

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM ESASLI GÖZENEKLİ MALZEME ELDE  
EDİLMESİ, KARAKTERİZASYONU VE BAZI  
ÖZELLİKLERİNİN İRDELENMESİ**

**Tezi Hazırlayan  
Ali Dinçer OGAN**

**Tezi Yöneten  
Prof. Dr. M. Baki KARAMIŞ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Doktora Tezi**

**Eylül 2008  
KAYSERİ**

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM ESASLI GÖZENEKLİ MALZEME ELDE  
EDİLMESİ, KARAKTERİZASYONU VE BAZI  
ÖZELLİKLERİNİN İRDELENMESİ**

**Tezi Hazırlayan  
Ali Dinçer OGAN**

**Tezi Yöneten  
Prof. Dr. M. Baki KARAMIŞ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Doktora Tezi**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi  
tarafından FBT-07-78 kodu ile desteklenmiştir.**

**Eylül 2008  
KAYSERİ**



## TEŞEKKÜR

Çalışmalarımı sürekli olarak değerli görüş ve katkılarıyla yönlendiren ve beni teşvik eden sayın hocam Prof. Dr. Mehmet Baki KARAMIŞ Bey'e teşekkürü bir borç bilirim.

Deneyisel çalışmalarda 1 nci Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı imkanlarından faydalanma olanağı veren değerli yöneticilerime, Eskişehir Anadolu Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü laboratuvar imkanlarını kullanma olanağı veren bölüm yöneticilerine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Mak. Yük. Müh. Kemal YILDIZLI Bey'e teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmalarım esnasında sabır ve yardımlarını esirgemeyen sevgili eşime ve yetişmemde büyük emekleri olan anne ve babama teşekkür ederim.

# ALÜMİNYUM ESASLI GÖZENEKLİ MALZEME ELDE EDİLMESİ, KARAKTERİZASYONU VE BAZI ÖZELLİKLERİNİN İRDELENMESİ

**Ali Dinçer OGAN**

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü  
Doktora Tezi, Ağustos 2008  
Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Baki KARAMIŞ**

## ÖZET

Gözenekli metaller düşük yoğunluk, mükemmel mekanik, ısı, elektriksel ve akustik özelliklerine sahip yeni bir malzeme grubudur. Bu özelliklerinden dolayı kullanışlı, tercih edilen metal türlerindedir ve geniş bir kullanım alanı mevcuttur.

Gözenekli metaller günümüzde özellikle otomotiv ve inşaat sektörü olmak üzere birçok sektörde yaygın olarak kullanım alanı bulmuş ve işlevselliğini göstermiştir.

Çalışmanın teori kısmında gözenekli metaller hakkında genel bilgi verilmekte ve özellikleri açıklanmaktadır. Ayrıca güncel ve uygulanan üretim yöntemleri açıklanmış ve örneklenmiştir.

Deneysel bölüm ise, gaz enjekte ederek gözeneklendirme, kabarcıklandırıcı maddeler ile gözeneklendirme ve toz sıkıştırırmalı ergitme teknikleri kullanılarak üretilen alüminyum esaslı gözenekli numuneler metalografik inceleme ve imaj analiz yöntemleri ile karakterize edilmiştir. Gözeneklendirmede kullanılan  $TiH_2$ 'nin kullanım oranına bağlı olarak oluşan gözenek yapısı, basma mukavemeti ve belirli basma yüklerinde enerji değerleri incelenmiştir. Ayrıca elde edilen numunelerin elektrik iletkenliği, özgül ısı ve sertliklerinin gözeneklilikten nasıl etkilendikleri araştırılarak değerlendirilmiştir. Aşındırma testleri yapılarak sonuçlar irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Gözenekli metal, Alüminyum, Basma davranışı, Aşınma, Gözenek, Karakterizasyon.

**TO GET ALUMINIUM BASED POROUS MATERIALS, CHARACTERISATION  
AND EXAMINATION SAME PROPERTIES**

**Ali Dinçer OGAN**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Ph.D. Thesis, August 2008**

**Thesis Supervisor: Prof. Dr. M. Baki KARAMIŞ**

**ABSTRACT**

Porous metals are a new class of materials with extremely low densities and unique combination of excellent mechanical, thermal, electrical and acoustic properties. They are widely preferred because of these properties.

In part of this thesis, general information about porous metals were given. Up-to-date and mostly used production methods were explained and examples were shown.

Porous metals have found a wide application area and showed superior functionality in many industrial sectors automotive and construction industry.

In experimental stage such as Foaming by Gas Injection, Foaming with Blowing Agents and Powder Compact Melting Technique were used. For samples, metallographic analyses, image analyses and compression tests were done. For porous structure bring into being TiH<sub>2</sub> was used. Depends on TiH<sub>2</sub>'s proportion, porous variation, energy for maximum compression force values were examined. In addition, electrical conductivity and hardness tests were done. Wear tests were done and results examined.

**Key Words :** Porous metals, Aluminium, Compression behaviour, Abrasion, Pore, Characterisation.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>SAYFA NO</b>
ONAY.....	I
TEŞEKKÜR.....	II
ÖZET.....	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	IX
TABLoların LİSTESİ.....	XV
1. BÖLÜM	
GİRİŞ.....	1
1.1. TEZİN KONUSU.....	1
1.2. TEZİN AMACI.....	3
1.3. TEZİN BÖLÜMLERİ.....	4
2. BÖLÜM	
GÖZENEKLİ MALZEMELER.....	6
2.1. GİRİŞ.....	6
2.2. GÖZENEKLİ MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ.....	7
2.3. GÖZENEKLİ MALZEMELERİN KULLANIM ALANLARI.....	11
3. BÖLÜM	
GÖZENEKLİ METALLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	14
3.1. GİRİŞ.....	14
3.2. ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	15
3.2.1. Gözenekli Metallerin Sıvı Hal Prosesi.....	16
3.2.1.1. Gaz Kullanarak Doğrudan Gözeneklendirme.....	16
3.2.1.1.1. Gaz Enjekte Ederek Gözeneklendirme.....	17
3.2.1.1.2. Kabarcıklandırıcı Maddeler İle Gözeneklendirme.....	20
3.2.1.2. Katı-gaz Ötektik Katılaştırması (“gasar”).....	21
3.2.1.3. Toz Sıkıştırılmalı Ergitme Tekniği.....	23

3.2.1.4. Döküm Yöntemleri	31
3.2.1.4.1. Polimer Köpükler İle Hassas Döküm	31
3.2.1.4.2. Kafes Bloklı Malzemeler	33
3.2.1.4.3. Boşluklu Malzemelerin Dökümü	33
3.2.1.5. Püskürtme İle Şekillendirme	37
3.2.2. Gözenekli Metallerin Katı Hal Prosesi	38
3.2.2.1. Metal Tozların ve Liflerin Sinterlenmesi	38
3.2.2.2. Gaz Yakalama Tekniği	40
3.2.2.3. Bulamaçların Şekillendirilmesi	42
3.2.2.4. Boşluk Tutucu Dolduruculardan Oluşan Gözenekli Metaller	43
4. BÖLÜM	
GÖZENEKLİ METALLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	46
4.1. GİRİŞ	46
4.2. GÖZENEKLİ METALLERİN KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ	47
4.2.1. Gözenek Miktarının (Göreceli Yoğunluğun) Hesaplanması	48
4.2.2. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	49
5. BÖLÜM	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	51
5.1. GİRİŞ	51
5.2. GAZ ENJEKTE EDEREK DOĞRUDAN GÖZENEKLENDİRME	52
5.2.1. Deney Seti	52
5.2.2. Deney Malzemeleri	54
5.2.3. Alüminyum Esaslı Gözenekli Metalin Elde Edilmesi	55
5.2.4. Metalografik Analiz	56
5.2.5. Görüntü Analizleri	60
5.2.5.1. Numuneleri Hazırlanması	60
5.2.5.2. Birinci Numune Görüntü Analizleri	61
5.2.5.3. İkinci Numune Görüntü Analiz Sonuçları	63
5.2.5.4. Üçüncü Numune Görüntü Analiz Sonuçları	64



5.2.5.5. Sertlik Testi	66
5.2.5.6. Elektrik İletkenliği	67
5.2.5.7. Basma Testi	68
5.3. TOZ SIKIŞTIRMALI ERGİTME TEKNİĞİ	72
5.3.1. Deney Seti	72
5.3.2. Kullanılan Malzemeler	74
5.3.3. Ön Deneme Numune Üretimi	75
5.3.4. Elde Edilen Numunelerin Değerlendirilmesi	77
5.3.4.1. 1A Nolu Numune	77
5.3.4.2. 2A Nolu Numune	79
5.3.4.3. 3A Nolu Numune	80
5.3.4.4. 4A Nolu Numune	81
5.3.5. Metalografik Analiz	82
5.3.5.1. 1A Nolu Numune Metalografik Analizi	82
5.3.5.2. 2A Nolu Numune Metalografik Analizi	84
5.3.6. Numune Üretimi	86
5.3.7. Görüntü Analizleri	89
5.3.8. Basma Testleri	92
5.3.9. Elektrik İletkenlik Değerleri	95
5.3.10. Sertlik Değerleri	97
5.3.11. Özgül Isı Değerleri	98
5.3.12. Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi	99
5.4. KABARCIKLANDIRICILI MADDELER İLE KÖPÜKLENDİRME	106
5.4.1. Deney Seti	107
5.4.2. Numune Üretimi	107
5.4.3. Metalografik Analiz	111
5.4.4. Basma Testi	113
5.4.5. Görüntü Analizleri	116
5.4.6. Elektrik İletkenlik	117
5.4.7. Özgül Isı	119
5.4.8. Sertlik	121
5.4.9. Aşınma	123

5.4.9.1. Adhezif Aşınma	124
5.4.9.2. Abrazif Aşınma ve Yüzey Pürüzlülüğü Deformasyonu	124
5.4.9.3. Yorulma ve Tabakalaşma Aşınması	126
5.4.9.4. Kimyasal Aşınma	127
5.4.10. Aşındırma Testleri	127
5.4.10.1 48 Nolu Numune Aşındırma Testleri	128
<b>6. BÖLÜM</b>	
<b>DENEYSEL ÇALIŞMALARDA GÖZENEKLİ MALZEME ÜRETİMİ YAPILAN ÜÇ FARKLI YÖNTEMİN KARŞILAŞTIRILMASI</b>	<b>145</b>
6.1. GİRİŞ	145
6.2. AKMA (BASMA) GERİLMESİ	145
6.3. GÖZENEKLİLİK	147
6.4. ELEKTRİK İLETKENLİĞİ	148
6.5. SERTLİK DEĞERLERİ	149
6.6. ÖZGÜL ISI DEĞERLERİ	150
6.7. SONUÇ	151
<b>7. BÖLÜM</b>	
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER</b>	<b>152</b>
7.1. SONUÇLAR	152
7.1.1. Gaz Enjekte Ederek Doğrudan Köpüklendirme Yöntemi Deney Sonuçları	152
7.1.2. Toz Sıkıştırılmalı Ergitme Tekniği Deney Sonuçları	153
7.1.3. Kabarcıklandırıcı Maddeler İle Köpüklendirme Deney Sonuçları	154
7.1.4. Gözenekli Malzeme Üretiminde Uygulanan Üç Farklı Yöntemin Karşılaştırma Sonuçları	156
7.2. ÖNERİLER	157
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>158</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>162</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>SAYFA NO</b>
Şekil 2.1. Elastomerik köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği	8
Şekil 2.2. Elastik-plastik köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği	8
Şekil 2.3. Elastik-kırılgan köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği	9
Şekil 3.1. Gaz enjekte ederek doğrudan gözeneklendirme (MMK Köpükleri)	17
Şekil 3.2. Farklı yoğunluk ve gözenek büyüklüğündeki iki adet köpük slab	19
Şekil 3.3. Partikül büyüklüğünün seçimi	19
Şekil 3.4. Köpücükendirici madde ile direk gözeneklendirme (“Alporas”-process)	20
Şekil 3.5. Gasar’ın gözenek yapısı. Yüzey normalı görünüşü	23
Şekil 3.6. Gasar üretme aparatı	23
Şekil 3.7. Toz sıkıştırılmalı ergitme işlemi	24
Şekil 3.8. Alüminyum/ TiH <sub>2</sub> ’nin 750 °C de köpüklendiğindeki genişmesi	25
Şekil 3.9. Toz sıkıştırılmalı ergitme yöntemiyle üretilmiş kurşun köpüğün kesiti	26
Şekil 3.10. Köpük enjeksiyonu işlemi	27
Şekil 3.11. Sandviç panel. İçi 12 mm kalınlığında alüminyum köpük, dış yüzeyler çelik	27
Şekil 3.12. Alüminyum/alüminyum köpük sandviç	28
Şekil 3.13. Alüminyum yüzeyle kaplanmış alüminyum köpük	30
Şekil 3.14. Hassas döküm ile hücrel metal üretimi	31
Şekil 3.15. Solda: “duocell” in görünüşü. Sağda: Hassas dökümle üretilen parçalar	32
Şekil 3.16. Boşluk tutucu doldurucularla hücrel metal üretimi	34
Şekil 3.17. Sentetik köpük oluşumunun işlem adımları	35
Şekil 3.18. Boşluk tutucularla üretilen hücrel alüminyum	36
Şekil 3.19. Boşluk tutucularla üretilen alüminyum parçalar	36
Şekil 3.20. Püskürtme ile şekillendirme yöntemine göre metal köpük üretimi	38
Şekil 3.21. 100 µm çaplı partiküllerden sinterlenmiş bronz malzeme	39
Şekil 3.22. Gaz yakalama tekniği	40
Şekil 3.23. TiAl6V4 sandviç. Gaz yakalama tekniği ile gözenekli iç yapı	42
Şekil 3.24. Metal tozların, boşluk tutucularla birleştirilerek gözenekli metal oluşumu	43
Şekil 3.25. (a): hücrel titanyum. (b): boşluk tutucu olarak magnezyum granülleri	45
Şekil 5.1. Deney düzeneği şematik gösterimi	53

Şekil 5.2. Deney tesisatında kullanılan karıştırıcının fotoğrafı	53
Şekil 5.3. Deney düzeneğinde kullanılan Argon gazı tüpü ve homojen gaz çıkışı sağlayabilmek için kullanılan çok delikli ucun fotoğrafları	54
Şekil 5.4. Deney düzeneğinin fotoğrafı	54
Şekil 5.5. Deney sonucu el edilen ham parçalar	56
Şekil 5.6. Ham parçalardan elde edilen numune kesiti.	56
Şekil 5.7. Analiz numunesinin genel görüntüsü	57
Şekil 5.8. Numune kesitlerinin Optik mikroskop görüntüleri.	58
Şekil 5.9. Numune kesitinin SEM görüntüleri.	58
Şekil 5.10. SEM / EDX ünitesi ile yapılan ana malzeme elemental analizi.	59
Şekil 5.11. Şekil 5.9. faz-1'in EDX analizi.	60
Şekil 5.12. Şekil 5.9. faz-2 EDX analizi.	60
Şekil 5.13. Birinci numune kesitindeki gözenekler.	61
Şekil 5.14. Birinci numune yüzey analiz verileri.	62
Şekil 5.15. İkinci numune kesiti gözenekleri.	63
Şekil 5.16. İkinci numune analiz verileri.	63
Şekil 5.17. Üçüncü numune kesiti gözenekleri.	64
Şekil 5.18. Üçüncü numune analiz verileri.	65
Şekil 5.19. Gaz debisine bağlı oluşan gözenek sayısı.	66
Şekil 5.20. Toplam gözenek alanının yüzey alanına Oranının gaz debisine bağlı olarak değişimi.	66
Şekil 5.21. Sertliğin gözenek alanıyla değişimi.	67
Şekil 5.22. Elektrik iletkenliğinin gözenek alanıyla değişimi.	68
Şekil 5.23. Basma testinde kullanılan instron marka mekanik test cihazı.	69
Şekil 5.24. 1, 2 ve 3 numaralı örneklere ait basma gerilmesi- şekil değiştirme eğrileri.	69
Şekil 5.25. Gözenek alanının basma mukavemetine etkisi.	71
Şekil 5.26. Toz sıkıştırılmalı ergitme tekniğine ait deney düzeneği.	73
Şekil 5.27. Hassas terazide alüminyum ve TiH <sub>2</sub> tozunun tartılması.	75
Şekil 5.28. Saf Alüminyum ve TiH <sub>2</sub> tozları ve 5 mm çapındaki zirkonyum bilyalar.	75
Şekil 5.29. Alüminyum ve TiH <sub>2</sub> tozlarının karıştırıldığı düzenek	76
Şekil 5.30. Numunelerin basıldığı kalıp ve hidrolik pres.	76
Şekil 5.31. Hidrolik presde basılan numune.	76

Şekil 5.32. Isı ve zaman kontrollü fırın.	77
Şekil 5.33. 1A numaralı örneğin makroskopik görüntüsü.	78
Şekil 5.34. 1A numaralı örneğe ait SEM görüntüsü	78
Şekil 5.35. 2A nolu numunede oluşan Alüminyum fişkırması.	79
Şekil 5.36. 2A numaralı örneğe ait SEM görüntüsü	79
Şekil 5.37. 3A numaralı örneğin makroskopik görüntüsü.	80
Şekil 5.38. 3A numaralı örneğe ait SEM görüntüsü	81
Şekil 5.39. Sıcaklığın 800 °C üzerine çıkması ile 4A nolu numune yüzeyinde meydana gelen çatlamlar.	81
Şekil 5.40. 4A numaralı örneğe ait SEM görüntüsü	82
Şekil 5.41. 1A numaralı örneğin 750 büyütmedeki SEM görüntüsü.	83
Şekil 5.42. 2A numaralı örneğin 750 büyütmedeki SEM görüntüsü.	85
Şekil 5.43. Sinterleme sıcaklık-zaman grafiği.	87
Şekil 5.44. 13 numaralı numuneye ait Makroskobik görüntü.	88
Şekil 5.45. 13 numaralı numuneye ait SEM görüntüleri.	88
Şekil 5.46. 23 nolu numune görüntü analizi.	89
Şekil 5.47. 23 nolu numune görüntü analizi.	90
Şekil 5.48. 23 nolu numuneye ait XR-D grafiği.	90
Şekil 5.49. 37 nolu numuneye ait basma gerilmesi-şekil değiştirme eğrisi.	93
Şekil 5.50. 38 nolu numuneye ait basma gerilmesi-şekil değiştirme eğrisi.	93
Şekil 5.51. Tane büyüklüğünün gözenek oluşumuna etkisi.	95
Şekil 5.52. Toz sıkıştırılmalı ergitme tekniği ile üretilen numunelerin (ortalama) ve farklı alüminyum alaşımlarının elektriksel iletkenlik değerleri.	96
Şekil 5.53. Elektrik iletkenliğinin gözenek çapına bağlı değişimi.	96
Şekil 5.54. Elektrik iletkenliğinin gözenek alanına bağlı değişimi.	97
Şekil 5.55. Özgül ısının gözenek alanıyla değişimi.	98
Şekil 5.56. Hacim oranı % 0,6 olan numunelerin basma mukavemeti, maksimum basma yükünde enerji ve elastisite modülü değerleri.	99
Şekil 5.57. Hacim oranı % 1 olan numunelerin basma mukavemeti, maksimum basma yükünde enerji ve elastisite modülü değerleri.	100
Şekil 5.58. Farklı hacim oranlarındaki numunelerin ortalama basma mukavemeti değerleri.	101
Şekil 5.59. Farklı hacim oranlarındaki numunelerin maksimum basma yükünde enerji değerleri.	101
Şekil 5.60. Farklı hacim oranlarında hazırlanan numunelerin ortalama basma mukavemeti ve maksimum basma yükünde enerji değerleri.	102

Şekil 5.61. Ortalama basma mukavemeti değerlerinin, maksimum basma yükündeki enerji değerleri ile değişimi.	103
Şekil 5.62. TiH <sub>2</sub> oranının elastisite modülüne etkisi.	103
Şekil 5.63. Hacim oranı % 0,6 olan sinterli ve sintersiz numunelerin basma mukavemeti değerleri.	104
Şekil 5.64. Hacim oranı % 1 olan sinterli ve sintersiz numunelerin basma mukavemeti değerleri.	104
Şekil 5.65. Hacim oranı % 0,6 olan sinterli ve sintersiz numunelerin maksimum basma yükünde enerji değerleri.	105
Şekil 5.66. Hacim oranları % 1 olan sinterli ve sintersiz numunelerin maksimum basma yükünde enerji değerleri.	105
Şekil 5.67. Deney düzeneği şematik gösterimi.	107
Şekil 5.68. Dökümden önce malzemelerin hazırlanması.	109
Şekil 5.69. Alüminyumun ergitilmesi.	109
Şekil 5.70. Kalıba döküm.	109
Şekil 5.71. Kabarcıklandırıcı maddelerle üretilmiş 48 nolu numuneye ait gözenekli yapı.	110
Şekil 5.72. 48 nolu numunede oluşan gözeneklerin SEM görüntüleri.	110
Şekil 5.73. 10 nolu numuneye ait ana malzeme EDX elemental analizi.	111
Şekil 5.74. 48 nolu numuneye ait ana malzeme EDX elemental analizi.	112
Şekil 5.75. Kabarcıklandırıcı maddelerle üretilmiş numunelere ait basma gerilmesi şekil değiştirme eğrileri.	113
Şekil 5.76. Kabarcıklandırıcı maddelerle üretilmiş 10 ve 46 nolu numunelere ait basma gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri.	114
Şekil 5.77. Kabarcıklandırıcı olarak kullanılan TiH <sub>2</sub> oranı değişiminin basma mukavemetine etkisi.	115
Şekil 5.78. 10 numaralı örneğe ait Makroskobik ve SEM görüntüsü.	116
Şekil 5.79. TiH <sub>2</sub> oranının, gözenek yapısına etkisi.	117
Şekil 5.80. TiH <sub>2</sub> oranının elektrik iletkenliğine etkisi.	118
Şekil 5.81. Elektrik iletkenliğinin gözenek alanıyla değişimi.	118
Şekil 5.82. Kabarcıklandırıcı maddeler ile üretilen numunelerin (ortalama) ve farklı alüminyum alaşımlarının elektrik iletkenlik değerleri.	119
Şekil 5.83. Özgül ısının gözenek alanıyla değişimi.	121
Şekil 5.84. TiH <sub>2</sub> oranının sertliğe etkisi.	122
Şekil 5.85. Sertliğin gözenek alanıyla değişimi.	123
Şekil 5.86. Temel Aşınma Mekanizmaları	124

Şekil 5.87. Üç farklı abrazif aşınma tarzının SEM görüntüsü, a) Kesme tarzı (pirinç pleyt üzerine çelik pim), b) kama oluşumu tarzı ( paslanmaz çelik pleyt üzerine çelik pim) c) saban tarzı (pirinç pleyt üzerine çelik pim)	125
Şekil 5.88. Abrazif aşınma mekanizmaları	125
Şekil 5.89. Tabakalaşma Aşınması sırasında meydana gelen yüzey altı çatlakları ve levha şeklindeki aşınmış tanecikler.	127
Şekil 5.90. 400 d/d hızda aşındırma test grafiği.	128
Şekil 5.91. 600 d/d hızda aşındırma test grafiği.	129
Şekil 5.92. 800 d/d hızda aşındırma test grafiği.	129
Şekil 5.93. Kuru şartlarda yüke bağlı ağırlık kaybı değişimi.	130
Şekil 5.94. Kuru şartlarda aşındırma hızına bağlı ağırlık kaybı değişimi.	131
Şekil 5.95. Kuru şartlarda yüke bağlı yüzey pürüzlülük değişimi.	131
Şekil 5.96. Kuru şartlarda aşındırma hızına bağlı yüzey pürüzlülük değişimi.	132
Şekil 5.97. Kuru şartlarda 50 N yük ve 800 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.	132
Şekil 5.98. Kuru şartlarda 75 N yük ve 600 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.	133
Şekil 5.99. Kuru şartlarda 100 N yük ve 800 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.	133
Şekil 5.100. Kuru şartlarda 100 N yük ve 600 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.	134
Şekil 5.101. 400 d/d hızda aşındırma test grafiği.	134
Şekil 5.102. 600 d/d hızda aşındırma test grafiği.	135
Şekil 5.103. 800 d/d hızda aşındırma test grafiği.	135
Şekil 5.104. Yağlı şartlarda yüke bağlı ağırlık kaybı değişimi.	136
Şekil 5.105. Yağlı şartlarda aşındırma hızına bağlı ağırlık kaybı değişimi.	136
Şekil 5.106. Yağlı şartlarda yüke bağlı yüzey pürüzlülük değişimi.	137
Şekil 5.107. Yağlı şartlarda aşındırma hızına bağlı yüzey pürüzlülük değişimi.	137
Şekil 5.108. Yağlı şartlarda 50 N yük ve 800 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.	138
Şekil 5.109. Yağlı şartlarda 75 N yük ve 600 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.	138
Şekil 5.110. Yağlı şartlarda 100 N yük ve 800 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.	139
Şekil 5.111. 400 d/d hızda aşındırma test grafiği.	139
Şekil 5.112. 600 d/d hızda aşındırma test grafiği.	140
Şekil 5.113. 800 d/d hızda aşındırma test grafiği.	140
Şekil 5.114. Yağlı şartlarda yüke bağlı ağırlık kaybı değişimi.	141

Şekil 5.115. Yağlı şartlarda aşındırma hızına bağlı ağırlık kaybı değişimi.	141
Şekil 5.116. Yağlı şartlarda yüke bağlı yüzey pürüzlülük değişimi.	142
Şekil 5.117. Yağlı şartlarda aşındırma hızına bağlı yüzey pürüzlülük değişimi.	142
Şekil 5.118. Yağlı şartlarda 50 N yük ve 800 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 10 nolu numunenin SEM görüntüsü.	143
Şekil 5.119. Yağlı şartlarda 75 N yük ve 600 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 10 nolu numunenin SEM görüntüsü.	143
Şekil 5.120. Yağlı şartlarda 100 N yük ve 800 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 10 nolu numunenin SEM görüntüsü.	144
Şekil 6.1. Akma gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması.	146
Şekil 6.2. Gözeneklilik değerlerinin karşılaştırılması.	147
Şekil 6.3. Elektrik iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması.	148
Şekil 6.4. Sertlik değerlerinin karşılaştırılması.	149
Şekil 6.5. Özgül ısı değerlerinin karşılaştırılması.	150



**TABLolar LİSTESİ**

	<b>SAYFA NO</b>
Tablo 2.1. Uygulanabilir Köpük Metal örnekleri	13
Tablo 3.1. Bir fazın diğer bir faz içerisindeki dağılımı	15
Tablo 3.2. Gözenekli metallerin üretim yöntemleri	16
Tablo 5.1. 1, 2 ve 3 numaralı örnekler için basma testi verileri.	70
Tablo 5.2. Ön deneme numuneleri için deney parametreleri.	77
Tablo 5.3. Farklı hacim oranlarında ve tane büyüklüklerinde TiH <sub>2</sub> tozu kullanılarak hazırlanan numuneler.	87
Tablo 5.4. 23 nolu numuneye ait XR-D sonuçları.	91
Tablo 5.5. Görüntü analiz sonuçları	91
Tablo 5.6. 1 nolu numuneye ait basma testi sonuçları.	92
Tablo 5.7. Numunelerin basma testi sonuçları.	94
Tablo 5.8. Elektrik iletkenlik değerleri.	95
Tablo 5.9. Numunelerin özgül ısı değerleri.	98
Tablo 5.10. Ağırlıkça farklı % oranlarında TiH <sub>2</sub> kullanılarak hazırlanan numuneler.	108
Tablo 5.11. Basma Testi Sonuçları.	114
Tablo 5.12. Kabarcıklandırıcı maddelerle üretilen numunelerin imaj analiz sonuçları.	116
Tablo 5.13. Elektrik iletkenlik değerleri.	117
Tablo 5.14. Özgül ısı değerleri.	120
Tablo 5.15. Brinell sertlik değerleri.	121

## 1. BÖLÜM

### GİRİŞ

#### 1.1. TEZİN KONUSU

Gözenekli metallere adını çokça duyduğumuz ve dünya endüstrisinde oldukça büyük yer kaplayan düşük yoğunluk, mükemmel mekanik, ısı, elektriksel ve akustik özelliklere sahip yeni bir malzeme grubudur. Bu malzemelerin ilk araştırmaları 1940 da ABD de başlamıştır. Cyril Stanley Smith'in yaptığı araştırmalar, gözenekli metallere ilk yapımlarını tetiklemiştir [1].

Kompozit ve plastik malzemelerin köpükleri oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Günlük yaşantımızda oldukça fazla karşımıza çıkan minderlerde, ambalajlarda, yalıtımda kullanılan poliüretan ve polistren malzemeler gözenekli metallere üretilebileceği konusunda örnek teşkil etmiştir. Bu malzemeler üretilbiliyorsa metallere köpük şeklinde üretilerek metallere özellikleri köpük yapılardan istenilen özelliklere göre modifiye edilebilir gerçeği oluşmuştur ve köpük metal üzerine araştırmalar başlamıştır.

Köpük metallere üzerine yapılan araştırmaların sonucunda, kullanımında büyük avantaj sağlayacak özelliklerinin ortaya çıkması, dünya endüstrisi ve bilim adamları tarafından köpük metali çok cazip hale getirmiştir. Hafiflik, sertlik ve ezilmeye dayanım gibi başlıca fiziksel özelliklere sahip olan köpük metallere, araştırmacıların iştahını kabartmıştır. İlk zamanlarda geri dönüşümü sağlanamayan köpük metallere sonradan değişik üretim ve geri dönüşüm tekniklerinin bulunması ile sanayide oldukça kullanışlı ve cazip bir malzeme olmasını sağlamıştır.

Dünya üzerinde üretim ve kullanım olarak köpük metalle ilgilenen ülkelerin başlıcaları ABD, Avusturya, Almanya, Japonya'dır. Özellikle otomotiv ve inşaa alanlarında ileri olan bu ülkeler, köpük metalleri ana malzemeleri gibi kullanmaktadır.

Ülkemizde ise, köpük metaller, araştırma ve geliştirme safhasındadır. Üretimi ve kullanımı yok denecek kadar azdır. Köpük metal üretimi Türkiye'de geleceğe yönelik önemli bir yatırım aracı olacaktır.

Dünyada en çok itibarı olan ve dünya ekonomisinin bir nevi lokomotif görevini gören ve ekonominin belirleyici bir özelliği olan otomotiv endüstrisi ve inşaa, köpük metal kullanımının artmasında çok büyük etken teşkil etmektedir. Otomotiv endüstrisindeki asıl kullanım amacı yüksek enerji absorpsiyonudur.

İnşaa alanındaki kullanımı ise ses ve ısı yalıtımı özelliğidir. Yangına karşı üst düzeyde güvenlik sağlamaktadır. Yangın ihtimali yüksek olan bölgelerde, yangından korunması gereken malzemelerin olduğu depolarda yüksek oranda köpük metal kullanılmaktadır. Sadece yalıtım özelliğinden değil, hafiflik ve dayanıklılık özelliği de inşaa alanında kullanımını arttırmaktadır.

Düşük yoğunluk, düşük ergime sıcaklığı ve üstün mekanik özellikleri sebebi ile alüminyum günümüzde en çok kullanılan köpük metal yapım malzemesidir.

Ticari olarak üretilen köpük metallere eriyik temelli üretim egemen olmuştur. Bir çok şirket köpük metal üretmeye başlamıştır. The Shinko Wire Co. (Japonya) "ALPORAS" adıyla bilinen alüminyum köpük metal üretimini gerçekleştirmektedir. Hydro (Norveç) ve Cymat (Kanada) eriyiğe gaz üfleme tekniği ile alüminyum köpük metal üretimi yapmaktadır. Alulight (Avusturya) toz metalurjisi ile alüminyum köpük metal üretmektedir [2].

İyi kalite köpük metal üretebilmek yüksek maliyet gerektirdiğinden, pazardaki köpük metaller hala sınırlıdır. Dünyada çeşitli üniversitelerde daha düşük maliyetlerle yüksek kalitede köpük metal üretimi yapılabilmektedir [2].

## 1.2. TEZİN AMACI

Gözenekli metaller diğer malzemelerde elde edilmesi zor olan bazı mekanik ve fiziksel özelliklerin kombinasyonuna sahiptir. Bunlara örnek olarak; yüksek tokluk, basma mukavemeti, iyi enerji absorpsiyon kabiliyetleri, ateşe dayanıklılık ve akustik sönümleme kabiliyeti verilebilir.

Metalik köpüklerin mekanik ve fiziksel özellikleri hücresel yapıları (açık veya kapalı) ve yoğunluklarına oldukça bağlıdır. Bunlar da üretim metodu ve parametreleri üzerinde etkilidir. Hücresel malzemelerin özgül mekanik ve fiziksel özellikleri her zaman için hacimsel eşlerine göre kötüdür. Bu durum elastisite modülü, mukavemet ve enerji absorpsiyon kabiliyeti için de geçerlidir.

Hücresel yapıların en önemli özelliği hafiflikleridir. Hücrelerin ilave bir etkisi olarak da kütle ayrılığından dolayı atalet momentinin yüksek olmasıdır. Sonuçta hücresel yapılar yüksek özgül eğilme tokluğu ve mukavemeti sergilemektedir. Bu mukavemet iki levhannın arasında köpük kullanımıyla elde edilen sandviç yapı ile daha da artırılabilir. Yoğun malzemelerden farklı olarak hücresel malzemeler deforme oldukça yoğunlukları artar. Deformasyon elastik kaldığı sürece homojen dağılım söz konusudur. Plastik rejimde hücrelerde bölgesel bantlar halinde hasarlar meydana gelir.

Bu arada kalan hasara uğramış hücreler gerilmeyi düşük ve sabit bir seviyede tutarlar. Bu davranış düşük gerilme seviyesinde enerji absorpsiyonu sağlar. Hücresel yapılar ayrıca ses enerjisini absorbe etmeye de yarar. En önemli sönümleme mekanizması gazın bir hücreden diğerine akışı sırasındaki ses dalgasındaki sürtünme kayıplarıdır. Yani sesi iyi absorbe edebilmek için hücrelerin birbiri ile bağlantılı olması gerekmektedir. Hücresel yapılar ısı yönteminde de kullanılabilir. Hücresel konstrüksiyon termal izolasyonda kullanılacak şekilde çok yüksek ısı iletim katsayısına sahiptir. Diğer taraftan hücrenin yüksek termal iletkenliği ve yüksek iç yüzey alanı ısı eşanjör uygulamaları için ideal özelliklerdir.

Hücresel malzemelerin en büyük potansiyeli alışılmamış malzeme özellikleri kombinasyonları sunmalarıdır. Yani her zaman için belirli bir özellik için daha iyi çözümler mevcuttur. Şayet birden fazla özellik bir arada isteniyorsa mesela ses

absorbsiyonu ve termal kararlılık gibi metal köpüklerin avantajı daha da iyi anlaşılır.

Bu çalışmada; gözenekli metal malzemelerin üretim yöntemleri olarak en yaygın kullanılan gaz enjekte ederek gözeneklendirme, kabarcıklandırıcı maddeler ile gözeneklendirme ve toz sıkıştırılmalı ergitme teknikleri kullanılarak üretilen numuneler metalografik inceleme ve imaj analiz yöntemiyle karakterize edilecek, basma deneyleri yapılarak gözenekliliğin basma mukavemeti üzerindeki etkileri incelenecektir.

Böylece ticari olmaları nedeniyle literatürde belli olmayan bazı özelliklerin tespiti ile bu alandaki bilimsel boşluk doldurulmaya çalışılacaktır.

Ayrıca elde edilen numunelerin elektrik iletkenliği, özgül ısı ve sertlik ölçümleri değerlendirilecektir. Ülkemiz şartlarında bu tür malzemelerin üretilebilirliği ve kullanılmasının (ticarileşerek) teşvik edilmesi ve araştırmacıların bu konuda yapacağı çalışmalar için bilgi birikimi sağlaması hedeflenmektedir.

### **1.3. TEZİN BÖLÜMLERİ**

Bu tez altı bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerden birincisinde tez konusu kısaca tanıtarak tezin gerekçesi ve hedefleri belirlenmiştir.

İkinci bölümünde; gözenekli malzemeler genel olarak incelenmiş olup gözenekli malzemelerin mekanik özellikleri ve kullanım alanları genel hatlarıyla açıklanmıştır.

Üçüncü bölümünde; gözenekli metallerin üretim teknikleri ana hatlarıyla açıklanmıştır.

Dördüncü bölümünde; gözenekli metallerin mekanik özellikleri kısaca belirtilerek, karakterizasyon yöntemleri üzerinde durulmuştur. Mekanik özelliklerin belirlenmesi kapsamında özellikle basma testinden bahsedilerek, anizotropik (farklı yönlerde farklı özellik gösteren) malzemelerin mekanik karakterizasyonunun genellikle basma testi ile belirlenebileceğine vurgu yapılmıştır.

Beşinci bölümü deneysel çalışmalar ve değerlendirmeye ayrılmış; öncelikle deneylerde kullanılan yöntemler kısaca açıklanmış, deney tesisatının kurulması, numunelerin

hazırlanması ve deney öncesi hazırlıklardan söz edilmiştir. Daha sonra önceden belirlenilen deney programına bağılı olarak deneylerin gerçekleştirilmesi, deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve yorumlanması ile bu bölüm sonlanmıştır.

Altıncı bölümünde; gaz enjekte ederek gözeneklendirme, toz sıkıştırılmalı ergitme tekniğı ve kabarcıklandırıcı maddeler ile gözeneklendirme yöntemlerinin uygulandığı bu çalışmada her üç yöntemle elde edilen deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Mukayeseler; Ortalama basma mukavemeti değerleri, gözeneklilik, elektrik iletkenliğı, sertlik değerleri ve özgül ısı değerleri göz önüne alınarak yapılmıştır.

Tezin yedinci bölümünde deneylerden elde edilen sonuçlar net bir şekilde ortaya konularak ileri çalışmalar için görüş ve öneriler belirtilmiştir.

## 2. BÖLÜM

### GÖZENEKLİ MALZEMELER

#### 2.1. GİRİŞ

Gözenekli yapıların yalıtım, paketlenme ve filtreleme gibi uygulamalar için çok uygun olduğu bilinmektedir. Ancak bu tür malzemelerin yapısal amaçlarla kullanılabilmesine inanmak oldukça güçtür. Binlerce bilimsel çalışma dökümlerle üretilen malzemeleri, toz metalürji ürünlerini, kaynak dikişlerini ve kaplamaları tamamı ile gözeneksiz yapabilmek için yürütülmektedir [3]. Oysa köpükler ve diğer yüksek gözenekliliğe sahip hücreli malzemeler yüksek mekanik enerji emebilme kapasitesi, yüksek rijitlik ve çok düşük özgül ağırlık gibi fiziksel ve mekanik özelliklerin birleşimine sahip oldukları için doğa tarafından da yapısal ve işlevsel amaçlarla sıkça kullanılmaktadır (ör. kemik ve ağaç yapıları) [4]. İnsanoğlu da yüzyıllardır doğal gözenekli malzemeleri yapısal amaçlarla kullanmaktadır. Mısır piramitleri en az 5000 yıllık ahşap malzeme içermektedir. Doğal mantarlar Roma devrinden beri (M.Ö. 27) şarap şişelerinde tıpa olarak kullanılmaktadır [5].

Daha sonraları insanoğlu doğadan ilham alarak kendi gözenekli malzemelerini yapmaya başlamıştır. Günlük hayatta en sık karşılaştığımız gözenekli malzemeler, tek kullanımlık sıcak içecek bardaklarından hava araçlarındaki çarpma yastıklarına kadar çeşitli uygulamalarda kullanılan polimerik köpüklerdir [5]. Seramik köpük malzemeler ise katalitik reaktörler, güneş enerjisi jeneratörleri, dizel egzoz ve döküm filtreleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Ancak yük taşıma amacı ile üretilen köpüğün malzemesi dikkatli seçilmelidir. Yapısal işlev için polimerler yetersiz mukavemette iken seramik malzemeler fazla kırılabilir yapıdadır. Dolayısıyla metalik malzemeler yük taşıyıcı köpükler için en uygun özelliklere sahiptirler [3].

Gözenekli malzemelerin özelliklerini belirleyen en önemli parametre göreceli yoğunluktur. Göreceli yoğunluk ( $\rho^*/\rho_s$ ) köpük malzemenin yoğunluğunun ( $\rho^*$ ) hücre duvarını oluşturan malzemenin yoğunluğuna ( $\rho_s$ ) oranı ile ifade edilir. Genel olarak gözenekli malzemeler 0.3'ten az göreceli yoğunluğa sahiptirler. Gözenek boyutu da önemli bir parametre olmakla birlikte birçok mekanik ve ısıl özelliği nispeten az miktarda etkiler. Gözenek şekli ise malzeme özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Eşeksizli gözenek yapısına sahip malzeme izotropik özellik gösterirken az miktarda uzamış veya düzleşmiş gözeneğe sahip malzemede dahi yöne bağlı özellik değişimi gözlemlenir [3].

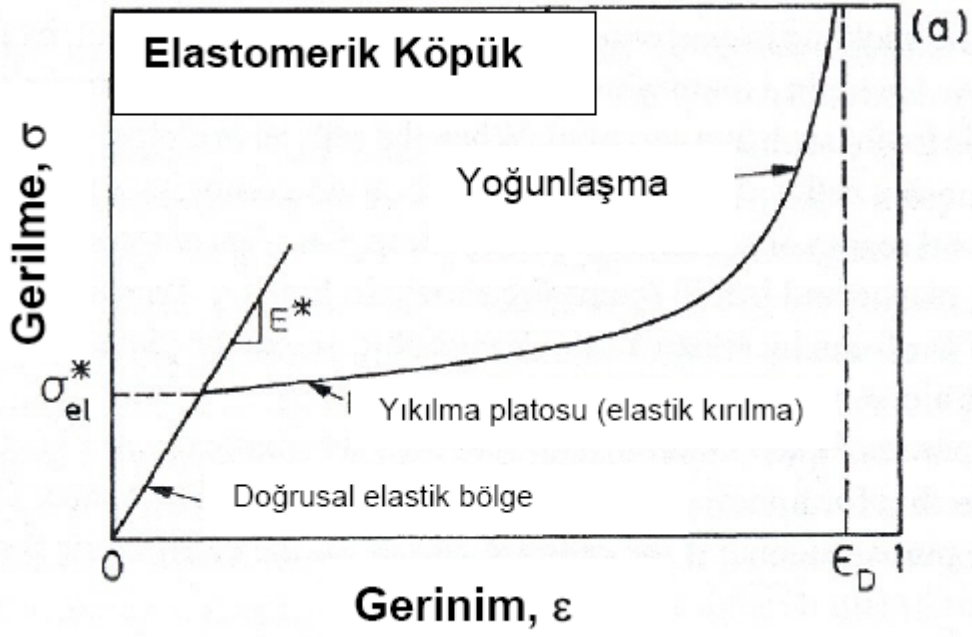
Gözeneklerin iki veya üç boyutlu olması da malzeme özelliklerinde olduğu gibi bu özelliklerin modellenmesinde de oldukça etkindir. İki boyutlu gözenek yapısına (bal peteği yapısı) sahip malzemelerin modellenmesi nispeten kolayken düzensiz yapıda gözeneğe sahip malzemeler (köpükler) için modelleme oldukça güçtür [5].

Üç boyutlu gözenek yapısına sahip malzemelerin, diğer bir deyişle köpüklerin, mekanik özellikleri açık veya kapalı gözenek yapısına sahip olmalarına bağlıdır. 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. Elbette ki her köpük tamamen açık ya da tamamen kapalı gözenek yapısına sahip değildir. Birçok gözenekli malzeme her iki türden de gözeneği barındırır [3,5].

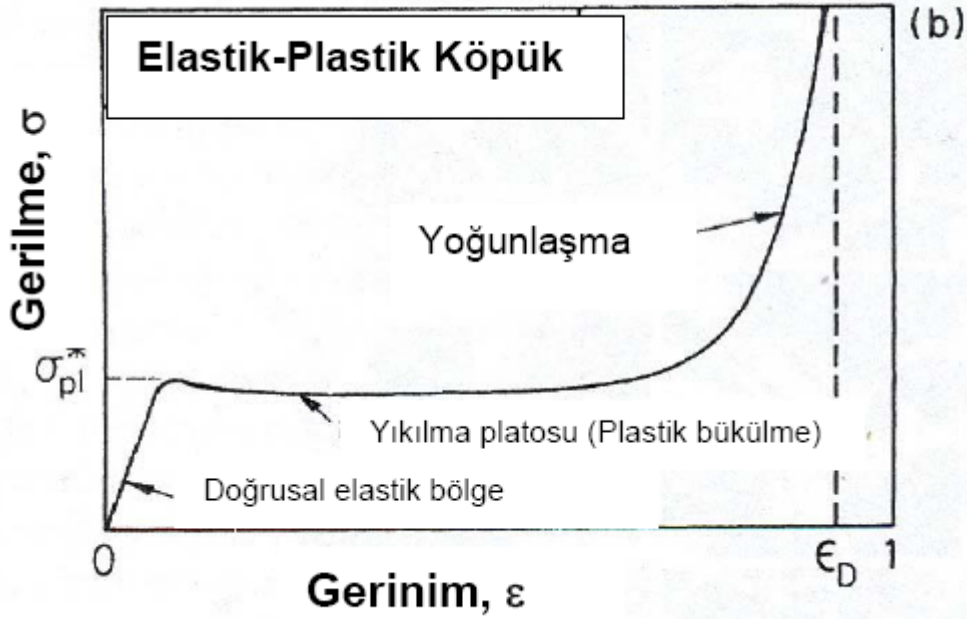
## **2.2. GÖZENEKLİ MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

Şekil 2.1, 2.2. ve 2.3. sırasıyla elastomerik, elastik-plastik ve elastik-kırılgan köpüklerin tipik deformasyon grafiklerini göstermektedir. Bütün köpükler düşük gerinim değerlerinde doğrusal elastik davranış gösterirler. Bu bölgedeki eğim elastik modülünü ( $E^*$ ) verir. Artan gerinimle gerilme-gerinim grafiğinde uzun bir “yıkılma platosu” gözlenir ve bu bölgeyi sabit gerinimde gerilmenin oldukça dik şekilde arttığı “yoğunlaşma” bölgesi izler [5].

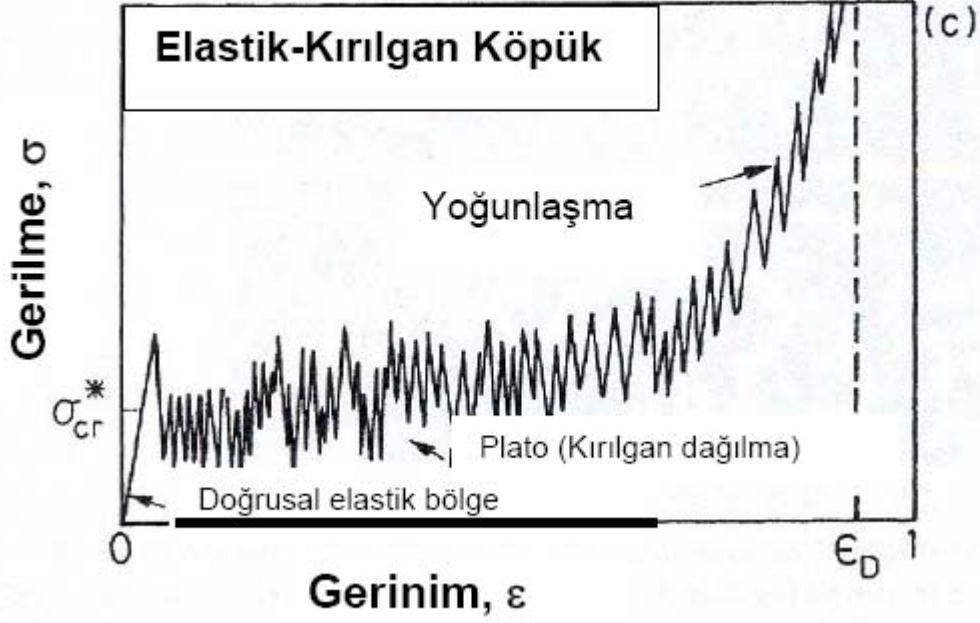




Şekil 2.1. Elastomerik köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği [5].



Şekil 2.2. Elastik-plastik köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği [5].



Şekil 2.3. Elastik-kırılğan köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği [5].

Doğrusal elastisite “hücre duvarı eğilmesi”, hücreler kapalı ise “hücre duvarı gerilmesi” tarafından kontrol edilir. Köpüklerin elastisite modülü ( $E^*$ ) gerilme-gerinim grafiğinin ilk bölgesinde yer alan doğrusal bölgenin eğimidir. Basma kuvvetine maruz kalan köpüğün plato bölgesi gözeneklerin yıkılması ile ilişkilidir. Gözenek yıkılması elastomerik köpüklerde (lastik vs.) elastik bükülme, elastik-plastik köpüklerde (metal vs.) oluşan ve akmaya sebep olan plastik menteşe bölgeleri ve kırılğan köpüklerde (seramik vs.) gözenek duvarlarının birbirine çarparak dağılması ile meydana gelir. Gözenekler neredeyse tamamen yıkıldığında gözenek duvarları birbirine değeri ve uygulanan gerinim katı malzemenin kendisini sıkıştırmaya başlar. Bu durum gerilme-gerinim grafiğinin son bölgesinde gerilmenin hızla artmasını sağlar [5].

Köpüklerin göreceli yoğunluklarının artırılması elastisite modülünü ve plato gerilmesini artırarak yoğunlaşmanın başladığı gerinimi azaltır [7].

Bir köpüğün doğrusal elastik özellikleri hücrelerinin açık ya da kapalı oluşuna bağlıdır [5]. Literatürdeki deneysel çalışmalar açık ve kapalı hücreli köpüklerin birbirinden oldukça farklı özellikler gösterdiğini ortaya çıkarmıştır [8].

Açık gözenekli köpükler temel olarak hücre duvarı eğilmesi ile şekil değişimine uğrarken kapalı gözenekli köpüklerde şekil değişimi sırasında gözenek duvarları hem eğilir hem de genişler veya büzülür. Gibson ve Ashby'nin [3,5] geliştirdiği kübik hücre modeline göre gözenekli malzemelerin elastik modülleri ve plato gerilmeleri ile göreceli yoğunlukları aşağıdaki denklemlerle ilişkilendirilmiştir.

(2.1) ve (2.2) numaralı eşitlikler açık hücreli köpükler, (2.3) ve (2.4) numaralı eşitlikler kapalı hücreli köpükler için geçerlidir [3,5].

$$E^*/E_s = C_1[\rho^*/\rho_s]^2 \quad 2.1$$

$$\sigma_{pl}/\sigma_{ys} \approx 0.3[\rho^*/\rho_s]^{3/2} \quad 2.2$$

$$E^*/E_s = \phi[\rho^*/\rho_s]^2 + (1+\phi)[\rho^*/\rho_s]^2 + P_0(1-2\nu^*)/E_s(1-\rho^*/\rho_s) \quad 2.3$$

$$\sigma_{pl}/\sigma_{ys} \approx 0.3[\rho^*/\rho_s]^{3/2} + 0.4(1-\phi)\rho^*/\rho_s \quad 2.4$$

$E^*$  = Gözenekli malzemenin elastik modülü

$E_s$  = Gözenekli malzemenin hücre duvarlarını oluşturan malzemenin elastik Modülü

$\rho^*$  = Gözenekli malzemenin yoğunluğu

$\rho_s$  = Gözenekli malzemenin hücre duvarlarını oluşturan malzemenin yoğunluğu

$\sigma_{pl}$  = Plato gerilmesi

$\sigma_{ys}$  = Gözenekli malzemenin hücre duvarlarını oluşturan malzemenin akma gerilmesi

$\phi$  = Kapalı gözenekli malzemelerde gözenek duvarlarındaki katı oranı

$P_0$  = Atmosferik basınç

Burada C sabiti ise bütün geometrik orantı sabitlerini kapsar ve literatürde yapılan çalışmalar bu sabitin yaklaşık 1 olarak alınması gerektiğini göstermektedir [5].

