Seeliger, H.W., “Aluminium FoamSandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications”, *Advanced Engineering Materials*, 10:793-802 (2008).
51. Neugebauer, R., Lies, C., Hohlfeld, J., Hipke, T., “Adhesion in sandwiches with aluminum foam core”, *Prod. Eng. Res. Devel.*, 1:271–278 (2007).
52. Neugebauer, R., Hipke, T., Hohlfeld, J., Thümmel, R., “Highly Damped Machine Tools With Metal Foam”, *International Conference Advanced Metallic Materials*, Smolenice, Slovakia, 214-218 (2003).
53. Banhart, J., “Properties and applications of cast aluminium sponges”, *1st International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures (MetFoam'99)*, Bremen, Germany, 159-162 (1999).
54. German, R. M., “Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., *Türk Toz Metalurjisi Derneği*, Ankara, 299-324 (2007).

55. Çinici, H., Türker, M., “TM Yöntemi ile üretilen al esaslı metalik köpüğe deformasyon miktarının etkisinin araştırılması”, **13th International Metallurgy & Materials Congress**, İstanbul, 854-860 (2006).
56. Yang, C.C., Nakae, H., “Foaming characteristics control during production of aluminum alloy foam”, **Journal of Alloys and Compounds**, 313:188-191 (2000).
57. Uzun, A., Çinici, H., Türker, M., “Effect of deformation rate and foaming duration on the properties of spherical aluminum foam produced by powder metallurgy”, **5th International Powder Metallurgy Conference**, Ankara, 801-807 (2008).
58. Duarte, I., Banhart, J., “A Study of Aluminium Foam Formation Kinetics and Microstructure”, **Acta mater.**, 48:2349-2362 (2000).

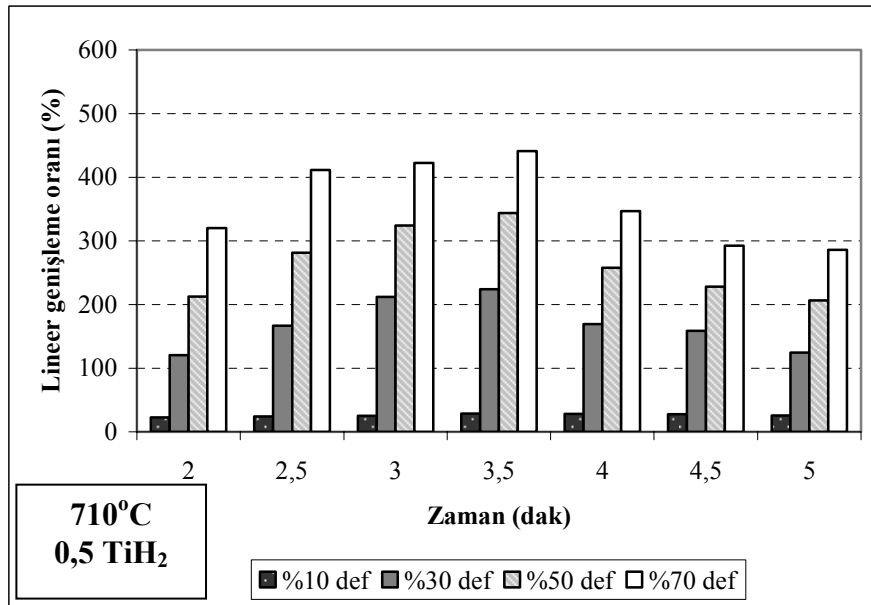
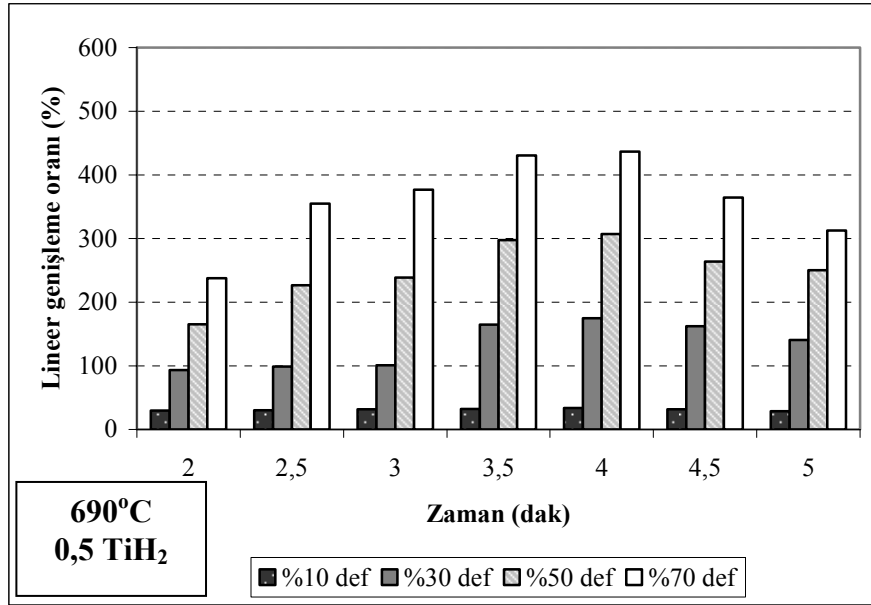
EKLER

EK-1 Deney sonucu elde edilen lineer genişleme – zaman grafikleri



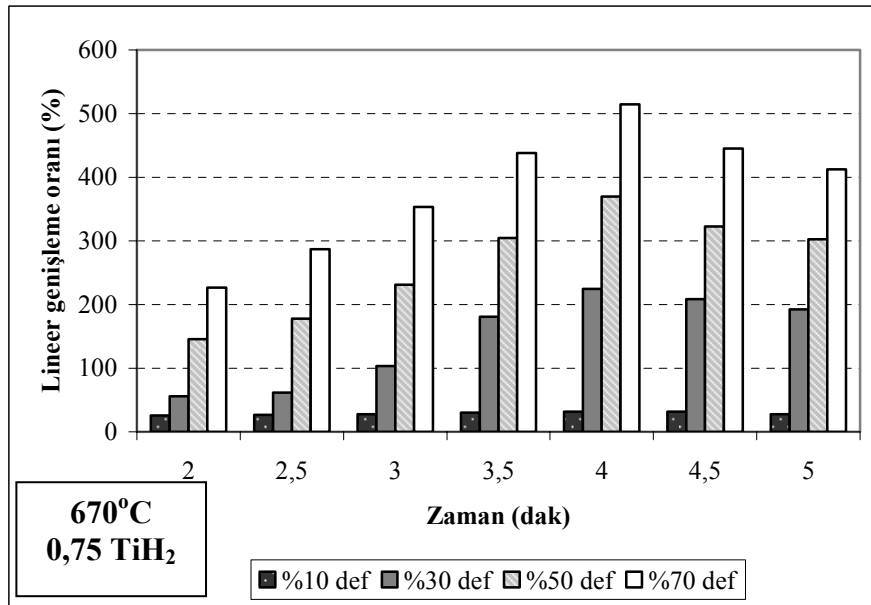
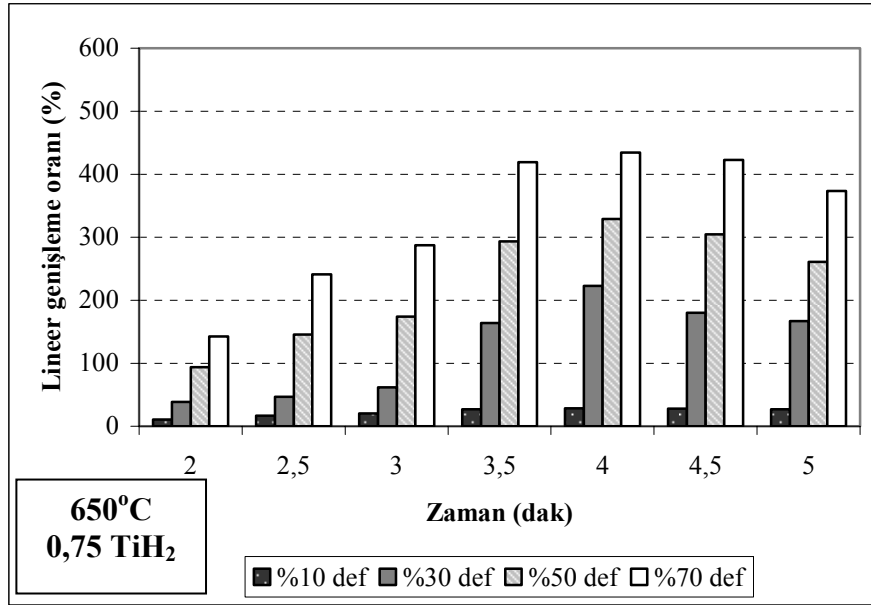
Şekil 1.1. %0,5 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki lineer genişleme – zaman ilişkisi grafikleri

EK-1 (Devam) Deney sonucu elde edilen lineer genişleme – zaman grafikleri



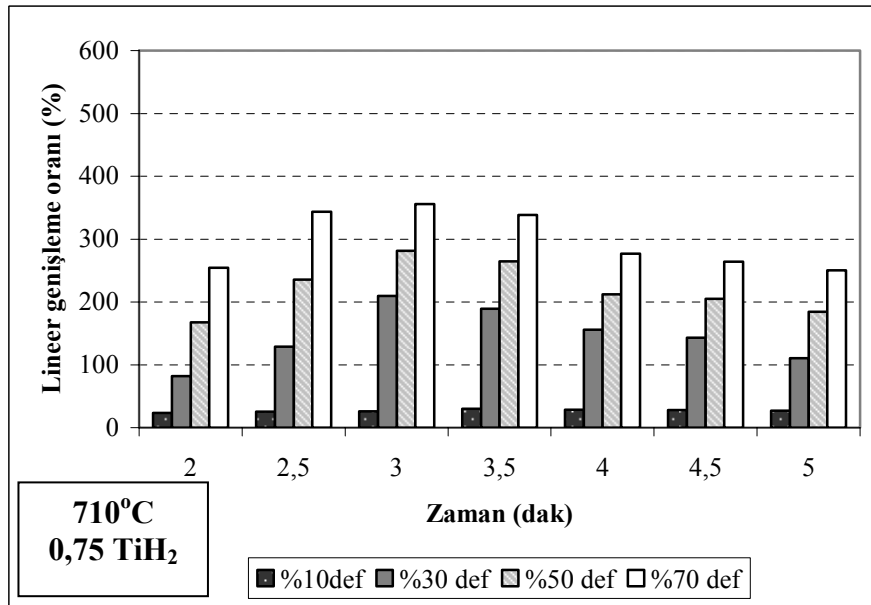
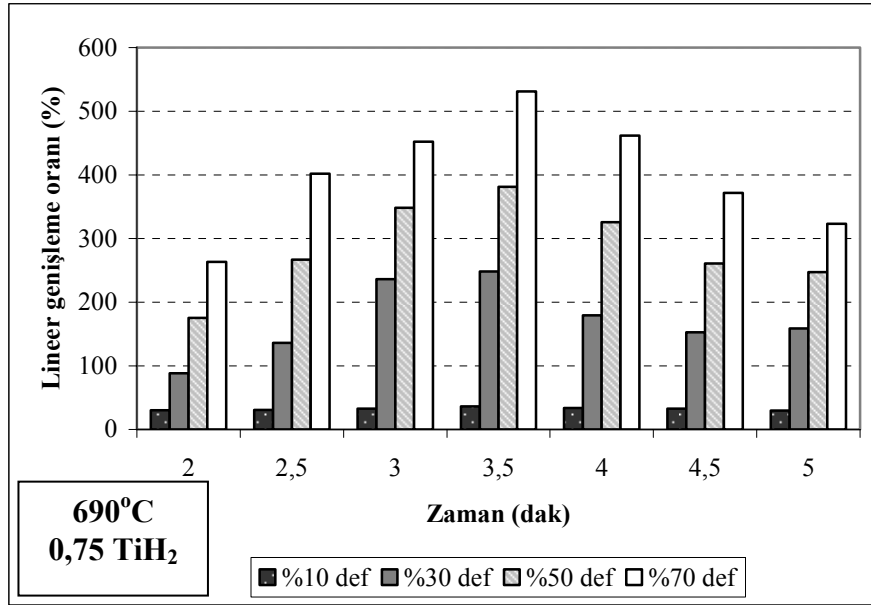
Şekil 1.1 (Devam) %0,5 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki lineer genişleme – zaman ilişkisi grafikleri

