KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ALÜMİNYUM KÖPÜK MALZEMELERİN UYGULAMAYA YÖNELİK ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ALPAY TAMER ERTÜRK

KOCAELİ 2013

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ALÜMİNYUM KÖPÜK MALZEMELERİN UYGULAMAYA YÖNELİK ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ALPAY TAMER ERTÜRK

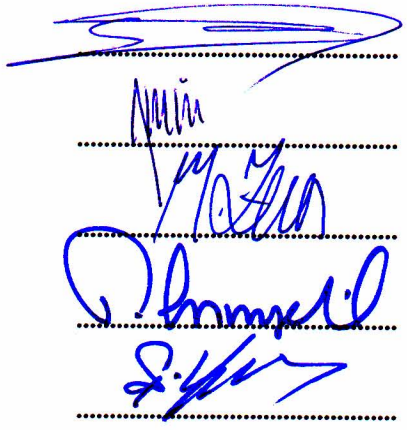
Yrd.Doç.Dr.Tülin ŞAHİN
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr.Ahmet ÜNAL
Jüri Üyesi, YTÜ

Prof.Dr.Muzaffer ZEREN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Şenol YILMAZ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 24.09.2013

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Sunulan tez çalışması, alüminyum köpük malzemelerin uygulamaya yönelik üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla yürütülen deneysel bir araştırmayı içermektedir. İlgili araştırma çalışması Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi tarafından BAP 2010/093 proje numarası ile desteklenmiştir.

Araştırma çalışmasının ihtiyaç duyduğu maddi desteği sağlayan Kocaeli Üniversitesi Rektörü Prof. Dr. S. Şener KOMSUOĞLU'na, çalışmalar boyunca yardım ve yakınlıklarını eksik etmeyen Kocaeli Üniversitesi Makine Müh. Bölüm Başkanı Prof. İbrahim UZMAN'a, süreç içerisinde engin bilgi birikimlerini esirgemeyen Tez İzleme Komitesi hocalarım Prof. Dr. Ahmet Ünal (YTÜ), Prof. Dr. Muzaffer ZEREN ve Tez Danışmanlığı'nı yürüten Yrd. Doç. Dr. Tülin ŞAHİN'e, çalışmada desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Yücel BİROL, Dr. Esin GÜNAY ve Yrd. Doç. Dr. E. Asım GÜVEN'e, inceleme desteği veren meslektaşım ve sevgili eşim Eda ERTÜRK'e, beni bugünlere getiren babam M. Metin ERTÜRK ve annem Fatma ERTÜRK'e, moral kaynaklarım Alper, Didem, İdil ve İrem ERTÜRK'e sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Ülkemizin dünya çapında yüksek teknoloji üreten ve geliştiren devletlerden birisi olmasını, ayrıca benzer araştırmaların ülkemizde artarak sürmesini ve yeterli desteği bulabilmesini dilerim.

Eylül - 2013 Alpay Tamer ERTÜRK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR ix
ÖZET x
ABSTRACT xi
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 2
1.1. Hücresel veya Kafes Yapılı Malzemeler 2
1.2. Hücresel Metalik Malzemelerin Üretim Metotları 4
1.2.1. Hücresel metallerin sıvı halden üretimleri 7
1.2.1.1. Metallerin doğrudan köpürtülmesi 7
1.2.1.2. Katı gaz ötektik katılaşma (Gasars) 15
1.2.1.3. Kompakt toz ergitme tekniği 17
1.2.1.4. Döküm yöntemleri 25
1.2.1.5. Sprey şekillendirme (Osprey) yöntemi 28
1.2.2. Hücresel metallerin katı halde üretilmesi 30
1.2.2.1. Metal tozların sinterlenmesi 31
1.2.2.2. Gaz hapsetme tekniği 33
1.2.2.3. Çamurların köpüklendirilmesi 34
1.2.2.4. Yer tutucu katkılara dayanan hücresel metaller 35
1.2.2.5. İçi boş metalsel küreler 37
1.2.2.6. Metal tozu bağlayıcı yöntemleri 40
1.2.2.7. Reaksiyon sinterlemesi 41
1.2.3. Elektro—çökeltme tekniği 41
1.2.4. Buhar çökeltme 43
1.3. Alüminyum Köpüklerin Köpürtücü Ajan ile Üretimleri 45
1.4. Metalik Köpüklerin Yapısal ve İşlevsel Özellikleri 49
1.5. Metalik Köpüklerin Mekanik Özellikleri 52
1.6. Metalik Köpüklerin Termal Özellikleri 59
1.7. Metalik Köpüklerin Elektriksel Özellikleri 60
1.8. Eğilme—Hakim Yapılar 61
1.9. Gerilme—Hakim Yapılar 62
1.10. Maxwell Denge Kriteri 67
1.11. Metalik Köpüklerin Karakterizasyonu 70
2. MALZEME ve YÖNTEM 75
2.1. Malzeme ve Üretim Yöntemi 75
2.2. Üretim Ekipmanları 77
2.2.1. Isıtma Parametreleri 79
2.2.2. Konumlama boşluğu ve sargı tasarımı 80
2.3. Deneysel Yöntem 83
3. BULGULAR ve TARTIŞMA 88

3.1. Birinci Üretim Çalışmaları 88
3.2. İkinci Üretim Çalışmaları 93
3.3. Üçüncü Üretim Çalışmaları 97
4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 125
KAYNAKLAR 127
EKLER 134
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 174
ÖZGEÇMİŞ 176

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Maddenin bir fazının diğeri içerisinde dağılımı 2
Şekil 1.2. Hücresel metalik malzemelerin üretim metotlarına çeşitli gruplar halinde genel bakış 4
Şekil 1.3. Farklı imalat metotları ile üretilmiş rastgele hücresel yapılı metallere ait topolojik yapı örnekleri 5
Şekil 1.4. Gaz enjeksiyonu ile doğrudan eriyik köpüklenmesi..... 8
Şekil 1.5. Gaz enjeksiyonu yöntemiyle üretilen iki farklı yoğunluk ve hücre boyutlarına sahip köpük levhalar 9
Şekil 1.6. MMC eriyiklerin köpürtülmesinde parçacık boyutu ve içerik seçimi.....10
Şekil 1.7. Ajan ilavesiyle eriyiklerin köpüklendirilmesi (Alporas yöntemi).....12
Şekil 1.8. Karıştırma süresinin kalsiyum ilavesinden sonraki bir alüminyum eriyiğin viskozitesi üzeresine etkisi 13
Şekil 1.9. TiH_2 ilavesi ile üretilmiş alüminyum köpüğe ait 80x80 mm^2 lik bir parçanın gözenek yapısı.....14
Şekil 1.10. Gasar yöntemi için uygulama aparatı 16
Şekil 1.11. Gasar yönteminde yüzeye normal yönde gözeneklerin yapısı görülmektedir 17
Şekil 1.12. Kompakt toz ergitme tekniği.....18
Şekil 1.13. 750 °C 'de köpürtülen alüminyum/TiH_2 kompaktların genleşme davranışı 19
Şekil 1.14. Kompakt toz ergitme tekniğiyle üretilmiş bir kurşun köpüğün kesit görüntüsü.....20
Şekil 1.15. Köpük enjeksiyon işlemi.....21
Şekil 1.16. Alüminyum köpük özlü (12 mm kalınlık) ve iki çelik sac yüzeyli sandviç panel.....22
Şekil 1.17. Alüminyum/alüminyum köpük sandviç.....23
Şekil 1.18. Alüminyum yüzey üzerine alüminyum köpük kaplanmış 60 mm uzunluklu bir parça, alt kısım kaplama yapılmamış alüminyum köpük, orta kısım termal püskürtme sonrası yapı, üst kısım son işleme 24
Şekil 1.19. Hassas döküm yöntemi ile hücresel metallerin üretimi 26
Şekil 1.20. Sol: duocel malzemeye ait SEM görüntüsü, Sağ: hassas döküm yöntemiyle üretilmiş bazı parça örnekleri 27
Şekil 1.21. Yer tutma dolgu maddeleri kullanarak hücresel metalik malzemelerin üretimi 27
Şekil 1.22. Mikro balon köpüğü (syntactic foam) üretiminde işlem basamakları 29
Şekil 1.23. Sprey şekillendirme ile metal köpük üretimi 29
Şekil 1.24. Sinterlenmiş gözenekli ürünler.....30
Şekil 1.25. Boşluk tutucu dolgular kullanılarak üretilmiş bir hücresel alüminyum malzeme, yoğunluk 1,1 gr/cm^3 31