Kapalı hücreli köpükler açık hücreli olanlara nispetle daha yüksek mukavemet, rijitlik ve darbe dayanımına sahiptir [7]. Açık gözenekli köpüklerden farklı olarak basma kuvveti

karşısında deformasyon mekanizmasında hücre duvarı esnemesi ve büzülmesi de önemli bir rol oynadığından bu tip gözenek yapısına sahip köpüklerde hücre duvarları yapıyı rijitleştirir [3]. Hücre duvarları tarafından izole edilmiş gözeneklerin içini kaplayan gaz basma esnasında hücre duvarlarının hareketi sebebiyle sıkıştığından basıncı artırır. Bu basınç artışı elastik modülü hesaplamalarında oldukça önemli rol oynar [7].

Açık gözenek yapısı ise köpük rijitliğini düşürmesine karşın yüksek ısı taşınımını mümkün kılan özelliği sebebi ile yüksek güç üreten cihazlarda etkili bir soğutucu mekanizma olarak kullanım alanı bulmaktadır [8].

### **2.3. GÖZENEKLİ MALZEMELERİN KULLANIM ALANLARI**

Gözenekli malzemeleri maliyet ve kazanç ilişkisini, kullanım alanlarını dikkate alarak tanımlamak gereklidir. Otomobil üretiminde, bu malzemeler yüksek maliyetli çözümleri (yüksek verimlilikle) getirirken, havacılık sektöründeki gelişmeler başka yollar üzerinde yoğunlaşmaktadır [8].

Şu zamana kadar, otomotiv endüstrisinde birçok uygulamalar yapılmasına rağmen alüminyum bazlı köpük malzemeler henüz seri üretimde kullanılmamıştır. Alüminyum malzemeler kullanılan metotlar sonucunda çeşitli birleştirme, tolerans ve aşınma sorunları olması sebebiyle, çoğunlukla araçların gövdeleri demir esaslı malzemelerden yapılmaktadır. Bu nedenle alüminyum köpük malzemeler maliyet bütçelerine katılmamaktadırlar. Yalnızca taşıtlarda aşınmaya eğilimi olan bölgelerde ya da alüminyum gövdelerin içyapılarında kullanılmaktadır. Yüksek ısıl gerilmelere maruz kalan elemanlarda kompleks metalik köpük malzemeler kullanılırsa (ısıl kalkan görevi gören parçalar gibi) minimum kalınlık 8 mm'nin üzerinde olması gerekir. Buda ağırlığı arttırdığı için uygun değildir. Akustik etkisine baktığımızda, etkileyici olarak düşük maliyetlere sahip çeşitli organik malzemelerle yarışacak durumdadır. Plastik tabanlı köpük yapıların otomobil üretiminde sayısız uygulamaları vardır. Örneğin Audi A8 gövdesinde karoser üzerinde birçok noktada yapısal köpük parçalar bulunmaktadır [8].

Kendine mahsus özelliklerinden dolayı metalik köpük malzemeler darbe enerjisini absorbe edici elemanlar olarak düşünülebilir. Köpük tipine (eriyik tabanlı köpükler), alaşıma ve yoğunluğa bağlı olarak enerji absorbe etme davranışı belirli bir aralıkta değiştirilebilir. Bu özellik, metalik köpük yapıları otomobillerde, kamyonlarda, trenlerde ve tramvaylarda

Çarpışma elemanı olarak kullanılabileceğimiz aday bir malzeme yapar. Bu özelliklerinden dolayı otomobil üreticileri yaptıkları testlerde metalik köpük yapıları denemektedirler [8].

Avusturyalı bir otomobil reticisi, Steyr Daimler Puch, yaptığı bir testte A-kolonunda kullandığı orijinal absorbe elemanı yerine, alüminyum köpükten imal edilmiş bir absorbe elemanı kullanmıştır [8].

Bazı yapısal parçalar, yapıların orta yada n panelleri, metalik köpük malzemeden üretilir. Aşağıdaki tabloda köpük malzemelerin genel olarak kullanım yerleri ve ne amaçla kullanılabileceği verilmiştir.

Tablo 2.1. Uygulanabilir Köpük Metal örnekleri [8].

<b>Prototip Parça (Al Köpük Malzeme)</b>	<b>Uygulama Alanı</b>	<b>Mekanik Özellik</b>
Plakalar	Talaşlı imalat, mimari yapılar	Ağırlık, tasarım
Silindirler, küpler	Otomobil yedek parçası	Darbe enerjisi absorpsiyonu
Tüp	Fiziksel araştırmalar	Fiziksel özellikler (İletkenlik, gözeneklilik)
Maçalar, küpler ve conta	Dökümhanelerde maça dökümlerinde	Döküm koşulları, ağırlık, enerji absorpsiyonu
Sıkı yapısal parçalar	Otomotiv endüstrisi, elektriksel uygulamalar, koruyucu kaplamalar	Rijitlik sönümlenme, ağırlık
Yapısal parçalar	Plakalar (Otomobil parçalarında)	Rijitlik sönümlenme davranışı
Yapısal parçalar	Otomotiv parçaları	Rijitlik, ağırlık
Yapısal parçalar	Gemiler, yatlar	Ağırlık
Sandviç yapılar	Taşımacılık, raylı taşıtlar	Rijitlik
Sıkı yapısal parçalar	Silahlar (kabza)	Ağırlık
Köpük malzeme ile doldurulmuş profiller	Motor bağlantıları, yapısal araba parçaları, raylı taşıtlar, uçaklar, rüzgar değirmenleri	Çarpışma davranışı
Köpük malzeme ile doldurulmuş profiller	Takım tezgahlarında, inşaat endüstrisinde, robotlardaki destek elemanlarında	Sönümlenme özellikleri
Sıkı yapısal parçalar	Sanatsal uygulamalar, tasarım	Görünüm

### 3. BÖLÜM

#### GÖZENEKLİ METALLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

##### 3.1. GİRİŞ

Son yıllarda farklı gözenekli malzemeler için farklı uygulama alanları bulunmuştur. Polimer ve cam köpükler düşük ısı iletkenlikleri sebebi ile ısı yalıtkanlık gerektiren uygulamalarda, iyi enerji emme kapasitesi gösterdiklerinden dolayı da ambalajlamada kullanılırken seramik köpükler yüksek sıcaklık dayanımları sebebiyle metal döküm sektöründe filtreleme gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu malzemelere nispetle yeni bir grup malzeme olan metal köpükler hafiflik ve rijitlikleriyle iyi ısı ve ses izolasyonu ve iyi alev kapanı özelliği sağlamalarının yanısıra otomotiv ve havacılık uygulamalarında da kullanım alanı bulmaktadır. Metalik hücreli malzemelerin yapısal kullanım alanları arasında otomotiv, demiryolu ve inşaat endüstrileri, uzay araçları, gemi ve spor malzemeleri yapımı ve biyomedikal uygulamalar; işlevsel kullanım alanları arasında ise filtreleme ve ayırma, ısı dönüştürücü, soğutma sistemleri, elektrokimyasal uygulamalar, su arıtma, sıvı muhafaza ve iletimi gibi uygulamalar sayılabilir [2].

Köpük teriminin orijinal anlamı; gaz habbeciklerinin bir sıvı içerisinde dağılımıdır. Bu gibi köpüklerin şeklini koruyarak sıvının katılaştırılmasıyla elde edilen yapı, “katı köpük” olarak adlandırılır. Konuşma dilinde genellikle “metalik köpükler” olarak bilinen bu malzeme aslında bir katı köpüktür.

Tablo 3.1. Bir fazın diğeri bir faz içerisindeki dağılımı [2].

	<b>Bir gaz içersinde dağılırsa</b>	<b>Bir sıvı içersinde dağılırsa</b>	<b>Bir katı içersinde dağılırsa</b>
<b>Eğer bir gaz</b>	Gaz karışımı	<b>Köpük</b>	<b>Katı köpük (Hücreli katı)</b>
<b>Eğer bir sıvı</b>	Sis	Emülsiyon	Jel
<b>Eğer bir katı</b>	Duman	Suspansiyon	Gömülü tanecikler

### 3.2. ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Gözenekli metaller, birçok farklı mekanik ve fiziksel özellik kompozisyonuna sahiptir. Düşük yoğunluklarına rağmen yüksek tokluk gösterirler; hem yüksek ısı iletkenliğine hem de yüksek geçirgenliğe sahiptir. Doğa, hücreli yapı malzemelerin bizden çok önce farkına varmış ve bunları tabiatında kullanmıştır. (tahta, kemik gibi)

İnsan yapımı hücreli malzemelerin en çok kullanılanı sizin polimer esaslı köpüklerdir. Polimer köpükler birçok sektörde (inşaat, ambalajlama, tesisat) kendilerine uygulama alanları bulmuştur. Metal köpükler ise polimer köpükler kadar sektöre girememiş malzemelerdir. Oysaki çalışabilecekleri sahalar en az polimer köpükler kadar geniştir. Bununla beraber son yıllarda yavaş yavaş kendini tanıtmaya başlamıştır.

Metalik köpük üretiminde, polimerik köpük üretiminde kullanılan teknikler kullanılabildiği gibi kullanılan metalin sinterleme davranışı, elektriksel olarak çöktürülüp çöktürülemeyeceği gibi özellikleri göz önünde bulundurularak yeni üretim teknikleri geliştirilmiştir. Tablo 3.2.'de bu yöntemler, kullanılan metalin süreç başlangıcındaki fiziksel durumuna göre gruplandırılmıştır [4].



Tablo 3.2. Gözenekli metallerin üretim yöntemleri [4].

Sıvı Metal	Toz Metal	Metal Buharı	Metal İyonu
Gaz kullanılarak doğrudan gözeneklendirme	İçi boş kürelerin sinterlenmesi	Buhar Depolama	Elektrokimyasal depolama
Köpüren malzeme kullanarak gözeneklendirme	Gaz hapsedme		
Katı-gaz ötektik katılaştırma (gasar)	Bulamaç gözeneklendirme		
Toz sıkıştırırmalı ergitme	Dolguların sıkıştırılması		
Döküm yöntemleri	Tozların ve liflerin sinterlenmesi		
Püskürtmeyle gözeneklendirme	Polimer-metal karışımlarının ekstrüzyonu		
	Tepkime Sinterlemesi		

### 3.2.1. Gözenekli Metallerin Sıvı Hal Prosesi

#### 3.2.1.1. Gaz Kullanılarak Doğrudan Gözeneklendirme

Metal eriyikleri belirli şartlar altında sıvı içerisinde gaz kabarcıklarının oluşturulması ile doğrudan gözeneklendirilebilir. Yüksek yoğunluklu bir metalik eriyik içerisindeki gaz kabarcıkları yüksek kaldırma kuvvetleri nedeniyle hızlı bir yükselme eğilimindedirler. Gaz kabarcıklarının tutulması ancak ergimiş metalin vizkozitesinin artırılması ile mümkün olur. Bu ise ince seramik tozlarının yada alaşım elementlerinin eriyik içersine katılmasıyla sağlanabilir.

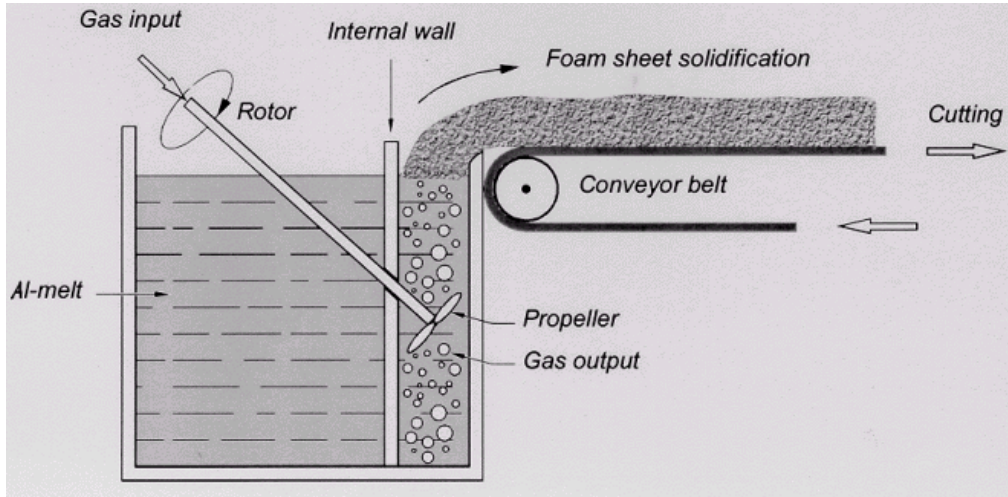
Bu yöntemle sıvı metalden köpük elde etmek için bir çok denemeler 1960 ve 1970 lerde yapılmıştır [1,2]. Bu denemelerde genellikle alüminyum, magnezyum, cinko yada bu metallerin alaşımları kullanılmıştır.

Bu denemelerde bazı uygun metal köpükler üretilmiş olsa da, bu malzemeler endüstriyel uygulamalarda kullanılamamıştır. Bu konuda yapılan bir takım ilerlemeler sonucunda üretim metotları geliştirilmiştir.

Genellikle metalik eriyiklerin doğrudan köpükendirilmesi için iki yol vardır; dışarıdaki bir kaynaktan sıvı metalin içersine gaz enjekte etmek yada gaz çıkarıcı maddelerin ergitilmiş metale karıştırılmasıdır.

### 3.2.1.1.1. Gaz Enjekte Ederek Gözeneklendirme

Köpüklendirme için bu ilk yol alüminyum ve alüminyum alaşımları kullanılarak Norveç'te Hydro alüminyum ve Kanada'da Cymat alüminyum firmaları tarafından kullanılmıştır (Kullanılan metotlar ve patentler Alcan International tarafından geliştirilmiştir.) [9,10]. Bu üretim Şekil 3.1.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Gaz enjekte ederek doğrudan gözeneklendirme [13].

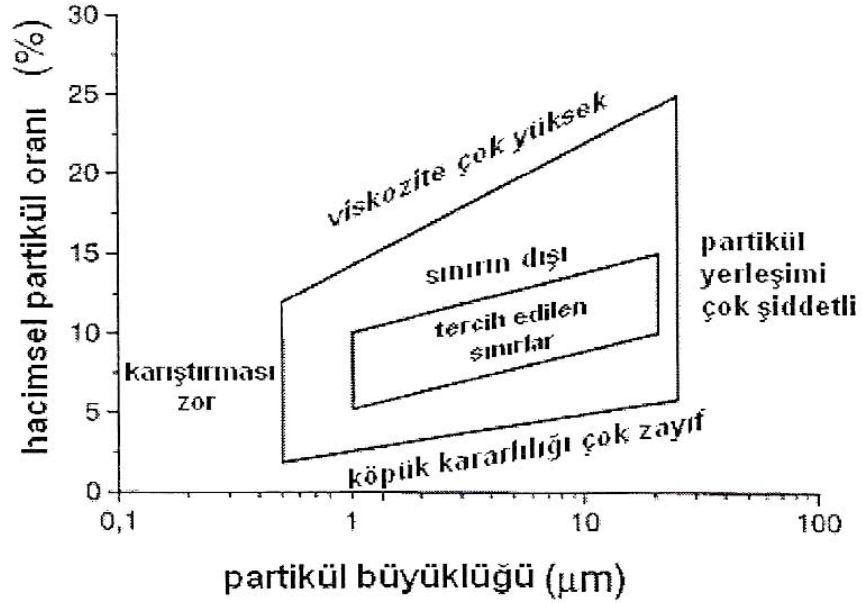
Bu üretim prosesine göre Silikon Karbit, Alüminyum Oksit yada Magnezyum Oksit parçacıkları eriyiğin vizkozitesini artırmak için kullanılır. Bu yüzden ilk adım bu metallere birini içeren Alüminyum eriyiğinin hazırlanmasıdır. Çözülmesi gereken bir problem olan partiküllerin eriyik tarafından ıslatılması ve parçacıkların homojen olarak dağıtılmasının sağlanması Metal Matriks Koompozitlerin (MMK) yapımında karşılaşılan probleme benzemektedir [11,12]. Çeşitli Alüminyum alaşımları kullanılabilir. Örneğin döküm alaşımı AlSi10Mg (A359) ya da dövme alaşımları olan 1060, 3003, 6016 yada 6061 gibi [13,14].

Sıvı MMK alaşımının, ikinci adımda çeşitli gazlardan birinin (Hava, Nitrojen yada Argon) özel dizayn edilmiş dönen pervane yada titreşen nozulların içerisinden enjekte edilerek köpüklendirilmesidir. Pervane yada nozulların fonksiyonu eriyik içersinde çok ince gaz kabarcıkları oluşturmak ve bunların üniform bir şekilde dağılmasıdır. Bu önemli bir fonksiyondur. Çünkü iyi kalitede bir köpüğün elde edilmesi ince kabarcıkların oluşturulmasına bağlıdır. Sonuç olarak yoğun kabarcık karışımı ve metal eriyik sıvısının yüzeyinde yüzerek kuru köpüğe dönüşerek dışarı alınır. Eriyik içersinde seramik parçacıklarının bulunmasından dolayı köpük nispeten stabildir. Köpük sıvı yüzeyinden bir konveyörle alınabilir ve daha sonra katılaşmak üzere soğumaya bırakılır. Gözenekli yapıya zarar vermemek için köpük henüz yarı katı haldeyken kesilmez. Katılaşmadan önce yarı-katı köpük rulolar yardımıyla düzlenir [15,16]. Sonuç olarak katılaşmış köpük istenildiği kadar uzun ve sıvı metal alaşım kabının izin verdiği ölçüde geniş olabilir. Genellikle 10 cm kalınlığında olabilir. Bu yöntemle üretilmiş iki köpük örneği Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Farklı yoğunluk ve gözenek büyüklüğündeki iki adet köpük slab [15].

Katılan güçlendirici partiküllerin hacimsel oranı %10 ila %20 arasında ve boyutları 5 ila 20  $\mu\text{m}$  arasında değişir. Partiküllerin büyüklüğünün ve hacimsel oranının seçimiyle ilgili bilgiler Şekil 3.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Partikül büyüklüğünün seçimi [16].

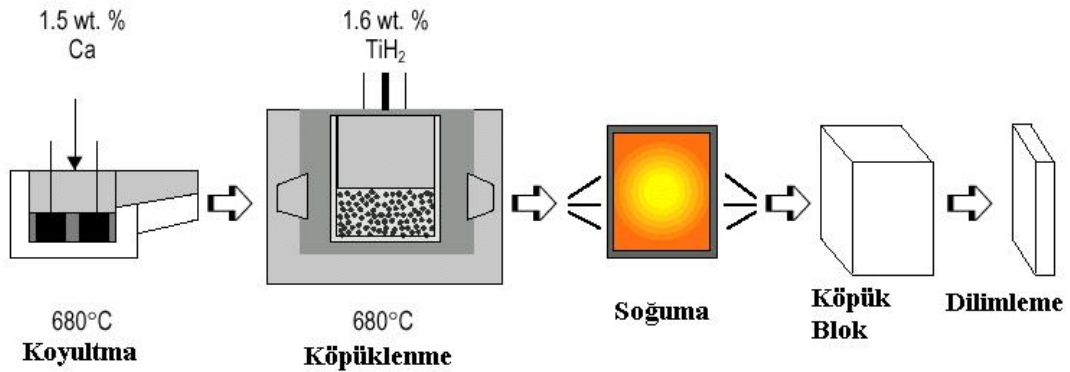
Partiküllerin hücre duvarlarında birikmesi, köpüğün stabilitesi açısından kilit rol oynar. Önce, partiküller yüzey viskozitesini artırarak, yüzeyin film halindeki akışını geciktirir; sonra da eriyik tarafından bölgesel ıslatılırlar. Bu ıslatılmanın belli açı sınırları içerisinde gerçekleşmesi gerekir. Prensipde bu partiküllerin ıslanma açısını ayarlamak mümkündür

(%80-98) ve böylelikle bu açı değerlerine tekabül eden yoğunluklar da ( $0.069-0.54 \text{ g/cm}^3$ ) ayarlanmış olur. Gözenek büyüklükleri 3 ila 25 mm ve gözenek duvarlarının kalınlıkları 50 ila 85  $\mu\text{m}$  arasında değişir.

### 3.2.1.1.2. Kabarcıklandırıcı Maddeler İle Gözeneklendirme

Eriyiği direk olarak gözeneklendirmek için diğer bir yöntem ise, eriyiğin içerisine kabarcıklandırmak için gaz enjekte etmek yerine eriyiğin içersine kabarcıklandırıcı madde ilave etmektir [17 - 20]. Isının etkisi altında kabarcıklandırıcı madde ayrışır ve gaz çıkışı meydana getirerek köpüğü ileri doğru iter. Bu işlemin modern bir versiyonu Şekil 3.4.'de gösterilmiştir [21,22]. Bu metot küçük çaplı bir ticari Japon firması olan Shinko Wire, Amagasaki tarafından 1986 yılından beri (Günlük 1000 kg'lık köpük üretim kapasitesine sahip) kullanılmaktadır. Bu teknikte kalsiyum (Metal Esaslı), alüminyum eriyiğe  $680^\circ\text{C}$ 'de ilave edilir. Eriyik birkaç dakika viskoziteyi arttırmak için karıştırılır [22,23].

Kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ), Kalsiyum-Alüminyum oksit ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ) yada  $\text{Al}_4\text{Ca}$  gibi intermetalikler ki bunlar sıvı metalin yoğunluğunu arttıırırlar [24,25].



Şekil 3.4. Köpürüklandırıcı madde ile direk gözeneklendirme (“Alporas”-process) [22].

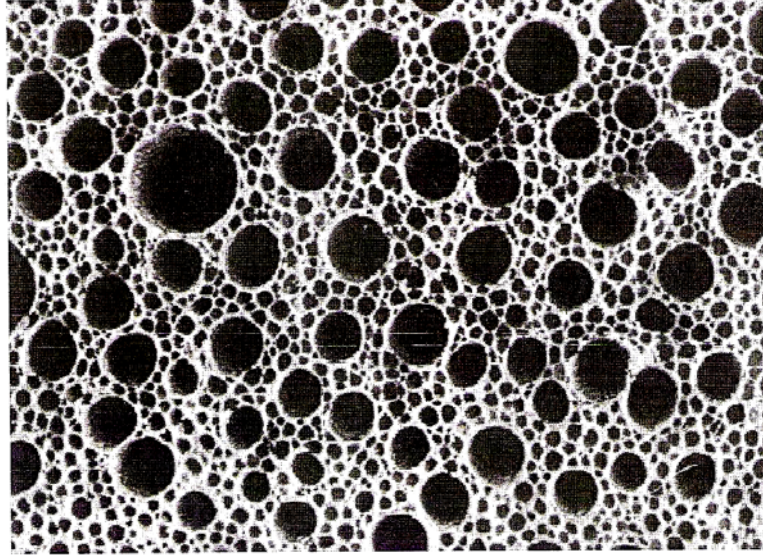
Gerçek bir köpük ürünü elde etmek için genellikle 1,5-3 wt %Ca ilave edilir. Viskozite istenen değere ulaştıktan sonra yoğun sıcak sıvı içersine hidrojen gazı çıkışı sağlamak için kabarcıklandırıcı madde olan Titanyum Hidrid ( $TiH_2$ ) ilave edilir. Eriyik daha sonra yavaş ve kademeli olarak genişlemeye başlar ve köpük kalıbı doldurur. Köpüklendirme belirli bir basınç altında gerçekleşir. Alaşım ergime noktasının altına kadar soğuduktan sonra sıvı köpük, katı alüminyum köpük haline döner ve daha sonraki işlemler için kalıptan çıkarılır. Tipik bir büyüklükteki ürün için tüm bu işlemler 15 dakika sürer [22]. Çalışmalar göstermiştir ki proses parametrelerinin dikkatli ayarlanması çok homojen bir köpük elde etmemizi sağlar [26].

Gerçekte ticari ismi “Alporas” olan bu yöntemle üretilen alüminyum köpükler döküm yapılar hariç en homojen yapıda olanlardır. Hem ortalama hücre çapı ve eriyiğim viskozitesi arasında, hem de son ürünün yoğunluğu ve viskozitesi arasında deneysel (Tecrübeye dayalı) bir ilişki vardır [27,28].

### **3.2.1.2. Katı-gaz Ötektik Katılaştırması (“gasar”)**

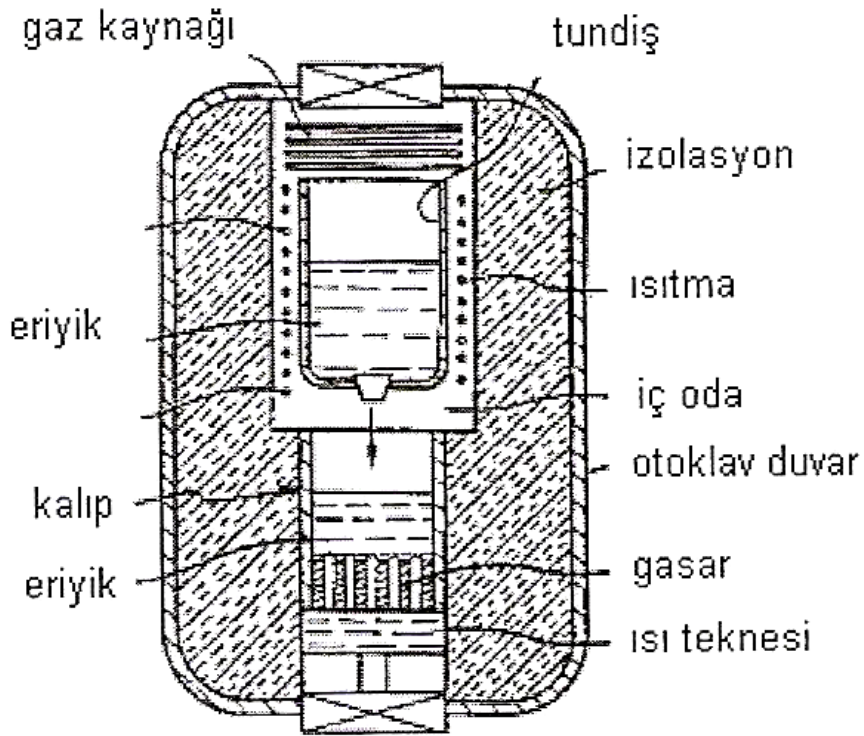
Bu metotla bazı akışkan metallerin hidrojen gazı ile ötektik bir yapı oluşturduğu ortaya kondu. Bu metallere birinin yüksek basınçlı (50 atm'ye kadar) hidrojen atmosferinde eritilmesi ile homojen hidrojen yüklü eriyik elde edilir. Bu aşamada sıcaklığın düşürülmesi eriyiğin ötektik geçişe girmesine ve heterojen bir ikili faz oluşmasına neden olur (katı+gaz). Eğer sistemin düzeni ötektik konsantrasyonuna yakın ise, belli bir sıcaklıkta ayırma reaksiyonu olur. Ötektik birleşimin sistemin basıncına bağlı olmasından dolayı, dış basınç ve hidrojen miktarı dengelenmelidir. Eriyikten ısı alınması yönsel katılaşmaya neden olur. Sıvının katılaşması ilerledikçe, genellikle bu sürecin hızı 0.05 ila 5 mm/s arasında değişir; katılaşma düzleminin yakınında hidrojen içeriği artar ve gaz baloncukları meydana gelir. Bu sürecin dengeleri, baloncukların sıvı yüzeyine geçmesine izin vermeyecek ve katılaşan yüzey yakınında, katının içinde tutsak kalmasını sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Ortaya çıkan gözenek morfolojileri genellikle hidrojen içeriğine, eriyik üstündeki basınca, ısı değişiminin yönüne, hızına ve eriyiğin kimyasal bileşenlerine bağlıdır. Genellikle büyümüş ve uzamış gözenekler, katılaşmanın olduğu bölgeye yakın olur. Sadece Şekil 3.5. yönünde elde edilirse küresel olurlar. Gözeneklerin çapları 10  $\mu m$  ila 10 mm arasında, uzunlukları 100  $\mu m$  ila 300 mm arasında, uzunluk oranları 1 ila 300

arasında, gözeneklilikleri %5 ila %75 arasında değişir. Aynı zamanda birleşmeden dolayı gözenek büyüklüklerinin dağılımı da düzenli değildir. Gözenekler koni şeklinde veya dalgalı bile olabilir. “Gasar” daki heterojen gözenek çekirdeklenmesi ve büyümesi daha sonra ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Katı-gaz karışımının ötektik katılaşması sonucu oluşan gözeneksel materyallere konan “gasar” sözcüğünün anlamının temelinde Rusçadan gelen “gaz-küçülmesi” yatar [29].



Şekil 3.5. Gasar’ın gözenek yapısı. Yüzey normaline görünüşü [29].

Mümkün bir gasar sürecinin gerçekleşmesi Şekil 3.6.’da gösterilmiştir. Eriyiğin üretilmesi için hidrojen ile yüklenme ve son olarak yönsel katılaşması için otoklav gereklidir. Kap silindirik ise, soğutulmasına bağlı olarak eksensel gözenekler elde edilir. Nikel, bakır, alüminyum ve magnezyuma dayalı gasarlar literatürde tanımlıdır. Bu metaller dışında bu tekniğin çelik, kobalt, krom, molibden ve hatta seramikler için de geçerli olduğu gözlenmiştir. Gözenek morfolojisi ve gasarların mikro yapıları karakterize edilmiştir. Yine de gasarların homojenlikleri bazen yeterli olmaz ve materyalin uygulamaları için yeni ilerlemelere ihtiyaç duyulur. Gasarların mekanik özellikleri, sıkıştırma ve gerilmedeki güçleri belirlenmiştir [30].

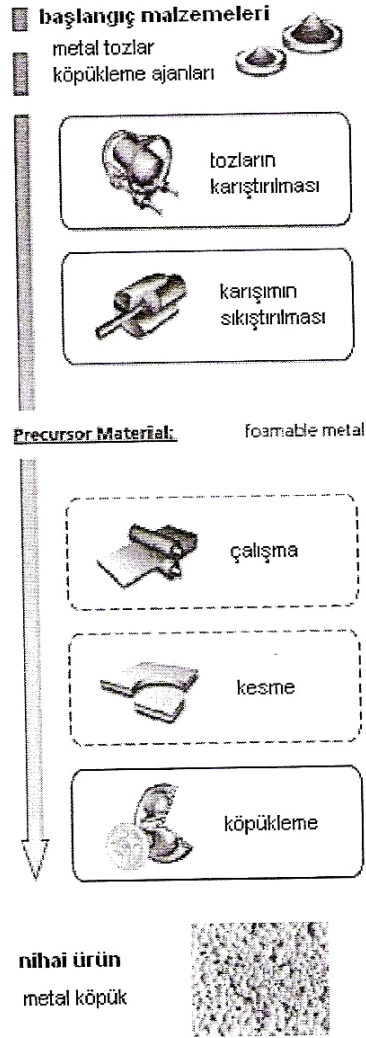


Şekil 3.6. Gasar üretme aparatı [30].

### 3.2.1.3. Toz Sıkıştırma Ergitme Tekniği

Üretim işlemi, metal tozlarının üfleme ajanları ile karıştırılmasıyla başlar (Şekil 3.7.). Prensip olarak, sıkıştırma herhangi bir teknikle yapılabilir (Sıcak aneksenel, izostatik sıkıştırma, çubuk ekstrüzyonu, toz yuvarlama). Seçilen sıkıştırma yöntemi, istenilen başlangıç malzemesinin şekline göre değişir. Bununla beraber ekstrüzyon, en ekonomik ve en çok tercih edilen metottur. Değişik kesitlerdeki dikdörtgenel profiller genellikle ince plakaların yuvarlanmasıyla oluşturulur [31]. Başlangıç malzemesinin kullanımına çok dikkat edilmelidir. Çünkü artık gözeneklilik ve diğer etkiler prosesin kötü sonuçlar doğurmasına neden olurlar.

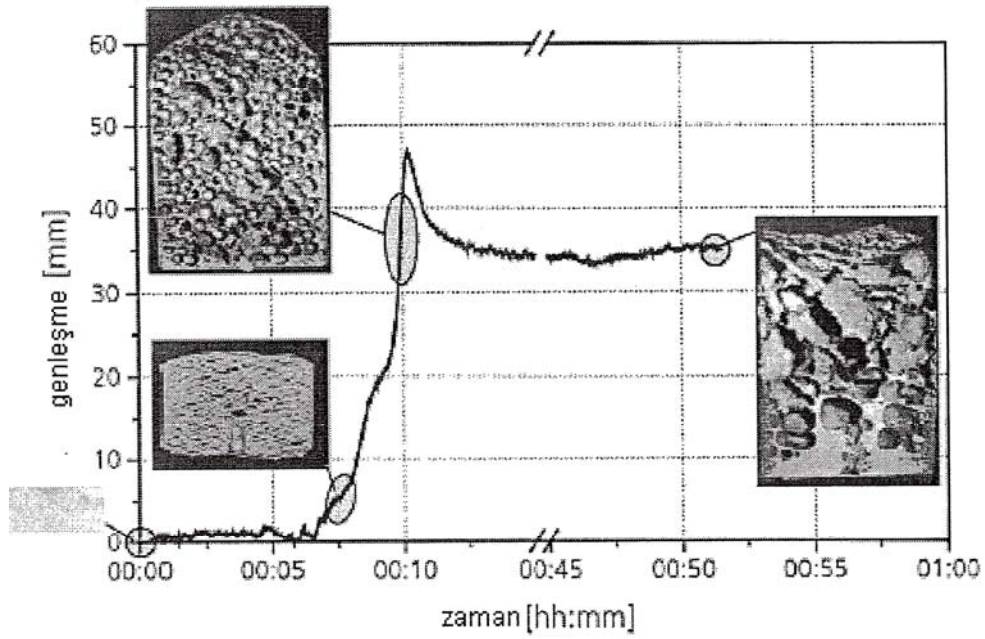




Şekil 3.7. Toz sıkıştırmalı  
ergitme işlemi [31].

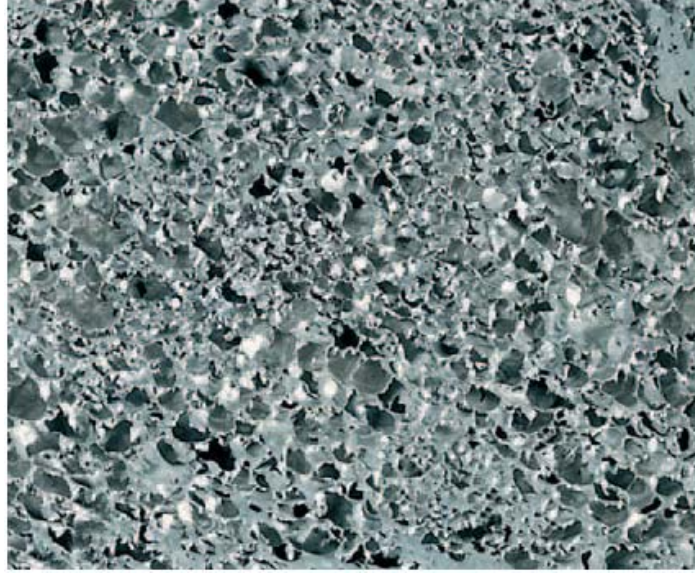
Matris maddesindeki ergime noktası yakınlardaki ısı değişim hareketleri bir sonraki adımdır. Mekanik matriste homojen olarak dağılmış olan üfleme ajanları daha basit parçalara ayrılır. Ortaya çıkan gaz başlangıç maddesini sıkışmaya zorlar ki bu da yüksek gözenekli yapıyı oluşturur. Genleşmenin tamamlanması için gerekli süre ısı ve başlangıç maddesinin etkisiyle birkaç saniyeden birkaç dakikaya kadar değişebilir (Şekil 3.8.). Alüminyum/  $TiH_2$  tozunun genleşme grafiğini gösterir. Genleşen köpüğün hacmi, zamanın ve genleşmelerin bazı farklı morfolojik aşamalarındaki fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Maksimum genleşme dengeli köpük morfolojisinde elde edilir ve sonra köpük çöker.

Maksimum genişlemenin değeri, aynı zamanda katı metal köpüğün yoğunluğu, sıcaklık ve ısı dereceleri gibi üfleme ajanı ve diğer köpüğün özelliklerini etkileyen özellikleri kontrol ederek ayarlanabilir. Çinko ve alüminyum alaşımları için, titanyum veya zirkonyum hidrit üfleme ajanı olarak kullanılır. Çelikler ise  $\text{SrCO}_3$  gibi karbonatlar ile köpüklenebilir. Eğer üfleme ajanı olarak metal hidritler kullanılırsa, içeriğin %1'inden azı kadarı, çoğu durumda yeterli olur [32].



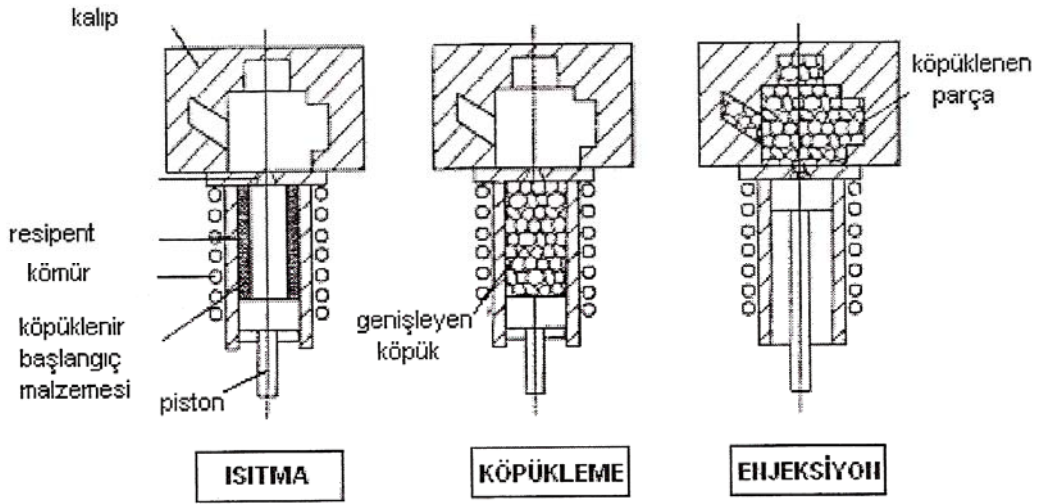
Şekil 3.8. Alüminyum/  $\text{TiH}_2$ 'nin  $750^\circ\text{C}$  de köpüklendiğindeki genişmesi [32].

Bu yöntem sadece alüminyum ve alaşımlar ile kısıtlı değildir, kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve bazı başka metaller ve alaşımları da doğru üfleme ajanları ve değerler kullanılarak köpüklenebilir. Yine de iyi köpükleme alaşımları saf alüminyum veya 2xxx veya 6xxx gibi işlenmiş alaşımlardır.  $\text{AlSi}_7\text{Mg}$  ve  $\text{AlSi}_2$  gibi döküm alaşımları da düşük erime sıcaklıklarından ve en iyi köpüklenme özelliklerinden dolayı sıkça kullanılırlar, fakat prensipte neredeyse her alüminyum alaşımı doğru parametrelerin kullanılmasıyla köpüklenebilir. Şekil 3.9. kurşun köpüğünün tipik kesit alanını gösterir. Hücre büyüklükleri ve şekillerinin düzensiz olması bu tipik sürecin özelliğidir.



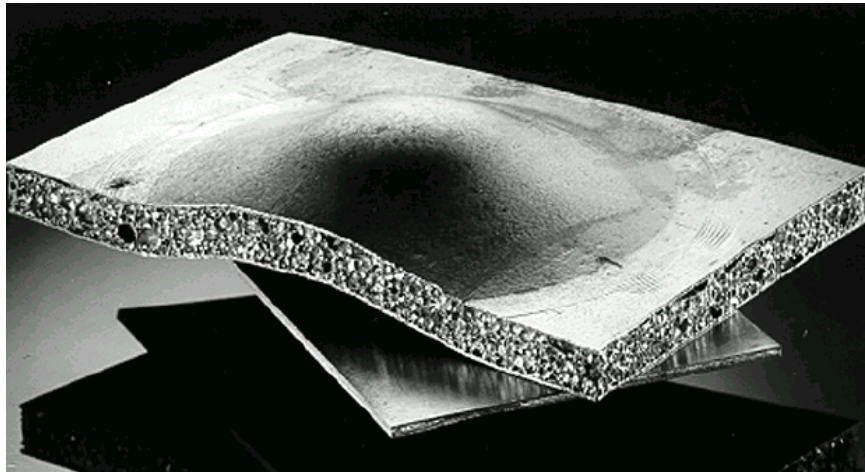
Şekil 3.9. Toz sıkıştırılmalı eritme yöntemiyle üretilmiş kurşun köpüğün kesiti [33].

Genleşme belli limitlerle yönlendirilmedikçe, ocaktaki bir başlangıç malzemenin bir parçasının köpüklenmesi, önceden tanımlanmamış bir şekilde köpükle sonuçlanır. Bu başlangıç maddesinin oyuk kalıba yerleştirilmesi ve ısıtılarak genleşmesi ile yapılır. Bu yolla benzer şekilli kısımlar elde edilebilir. Başlangıç maddesinin bir kısmının şeklini kalıbın geometrisine uydurmak avantajlı olabilir ki böylece köpüklenme, köpüklenme esnasında akış durumunu geliştirir. Genişleyen köpüğün uygun kalıba yerleştirilerek oldukça karmaşık parçalar üretilebilir. Bu olay Şekil 3.10.'daki şematik şekilde incelenebilir. Buna göre köpüklenebilir bir başlangıç malzemesi kapalı bir alan içinde erime sıcaklığına yakın bir dereceye kadar ısıtılabilir. Köpüklenme başladıktan sonra başlangıç malzemesi yarı-katı hale gelir, kütle hareketli bir piston ile kalıbın içine enjekte edilir ve burada kalıp içindeki genleşmesini tamamlar. Köpüklenen kısımların gözenek yapıları süreç boyunca dikkatle kontrol edilmezse sorun yaşanabilir. Yine de bu olay karmaşık hacimli parçaların ekonomik toplu için önemli üretimi bir adımdır [33].



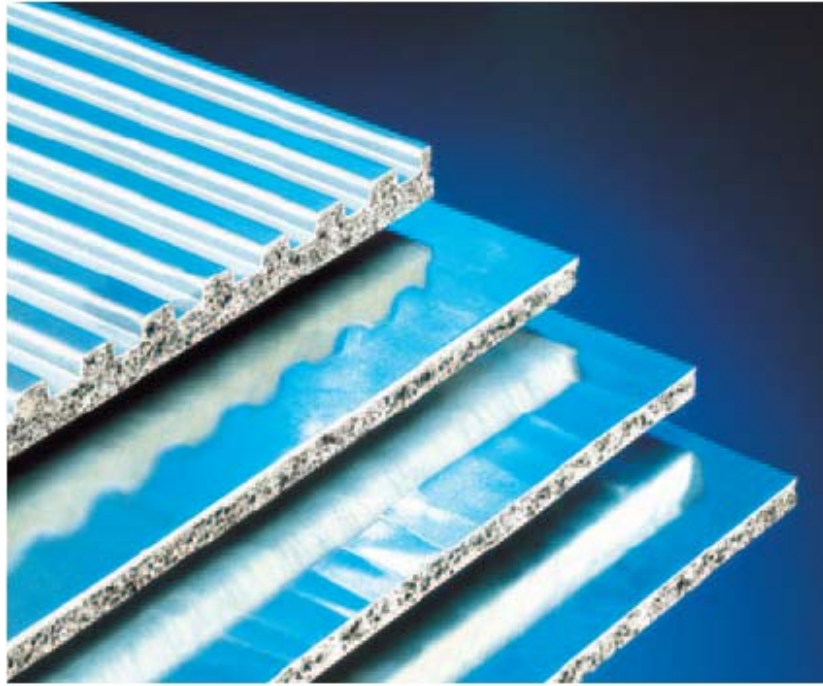
Şekil 3.10. Köpük enjeksiyonu işlemi [33].

Köpüklenmiş metal çekirdeği içeren sandviç paneller ve iki metal yüzeyden oluşan sandviç paneller, metal levhaları pir parça köpüğe yapıştırarak kolaylıkla elde edilebilirler. Alternatif olarak, eğer saf metalik bağ gerekli ise levhalar alüminyum veya çelik levha şeklindeki başlangıç metale yuvarlayarak giydirilebilirler. Kompozit malzeme herhangi bir adımda bozulabilir, örneğin derin çekme adımında. Köpüklenmiş çekirdeğin genişlediği ve yüzeylerin yoğunlaştığı son ısı değişimi, sistemi sandviç yapıya getirir. Bu yapı Şekil-11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Sandviç panel (İçi 12 mm kalınlığında alüminyum köpük, dış yüzeyler çelik) [33].

Alüminyum köpük çelik ve titanyumla olduğu gibi alüminyum yüzeylerle de birleştirilebilir. Çekirdek ve yüzeyler için, farklı erime noktalarına sahip alaşımların seçilmesinde, köpüklenme sırasında yüzey maddelerinin erimesini engelleyecek önlemler alınabilir. Bremen'deki Alman araba üreticisi Karman (Osnabrück) ve Fraunhofer Institute ortaklaşa olarak büyük bir alüminyum/alüminyum köpük sandviç oluşturmuş ve bunu alüminyum köpük yapıları bir konsept araçta kullanmışlardır. Böyle bir parça Şekil 3.12.'de gösterilmektedir. Bu sandviçler, uzunlukları 2 metreye ve genişlikleri 1 metreye kadar değişen üç boyutlu yapılardır [34].



Şekil 3.12. Alüminyum/alüminyum köpük sandviç [34].

İçi boş silindirler veya rasgele şekillendirilmiş kolonlar, alüminyum köpüklerle ve farklı yöntemlerle doldurulabilir:

1. En kolay yol köpüklenebilir başlangıç malzemeli çubuk ile doldurmak ve ikisini birlikte ocağa yerleştirmektir. Başlangıç malzemesi köpüklemeye başlayacak ve sonunda bütün bölümü dolduracaktır. Bu yöntemin dezavantajı, sadece iç malzemeye göre daha yüksek erime noktasına sahip tüplerin (ör. Alüminyum köpüklü çelik tüpler) kullanılabiliniyor olmasıdır. Alternatif bir yöntem ise basit bir

çubuk kullanarak yerine köpük ile doldurulacak bölüme uyacak, köpüklenebilir bir parça yerleştirmektir. Böylece köpük sadece merkeze doğru genişir ve mekanik destek sağlar. Bölüm ve köpük arasındaki termal etkileşim bölümün köpüklenme esnasında aşırı ısınmasını engeller.

2. Üçüncü bir fikir ise konsantrasyonca ayarlanmış iki tüpün bileşiğe ortaça dışa doğru kuvvet uygulamasıdır ki iki bileşenin arasında metalürjik bağ vardır. İç tüp için köpüklenebilir materyal kullanılırken, dış tüp normal alüminyum alaşımıdır. Sonraki köpüklenme adımında, iç tabaka ortaya doğru genişir ve sonunda tüpün merkezini doldurur.
3. Bileşen oluşturmanın başka bir yolu ise alüminyum köpüğün önceden belirlenmiş şeklinin üstüne alüminyumun termal püskürtülmesidir ki böylece alüminyum köpük ve yoğun bir dış tabaka elde edilmektedir. Böyle bir örnek Şekil 3.13.'de gösterilmiştir. Tabi ki bu teknik, sadece tüpler ile kısıtlanmamıştır; şekillendirilmiş herhangi bir gövde üstüne de uygulanabilir.
4. Son olarak, eğer alüminyum köpüğün parçaları klasik kum dökümünün içinde çekirdek olarak kullanılırsa, köpüklenmiş çekirdeklerin tamamen içinde kaldığı bir bileşen elde edilir.



Şekil 3.13. Alüminyum ile kaplanmış alüminyum köpük [34].

Ayrıca metal köpük bileşenleri ve seramik bileşikler de bu teknikle elde edilebilir. Alüminyum köpük (AlSi12) alüminyum yüzeylere 500°C de 100 kPa basınç uygulayacak şekilde difüzyon ile bağlanmış olabilir. Aynı zamanda alüminyum alaşımı 6061 de aralarında belli mesafe bulunan iki seramik tabakaya, köpüğün genişmesiyle basınç uygulayarak alüminyum tabakalara bağlanabilir [35].

Pek çok metal köpük parçaları, yeterli şekilde düzenlenmiş ocaklarda üretilebilir. Fakat, toplu bir üretim için, köpüklenecek parçaların devamlı bir ocak içinde önce köpüklenip sonra soğuyacağı özel bölümlenmiş ocaklar kullanmak daha etkilidir. Bu şekilde, yüklenebilir ve boşaltılabilir ocaklar kullanarak toplu üretim de geliştirilebilir. Böylece her köpükleme döngüsünden sonra yapılan ürünleri çevre sıcaklığına soğutma adımından da kurtulmuş olunur. Ürün köpüklenme sıcaklığı ile katılaştığı sıcaklık arasında bir noktada işletilebilir. Bu yöntem ile enerji tasarrufu sağlanır; bir köpük yapmak için gereken süre düşer ve gerekli iş gücü de minimuma indirilmiş olur. Boşluklu bölümü metal köpük ile doldurmak için, köpüklenebilecek teli eritecek ve dolduracak, taşınabilir köpük enjekte edebilecek bir cihaz bu iş için kullanışlı olur. Bu cihazın avantajları; devamlı çalışma imkanı suması, yerleşmiş köpük doldurabilmesi ve yüzey maddesi üstünde daha az

termal etki bırakmasıdır.

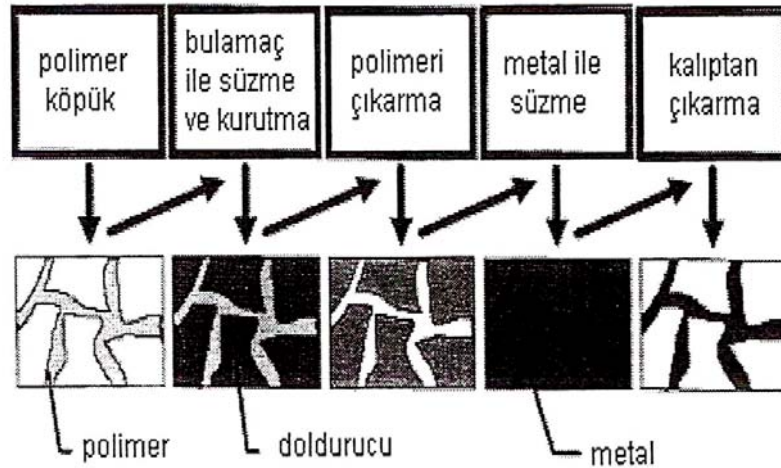
Toz sıkıştırılmalı ergitme sürecinin gelişimi için yeni adımlar da atılmaktadır. Bu adımlardan biri, toz yerine titanyum hidriti direkt alüminyum eriyiğiyle birleştirerek, köpüklenecek başlangıç malzemesi üretmektir. Zamansız hidrojen dönüşümünü önlemek için karıştırma işleminden hemen sonra eriyik hızla erime sıcaklığının altına soğutulmalıdır. Başka bir yol ise titanyum hidritin ayrışmasını yavaşlatmak için pasif hale getirilmesidir. İleri seviyede düzenli gözenek morfolojili köpükler bu yöntem ile elde edilir. İlginçtir ki bu fikirlerden bazılarının geçmişi kırk seneye dayanır.

Toz sıkıştırılmalı eritme metodu Alman Schunk GmbH, Honsel AG, Avusturyalı Mepura ve Neuman firmalarınca reklamlarda kullanılmaktadır. Bu yöntem ile üretilen köpükler için firmalar “Foaminal” ve “Alulight” isimlerini kullanmaktadır [36].

### 3.2.1.4. Döküm Yöntemleri

#### 3.2.1.4.1. Polimer Köpükler İle Hassas Döküm

Köpükler, direkt metali köpüklemek yerine erimiş metali köpükleyerek de elde edilebilir. Bu durum Şekil 3.14.’de şematik olarak da incelenebilir.

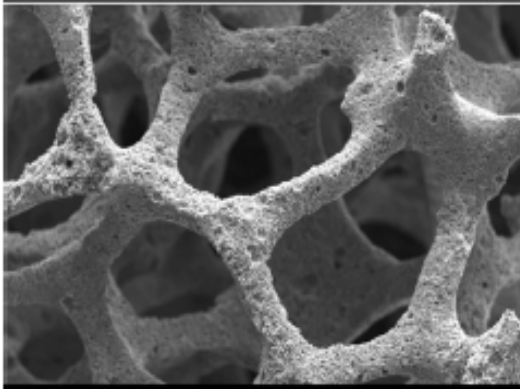


Şekil 3.14. Hassas döküm ile hücreli metal üretimi [38].