EK-1 (Devam) Deney sonucu elde edilen lineer genişleme – zaman grafikleri



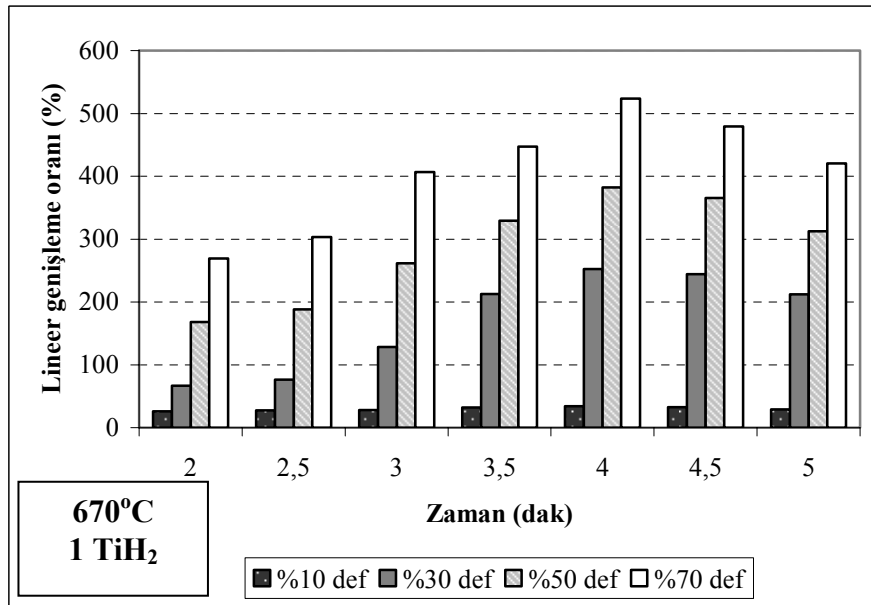
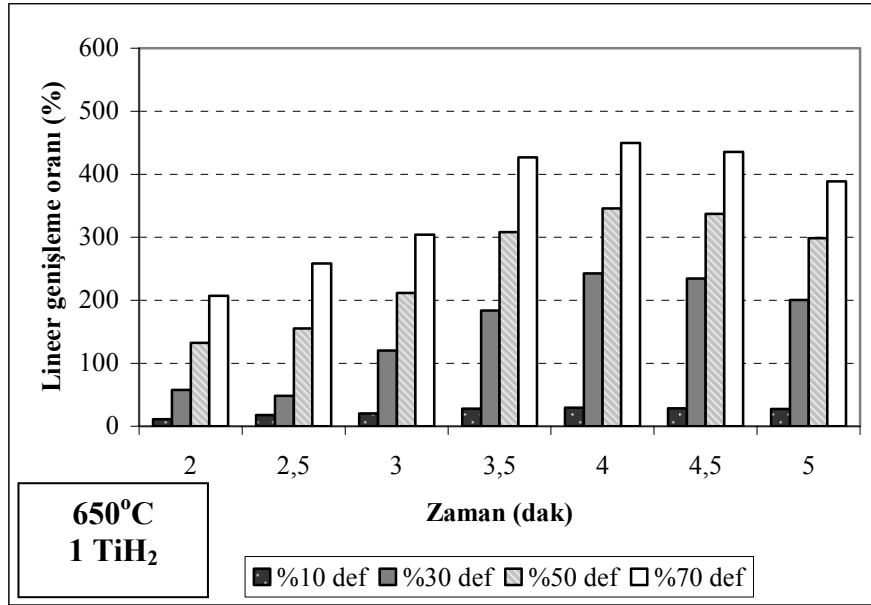
Şekil 1.2. %0,75 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki lineer genişleme – zaman ilişkisi grafikleri

EK-1 (Devam) Deney sonucu elde edilen lineer genişleme – zaman grafikleri



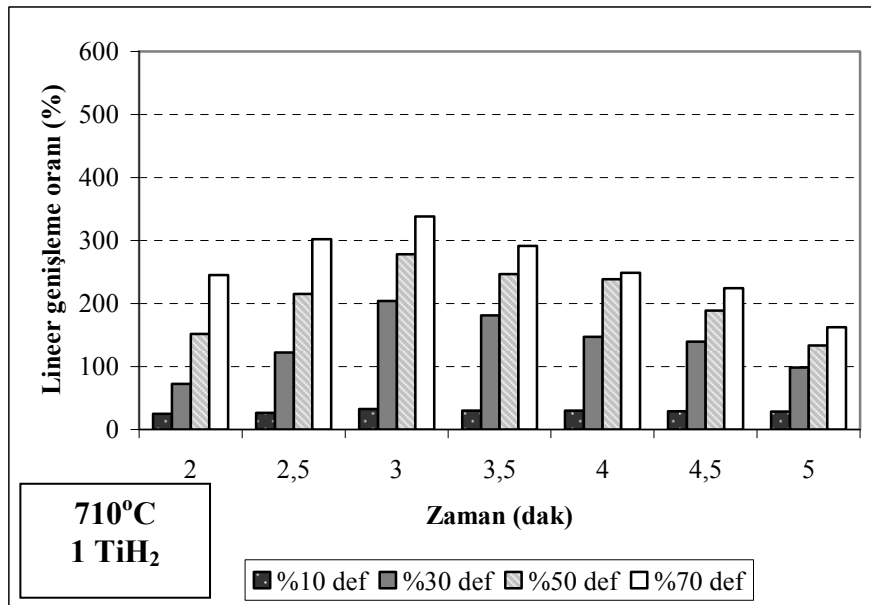
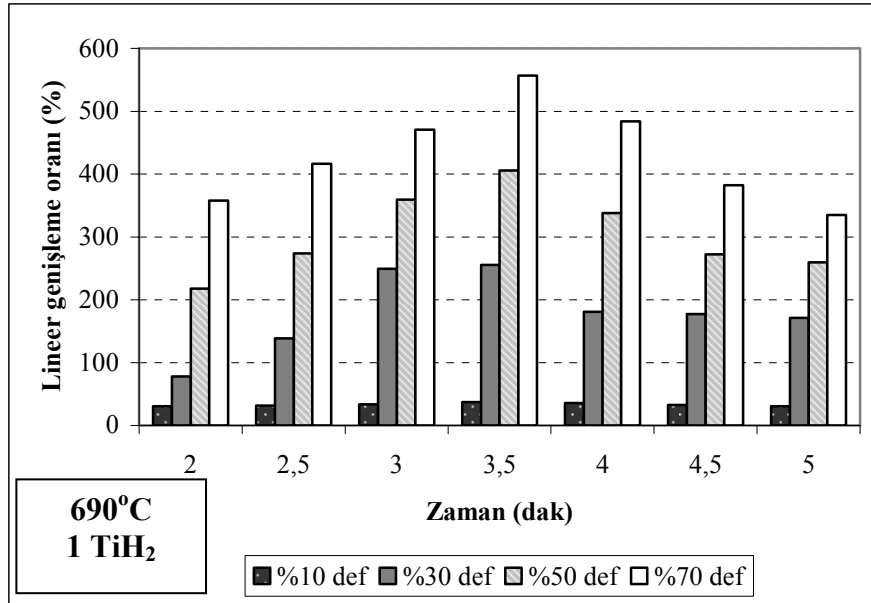
Şekil 1.2 (Devam) %0,75 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki lineer genişleme – zaman ilişkisi grafikleri