Şekil 1.26. Yaklaşık 100 mm çaplı partiküllerin sinterlenmesiyle elde edilmiş gözenekli bronz yapısı....32
Şekil 1.27. Gaz hapsetme tekniği....33
Şekil 1.28. Gaz hapsetme tekniği kullanılarak imal edilmiş Ti6Al4V malzemeden gözenekli öze sahip sandviç yapı....34
Şekil 1.29. Metal tozlarından gözenekli metalsel yapıların üretiminde boşluk tutucu tekniği....36
Şekil 1.30. Toz metalurjisi yöntemiyle hücresel titanyum üretiminde boşluk tutucu olarak polimer (solda) ve magnezyum (sağda) granülleri kullanımı....37
Şekil 1.31. İçi boş küre yapıların üretiminde genleştirilmiş polistiren (strafor) kaplama işlemi....38
Şekil 1.32. Sinterleme ile paslanmaz çelik kürelerden imal edilmiş açık içi boş küre yapısının tek eksenli deformasyon öncesi ve sonrası görünümü, parçaların çapları yaklaşık 20 mm....39
Şekil 1.33. Metal tozlarıyla yönlendirilmiş gözenekli hücresel metallerin üretimi....40
Şekil 1.34. Altıgen kesitli yönlendirilmiş gözenekli demir numunesi (gözenek oranı %86)....41
Şekil 1.35. Metalik köpük üretiminde elektro çökertme tekniği....42
Şekil 1.36. Elektro çökeltme tekniği ile üretilmiş nikel köpük ve içi boş payanda kenarlarının mikro görünümü....43
Şekil 1.37. Nikel karbonil yöntemiyle üretilmiş Incofoam yapı örneği (20 ppi)....44
Şekil 1.38. Dizayn değişkenleri....51
Şekil 1.39. Metal ve metalik köpük yapının gerilme uzama davranışlarının kıyaslanması....53
Şekil 1.40. Hücresel katıya ait bir gerilme genleme eğrisi ve önemli parametreler....54
Şekil 1.41. Düşük bağlantılı hücre yapısı yüklendiği zaman hücre kenarında meydana gelen bükülme....54
Şekil 1.42. Sünek malzeme esaslı köpükler hücre kenarları plastik bükülme göstererek çökerler....55
Şekil 1.43. Hücre kenarlarının elastik burkulması ile elastomerik köpük çöker....56
Şekil 1.44. Gevrek yapılı köpüklerde çökme....57
Şekil 1.45. Tipik bir hücresel yapı, açık hücreli köpük....61
Şekil 1.46. Açık hücreli köpük yapıda bulunan idealize hücre modeli....62
Şekil 1.47. Mikro—payanda yapısı (M>0) ve oluşturduğu birim hücre....63
Şekil 1.48. Gerilme—hakim yapıda şematik gerilme-genleme eğrisi....65
Şekil 1.49. Farklı hücresel yapılar için logaritmik ölçekte bağıl elastisite modülüne karşı bağıl yoğunluk değerleri....66
Şekil 1.50. Farklı hücresel yapılar için logaritmik ölçekte bağıl dayanım karşı bağıl yoğunluk....67
Şekil 1.51. Pin mafsallı çerçeve....68
Şekil 1.52. Çokyüzlü hücreler....69
Şekil 1.53. Elastomerik köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği....73

Şekil 1.54. Elastik-plastik köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği 74
Şekil 1.55. Elastik-kırılgan köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği 74
Şekil 2.1. Konveksiyon ısıtma fırını 78
Şekil 2.2. İndüksiyonla ısıtma yöntemi 79
Şekil 2.3. Merkezden kaçık yerleştirilen işparçası içinde indüksiyon ısıtma dağılımı 81
Şekil 2.4. Reterm marka indüksiyon ısıtma sistemi 82
Şekil 2.5. (a) El presi (10 ton), (b) Dartec üniversal çekme basma test cihazı (60 ton) 83
Şekil 2.6. Siemens marka tridoros 5S X ray analiz cihazı 84
Şekil 2.7. Zwick marka Vikers mikrosertlik cihazı 84
Şekil 2.8. X ışını difraktometre cihazı 85
Şekil 2.9. DSC analiz cihazı 85
Şekil 2.10. Nikon ters metal mikroskobu 86
Şekil 2.11. Jeol 6060 SEM cihazı 86
Şekil 2.12. Brüel Kjaer titreşim ölçme cihazı 87
Şekil 3.1. Alüminyum tozu ve TiH_2 tozlarının karıştırılmadan önce ısıl işleme tabi tutulması (480 °C/ 3 saat) 88
Şekil 3.2. Alüminyum tozu ve TiH_2 tozlarının karıştırılması 89
Şekil 3.3. Öncü ve köpük numune kalıpların hassas kesme cihazı ile hazırlanması 89
Şekil 3.4. Öncü kalıp yüzükleri (Ø2,2 / h: 15) 89
Şekil 3.5. Öncü kalıp kapağı (Ø2,2 / h: 5) 90
Şekil 3.6. El mengenesinde preslenmiş öncü 90
Şekil 3.7. Sıkıştırma miktarını hesaplamada kullanılan tork metre 91
Şekil 3.8. Öncü üretim sıcaklığının uygulanması 91
Şekil 3.9. (a) El mengenesinde oda sıcaklığında 30 dk ve (b) sıcaklık (430 °C / 30 dk) 92
Şekil 3.10. El presinde sıkıştırılmış ancak sıcaklık uygulanmamış öncünün fırın içerisinde köpürmesi 93
Şekil 3.11. El presi için soğutmalı baskı takozu 93
Şekil 3.12. Fırında serbest kalıpta elde edilen metalik köpük yapı 94
Şekil 3.13. El presine uygulanan bakır boru soğutma sistemi 95
Şekil 3.14. İkinci üretim çalışmalarında elde edilen metalik köpük yapı 95
Şekil 3.15. Fırında serbest kalıpta elde edilen metalik köpük yapı 96
Şekil 3.16. Çelik boru içerisinde elde edilen metalik köpük yapı 96
Şekil 3.17. Akış diyagramı 98
Şekil 3.18. Öncü hazırlama kalıbı 99
Şekil 3.19. Cam boru fırınlama kalıpları 99
Şekil 3.20. Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan TiH_2 tozlarına ait fotoğraflar 101
Şekil 3.21. Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan TiH_2 tozlarının argon atmosferindeki DSC eğrileri 102
Şekil 3.22. Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan TiH_2 tozlarının farklı sıcaklıklar için XRD eğrileri 103
Şekil 3.23. Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan TiH_2 tozları kullanılarak üretilen öncülere ait köpük üretim eğrileri 104