Bu yönteme göre poliüretan köpük gibi bir polimer köpük başlangıç noktası olarak kullanılır. Eğer polimer, kapalı gözeneklere sahipse retikülasyon uygulanarak gözenekleri açık hale getirilmelidir. Elde edilen açık hücreli polimer köpüğün içi daha sonra fenollü reçine ve kalsiyum karbonat gibi balçıksı ve yeterli ısı direncine sahip bir malzeme ile doldurulur. Isı hareketleriyle polimer köpük tedavi edildikten sonra erimiş metal orijinal köpük yapısının oluşturacağı açık bölmelere doldurulur. Eğer dar girintiler sıvı metal ile basitçe doldurulmazsa, kalıba basınç uygulanması veya kalıbın ısıtılması gibi yöntemler gerekli olabilir. Döküm malzemesinin çıkartılmasından sonra (ör. Basıncılı su ile) orijinal polimer köpüğün tamamen benzeri yapıdaki metalik yapı elde edilir. Kalıbı tamamen doldurmaya başarmak, katılaşmanın yönünü kontrol edebilmek ve döküm malzemesini iç yapıya zarar vermeden çıkarmak bu yöntemin zorluklarındandır.

Bu teknik ile yapılmış (Şekil 3.15a. ) hücreli alüminyum malzemesinin mikro yapısı gösterilmektedir. Bu tür köpükler “duocell” adı altında Oakland(USA)’daki ERG firması tarafından ve resmi olarak Japonya’da yıllardır satılmaktadır. Bunların 2 gözenekten 16 gözeneğe kadar farklı dereceli halleri bulunmaktadır. Karmaşık yapılar polimer köpüğü önceden şekillendirerek elde edilebilir. University of Aachen’de elde edilen bazı alüminyum köpük örnekleri Şekil 3.15b.’de görülebilir [38].



(a)



(b)

Şekil 3.15. (a) : “duocell” in görünüşü. (b) : Hassas dökümle üretilen parçalar [38].

Her ne kadar 6101 veya AlSi7Mg (A356) gibi alüminyum alaşımları genellikle kullanılsa da bakır ve magnezyum gibi başka metaller de kullanılabilir. Tabi ki son metal ürünün

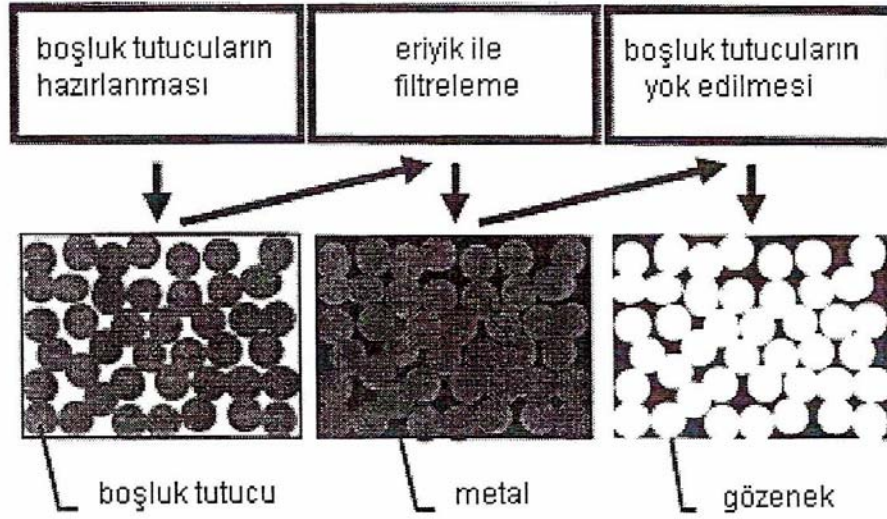
yoğunluğu ve köpük morfolojileri başlangıç malzemesi tarafından belirlenir. Gözeneklilik genellikle %80 ila %97 arasında değişir. Her ne kadar yıllık üretimin 8 m<sup>3</sup> civarında olmasından dolayı ERG malzemesinin fiyatı yüksek olsa da (her in<sup>3</sup> köpük için yaklaşık 10\$) kalıplama tercihlerindeki yeni teknolojiler sayesinde fiyatlar 2 dolar kadar düşecek gözükmemektedir [39].

#### **3.2.1.4.2. Kafes Bloklı Malzemeler**

Hassas döküm, yüksek derecede gözenekli, kafes bloklı malzeme elde etmek için kullanılabilir. Bu malzemelerin yapısı, düz kirişlerin iki düğüm noktasını birbirine bağlayan tekrarlı hücrelerden oluşur. Yapıları mükemmel şekilde düzenlidir ve bütün noktaları birbirine bağlanmıştır. Böyle yapılar, öncen oluşturulmuş, enjekte ile doldurulmuş polimer elementleri benzer şekilde katman katman yapıştırarak elde edilir. Elde edilen ürün daha sonra hassa döküm adında model olarak kullanılarak, yüksek derecede düzenli polimer başlangıç malzemesini verir. Prensipde alüminyum A356 veya paslanmaz çelik gibi kalıplanabilir her madde kullanılabilir. Genellikle, kafes aralıkları 6.5 mm ve 25 mm arasında, strut ölçüleri ise 1.5 mm ile 3.8 mm arasında değişir. Metalik LBM'nin temel avantajı teorik olarak optimum limit olan, kolayca tahmin edilen ve tekrar üretilen mekanik özellikleridir [40].

#### **3.2.1.4.3. Boşluklu Malzemelerin Dökümü**

Düşük ağırlıklı gözenekli metaller, inorganik, organik ya da saydam düşük yoğunluklu küresel taneciklerin etrafına dökülerek üretilirler. Diğer bir yol ise erimiş metale dökülerek oluşturulmalarıdır. Döküm sonucu tanecikler ya metalik üründe kalır ya da bir çözücü, asit veya termal bir etki sonucu ortadan kalkar (Şekil 3.16.). Bu durumun başarılmasındaki koşul; boşluk tutan taneciklerin sayısı yeteri kadar fazla ise birbirlerine bağlanmasıdır. Vermekolitler, ısıya dayanıklı kil toprakları, çözünebilir tuzlar, kum taneleri, küresel cam köpükler, ya da Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içi boş küreleri inorganik doldurucu metaller olarak iş görebilir. Polimer küreler, boşluk tutan organik maddeler olarak kullanılabilir; ama erimenin tersine bir şekilde çalışan katılaşma, hızlı bir şekilde olmalıdır. Bu durumda, yüksek basınçta süzülme olayının gerçekleşmesi gerekir [41].

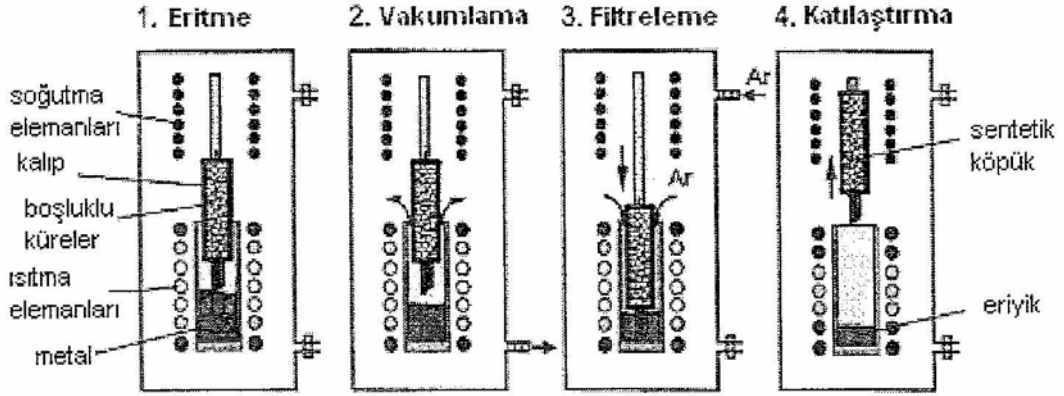


Şekil 3.16. Boşluk tutucu doldurucularla hücresel metal üretimi [41].

Boşluklu maddelerde yeniden ısıtma yöntemi, beklenenden daha önce katılaşmayı önlemek için gereklidir. Bu yöntem özellikle de ısı kapasitesinin yüksek ya da süzülme basıncının düşük olduğu durumlarda gereklidir. Sıvı metallerin sahip olduğu yüksek düzeyde yüzey gerilmeleri taneciklerin ıslanmasına yol açar. Bu problem genellikle taneciklerin arasının çatlaması sonucu boşlukların tam olarak doldurulamaması şeklinde açığa çıkar. Tanecikler arasında vakum yapmak ya da erimiş maddeye basınç uygulamak, süzülme için önemli bir ön koşuldur. Boşluklu tuzlar su yardımıyla ortadan kaldırılabilir. Kum topları ise sıcaklık yardımıyla kolaylıkla ayrıştırılabilir. Polimer küreler ise termal pirolizle (ısıl bozunma) ayrıştırılır. Metallerin büyük kısmında bu prosesler izlenir. Alüminyum, magnezyum, çinko vb. önceden tasarlanan parçalar istenilen geometrik kalıplara dökülerek fabrikada üretilebilir. Genel olarak üretilen malzemelerin morfolojisi bir süngere benzetilebilir [42].

Şekil 3.17'deki diyagram sentetik köpük yapmanın muhtemel yollarını göstermektedir. Bu durumda, piyasada bulunabilen boşluklu alüminyum küreleri (2.1-3.6 çaplı ve 100-200 mm kalınlıklı) kullanılır. Küreler çelik dökme kalıplara doldurulur ve yüksek sıkışma derecesine ulaşana kadar titreştirilir. Bu işlemten sonra küreler 700 derecedeki erimiş magnezyum yardımıyla basınçlı süzülme bırakılır. Maddenin yapısı tek düze bir yapı kazanır ve köpük özellikleri neredeyse izotropik olur. Bu olayın dışında sandviç panelleri

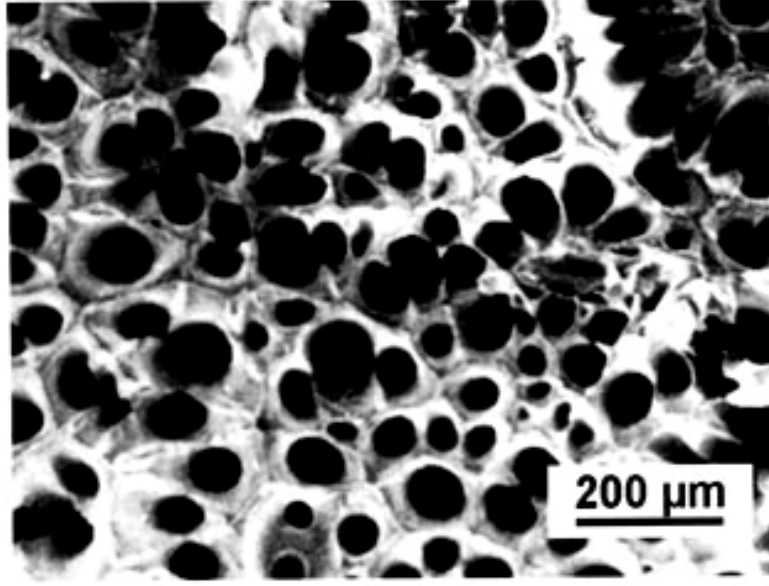
de oluşturulabilir. Bunun için önceden fabrikada hazırlanmış iki metal levhanın arasına seramik küreler konur ve sonra eritilerek süzülmeleri sağlanır. Bu levhalar metalürjik bağ yapana kadar eritilir.



Şekil 3.17. Sentetik köpük oluşumunun işlem adımları [42].

Boşluklu malzemelerin temel avantajlarından biri, madde üzerindeki boşlukların büyüklüklerinin ince ayarının yapılabilmesidir. Bu durum doldurucu taneciklerin büyüklüklerine göre dağıtımını ile sağlanabilir. Diğer taraftan %80 değeri, boşluklu malzemelerin maksimum gözeneklilik değerinin limiti olarak gösterilmektedir.

Açık gözenekli alüminyum maddelerin üzerindeki delikler, Şekil 3.18.'de gösterildiği gibi boşluklu malzemelerin yüksek basınç altında süzülmesi sonucu oluşturulabilir. Bu durumda doldurucu maddeler tamamıyla ortadan kaldırılabilir ve yoğunluk  $1.1 \text{ g/cm}^3$ 'e ulaştırılabilir. Bu maddeden imal edilen bazı bileşenler Şekil 3.19.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Boşluk tutucularla üretilen hüresel alüminyum [43].

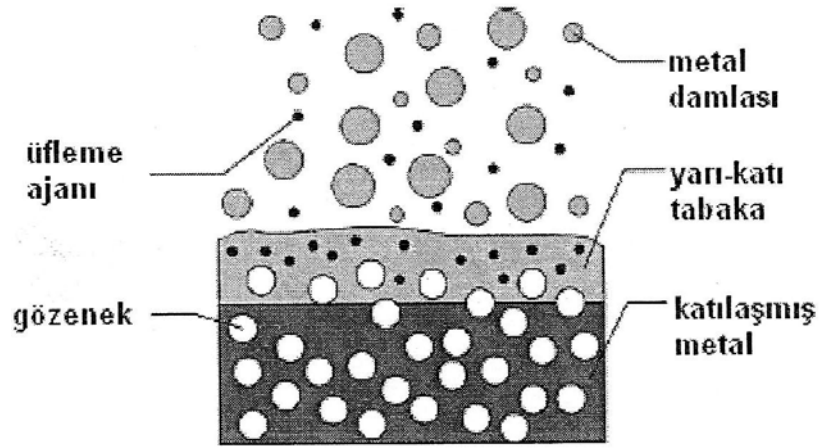


Şekil 3.19. Boşluk tutucularla üretilen alüminyum parçalar [43].

Ayrıca bu şekil, alüminyum köpüklerin kompozitlerinin de üretilebildiğini resmetmektedir. Maddenin üzerinde diş kesikleri açılarak, pünömomatik aletlerin gaz çıkışının titreşim halindeki su buharıyla birleşerek komponent oluşturması sağlanabilir.

### 3.2.1.5. Püskürtme İle Şekillendirme

Sprey şekillendirme, birçok çeşit metal ve alaşım için kullanılabilen bir işlemdir. Erimiş metal devamlı atomize olmuştur ve hızlı hareket eden metal damlacıklarının püskürüğü oluşturulmuştur. Metal damlacıklar, daha yoğun bir tabaka haline gelebilecekleri sert bir alt tabakada toplanmışlardır. Bunların şekilleri ise daha önceden hazırlanmıştır, örnek olarak; levha, çubuk, tüp. Bu durum, sürecin parametrelerinin uygun bir şekilde seçilmesini sağlamaktadır. Sprey ile şekillendirilen metallerin, karakteristik özelliklerine bakıldığında düşük oranda oksit içerdiği görülmektedir. Bunun yanında uygun tanecik büyüklüğüne ulaşılmış ve yüksek oranda metastabil olmuş alaşım fazına ulaşılmaktadır. Bu özelliklerin kombinasyonuna çoğu zaman klasik döküm yöntemleriyle ulaşamamıştır. Sprey prosesini özel kılan bir özelliği vardır; oksit, kalsiyum karbür ve saf metal pudraları spreyn içine doldurulup püskürtülerek sıvı metal damlacıklarıyla etkileşime girme ihtimalini sağlar. Bu durum tabakanın modifiye olmasını sağlar ve metal içine nüfus ederek onu alt tabakaymış gibi kullanır. Eğer pudra olarak oksit veya karbür (kalsiyum karbür) kullanılırsa MMC'den elde edilir. Enjekte edilen pudralar döküm ile temas ederek ayrılır ve yüksek miktarda gaz açığa çıkar. Hatta malzemenin üzerinde delikler açması da muhtemeldir (Şekil 3.20.). Bu etki delikli metallerin üretiminde kullanılabilir. Kelley, delikli yapının oluşmasını incelemek için CuSn<sub>6</sub> alaşımına BaCO<sub>3</sub> pudrasını enjekte etmiştir. Banhart ise silikon oksit ile manganez oksidi karbon çelik spreğine koymuş ve çeliğin içinde büyük miktarda karbon monoksit ortaya çıkması sonucu delikli çelik elde etmiştir (reaksiyon: SiO<sub>2</sub> + 2C → Si + 2SiO). Burada karşılaşılan sorun, deliklerinin büyüklüklerinin farklı olmasıdır [44].



Şekil 3.20. Püskürtme ile şekillendirme yöntemine göre metal köpük üretimi [44].

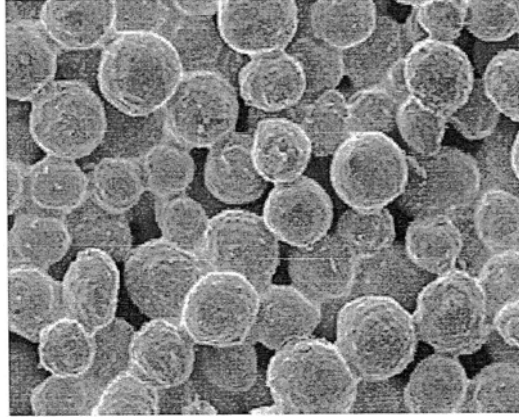
### 3.2.2. Gözenekli Metallerin Katı Hal Prosesi

Dökme metal dışında toz halindeki metal de hücreli yapıda metal malzeme üretiminde kullanılabilir. Bütün proses süresince toz metal katı olarak kalır ve nadiren katı hal operasyonları görülür. Sıvı halin yüzey gerilimi, kapalı gözenekli yapının oluşumuna eğilim gösterdiğinden, bu durumda ortaya çıkan hücreli yapının morfolojisi için çok önemlidir. Halbuki katılaşmış delikli ürünler, açık morfolojik izole edilmiş yapı gösterir; az ya da çok küresel parçalar birbirlerine katı boyunlarla bağlanmıştır. Bu günlerde, basit olarak katılaştırılmış toz gövdeleri ya da lifler, delikli metal elde etmenin en kolay yoludur. Daha gelişmiş teknolojiler sayesinde, toza temas edecek şekilde gaz gönderilmesi sonucu delikli yapı elde edilebilir. Bu durumda boşluklu malzemeler, içi boş küreler veya metal tozundan bulamaçlar kullanılabilir [45].

#### 3.2.2.1. Metal Tozların ve Liflerin Sinterlenmesi

Günümüzde, gözenekli metal ürünler birçok çeşit proses ile üretilmektedir. Çok fazla metal kullanılmakta, bunların içinde titanyum ve süper alaşımlar, hatta bronz ve paslanmaz çelik büyük kısmı oluşturmaktadır. Genelde, gözenekli malzemelerin üretiminde, birtakım adımlar izlenir; pudranın hazırlanması, sıkıştırma ve kalıba dökme, katılaştırma. Yerçekimi ya da paketleme sistemi bronz için çoğunlukla kullanılan bir sistemdir

(Cu89Sn11). Katılaşma sıcaklığı yaklaşık olarak 820 °C'dir ve %20 ve %50 delikler oluşturulabilir. Oysa sağlamlık bakımından karşılaştırıldığında daha dūřuk olduğu gōrōlūr [46]. Buna benzer bir malzeme Őekil 3.21.'de gōsterilmiřtir.



Şekil 3.21. 100 μm çaplı partikōllerden sinterlenmiş bronz malzeme [46].

Islak toz spreyi, delikli yapının ūzerindeki tařıyıcı bir sıvı ile birleřmiř pudra/bulamaç içerir. Bundan sonra ise, kurutma ve vakumla oluřan difūzyon baęları gōrōlūr. Bu yolla, çok iyi delikli yapı elde edilir.

Alōminyum alaşımlı pudralardan veya taneciklerden yapılan gōzenekli metallerin, daha ūnce bahsedilen metallere gōre kullanımı daha zordur. ōnkō alōminyum çoğunlukla yoğun oksit tabakası ile kaplıdır. Bu kaplama da parçaların birbirine sıkışmasını ūnlemektedir. Bu problemi ōzme için bir ōzōm; pudraları ve tanecikleri oksit tabakasını kırarak Őekilde yeniden Őekillendirmek ve parçalar arsında metalik baę oluşumunu sağlamak olabilir. Buna alternatif olarak, sinterleme, bakır, silikon veya magnezyum pudralarını etkileyerek dūřuk seviyede erimiş alaşımların oluşmasını sağlayabilir, bu sıcaklık ise yaklaşık 595-625 °C civarındadır. Alōminyum taneciklerinin basınçsız sinterlenmesi, sinterlemeye yardımcı çentiklerin oluşmasına neden olabilir ve bu alaşım prosesini sinterlemeye bağlı olarak etkiler [47].

Tozların metal liflerle yer değiştirmesi, gōzenekli metal malzemelerin yapılması için yeni olasılıkların oluşmasını sağlar. Çok çeşitli metallere lif olarak ūretiler ve sinterlenmiş

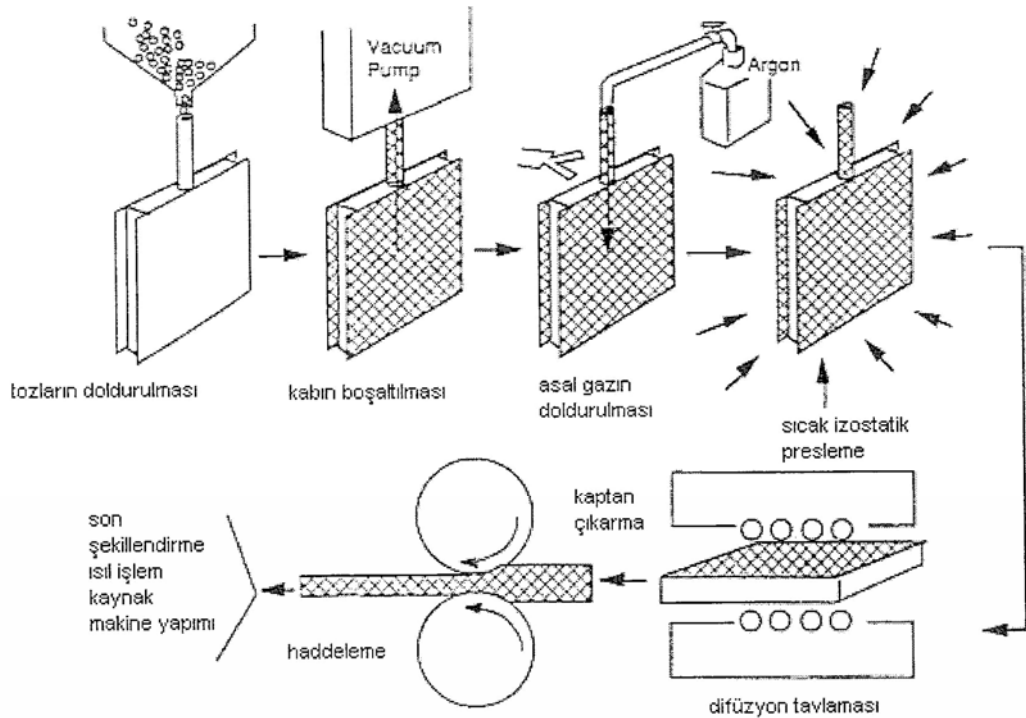


ürünlerin prosesini oluşturabilir ki bunlar da piyasada bulunabilen malzemelerdir.

### 3.2.2.2. Gaz Yakalama Tekniği

Hücreli metaller, bölüm 2.1.3.'te açıklanan benzer proseslerle üretilebilir, ama üfleme ajanları kullanmadan ve metal eritilmeden yapılması gerekmektedir. Bunun için, pudralar yoğun olan ön malzemeye sıkıştırılır. Sıkıştırma esnasında gaz, malzemenin içinde yakalanmaya yakın hale gelir. İkinci adımda ön malzeme ısıtılır ve metalin genişmesi sağlanır. Bu durum yakalanan gaz tarafından oluşan iç basınca bağlı olarak gerçekleşir. Bu genişleme katı halde yer alır ve bu yüzden gerçekte şekillendirme prosesi değil, daha çok katı hal sürünme prosesidir.

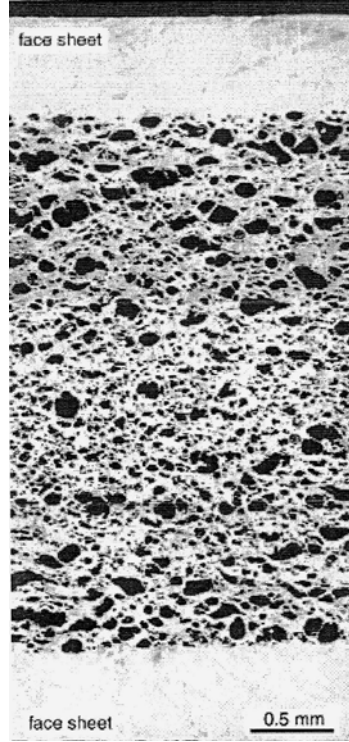
Bu metot, uçaklar için gözenekli titanyum malzemelerin üretiminde kullanılmıştır (Boeing, USA). Şekil 3.22. işlemin muhtemel uygulamasını göstermektedir.



Şekil 3.22. Gaz yakalama tekniği [48].

Titanyum tozları önceden boşaltılan ve gazı çıkartılan bir kabin içine doldurulur. Bundan

sonra 3-5 atm kadar basınçta argon gazı ile doldurulur. Kap sızıntıyı önlemek için contalanır ve izostatik olarak basınç uygulanır. Bu süreç malzeme yoğunlaşana kadar devam eder. Argon gazı sıkıştırılır ve düzenli bir şekilde gözeneklerin dağılımı sağlanır. Bu gözenekler, yüksek iç basınç altındadır ve toplam hacmin %2'den az olan kısmını oluştururlar. Yoğunlaştırılmış malzeme son çalışma şekline yakın bir şekil alarak çalışır ve sonra yavaş yavaş soğutulularak yumuşatma etkisiyle hücresel malzemeye çevrilir. Genel olarak, bu soğutma adımı, alaşımın erime sıcaklığının 0.6 katında gerçekleşir ve 6-24 saat sürer. Soğutma sürecinde gaz boşlukları yavaşça genişler. Bu yüzden iç basıncın, gazın basıncıyla metalin gücünün eşitlenmesine kadar düşürülmesiyle soğutma sıcaklığına ulaşılır. Bunun sonucu %20-40'luk gözenekli gövdeye ulaşılır. Tipik bir gözenegin çapı 10 ila 100 µm arasındadır. Teorik varsayımlara göre gaz yakalama tekniğinde %50'den fazla gözenekli yapı beklenmez. Kabin pudra içeren duvarlarının iki fonksiyonu olabilir; tozları sızdırmamanın yanı sıra, dengeli soğutmadan sonra köpük özü ve iki yüzlü levha içeren sandviç yapıların imalatına olanak sağlar. Böylece duvarlar hücresel çekirdekte yoğun bir dış tabaka oluştururlar. Bu sandviçlerin bir kesiti Şekil 3.23.'de gösterilmiştir. Genleşmedeki yoğunlaşmaya bağlı olarak yuvarlanan levhalardan 1.2x2.1 m olan bir kesit alınmıştır. Bunun yoğunluğu titanyumun %66'luk gövdesine denktir [48].



Şekil 3.23. TiAl6V4 sandviç.  
Gaz yakalama  
teknîği ile gözenekli  
iç yapı [48].

### 3.2.2.3. Bulamaçların Şekillendirilmesi

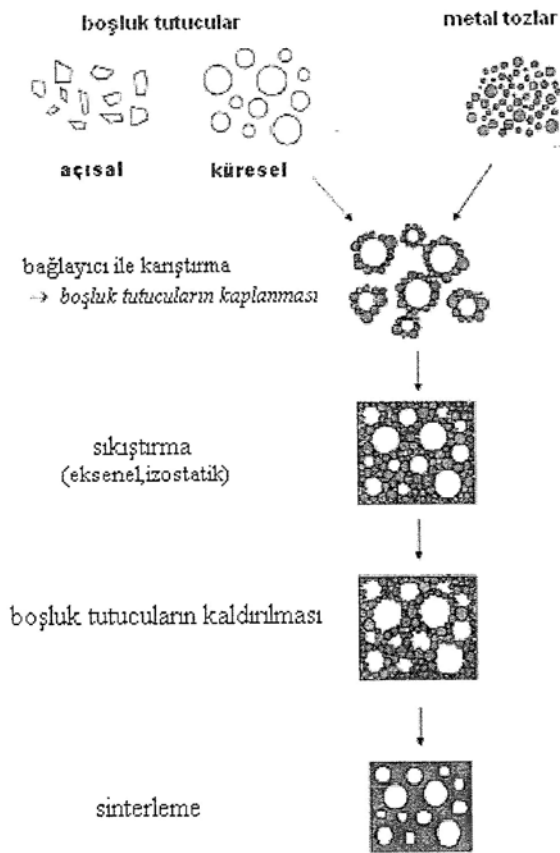
Metalik köpükler ayrıca; metal tozların reaktif katkıların bulamaçları hazırlanarak da üretilir. Bu bulamaçlar karıştırılarak ve kalanlar sıcaklık yardımıyla ayrıştırılarak kalıba dökülür. Eklenenlerin ve üfleme ajanlarının etkisiyle, bu bulamaç daha yapışkan bir hale dönüşür ve gazın genişmesiyle o da genişler. Eğer yeterli kararlılık ölçülürse genişlemiş bulamaç korunabilir ve tamamen kurutulabilir. Üfleme ajanı olarak ortofosforik asit ile alüminyum hidroksit veya hidroklorik asidin kullanılmasıyla alüminyum tozlardan köpükler elde edilir. Yoğunlukta %7 yakalanır. Fakat hala köpüklerde yetersiz sağlamlık ve kırılabilirlik gibi sorunlarla karşılaşılabilir [49].

Bulamaçlar açık gözenekli metalik köpüklerin üretiminde alternatif bir yol olarak kullanılabilir. Bu durumda, açık gözenekli bir polimer köpük gümüş ve gümüş oksit tozu içeren bulamaçlara yerleştirilir. Bir sonraki adımda bulamaçlar açık gözenekli metalik köpüklerin üretiminde alternatif bir yol olarak kullanılabilir. Daha sonra köpük kurutulup

ve bir sıcaklığa kadar ısıtılıp polimer yakılır ve metal toz parçaları birbirlerine sıkışmaya başlar. Böylece sert hücresel bir metal yapı elde edilir.

### 3.2.2.4. Boşluk Tutucu Dolduruculardan Oluşan Gözenekli Metaller

Gözenekli, sünger benzeri malzemeler boşluk dolduran metal tozlardan elde edilebilir. 2.1.4. bölümden farkı, boşluklu maddenin gövdesi metal pudrayla doldurulmuştur (Şekil 3.24.).



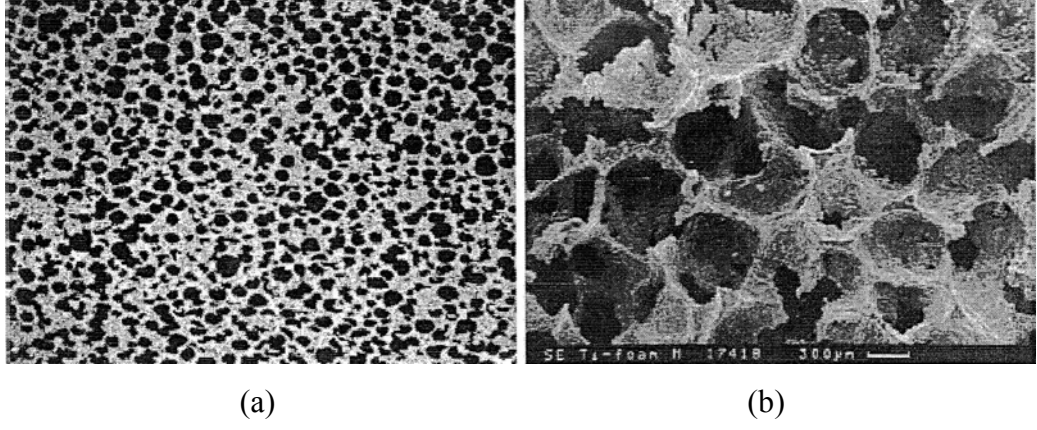
Şekil 3.24. Metal tozların, boşluk tutucularla birleştirilerek gözenekli metal oluşumu [50].

Metal tozlar kuru doldurucuların gövdelerine doldurulur veya uygun çözücü kullanılır veyahut da organik bağ kullanılabilir. Bu bağ ise metal tozların, boşluklu malzemelerle karıştırılmasında kullanılır. Seramik parçalar, içi boş küreler, polimer tanecikler veya

boşluklu polimer küreler, tuzlar ve hatta metaller boşluklu maddeler olarak kullanılabilir. Doldurulan gövdeler ise oda sıcaklığında tutulur veya boşluklu maddeler ısıya karşı dayanıklıysa, belirli sıcaklıklarda preslenir. Böylece sıkışma özelliği gelişir ve sinterleme prosesi başlar. Her iki durumda da, doldurucu taneciklerin yer aldığı metal matrixler içeren kompozitler elde edilir. Eğer metal içerik yeteri kadar düşükse, boşluklu maddeyi ortadan kaldırmak da o kadar muhtemeldir. Çünkü doldurucu malzeme tarafından şekillendirilen ağ birbirinden bağımsızdır. Bu durum; termal etkiyle, filtrelemeyle veya sulu çözeltiyle yapılabilir. Sonunda uygulanan sinterleme adımı, gözenekli metalin ağını yoğunlaştırır [50].

Titanyum köpükler, aşağıda belirtilen birkaç yöntemle üretilebilirler:

1. Birinci yol, polimer kürelerin boşluklu maddeler olarak kullanılmasıdır. Titreşimle yerleştirilen titanyum tozları polimer küre gövdelerine soğuk preslenir. Polimer, termal işlemlerle ortadan kaldırılır ve sonunda sinterlenmiş olur (Şekil 3.25a.).
2. Alternatif olarak, magnezyum metal tanecikleri doldurucu olarak kullanılabilir. Bu proseste, magnezyuma erime sıcaklığında sıcak pres uygulanır ve sonrasında bu taneciklerin gövdeleri titanyum tozlarıyla doldurulur. Magnezyum tanecikleri buharlaştırma (1400 °C) yöntemiyle ortadan kaldırılır. Bu durumda titanyum parçaları arasında sinterleme prosesi gerçekleşir. Magnezyumun avantajı düşük kaynama noktası (1107 °C) ve titanyum ile karışmazlığıdır (Şekil 3.25b.).
3. Sonunda, yüksek oranda gözenekli titanyum, tanecik büyüklüğü 0.4'ten 2.5 mm'ye ulaşan karbamidi parçalar boşluk doldurucu olarak kullanılarak imal edilebilir. Bu doldurucu maddelerin tanecik büyüklüğü 45 µm'den azdır ve karbamidi "petrolether" ile nemlendirme sürecinde eklenir. Karışım 166 MPa'da preslenir ve sıcaklık ilk olarak 170 °C'de verilir. Bundan sonra ise sıcaklık 1400 °C'ye çıkar. Gözenekler %70'e ulaşır. Paslanmaz çelik (316L) ve bazı nikel temelli süper alaşımlar ayrıca %60 ile %80 arasındaki oranda gözenekli hücresel katıların prosesinde etkilidirler.



Şekil 3.25. (a) : Hücresel titanyum, (b) : Boşluk tutucu olarak magnezyum granülleri [50].

## 4. BÖLÜM

### GÖZENEKLİ METALLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

#### 4.1. GİRİŞ

Gözenekli metaller çekme gerilmesi altında kırılğan davrandığından bu malzemelerden mekanik olarak yararlanma alanları basma kuvvetlerinin baskın olduğu alanlardır. Basma kuvvetlerine maruz kaldığında hücre duvarlarının plastik bükülmeye uğraması nedeniyle metalik köpüklerin enerji emebilme özelliği yüksektir. Uygulanan kuvvetin iletim miktarı gözenek özellikleri ile kontrol edilebildiğinden geniş plastik gerinim potansiyeli metalik köpükleri enerji emilimi gerektiren uygulamalar için ideal malzeme haline getirmektedir [57].

Darbe enerji emiliminin belirlenmesi için öncelikle köpük malzemesinin gerinim hızına karşı duyarlılığının belirlenmesi gerekmektedir. Bu alanda literatürde oldukça sınırlı veri bulunmakla birlikte çeşitli Al köpükleri üzerinde yapılan çalışmalar bu köpüklerin dinamik gerinim altındaki davranışlarının yarı-durağan gerinim (10-2 1/s'in altındaki gerinim hızları) altındaki davranışlarına benzer olduğu görülmüştür [58].

Metal köpükler deformasyon bantlarının sağladığı özel deformasyon mekanizmaları sayesinde mükemmel enerji emebilme kapasitesine sahiptir ve bu nedenle kara taşıtlarında tampon olarak kullanılır [59,60].

Metal köpükler üç bölgeye ayrılabilir karakteristیک bir basma gerilmegerinim davranışı gösterirler. Düşük gerinimlerde (< % 1-2) elastik deformasyon gösteren köpükler % 60-80 gerinime kadar gerilmenin sabit olduğu bir platoya sahiptirler. Basma gerilme-gerinim

grafığının üçüncü bölgesinde ise yoğunlaşma gerinimine ulaşırlar ve hücre duvarlarının yıkılıp birleşmesi ile yoğunlukları artar. Gerilmenin sabit olduğu uzun plato sayesinde metalik gözenekli malzemeler belirli bir gerilme sınırını aşmadan enerji emebilme yeteneğine sahiptirler [59].

Metalik köpüklerin enerji emilim özelliklerinin karakterizasyonu için plato gerilmesi ve yoğunlaşma gerinimi gibi basma özelliklerinin köpük özellikleri ile değişiminin belirlenmesi gerekir [58,59].

Metalik köpükler darbe emme özellikleri sayesinde son yıllarda zırh sistemlerinde de kullanılmaktadır. Yu ve arkadaşları [61] geliştirdikleri zırh sisteminde en önde darbeyi karşılayacak seramik veya kompozit malzemeden yapılmış çarpma plakası, arkasında darbe ile gelen şok dalgalarını hücre duvarları sayesinde farklı yönlere dağıtma özelliğindeki metalik köpük, en arkada ise deforme olarak darbe enerjisini emen ve genellikle polimerden yapılan destek plakası kullanarak zırhın performansını iyileştirmişlerdir.

## **4.2. GÖZENEKLİ METALLERİN KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ**

Gözenekli malzemelerin yapısal ve işlevsel özelliklerini belirleyen en önemli parametre gözenek özellikleridir. Bu nedenle gözenek dağılımı, miktarı ve yapısının belirlenmesi metalik köpük malzemelerin karakterizasyonunun ilk adımını oluşturur [62].

Metalik köpüklerin karakterizasyon yöntemleri tahribatlı ve tahribatsız olmak üzere iki grupta toplanabilir. Tahribatsız muayene yöntemleri, sıvı penetrant yöntemi ile hücre duvarı kılcal çatlaklarını tespit etme, X-ışını radyografi ve radyoskopisi ile makroyapısının haritalanması, X-ışını tomografisi ile 3 boyutta gözenek dağılımının belirlenmesi, girdap akımları kullanılarak manyetik akım değişiminden göreceli yoğunluk ve gözenek özelliklerinin ölçülmesi, akustik ölçümlerle ses yalıtım özelliklerinin belirlenmesi ve elektrik ve ısı iletkenlik ölçümleri olarak sıralanabilir [62].

Tahribatlı muayene yöntemleri ise basma, çekme, eğme gibi mekanik testler, gözenek özelliklerinin belirlenmesi, elektron ve optik mikroskop analizleri ve korozyon testlerini kapsar [63].



En yaygın kullanım alanları olan kemik implantları, yük taşıyıcı yapılar ve darbe dayanımı gerektiren uygulamalar göz önüne alındığında en önemli karakterizasyon yöntemleri olan gözenek özelliklerinin belirlenmesi ve basma testi olduğu görülür.

#### 4.2.1. Gözenek Miktarının (Göreceli Yoğunluğun) Hesaplanması

Gözenekli malzemelerin en önemli özellikleri yapısal ve işlevsel özelliklerini belirleyen gözenek miktarı (göreceli yoğunluk), şekli ve dağılımıdır. Gibson ve Ashby'nin [64] modeline göre göreceli yoğunlukla basma mukavemeti ve elastik modülü arasında açık bir ilişki bulunmaktadır.

Göreceli yoğunluk geometrik hesaplama [65], kantitatif görüntü analizi [66,67] ile ölçülebileceği gibi Archimedes'in suya daldırma prensibi ile ölçülebilmektedir. Gözenekler analiz sırasında suyun giremeyeceği şekilde kapatıldığı takdirde Archimedes suya daldırma yöntemi gözenekli malzemelerde toplam gözenek miktarının hesaplanması için uygun bir yöntemdir.

Archimedes prensibi sıvı içine daldırılmış bir katının sıvı içinde askıdaki kuvvetinin daldırma sırasında yer değiştirmesine sebep olduğu sıvı ağırlığına eşit olduğunu kabul eder. Buna göre havadaki (kuru) ağırlığı bilinen bir katı, saf su gibi yoğunluğu bilinen (sıcaklığın fonksiyonu olarak) bir sıvıya daldırıldığında yoğunluğu, bir başka deyişle gözenekliliği belirlenebilir [68].

Gözeneklerin kapatılması için vakum yağı veya silikon yağı kullanılabilir. Kuru olarak tartılan numune (W1) gözenekleri yağ ile tamamen kapatıldıktan sonra tekrar tartılır (W2). Son olarak yağ ile mühürlenmiş şekilde su içinde askıda tartıldıktan sonra yoğunluk aşağıdaki formüle göre hesaplanır [69]:

$$\rho^* = W1 \rho_w / [W2-W3] \quad (3.1)$$

$\rho_w$  ölçüm sıcaklığında suyun yoğunluğu ( $gr/cm^3$ ) olup aşağıdaki eşitlikle hesaplanır. Burada T suyun sıcaklığını ifade etmektedir.

$$\rho_w = 1.0017 - 0.0002315T \quad (3.2)$$

Gözenek boyut dağılımı ise makro boyuttaki (10-100  $\mu\text{m}$ ) gözenekler için cıvalı porozimetre, daha küçük boyutlardaki gözenekler için helyum piknometre kullanılarak ölçülebilmektedir [68].

#### 4.2.2. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Yapısal malzemelerin en önemli özelliklerinden biri doğrusal elastik davranışlarıdır. Metalik köpükler birçok yapısal işlev gerektiren uygulamalarda kullanıldığından performanslarını belirleyen en önemli parametreleri elastiklik modülü ve basma mukavemetidir [59].

Basma yükleri birçok uygulama alanında malzemelerin maruz kaldığı yük türüdür. Dolayısıyla yük taşıyıcı uygulamalarda kullanılan malzemelerin basma yükü altındaki davranışlarını belirleyecek testler uygulamak gerekir. Belirli durumlarda basma testleri diğer mekanik test yöntemleri ile karşılaştırıldığında avantaj sağlar. Malzemelerin deformasyon (elastik, akma, plastik), kırılma mukavemeti gibi birçok mekanik özelliğinin belirlenmesinde en yaygın kullanılan yöntem çekme testidir. Ancak deformasyon miktarı çekme sırasında malzemelerin boyun vermesi ile sınırlıdır [71]. Malzemelerin geniş plastik gerinimler altındaki davranışının belirlenmesi için ölçüm boyun verme noktasından sonra yapılmalıdır. Bu tür ölçümlere imkan sağladığından basma testi çekme testine alternatif bir test yöntemidir. Ayrıca basma testi numuneleri çekme numunelerine kıyasla oldukça basit şekilli, kolay hazırlanabilen ve az miktarda malzeme gerektiren numunelerdir [70].

Bunun yanında anizotropik (farklı yönlerde farklı özellik gösteren) malzemelerin mekanik karakterizasyonu genellikle basma testi ile belirlenir. Çok kristalli izotropik malzemelerin basma ve çekme davranışları oldukça benzer özellikler gösterir. Ancak dislokasyon kaymasına zıt şekilde ikizlenme ile deforme olan yüksek derecede yönlendirilmiş yapılarda (örn. tek yönlü desteklenmiş kompozit malzemeler) basma ve çekme davranışları birbirinden çok farklıdır [70].

Basma testlerinde deformasyon modunu belirleyen en önemli değişken numunelerin yükseklik/çap (L/D) oranıdır. L/D oranının 5.0'ten büyük olduğu durumlarda numunelerde bükülme meydana gelir. Bu tip numuneler elastik ve plastik bükülme analizi için uygun numunelerdir. L/D oranı 5.0'ten küçük numuneler bükülme göstermez ve hem kırılma

hem sünek malzemelerin, basma testleri için uygun boyutta numunelerdir. Bununla birlikte pratik uygulamalar 2.5'tan yüksek L/D oranına sahip sünek malzemelerin uygulanan yüke gösterdikleri tepkinin tatminkar olmadığını ortaya çıkarmıştır. Bu geometrilere taban ve tavan yüzeylerinde veya test cihazının çenelerindeki paralellikten en küçük bir sapma kaymaya sebep olur ve bu da ölçümü etkiler. Sonuç olarak 2.0'nin altındaki L/D oranlarında bükülme etkisinden bağımsız ve sağlıklı ölçümler yapılabilir [70].

Metalik malzemelerin oda sıcaklığındaki basma mukavemetinin belirlenmesi ASTM E9 - 81, "Metalik Malzemelerin Oda Sıcaklığında Basma Testi için Standart" [71] standardında konu edilmiştir. Bu standartta silindirik test numuneleri L/D oranlarında göre küçük, orta ve büyük olmak üzere üç farklı kategoride belirtilmiş, yüksek mukavemetteki metallerin basma testi için en uygun olan oranın küçük numuneler kategorisine giren 1.5-2.0 arasında olduğu ifade edilmiştir. Optimum test hızı ise 0.003-0.005 mm .dk ( $\cong 0.8 \times 10^{-3} - 1.4 \times 10^{-3}$  mm .s) olarak belirtilmiştir [71].

Basma gerinim-gerilme grafiğinde akma mukavemeti % 0.2 gerinim noktasından grafiğe çizilen paralelin (ofset) gerinim-gerilme eğrisini kestiği nokta olarak alınır. Test sırasında kırılan numunelerde en yüksek basma gerilmesi basma mukavemeti olarak alınır. Test boyunca kırılmayan sünek metaller için ise basma mukavemeti önceden belirlenen bir gerinimdeki gerilme değeri olarak alınır [71].

Ticari metalik köpüklerin basma kuvveti altındaki davranışları göreceli yoğunlukları ve hücre duvarı özellikleri kullanılarak oluşturulan modellerle öngörülemezdir. Bu uyumsuzluğun sebebi literatürde gözenek dağılımındaki homojensizlik ve köpüklerdeki hataları içeren birçok varsayımla açıklanmaya çalışılmıştır [58].

## 5. BÖLÜM

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 5.1. GİRİŞ

Önceki bölümlerde üretim yöntemleri ve kısmen mekanik özellikleri hakkında bilgi verilen köpük veya gözenekli malzemelerin değişik malzeme ve yöntemle üretilmesi, üretilen numunelerin karakterize edilmesi, fiziksel ve mekanik özelliklerinin test edilmesi bu bölümde ele alınacaktır. Bu çalışmanın ana konusunu oluşturan ve literatürde tesbit edilen boşluğu doldurmak adına yapılacak deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçların ilgi görmesi ve uygulamaya aktarılması ile Türk üniversite – sanayi ve kullanıcı üçgenini kuvvetlendirmek hedeflenmiştir.

Deneysel olarak yapılan bu çalışmalarda, üç ayrı hücrel metal üretim yöntemi kullanılarak numuneler üretilmiştir. Daha sonra bu numunelerin karakterizasyonu yapılarak mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada numune üretim teknikleri olarak yaygın bir şekilde kullanılan;

- Gaz enjekte ederek doğrudan gözeneklendirme,
- Toz sıkıştırılmalı ergitme tekniği,
- Kabarcıklandırıcı maddeler ile gözeneklendirme,

yöntemleri ile farklı özelliklerde numuneler üretilmeye çalışılmış ve test edilerek elde edilen özellikleri açıklanmıştır.

## 5.2. GAZ ENJEKTE EDEREK GÖZENEKLENDİRME

Bu yöntem 3. bölümde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Ancak kısaca aşağıda verildiği gibi özetlenebilir.

Metal eriyikleri belirli şartlar altında sıvı içerisinde gaz kabarcıklarının oluşturulması ile doğrudan gözeneklendirilebilir. Yüksek yoğunluklu bir metalik eriyik içerisindeki gaz kabarcıkları yüksek kaldırma kuvvetleri nedeniyle hızlı bir yükselme eğilimindedirler. Gaz kabarcıklarının tutulması ancak ergimiş metalin vizkozitesinin artırılması ile mümkün olur. Bu ise ince seramik tozlarının ya da alaşım elementlerinin eriyik içersine katılmasıyla sağlanabilir.

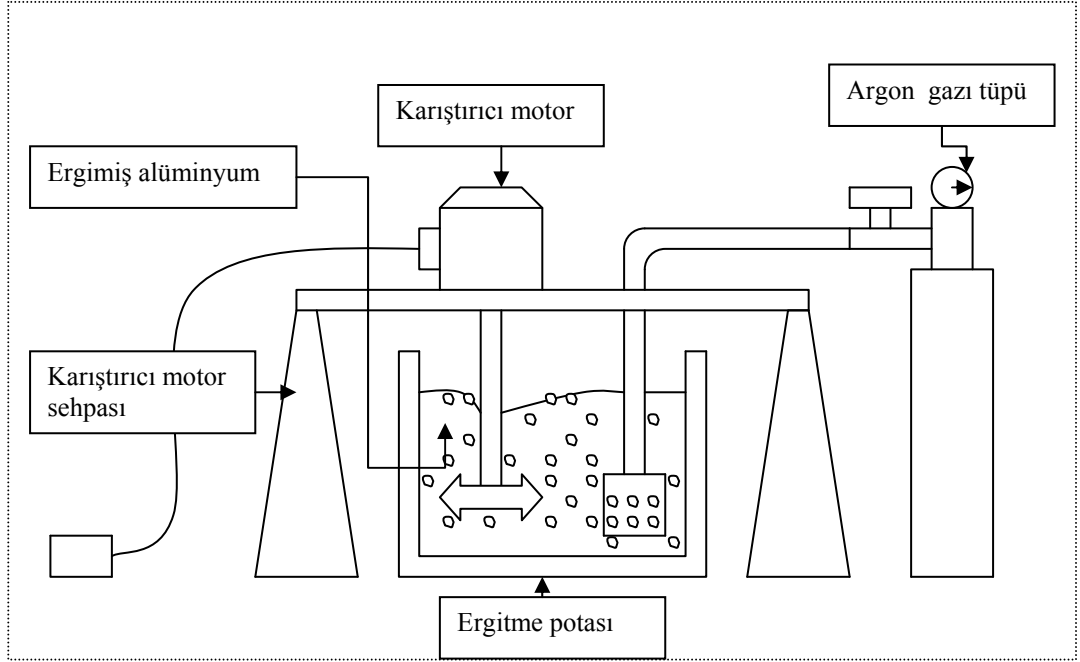
Bu üretim prosesine göre Silisyum Karbür, Alüminyum Oksit ya da Magnezyum Oksit parçacıkları eriyiğin vizkozitesini artırmak için kullanılır. Bu yüzden ilk adım bu metallerden birini içeren Alüminyum eriyiğinin hazırlanmasıdır. Çözülmesi gereken bir problem olan partiküllerin eriyik tarafından ıslatılması ve parçacıkların homojen olarak dağıtılmasının sağlanması Metal Matriks Kompozitlerin (MMK) yapımında karşılaşılan probleme benzemektedir [11,12]. Çeşitli Alüminyum alaşımları kullanılabilir. Örneğin döküm alaşımı AlSi10Mg (A359), A356 ya da dövme alaşımları olan 1060, 3003, 6016 yada 6061 gibi [13,14].