EK-1 (Devam) Deney sonucu elde edilen lineer genişleme – zaman grafikleri



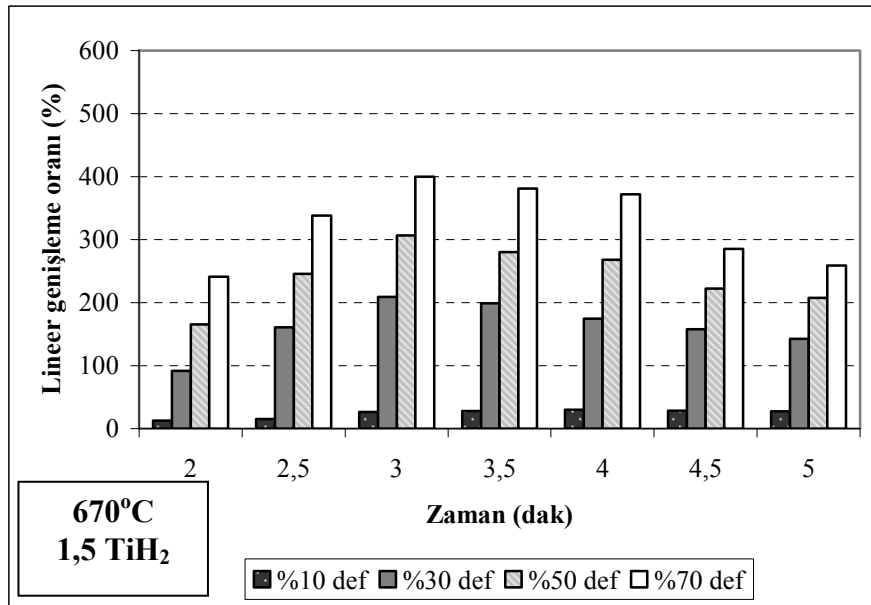
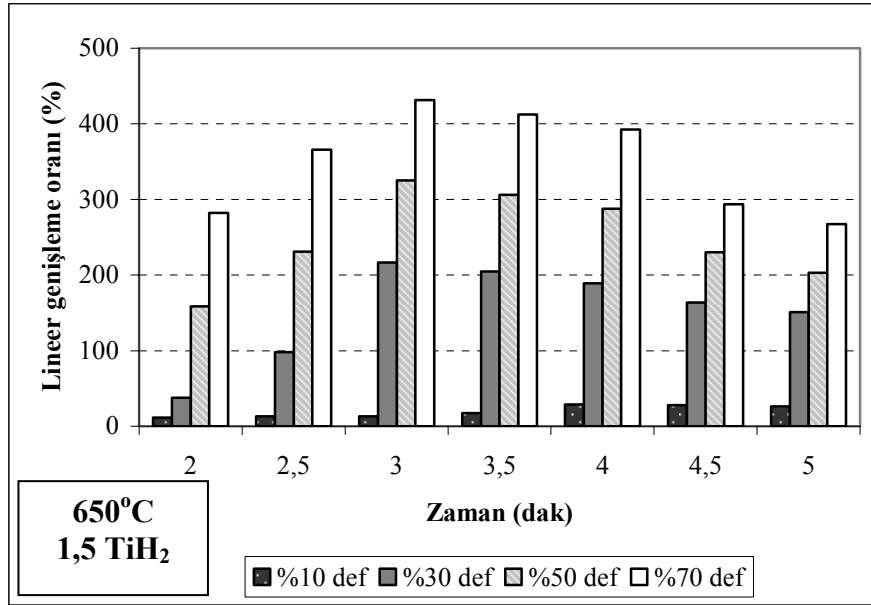
Şekil 1.3. %1 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki lineer genişleme – zaman ilişkisi grafikleri

EK-1 (Devam) Deney sonucu elde edilen lineer genişleme – zaman grafikleri



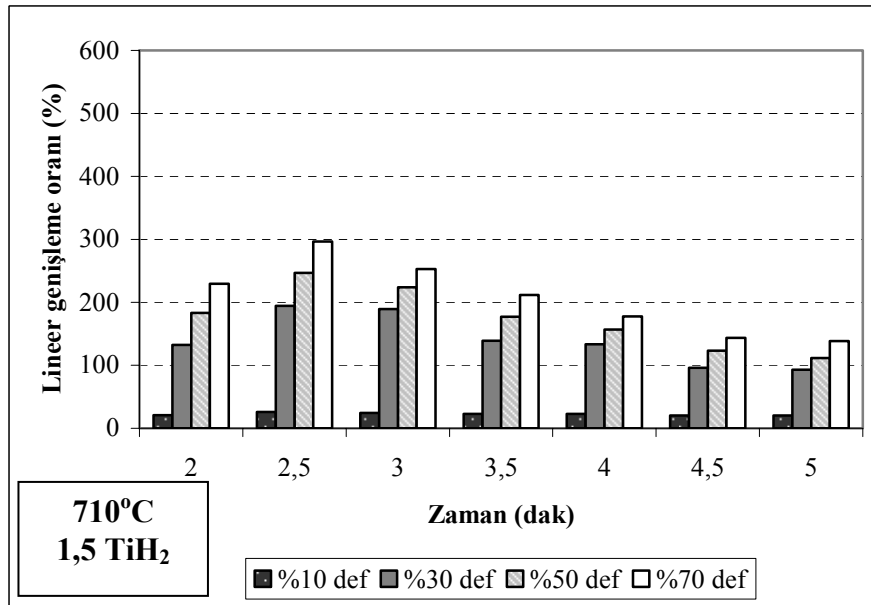
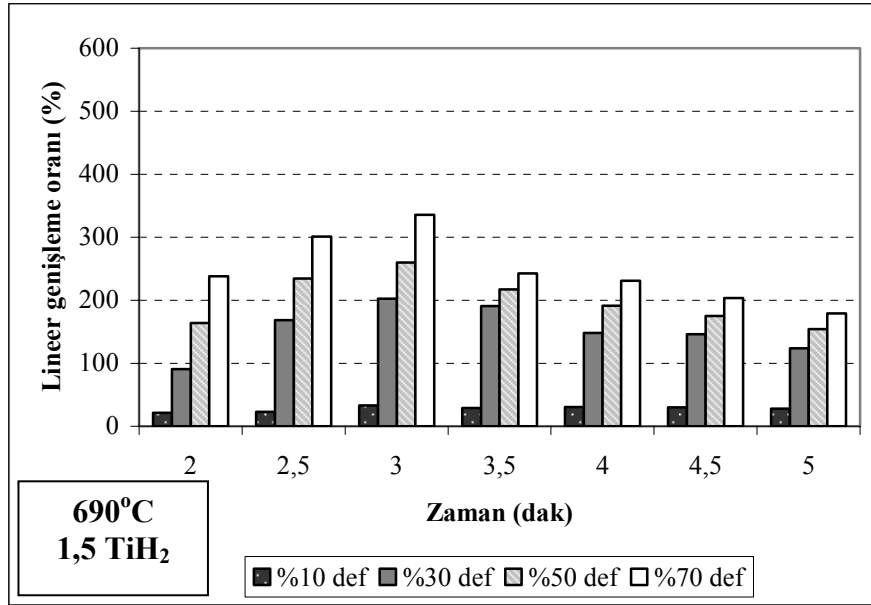
Şekil 1.3 (Devam) %1 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki lineer genişleme – zaman ilişkisi grafikleri

EK-1 (Devam) Deney sonucu elde edilen lineer genişleme – zaman grafikleri



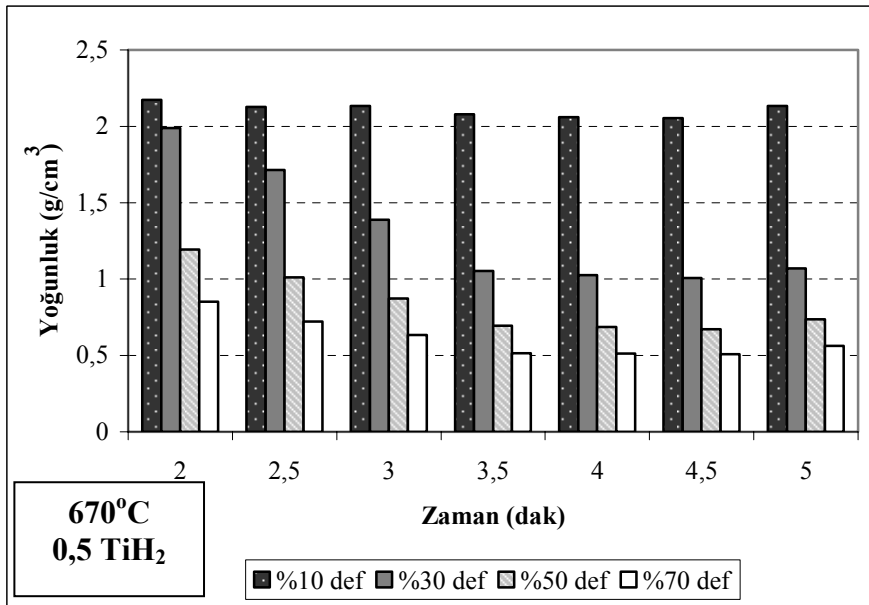
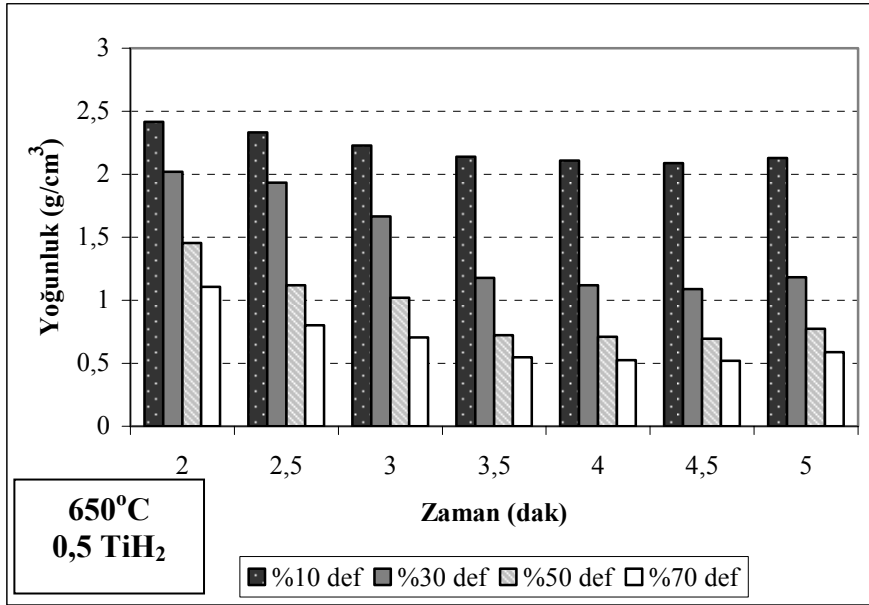
Şekil 1.4. %1,5 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki lineer genişleme – zaman ilişkisi grafikleri