Şekil 3.24. ASTM 799'a göre dağılım 105
Şekil 3.25. Ortalama partikül dağılım grafiği 106
Şekil 3.26. En-boy oranı istatistikî dağılım grafiği 106
Şekil 3.27. Titanyum hidrit partikül dağılım grafiği 107
Şekil 3.28. Uygulanan yüklemelere ait yük-zaman grafiği 108
Şekil 3.29. Yüklemeler sonrası oluşturulan Vikers sertlik izleri 108
Şekil 3.30. Yüklemeler sonrası oluşturulan Vikers sertlik analiz ve yoğunluk değerlerinin değişim grafiği 110
Şekil 3.31. İndüksiyon sıcaklığı, presleme yükünün ve zamana göre değişim grafiği 110
Şekil 3.32. Presleme altında indüksiyon uygulaması sonrası SEM görüntüleri 111
Şekil 3.33. Toplam gözenek adedi, red gözenek adedi ve yüzde gözenek kabul oranının yüzde kalıp doldurma oranlarına göre grafiği 111
Şekil 3.34. Ortalama gözenek alanının ve yoğunluğun yüzde kalıp doldurma oranlarına göre grafiği 112
Şekil 3.35. Farklı kalıp doldurma oranlarına göre üretilmiş numunelerin X-ray görüntüleri 113
Şekil 3.36. Farklı kalıp doldurma oranlarında üretilen köpük yapıların basma gerilmesi ile ezilme davranışlarının kıyaslanması 114
Şekil 3.37. Farklı oranlarda TiH_2 içeren öncülerin değişken fırın sıcaklığına bağlı üretimlerinde gözenek kabul oranı grafiği 117
Şekil 3.38. Metal köpük hücre yapısının SEM analizi, X20 118
Şekil 3.39. Metal köpük hücre duvar yapısının SEM analizi, X100 119
Şekil 3.40. Metal köpük hücre duvar yapısının SEM analizi, X150 119
Şekil 3.41. Sönüm oranı parametresi analiz düzeneği 120
Şekil 3.42. Titreşim modelleri: (a) tekerlek yol (b) kütle köpük modeli 121
Şekil 3.43. Alüminyum köpüğün sönüm oranı analiz sonucu 123
Şekil 3.44. Endüstriyel titreşim pedinin sönüm oranı analiz sonucu 124

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Hücresel metaller ve metal köpükler için üretim metotları.....45
Tablo 1.2. Metalik Köpük Üretim Yöntemleri 46
Tablo 2.1. Al tozlarının fiziksel özellikleri.....75
Tablo 2.2. Atomize alüminyum tozlarının tipik kimyasal analizleri.....77
Tablo 2.3. Titanyum hidrüre ait teknik özellikler 77
Tablo 2.4. Isıtma ve tutma esnasında uygulanan elektriksel büyüklükler.....82
Tablo 3.1. Birinci üretim çalışmalarında uygulanan büyüklükler tablosu 92
Tablo 3.2. TiH_2 ajana uygulanan ısıl işlem planı 101
Tablo 3.3. Preslemeler sonrası elde edilen kompaktların 50, 100 ve 200 büyütmelerde optik görüntüleri.....109
Tablo 3.4. TiH_2 miktarı ve fırın sıcaklığına bağlı metal köpük üretimleri 115
Tablo 3.5. TiH_2 miktarı ve fırın sıcaklığına bağlı metal köpük üretimlerinin röntgen görüntüleri 116
Tablo 3.6. Alüminyum tozu, öncü numune ve metalik köpüğün yüzde element içeriği analiz değerleri 117
Tablo 3.7. Metal köpük numunelerin sönüm oranı ölçümleri 122

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

$\tilde{E}$: Köpük yapının elastisite modülü, (N/mm^2)
E^* : Gözenekli malzemenin elastik modülü, (N/mm^2)
E_s : Hücre duvarlarını oluşturan malzemenin elastik modülü, (N/mm^2)
F_b : Euler burkulma kuvveti, (N)
I : Atalet momenti, (mm^4)
M_f : Eğilme momenti, (Nmm)
P_o : Atmosferik basınç, (atm)
S : Standart sapma, (ölçüm biriminin karesi)
Y : Gözlem değeri
t : Kare kesit uzunluğu, (mm)
$\bar{U}$: Gerilme–genelme eğrisi altındaki alan, (mm^2)
W1 : Kuru olarak tartılan numune ağırlığı, (gr)
W2 : Gözenekler yağ ile kapatıldıktan sonra tartılan numune ağırlığı, (gr)
$\bar{\varepsilon}_d$: Genleme yoğunlaşması, (%)
f : Frekans, (Hz)
ρ : Özdirenç, (Ωm)
ρ^* : Gözenekli malzemenin yoğunluğu, (kg/m^3)
ρ_s : Hücre duvarlarını oluşturan malzemenin yoğunluğu, (kg/m^3)
δ : Çökme miktarı, (mm)
$\delta_{\text{ısıtma}}$: Isıtma derinliği, (m)
$\sigma_{y,s}$: Köpük yapının esas malzemesinin akma dayanımı, (N/mm^2)
$\bar{\sigma}_{el}$: Köpük yapıda elastik çökmeye neden olan gerilme, (N/mm^2)
σ_{pl} : Plato gerilmesi, (N/mm^2)
σ_{ys} : Hücre duvarlarını oluşturan malzemenin akma gerilmesi, (N/mm^2)
μ : Malzemenin manyetiklenme miktarı, (H/m)
λ_g : Kuru hava için ısıl iletkenlik, ($Wm^{-1}K^{-1}$)
λ_s : Katı hücre yüzeyleri ve kenarlarından olan ısıl iletkenlik, ($Wm^{-1}K^{-1}$)
Ø : Gözenek duvarlarındaki katı oranı, (%)

Kısaltmalar

DCS : Differential Scanning Calorimetry (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre)
EDS : Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi)
NOG : Normal Olasılık Grafiği
SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
XRD : X-ray Diffraction (X-ışını Kırınımı)

ALÜMİNYUM KÖPÜK MALZEMELERİN UYGULAMAYA YÖNELİK ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Alüminyum köpükler 2000'li yıllardan itibaren sahip oldukları düşük özgül ağırlıkları, yüksek enerji sönümleme kabiliyetleri ve diğer hücresel metallere kıyasla yüksek basma mukavemetlerinden ötürü ön plana çıkmaktadırlar. Konuyla ilgili günümüze kadar yürütülmüş olan çalışmalar genel olarak temel alüminyum alaşımlarından hücresel yapılı metalik malzemelerin çeşitli yöntemlerle üretilmesi ve hücresel metallerin basma, darbe benzeri yükler altındaki karakteristik davranışlarının tayininden ibarettir. Yürütülen çalışmada alüminyum alaşımından toz metalürjisi üretim tekniği kullanılarak elde edilen metalik köpüklerin mühendislik malzemesi olarak ele alınıp uygulamaya yönelik üretimi yapılarak ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Mekanik Özellik, Metal Köpük.