Sıvı MMK alaşımın, ikinci adımda çeşitli gazlardan birinin (Hava, Nitrojen ya da Argon) özel dizayn edilmiş dönen pervane yada titreşen nozulların içerisinden enjekte edilmesiyle gözeneklendirilmesi yada köpüklendirilmesidir. Pervane yada nozulların fonksiyonu eriyik içersinde çok ince gaz kabarcıkları oluşturmak ve bunların üniform bir şekilde dağılmasını sağlamaktır. Bu önemli bir fonksiyondur. Çünkü iyi kalitede bir köpüğün elde edilmesi ince kabarcıkların oluşturulmasına bağlıdır. Sonuç olarak yoğun kabarcık karışımı ve metal eriyik sıvının yüzeyinde yüzerek kuru köpüğe dönüşerek dışarı alınır.

### 5.2.1. Deney Seti

Yukarda özetlenen bu yöntem bu çalışmada da kullanılmış ve deney setinin şematik gösterimi Şekil 5.1.'de fotoğrafı Şekil 5.4.'de gösterilmiştir. Şekil 5.2. ve 5.3.'de sıvı metali karıştırmada kullanılan mikser ve gözenek oluşumunu sağlamada kullanılan Argon

gazı tüpü ile homojen gaz ıkıı sağlayabilmek için kullanılan çok delikli u görülmektedir.



Şekil 5.1. Deney düzeneği Şematik gösterimi.



Şekil 5.2. Deney tesisatında kullanılan karıştırıcı.



Şekil 5.3. Deney düzeneğinde kullanılan argon gazı tüpü ve homojen gaz çıkışı sağlayabilmek için kullanılan çok delikli uç.



Şekil 5.4. Deney düzeneğinin genel görünümü.

### 5.2.2. Deney Malzemeleri

Bu çalışmada köpüklendirme uygulanacak malzeme sıvı haldeki matris malzemesidir. Alüminyum alaşımı A356, malzeme köpüklendirilecek ana malzeme olarak seçilmiştir. Çünkü köpük malzemenin kullanma amacına uygun (ses, ısı, elektrik yalıtımı gibi) hafif,

kolay elde edilebilir ve laboratuvar çalışmalarına uygun olması ve ayrıca uzay ve havacılık endüstrisinde yaygın kullanılıyor olması tercih nedenlerinin başında gelmektedir. Silisyum karbür ise hem matriks malzemesinin mukavemetini arttırmak ve hem de sıvı Al'nin vizkozitesini yükseltmek amacı ile, ucuz Al ile iyi ıslatılabilir ve temininin kolay ve ucuz olması nedeniyle seçilmiştir. Metal köpüklendirme için kullanılan ana malzeme A356'nın özellikleri; % 91,1 – 93,3 Al, % 0,2 Cu, % 0,2 Fe, % 0,25 – 0,45 Mg, %0,1 Mn kompozisyonunda olup silisyum karbür parçacıklarının tane büyüklüğü, 3-5 µm arasındadır. Köpüklendirmeyi sağlamak için ise sıvı kompozitle reaksiyona girmeyen argon gazı kullanılmıştır.

### **5.2.3. Alüminyum Esaslı Gözenekli Metalin Elde Edilmesi**

Yukarda söylendiği gibi alüminyum eriyiğinin üretimi için ana malzeme olarak A356, vizkoziteyi arttırmak ve eriyiği köpüklendirmede daha kararlı hale getirebilmek için silisyum karbür parçaları kullanılmıştır. Ergitilen alüminyum ve silisyum parçacıklarından oluşan sıvı metali köpüklendirmek için kullanılan Argon gazı köpüklendirmeyi homojen bir halde yapabilmek için (argon gazı çıkışında) çok delikli bir apara içinden verilmiştir.

A356 alüminyum alaşımı 750°C'de (döküm sıcaklığı) ergitildikten sonra, ağırlıkça % 5 SiC katılarak 400 d/d ile 15 dk. karıştırılmıştır. Köpüklendirme işlemine geçmeden önce eriyik sıcaklığı 650°C'ye düşürülmüştür. Bu aşamadan sonra köpüklendirme işlemine geçilerek eriyiğe 3, 4 ve 5 lt/dk.'lık üç farklı debide Argon gazı verilmiş ve mikser yardımıyla karıştırılmıştır. Eriyiğin üst kısmında köpük oluşumu sağlandıktan sonra köpük yapı alınarak soğumaya bırakılmıştır.

Şekil 5.5. ve 5.6.'da elde edilen ham parça ve ham parçalardan kesilerek elde edilen numuneler görülmektedir.





Şekil 5.5. Deney sonucu elde edilen ham parçalar.



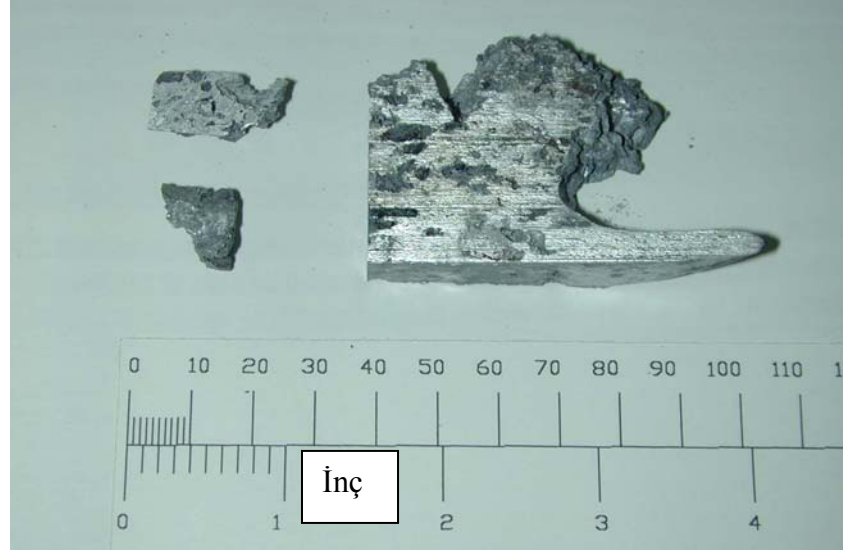
Şekil 5.6. Ham parçalardan elde edilen numune kesiti.

#### 5.2.4. Metalografik Analiz

Aluminyum köpük malzeme, SEM, optik mikroskop, mikrosertlik cihazı ve image analyzer ile incelenmiştir.

Numunenin genel görüntüsü Şekil 5.7.'de verilmiştir. Malzeme dış yüzeyleri incelendiğinde;

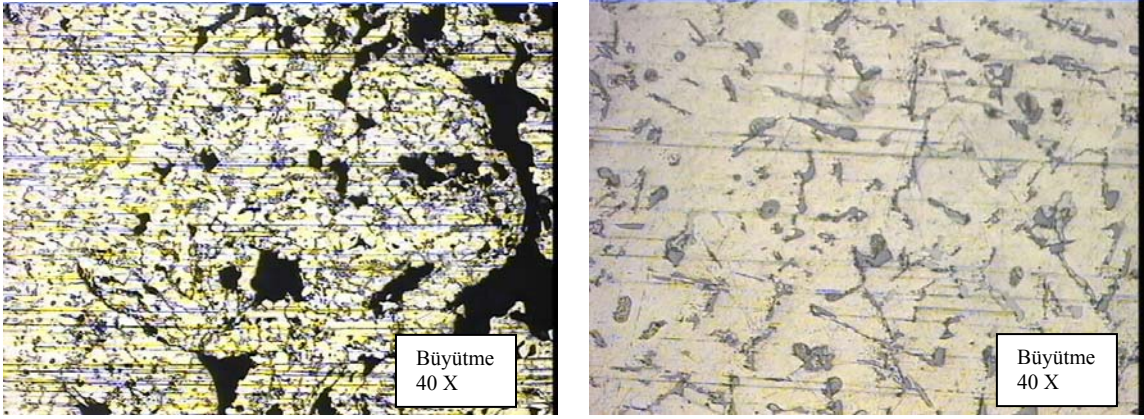
- numunenin gözenekli yapıda olduğu,
  - gözenek dağılımının, boyut ve yoğunluk açısından homojen olmadığı,
- görülmüştür.



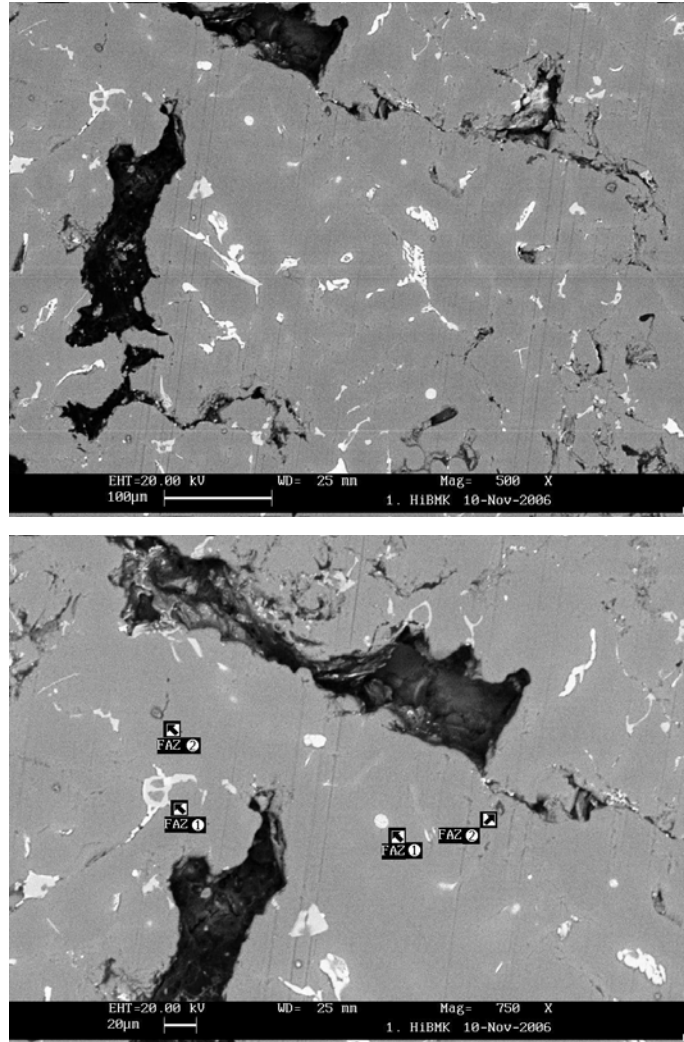
Şekil 5.7. Analiz numunesinin genel görüntüsü.

Malzemenin gözenek dağılımındaki homojensizlik nedeniyle farklı bölgelerinden numune alınmış ve yoğunlukları ölçülmüştür. Ölçüm yapılan bölgelerde yoğunluk,  $1,4 \text{ g / cm}^3$  ile  $1,9 \text{ g / cm}^3$  arası değerler almıştır.

Numuneden alınan kesit metalografik olarak hazırlanmış, SEM ve optik mikroskop ile incelenmiştir ( Şekil 5.8., 5.9. ). Yapılan incelemede mikroyapının, yumuşak ana fazın çevrelediği sert ikincil fazlardan oluştuğu görülmüştür. İkincil fazların dağılımı da gözeneklerin dendritik yapısıyla uyumlu katılma şeklinde gerçekleşmiştir. İkincil fazların dominant morfolojisi dendritik lamellerin yanı sıra kübik olup, büyüklük ve yoğunluk açısından dağılımı gözeneklere benzer şekilde homojen değildir.

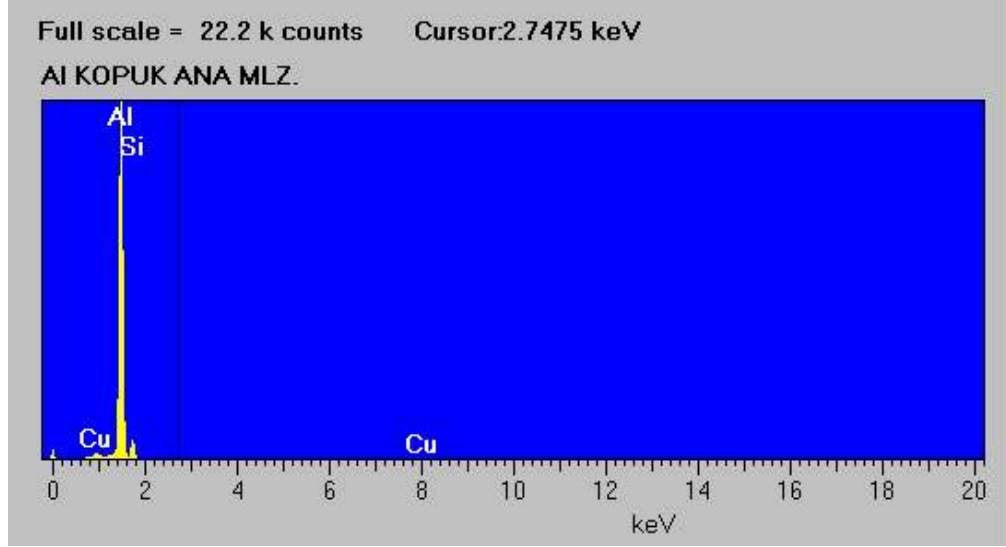


Şekil 5.8. Numune kesitlerinin Optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 5.9. Numune kesitinin SEM görüntüleri.

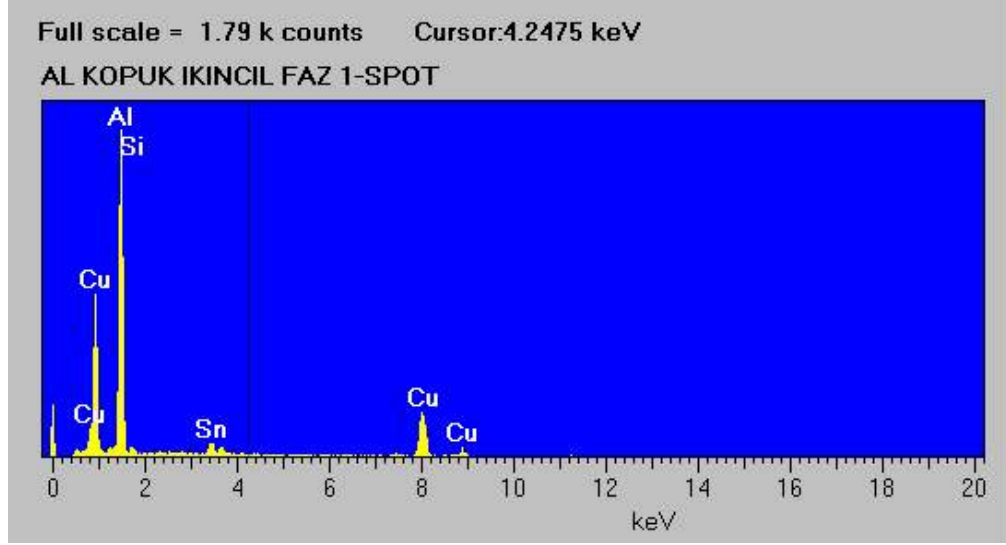
SEM / EDX ünitesi ile yapılan elemental analiz neticesinde, ana faz aluminyum esaslı olup (Şekil 5.10.) ikincil fazlar ağırlıklı olarak bakırca zengin (Şekil 5.11.) ve sınırlı miktarda aluminyum magnezyum esaslı (Şekil 5.12.) fazlardan oluşmaktadır.



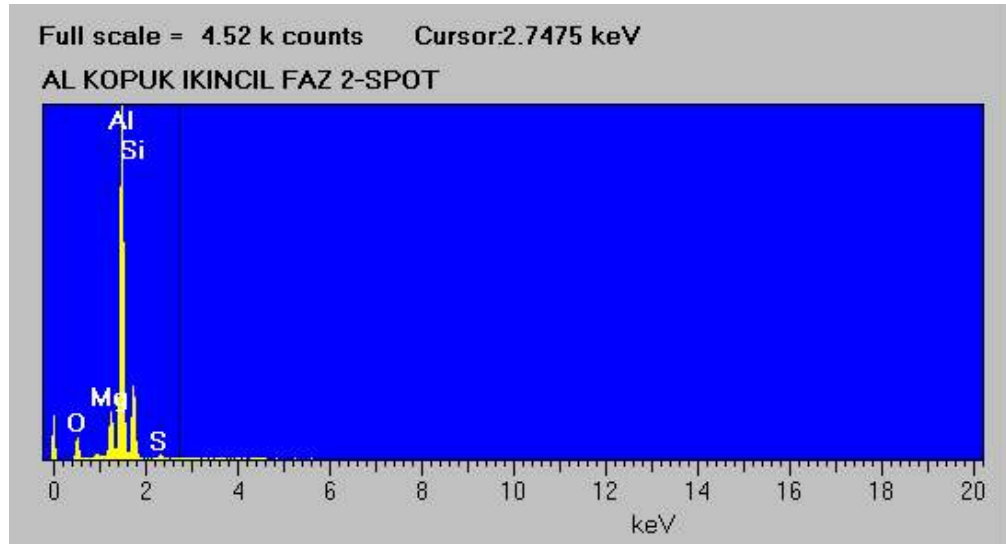
Şekil 5.10. SEM / EDX ünitesi ile yapılan ana malzeme elemental analizi.

#### NUMUNE GENEL ANALİZİ

Element	Yüzde	
Al	84.88	wt.%
Si	11.89	wt.%
Cu	3.23	wt.%
	100.000	wt.% Toplam



Şekil 5.11. Şekil 5.9. , faz-1'in EDX analizi.



Şekil 5.12. Şekil 5.9. , faz-2 EDX analizi.

## 5.2.5. Görüntü Analizleri

### 5.2.5.1. Numuneleri Hazırlanması

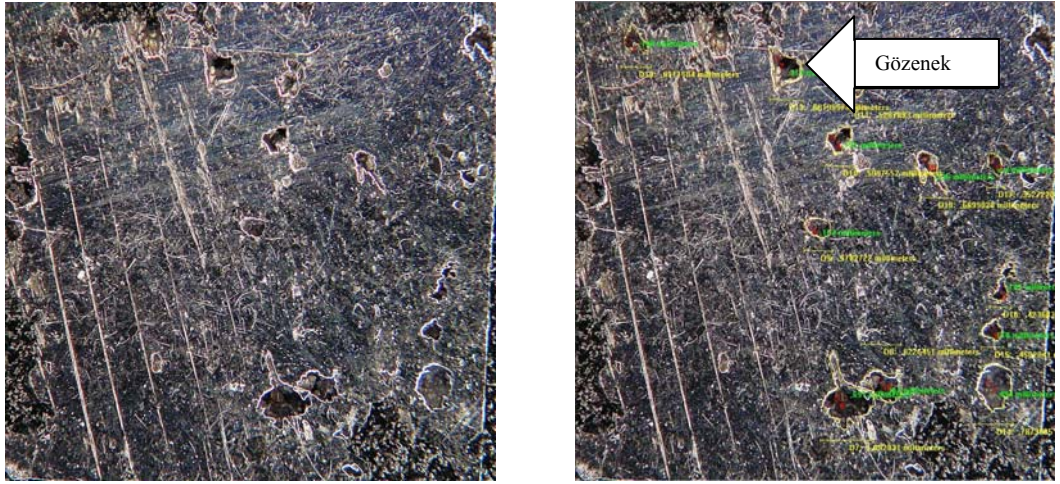
Şekil 5.6.'da gösterilen malzemelerden bölgesel, 4 farklı alüminyum numune 10x10 mm<sup>2</sup>'lik parçalar halinde kesilerek numaralandırılmıştır.

Kesilen her parça pres makinesinde belirli bir sıcaklığa ısıtılıp 30 dakika süreyle bu sıcaklıkta ısıtılarak bakalitlenmiştir, elde edilen her numuneler numaralanmıştır.

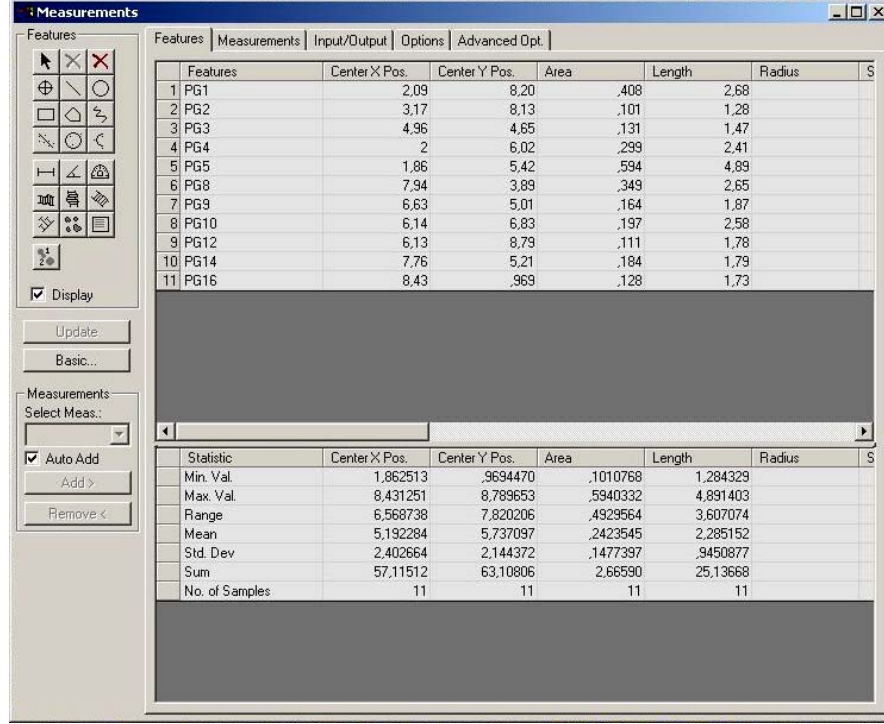
Bakalitlenen her numune yüzey temizleme ve parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatma işleminde 800, 1000 ve 1200 numaralı zımparalar sırasıyla kullanılmış ve yüzeyler son olarak 0,5 mikronluk  $Al_2O_3$  pasta ile parlatılmıştır.

Yüzey temizleme ve parlatma işleminden sonra numune yüzeyleri optik ile resimlenmiş bu resimler bilgisayarda işlenerek Image Pro-Plus programı ile imaj analizine tabi tutulmuştur. Böylece yüzeydeki gözeneklerin çapları, kapladıkları alanlar, ve oranları belirlenmiştir.

#### 5.2.5.2. Birinci Numune Görüntü Analizleri



Şekil 5.13. Birinci numune kesitindeki gözenekler.  
(Banyo sıcaklığı: 650 °C; Karıştırıcı: 400 d/d; Gaz debisi: 3 lt/d )



The screenshot shows the 'Measurements' software interface. The main window displays a table with 11 rows of feature data. The columns are: Features, Center X Pos., Center Y Pos., Area, Length, and Radius. The data is as follows:

Features	Center X Pos.	Center Y Pos.	Area	Length	Radius
1 PG1	2.09	8.20	.408	2.68	
2 PG2	3.17	8.13	.101	1.28	
3 PG3	4.96	4.65	.131	1.47	
4 PG4	2	6.02	.299	2.41	
5 PG5	1.86	5.42	.594	4.89	
6 PG8	7.94	3.89	.349	2.65	
7 PG9	6.63	5.01	.164	1.87	
8 PG10	6.14	6.83	.197	2.58	
9 PG12	6.13	8.79	.111	1.78	
10 PG14	7.76	5.21	.184	1.79	
11 PG16	8.43	.969	.128	1.73	

Below this table, there is a summary table with the following columns: Statistic, Center X Pos., Center Y Pos., Area, Length, and Radius. The data is as follows:

Statistic	Center X Pos.	Center Y Pos.	Area	Length	Radius
Min. Val.	1.862513	.9694470	.1010768	1.284329	
Max. Val.	8.431251	8.789653	.5940332	4.891403	
Range	6.568738	7.820206	.4929564	3.607074	
Mean	5.192284	5.737097	.2423545	2.285152	
Std. Dev	2.402664	2.144372	.1477397	.9450877	
Sum	57.11512	63.10806	2.66590	25.13668	
No. of Samples	11	11	11	11	

Şekil 5.14. Birinci numune yüzey analiz verileri.

İncelenen kesitte, Görüntü Analizleri sonucu Şekil 5.14.'den belirlenen veriler aşağıda verilmiştir.

En büyük gözenek çapı: 1.09 mm

Toplam gözenek alanı: 2.67 mm<sup>2</sup>

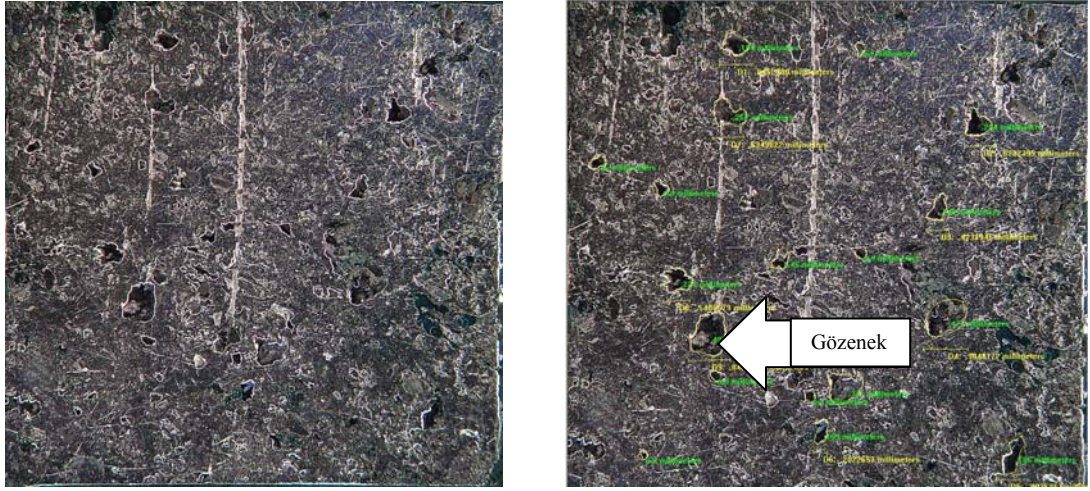
En büyük gözenek alanı: 0.594 mm<sup>2</sup>

Ortalama gözenek alanı: 0.148 mm<sup>2</sup>

Toplam gözenek sayısı: 15 adet

Toplam gözenek alanının yüzey alanına oranı (%): 2.46

### 5.2.5.3. İkinci Numune Görüntü Analiz Sonuçları



Şekil 5.15. İkinci numune kesiti gözenekleri.  
(Banyo sıcaklığı: 650 °C; Karıştırıcı: 400d/d; Gaz debisi: 4 lt/d)

Measurements						
Features						
Features	Center X Pos.	Center Y Pos.	Area	Length	Radius	
1 PG1	2,83	6,88	,493		2,77	
2 PG2	5,64	8	,341		2,20	
3 PG3	7,68	6,55	,472		2,68	
4 PG4	8,35	2,49	,204		1,98	
5 PG5	3,29	2,30	,262		2,35	
6 PG6	2,23	5,74	,227		2,01	
7 PG7	7,50	4,25	,140		1,77	
8 PG8	3,41	,858	,199		1,74	
9 PG9	9,04	9,35	,196		2,11	
10 PG10	5,14	8,87	,109		1,43	
11 T1	4,32	5,33			1,45	
12 BC1	4,92	8,16	ovf		,701	,112
13 BC2	,605	3,33	ovf		,923	,14E
14 BC3	1,87	3,86	ovf		,978	,15E
15 BC4	2,98	7,74	ovf		,794	,12E
16 BC5	1,52	9,37	ovf		,517	ovf
17 BC6	5,95	5,20	ovf		,701	,112
18 BC7	5,91	,975	ovf		,720	,11E
Statistic	Center X Pos.	Center Y Pos.	Area	Length	Radius	S
Min. Val.	,5522910	,8578137	,0212562	,5168304	,0822561	
Max. Val.	9,042297	9,447702	,4929909	2,765683	,1556991	
Range	8,490006	8,589888	,4717347	2,248853	,0734429	
Mean	3,974356	5,516131	,1752425	1,546283	,1214956	
Std. Dev	2,290393	2,758749	,1435003	,7122617	,0229807	
Sum	154,9999	215,1291	2,979122	27,83309	,8504634	
No. of Samples	39	39	17	18	7	

Şekil 5.16. İkinci numune analiz verileri.



İncelenen kesitte, Görüntü Analizleri sonucu Şekil 5.16.'dan belirlenen veriler aşağıda verilmiştir.

En büyük gözenek çapı: 0.905 mm

Toplam gözenek alanı: 2.98 mm<sup>2</sup>

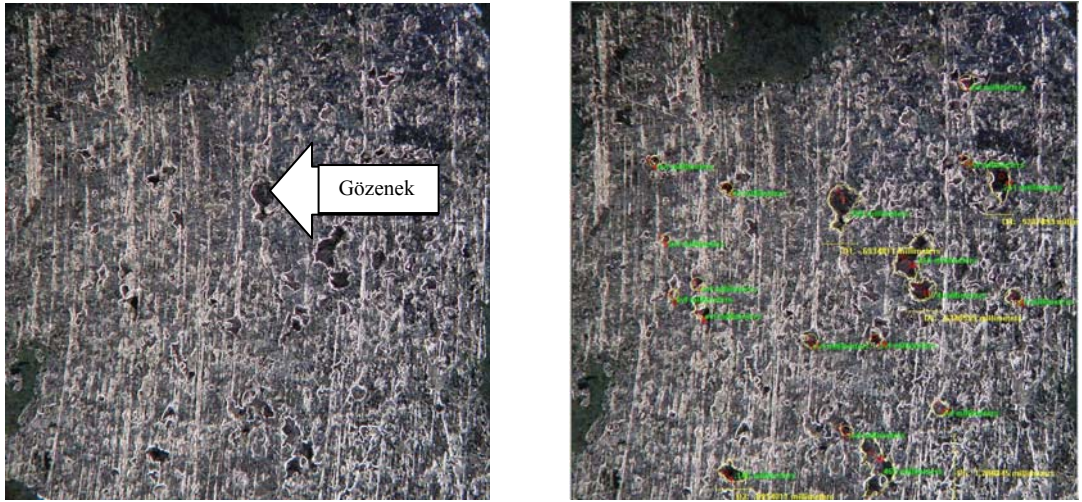
En büyük gözenek alanı: 0.493 mm<sup>2</sup>

Ortalama gözenek alanı: 0.144 mm<sup>2</sup>

Toplam gözenek sayısı: 18 adet/cm<sup>2</sup>

Toplam gözenek alanının yüzey alanına oranı (%): 2.67

#### 5.2.5.4. Üçüncü Numune Görüntü Analiz Sonuçları



Şekil 5.17. Üçüncü numune kesiti gözenekleri.  
(Banyo sıcaklığı: 650 °C; Karıştırıcı: 400d/d; Gaz debisi: 5 lt/d )

The screenshot shows the 'Measurements' software interface. The main table lists 19 features with their respective Center X Pos., Center Y Pos., Area, Length, and Radius. A summary table below provides statistical data for the entire set of features.

Features	Center X Pos.	Center Y Pos.	Area	Length	Radius
3 PG3	7,02	5,80	,174	1,57	
4 PG4	6,83	5,09	,416	2,85	
5 PG5	6,14	9,34	,462	3,56	
6 PG6	3,20	9,43	,145	1,72	
7 BC1	3,10	3,74	ovf	,757	,115
8 BC2	2,60	6,22	ovf	,978	,154
9 BC3	6,10	6,80	ovf	,794	,126
10 BC4	7,36	8,17	ovf	,904	,144
11 BC5	5,49	8,62	ovf	,628	,103
12 BC6	8,85	5,92	ovf	,997	,155
13 BC7	1,65	3,20	ovf	,646	,103
14 BC8	7,91	1,60	ovf	,960	,153
15 BC9	7,88	3,16	ovf	,535	,107
16 BC10	4,78	6,82	ovf	,849	,137
17 BC11	2,52	5,67	ovf	,812	,125
18 BC12	2,03	5,88	ovf	,683	,107
19 BC13	1,87	4,76	ovf	,535	,107

Statistic	Center X Pos.	Center Y Pos.	Area	Length	Radius
Min. Val.	1,621620	1,562866	,0228016	,5352886	,0851938
Max. Val.	9,001169	9,430076	4615080	3,564226	,1586368
Range	7,379548	7,867210	,4387063	3,028938	,0734429
Mean	4,942458	5,506094	,1294656	1,308250	,1232712
Std. Dev	2,496063	2,026020	,1357832	,8818133	,0244328
Sum	286,6626	319,3535	2,459847	24,85674	1,602525
No. of Samples	58	58	19	19	13

Şekil 5.18. Üçüncü numune analiz verileri.

İncelenen kesitte, Görüntü Analizleri sonucu Şekil 5.18.'den belirlenen veriler aşağıda verilmiştir.

En büyük gözenek çapı: 1.28 mm

Toplam gözenek alanı: 2.46 mm<sup>2</sup>

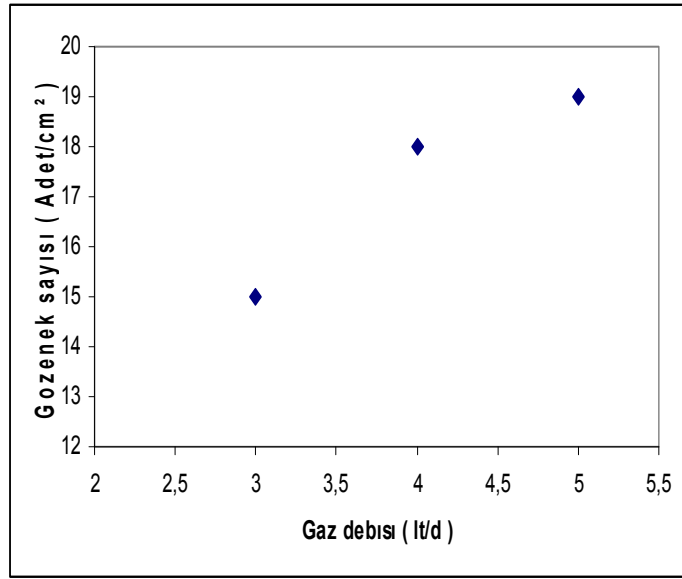
En büyük gözenek alanı: 0.462 mm<sup>2</sup>

Ortalama gözenek alanı: 0.136 mm<sup>2</sup>

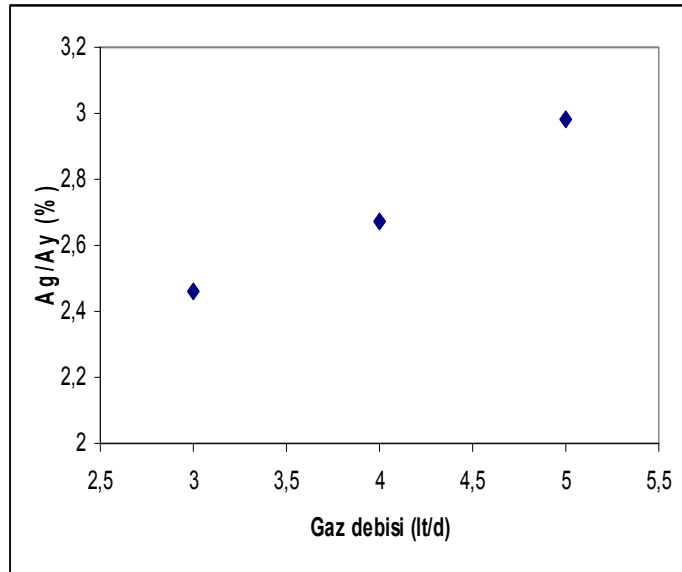
Toplam gözenek sayısı: 19 adet

Toplam gözenek alanının yüzey alanına oranı (%): %2.98

Görüntü analizlerinin değerlendirilmesi sonucu, gaz debisi artışının ergimiş alüminyum ana malzemesinin köpüklenmesini arttırdığı dolayısıyla gözenekliliği arttırdığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.19. Gaz debisine bağlı oluşan gözenek sayısı.



Şekil 5.20. Toplam gözenek alanının yüzey alanına Oranının, gaz debisine bağlı olarak değişimi.

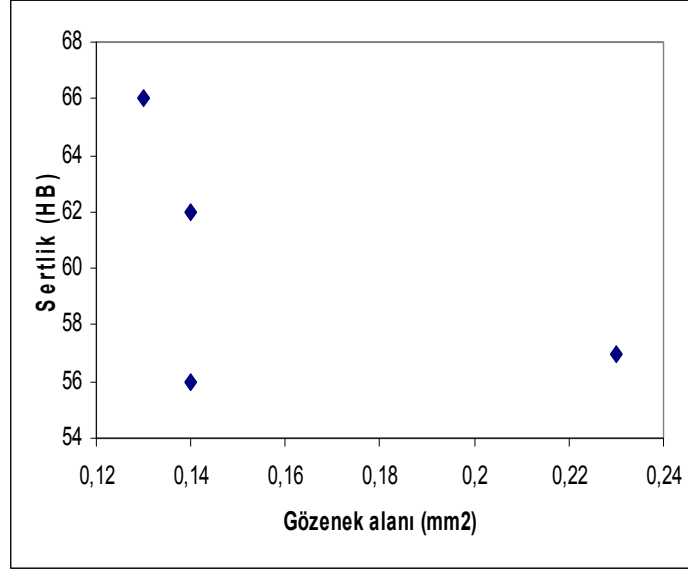
Gaz debisi artışının aynı zamanda gözenek alanını da arttırdığı belirlenmiştir.

#### 5.2.5.5. Sertlik Testi

Sertlik testleri 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı laboratuvarlarında sertlik cihazında 500 Kg yükte yapılmıştır. Sertlik değerleri Brinel sertliği cinsinden aşağıda verilmiştir.

1. Numune = 66 HB
2. Numune = 62 HB
3. Numune = 56 HB
4. Numune = 57 HB

Sertliğin gözenek alanıyla değişimi aşağıdaki grafikte verilmiştir.



Şekil 5.21. Sertliğin gözenek alanıyla değişimi.

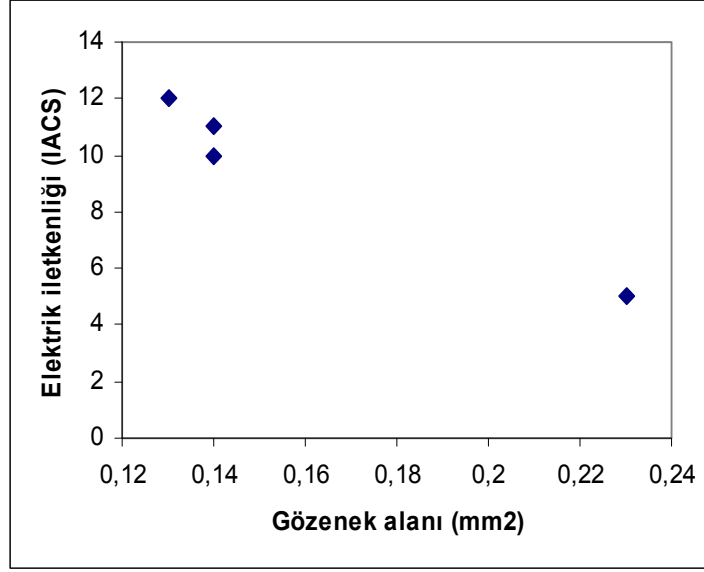
Yukarıdaki şekilden de görüldüğü üzere gözenek alanının artmasıyla sertlik değerinde düşme meydana gelmektedir. Bunun nedeni, oluşan boşlukların sertliği düşürmesinden ileri gelmektedir. Gözenek alanı değerinin 0,15 değerinden sonrasında sertlikte bir artış gözle çarpılmaktadır. Bunun nedeninin ise o numunelerde batıcı ucun, sertliğin alındığı bölgelerde daha az boşluklu bölgelere denk gelmesindedir.

#### 5.2.5.6. Elektrik İletkenliği

Elektrik iletkenlikleri 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı laboratuvarlarında elektrik iletkenlik cihazında yapılmıştır.

1. Numune = 12 IACS
2. Numune = 11 IACS
3. Numune = 10 IACS
4. Numune = 5 IACS

Elektrik iletkenliğinin gözenek alanıyla değişimi aşağıdaki tabloda verilmiştir.



şekil 5.22. Elektrik iletkenliğinin gözenek alanıyla değişimi.

Elektrik iletkenlik deđerleri gözenek alanının artıřı ile dūřmektedir. Bunun nedeni, gaz ile dolu olan gözenekli yapıdan dolayı oluřan süreksizliklerin elektrik iletkenlik deđerini dūřürmesidir.

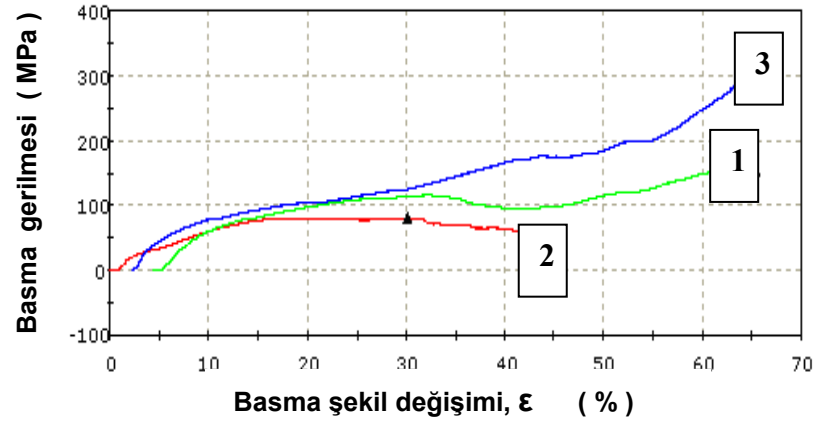
#### 5.2.5.7. Basma Testi

Basma testleri şekil 5.24.'de görülen Instron marka mekanik test ünitesi ile Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında uygun olan (büyük yarık ve çatlakları olmayan) 3 adet numune üzerinde uygulanmış ve ortalama değerleri alınmıştır.



Şekil 5.23. Basma testinde kullanılan instron marka mekanik test cihazı (Anadolu Üniversitesi)

1, 2 ve 3 numaralı numunelerin basma testi sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.24. 1, 2 ve 3 numaralı örneklere ait basma gerilmesi- şekil değiştirme eğrileri.

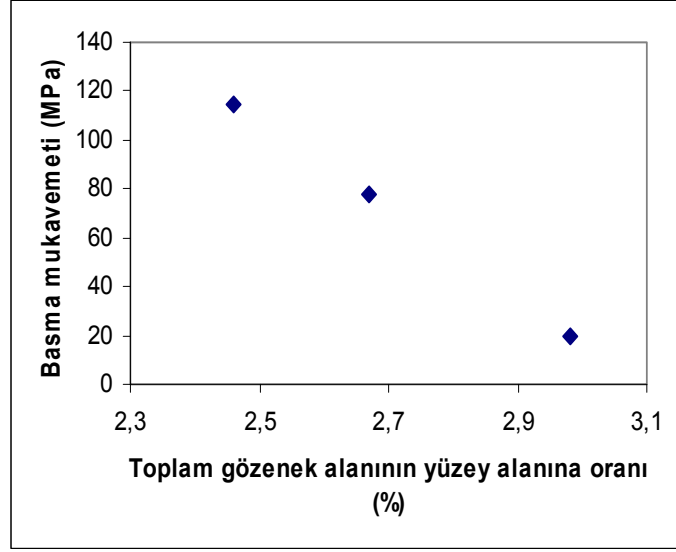
Tablo 5.1. 1, 2 ve 3 numaralı örneklere ait basma testi verileri.

	Çap[mm]	Son Çap[mm]	Çekiç Yükseklik[mm]	Kalınlık[mm]	Genişlik[mm]
1			32,57	13,30	14,92000
2			27,25	11,12	15,10000
3			22,84	11,52	13,50000
Ortalama			27,55	11,98	14,50667
Standard Sapma			4,872	1,161	0,876
Değişim Katsayısı			17,68239	9,68712	6,04158

	Maksimum Basma gerilmesindeki basma yükü (N)	Akmadaki Basma Gerilmesi (MPa)
1	15677,474	78,146
2	51014,197	-----
3	24120,349	114,828
Ortalama	30270,673	96,487
Standard Sapma	18453,749	25,938
Değişim Katsayısı	60,96247	26,88263

	Elastiklik Modülü (MPa)	Akma anındaki basma yükü (N)	Akma anındaki gerçek şekil değiştirme (mm/mm)
1	832,73838	15506,96045	0,19177
2	1044,21358	-----	
3	1293,79815	17858,07014	0,32437
Ortalama	1056,91670	16682,51529	0,25807
Standard Sapma	230,792	1662,486	0,094
Değişim Katsayısı	21,83637	9,96544	36,33252

	Akma anındaki gerçek gerilme (Pa)
1	64509137,98400
2	-----
3	83018488,93061
Ortalama	73763813,45730
Standard Sapma	13088087,570
Değişim Katsayısı	17,74324

**Basma testi sonucu:**

Şekil 5.25. Gözenek alanının basma mukavemetine etkisi.

Basma testi sonuçları, gözenek oranının artması ile basma direncinde azalma olduğunu göstermektedir.

Bunun nedeni gözenekliliğin basma direncini düşürmesinden ileri gelmektedir.



### 5.3. TOZ SIKIŞTIRMALI ERGİTME TEKNİĞİ

Gözenekli metal üretiminde kullanılan diğer bir yöntem olan, toz sıkıştırırmalı ergitme tekniği işlemi, Eskişehir Anadolu Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarındaki imkanlar kullanılarak 3. bölümde açıklanan yönteme göre yapılmıştır.

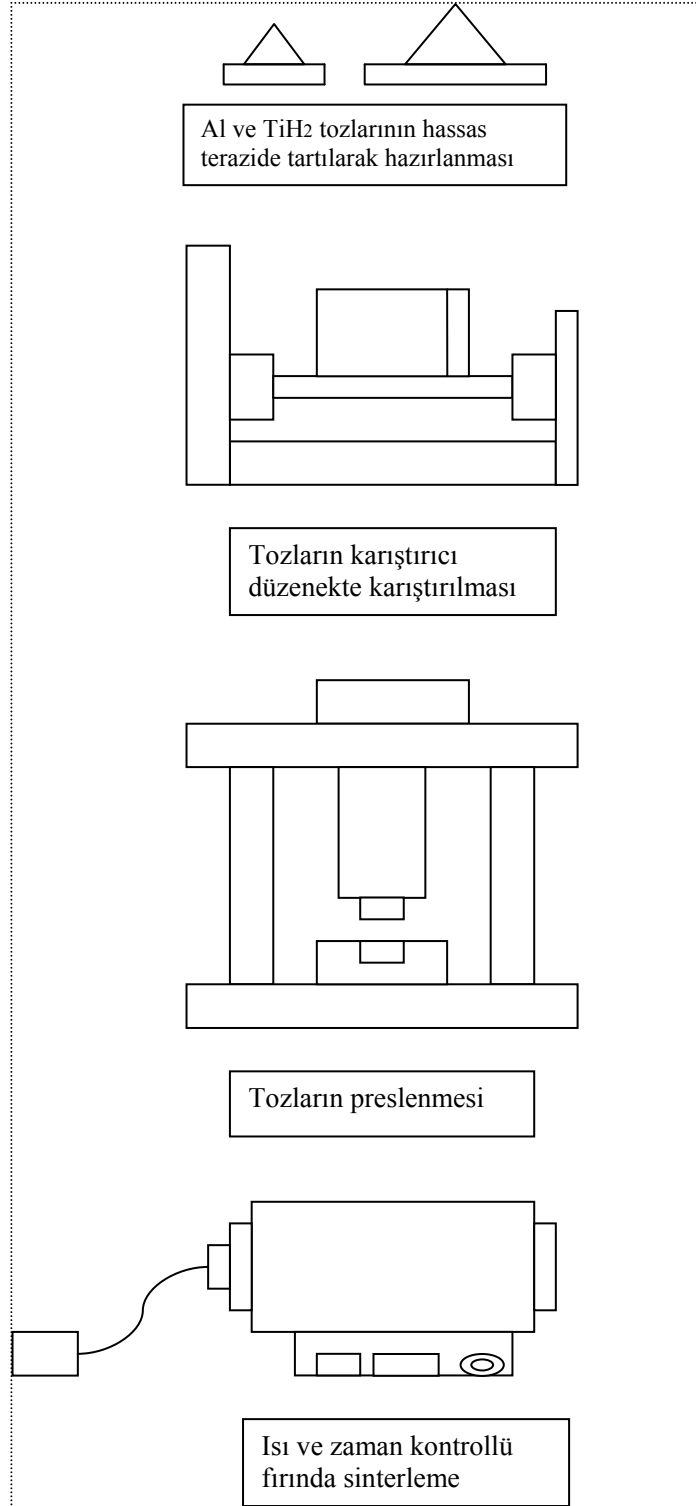
Burada yöntemi kısaca açıklamak gerekirse:

Üretim işlemi, metal tozlarının üfleme ajanları ile karıştırılmasıyla başlar. Prensip, sıkıştırma herhangi bir teknikle yapılabilir (Sıcak aneksenel, izostatik sıkıştırma, çubuk ekstrüzyonu, toz yuvarlama). Seçilen sıkıştırma yöntemi, istenilen başlangıç malzemesinin şekline göre değişir. Bununla beraber ekstrüzyon, en ekonomik ve en çok tercih edilen metottür. Değişik kesitlerdeki dikdörtgensel profiller genellikle ince plakaların yuvarlanmasıyla oluşturulur [31]. Başlangıç malzemesinin kullanımına çok dikkat edilmelidir. Çünkü artık gözeneklilik ve diğer etkiler prosesin kötü sonuçlar doğurmasına neden olurlar.

Matris maddesindeki ergime noktası yakınlardaki ısı değişim hareketleri bir sonraki adımdır. Matriste homojen olarak dağılmış olan üfleme ajanları daha basit parçalara ayrılır. Ortaya çıkan gaz başlangıç maddesini sıkışmaya zorlar ki bu da yüksek gözenekli yapıyı oluşturur. Genleşmenin tamamlanması için gerekli süre ısı ve başlangıç maddesinin etkisiyle birkaç saniyeden birkaç dakikaya kadar değişebilir. Çinko ve alüminyum alaşımları için, titanyum veya zirkonyum hidrit üfleme ajanı olarak kullanılır. Çelikler ise  $\text{SrCO}_3$  gibi karbonatlar ile köpüklenebilir. Eğer üfleme ajanı olarak metal hidritler kullanılırsa, içeriğin %1'inden azı kadarı, çoğu durumda yeterli olur [32].

#### 5.3.1. Deney Seti

Deney seti şeması Şekil 5.27.'de gösterilmiştir. Şekil 5.30. ve 5.31.'de metal tozlarının karıştırıldığı düzenek ve tozların basıldığı kalıp ve pres görülmektedir.



Şekil 5.26. Toz sıkıştırımlı ergitme tekniğine ait deney düzeneği.

### 5.3.2. Kullanılan Malzemeler

Saf Alüminyum Tozu (Al 99):

- Tane büyüklüğü : < 44 $\mu$ m
- Tane şekli : Irregular (Düzensiz)
- Özgül ağırlık : 2,7 g/cm<sup>3</sup>
- Safılığı : % 99,2 Al
- Üretim Metodu : Atomize

Titanyum (II) Hydride ( TiH<sub>2</sub>):

- Tane büyüklüğü : < 44  $\mu$ m
- Özgül ağırlık : 3,9 g/cm<sup>3</sup>
- Safılığı : %99
- Ergime Noktası : 450 °C
- Metal bazlı

Titanyum (II) Hydride ( TiH<sub>2</sub>):

- Tane büyüklüğü : 1-3  $\mu$ m
- Özgül ağırlık : 3,9 g/cm<sup>3</sup>
- Safılığı : %99
- Ergime Noktası : 450 °C
- Metal bazlı

Alüminyum özellikle uzay ve havacılık sektöründe çok sık kullanılması nedeniyle tercih edilmiştir. TH<sub>2</sub> gözenek oluşturu malzeme olarak alüminyumun özgül ağırlığına yakın oluşu ve bu malzemelerin bir arada kullanım uyumluluğu gibi nedenlerden seçilmiştir.

### 5.3.3. Ön Deneme Numune Üretimi

İlk etapta sağlıklı numune üretebilmek ve optimizasyon için ön deneme üretimi yapılmıştır. Malzemeler aşağıda verilen miktarlarda onbinde bir gram hassas terazide, hacim oran hesabına göre oranları belirlenerek tartılmış ve Şekil 5.30.'da gösterilen düzenek yardımıyla karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar, hidrolik preste metal kalıp içerisinde 4 tonda preslenmiştir.