EK-1 (Devam) Deney sonucu elde edilen lineer genişleme – zaman grafikleri



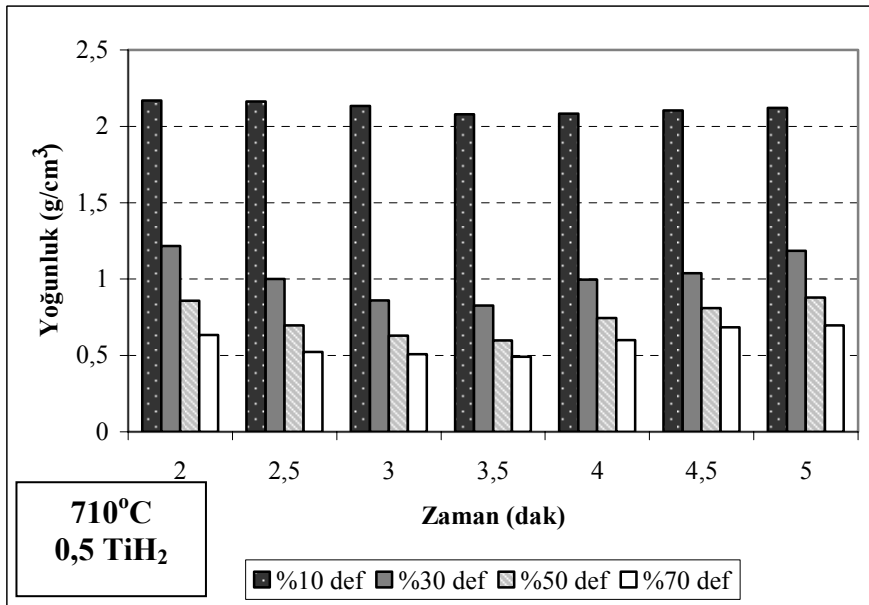
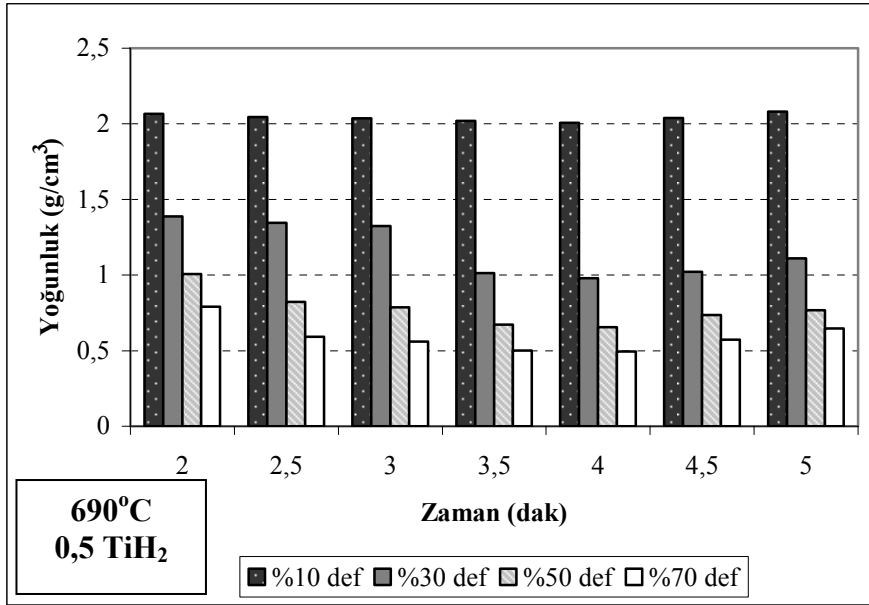
Şekil 1.4 (Devam) %1,5 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki lineer genişleme – zaman ilişkisi grafikleri

EK-2 Deney sonucu elde edilen yoğunluk – zaman grafikleri



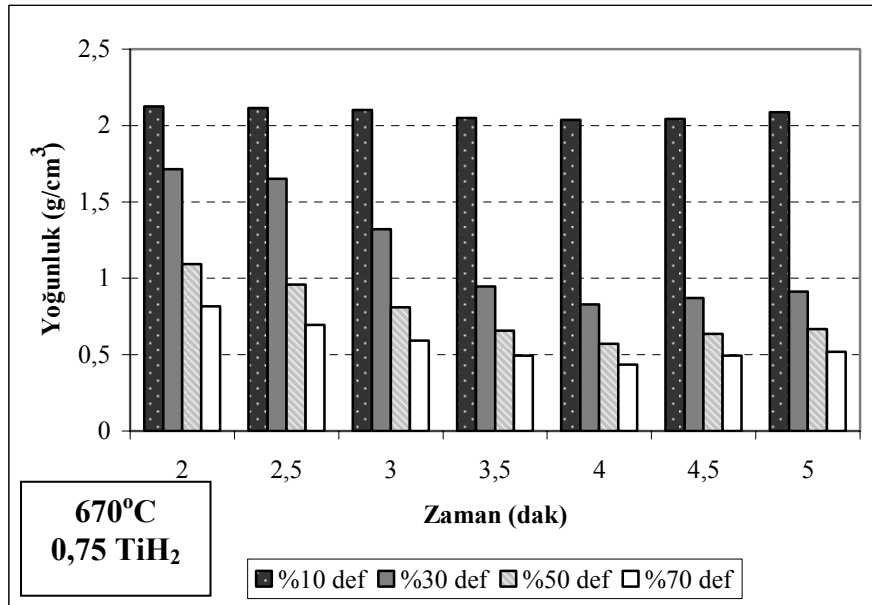
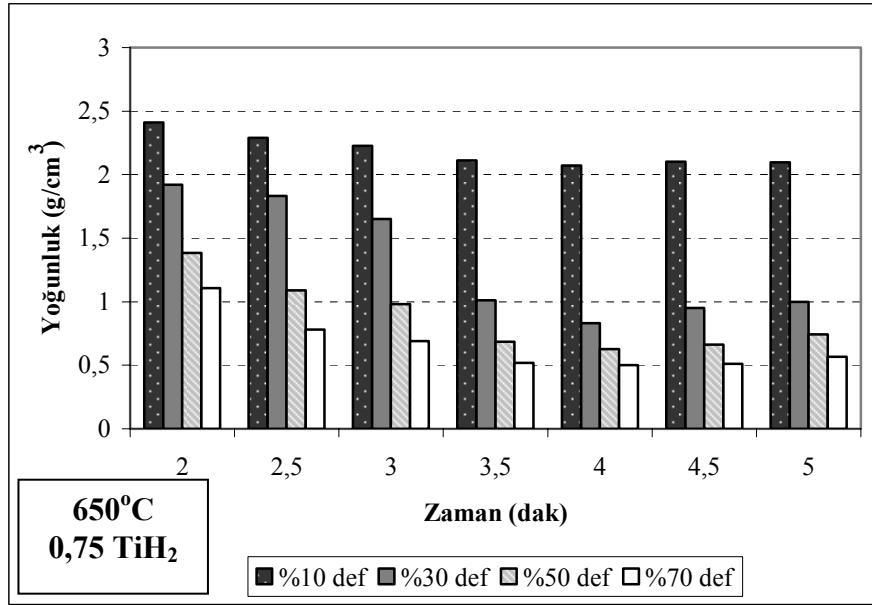
Şekil 2.1. %0,5 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki yoğunluk – zaman grafikleri

EK-2 (Devam) Deney sonucu elde edilen yoğunluk – zaman grafikleri



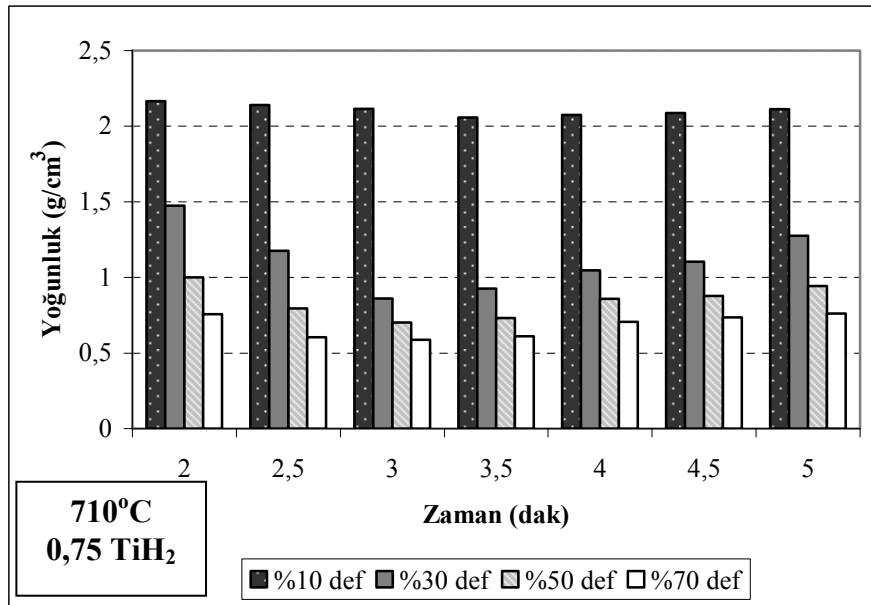
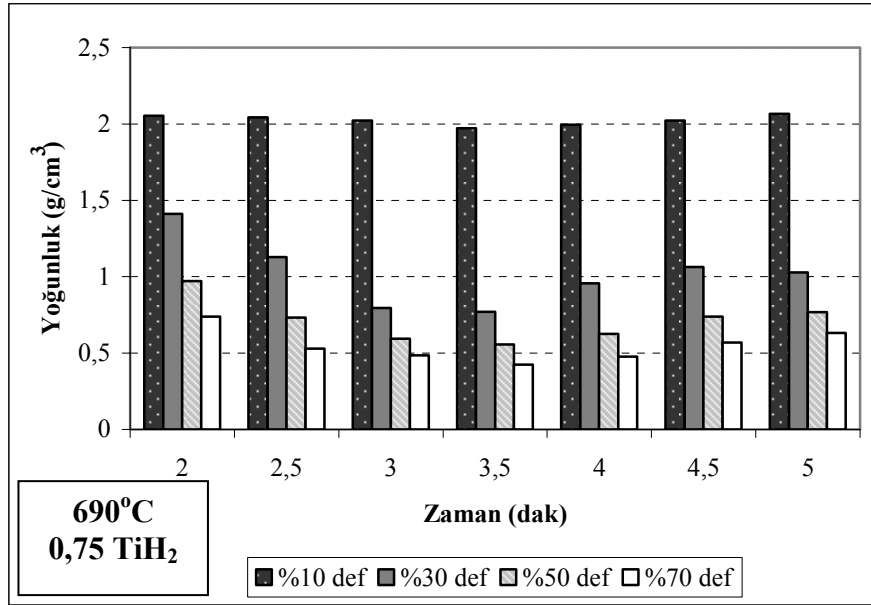
Şekil 2.1 (Devam) %0,5 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki yoğunluk – zaman grafikleri