PRODUCTION OF APPLICATION ORIENTED ALUMINUM FOAMS AND INVESTIGATION OF THEIR MECHANICAL PROPERTIES

ABSTRACT

Since the early 2000's, aluminum foams are preferred due to their low specific weight, high energy dissipation capacity and high compressive strength compared to other cellular metals. The studies conducted up to now on the subject are generally on producing cellular metals, using basic aluminum alloys, by means of various methods, to determine the characteristic behaviors of such loads as compression and pulse. This study was conducted to obtain the metallic foams by manufacturing and processing technique of powder metallurgy with aluminum alloys. Moreover, application oriented aluminum foams have produced and their mechanical characteristics have been investigated by various research methodologies.

Keywords: Aluminum, Mechanical Properties, Metal Foams.

GİRİŞ

Metalik köpüklerle ilgili ilk çalışmayı Benjamin Sosnick, 1948 yılında alüminyum içerisinde cıva buharlaştırarak yapmış daha sonra John Elliott 1961 yılında Bjorkstenh Araştırma Laboratuarları'nda aynı metodu tekrarlayarak metalik köpüğü üretmiştir [1-3]. Sıklıkla atıfta bulunulan metalik hücresel malzemelere dair genel bir yeniden gözden geçirme makalesi 1983 yılında Davies ve Zhen tarafından yayınlanmıştır [4]. Bu yayından önce metallik köpüklerin üretim, karakterizasyon ve uygulamalarıyla alakalı yeni birçok gelişme olmuştur. Bu yayından sonrada mekanik özellikleri konu alan birkaç genel yeniden gözden geçirme makaleleri ve bu türden malzemelerin üretimi ile kullanım uygulamalarını özel bir bakışla ele alan çalışmalar yayınlanmıştır [5, 7]. Bir tasarım kılavuzu olarak mekanik köpüklerin özellikleri ve uygun kullanımlarına kılavuzluk eden yeni bir yaklaşım Ashby ve arkadaşlarınca 2000 yılında yayınlanmıştır [8]. Gözeneklendirilebilen metaller ve alaşımlar arasında alüminyum, titanyum, çelik, nikel bazlı süperalaşımlar, kurşun, çinko ve kalay sayılabilir [9].

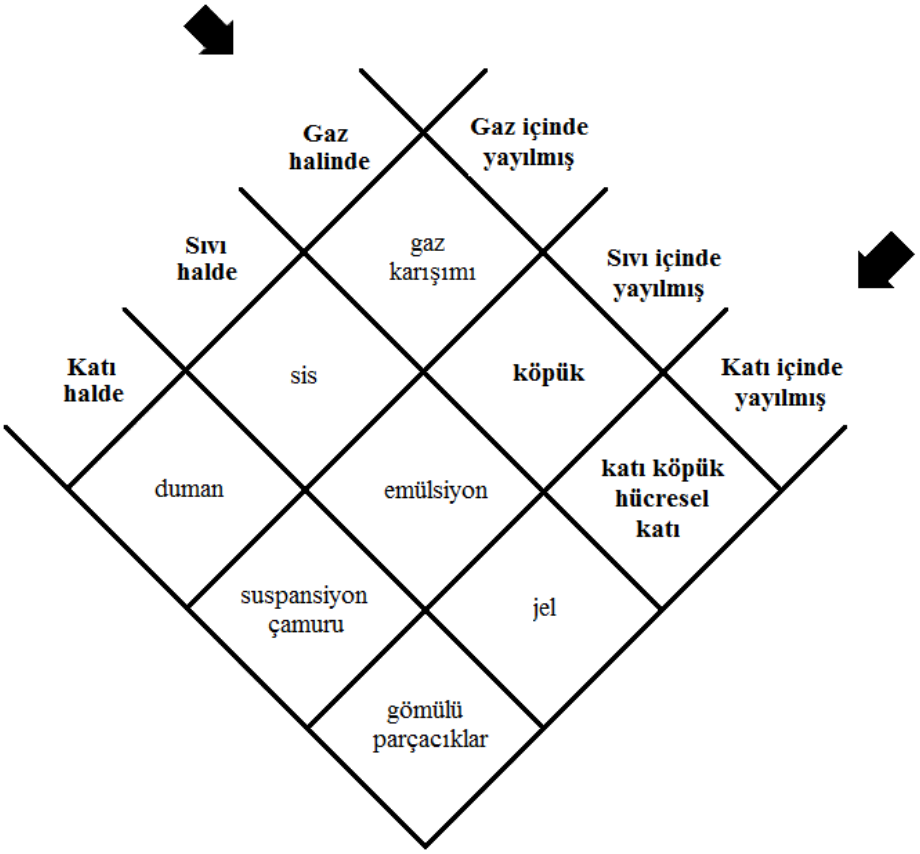
Bu konuda yapılan araştırma çalışmaları metalik köpük malzemelerin üretimi konusunda 2000 li yılların başlarından itibaren araştırma faaliyetlerinin hız kazandığını göstermiştir. Metalik köpüklerin birçok özel uygulamada mekanik ve fiziksel özellikleri yönünden üstünlük göstermeleri bu çalışmaları daha da teşvik etmektedir.

Bununla beraber metalik köpük üretim yöntemlerinin çeşitliliği ve yeni üretim yöntemlerinin araştırılması ürün maliyeti açısından da avantajlar sağlamaktadır. Alüminyum köpük malzemelerin uygulamaya yönelik üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi konusunun seçimi şu ana kadar uygulamaya yönelik kayda değer bir çalışma olmamasıdır. Çalışmada gerçekleştirilen metalik köpük üretimlerinde kapalı hücre yapısının küresellik bakımından daha iyi niteliğe sahip olması hedeflenmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Hücresel veya Kafes Yapılı Malzemeler

Köpük terimi her zaman doğru olarak kullanılmamaktadır. Bu sebeple ayrıntılı olarak ele alınmalıdır. Şekil 1.1 incelendiğinde bir fazın diğeri içindeki dağılım olasılıklarının tamamının listelendiği görülmektedir. Buradaki her bir faz maddenin 3 halinden biridir. Köpükler sıvı ya da katı fazlardan birisinde düzenli dağılıma sahip gaz fazı barındırırlar. Bağımsız gaz sırasıyla sıvı ya da katı kısımdan ayrılmış olarak yer alır. Böylece hücreler sıvı ya da katı tarafından tamamen çevrelenmiş ve birbirinden bağımsız bağlantısız bir durumdadır. Köpük terimi esas anlamıyla gaz kaparcıklarının sıvı içerisinde dağılarak hapsolduğu yapı anlamı taşır [10, 11].