Şekil 5.27. Hassas terazide alüminyum ve  $TiH_2$  tozunun tartılması.

Elde edilmesi düşünülen kompozitin hacim oranlarına göre değişen ağırlıklarda tartılarak bileşenler, aşağıda gösterilen kapların içersinde 5 mm çapındaki zirkonyum bilyalar da kullanılmak suretiyle karıştırma düzeneğinde 1,5 saat karıştırılmıştır.



Şekil 5.28. Saf Alüminyum ve  $TiH_2$  tozları ve 5 mm çapındaki zirkonyum bilyalar.



Şekil 5.29. Alüminyum ve  $TiH_2$  tozlarının karıştırıldığı düzenek.

Hazırlanan karışımlar, hidrolik presle, kalıp içersinde basınç altında basılmak suretiyle ilk etapta 4 adet numune elde edilmiştir.



Şekil 5.30. Numunelerin basıldığı kalıp ve hidrolik pres.



Şekil 5.31. Hidrolik presde basılan numune.

< 44 mikron tane büyüklüğü olan Saf Alüminyum ve  $TiH_2$  kullanılarak elde edilen numuneler ısı ve zaman ayarlı fırında aşağıdaki tabloda verilen süre ve sıcaklıklarda sinterlenmiştir.

Tablo 5.2. Ön deneme numuneleri deney parametreleri.

Numune No	TiH <sub>2</sub> Hacim Oranı (%)	Sinterleme Sıcaklığı ( °C)	Sinterleme Süresi ( dk.)
1A	0,6	625	60
2A	0,6	625	60
3A	0,6	880	60
4A	0,6	880	60

Numunelerin sinterlendiği ısı ve zaman ayarlı fırın aşağıdaki şekilde verilmiştir.

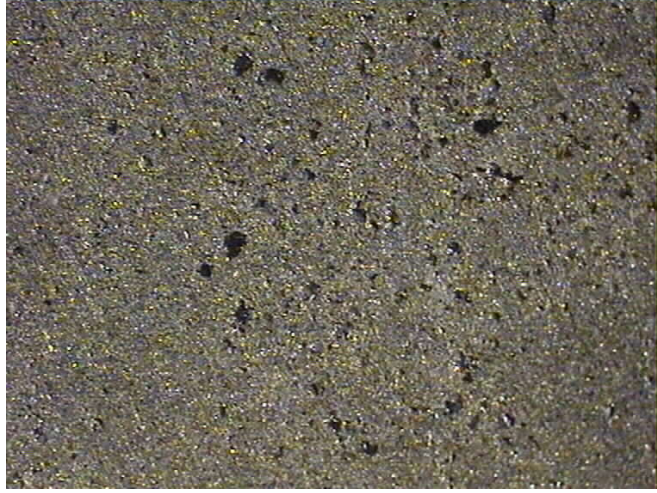


Şekil 5.32. Isı ve zaman kontrollü fırın.

### 5.3.4. Elde Edilen Numunelerin Değerlendirilmesi

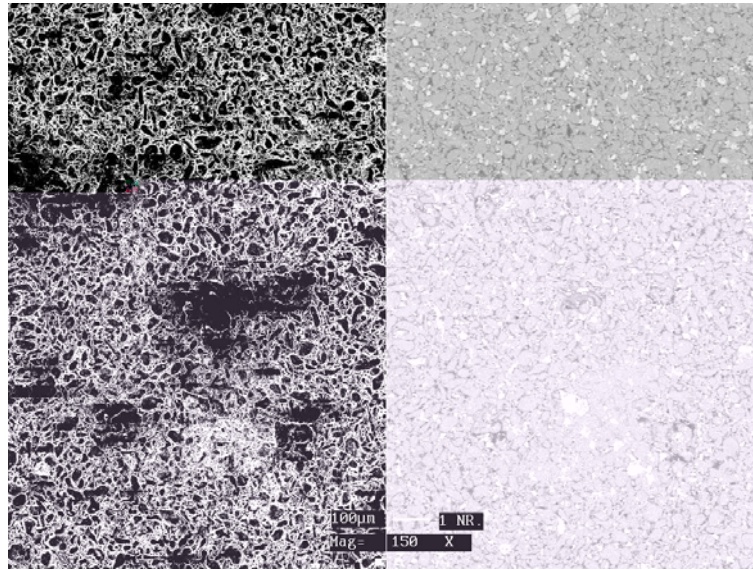
#### 5.3.4.1. 1A Nolu Numune

Sonuç olarak 1A numaralı örneğin yüzeyinden gaz çıkış delikleri ve oluşan gözenekli yapının daha düzgün olduğu gözlemlenmiştir. Buna ait görüntü aşağıda net bir şekilde görülmektedir. Görüldüğü gibi TiH<sub>2</sub>'nin ayrışma sıcaklığı olan 465°C'a ısınan numuneden TiH<sub>2</sub>'nin buharlaşarak bünyeyi terk etmesiyle yüzeyde gözenekler oluşmuştur.



Şekil 5.33. 1A numaralı örneğin makroskopik görüntüsü.

Uygulama sonucu elde edilen 1A numaralı numuneye ait BSD (Back Scattering Dedektör) geri saçılım dedektörü ve SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.34. 1A numaralı örneğe ait SEM görüntüsü.  
(Sol: Secondary image görüntüsü; Sağ:BSD )

SEM görüntüsünde sol tarafta gözüken siyah bölgeler gözenekli yapıyı göstermektedir. Burada oluşan gözenekli yapı aşağıda verilen 2A, 3A ve 4A numunelerinde oluşan yapıya göre daha homojen bir şekilde oluşmuştur.

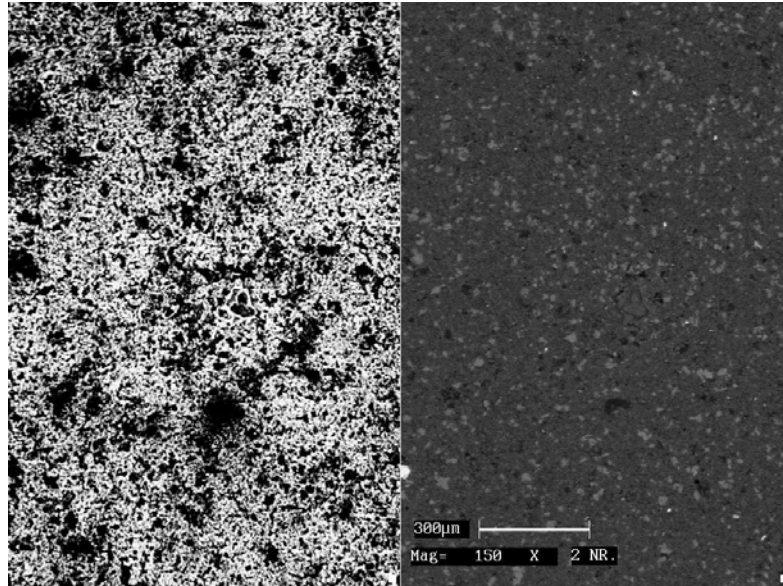
### 5.3.4.2. 2A Nolu Numune

2A nolu numunenin belirli bölgelerinde ergimeye başlayan Alüminyumun Hidrojen gazı çıkışının olduğu yerlerden dışarıya fişkırıldığı gözlemlendi.



Şekil 5.35. 2A nolu numunede oluşan alüminyum fişkırması.

Ergiyen alüminyum bu numunede oluşan gözeneklerden yüzeyde Alüminyum fişkırmasına neden olmuştur.



Şekil 5.36. 2A numaralı örneğe ait SEM görüntüsü (Sol: Secondary image görüntüsü; Sağ:BSD)



Burada 1A numaralı örneğe göre oluşan gözenekli yapının daha az homojen olduğu görülmektedir.

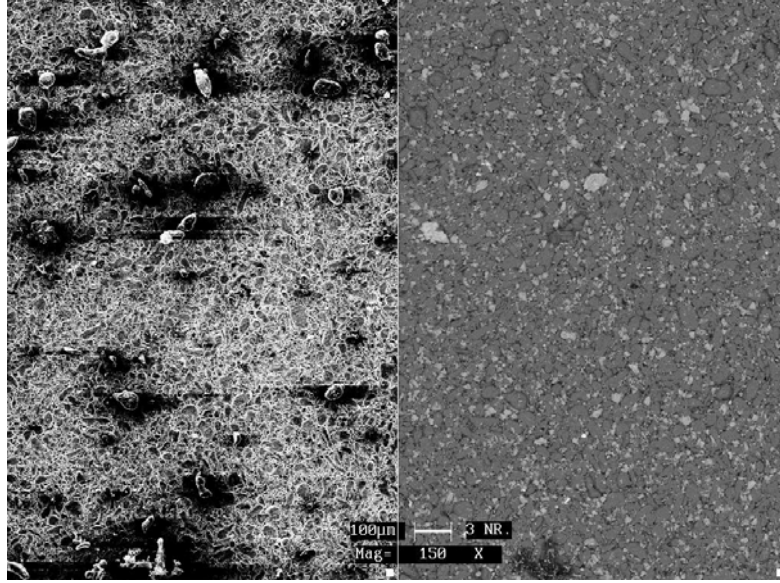
#### 5.3.4.3. 3A Nolu Numune

Bu numunede gaz çıkış deliklerinin 1A nolu numunedeki kadar belirgin oluşmadığı gözlenmiştir.



Şekil 5.37. 3A numaralı örneğin makroskopik görüntüsü.

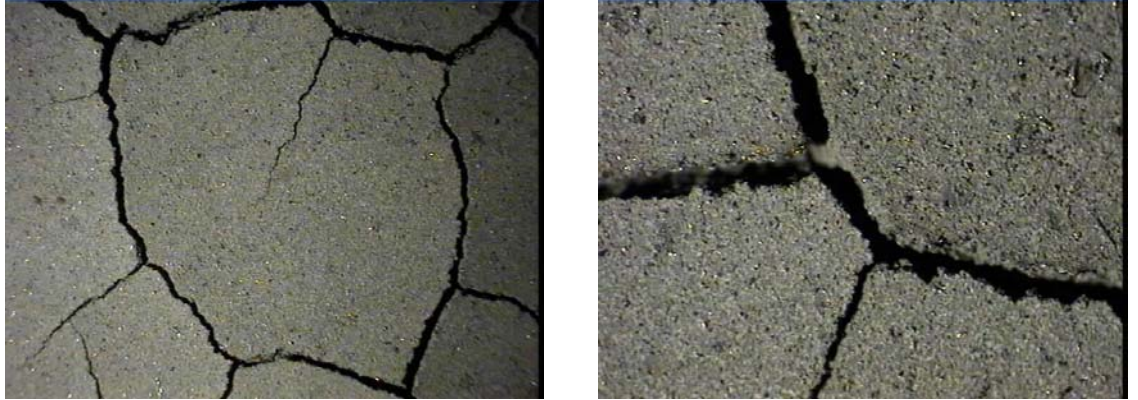
3A numaralı numuneye ait BSD (Back Scattering Dedektör) geri saçılım dedektörü ve SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.38. 3A numaralı örneğe ait SEM görüntüsü  
(Sol: Secondary image görüntüsü; Sağ:BSD)

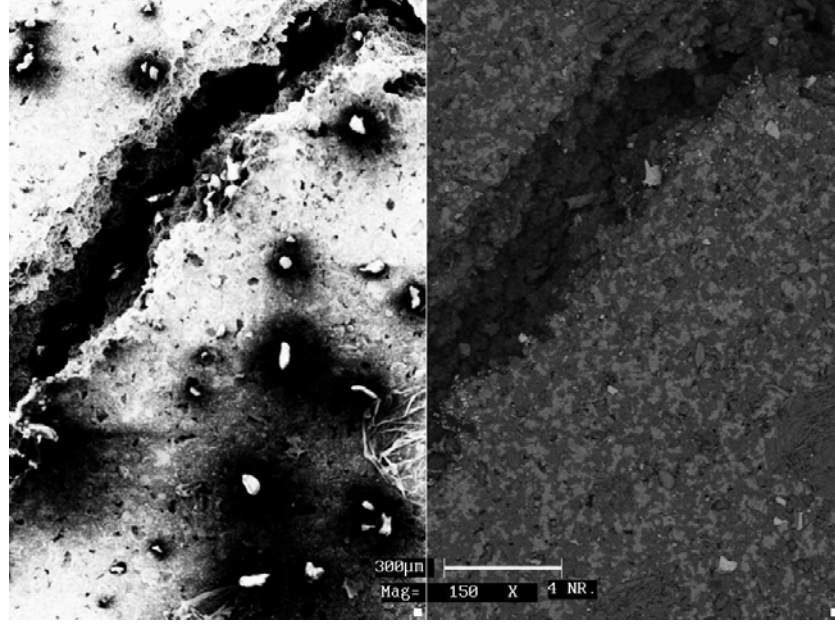
#### 5.3.4.4. 4A Nolu Numune

Sonuç olarak sinterleme sıcaklığının 880°C'a çıkılması ile yüzeyde çatlamlar ve yapıda ayrılmaların başladığı görülmüştür.



Şekil 5.39. Sinterlemenin 880 °C sıcaklıkta yapılması sonucu, 4A nolu numune yüzeyinde meydana gelen çatlamlar.

880 °C sinterleme sıcaklığında yapı tamamen bozulmuştur. Bu numuneye ait BSD (Back Scattering Dedektör) geri saçılım dedektörü ve SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.



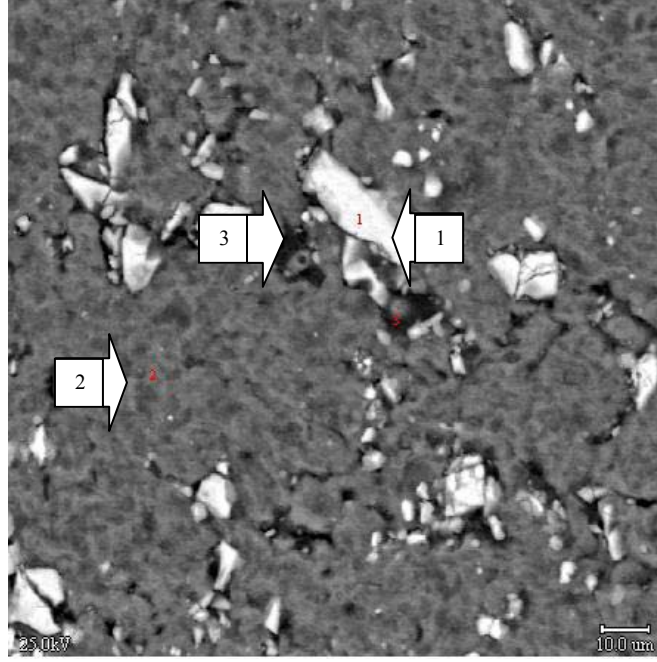
Şekil 5.40. 4A numaralı örneğe ait SEM görüntüsü  
(Sol: Secondary image görüntüsü; Sağ:BSD)

### 5.3.5. Metalografik Analiz

Bu kısımda özellikle diğer numunelere nazaran homojen bir yapıda gözenek yapısı oluşan 1A ile 880 °C sıcakta sinterlenen 2A numaralı numunelere ait mikro yapı(SEM) görüntüleri ve analizleri aşağıda verilmiştir.

#### 5.3.5.1. 1A Nolu Numune Metalografik Analizi

Analizler genel, 1 numarayla gösterilen bölgede beyaz partikül, 2 numarayla gösterilen bölgede gri faz ve 3 numarayla gösterilen koyu gri bölge analizleri olarak aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.41. 1A numaralı örneğin 750 büyütmedeki SEM görüntüsü.

1A numaralı örneğe ait iç yapı analizi aşağıda verilmiştir.

#### GENEL ANALİZ

Element	Yoğunluk (c/s)	Yüzde
O	6.38	9.33 wt.%
Al	1110.72	71.20 wt.%
Ti	206.60	19.45 wt.%
		100.0 wt.% Toplam

#### 23 BEYAZ PARTİKÜL ANALİZİ

Element	Yoğunluk (c/s)	Yüzde
Ti	1295.13	100.0 wt.%
		100.0 wt.% Toplam

### 23 GRİ FAZ NOKTA ANALİZİ

Element	Yoğunluk (c/s)	Yüzde
Al	1042.42	100.0 wt.%
		100.0 wt.% Toplam

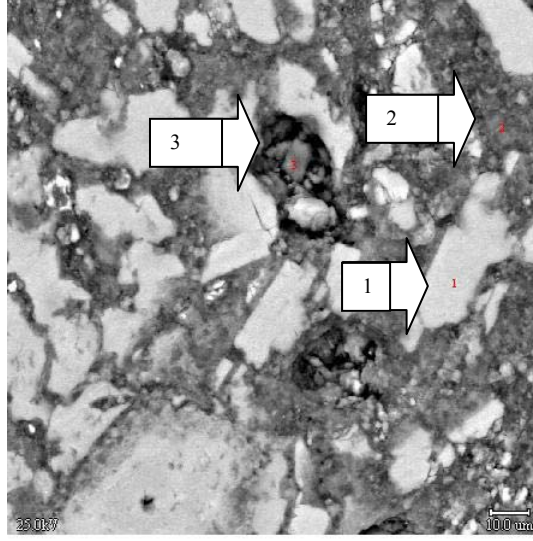
### 3 KOYU GRİ BÖLGE NOKTA ANALİZİ

Element	Yoğunluk (c/s)	Yüzde
O	10.69	19.28 wt.%
Al	676.67	61.15 wt.%
Ti	160.29	19.56 wt.%
		100.0 wt.% Toplam

Analizlerden görüldüğü gibi beyaz partiküllerin titanyum, gri bölgelerin alüminyum, koyu gri bölgelerin alüminyum ağırlıklı olmak üzere Al-Titanyum ve oksijen karışımı olduğu belirlenmiştir. Yapıda oksijenin bulunması belirli oranda oksitlenme olduğunu göstermektedir.

#### 5.3.5.2. 2A Nolu Numune Metalografik Analizi

880 °C sıcaklıkta sinterlenmiş olan 2A numaralı numuneye ait iç yapı görüntü ve analizleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.42. 2A numaralı örneğin 750 büyütmedeki SEM görüntüsü.

#### GENEL ANALİZ

Element	Yoğunluk (c/s)	Yüzde
O	7.08	14.18 wt.%
Al	671.00	53.65 wt.%
Ti	324.69	32.16 wt.%
		100.0 wt.% Toplam

#### 23 BEYAZ PARTİKÜL ANALİZİ

Element	Yoğunluk (c/s)	Yüzde
Ti	1311.54	100.0 wt.%
		100.0 wt.% Toplam

#### 23 GRİ FAZ NOKTA ANALİZİ

Element	Yoğunluk (c/s)	Yüzde
Al	918.52	100.0 wt.%
		100.0 wt.% Toplam

### 23 KOYU GRİ BÖLGE NOKTA ANALİZİ

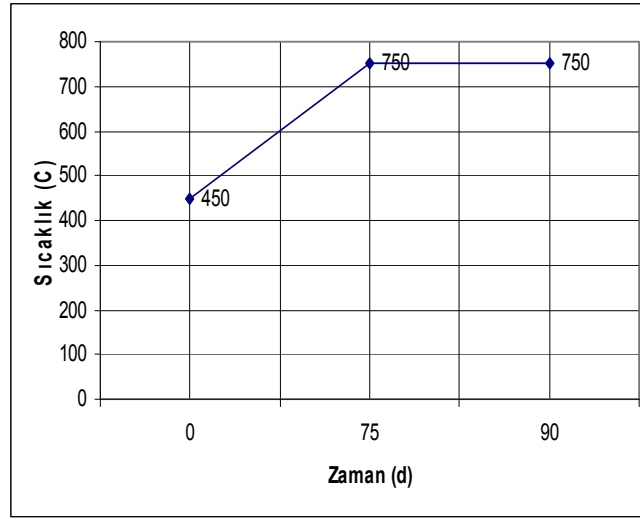
Element	Yoğunluk (c/s)	Yüzde
O	6.71	22.32 wt.%
Al	299.89	77.67 wt.%
		100.0 wt.% Toplam

1A nolu numunede titanyum oranı % 19,456 olarak analiz edilirken 2A nolu numunede % 32,163 olduğu görülmüştür. Beyaz ve gri nokta analizlerinde, 1A'da titanyum yoğunluğu 1295,13 (c/s) iken 2A nolu numunede 1311,54 (c/s) olduğu, alüminyum yoğunluğu ise 1A'da 1042,42 (c/s) iken 2A'da 918,52 (c/s) olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeninin ise 2A nolu numunenin sinterleme işleminde 880 °C'ta çıkılması ile titanyumun rekristalize olması ve yapıya daha fazla nüfus etmesi olarak söyleyebiliriz. Bu durum malzemenin sertliğini de arttırarak, aynı zamanda yapıyı kırılğanlaştırmaktadır.

#### 5.3.6. Numune Üretimi

Toz Sıkıştırılmalı Ergitme Tekniği ile gaz enjeksiyonu ile, gözeneklendirme yöntemine göre, daha homojen yapıda gözenekli malzemeler elde edilmiştir. Gene aynı yöntemle, yukarıda verilen malzemelerle, farklı hacim oranlarında ve tane büyüklüklerinde TiH<sub>2</sub> tozu kullanılarak 39 adet numune daha üretilmiştir.

Numuneler aşağıdaki grafikte verilen süre ve sıcaklıkta sinterlenmiştir.



Şekil 5.43. Sinterleme sıcaklık-zaman grafiği.

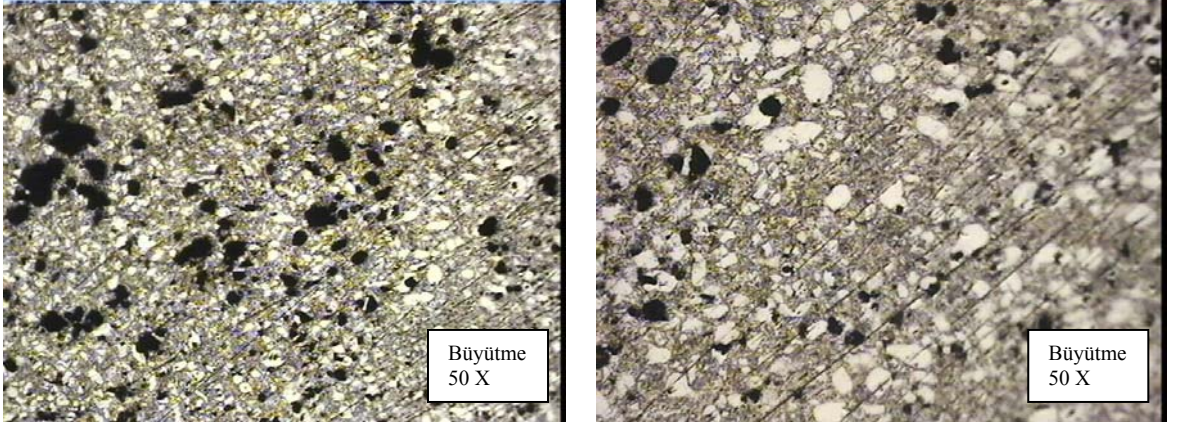
Numunelerin hazırlanış kompozisyonu yukarıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.3. Farklı hacim oranlarında ve tane büyüklüklerinde TiH<sub>2</sub> tozu kullanılarak hazırlanan numuneler.

Hacim oranı	Kullanılan Malzemeler	
	Al ( < 44 µm )	
	TiH <sub>2</sub> ( < 44 µm )	TiH <sub>2</sub> (1-3 µm )
	Numune No	
% 0,6	34, 36*, 40	19, 20, 22, 24, 25, 27,28*,29
% 1	23, 26, 35, 37, 41*	33, 38*, 39
% 10	1	
% 15	11, 18, 31	
% 20	2, 13, 15, 16, 17	
% 25	12, 30	
% 30	3, 6, 7, 8, 32	
% 40	4, 14	
% 50	5	
* İşaretli numuneler sinterlenmemiştir.		

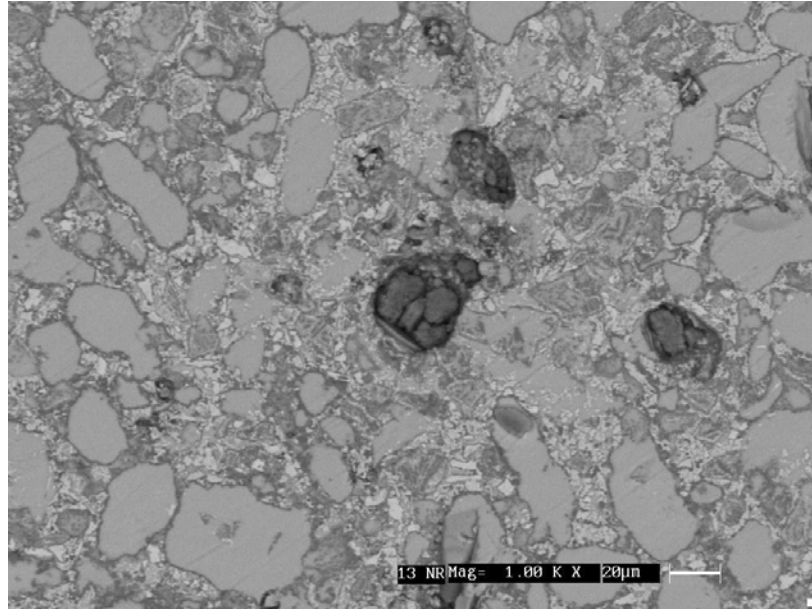


Sinterleme sonrası numunelerde gaz çıkışı ile oluşan gözenek oluşumu Şekil 5.45.'de görülmektedir.



Şekil 5.44. 13 numaralı numuneye ait makroskobik görüntü.

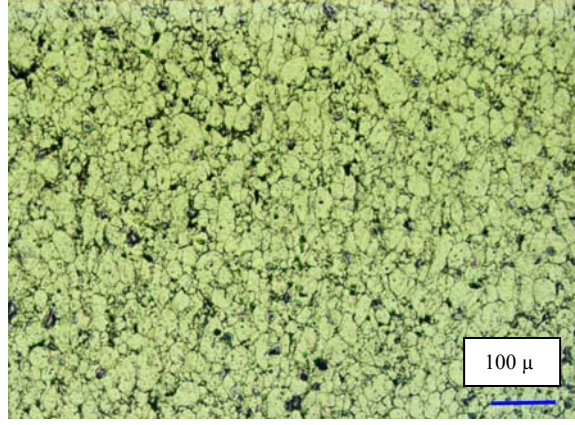
Oluşan gözenekli yapının homojen bir yapıda olmadığı ancak yeterli seviyede olduğu görülmüştür.



Şekil 5.45. 13 numaralı numuneye ait SEM görüntüleri.

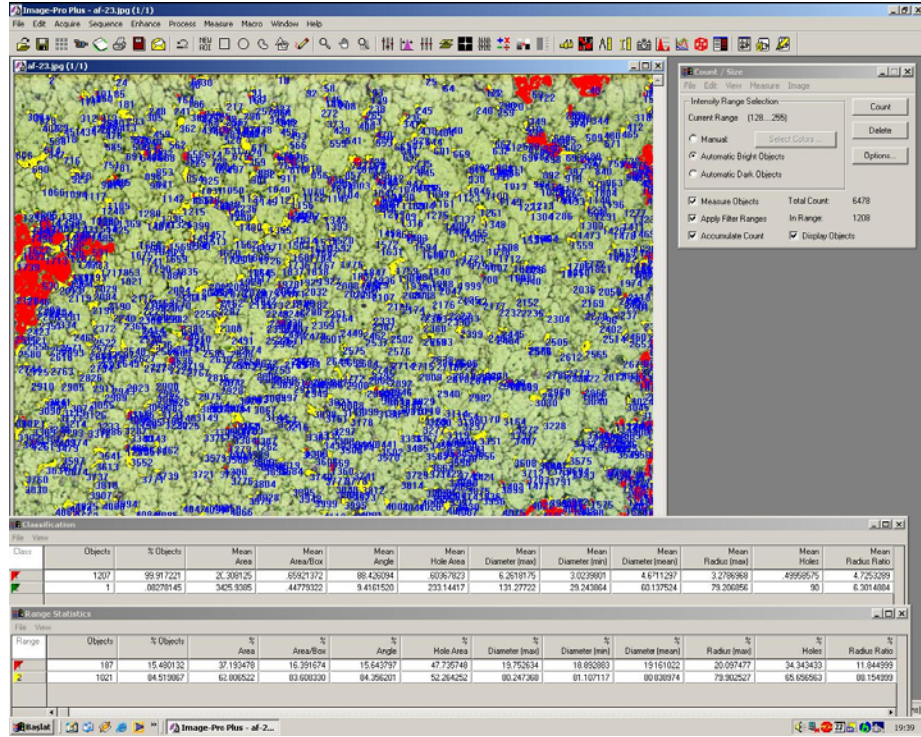
### 5.3.7. Görüntü Analizleri

Numunelerde oluşan gözenekli yapının durumunu belirlemek için görüntü analizleri yapılmıştır. Örnek olarak 23 nolu numuneye ait görüntü analizleri aşağıda verilmiştir.



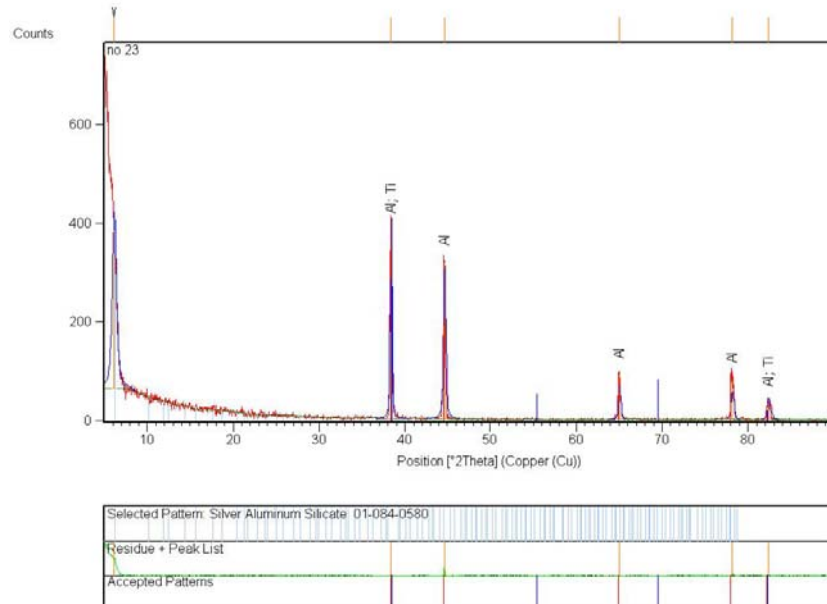
Şekil 5.46. 23 nolu numune görüntü analizi.

Yukarda verilen şekilde siyah bölgeler oluşan gözenekleri göstermektedir. Bu gözeneklerin ortalama çapları ve alanları gibi bilgiler örnek olarak Şekil 5.47.'de 23 nolu numune için verilen görüntü analiz verilerinden elde edilmiştir.



Şekil 5.47. 23 nolu numune görüntü analizi.

23 nolu numuneye ait XR-D sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.48. 23 nolu numuneye ait XR-D grafiği.

Tablo 5.4. 23 nolu numuneye ait XR-D sonuçları.

No.	Bileşen Adı	Kimyasal Formülü	Sayı	Yüzde [%]
1	Alüminyum	Al	83	70
2	Titanyum	Ti	33	30

Tablo 5.4. den de görüldüğü gibi numunede ağırlıklı olarak Alüminyum ve üçte bir oranda da Titanyum görülmüştür. Diğer numunelere ait görüntü analiz sonuçları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.5. Görüntü analiz sonuçları.

	Numune No										
	19	22	23	24	25	27	28	33	34	35	36
<b>Gözenek alanı (%)</b>	0,51	1,63	47,73	8,15	0,5	0,25	16,66	0,66	30,14	2,11	20,36
<b>Ortalama gözenek çapı (µm)</b>	5,22	5	4,67	8,25	6,18	5,2	5,58	5,33	5,59	5,86	5,75
<b>Maksimum gözenek çapı (µm)</b>	6,83	6,64	6,26	12	7,83	6,76	7,19	7,11	7,57	5,89	7,42

### 5.3.8. Basma Testleri

Toz sıkıştırılmalı eritme tekniği ile elde edilen numuneler basma testine tabi tutulmuştur. Örnek olarak 1 nolu numuneye ait basma test sonuçları aşağıda ki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.6. 1 nolu numuneye ait basma testi sonuçları.

	ÇEKİÇ YÜKSEKLİĞİ (mm)	KALINLIK (mm)	GENİŞLİK (mm)	BAŞLANGIÇ TARİHİ	BİTİŞ TARİHİ	AKMADAKİ BASMA GERİLMESİ (DENK. 0,2 %) (MPa)
1	14,17	11,32	9,75	29.11.2007 11:05:13	29.11.2007 11:16:24	88,97815
Mean	14,17	11,32	9,75			88,97815
Coefficient of Variation	-----	-----	-----			-----
Standard Deviation	-----	-----	-----			-----

	Modulus (E-modulus) (GPa)	BAŞLANGIÇ NOKTASINDA ENERJİ (BASMA GERİLMESİ 25 %) (J)	BAŞLANGIÇ NOKTASINDA ENERJİ (BASMA GERİLMESİ 40 %) (J)	BAŞLANGIÇ NOKTASINDA ENERJİ (BASMA GERİLMESİ 60 %) (J)
1	2,16	38,45672	65,08880	93,95075
Mean	2,16	38,45672	65,08880	93,95075
Coefficient of Variation	-----	-----	-----	-----
Standard Deviation	-----	-----	-----	-----

	MAKSİMUM BASMA YÜKÜNDE ENERJİ (J)	Modulus (Automatic) (GPa)	AKMADAKİ BASMA GERİLMESİ (EĞİM BAŞLANGICI 0.2 %) (MPa)
1	16,70	2,24	120,48039
Mean	16,70	2,24	120,48039
Coefficient of Variation	-----	-----	-----
Standard Deviation	-----	-----	-----

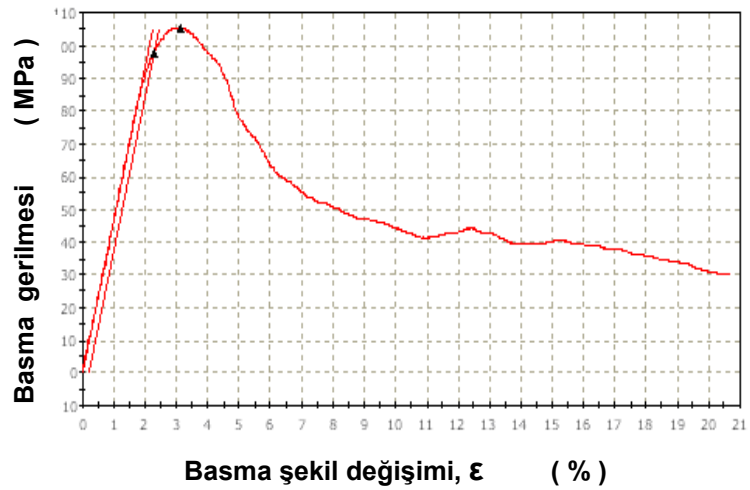
	AKMADAKİ BASMA GERİLMESİ (SIFIR EĞİM) (MPa)
1	120,77924
Mean	120,77924
Coefficient of Variation	-----
Standard Deviation	-----

Uygulanan basma testi sonuçlarının birbirine yakın değerlerde olduğu, malzemelerin 80-100 MPa değerlerinde aktığı 3,6 ve 7 nolu numunelerde akmadan sonrada kırılmalar olduğu 1 nolu numunede yapının daha rijit 3,4 ve 7 nolu numunelerde dağılma meydana geldiği tespit edilmiştir. Dağılma nedenlerinin malzemede oluşan gözeneklerin bu numunelerde kırılma ve dağılmanın olduğu bölgelerde yoğunlaşmasından ileri geldiği düşünülmektedir.

Basma testi gerilme-şekil değişimi eğrilerinden sinterlenmiş numunelerden 37 ve sinterlenmemiş numunelerden 38 nolu numuneye ait olan iki adet örnek aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



şekil 5.49. 37 nolu numuneye ait basma gerilmesi-şekil değişirme eğrisi.

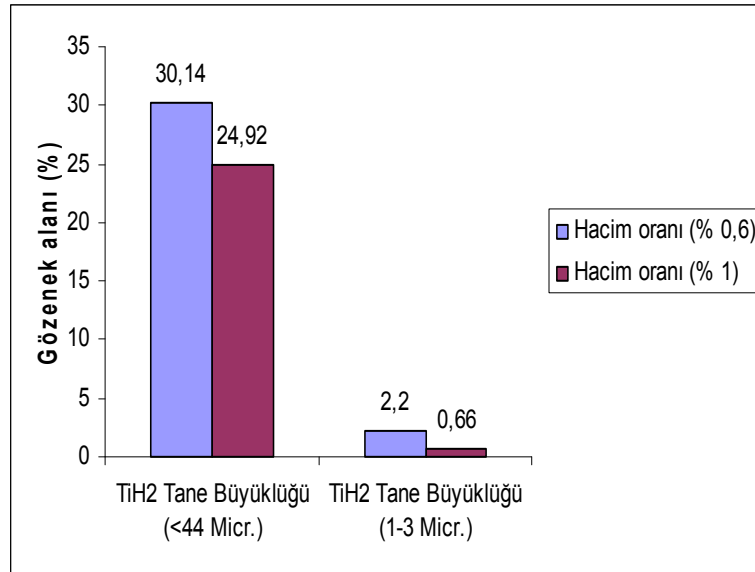


şekil 5.50. 38 nolu numuneye ait basma gerilmesi-şekil değişirme eğrisi.

Tablo 5.7. Numunelerin basma test sonuçları.

Numune No	Basmadaki Akma Gerilmesi [MPa]	Elastisite Modülü [GPa]	Maksimum Basma Yükünde Enerji [J]
1	88,97	2,16	16,70
3	83,08	3,87	1,47
4	148,84	6,54	1,94
6	104,23	6,83	2,64
7	60,76	19,24	6,34
19	51,47	2,26	52,43
20	72,70	3	131,52
22	42,99	2,27	126,63
23	58,73	1,49	111,73
24	59,47	2,94	236,40
25	59,49	2,16	100,66
26	42,18	2,51	52,94
27	45,57	3,15	149,95
28*	86,35	4,69	1,53
33	60,37	3,36	148,21
34	47,94	2,50	134,74
35	51,62	2,53	22,67
36*	80,77	4,09	2,03
37	68,44	3,31	124,04
38*	97,92	4,74	3,20
40	43,56	1,98	66,50
41*	51,77	2,63	0,75

\* İşaretli numuneler sinterlenmemiştir.



Şekil 5.51. Tane büyüklüğünün gözenek oluşumuna etkisi.

Gözenek yapıcı malzeme olarak kullanılan TiH<sub>2</sub>'nin hacim oranı arttığında gözenek alanı yüzdesi düşmektedir. Benzer şekilde TiH<sub>2</sub>'nin tane büyüklüğü arttığında da gözenek alanı yüzdesinin düştüğü tespit edilmiştir.

### 5.3.9. Elektrik İletkenlik Değerleri

Numunelere ait elektrik iletkenlik değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. İletkenlik ölçümleri 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı laboratuvarlarında elektrik iletkenlik ölçüm cihazında yapılmıştır.

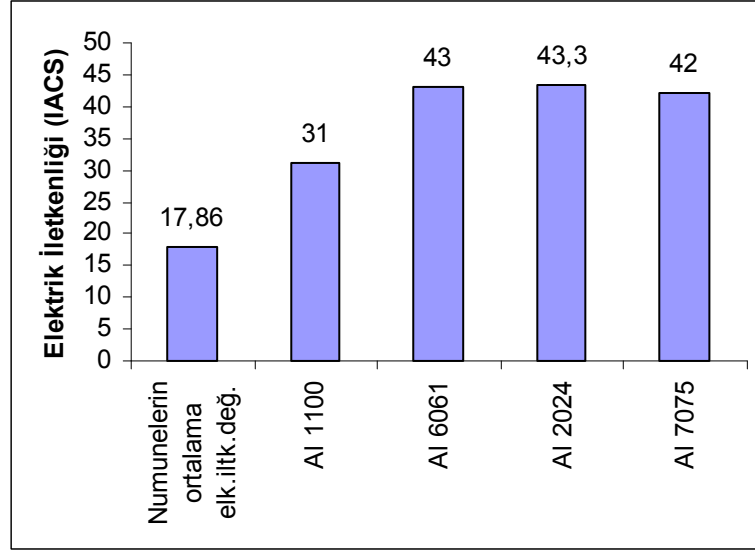
Tablo 5.8. Elektrik iletkenlik değerleri.

	Numune No														
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	33	34	35	37	39	40
<b>Elekt. İletk. (IACS)</b>	18	25	16	22	12	18	11	6	17	14	27	19	18	19	26

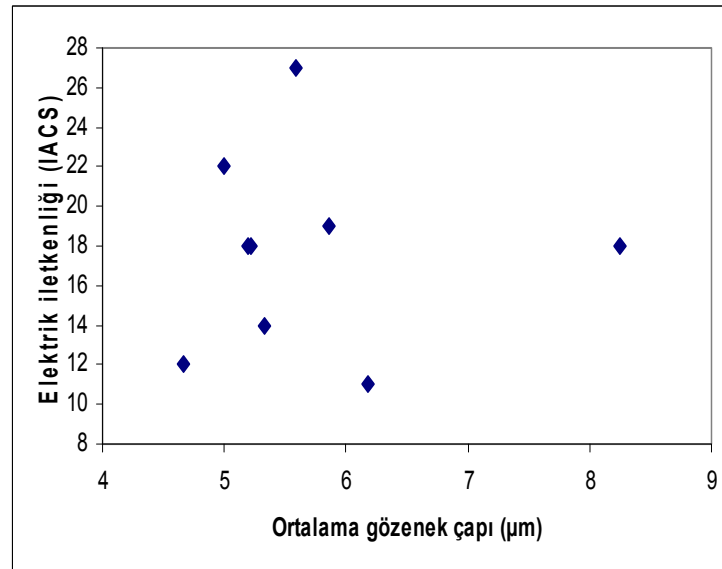
Tablodan ortalama bir elektrik iletkenlik değeri hesapladığımızda, 17,86 IACS cinsinden bir değere ulaşırız. Bu değeri çeşitli alüminyum alaşımı malzemeleri ile karşılaştırdığımızda, ki aşağıdaki şekilde verilmiştir, bir hayli düşük seviyede kaldığını görürüz. Dolayısıyla gözenekli



yapıların elektriksel iletkenlik değeri düşük çıkmaktadır. Bunun nedeni malzemede oluşan gözenekli yapının süreksizliğe neden olmasıdır. Ayrıca metalografik analizde tespit edildiği gibi yapıdaki oksit oluşumu elektrik iletkenlik değerlerindeki düşmenin nedenlerinden biridir.

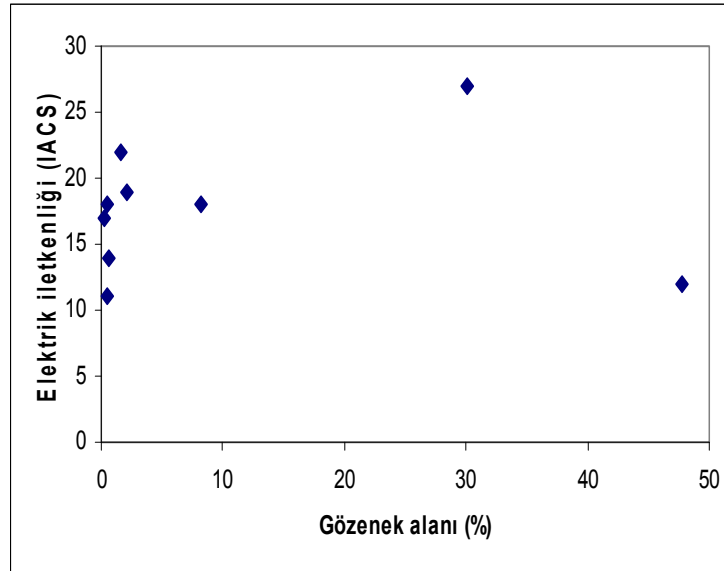


Şekil 5.52. Toz sıkıştırılmalı ergitme tekniği ile üretilen numunelerin (ortalama) ve farklı alüminyum alaşımlarının elektriksel iletkenlik değerleri.



Şekil 5.53. Elektrik iletkenliğinin gözenek çapına bağlı değişimi.

Yukarıdaki şekilden de görüldüğü gibi gözenek çapının artışına bağlı olarak elektrik iletkenlik değerleri farklılık göstermektedir. Bunun sebebinin numunelerde ölçülen elektrik iletkenlik değerlerinin alındığı bölgelerde gözenek çaplarının değişkenlik göstermesinden ileri gelmektedir.



Şekil 5.54. Elektrik iletkenliğinin gözenek alanına bağlı değişimi.

Burada da yukarıda belirtildiği gibi elektrik iletkenlik ölçümünün yapıldığı bölgedeki gözenek alanının farklılık göstermesinden ileri gelen bir kararsızlık olduğu görülmektedir. Ancak genel bir değerlendirme yapılacak olursa gözenek alanı ve çapının artışına bağlı olarak elektrik iletkenlik değerleri düşmektedir. Bunun nedeni de hava ile dolu olan gözenekli yapının süreksizliğe neden olarak elektrik iletkenliğini zayıflatmasıdır.

### 5.3.10. Sertlik Değerleri

1. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı laboratuvarlarında sertlik ölçüm cihazı ile yapılan Brinel cinsinden ölçümlerde numunelerin ölçülemeyecek kadar yumuşak olduğu tespit edildi. Bundan dolayı toz sıkıştırırmalı ergitme tekniği ile üretilen numunelerin sertlik değerleri sıfır olarak değerlendirilmiştir.

### 5.3.11. Özgül Isı Değerleri

Elde edilen numunelere ait özgül ısı değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Bu ölçümler Erciyes Üniversitesi Kimya Bölümü laboratuvarında yapılmıştır.

Özgül ısı; bir maddenin birim kütlesinin sıcaklığını birim derece arttırmak için gerekli olan ısı enerjisi miktarıdır. Birimi “J/gr.°C” dir. Cp olarak ifade edilen özgül ısı için, aynı zamanda bir maddenin ısıyı soğurma (yutma) yeteneğidir de diyebiliriz.

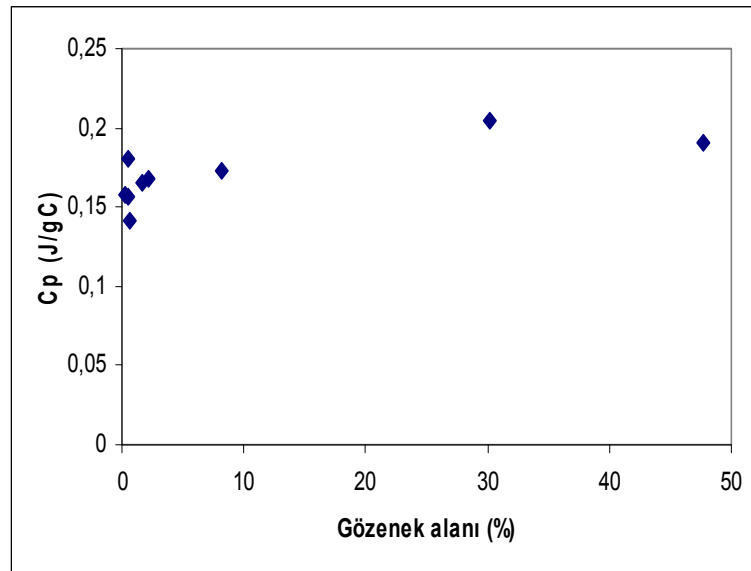
Tablo 5.9. Numunelerin özgül ısı değerleri.

	Numune No								
	19	22	23	24	25	27	33	34	35
Özgül ısı (J/g°C)	0,180	0,165	0,191	0,173	0,156	0,158	0,141	0,204	0,168

Tabloda verilen numunelerin özgül ısılarının ortama değeri;

$C_{p\text{ortalama}} = 0,169 \text{ J/gr.}^\circ\text{C}$  dir.

Özgül ısının gözenek alanına bağlı değişimi aşağıdaki grafikte vermiştir.



Şekil 5.55. Özgül ısının gözenek alanıyla değişimi.

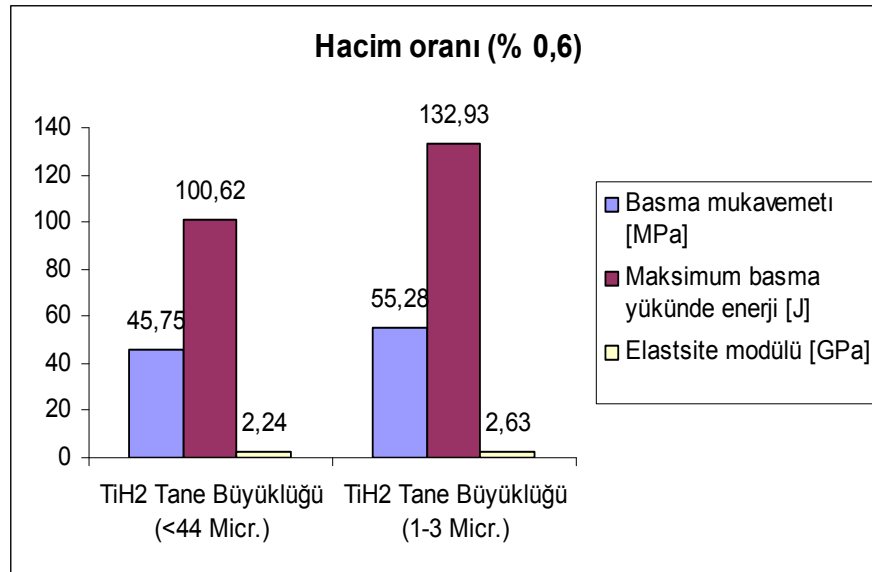
Özgül ısının gözenek alanının artmasıyla yükseldiği görülmektedir. Bunun nedeninin % 99 saf Alüminyumun özgül ısısının 0,92 J/gr.°C, sabit basınçta havanın özgül ısısının 1 J/gr.°C olması dolayısıyla gözenek alanı artan numunelerde özgül ısı değerinin yükseldiği görülmektedir. Ancak yinede burada elde edilen numunelerin ortalama 0,169 J/gr.°C lik özgül ısı değeri aşağıda bazı malzemeler için verilen özgül ısı değerlerinden daha küçüktür.

$C_{psu} = 4,18 \text{ J/gr.}^\circ\text{C}$ ,  $C_{pdemir} = 0,45 \text{ J/gr.}^\circ\text{C}$ ,  $C_{palüminyum} = 0,92 \text{ J/gr.}^\circ\text{C}$

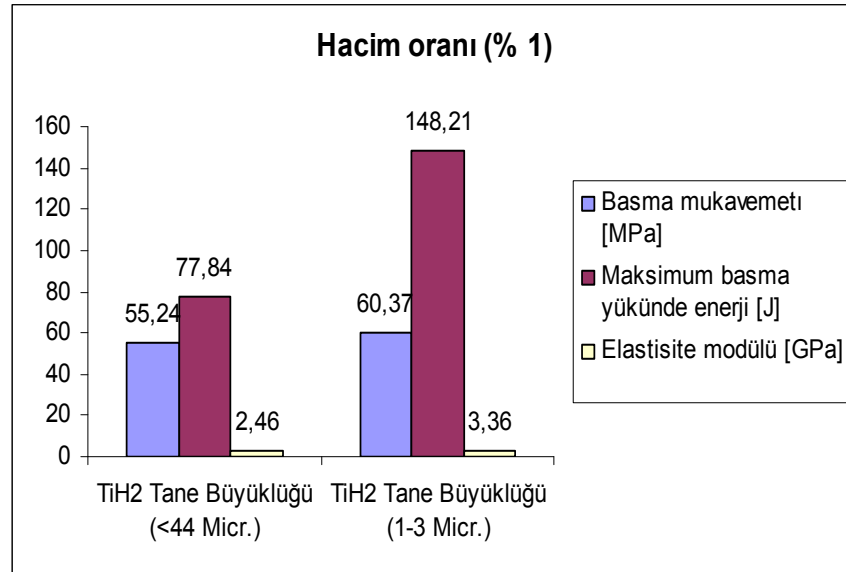
$C_{pbakır} = 0,38 \text{ J/gr.}^\circ\text{C}$ ,  $C_{pkarbon} = 0,71 \text{ J/gr.}^\circ\text{C}$ ,  $C_{pciva} = 0,14 \text{ J/gr.}^\circ\text{C}$

### 5.3.12. Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi

Toz sıkıştırılmalı ergitme tekniğiyle, gözenekli malzeme üretiminin denendiği bu bölümde üretilen numunelerle yapılan testlerden aşağıdaki verilere ulaşılmıştır.