EK-2 (Devam) Deney sonucu elde edilen yoğunluk – zaman grafikleri



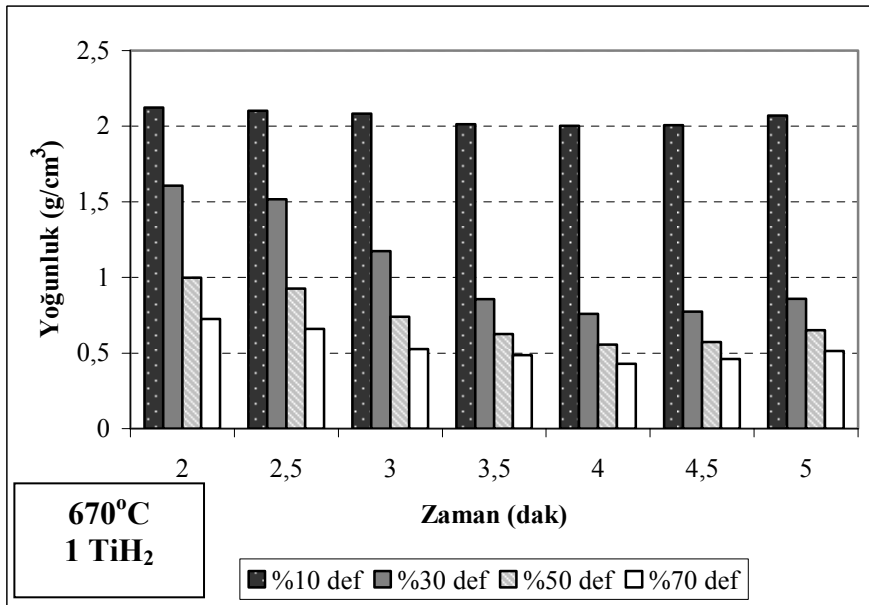
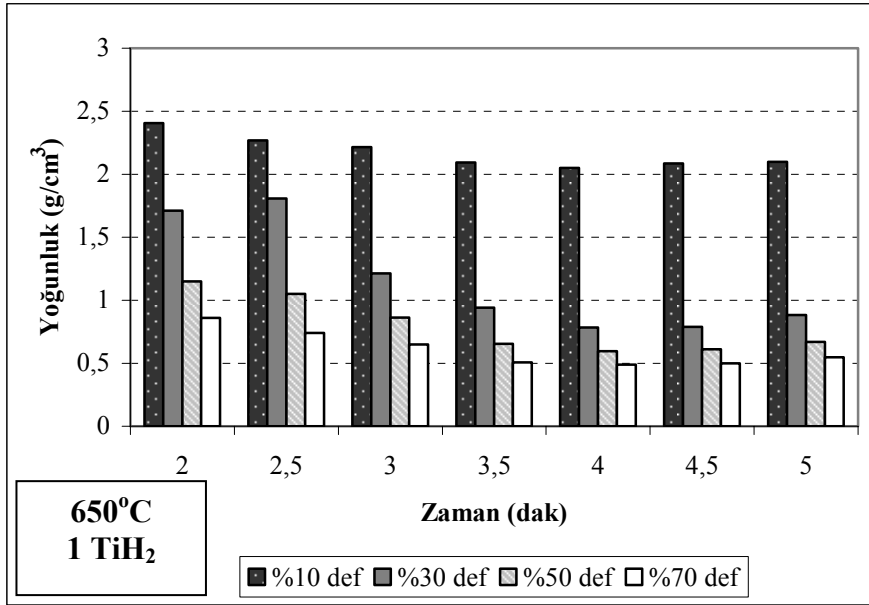
Şekil 2.2. %0,75 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki yoğunluk – zaman grafikleri

EK-2 (Devam) Deney sonucu elde edilen yoğunluk – zaman grafikleri



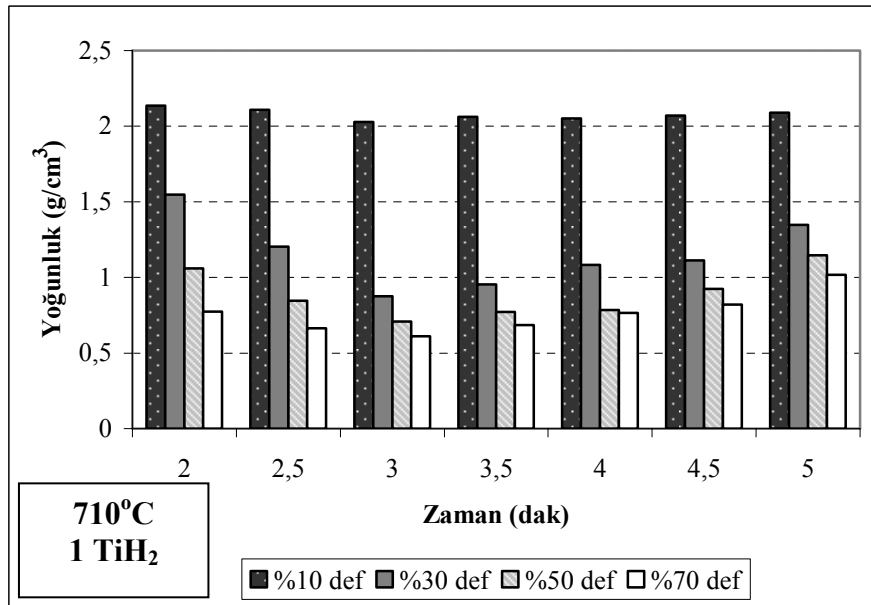
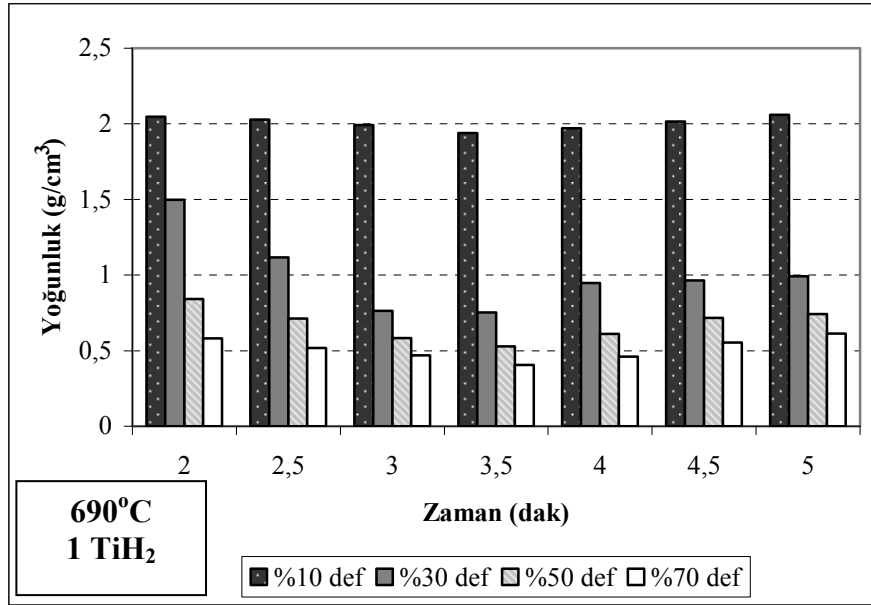
Şekil 2.2 (Devam) %0,75 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki yoğunluk – zaman grafikleri

EK-2 (Devam) Deney sonucu elde edilen yoğunluk – zaman grafikleri



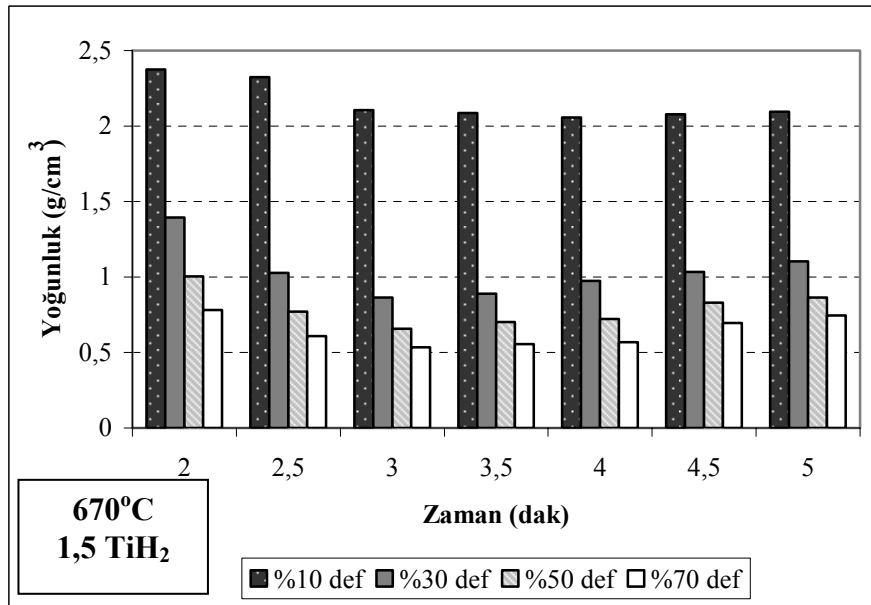
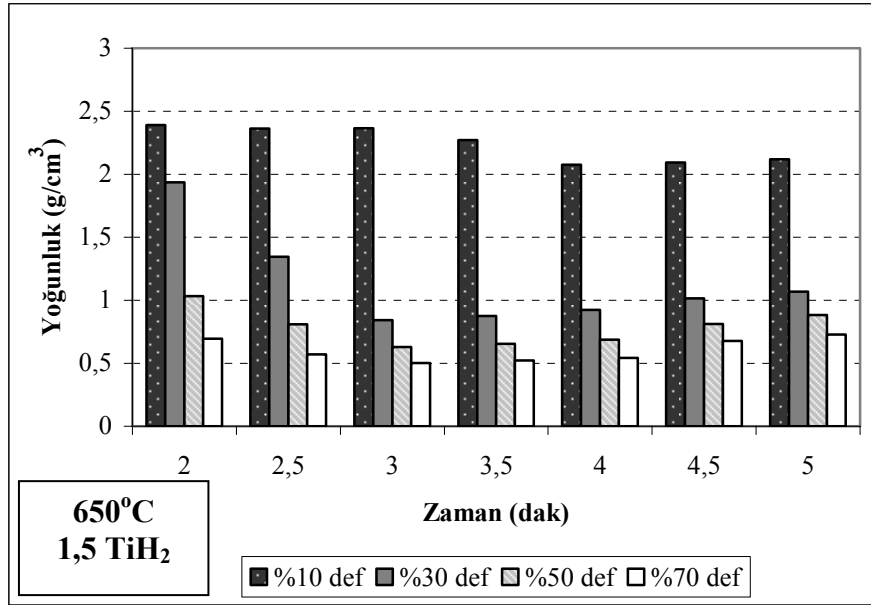
Şekil 2.3. %1 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki yoğunluk – zaman grafikleri