Şekil 1.1. Maddenin bir fazının diğeri içerisinde dağılımı [10]

Bu tip köpük morfolojileri sıvının katılaştırılmasıyla elde edilebilir ve katı köpük olarak adlandırılırlar. Metalik köpük ifadesiyle de genel olarak katı köpük yapı belirtilmektedir. Sıvı metalik köpük yalnız malzeme üretim sürecinde meydana gelen bir fazdır. Katı köpükler daha sık bir kullanıma sahip olan hücresel katı olarak ifade edilen kavramın özel bir halidir [10, 11].

Bir sıvının içerisinde yüzey enerjisinin minimizasyonu sadece belirli bir köpük hücre yapısında söz konusudur. Katı köpük sıvı halinin şekilsel formunun görüntüsüne sahiptir ve biçimsel olarak da sınırlanmıştır. Bu durumun tersine hücresel katıların sıvı halden üretilme gerekliliği yoktur ve bundan dolayı neredeyse bütün morfolojilerde olabilirler, örneğin sinterlenmiş tozların tipik açık yapılı hali gibi. Bu tür gözenekli yapılar için sünger ifadesi daha uygun bir terim olsa da çoğu zaman köpük olarak adlandırılırlar [10, 11].

Hücresel (kafes yapılı) malzemelerin birim hücre uzunlukları milimetre veya mikrometre mertebesindedir. Bu durum hücresel malzemeleri hem yapısal hem de malzeme olarak ele almayı gerektirir. Bu bağlamda, hücresel malzemeler tıpkı uzay kafes yapılarının analiz edilişi gibi klasik mekanik metotları kullanılarak analiz edilebilir. Ancak, diğer yöntem göz önüne alındığında hücresel yapıları sadece bir dizi payanda olarak ele alınamaz, başlı başına yapısal bir malzeme olarak özelliklerini de değerlendirmek gerekir. Bu değerlendirmede hücresel yapılar monolitik (tek parça) olarak ele alınırlar. Geçmişte, köpük yapılar, kafes yapılı malzemelerin belirli bir alt kümesi olarak değerlendirilerek ve genellikle farklı tip kafes yapı çalışmaları yürütülmüştür [12, 13].

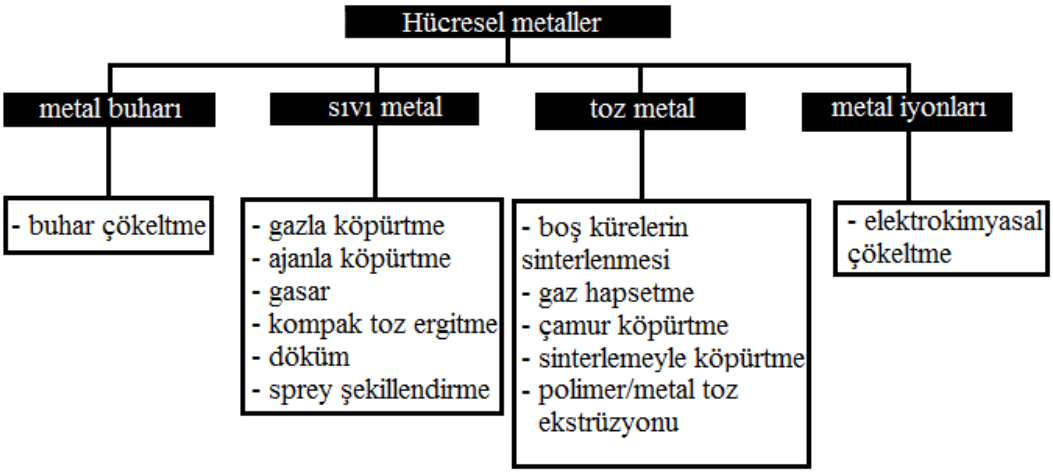
İlk çalışmalar köpük özelliklerinin bağıl yoğunlukla ilişkisini $\tilde{\rho}/\rho_s$ (katı malzemenin hacme göre oranı) doğrusal olarak varsaymıştır. Ancak birçok köpük yapı için durum böyle değildir. Köpük yapıların mekanik özelliklerini inceleme üzerine yürütülen araştırmaların temelini Gent ve Thomas isimli araştırmacıların 1950—70'li yıllardaki çalışmaları ortaya çıkarmışlardır. Bu iki çalışma köpüklerin termal, mekanik ve elektriksel özellikleri kapsamlı bir anlayış inşa edilmesine ön ayak olmuştur [13].

Bu gelişmelerin ardından gelen çalışmalar, köpük yapı ister açık isterse kapalı hücre tipinde olsun bükme etkisinin hakim faktör olduğunu ortaya koymuştur. Köpüklerin

gerilmenin hakim olduğu tam üçgen kafes yapı tipinde ki köpüklerden (belirli bir bağıl yoğunlukta) beklenilen rijitlik ve dayanım değerlerinin çok alt seviyede olması bükme etkisinin bir sonucudur. Fikir vermesi açısından, bağıl yoğunluğu 0,1 (hücre duvarları hacmin %10'u) olan zayıf bağlı kafes yapılı metal köpük ile aynı bağıl yoğunluklu üçgen kafes tipindeki köpüğün gerilme hakim bir yapıdan 10 kat daha az serttir. Eğilme ve gerilmenin hakim olduğu köpük yapıların termal, mekanik ve elektriksel özelliklerini belirmek üzere boyutsal yöntemler kullanarak basitleştirilmiş bir takım kurallar belirlemeye çalışmışlardır [14].