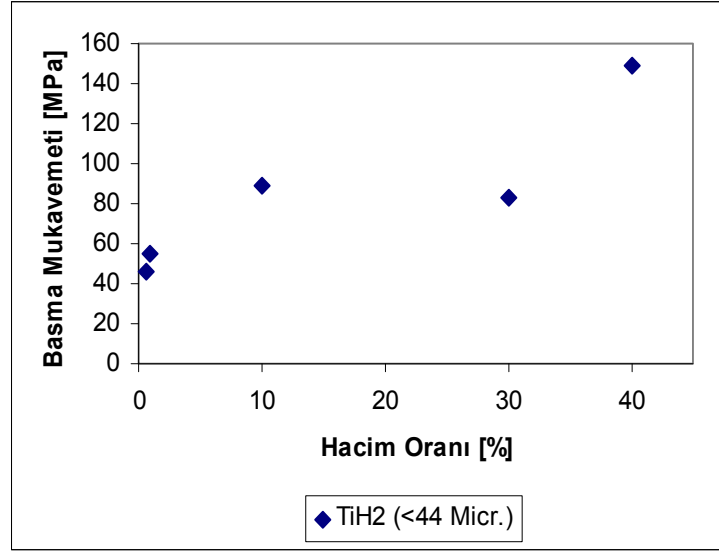
Şekil 5.56. Hacim oranı % 0,6 olan numunelerin basma mukavemeti, maksimum basma yükünde enerji ve elastisite modülü değerleri.



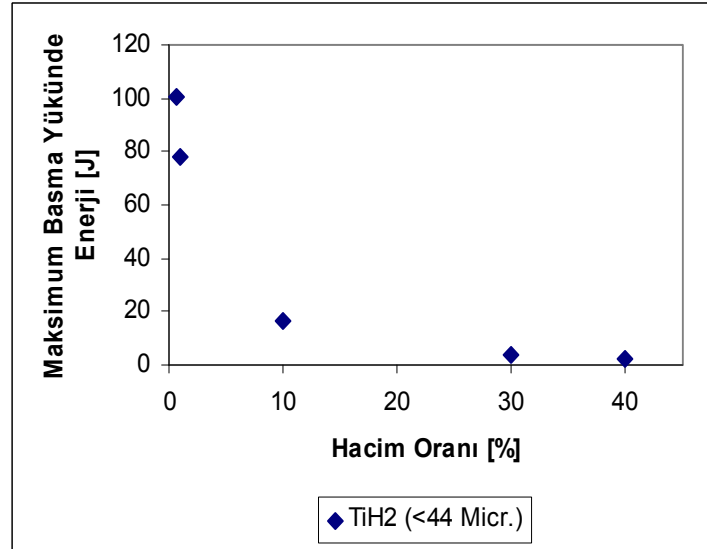
Şekil 5.57. Hacim oranı % 1 olan numunelerin basma mukavemeti, maksimum basma yükünde enerji ve elastisite modülü değerleri.

TiH<sub>2</sub> nin tane büyüklüğünün 1-3  $\mu\text{m}$  olduğu durumda basma mukavemeti ortalama değerlerinin, < 44  $\mu\text{m}$  olması durumuna göre daha yüksek olduğu görüldü. Aynı şekilde Hacim Oranının % 1 olduğu durumda % 0,6'ya kıyasla basma mukavemeti ortalama değerlerinin yüksek olduğu görüldü. Bu durumun yani gözenek yapıcı malzeme olarak kullanılan TiH<sub>2</sub>'nin tane büyüklüğünün artmasıyla birlikte basma mukavemeti değerlerinin artmasının nedeni imaj analiz neticelerinden Şekil 5.53.'de belirtildiği gibi gözenek miktarının azalmasından ileri gelmektedir. Benzer şekilde gözenek yapıcı madde olarak kullanılan TiH<sub>2</sub>'nin eriyiğe karıştırma hacim oranının artmasıyla basma mukavemetinin artmasının nedeni oluşan gözenek miktarının azalmasından ileri gelmektedir.

Ayrıca TiH<sub>2</sub>'nin tane büyüklüğü arttırıldığında, maksimum basma yükünde enerji ve elastisite modülü değerleri de artmaktadır. Hacim oranının artması ile elastisite modülünde de artış meydana gelmektedir.



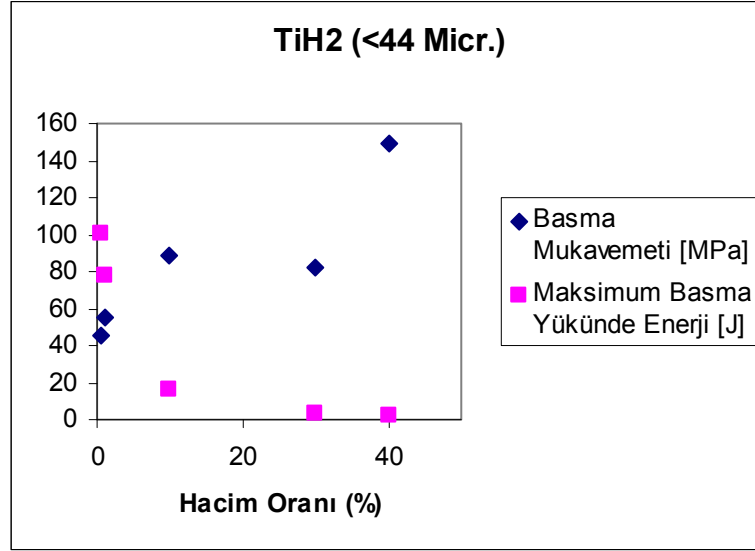
Şekil 5.58. Farklı hacim oranlarındaki numunelerin ortalama basma mukavemeti değerleri.



Şekil 5.59. Farklı hacim oranlarındaki numunelerin maksimum basma yükünde enerji değerleri.

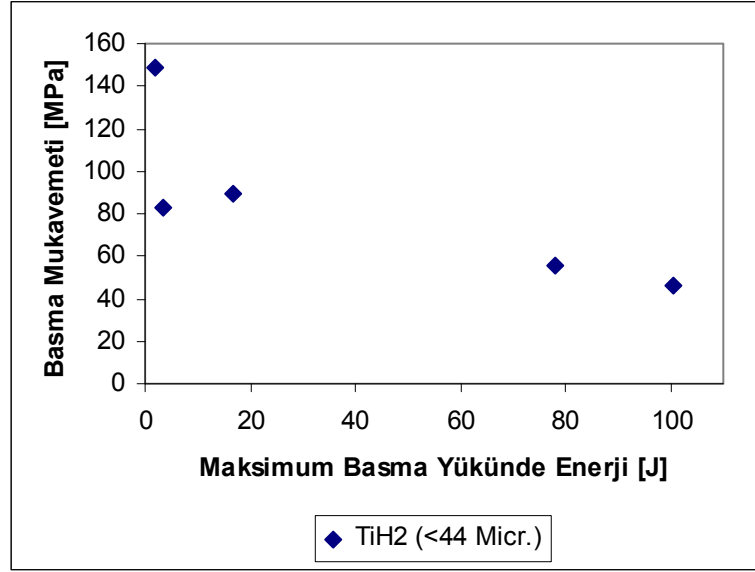
TiH<sub>2</sub> nin hacim oranı yükseldikçe, basma mukavemeti değerlerinin yükseldiği buna mukabil maksimum basmadaki enerji değerlerinin düştüğü görülmüştür. Buna neden olarak hacim oran katsayısının artırılması ile gözenekli yapının azaldığı sonucunu çıkarabiliriz. Yapılan imaj

analizleri neticesinde oluşturulan, TiH<sub>2</sub>'nin farklı hacim oranlarında oluşan gözenek durumunu gösteren Şekil 5.52.'de bu sonucu doğrulamaktadır.



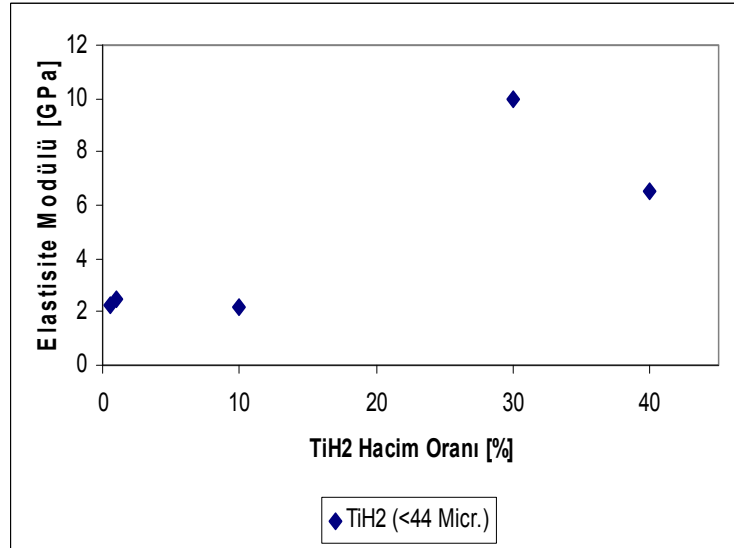
Şekil 5.60. Farklı hacim oranlarında hazırlanan numunelerin ortalama basma mukavemeti ve maksimum basma yükünde enerji değerleri.

Hacim oranı artışı ile maksimum basma yükünde enerji değerleri azalırken ortalama basma mukavemeti değerleri artmaktadır. Çünkü oluşan gözenek miktarı ve boyutu azalmaktadır.



Şekil 5.61. Ortalama basma mukavemeti değerlerinin, maksimum basma yükündeki enerji değerleri ile değişimi.

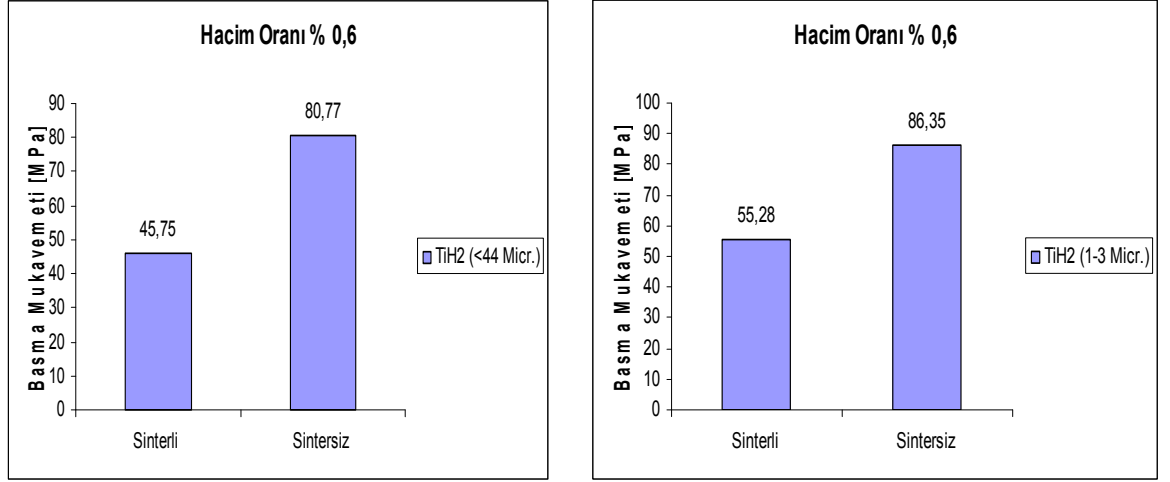
Malzemenin ortalama basma mukavemeti değerleri ile maksimum basma yükündeki enerji değerlerinin ters orantılı olduğu tespit edilmiştir.



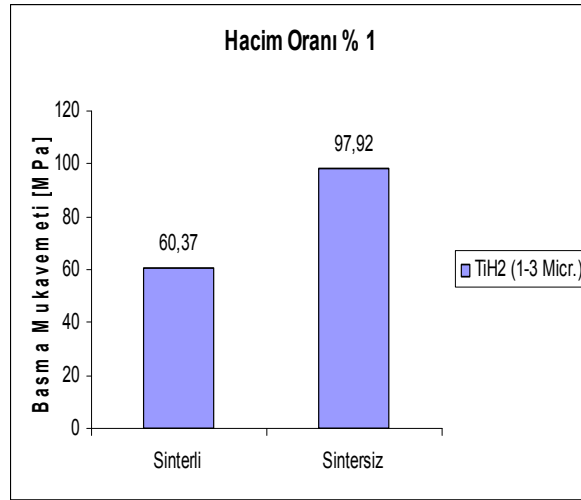
Şekil 5.62. TiH<sub>2</sub> oranının elastisite modülüne etkisi.



Gözenek yapıcı malzeme olarak kullanılan TiH<sub>2</sub>' nin eriyikte hacimce kullanılma oranı attıkça elastisite modülü değeri artmaktadır.



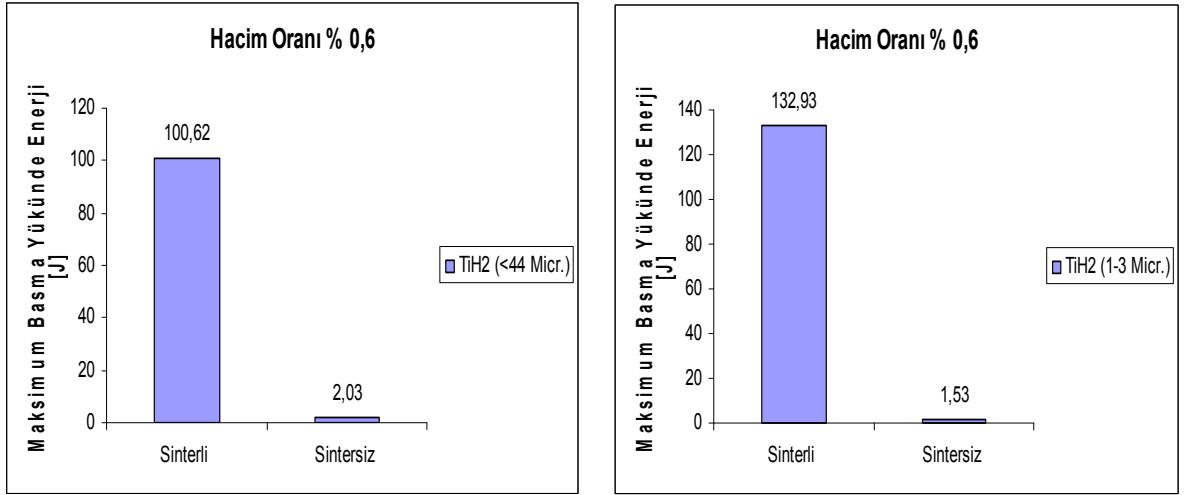
Şekil 5.63. Hacim oranı % 0,6 olan sinterli ve sintersiz numunelerin basma mukavemeti değerleri.



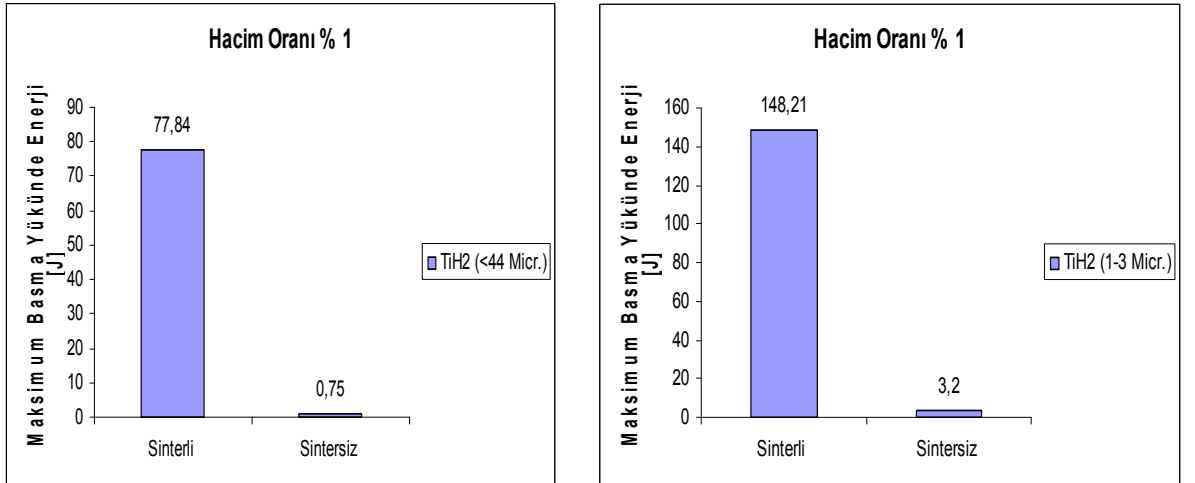
Şekil 5.64. Hacim oranı % 1 olan sinterli ve sintersiz numunelerin basma mukavemeti değerleri.

Sintersiz numunelerin basma gerilmesi değerlerinin sinterli numunelere kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Buradan gözenekli yapıdan dolayı malzemenin basma mukavemetinin azaldığı buna mukabil maksimum basma yükünde ki enerji değerlerinin yükseldiği görülmüştür. Sintersiz numunelerin gözenekliliği sinterlilere göre daha az olduğundan basma mukavemeti değerleri de daha yüksek çıkmaktadır.



Şekil 5.65. Hacim oranı % 0,6 olan sinterli ve sintersiz numunelerin maksimum basma yükünde enerji değerleri.



Şekil 5.66. Hacim oranları % 1 olan sinterli ve sintersiz numunelerin maksimum basma yükünde enerji değerleri.

Sinterli malzemelerin maksimum basma yükünde enerji değerlerinin sintersiz numunelere göre çok daha yüksek olduğu görülmüştür.

Burada önemli olan malzemenin kullanılacağı yere uygun yapıda, yani hem gözenekli hem de basma yükünde akma değerlerinin verilen dizayn kriterlerine uygun olmasıdır.

Yapılan tasarımlarda gözenekli malzemelerin avantajlarından (Ses, şok absorbesi vb.) yararlanabilmek bu tür malzemelerin diğer mekanik özelliklerine de çok bağlıdır. Bu durumda gözenekli yapıdaki malzemelerin mukavemetlerini arttıracak yöntemlerin geliştirilmesi önem kazanmaktadır.

#### **5.4. KABARCIKLANDIRICILI MADDELER İLE GÖZENEKLENDİRME**

Bu yöntemle gözenekli malzeme üretimi, 3. Bölümde açıklanmıştır. Ancak burada kısaca bahsetmek gerekirse;

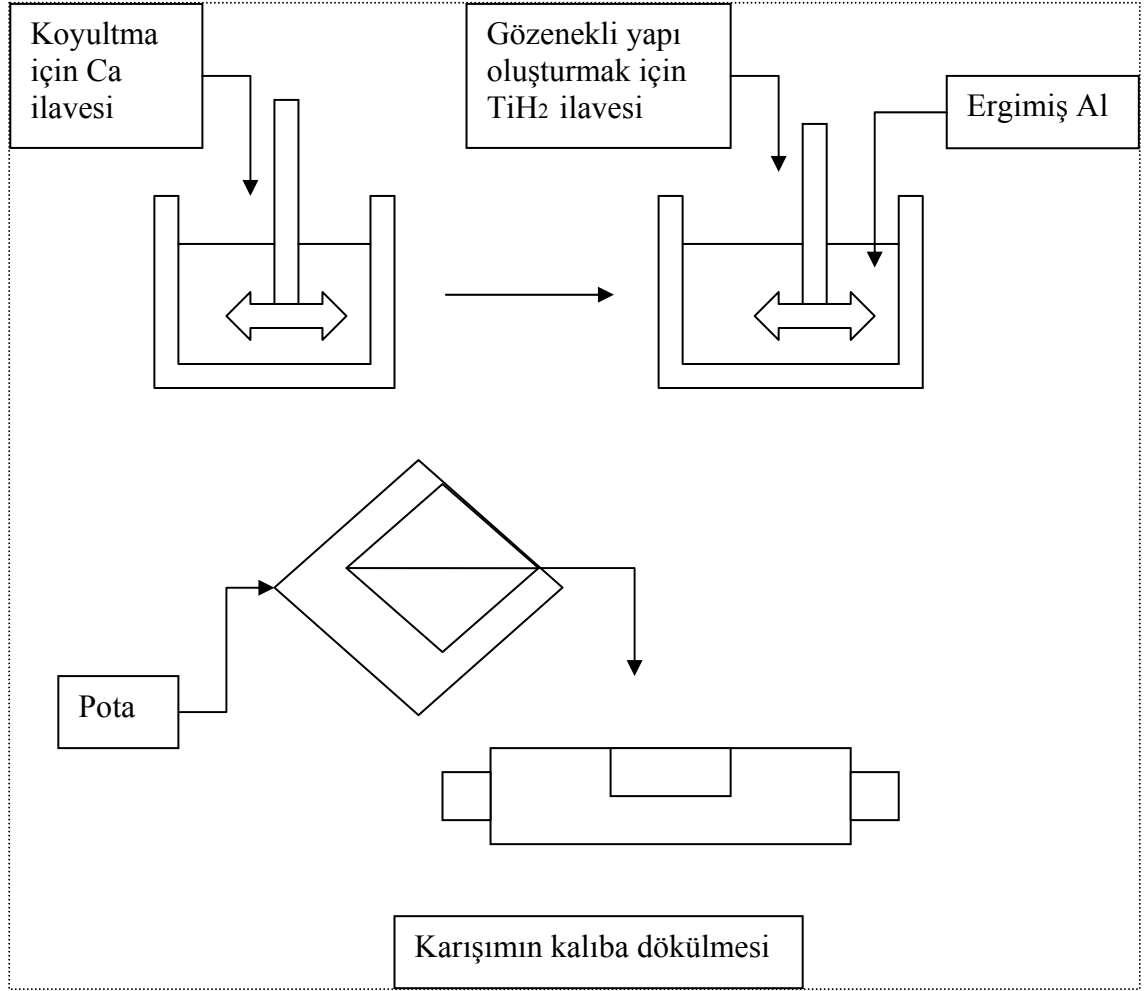
Eriyik direk olarak köpüklendirmek için eriyiğin içersine kabarcıklandırmak için gaz enjekte etmek yerine eriyiğin içersine kabarcıklandırıcı madde ilave etmektir [17 - 20]. Isının etkisi altında kabarcıklandırıcı madde ayrışır ve gaz çıkışı meydana getirerek köpüğü ileri doğru iter.

Bu teknikte kalsiyum (metal esaslı), alüminyum eriyiğe 680°C'de ilave edilir. Eriyik birkaç dakika viskoziteyi arttırmak için karıştırılır [22,23].

Gerçek bir köpük ürünü elde etmek için genellikle 1,5-3 wt %Ca ilave edilir. Viskozite istenen değere ulaşıktan sonra yoğun sıcak sıvı içersine Hidrojen gazı çıkışı sağlamak için kabarcıklandırıcı madde olan TiH<sub>2</sub> ilave edilir. Eriyik daha sonra yavaş ve kademeli olarak genişlemeye başlar ve köpük kalıbı doldurur. Alaşım ergime noktasının altına kadar soğuduktan sonra sıvı köpük, katı alüminyum köpük haline döner ve daha sonraki işlemler için kalıptan çıkarılır.

### 5.4.1. Deney Seti

Deney seti kompleksi Şekil 5.69. ve Şekil 5.70, 71 ve 72 'de gösterilmiştir.



Şekil 5.67. Deney düzeneği şematik gösterimi.

### 5.4.2. Numune Üretimi

Numune üretiminde aşağıdaki malzemeler kullanılmıştır.

#### Kullanılan Malzemeler :

1- Saf Alüminyum ( Al 1100 )

% 99 Al ( % 1 Si, % 0,2 Cu, % 0,05 Mn, % 0,1 Cr, % 0,1 Zn)

## 2- Kalsiyum Granül

Metal Bazlı

Tane Büyüklüğü : -6 Mesh

## 3- Titanyum (II) Hydride

Tane Büyüklüğü : 1-3  $\mu\text{m}$ 

Metal Bazlı

Kullanılan malzemelerin ağırlıkça % oranları ve buna karşılık gelen numune numaraları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.10. Ağırlıkça farklı % oranlarında  $\text{TiH}_2$  kullanılarak hazırlanan numuneler.

<b>Kullanılan Malzemeler</b>	
<b>Ağırlıkça % <math>\text{TiH}_2</math></b>	<b>Al (%99) Ağırlıkça % 1,8 Ca</b>
	<b>Numune No</b>
1,5	10
2	42
2,5	43
3	44
3,5	45
4	46
4,5	47
5	48

Literatürde verilen değerlere göre; 680 °C'de ergitilen Alüminyuma vizkoziteyi arttırarak oluşan kabarcıkların yapı içersinde kalmasını sağlamak için metal bazlı kalsiyum granülü eklenip 10 dk. karıştırılmıştır.



Şekil 5.68. Dökümden önce malzemelerin hazırlanması.



Şekil 5.69. Alüminyumun ergitilmesi.

Ergimiş karışıma kabarcıklandırıcı olarak  $TiH_2$  ilave edilerek kalıba dökülmüştür.



Şekil 5.70. Kalıba döküm.

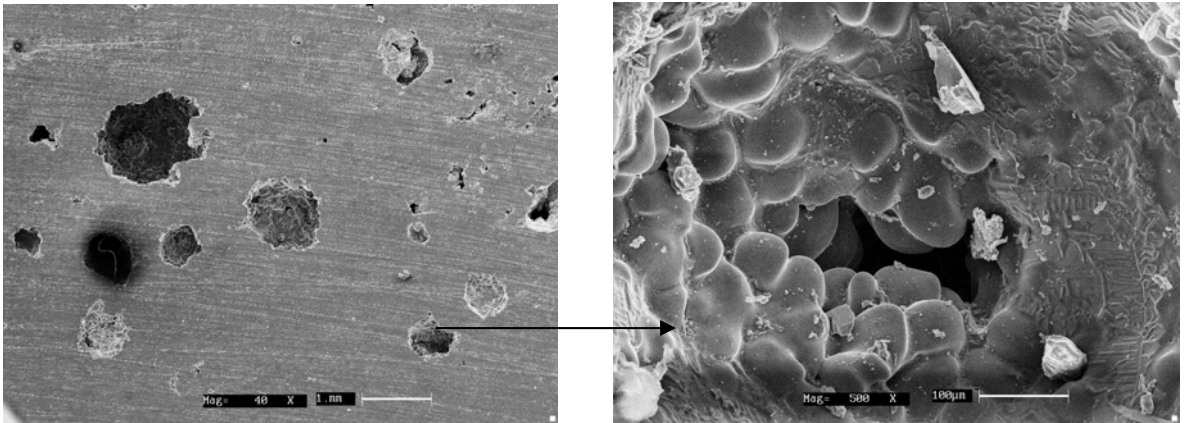
Kalıpta soğumaya bırakılan numune daha sonra kalıptan alınarak test numunesi boyutlarına getirilmiştir.

Aşağıda Şekil 5.73.'de bu yöntemle elde edilen numune görülmektedir. Numunede kabarcıklandırıcı madde olarak kullanılan  $TiH_2$ 'nin meydana getirdiği gaz çıkışıyla oluşan gözenekli yapı görülmektedir.



Şekil 5.71. Kabarcıklandırıcı maddelerle üretilmiş 48 nolu numuneye ait gözenekli yapı.

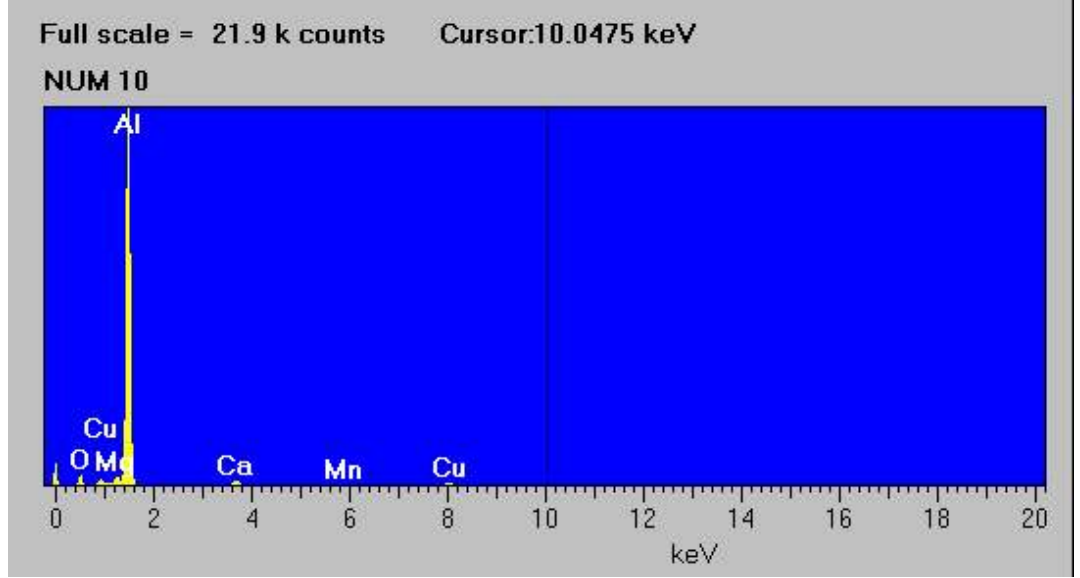
Oluşan gözenekli yapılar için SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir. İlk görüntü 40 büyütmede çekilmiştir. İkinci fotoğrafta oluşan gözeneklerin 500 büyütmedeki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.72. 48 nolu numunede oluşan gözeneklerin SEM görüntüleri.

### 5.4.3. Metalgrafik Analiz

Burada 10 ve 48 nolu numunelere ait SEM / EDX ünitesi ile yapılan ana malzeme elemental analizleri verilmiş olup diğer numunelere ait grafikler tezin ekler bölümünde verilmiştir.

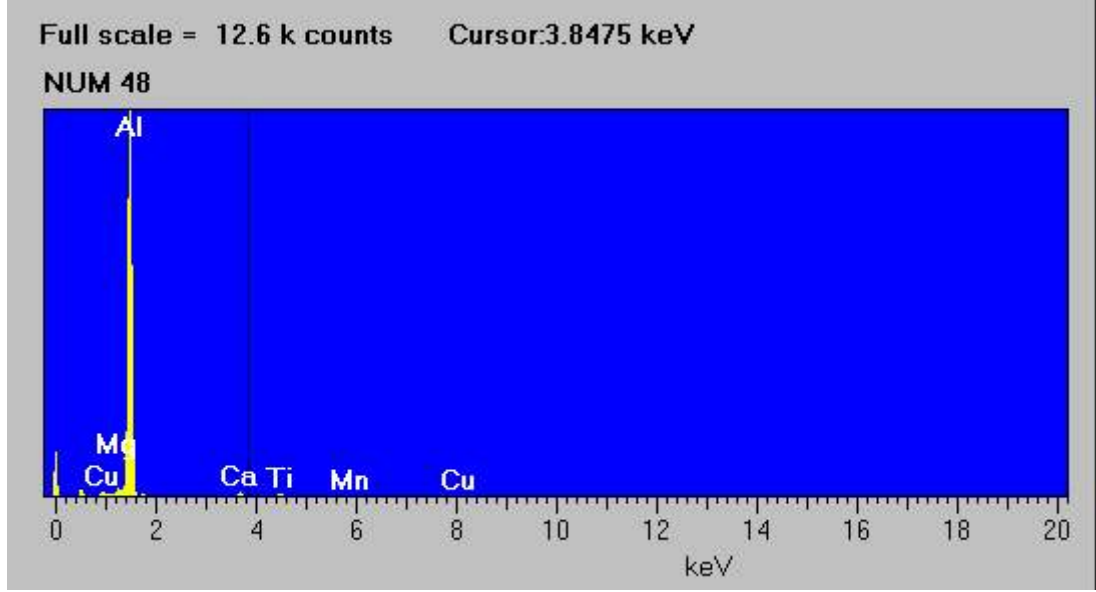


Şekil 5.73. 10 nolu numuneye ait ana malzeme EDX elemental analizi.

### 10 NOLU NUMUNE GENEL ANALİZİ

Element	Yüzde
Mg	0.97 wt.%
Al	90.47 wt.%
Ca	2.42 wt.%
Mn	0.89 wt.%
Cu	5.26 wt.%
	100.00 wt.% Toplam





Şekil 5.74. 48 nolu numuneye ait ana malzeme EDX elemental analizi.

#### 48 NOLU NUMUNE GENEL ANALİZİ

Element	Yüzde
Mg	0.63 wt.%
Al	92.36 wt.%
Ca	1.69 wt.%
Ti	1.13 wt.%
Mn	0.58 wt.%
Cu	3.61 wt.%
	100.0 wt. % Toplam

EDX ünitesi ile yapılan elemental analiz neticesinde, ana faz alüminyum esaslı olup, ikincil fazların ağırlıklı olarak bakır esaslı olduğu görülmüştür. 10 nolu numunede kullanılan TiH<sub>2</sub> ağırlıkça kullanım oranı % 1,5 olarak düşük bir miktarda olduğundan elemental analizde Ti gözükmemekle beraber 48 nolu numunede Ti % 1,13 olarak belirlenmiştir.

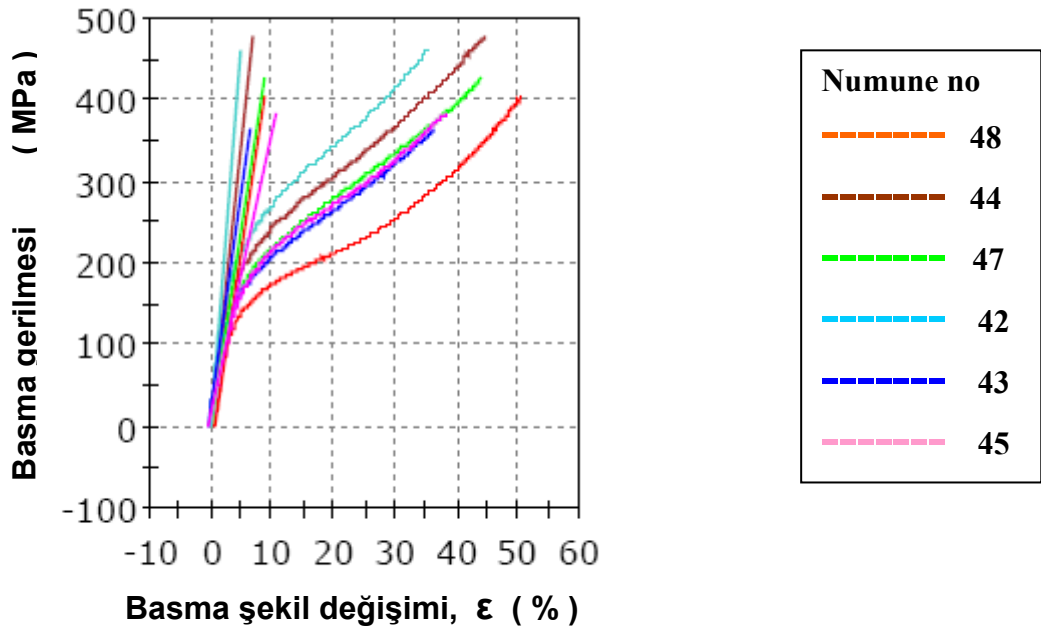
#### 5.4.4. Basma Testi

Bu yöntemle elde edilen numuneler basma testine tabi tutulmuş olup sonuçlar aşağıda verilmiştir.

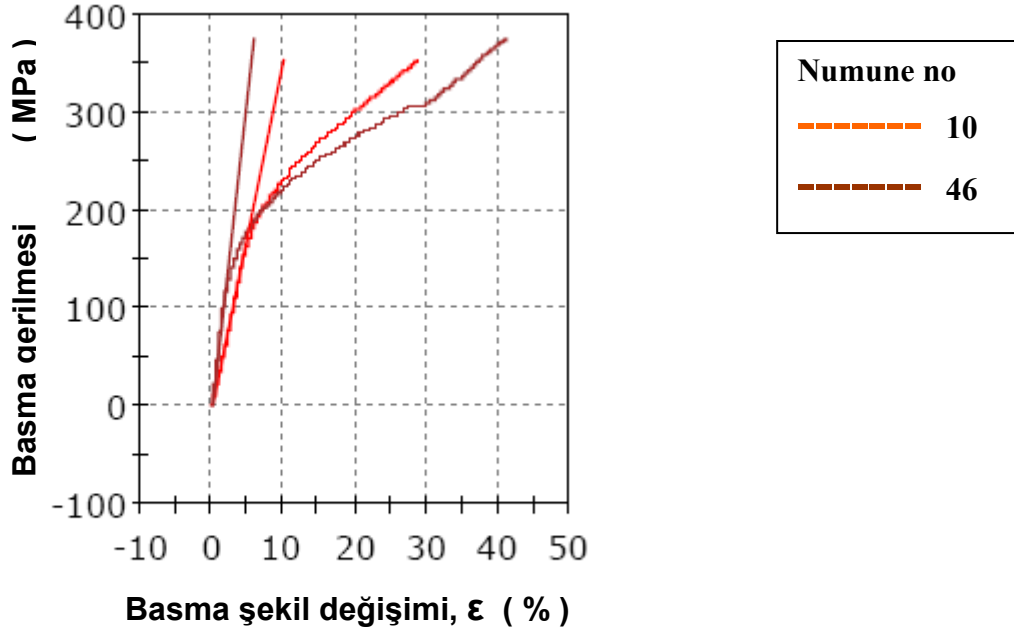
Basma testi esnasında, numunelerde burkulmanın olmaması için;

$$\text{Boy/En} = 1,5\text{cm}/1\text{cm} < 2$$

olarak alınmıştır.



Şekil 5.75. Kabarcıklandırıcı maddelerle üretilmiş numunelere ait basma gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri.



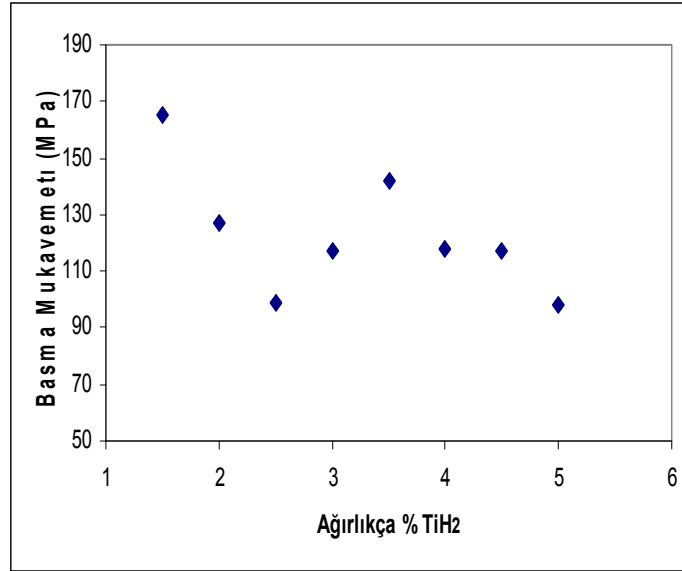
Şekil 5.76. Kabarcıklandırıcı maddelerle üretilmiş 10 ve 46 nolu numunelere ait basma gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri.

Basma test sonuçları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.11. Basma Test Sonuçları.

Numune No	Akma (Basma) Gerilmesi [MPa]	Elastisite Modülü [GPa]
10	165,40	3,66
42	127,19	8,92
43	98,69	5,36
44	117,34	7,16
45	141,74	3,52
46	117,93	6,43
47	117,12	4,80
48	97,99	5

Tablo 5.9.'dan da görüleceği üzere bu yöntemle üretilen numunelerin, Toz sıkıştırma ile üretilen numunelere kıyasla basma mukavemeti değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

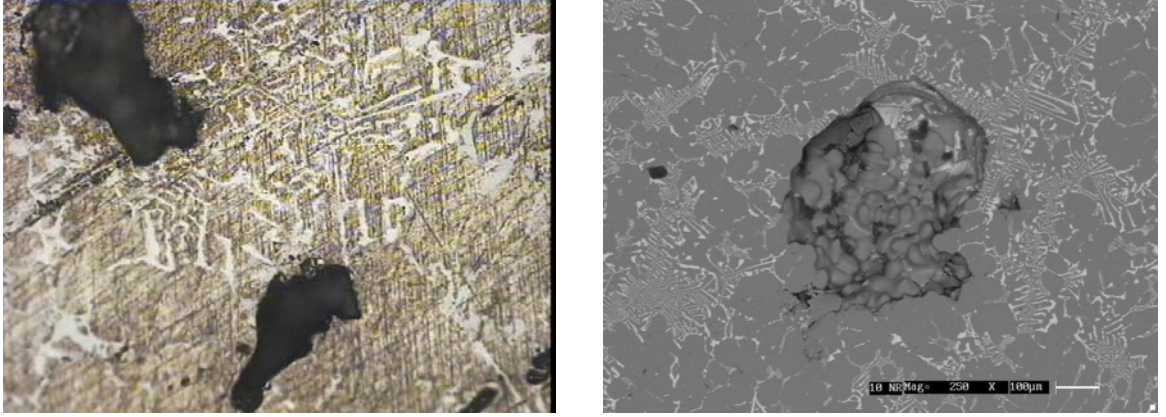


Şekil 5.77. Kabarcıklandırıcı olarak kullanılan TiH<sub>2</sub> oranı değişiminin basma mukavemetine etkisi.

Kabarcıklandırıcı madde olarak kullanılan TiH<sub>2</sub>'nin eriyiğe karıştırma oranı arttırıldıkça basma mukavemeti değerlerinin önce düştüğü Şekil 5.79. 'daki grafikte görülmektedir. Burada TiH<sub>2</sub>'nin % 2,5 değerinde basma gerilmesi değerlerinin tekrar yükselme trendine girdiği ancak daha sonrasında düşme eğiliminin devam ettiği görülmektedir. Bunun nedeninin basma testine tabi tutulan numune boyutlarının küçük değişimlerinden kaynaklandığını söyleyebiliriz. Dolayısıyla genel eğilimin TiH<sub>2</sub> oranının artmasıyla basma mukavemetinin düştüğü yönündedir.

TiH<sub>2</sub>'nin artması ile basma mukavemeti değerlerinin azalmasının nedeni gözenek miktarının TiH<sub>2</sub> oranının artması ile yükselmesidir. Şekil 5.81.'de TiH<sub>2</sub> oranına bağlı olarak gözenek miktar ve boyutlarına ait değişimler gösterilmektedir.

Elde edilen numunelere ait iç yapı SEM görüntülerinde malzeme içerisinde oluşan gözenekli yapı net olarak görülmektedir.

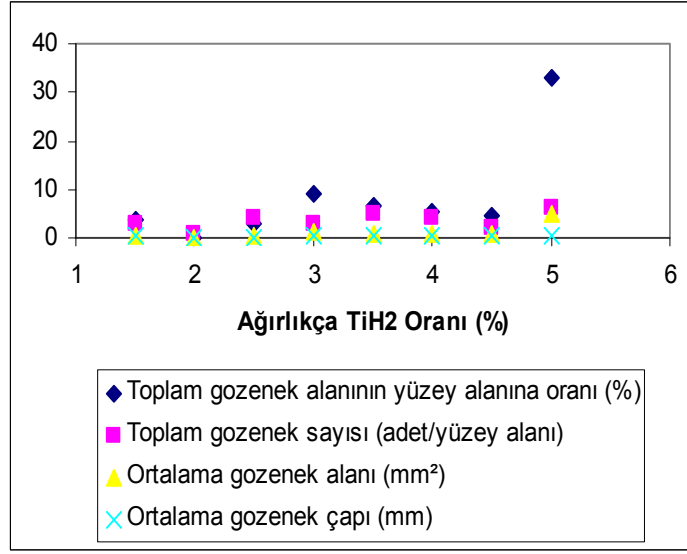


Şekil 5.78. 10 numaralı örneğe ait Makroskobik ve SEM görüntüsü.

#### 5.4.5. Görüntü Analizleri

Tablo 5.12. Kabarcıklandırıcı maddelerle üretilen numunelerin imaj analiz sonuçları.

	Numune Numarası							
	10	42	43	44	45	46	47	48
<b>En büyük gözenek çapı (mm)</b>	0,54	0,025	0,27	0,6	0,32	0,4	0,54	1,2
<b>Ortalama gözenek çapı (mm)</b>	0,25	0,025	0,19	0,38	0,25	0,24	0,33	0,5
<b>Toplam gözenek sayısı (adet/yüzey alanı)</b>	3	1	4	3	5	4	2	6
<b>Ortalama gözenek alanı (mm<sup>2</sup>)</b>	0,58	0,0019	0,45	1,36	0,98	0,77	0,69	4,86
<b>Toplam gözenek alanının yüzey alanına oranı (%)</b>	3,9	0,063	3	9,22	6,65	5,22	4,68	32,9



Şekil 5.79. TiH<sub>2</sub> oranının, gözenek yapısına etkisi.

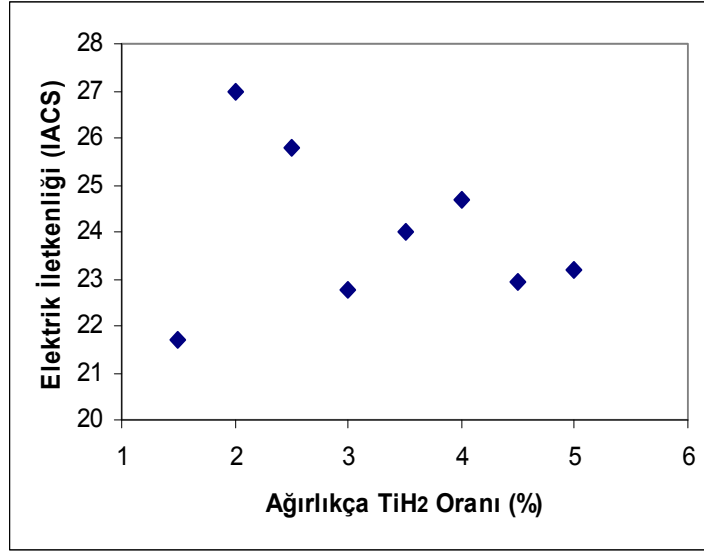
Gözenek oluşturucu madde olarak kullanılan TiH<sub>2</sub>'nin eriyiğe karıştırılma oranı arttırıldıkça, yukarıdaki şekilden de görüldüğü gibi gözenek oranı, miktarı ve boyutları da artmaktadır. Ancak oranın 4,5 tan 5'e çıkmasıyla toplam gözenek alanı hızla ve gözenek sayısı yavaşta olsa artarken gözenek çapında bir değişim gözlenmemektedir.

#### 5.4.6. Elektrik İletkenliği

Kabarcıklandıcı madde kullanarak üretilen numunelere ait elektrik iletkenlik değerleri ve buna ilişkin sonuçlar aşağıda verilmiştir.

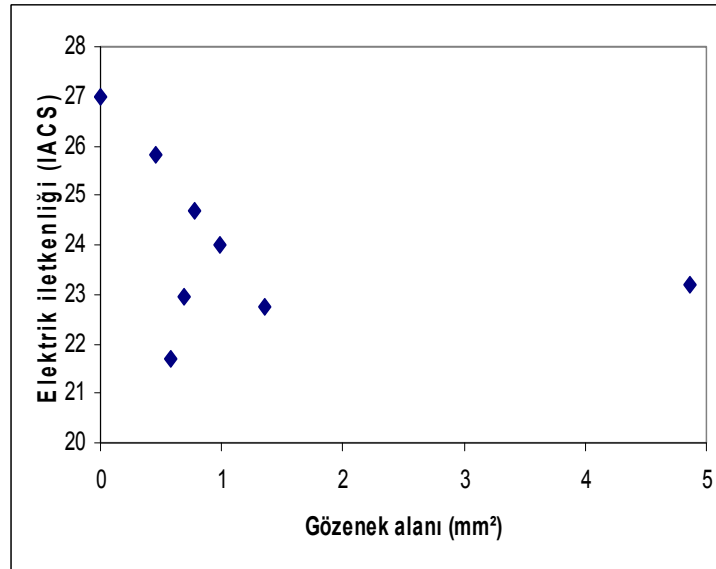
Tablo 5.13. Elektrik iletkenlik değerleri.

	Numune No							
	10	42	43	44	45	46	47	48
<b>Elektrik iletkenliği (IACS)</b>	21,7	27	25,8	22,75	24	24,7	22,95	23,2



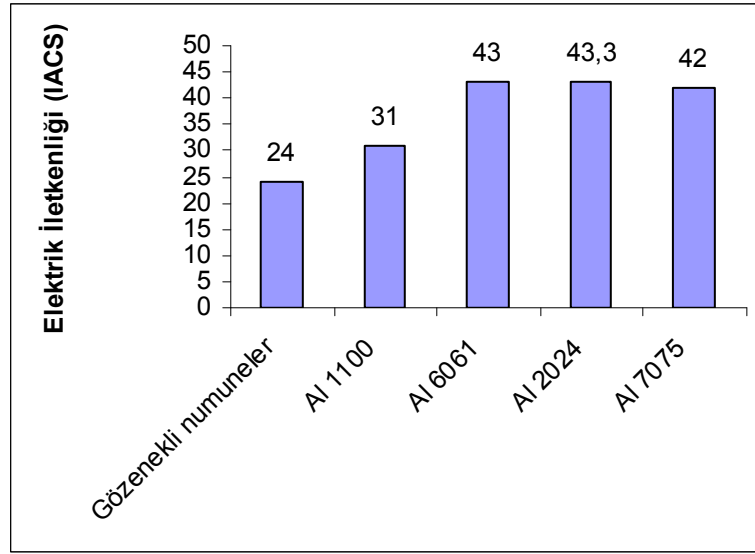
Şekil 5.80. TiH<sub>2</sub> oranının elektrik iletkenliğine etkisi.

Ağırlıkça TiH<sub>2</sub> oranının artışına bağlı olarak elektrik iletkenlik değerleri dalgalanmakla beraber düşüş eğilimi göstermektedir. Bunun sebebinin görüntü analizlerinde belirlendiği gibi gözenek oluşturuucu madde olarak kullanılan TiH<sub>2</sub>'nin eriyiğe karıştırılma oranı arttırıldıkça gözenek oranı, miktarı ve boyutlarının artmasıdır. Gözenek alanı artışı malzeme iç yapısında süreksizliklere neden olduğundan elektrik iletkenlik değerlerini de düşürmektedir.



Şekil 5.81. Elektrik iletkenliğinin gözenek alanıyla değişimi.

Elektrik iletkenliğinin gözenek alanına bağlı değişimi yukarıdaki şekilde verilmiştir. Buna göre elektrik iletkenliğinin gözenek alanı artışıyla düştüğü görülüyor. Ancak buradaki kararsızlığın nedeni elektrik iletkenliğinin ölçümlerin alınması sırasında probun numuneler üzerinde bastığı bölgelerde bulunan gözenek yapısına göre değişmesi dolayısıyla numunelerin genelindeki yapıyı tam olarak yansıtmamasından ileri gelmektedir. Ancak elektriksel iletkenlik değeri genel itibariyle gözenekli olan bu numunelerde aşağıdaki şekilden de görüldüğü gibi, gözenekli olmayan diğer Alüminyum malzemelere göre düşük çıkmıştır.



Şekil 5.82. Kabarcıklandırıcı maddeler ile üretilen numunelerin (ortalama) ve farklı alüminyum alaşımlarının elektrik iletkenlik değerleri.

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi üretilen numunelere ait ortalama elektrik iletkenlik değeri, numune üretiminde kullanılan Al 1100 ve değişik alüminyum alaşımlarından olan; Al 6061, 2024 ve 7075'in elektriksel iletkenlik değerlerinden düşüktür. Sonuçta gözenekli yapının elektrik iletkenlik değerini düşürdüğü sonucu ortaya çıkmaktadır.