EK-2 (Devam) Deney sonucu elde edilen yoğunluk – zaman grafikleri



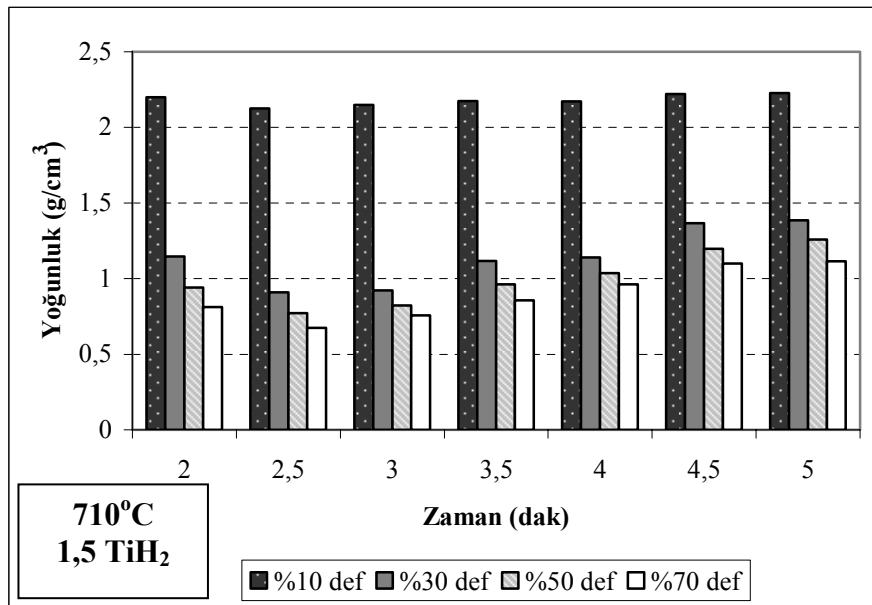
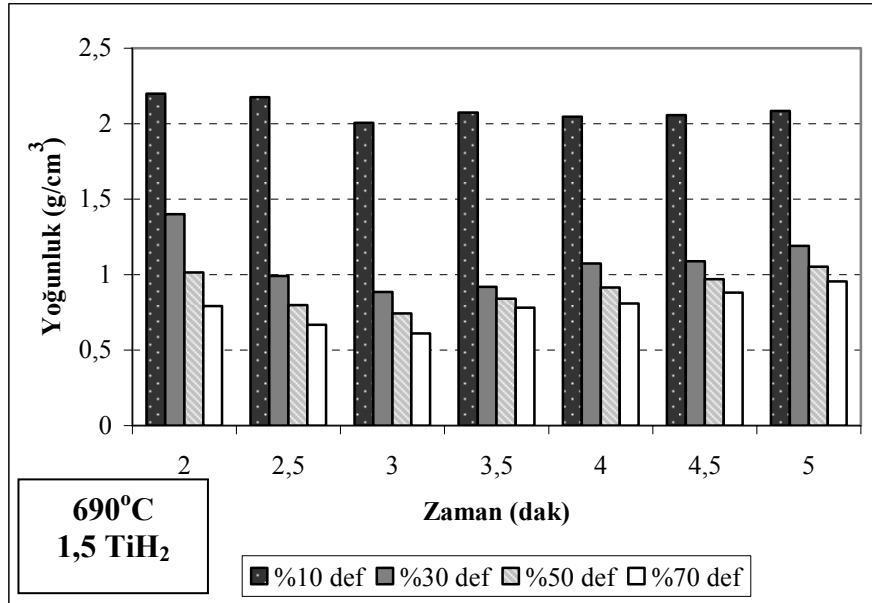
Şekil 2.3 (Devam) %1 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki yoğunluk – zaman grafikleri

EK-2 (Devam) Deney sonucu elde edilen yoğunluk – zaman grafikleri



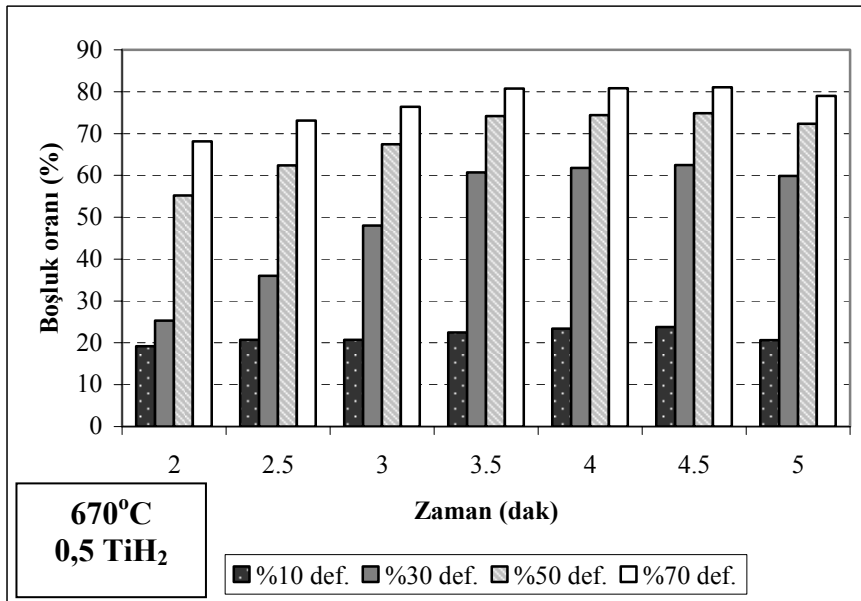
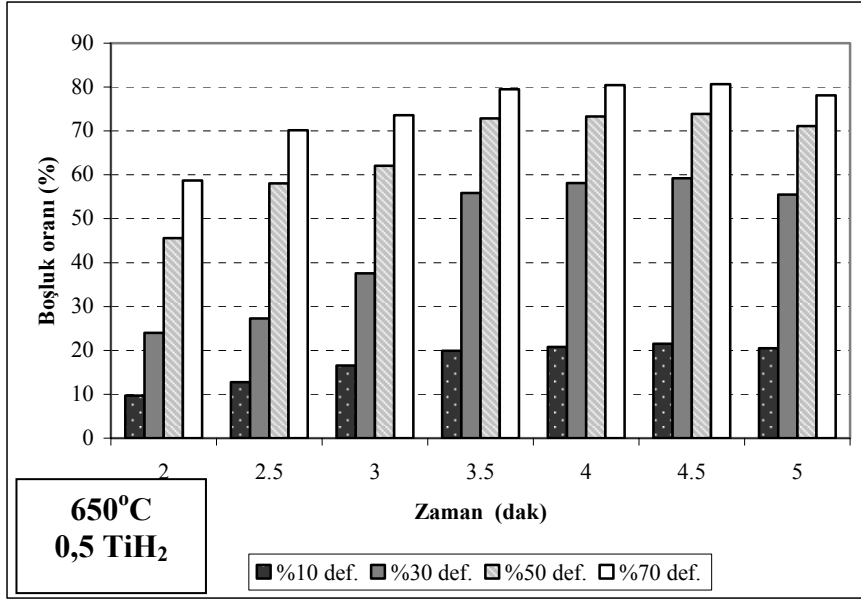
Şekil 2.4. %1,5 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki yoğunluk – zaman grafikleri

EK-2 (Devam) Deney sonucu elde edilen yoğunluk – zaman grafikleri



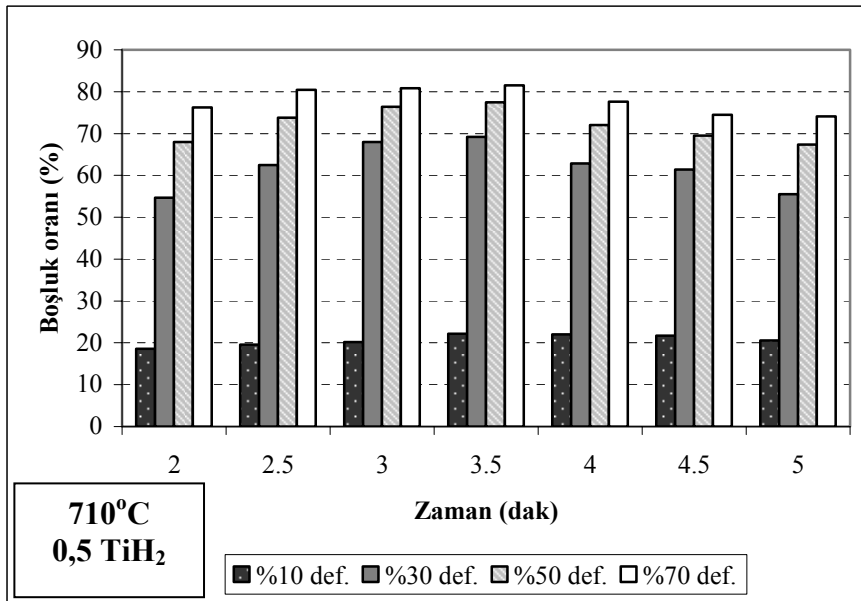
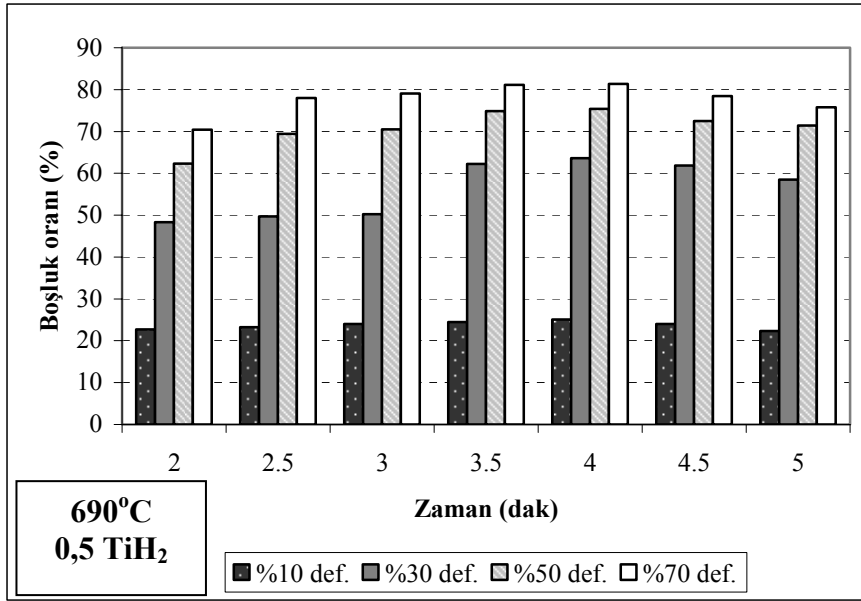
Şekil 2.4 (Devam) %1,5 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki yoğunluk – zaman grafikleri