1.2. Hücresel Metalik Malzemelerin Üretim Metotları

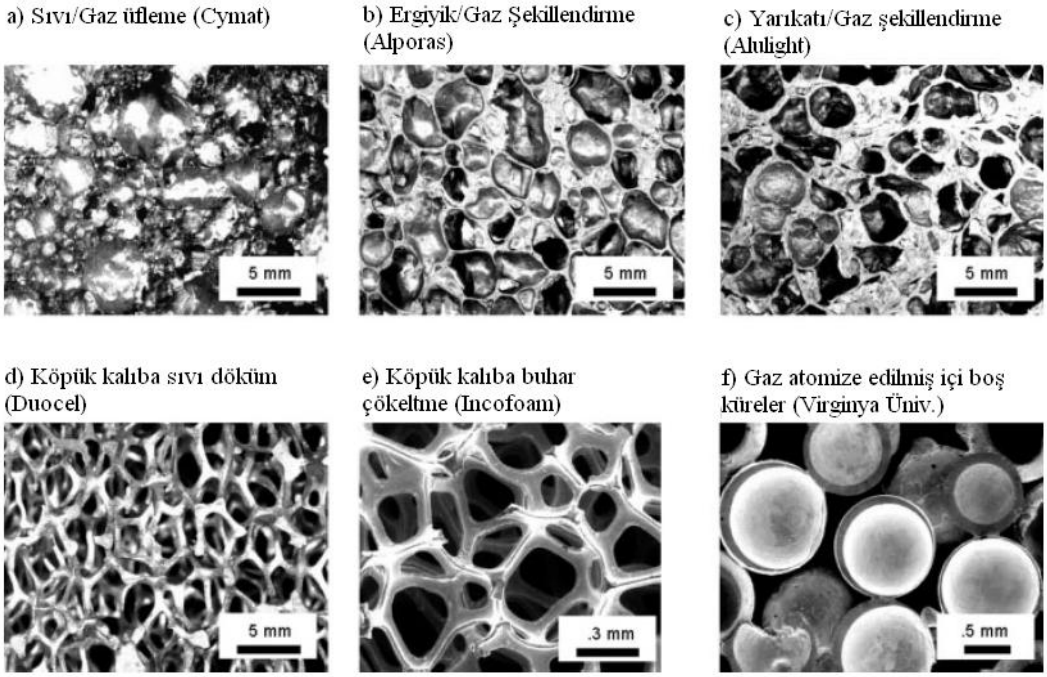
Birçok çeşit hücresel metalik malzeme üretim metotları mevcuttur. Bazı metotlar sulu ortamda polimer sıvıların köpürtülme metoduna benzer teknikte iken diğer birtakım metotlar metallerin karakteristik özelliklerine göre özel olarak tasarlanmıştır. Örneğin sinterleme ya da elektriksel özelliklere dayanan yöntemler böyledir. Çeşitli metotları metallerin üretim sürecinde bulundukları duruma göre sınıflandırmak mümkündür. Bu sınıflandırma Şekil 1.2'de maddenin hali dikkate alınarak 4 grupta tanımlanmıştır. Gruplar: sıvı metal, toz formda katı metal, metal buharı ya da gaz metal karışımı ve metal iyon çözeltisidir [10-12, 15].



Şekil 1.2. Hücresel metalik malzemelerin üretim metotlarına çeşitli gruplar halinde genel bakış [11, 12]

Kapalı gözenekli alüminyum köpüklerin üretiminde iki temel yöntem uygulanmaktadır. Bunlardan birisi eriyik halde diğeri ise katı halde bulunan köpürmek üzere hazırlanmış ara üründen köpürtmenin gerçekleştirilmesidir. Eşit

miktarda dağılmış seramik parçacıklar içeren eriyik yüzeyinin altından hava veya gaz üfleme ile alüminyum köpük yapı elde edilebilir [3, 8, 16]. Şekil 1.3'de farklı imalat metotları ile üretilmiş rastgele hücresel yapılı metallere ait kesit yüzey yapı örnekleri görülmektedir [17].



Şekil 1.3. Farklı imalat metotları ile üretilmiş rastgele hücresel yapılı metallere ait topolojik yapı örnekleri [17]

Metalik köpükler metal tozları, gaz oluşturucu ve reaktif ilavelerin karışımından oluşmuş bir çamurun bir kalıba dökülüp yüksek sıcaklıklarda bekletilmesi yöntemi ile de üretilebilir. İlavelerin etkisi ile çamur viskoz bir sıvı haline gelir ve genleşmeye başlar. Kalıptan çıkarılan metal köpük sinterlenerek son halini alır. Örneğin, alüminyum köpükler alüminyum tozu, ortofosforik asit ile alüminyum hidroksit veya hidroklorik asitten oluşan çamurdan da üretilebilirler. Bu şekilde göreceli yoğunluk % 7'ye kadar düşürülebilir. Ancak yetersiz mukavemet ve olası çatlaklar bu yöntemin olumsuz yanlarıdır [12, 18].

Yer tutucu ilave edilerek köpüklendirme açık gözenekli köpük yapımı için alternatif bir yöntemdir. Açık gözenekli bir polimer sünger gümüş ile gümüş oksit tozlarından oluşan bir çamurun içine daldırılır. Metalik çamurla kaplanan sünger daha sonra kurutulur ve polimerin yanarak sistemi terk etmesi ile birlikte metal tozlarının da sinterleneceği bir sıcaklığa kadar çıkarılır. Sonuçta rijit hücreli bir metal yapı elde

edilir. Bir başka üretim yöntemi de metal tozlarını yer tutucu malzemelerin (space holder) etrafına dökme yöntemidir. Yer tutucu malzemeler 'kuru' yığınsal yer doldurucular, uygun çözücü malzeme veya organik bağlayıcılar olabilir. Seramik parçacıklar veya boş küreler, polimer taneleri veya boş polimer küreleri, tuzlar hatta metaller yer tutucu olarak kullanılabilir. Metal tozu ile yer tutucu karışımı oda sıcaklığında preslenerek paketlenebilir veya yer tutucu malzeme yeterli sıcaklık dayanımına sahipse yüksek sıcaklıkta preslenip sinterlenebilir. Sonuçta bir metal matris kompozit elde edilir [8, 9, 19].

Metal toz/bağlayıcı sistemi ile köpüklendirme uygulamasında metal tozları ve polimer bağlayıcılardan oluşan karışım preslendikten veya ekstrüzyona tabi tutulduktan sonra ısıl işlem uygulanarak gözenekli metal parçalar elde edilebilir. Yer tutucu ilaveler kullanılmamasına rağmen bu yöntemle % 50'ye varan oranlarda gözeneklilik elde edilebilmiştir. Benzer bir yolla çeşitli metaller içinde kanal kalınlıkları birkaç mikrometreden birkaç milimetreye kadar değişebilen yönlenmiş gözenekler oluşturulabilir. Plastik bağlayıcı ile uçucu yer tutucu karışımından oluşan bir çekirdek ve metal tozu ile bağlayıcı karışımından oluşan kabuk sahibi çubuklar eksenel pres veya ekstrüzyon ile preslenerek yeşil kırılganlık mukavemetine sahip bir yapı oluşturulur. Daha sonra yer tutucu ve bağlayıcı ısı ile sistemden uzaklaştırılarak sinterleme uygulanır. Bu yöntemle mikro petekli (yönlenmiş gözenekli) demir esaslı malzemeler üretilebilmektedir. Ti + Al, Fe + Al veya Ti + Si gibi toz karışımlarının tepkime sinterlenmesi sonucu gözenekli metal yapı elde edilebilir. Sinterleme sonucu oluşan yapının gözenekli olması toz karışımındaki metallerin difüzyon hızları farkından ileri gelmektedir [8, 18].