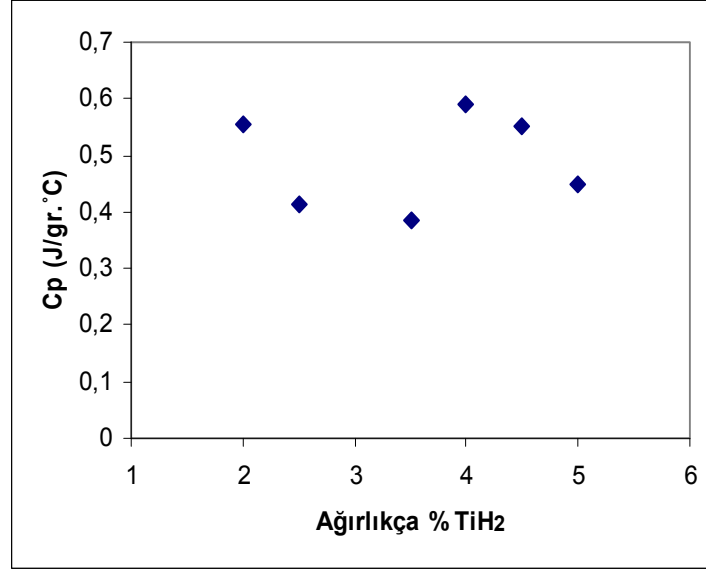
#### 5.4.7. Özgül Isı

Elde edilen numunelere ait özgül ısı değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Bu ölçümler Erciyes Üniversitesi Kimya Bölümü laboratuvarında yapılmıştır.



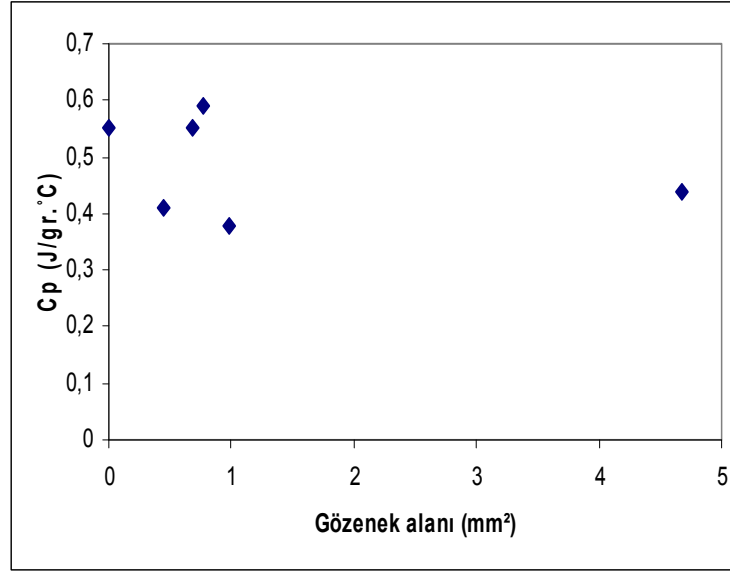
Tablo 5.14. Özgül ısı değerleri.

	Numune No					
	42	43	45	46	47	48
Özgül ısı (J/gr.°C)	0,554	0,413	0,386	0,592	0,551	0,448

Şekil 5.84. TiH<sub>2</sub> oranının özgül ısıya etkisi.

Kabarcıklandırıcı madde olarak kullanılan TiH<sub>2</sub> oranının özgül ısıya etkisi yukarıdaki şekilden de görüldüğü gibi 0,4 – 0,6 Cp aralığında değişim göstermektedir.

Burada dikkat çekici bir husus da, ağırlıkça % 2 ila 4 TiH<sub>2</sub> değerlerindeki Cp değerleri ve ağırlıkça % 2,5 ila 3,5 TiH<sub>2</sub> değerlerindeki Cp değerlerinin bir birlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Bunun nedeni araştırıldığında, görüntü analizlerinde aynı ağırlıkça % TiH<sub>2</sub> değerlerindeki, ortalama gözenek alanları değerlerinin de bir birlerine çok yakın olduğu görüldü.



Şekil 5.83. Özgül ısının gözenek alanıyla değişimi.

Özgül ısı değerlerinin gözenek alanı artışıyla genel olarak arttığı görülmektedir.

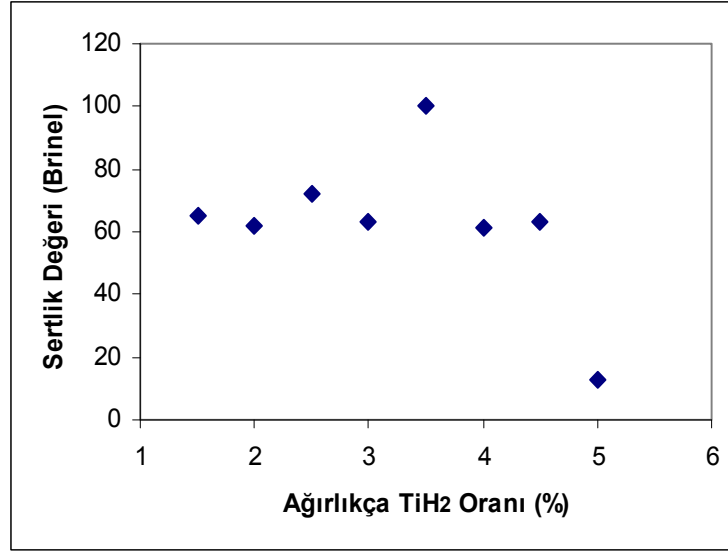
Bunun nedenini, % 99 saf Alüminyumun özgül ısısının 0,92 J/gr.°C, sabit basınçta havanın özgül ısısının 1 J/gr.°C olması dolayısıyla gözenek alanı artan numunelerde özgül ısı değerinin yükselmesi olarak açıklayabiliriz.

#### 5.4.8. Sertlik Değerleri

Elde edilen numunelere ait Brinel sertlik değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.15. Brinel sertlik değerleri.

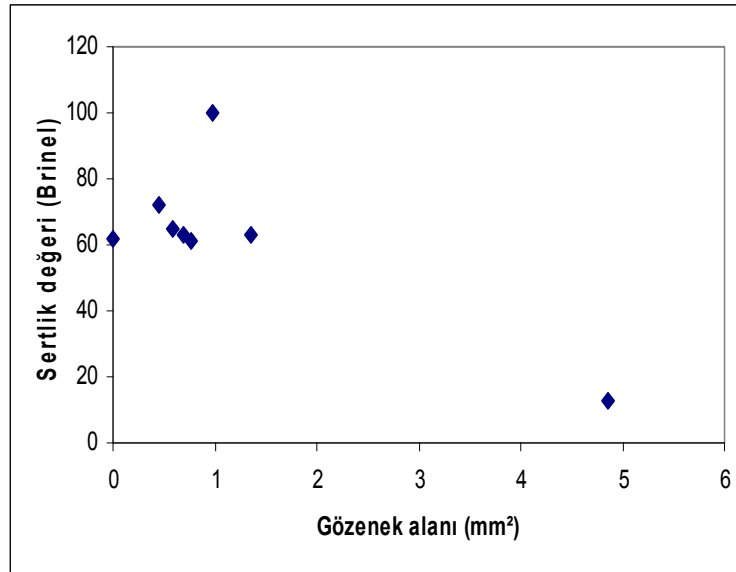
	Numune No							
	10	42	43	44	45	46	47	48
Brinel sertlik değerleri	65	62	72	63	100	61	63	13



Şekil 5.84. TiH<sub>2</sub> oranının sertliğe etkisi.

Kabarcıklandırıcı madde olarak kullanılan TiH<sub>2</sub> oranının sertliğe etkisi değişim göstermekle beraber, özellikle % ağırlıkça en fazla TiH<sub>2</sub> oranıyla üretilmiş olan 48 nolu numunede diğer numunelere oranla oluşan gözenek miktarının yüksek olması, TiH<sub>2</sub> artışının yapıyı daha fazla gözeneklendirdiği dolayısıyla bu şekilde üretilen numunelerin sertlik değerinde düşmeye neden olduğunu göstermektedir.

Sertliğin gözenek alanıyla değişimi aşağıdaki grafikte verilmiştir.



Şekil 5.85. Sertliğin gözenek alanıyla değişimi.

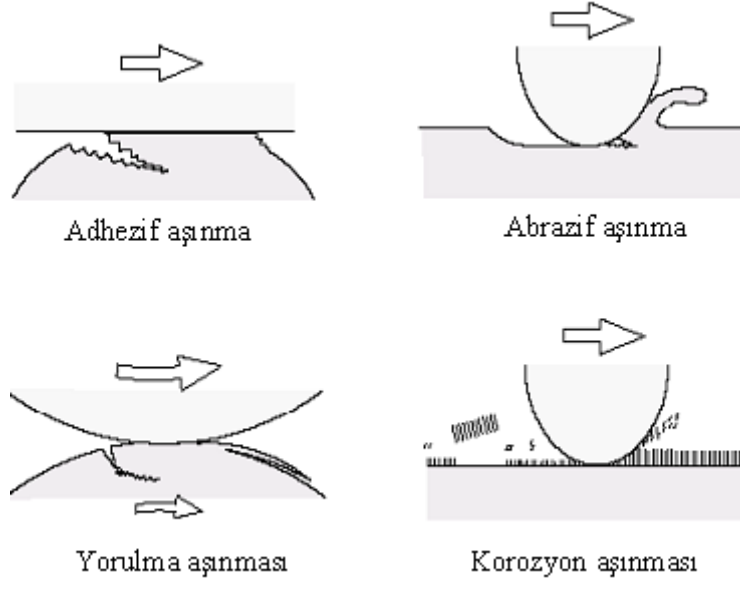
Yukarıdaki şekilden de görüldüğü gibi sertlik gözenek alanı artışı ile düşmektedir. Boşluklar sertliğin düşmesine neden olmaktadır.

#### 5.4.9. Aşınma

Bir yüzeyin kendisi ile temas halinde olan başka bir yüzey üzerindeki hareketinin sonucunda yüzeylerinden malzemenin uzaklaşmasına aşınma adı verilmektedir. Hem sürtünme hem de aşınma aynı tribolojik temas prosesinin sonucu olarak bir arada meydana gelirler. Bununla birlikte aralarındaki ilişki tam olarak anlaşılammıştır. Genellikle düşük sürtünmenin düşük aşınmaya yüksek sürtünmenin yüksek aşınmaya sebep olduğunu deneysel sonuçlar göstermektedir. Fakat bu durum genel bir kural değildir. Aşınma bir malzeme özelliği olmayıp, bir sistem özelliğidir [72].

Aşınma, aşınma izinin görünüşüne göre, malzeme kaldırılmasının veya hasarın meydana geldiği fiziksel mekanizmaya göre ve aşınmanın meydana geldiği şartlara göre üç ayrı grupta sınıflandırılır. Aşınma izi görünümü, çukurlanma, pullanma, çizilme, parlaması, oyulma kemirilme ve kazıma şeklinde olabilir. Aşınmanın gerçekleştiği fiziksel mekanizma adhezyon, abrazyon ve oksitlenme şeklinde olabilir. Aşınma ortamı da yağlı aşınma, yağsız (kuru) aşınma, metal-metal kayma aşınması, yüksek gerilimli kayma aşınması ve yüksek sıcaklık

metalik aşınma şeklinde olabilir. Gerçek temas şartlarında birden fazla mekanizmanın aynı anda etki ettiği durumlara sıkça rastlanır. Şekil 5.89 'da temel aşınma mekanizmaları görülmektedir.



Şekil 5.86. Temel Aşınma Mekanizmaları [72].

#### 5.4.9.1. Adhezif Aşınma

Bir yüzeyin yüzey pürüzü bu yüzeye temas halinde olan başka bir yüzeyin yüzey pürüzü ile temas haline gelirse bu pürüzler birbirine yapışır ve pürüzlerin bulunduğu bölgelerde kaynak bağları oluşur (şekil 5.90.a.).

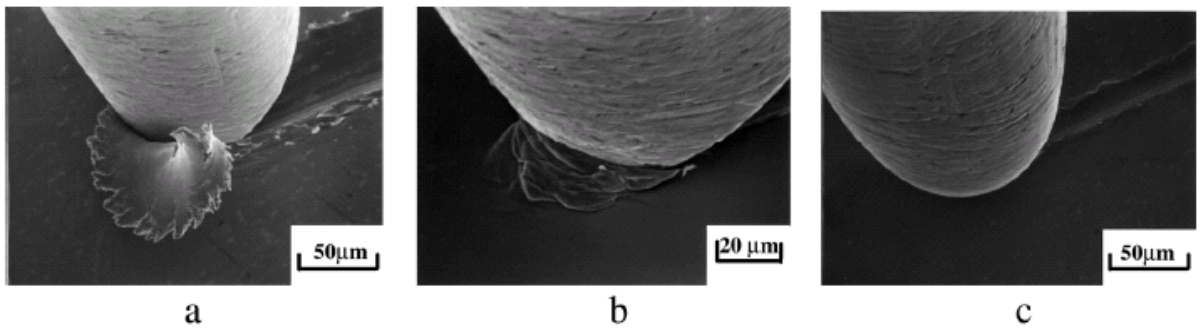
Yüzeylerin birbirine göre bağıl olarak gerçekleştireceği teğetsel hareketler sonucunda yumuşak yüzey pürüzleri kopar ve aşınma meydana gelir. Adhezif aşınmada koruyucu yüzey filmleri ve tabakalar gibi yüzey özellikleri önemli rol oynar. Yapılan deneysel çalışmalar; bir çok kayma şartlarında adhezif aşınmanın temel aşınma mekanizması olarak ortaya çıktığını göstermektedir [72, 73].

#### 5.4.9.2. Abrazif Aşınma ve Yüzey Pürüzlülüğü Deformasyonu

Abrazif aşınma: bir yüzeyin temas halinde bulunduğu diğer yüzeyden daha sert olduğu durumlarda veya temas bölgesinde sert taneciklerin bulunduğu durumlarda meydana gelir.

Sert yüzeyin yüzey pürüzlülükleri yumuşak yüzeye bastırıldığı zaman yumuşak malzemede plastik akma meydana gelir.

Şayet sert yüzey teğetsel olarak hareket ettirilirse dalma meydana gelir ve yumuşak malzemenin yüzeyinde kanallar ve çizikler meydana gelir. Sert yüzeyin geometrisine ve nufuziyet derecesine bağlı olarak dalma, kama oluşumu veya kesme mekanizmaları vasıtasıyla yüzeyden malzeme uzaklaştırır (şekil 5.90. a, b, c). Yüzey pürüzü deformasyonu temas eden yüzeylerin pürüzlülük derecesine bağlı olarak meydana gelir.



Şekil 5.87. Üç farklı abrazyon aşınma tarzının SEM görüntüsü, a) Kesme tarzı (pirinç pleyt üzerine çelik pim), b) kama oluşumu tarzı ( paslanmaz çelik pleyt üzerine çelik pim) c) saban tarzı (pirinç pleyt üzerine çelik pim) [72].

Abrazyon aşınma, iki cisimli, üç cisimli ve erozyon aşınması olarak üç gruba ayrılır. Abrazyon aşınma mekanizmaları şekil 5.91. 'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.88. Abrazyon aşınma mekanizmaları [73].

İki cisimli abrazyon aşınma, pürüzlü bir yüzeyin veya sabit aşındırıcı taneciklerin hareketi ile yüzeyden malzemenin kaldırılmasıdır. Üç cisimli abrazyon aşınma ise, iki yüzey arasında kayma

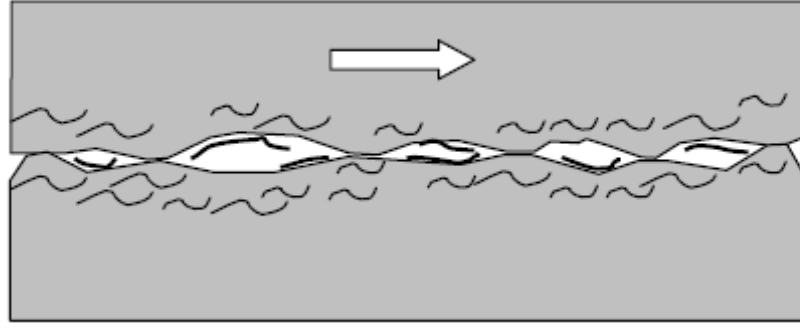
ve yuvarlanma hareketi yapabilen aşındırıcı taneciğin yüzeyden malzeme kaldırmasıdır. Serbest bir şekilde akan taneciklerin yüzeyden malzeme kaldırmasına ise erozyon denilmektedir.

Abrazif aşınma malzemenin yüzey sertliği ile yakından ilgilidir ancak mikroyapı da önemli rol oynar [74, 75]. Abrazif parçacık sertliğinin yüzey sertliğine oranı kritik öneme sahiptir [75]. Aşınma direnci yalnızca abrazif parçacıkların ve yüzeyin sertliklerinin oranına bağlı değil aynı zamanda abrazif parçacıkların tabiatına, dayanımına, şekline, tane boyutuna ve keskinliğine de bağlıdır. Abrazif taneciklerin metal yüzeyini mikro boyutta kazınması plastik olarak şekil değiştirmiş aşınma izleri meydana getirirse de malzeme kaybına neden olmaz. Ancak aşındırıcı taneciklerin yüzeyi bir torna kaleminin malzemeyi kestiği gibi mikro boyutta kesmesi ve yüzeyden talaş kaldırması aşınma izleri yanında malzeme kaybına da sebep olur. Mikro kazınma ve mikro kesme tok (ductile) bölgede meydana gelir ve aşınma direnci sertliğin artmasıyla artar. Ancak gevrek mikro yapıli bölgelerde mikro çatlaklar aşınmaya sebep olur ve aşınma direnci artan sertlikle azalır [75].

#### **5.4.9.3. Yorulma ve Tabakalaşma Aşınması**

Yorulma çatlakları ilerleyişi yüzeyin tek bir uygulama halinde dayanabileceği fakat tekrarlı uygulama halinde dayanamayacağı gerilme seviyelerinde, malzeme yüzeylerinin yüklenip boşaltılmasından kaynaklanır. Yorulma büyük bir çatlakın orijini başlatabilir ve malzeme yüzeyinden taneciklerin kopmasını sağlayabilir.

Tabakalaşma aşınması; yüzey pürüzlülüklerinin birbiri üzerinde kayması sırasında mikroskobik ölçekte meydana gelen bir yorulma aşınmasıdır (Şekil 5.91.).



Şekil 5.89. Tabakalaşma Aşınması sırasında meydana gelen yüzey altı çatlakları ve levha şeklindeki aşınmış tanecikler. [73].

Küçük çatlaklar yüzeyin altında çekirdeklenir. Yüzeyin hemen altında üç eksenli basma gerilmelerinden dolayı çatlak başlangıç yüzeyin hemen altında meydana gelmez. Tekrarlı yükleme ve deformasyonlar, çatlakların genişlemesini, ilerlemesini ve diğer komşu çatlaklarla birleşmesine neden olur. Çatlaklar yüzeye paralel doğrultuda oluşur ve sonuçta uzun ince aşınmış tabakalar meydana gelir [73].

#### 5.4.9.4. Kimyasal Aşınma

Kimyasal aşınmada aşınma süreci temas bölgesindeki kimyasal reaksiyonlardan meydana gelir. Temas bölgesinde kimyasal reaksiyonlarla birlikte sürtünmenin de olması yüzeyden malzemenin uzaklaşmasını ve aşınmış taneciklerin oluşmasını sağlar. Sürtünme etkisi yüzeyde yüksek sıcaklıkların meydana gelmesine neden olur ve bu sıcaklık artışı kimyasal reaksiyonların sebep olduğu çatlak oluşumunu artırır. Ayrıca yüzeyde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar yüzeyin yumuşamasına ve zayıflamasına neden olur [72, 73].

#### 5.4.10. Aşındırma Testleri

Aşındırma testleri Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında PLINT marka çok amaçlı sürtünme ve aşındırma test cihazında yapılmıştır. Karşılaştırma açısından ağırlıkça en düşük (% 1,5) TiH<sub>2</sub> katılarak üretilen 10 nolu numuneye, en fazla (% 5) TiH<sub>2</sub> katılarak üretilen 48 nolu numuneler aşındırma testi için seçilmiştir.

Aşındırma testleri 48 nolu numune için yağlı ve kuru şartlarda 400, 600 ve 800 d/d'lık kayma

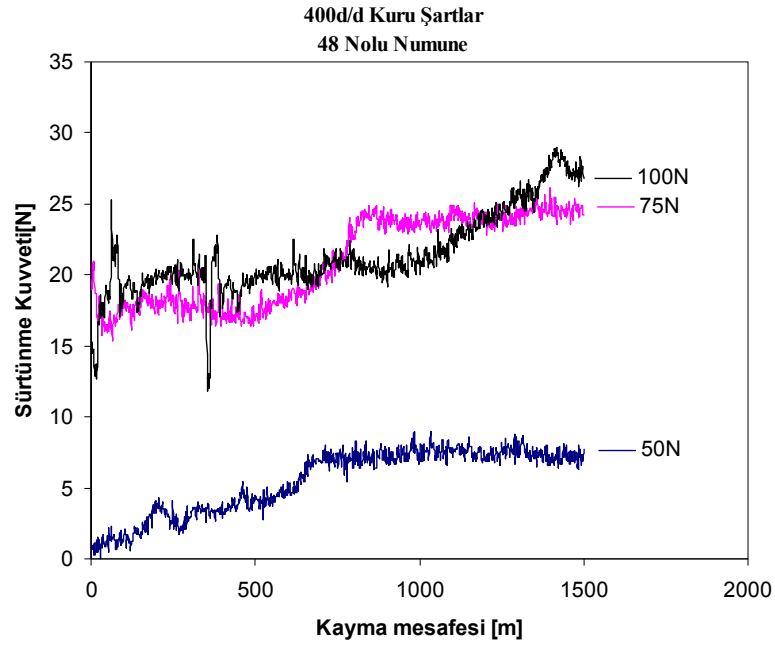


hızlarında 50, 75 ve 100 N yüklerde 1500 m sabit kayma yolunda yapılmıştır. 10 nolu numunede ise aynı koşullarda yağlı şartlar altında aşındırma testleri yapılmıştır.

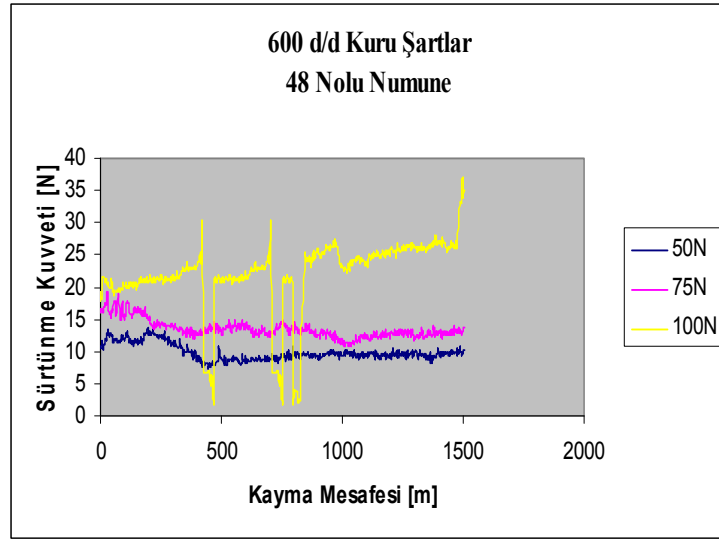
Aşındırıcı disk malzemesi 100 Cr 6, çapı 63 mm , sertliği 692 VSD1 dir. Yağlı şartlar için kullanılan yağ Castrol marka motor yağı olup vizkozitesi 50 cst'dir. Pin on ring test konfigürasyonu kullanılmıştır.

#### 5.4.10.1 48 Nolu Numune Aşındırma Testleri

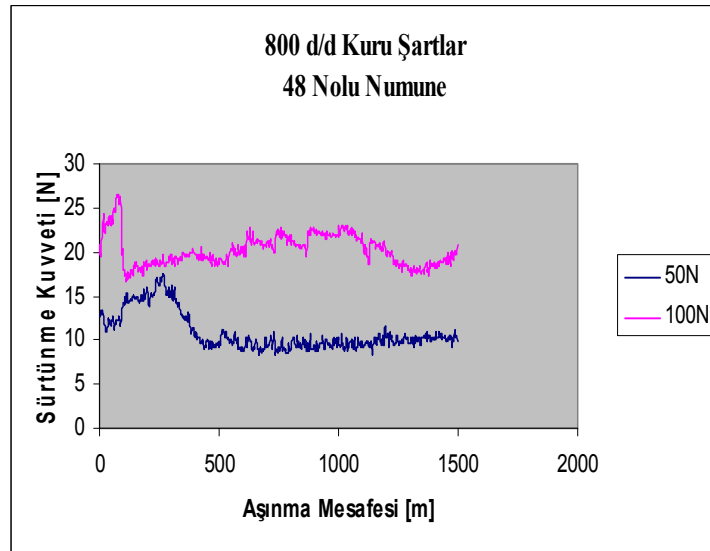
##### Kuru Şartlar;



Şekil 5.90. 400 d/d hızda aşındırma test grafiği.



Şekil 5.91. 600 d/d hızda aşındırma test grafiği.

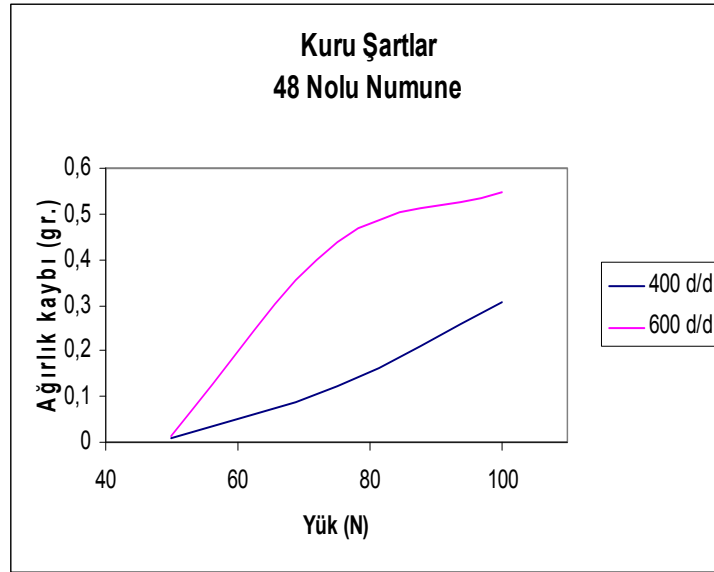


Şekil 5.92. 800 d/d hızda aşındırma test grafiği.

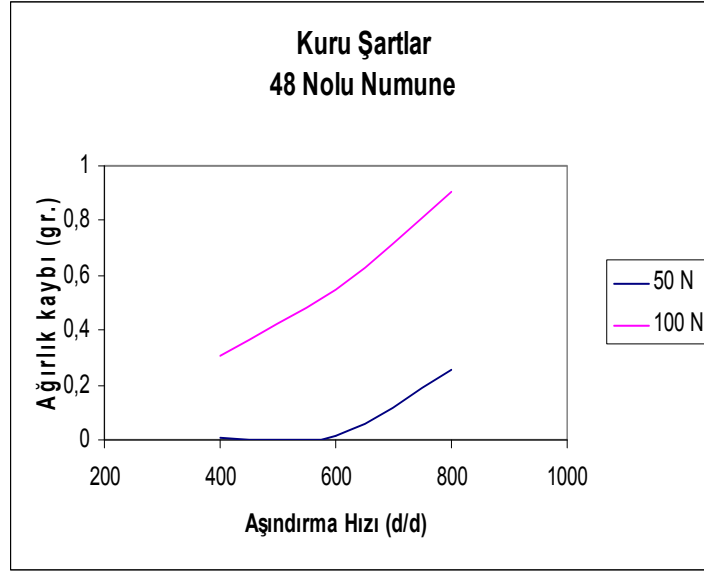
Özellikle kuru şartlarda aşındırma testleri esnasında gözenekli yapıya gelindiğinde aşınmaların malzemeden parça koparması şeklinde gerçekleştiği ve bu süreçte aşınmaların çok hızla gerçekleşerek malzemeyi küçülttüğü tespit edildi. Bunun sebebinin gözenekli bölgelere gelindiğinde, numune üzerindeki yüzey alanının azalması ile numune üzerine gelen basıncın artarak sürtünme kuvvetini arttırmasıdır. Buda grafiklerde pik yapan kısımlar olarak görülmektedir. Yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü üzere yükün ve aşındırıcı disk devrinin

artmasıyla sürtünme kuvveti artış göstermekte dolayısıyla malzemenin aşınma oranı da artmaktadır.

Kuru şartlarda sürtünme kuvveti belli bir değere kadar artmakta daha sonra yatay konuma gelerek sabitlenmektedir. Tabii olarak gözenekli bölgelerde sürtünme kuvvetinin artmasıyla grafiklerde tepe noktalar oluşmaktadır.

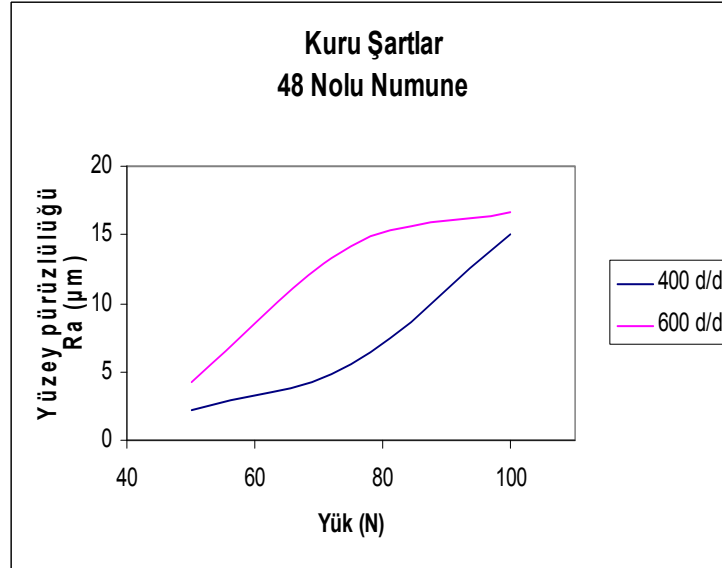


Şekil 5.93. Kuru şartlarda yüke bağlı ağırlık kaybı değişimi.

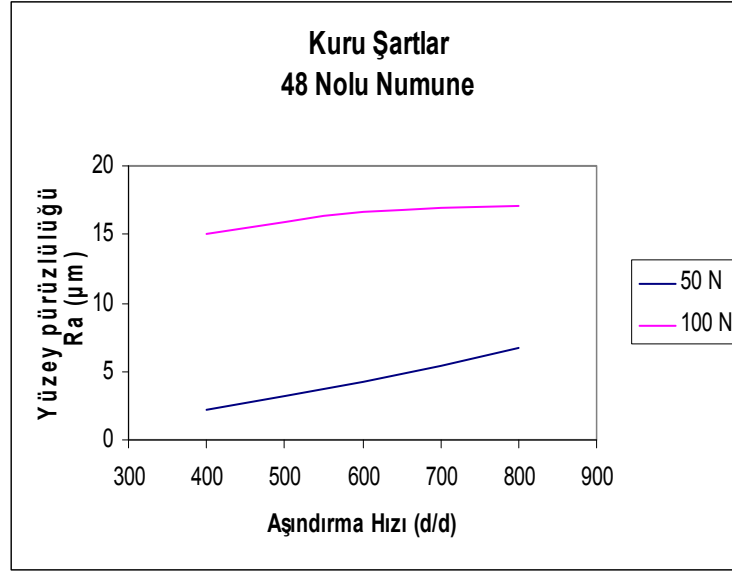


Şekil 5.94. Kuru şartlarda aşındırma hızına bağlı ağırlık kaybı değişimi.

Yüke bağlı ağırlık kaybı artmakta bu kayıplar aşındırma hızının artışı ile daha fazla olmaktadır. Özellikle kuru şartlarda yük ve aşındırma hız artışları ağırlık kaybını daha da artırmaktadır.

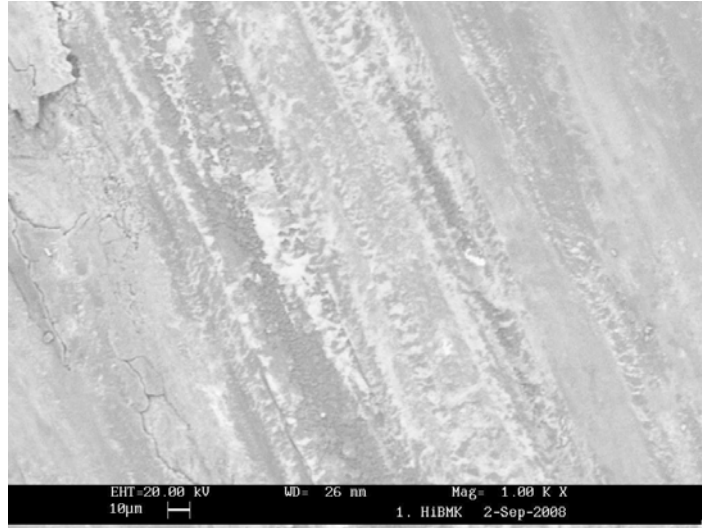


Şekil 5.95. Kuru şartlarda yüke bağlı yüzey pürüzlülük değişimi.

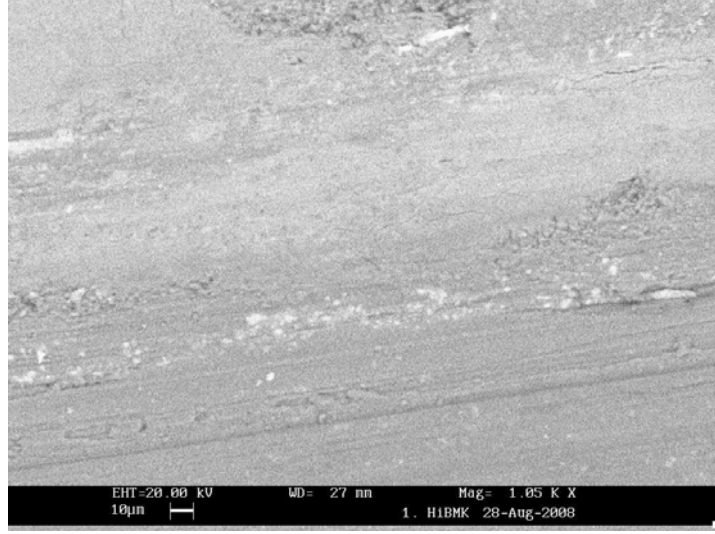


Şekil 5.96. Kuru şartlarda aşındırma hızına bağlı yüzey pürüzlülük değişimi.

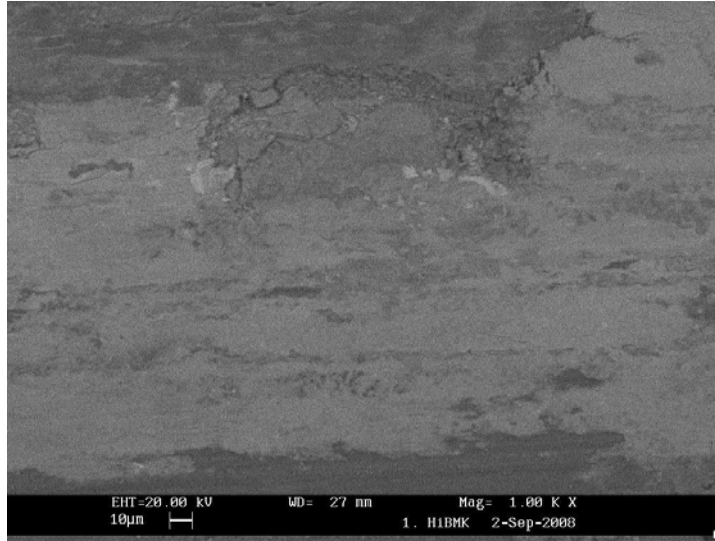
Yine burada yük ve aşındırma hız artışı aşındırılan yüzeylerdeki pürüzlülük değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Yük artışıyla beraber hız artışı daha da yüksek yüzey pürüzlülüğüne neden olmaktadır.



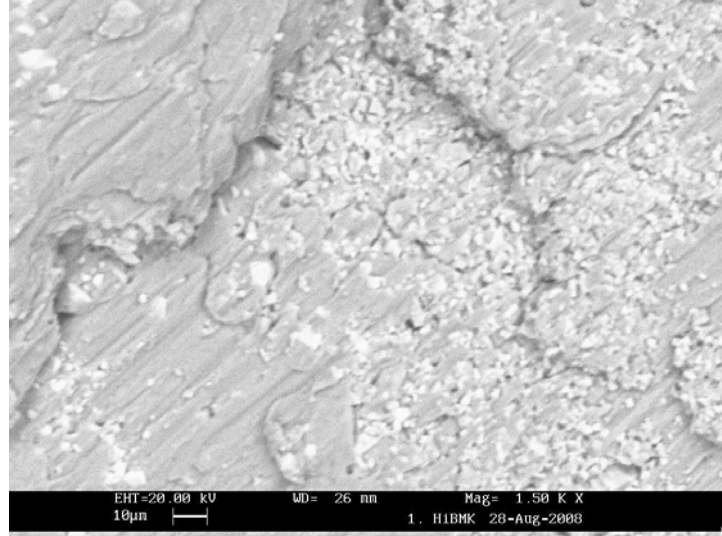
Şekil 5.97. Kuru şartlarda 50 N yük ve 800 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 5.98. Kuru şartlarda 75 N yük ve 600 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.



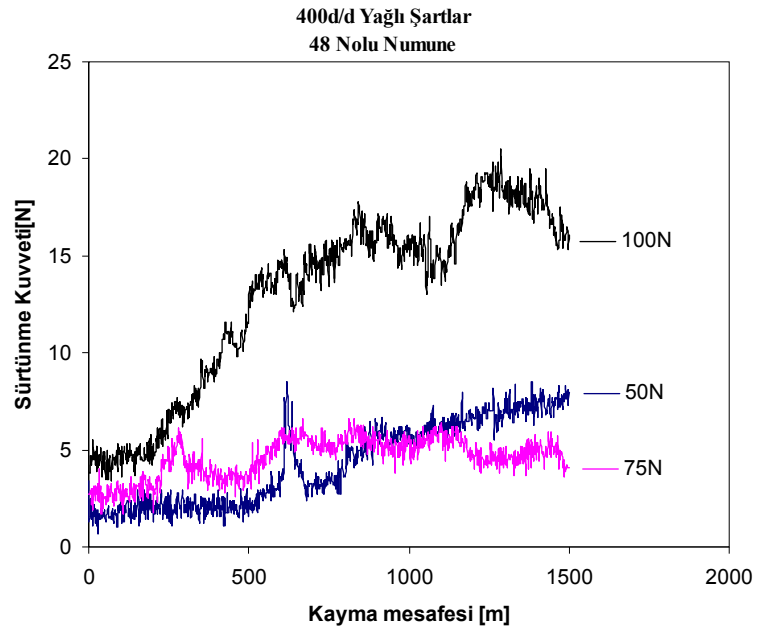
Şekil 5.99. Kuru şartlarda 100 N yük ve 800 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.



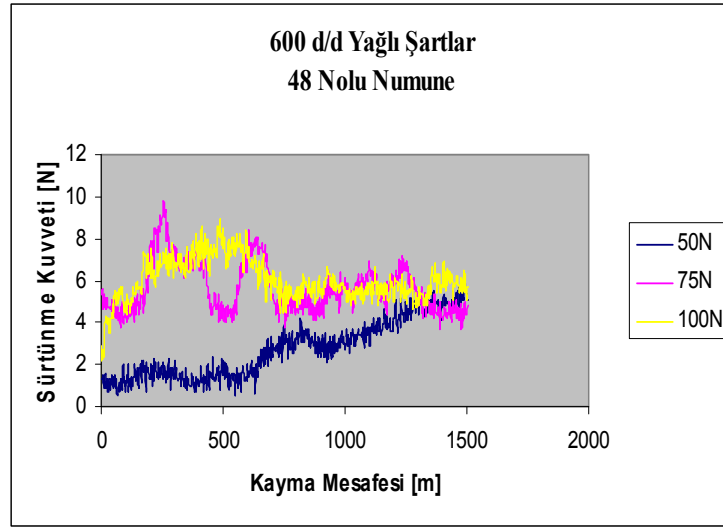
Şekil 5.100. Kuru şartlarda 100 N yük ve 600 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.

### Yağlı Şartlar;

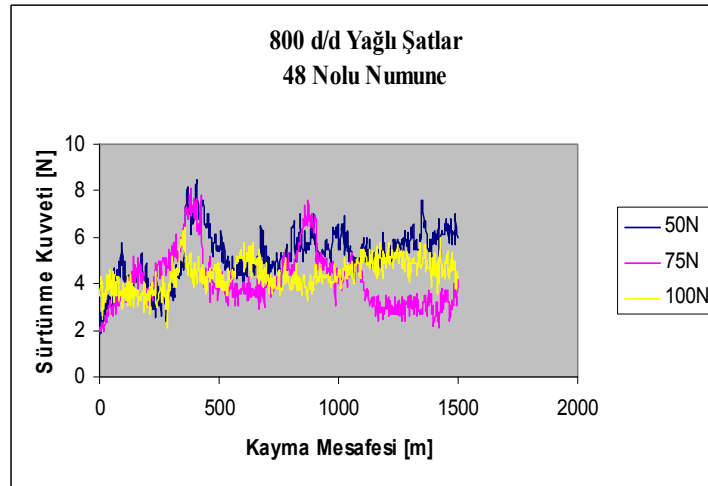
48 nolu numuneye ait yağlı şartlar altında yapılan aşındırma test sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.101. 400 d/d hızda aşındırma test grafiği.



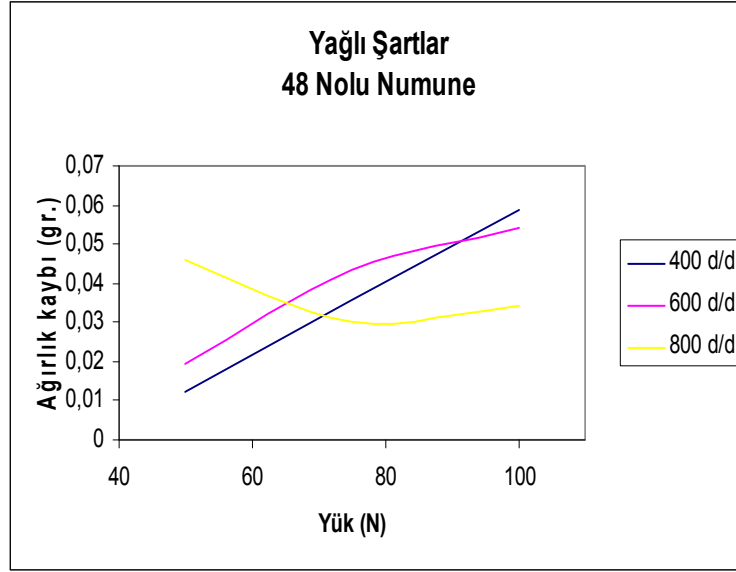
Şekil 5.102. 600 d/d hızda aşındırma test grafiği.



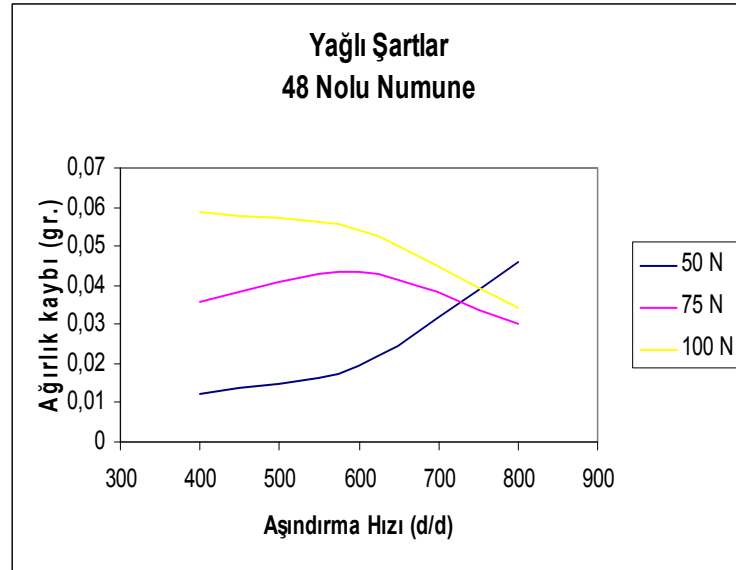
Şekil 5.103. 800 d/d hızda aşındırma test grafiği.

Yağlı şartlarda gene yükün artmasıyla sürtünme kuvvetinde artış görülmektedir. Ancak burada yağdan dolayı sürtünme kuvveti değerleri kuru şartlara göre 5 kat daha azdır. Grafiklerden de görüleceği üzere sürtünme kuvveti değerleri ilk başlarda düşük seviyelerde iken sonradan artmaya başlamaktadır. Bunun sebebinin numunelerin gözeneklerine nüfuz etmiş olan yağın zamanla azalmasından ileri gelmektedir. Ancak gene de numunelerin gözenekli olmasından dolayı yağın azalması daha uzun süre almıştır.



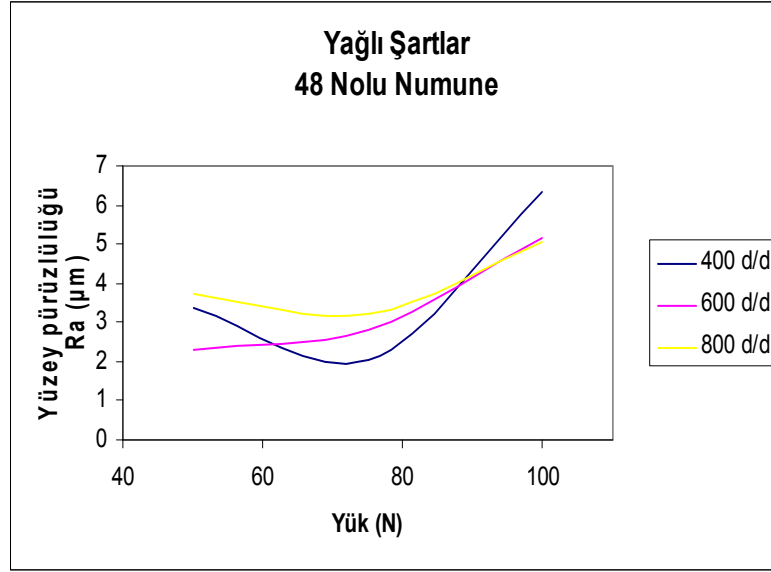


Şekil 5.104. Yağlı şartlarda yüke bağlı ağırlık kaybı değişimi.

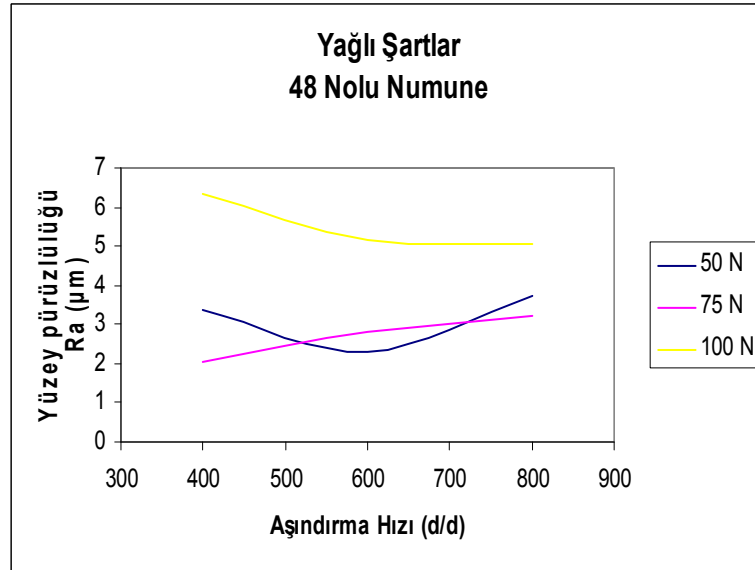


Şekil 5.105. Yağlı şartlarda aşındırma hızına bağlı ağırlık kaybı değişimi.

Yağlı şartlarda yüke bağlı olarak ağırlık kaybı artmakta ancak aşındırma hızının 800 d/d olduğu durumda ve yükün 100 N olduğu durumda ağırlık kaybında azalma olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin genel olarak yağlı şartlarda hız artışında sürtünmenin azalması, parça aşınmasının azalması olduğunu söyleyebiliriz.



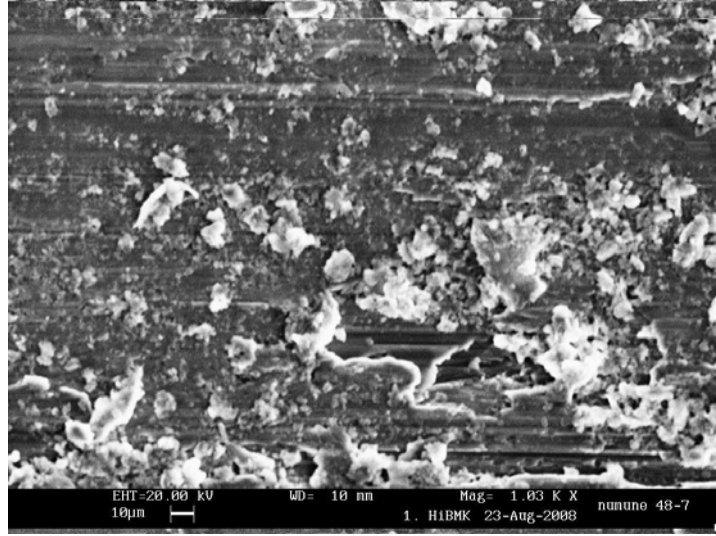
Şekil 5.106. Yağlı şartlarda yüke bağlı yüzey pürüzlülük değişimi.



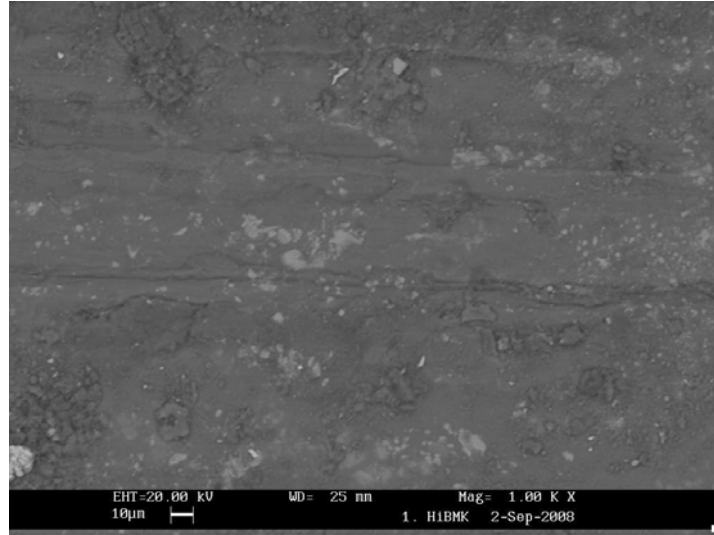
Şekil 5.107. Yağlı şartlarda aşındırma hızına bağlı yüzey pürüzlülük değişimi.