EK-3 Deney sonucu elde edilen boşluk miktarı – zaman grafikleri



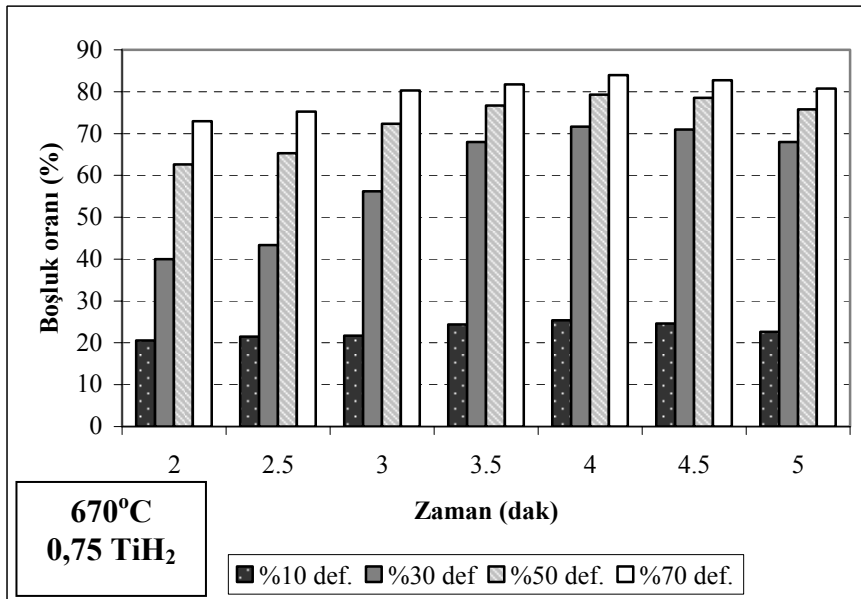
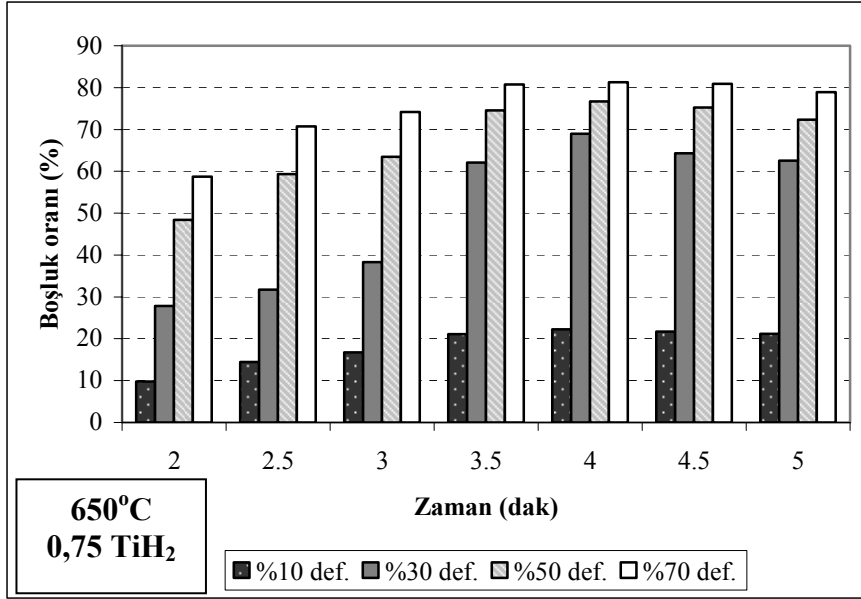
Şekil 3.1. %0,5 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki boşluk miktarı – zaman grafikleri

EK-3 (Devam) Deney sonucu elde edilen boşluk miktarı – zaman grafikleri



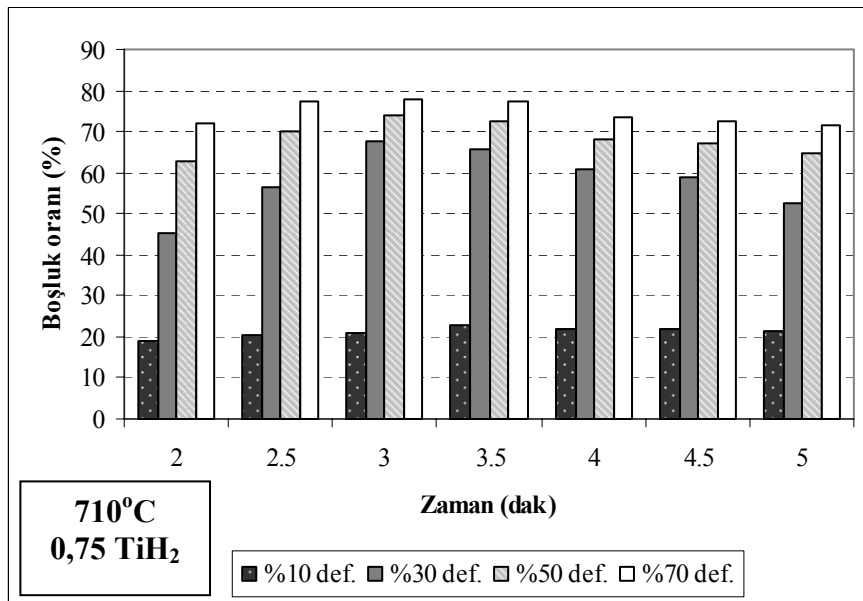
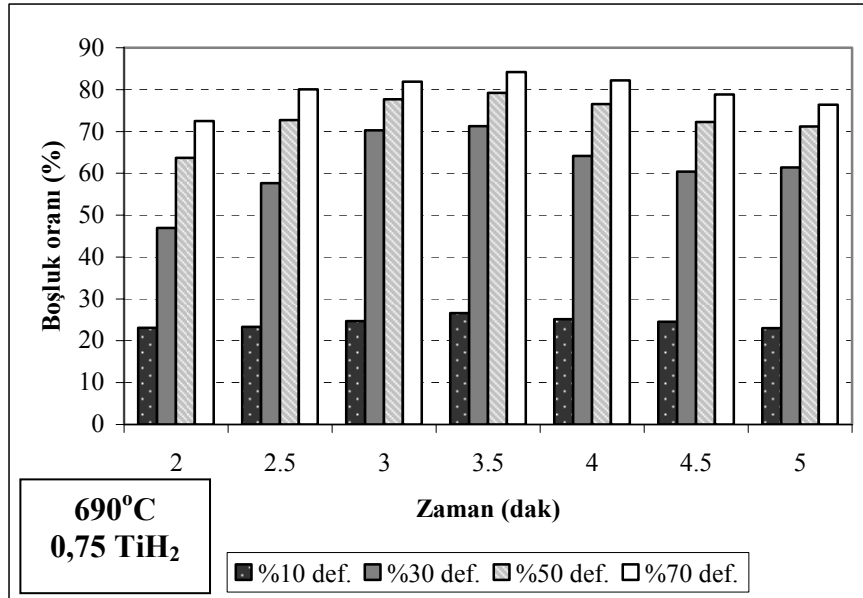
Şekil 3.1 (Devam) %0,5 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki boşluk miktarı – zaman grafikleri

EK – 3 (Devam) Deney sonucu elde edilen boşluk miktarı – zaman grafikleri



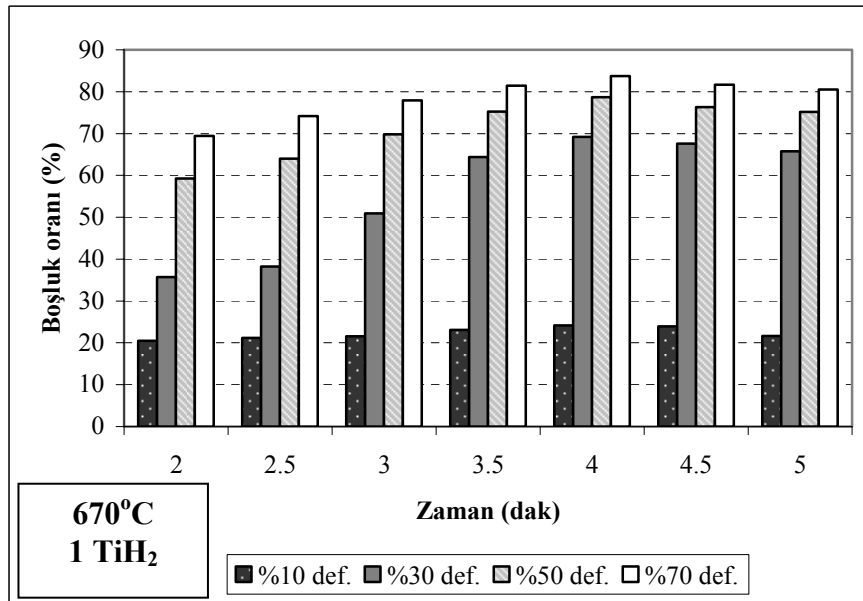
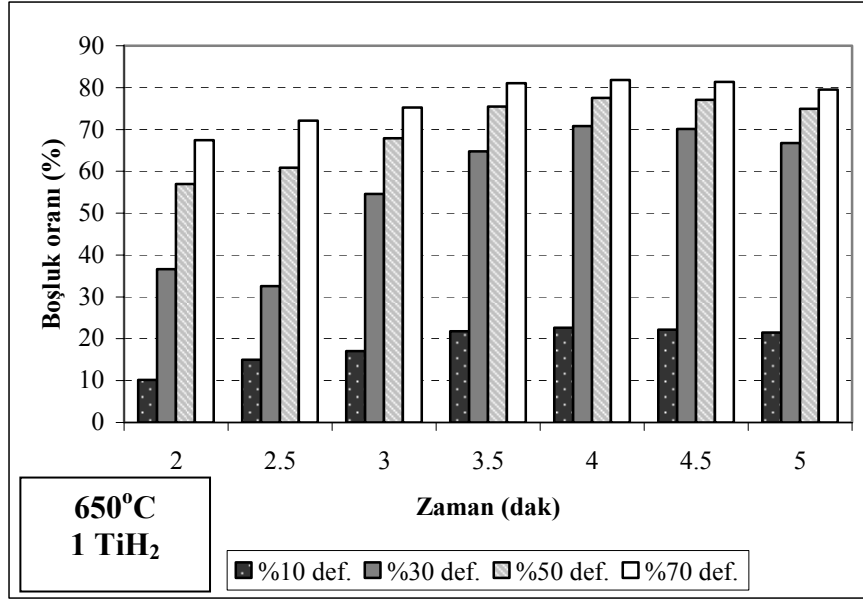
Şekil 3.2. %0,75 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki boşluk miktarı – zaman grafikleri