Metalik boş küre kullanarak köpüklendirmede metalik boş küreler arasında sinterleme esnasında bağ oluşturularak hücreli yapıda metal elde edilebilir. Metalik boş küreler polimer küreler üzerine kimyasal veya elektriksel çöktürme, polimer küreleri metalik süspansiyonla kaplama gibi birçok yolla üretilebilir. Metalik boş küre kullanılarak açık veya kapalı, düzenli veya düzensiz gözenekliliğe sahip hafif metaller üretilebilir. Yöntemin avantajı gözenek boyutu ve dağılımının kolaylıkla kontrol edilebilir olmasıdır. Dolayısıyla, elde edilen köpük metalin mekanik ve fiziksel özellikleri 'gerçek köpük'lerin özelliklerinden daha kolay tahmin edilebilir

ve isteğe göre düzenlenebilir. Bir diğer avantajı ise toz metalürjisi ile üretilebilen her metalin kullanılabilmesidir [8, 20].

1.2.1. Hücresel metallerin sıvı halden üretimleri

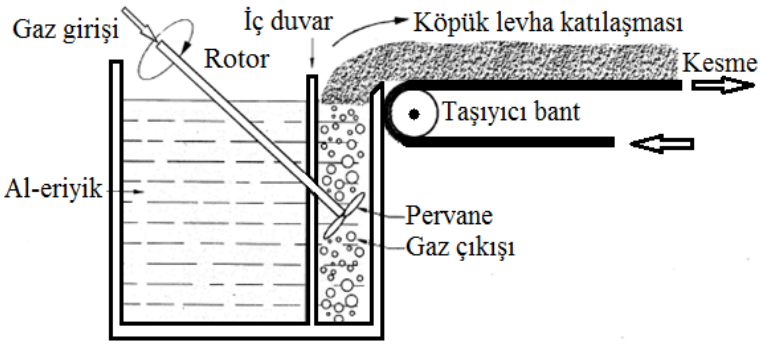
Sıvı metalden metal gözenekli bir malzeme haline doğrudan köpürtme ya da bir polimer köpük vasıtasıyla dolaylı köpürtme metodu kullanılarak, son olarak da sıvı metalin çevresine bir sonraki üretim aşamasında gözenek boşluğu olacak katı boşluk tutucu dolgu malzemesi kullanılarak üretilebilir. Bir sonraki olanak gaz salınımı sağlayan bir köpürtme ajanı içeren toz kompaktların eritilmesidir [8, 11, 12].

1.2.1.1. Metallerin doğrudan köpürtülmesi

Metalik eriyikler uygun koşullar altında sıvı içerisinde oluşturulan kabarcıklarla doğrudan doğruya köpükleştirilebilir. Normal olarak, gaz kabarcıkları yüksek yoğunluklu metalik eriyiğin içerisinde kuvvetler etkisiyle hızla yüzeye çıkma eğilimindedir. Fakat buradaki etkin kaldırma kuvveti erimiş metalin viskozite artışıyla engellenebilir. Bunun sağlanması için ince seramik tozlarını yada sıvı eriyik içerisinde düzenleyici parçacık olarak görev alacak alaşım elementlerini ilave etmek mümkündür [8, 11, 12].

Bu yöntem kullanılarak sıvı metallerin çoğunluklada alüminyum, magnezyum, çinko alaşımlarının köpürtülmesi üzerine 1960-70'li yıllarda gerçekleştirilen çok sayıda girişim bulunmaktadır [2]. Üretilmiş olan metal köpüklerin bir kısmı oldukça iyi olmasına rağmen, malzeme gerçek endüstriyel uygulamalarda kullanım alanı bulamamıştır. Üretimde süreç kontrolünün tatminkar köpük üretimi açısından yeterli olup olmadığı, üretilebilir kaliteyle fiyata sahip olunması ya da 40 yıl önce alüminyum köpük türü bir malzemeye ihtiyaç duyulması gibi sorular o dönem için tam olarak açık değildir. Geçmiş on yılda her ne kadar bir takım yeni gelişmeler yer almış olsa da günümüzde de üretim akışında izlenilen rotanın iyileştirilmesi mümkündür. Son zamanlarda metalik eriyiklerin doğrudan köpürtülmesi için iki yol bulunmaktadır. Birinci yol sıvı metal içerisine bir dış kaynaktan gaz enjekte edilmesi ve ikinci yol sıvı içerisinde yerinde gaz oluşumuna neden olan köpürtme ajanları erimiş metale ilave edilerek karıştırılmasıdır. Şu ilginç noktaya tekrar değinmek gerekir ki konuyla ilgili yazılmış olan ilk patentlerden birisi 1940'lı yıllarda ikinci bir metalin köpürtme ajanı olarak kullanımını önermektedir, örneğin alüminyumun

köpürtülmesi için merkury elementinin kullanımı bunlardan biridir [1]. Bu ikinci metal alüminyum ergime noktasına ısıtılırken buharlaştırılır ve yapıda gözenekler bu sayede meydana gelir [8, 11].

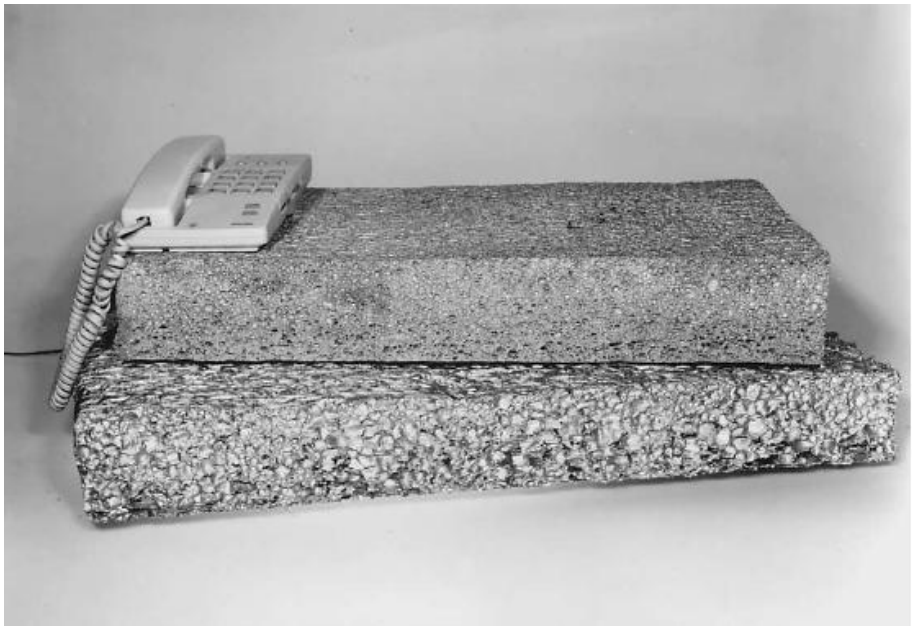


Şekil 1.4. Gaz enjeksiyonu ile doğrudan eriyik köpüklenmesi [11, 12]

Gaz enjeksiyonu ile köpürtme metallerin doğrudan köpüklendirilmesi yönteminde ilk sırada gelmektedir. Günümüzde alüminyum ve alüminyum alaşımlarından köpük üretimi için birinci yol Norveç'te uygulanan yöntem adlandırmasıyla "Hydro Aluminium" ve Kanada'da uygulanan adlandırmayla Cymat (Alcan Int. tarafından en son geliştirilen metot ve patent). Şekil 1.4'de şematik olarak çizilmiş olan bu proseste silisyum karbür, alüminyum oksit veya magnezyum oksit partiküller eriyik viskozitesini geliştirmek amacıyla kullanılır [21]. Buna göre birinci adım bu maddelerden birini içeren alüminyum eriyiğin hazırlanmasıdır. Herhangi bir metal matris kompozit (MMC) yapımı ile karşılaştırıldığında parçacıkların eriyik tarafından ıslatılması ve takviye partiküllerinin homojen dağılımı gibi problemlerin çözümü benzerlikler göstermektedir. Alüminyum alaşımlarının birçok türü kullanılabilmektedir. Döküm alaşımı olan AlSi 10Mg (A359) veya 1060, 3003, 6016, 6160 gibi dövme alaşımlarının kullanımı mümkündür. Sıvı MMC eriyiği ikinci adımda eriyiğin içine yerleştirilen özel olarak tasarlanmış döner pervane ya da titreşim nozulları vasıtasıyla uygulanan gaz enjeksiyonu (hava, nitrojen, argon) ile köpürtülür [8, 11].