Yine burada yükün artması ile yüzey pürüzlülük değeri artmaktadır. Aşındırma hızı artışı ile yüzey pürüzlülük değerleri düşmeye başlamakta, 50 N yükte bu azalış 600 d/d'nin üzerine çıktığında tekrar yükselme trendine girmektedir. 75 N yükte hız artışı ile birlikte pürüzlülük artışı doğru orantılı olarak artmaktadır. Tabii burada kuru şartlardan farklı olarak yağlamanın

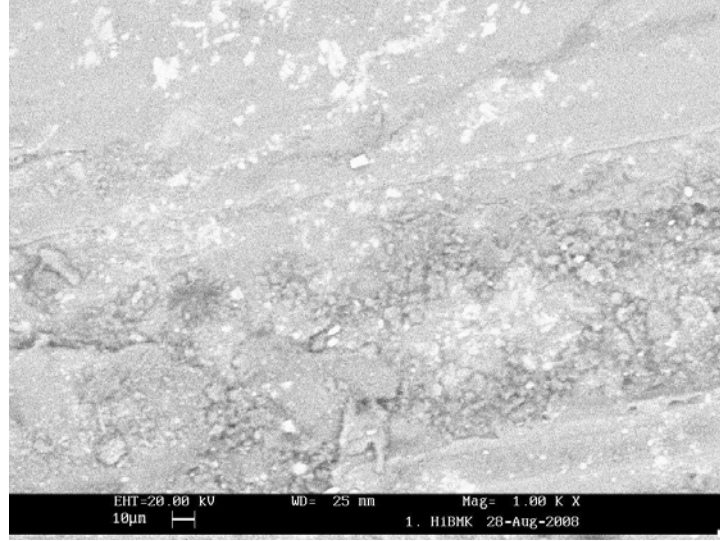
etkisiyle gerek yük artışı gerekse hız artışları ile belli bir süre pürüzlülük değerleri azalmakta, yağlama etkisinin azalmasıyla pürüzlülük değerleri de yükselmektedir. Bunun nedeni ise, yağın eksilmesiyle sürtünme kuvvetinin artarak, aşındırılan yüzeyi pürüzlü hale getirmesidir.



Şekil 5.108. Yağlı şartlarda 50 N yük ve 800 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.



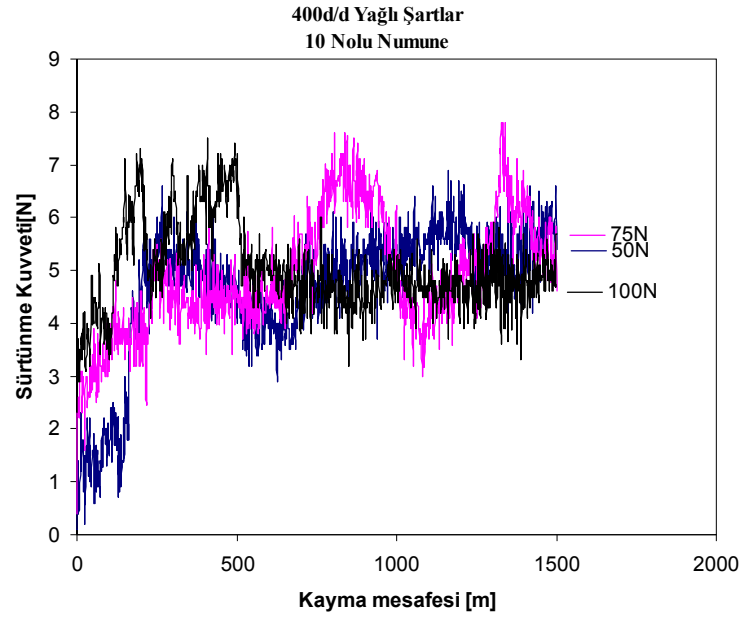
Şekil 5.109. Yağlı şartlarda 75 N yük ve 600 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.



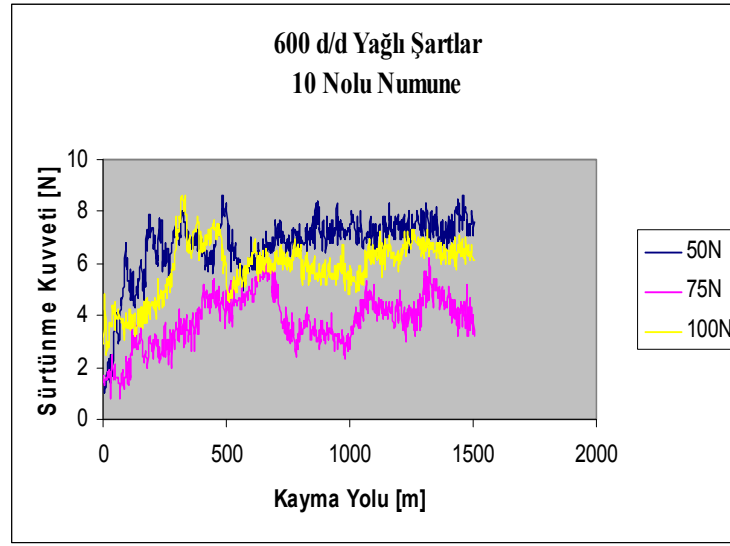
Şekil 5.110. Yağlı şartlarda 100 N yük ve 800 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 48 nolu numunenin SEM görüntüsü.

#### 5.4.10.2. 10 Nolu Numune Aşındırma Testleri

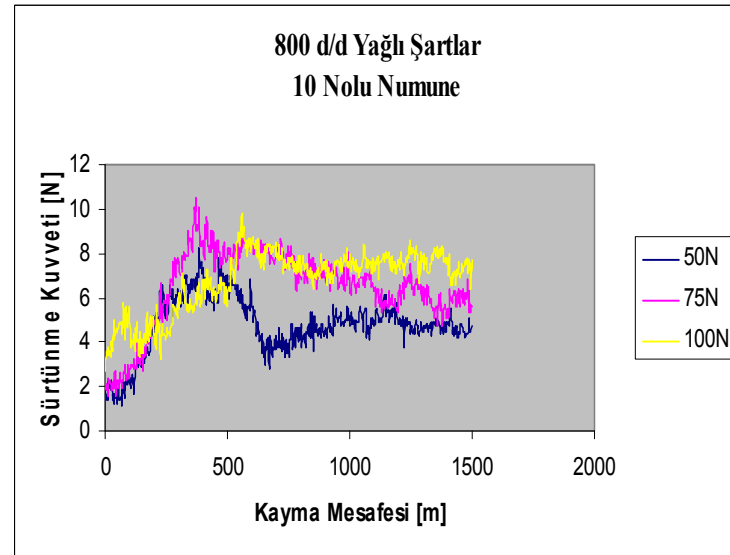
10 nolu numune üzerinde yağlı şartlarda yapılan aşındırma test verilerinden elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.111. 400 d/d hızda aşındırma test grafiği.



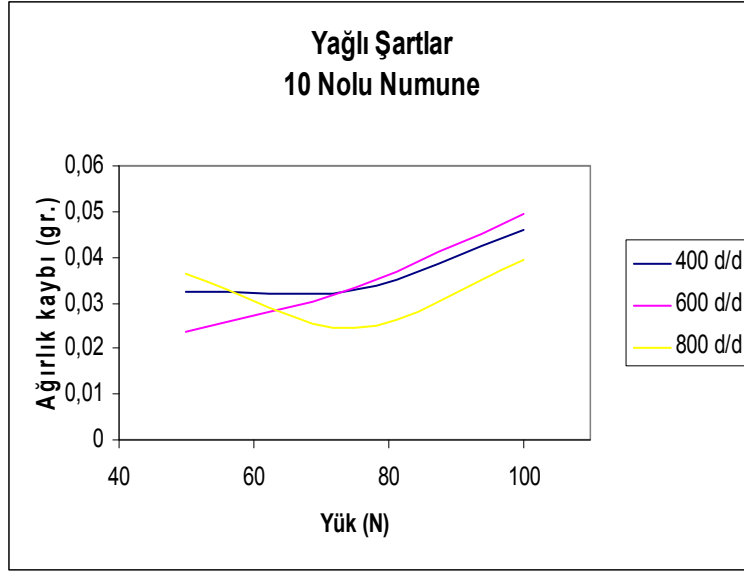
Şekil 5.112. 600 d/d hızda aşındırma test grafiği.



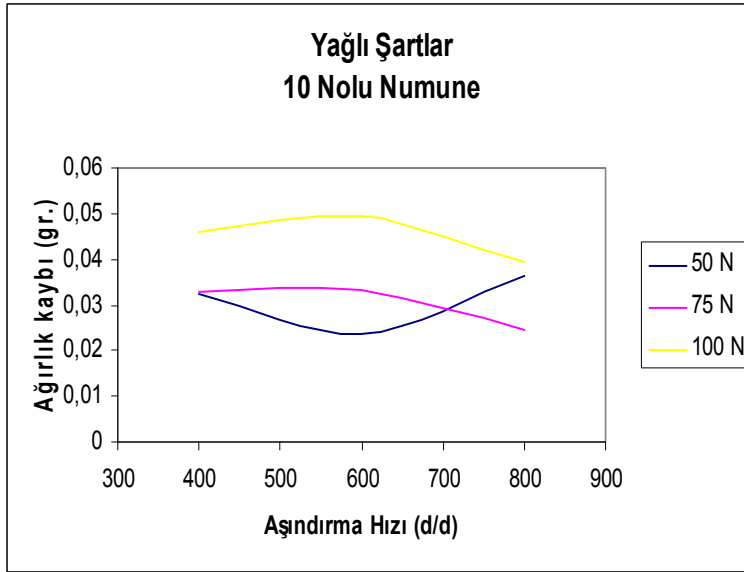
Şekil 5.113. 800 d/d hızda aşındırma test grafiği.

Bu numunede 48 nolu numuneye göre daha az gözenek bulunduğundan grafiklerden de görüldüğü gibi sürtünme kuvvetindeki artışlar daha hızlı gerçekleşmiştir.

Gene burada sürtünme kuvveti kayma mesafesinin 500 metresine kadar bir artış göstermekte daha sonra paralel bir konuma gelerek sabit hale geçmektedir. Bunun sebebi yağlanmanın kayma mesafesinin 500 üncü metresinden sonra randımanlı bir şekilde gerçekleşmesinden ileri gelmektedir.

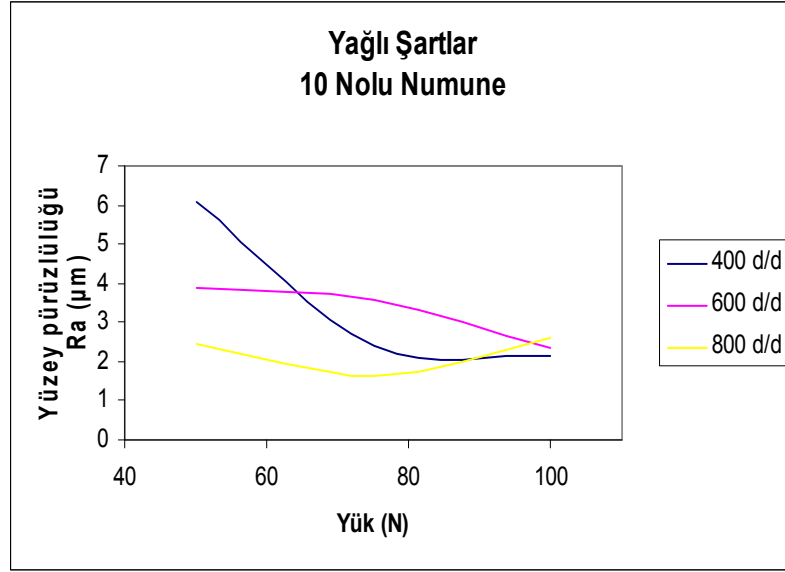


Şekil 5.114. Yağlı şartlarda yüke bağlı ağırlık kaybı değişimi.

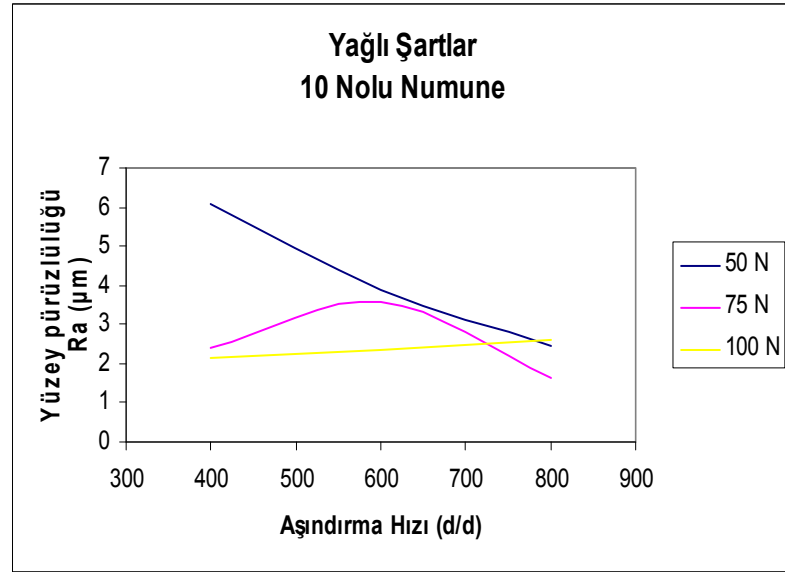


Şekil 5.115. Yağlı şartlarda aşındırma hızına bağlı ağırlık kaybı değişimi.

Yük artışıyla beraber ağırlık kaybında artış meydana gelmektedir. Ancak aşındırma hızı artışı ile ağırlık kaybında düşme meydana gelmektedir. 50 N yükte 600 d/d hızdan sonra ağırlık kaybı artış eğilimi göstermektedir.



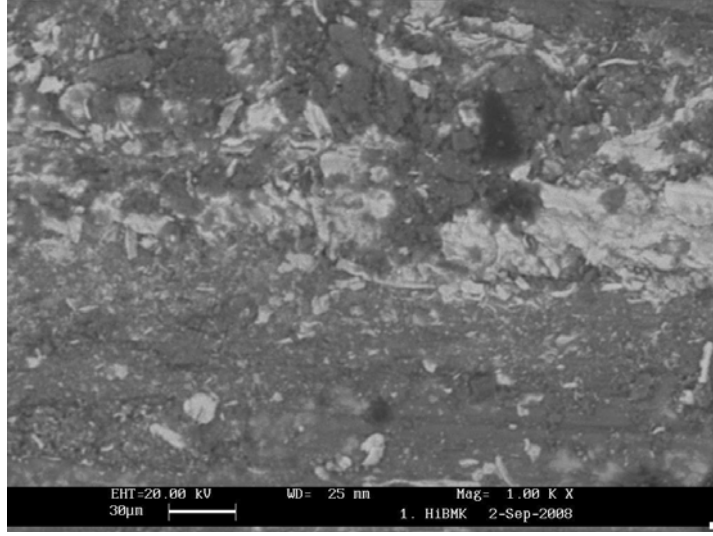
Şekil 5.116. Yağlı şartlarda yüke bağlı yüzey pürüzlülük değişimi.



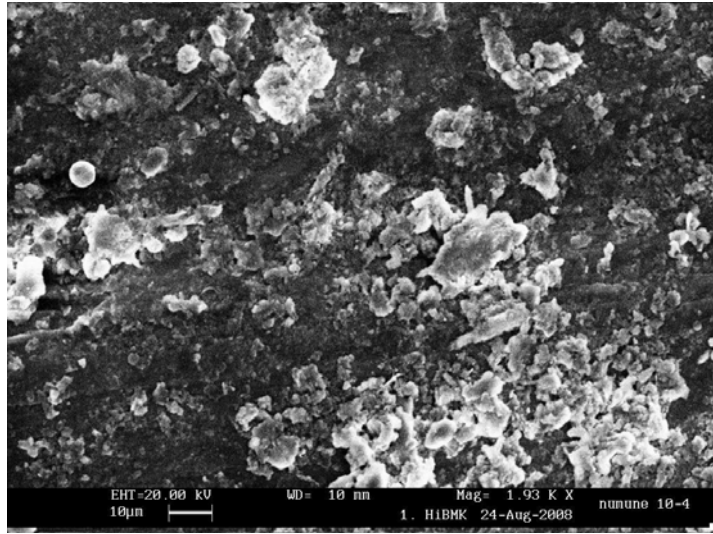
Şekil 5.117. Yağlı şartlarda aşındırma hızına bağlı yüzey pürüzlülük değişimi.

Yük artışıyla beraber yüzey pürüzlülüğü azalmakta, bunun nedeninin yük artışıyla beraber yağlı yüzeyde meydana gelen film tabakası kalınlığının azalması olduğunu söyleyebiliriz. Kaymalı yataklardan da bilindiği gibi film tabakası kalınlığı azaldıkça sürtünme katsayısı da düşmektedir. Ayrıca yukarıdaki grafikten görüldüğü gibi hızın artışıyla pürüzlülük azalmakta

ancak 100 N yükte bir yükselme eğilimi göstermektedir.

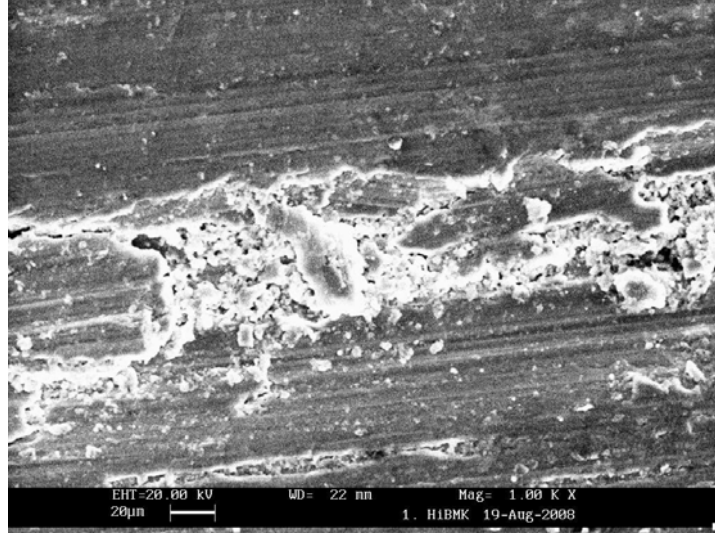


Şekil 5.118. Yağlı şartlarda 50 N yük ve 800 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 10 nolu numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 5.119. Yağlı şartlarda 75 N yük ve 600 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 10 nolu numunenin SEM görüntüsü.





Şekil 5.120. Yağlı şartlarda 100 N yük ve 800 d/d hızda aşındırma testine tabi tutulan 10 nolu numunenin SEM görüntüsü.

## **6. BÖLÜM**

### **DENEYSEL ÇALIŞMALARDA GÖZENEKLİ MALZEME ÜRETİMİ YAPILAN ÜÇ FARKLI YÖNTEMİN KARŞILAŞTIRILMASI**

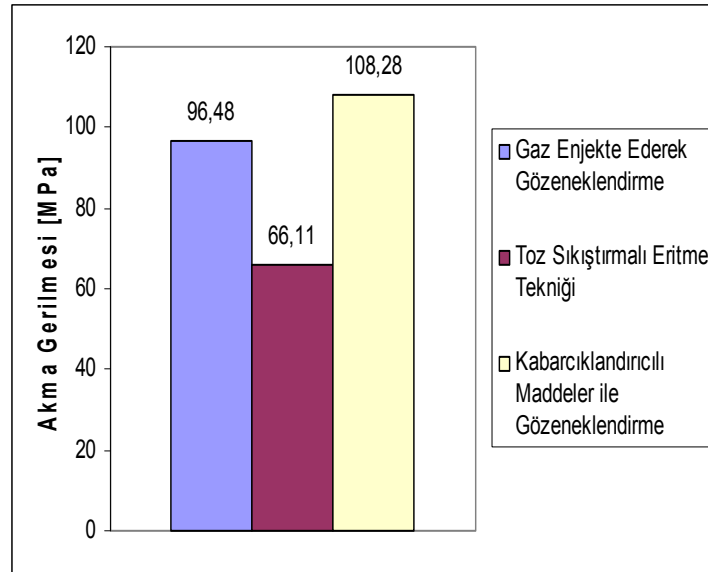
#### **6.1. GİRİŞ**

Gaz enjekte ederek gözeneklendirme, toz sıkıştırırmalı ergitme tekniği ve kabarcıklandırıcı maddeler ile gözeneklendirme yöntemlerinin uygulandığı bu çalışmada her üç yöntemle elde edilen deneysel veriler bu bölümde karşılaştırılmıştır.

Mukayeseler; ortalama basma mukavemeti değerleri, gözeneklilik, elektrik iletkenliği, sertlik değerleri ve özgül ısı değerleri göz önüne alınarak yapılmıştır.

#### **6.2. AKMA (BASMA) GERİLMESİ**

Her üç yöntemle elde edilen numuneler üzerinde yapılan basma mukavemeti değerlerinin ortalamaları alınarak oluşturulan grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir.

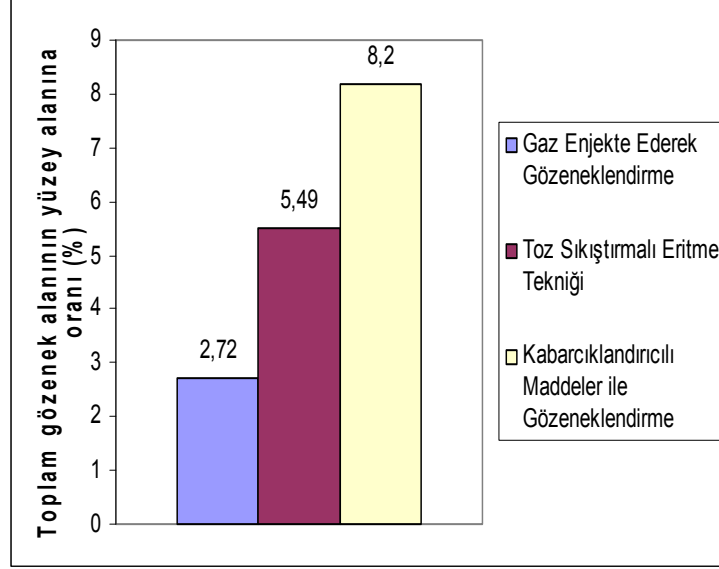


Şekil 6.1. Akma gerilmesi değerlerinin karşılaştırılması.

Şekilden de görüldüğü gibi en yüksek akma (basma) gerilmesi değeri Kabarcıklandırıcı Maddeler ile Gözeneklendirme (KMG) yönteminde en düşüğü ise Toz Sıkıştırılmalı Eritme (TSE) yönteminde görülmektedir. Gaz Enjekte Ederek Gözeneklendirme (GEG) yönteminde akma gerilmesi değeri KMG dekinden düşük olmakla beraber buna yakın bir değer çıkmaktadır. Bunun sebebinin KMG ve GEG yöntemlerinin her ikisinde de Alüminyumun ergitilerek dökülmesi TSE de ise toz halinden preslenmesidir. Toz halinden preslenen malzeme her ne kadar sinterlenmiş olsa da mukavemeti diğerlerine göre daha düşüktür.

### 6.3. GÖZENEKLİLİK

Her üç yöntemle elde edilen numuneler üzerinde yapılan gözeneklilik değerlerinin ortalamaları alınarak oluşturulan grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir.

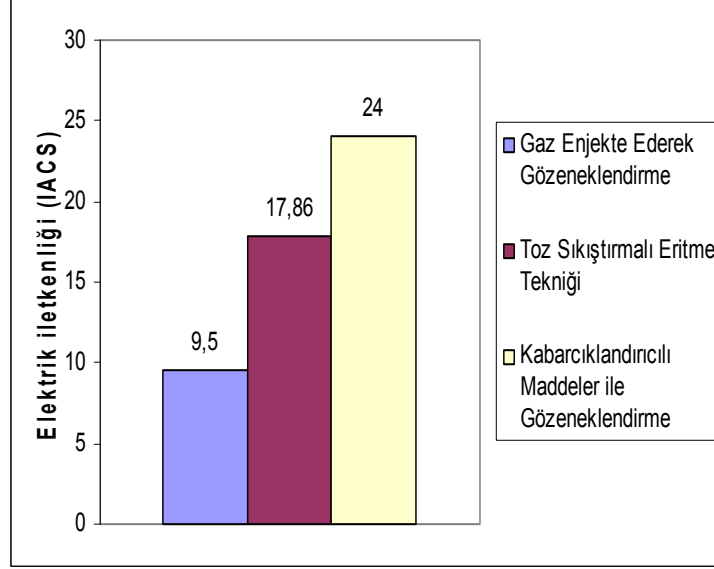


Şekil 6.2. Gözeneklilik değerlerinin karşılaştırılması.

Gözeneklilik açısından en fazla KMG de gözenek oluştuğu görüldü. Bunun nedeni KMG işleminde döküm esnasında  $TiH_2$  nin oluşturduğu kabarcıkların Alüminyumun dökümden hemen sonra katılaşmaya başlayarak tutulmasıdır.

#### 6.4. ELEKTRİK İLETKENLİĞİ

Her üç yöntemle elde edilen numuneler üzerinde yapılan elektrik iletkenlik değerlerinin ortalamaları alınarak oluşturulan grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir.

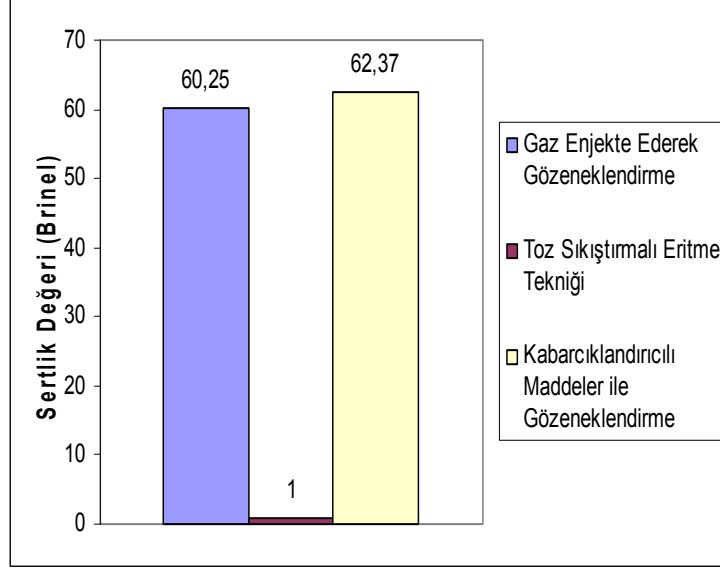


Şekil 6.3. Elektrik iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması.

Elektrik iletkenliğini değerlendirdiğimizde KMG ile üretilen numunelerin en fazla gözeneğe sahip olmasına rağmen diğerlerine göre iletkenliğinin de yüksek çıktığı görülmüştür. Bunun sebebinin gözenek yapısından değil kullanılan malzeme ve oluşan bileşim yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

## 6.5. SERTLİK DEĞERLERİ

Her üç yöntemle elde edilen numuneler üzerinde yapılan sertlik değerlerinin ortalamaları alınarak oluşturulan grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir.

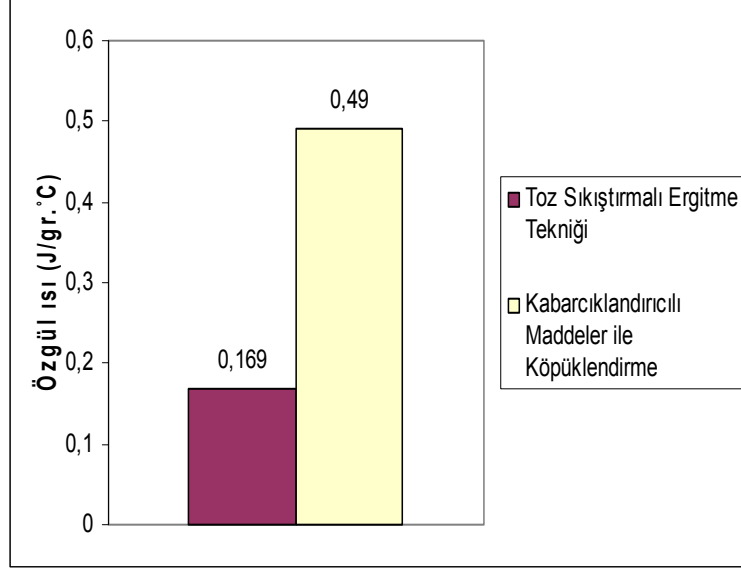


Şekil 6.4. Sertlik değerlerinin karşılaştırılması.

GEG ile KMG yöntemleriyle elde numunelerin sertlik değerleri birbirine yakın çıkarken, TSE ile üretilen numuneler sertlikleri ölçülemeyecek kadar düşük olduğundan grafikte gösterebilmek için 1 olarak verilmiştir.

## 6.6. ÖZGÜL ISI DEĞERLERİ

Elde edilen numuneler üzerinde yapılan özgül ısı değerlerinin ortalamaları alınarak oluşturulan grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 6.5. Özgül ısı değerlerinin karşılaştırılması.

Özgül ısı değerlerinde de KMG ile üretilen numunelerin ortalama değerinin yüksek olduğu görülmüştür. Buda KMG ile üretilen numunelerin ısı soğurma (yutma) kapasitesinin diğerlerine göre daha fazla olduğunu göstermektedir.

## 6.7. SONUÇ

Sonuç olarak Kabarcıklandırıcı maddeler ile gözeneklendirme yöntemiyle üretilen numunelerin akma (basma) gerilmesi , gözeneklilik, elektrik iletkenliği, sertlik ve özgül ısı değerleri diğer yöntemle üretilen numunelere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Bu özellikler bu tür malzemelerin kullanım yerine göre değerlendirilerek üretim yöntemi seçilebilir. Örneğin KMG ile üretilen bir malzeme, hem gözenekliliği fazla olup hem de basma gerilmesi ve sertliğin yüksek olması istenilen bir yerde kullanılabilir.



## 7. BÖLÜM

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 7.1. SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen deneysel verilerin değerlendirilmesi neticesinde çıkarılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

##### 7.1.1. Gaz Enjekte Ederek Doğrudan Gözeneklendirme Yöntemi Deney Sonuçları

1. Görüntü analizlerinin değerlendirilmesi sonucu, gaz debisi artışının ergimiş alüminyum ana malzemesinin köpüklenmesini arttırdığı dolayısıyla gözenekliliği arttırdığı tespit edilmiştir. Gaz debisi artışının aynı zamanda gözenek alanını da arttırdığı belirlenmiştir.
2. Gözenek alanının artmasıyla sertlik değerinde düşme meydana gelmektedir. Bunun nedeni, oluşan boşlukların sertliği düşürmesinden ileri gelmektedir.
3. Basma testi sonuçlarına göre; gözenek oranının artması ile basma direncinde azalma olduğunu görülmüştür. Bunun nedeni gözenekliliğin basma direncini düşürmesidir.
4. Sabit karıştırıcı devir sayısında, argon gazı debisinin artışı ile malzemede oluşan, gözenek sayısı ve nominal çapının yanı sıra, alan oranının da arttığı görülmüştür.
5. Elektrik iletkenlik değerleri gözenek alanının artışı ile düşmektedir. Bunun nedeni, gaz ile dolu olan gözenekli yapıdan dolayı oluşan süreksizliklerin elektrik iletkenlik değerini düşürmesidir.

### 7.1.2. Toz Sıkıştırılmalı Ergitme Tekniği Deney Sonuçları

1. Gözenek yapıcı malzeme olarak kullanılan  $TiH_2$ 'nin hacim oranı arttığında gözenek alanı yüzdesi düşmektedir. Benzer şekilde  $TiH_2$ 'nin tane büyüklüğü arttığında da gözenek alanı yüzdesinin düştüğü tespit edilmiştir.
2. Toz sıkıştırılmalı ergitme tekniği ile üretilen numunelerde elektrik iletkenlik değerleri diğer Alüminyum alaşımlarına ( Al 1100, 6061, 2024, 7075 ) oranla çok düşük çıktığı görülmüştür. Dolayısıyla gözenekli yapıların elektriksel iletkenlik değeri düşük çıkmaktadır. Bunun nedeni malzemede oluşan gözenekli yapının süreksizliğe neden olmasıdır. Ayrıca metalografik analizde tespit edildiği gibi yapıdaki oksit oluşumu elektrik iletkenlik değerlerindeki düşmenin nedenlerinden biridir.
3. Gözenek alanı ve çapının artışına bağlı olarak elektrik iletkenlik değerleri düşmektedir. Bunun nedeni de hava ile dolu olan gözenekli yapının süreksizliğe neden olarak elektrik iletkenliğini zayıflatmasıdır.
4. Yapılan sertlik ölçümlerinde numunelerin sertliklerinin ölçülemeyecek kadar yumuşak olduğu tespit edildi.
5. Özgül ısının değerlendirilmesi sonucu, gözenek alanının artmasıyla özgül ısıda bir artış görülmektedir. Bu durum gözeneklerin hava ile dolmasından ileri gelmektedir.
6.  $TiH_2$  nin tane büyüklüğünün 1-3  $\mu m$  olduğu durumda basma mukavemeti ortalama değerlerinin, < 44  $\mu m$  olması durumuna göre daha yüksek olduğu görüldü. Aynı şekilde hacim oranının % 1 olduğu durumda % 0,6'ya kıyasla basma mukavemeti ortalama değerlerinin yüksek olduğu görüldü. Bu durumun yani gözenek yapıcı malzeme olarak kullanılan  $TiH_2$ 'nin tane büyüklüğünün artmasıyla birlikte basma mukavemeti değerlerinin artmasının nedeni imaj analiz neticelerinden Şekil 5.53.'de belirtildiği gibi gözenek miktarının azalmasından ileri gelmektedir. Benzer şekilde gözenek yapıcı madde olarak kullanılan  $TiH_2$ 'nin eriyiğe karıştırma hacim oranının artmasıyla basma mukavemetinin artmasının nedeni oluşan gözenek miktarının azalmasından ileri gelmektedir.
7.  $TiH_2$ 'nin tane büyüklüğü arttırıldığında, maksimum basma yükünde enerji ve elastisite

modülü değerleri de artmaktadır.

**8.** TiH<sub>2</sub> nin hacim oranı yükseldikçe, basma mukavemeti değerlerinin yükseldiği buna mukabil maksimum basmadaki enerji değerlerinin düştüğü görülmüştür. Buna neden olarak hacim oran katsayısının artırılması ile gözenekli yapının azaldığı sonucunu çıkarabiliriz. Yapılan imaj analizleri neticesinde oluşturulan, TiH<sub>2</sub>'nin farklı hacim oranlarında oluşan gözenek durumunu gösteren Şekil 5.52.'de bu sonucu doğrulamaktadır.

**10.** TiH<sub>2</sub> hacim oranı artışı ile maksimum basma yükünde enerji değeri azalırken basma mukavemeti değerleri artmaktadır.

**11.** Malzemenin ortalama basma mukavemeti değerleri ile maksimum basma yükündeki enerji değerlerinin ters orantılı olduğu tespit edilmiştir.

**12.** Gözenek yapıcı malzeme olarak kullanılan TiH<sub>2</sub>' nin hacimce kullanılma oranı attıkça elastisite modülü değerinde artma görülmektedir.

**13.** Sintersiz numunelerin basma mukavemetinin sinterli numunelere kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buradan gözenekli yapıdan dolayı malzemenin basma mukavemetinin azaldığı buna mukabil maksimum basma yükünde ki enerji değerlerinin yükseldiği görülmüştür. Sintersiz numunelerin gözenekliliği sinterlilere göre daha az olduğundan basma mukavemeti değerleri de daha yüksek çıkmaktadır.

**14.** Sinterli malzemelerin maksimum basma yükünde enerji değerlerinin sintersiz numunelere göre çok daha yüksek olduğu görülmüştür.

### **7.1.3. Kabarcıklandırıcı Maddeler İle Gözeneklendirme Deney Sonuçları**

**1.** Kabarcıklandırıcı madde olarak kullanılan TiH<sub>2</sub>'nin eriyiğe karıştırma oranı artırıldıkça basma mukavemeti değerlerinin düştüğü görülmektedir.

**2.** Gözenek oluşturucu madde olarak kullanılan TiH<sub>2</sub>'nin eriyiğe karıştırılma oranı artırıldıkça gözenek oranı, miktarı ve boyutları da artmaktadır.

3. TiH<sub>2</sub> karıştırılma oranının artması ile basma mukavemeti değerlerinin azalmasının nedeni olarak, gözenek miktarının TiH<sub>2</sub> oranının artması ile yükselmesi olduğunu söyleyebiliriz.
4. Ağırılıkça TiH<sub>2</sub> oranının artışına bağlı olarak elektrik iletkenlik değerleri dalgalanmakla beraber düşüş eğilimi göstermektedir. Bunun sebebinin görüntü analizlerinde belirlendiği gibi gözenek oluşturuucu madde olarak kullanılan TiH<sub>2</sub>'nin eriyiğe karıştırılma oranı arttırıldıkça gözenek oranı, miktarı ve boyutlarının artmasıdır. Gözenek alanı artışı malzeme iç yapısında süreksizliklere neden olduğundan elektrik iletkenlik değerlerini de düşürmektedir.
5. Üretilen numunelere ait ortalama elektrik iletkenlik değeri, numune üretiminde kullanılan Al 1100 ve değişik alüminyum alaşımlarından olan; Al 6061, 2024 ve 7075'in elektriksel iletkenlik değerlerinden düşüktür. Sonuçta gözenekli yapının elektrik iletkenlik değerini düşürdüğü sonucu ortaya çıkmaktadır.
6. Özgül ısı değerlerinin gözenek alanı artışıyla genel olarak arttığı görülmektedir.
7. Kabarcıklandırıcı madde olarak kullanılan TiH<sub>2</sub> oranının sertliğe etkisi değişim göstermekle beraber özellikle 48 nolu numunede diğer numunelere oranla oluşan gözenek miktarının yüksek olması, gözenekli yapının sertlik değerinde düşmeye neden olduğunu göstermektedir.
8. Kabarcıklandırıcı maddeler ile gözeneklendirme yöntemiyle üretilen numunelerin, toz sıkıştırılmalı ergitme tekniği ile üretilen numunelere kıyasla basma mukavemeti değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.
9. Bu yöntemle üretilen 48 ve 10 nolu numunelere yağlı ve kuru şartlarda yapılan aşındırma testleri sonucunda; 48 nolu numunenin kuru şartlarda yapılan testlerinde, gözenekli yapıya gelindiğinde aşınmaların malzemedan parça koparması şeklinde gerçekleştiği görüldü ve bu süreçte aşınmaların çok hızla gerçekleşerek malzemeyi küçülttüğü görüldü. Bunun sebebinin gözenekli bölgelere gelindiğinde numune üzerindeki yüzey alanının azalması ile numune üzerine gelen kuvvetin artarak sürtünme kuvvetini arttırmasıdır. Buda grafiklerde pik yapan kısımlar olarak görülmektedir. Aynı

zamanda yükün ve aşındırıcı disk dönü devrinin artmasıyla sürtünme kuvveti artmaktadır.

**10.** Kuru şartlarda sürtünme kuvveti belli bir değere kadar artmakta daha sonra yatay konuma gelerek sabitlenmektedir. Tabii olarak gözenekli bölgelerde sürtünme kuvvetinin artmasıyla zikzaklar yapmaktadır.

**11.** Yağlı şartlar altında yapılan aşındırma testlerinde; yükün artmasıyla sürtünme kuvvetinde artış görülmektedir. Ancak burada yağdan dolayı sürtünme kuvveti değerleri kuru şartlara göre 5 kat daha azdır. Sürtünme kuvveti değerleri ilk başlarda düşük seviyelerde iken sonradan artmaya başlamaktadır. Bunun sebebinin numunelerin gözeneklerine nüfuz etmiş olan yağın zamanla azalmasından ileri gelmektedir. Ancak gene de numunelerin gözenekli olmasından dolayı yağın azalması daha uzun süre almıştır.

**12.** Yağlı şartlar altında yapılan aşındırma testlerinde; 10 nolu numunede 48 nolu numuneye göre daha az gözenek bulunduğu sürtünme kuvvetindeki artışlar daha hızlı gerçekleşmiştir.

#### **7.1.4. Gözenekli Malzeme Üretiminde Uygulanan Üç Farklı Yöntemin Karşılaştırma Sonuçları**

**1.** Basma gerilmesi değerinin karşılaştırılması sonucu, Kabarcıklandırıcı Maddeler ile Gözeneklendirme (KMG) yönteminde en düşüğü ise Toz Sıkıştırılmalı Ergitme (TSE) yönteminde görülmektedir. Gaz Enjekte Ederek Gözeneklendirme (GEG) yönteminde basma mukavemeti değeri KMG dekinden düşük olmakla beraber buna yakın bir değer çıkmaktadır. Bunun sebebinin KMG ve GEG yöntemlerinin her ikisinde de alüminyumun ergitilerek dökülmesi TSE de ise toz halinden preslenmesidir. Toz halinden preslenen malzeme her ne kadar sinterlenmiş olsa da mukavemeti diğerlerine göre daha düşüktür.

**2.** Gözeneklilik açısından en fazla KMG de gözenek olduğu görüldü. Bunun nedeni KMG işleminde döküm esnasında  $TiH_2$  nin oluşturduğu kabarcıkların alüminyumun dökümden hemen sonra katılaşmaya başlayarak tutulmasıdır.

**3.** Elektrik iletkenliğini değerlendirdiğimizde KMG ile üretilen numunelerin en fazla

gözeneğe sahip olmasına rağmen diğerlerine göre iletkenliğinin de yüksek çıktığı görülmüştür. Bunun sebebinin gözenek yapısından değil kullanılan malzeme ve oluşan bileşim yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. GEG ile KMG yöntemleriyle elde numunelerin sertlik değerleri birbirine yakın çıkarken, TSE ile üretilen numuneler sertlikleri ölçülemeyecek kadar düşük çıkmıştır.

5. Özgül ısı değerlerinde de KMG ile üretilen numunelerin ortalama değeri diğerlerine göre daha yüksektir. Buda KMG ile üretilen numunelerin ısı soğurma (yutma) kapasitesinin diğerlerine göre daha fazla olduğunu göstermektedir.

## 7.2. ÖNERİLER

1. Gaz enjekte ederek köpüklendirme yönteminde, köpüklendirme sonrası eriyiğin yüzeyinde oluşan köpüğü sönmürlenmeden alabilmek için bant sistemi yapılabilir.

2. Toz sıkıştırılmalı ergitme tekniği ile alüminyum esaslı malzemelerle çalışılması halinde, 800 °C ve üzeri sıcaklıklarda sinterleme yapılması halinde malzemede çatlak ve yarıklar meydana geldiğinden bu sıcaklıkların altında sinterleme yapılması uygun olur.

3. Bu çalışmada hücresel yapıli malzeme üretim yöntemlerinden sadece üç tanesi üzerinde çalışılmıştır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, Katı-gaz ötektik katılaştırma (gasar), İçi boş kürelerin sinterlenmesi gibi diğer üretim yöntemleri üzerinde de çalışmaların yapılması faydalı olacaktır.

4. Yapılan bu çalışmalarda Alüminyum esaslı malzemeler üzerinde durulmuştur. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, hücresel yapıli metal üretiminde kullanılan diğer malzemeler (Çinko, bakır, prinç vb.) üzerinde de çalışmalar yapılabilir.

5. Gene bundan sonra yapılacak çalışmalarda, elde edilecek numuneler üzerinde, abrasiv katkılı yağ veya toz abrasivli aşındırma, darbe sönmüleme ve ses iletim gibi testler de yapılarak sonuçların irdelenmesi yapılabilir.

## KAYNAKLAR

1. Bart-Smith, Bastawros AF. Mumm Dr, Evans AG. Porous and cellular materials for structural applications. MRS Symp. Proc., vol.521, 1998.p.71.
2. Burzer J, Bernard T, Bergmann HW, Bamm O. Metal foams and porous metal structures. MIT Pres- Verlag, 1999. p.277.
3. Degischer, H.-P. ve Kriszt, B., Handbook of Cellular Metals, Production, Processing and Applications, Wiley-VCH, ISBN 3-527-29320-5, (2002).
4. Banhart, J., 'Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams', Progress in Materials Science, 46, 559-632, (2001).
5. Gibson, L. J. ve Ashby, M.F., Cellular Solids, Second Edition, Cambridge Solid State Science Series, ISBN 0-521-49560-1, (1997).
6. Sharafat, S., Ghoniem, N., Ying, A., Sawan, M., Williams ve B., Babcock, J., Ceramic Foams: Inspiring new solid breeder materials, 12. International Workshop on Ceramic Breeder Blanket Interactions, Forschungszentrum Karlsruhe, Germany, September 16-17, (2004).
7. Queheillalt, D.T., Katsumura, Y. ve 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).
8. Evans, A. G., Hutchinson, J. W. ve Ashby, M. F., Cellular metals, Current Opinion in Solid State and Materials Science, 3, 288-302 (1998).
9. Haberling C, Haldenwanger H6, Bernard T. Metal foams and porous metal structures. MIT press- Verlag, 1999.p.37.
10. Kaptay 6. Metal foams and porous metal structures. MIT. Pres- Verlag, 1999.p.141.
11. Gargely V, Degisher HP, Clyne TW. In: Comprehensive Composite Materials, vol. 3. Amsterdam: Elsevier Science, 2000.
12. Miyoshi T, Itoh M, Akiyama S, Kitahara A. Porous and cellular Materials for structural applications. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998.p.133.
13. Banhart J. Baumeister J, Weber M. Euro. Conf. Advanced PM Materials, Birmingham, UK, 23-25 October 1995.p.201
14. F.K.ko, A.I.Geshury, and J.W.Song: Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. on "Composite Materials" (ICCM-11), Gold Coast, Queensland, Australia, July 1997, (ed. M.L. Scott), Vol. 2, 464-473; 1997, Leatherhead, woodhead.

15. D.Sherman and D.G.Brandon: *J.Mater.Res.*, 1997,12,1335-1343
16. Fischer GW.US Patent 3,052,967,1962
17. Niemeyer M.,1999,DFG Symposium 11-12 November 1999, Bonn,Germany
18. Drolet JP.*Int J Powder Met* 1977;13:223
19. Banhart J.*Aluminium* 1999;75:1094
20. Elzey DM,Wadley HNG.*Acter Mater* 2001;49:849
21. Chen F,He DP.Metal foams and porous metal structures. In:Banhart J,Ashby MF,Fleck NA,editors.*Int.Conf.*,Bremen,Germany, 14-16 June.Bremen:MIT Press-Verlay 199.P.163
22. Thiele W.*Metals and Materials* 1972; 6:349
23. Schultz o, des ligneris A,Haider o,Starke P.*Advanced Engineenhg Materials* 2000;2:215
24. Asholt P. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors.*Int.Conf.*,Bremen,Germany,14-16 June.Bremen:MIT Press Verlag,1999.p.133.
25. Lloyd DJ, McLeod AD, Morris PL, Jin I.*Int. Patent Application WO 91/19823*,1991.
26. Ridgway JA. US Patent 3,297,431,1967.
27. Kenny LD.In: *Materials science forum*, vols 217-222.Switzerland:Transtec Publications, 1996.
28. Niebylski LM, Jarema CP, Lee TE. US Patent 3,940,262, 1976.
29. Sosnick B. US Patent 2,553,016, 1947.
30. Jin I, Kenny LD, Sang H. US Patent 5,112,697, 1992.
31. Berry CB. US Patent 3,669,654, 1972.
32. Bjorksten J, Rock EJ. US Patent 3,707,367, 1972.
33. Simone AE, Gibson LJ. *Acta Mater* 1998;46:3109.
34. Beals JT, Thompson MS. *J Mat Sci* 1997;32:3595.
35. Hydro Aluminium Norway. Product data sheets. 1994.
36. Huschka S. Thesis, Düsseldorf, Germany: VDI-Verlag, 1998 [in German].
37. Langseth M, Hopperstad OS, Langseth M. Structures under Shock and Impact V (SUSI 98), Thessaloniki, Greece, 24-26 June 1998.p. 143.
38. Ma L, Song Z. *Scripta Met* 1998;39:1523.



39. Miyoshi T, Itoh M, Akiyama S, Kitahara A. *Advanced Engineering Materials* 2000;2:179.
40. Niebylski LM, Jarema CP, Lee TE. US Patent 3,816,952, 1974.
41. Han F, Zhu Z, Gao J. *Met Trans* 1998;29A:2497.
42. Lu TJ, Hess A, Ashby MF. *J Appl Phys* 1999;85:7528.
43. Harte AM, Fleck NA, Ashby MF. *Advanced Engineering Materials* 2000;2:219.
44. Miyoshi T. Private communication, 1998.
45. Albright DM, Chilcott WR, Floridis TP. US Patent 3,360,361, 1967.
46. Hall CG. US Patent 3,692,513, 1972.
47. Berry CB. 1972, US Patent 3,671,221, 1972.
48. Berry CB, Valdo AR. US Patent 3,725,037, 1973.
49. Niebylski LM, Jarema CP, Lee TE. US Patent 3,843,353, 1974.
50. Bjorksten J. US Patent 3,782,919, 1974.
51. Jarema CP, Niebylski LM. US Patent 3,719,223, 1973.
52. Jarema CP, Niebylski LM. US Patent 3,839,080, 1974.
53. Thornton PH, Magee CL. *Met Trans* 1975;6A:1253.
54. Shapovalov VI. US Patent 5,181,549, 1993.
55. Simone AE, Gibson LJ. *Acta Met* 1996;44:1437.
56. Baumeister J. German Patent 4,018,360, 1990.
57. Markakı, A.E. ve Clyne, T.W., Characterisation of impact response of metallic foam/ceramic laminate, *Materials Science and Technology*, July-August, 16, 785-791, (2000).
58. YU, J.L., LI, J.R. ve HU, S.S., Strain-rate effect and micro-structural optimization of cellular metals, *Mechanics of Materials*, (2005).
59. Kadar, CS., Keneseı, P., Lendval, J. ve Rajkoviıds, ZS., Energy absorption properties of metal foams, *VI. évfolyam 1. szám*, 6, January, (2005).
60. Daxner, T., Böhm, H.J. ve Rammerstorfer, H.G., Mesoscopic simulation of inhomogeneous metallic foams with respect to energy absorption, *Computational Materials Science*, 16, 61-69, (1999).
61. YU, C-J., CLAAR, T.D. ve EIFERT, H.H., Use of metal foams in armor systems, US 6,698,331 (2004).

62. Pashak JF. US Patent 2,953,396, 1960. Wang DB, Wu JJ, Yuan GJ, Li CG. *Mat Sci Eng.* 2000;A286:282.
63. Olurin OB, Fleck NA, Ashby MF. *Scripta Mater* 2000;43:983
64. Banhart J, Stanzick H, Helfen L, Baumbach T. *Applied Physics Letters* 2001;78:1152.
65. Koza, E., Leonowicz, M., Wojciechowski, S. ve Simancık, F., Compression strength of aluminium foams, *Materials Letters*, 58, 132-135, (2003).
66. Fusheng, H., Jianning, W., Hefa, C. ve Junchang, G., Effect of process parameters and alloy compositions on the pore structure of foamed aluminum, *J. Materials Processing and Technology*, 138, 505-507, (2003).
67. Papadopoulos, D.P., Konstantinidis, I.CH., Papanastasiou, N., Skolianos, S., LEFAKIS, H. ve TSIPAS, D.N., Mechanical properties of Al foams, *Materials Letters*, 58, 2574-2578, (2004).
68. DAVIS, N. G., Enhancement of solid-state foaming of titanium by transformation superplasticity, *Doktora Tezi*, Northwestern University, Illinois, ABD, (2002).
69. German, R.M. *Powder Metallurgy Science*, The Pennsylvania State University Second Edition, 308-309, (1984).
70. Kuhn, H.A. ve Medlin, D., *ASM Handbook, Mechanical Testing and Evaluation*, 8, 143-147, (2000).
71. Standard methods of compression testing of metallic materials at room temperature, E 9 – 81, *ASTM Standards*, 176-188, (1981).
72. Kato, K., Adachi, K., *Wear Mechanisms*, *Modern Tribology Handbook*, vol. 1(Principles of Tribology), CRC Pres, London, 2001
73. Halling, J. , *Principles of Tribology*, MacMillan Press, London, 1975
74. Karamış, M. B., Wear properties of steel plasma nitrided at high temperatures, *Material science and Engineering, A*, 168 49 – 53, 1993
75. Karamış, M. B., Experimental study of the abrasive wear behaviour op plasma nitrided gearing steel wear, 161, 199-206, (1993)

## ÖZGEÇMİŞ

Ali Dinçer OGAN 1969 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 1990 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Sakarya Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1991 yılında Hava Kuvvetleri Komutanlığı'nda Mühendis Subay olarak göreve başladı. 1999 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitime başladı. 2001 yılında Yüksek Lisans programını tamamlayıp, 2002 yılında aynı Enstitüde Doktora eğitime başladı. Halen Hava Lojistik Komutanlığında, 1 nci Endüstri Denetim Ekip Komutanlığı görevini yürüten Binbaşı Ali Dinçer OGAN, evli ve iki çocuk babasıdır, İngilizce bilmektedir.

Adres : 1 nci Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı

26320 - ESKİŞEHİR

Tel : 0 222 237 59 40 - 4134

Faks : 0 222 237 28 46

e-mail : adogantr@yahoo.com