EK-3 (Devam) Deney sonucu elde edilen boşluk miktarı – zaman grafikleri



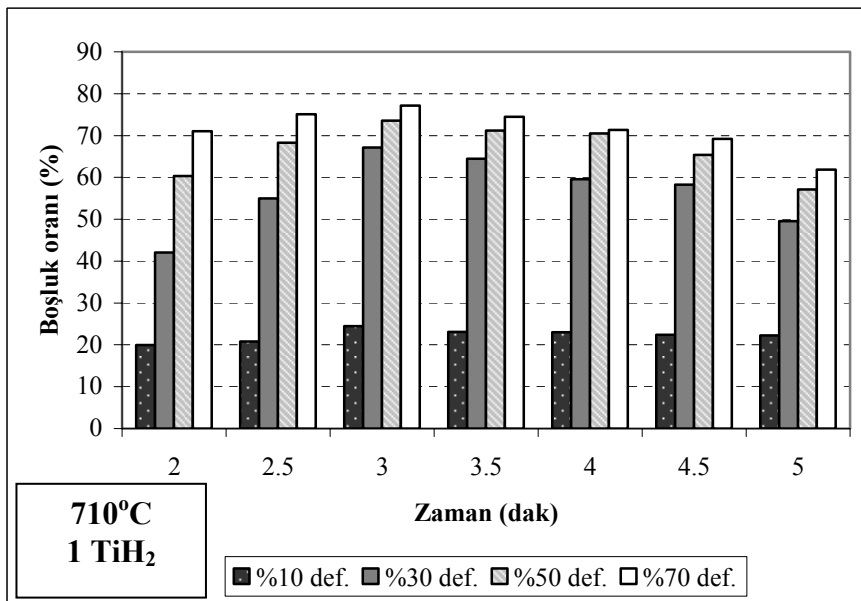
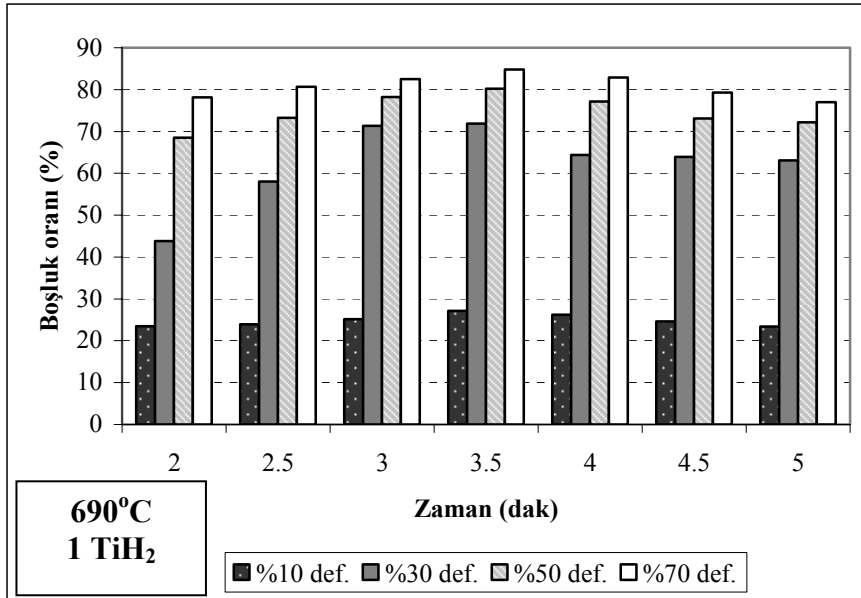
Şekil 3.2 (Devam) %0,75 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki boşluk miktarı – zaman grafikleri

EK-3 (Devam) Deney sonucu elde edilen boşluk miktarı – zaman grafikleri



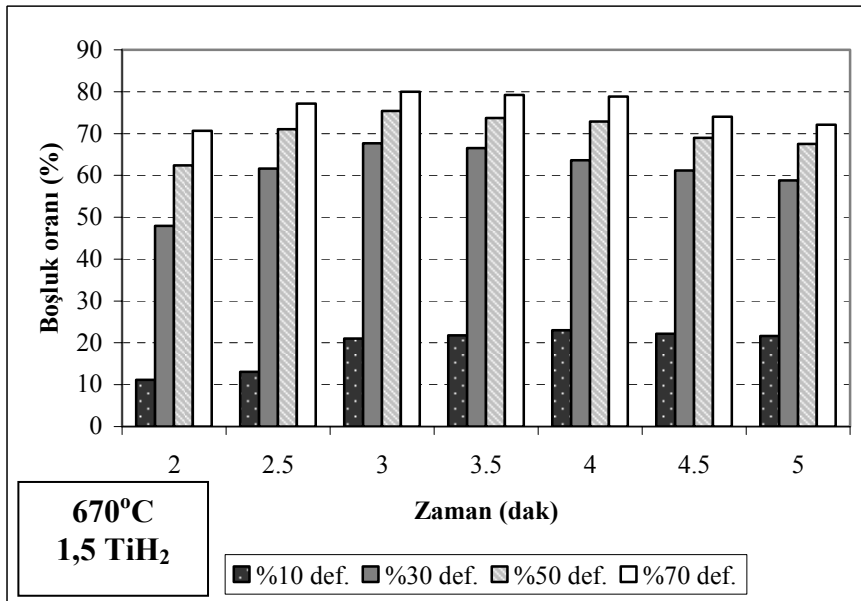
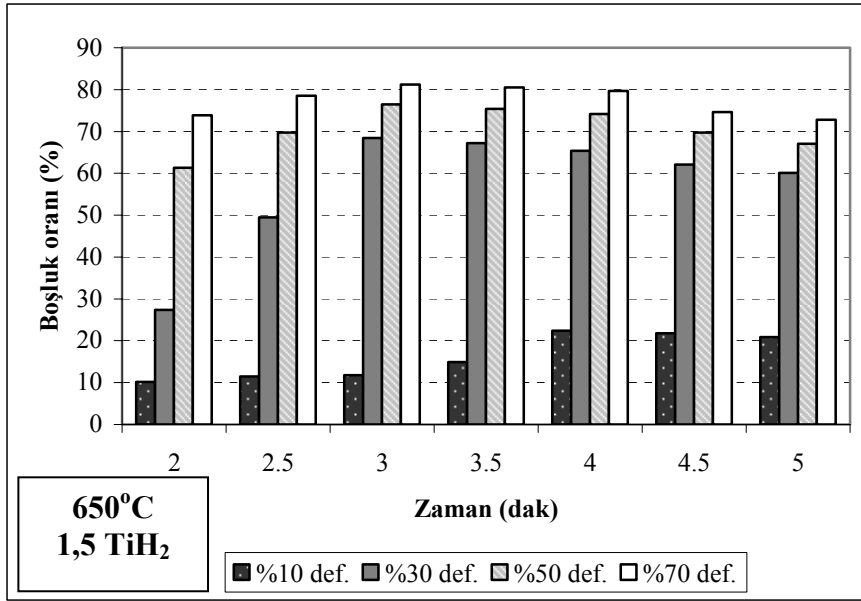
Şekil 3.3. %1 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki boşluk miktarı – zaman grafikleri

EK-3 (Devam) Deney sonucu elde edilen boşluk miktarı – zaman grafikleri



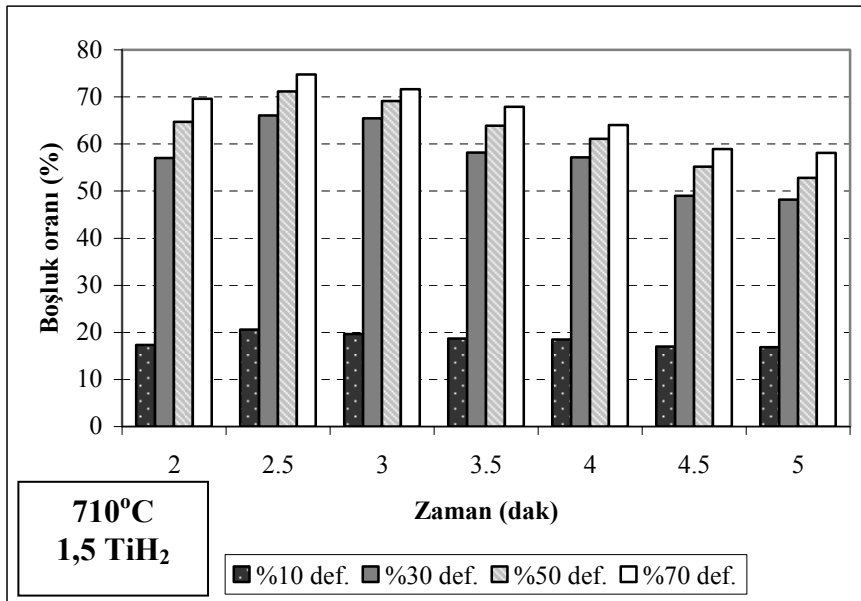
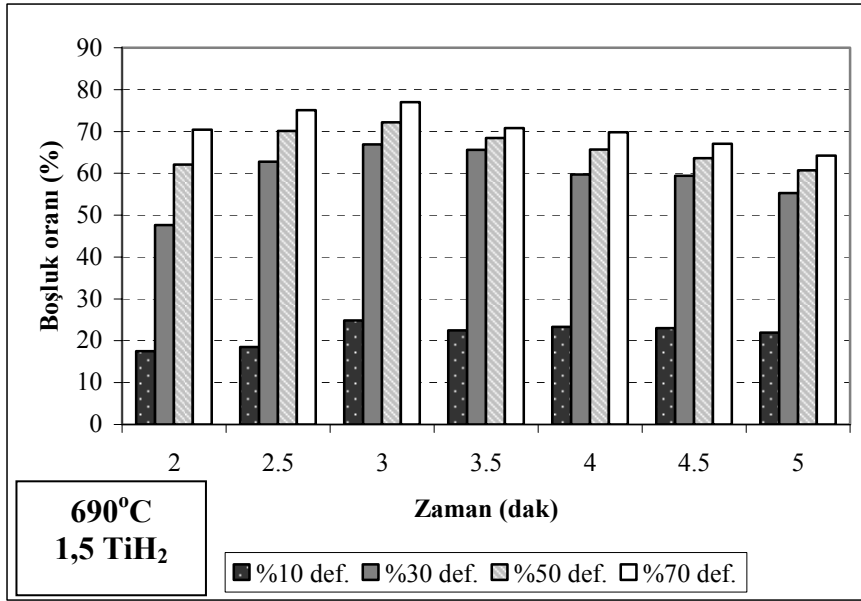
Şekil 3.3 (Devam) %1 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki boşluk miktarı – zaman grafikleri

EK-3 (Devam) Deney sonucu elde edilen boşluk miktarı – zaman grafikleri



Şekil 3.4. %1,5 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki boşluk miktarı – zaman grafikleri

EK-3 (Devam) Deney sonucu elde edilen boşluk miktarı – zaman grafikleri



Şekil 3.4 (Devam) %1,5 TiH₂ içeren numunelerin farklı sıcaklıklardaki boşluk miktarı – zaman grafikleri

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Arif UZUN
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1983 Amasya
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 535 260 91 22
 e-mail : auzun@kastamonu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi Metal Eğitimi Bölümü	2006
Lise	İncirli Endüstri Meslek Lisesi Metal İşleri Bölümü	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009 -	Kastamonu Üniversitesi Cide M.Y. O	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Tenis, Bilgisayar teknolojileri, Basketbol