Pervane ya da nozulların fonksiyonu sıvı eriyik içerisinde çok ince gaz kabarcıkları oluşturmak ve kabarcıkların düzenli dağılımını temin etmektir. Bunun temini sadece yeterince ince kabarcıklar oluşturulduğunda mümkün olan tatminkâr ölçüde köpük

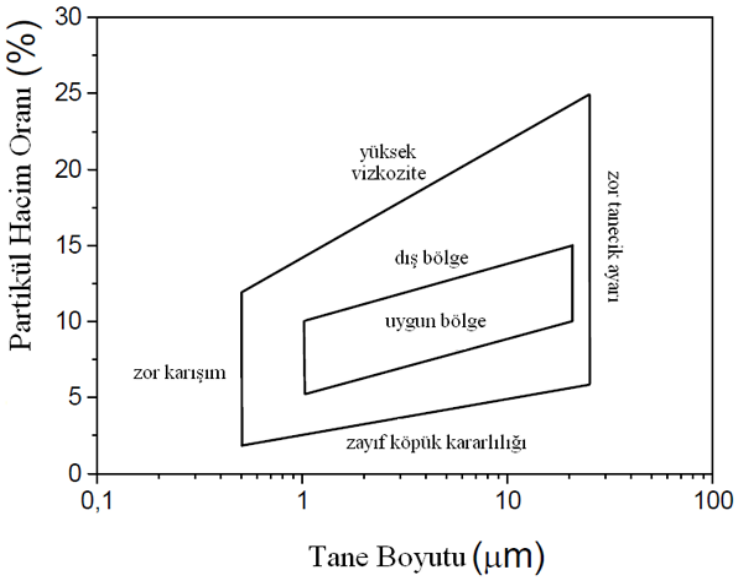
kalitesinin elde edilmesi bakımından önemli bir gereksinimdir. Meydana gelen viskoz metal eriyik ve kabarcıkların karışımı sıvı yüzeyine doğru saf ve temiz köpük halinde yükselir. Köpük yapı eriyik içerisinde bulunan seramik parçacıklar sayesinde göreceli olarak dengelidir. Oluşturulan köpük yapı sıvı yüzeyinden bir taşıyıcı bant ile alınır ve soğuyarak katılaştırılır. Köpüğün sıyrılarak alınması esnasında gözenek yapısının hasarlanmaması için çok fazla özen gösterilmelidir. Zira köpük yapı halen yarı katı haldedir. Katılaşmadan önce, yarı katı köpük slab formunda üst ve alt yüzeyleri kapalı düzgün köpük elde etme amacıyla bir ya da birden fazla merdane veya bantlı sistemler kullanılarak düzeltilebilir. Sonuç itibariyle oluşturulan katı köpük prensipte arzu edilen uzunlukta ve genişliktedir ve tipik olarak kalınlık ölçüsü 10 cm dir. İki farklı köpük örneği Şekil 1.5'te görülmektedir [8, 11].



Şekil 1.5. Gaz enjeksiyonu yöntemiyle üretilen iki farklı yoğunluk ve hücre boyutlarına sahip köpük levhalar [11]

Takviye parçacıkların hacim oranı tipik olarak % 10 ila 20 aralığında ve parçacık boyutu 5 ila 20 mm dir. Parçacık boyutunun seçimi ve miktarı deneysel olarak tayin edilir. Çok yüksek veya çok az içerik oranı ya da parçacık boyutu Şekil 1.6'da verilen problemleri doğurur. Parçacıklar çeşitli çalışmalarda tartışılan mekanizmalar etkisiyle köpük yapının stabilizasyonuna yardımcı olurlar. Parçacıkların hücre duvarlarında toplanmasının stabilizasyon için anahtar rol oynadığı yaygın olarak kabul edilmiştir. İlk olarak parçacıklar yüzey viskozitesini artırılırlar ve bu sayede filmlerin drenajını geciktirirler. İkinci olarak parçacıklar sıvı tarafından kısmen

ıslatılırlar. Islatma açısı belirli bir aralıktadır: kabarcık/parçacık ara yüzü kabarcık eriyik yüzeyine çıkarken dengede olduğundan parçacıklar kabarcıklardan sıyrılmazlar. Bir çift kabarcık ara yüzeyindeki parçacıklar toplam enerjiyi düşürür. Yetersiz ıslatmanın (yüksek temas açılı) veya oldukça iyi ıslatmanın da (düşük temas açılı) stabilizasyon üzerinde hiç bir etkisi yoktur. ilke olarak, seramik partiküllerin eriyik ile bilinen ıslatma açılarından uygun bir stabilizasyon etkisi sağlanabilir. Bu yöntemle üretilen alüminyum köpüklerin gözenekliliği %80—90 aralığında ve bu gözenekliliğe tekabül eden yoğunluk oranları 0,069 ve 0,54 gr/cm^3, ortalama duvar kalınlıkları 50 ila 85 mm dir [8, 11].



Şekil 1.6. MMC eriyiklerin köpürtülmesinde parçacık boyutu ve içerik seçimi [11]

Ortalama hücre boyutu ortalama hücre duvarı kalınlığı ve yoğunlukla ters orantılıdır. Ayrıca gaz akış ayarı, pervane dönüş hızı, gaz nozulu titreşim frekansı ve daha birçok faktör ortalama hücre boyutunu etkiler. Köpürtülen slablarda genellikle yoğunluk, gözenek boyutu ve gözenek uzamalarının bir gradayanı mevcuttur. Bu durum yerçekimine bağlı oluşan drenaj etkisinin doğal bir sonucudur. Ayrıca taşıyıcı banttan kaynaklanan kesme kuvvetleri etkisiyle nihai üründe çapraz yönlü çarpılmış hücreler mevcuttur. Bu hücrelerden kaynaklı anizotropi söz konusudur ve mekanik özellikler üzerinde belirgin bir etkiye görülür. Bu durum oluşturulan köpük yapının dikey yönde çekilmesiyle önlenebilir. Köpürtülmüş malzeme ya döküm ünitesinden çıkarıldığı kapalı bir dış yüzeye sahip haliyle ya da köpürme sonrası arzu edilen

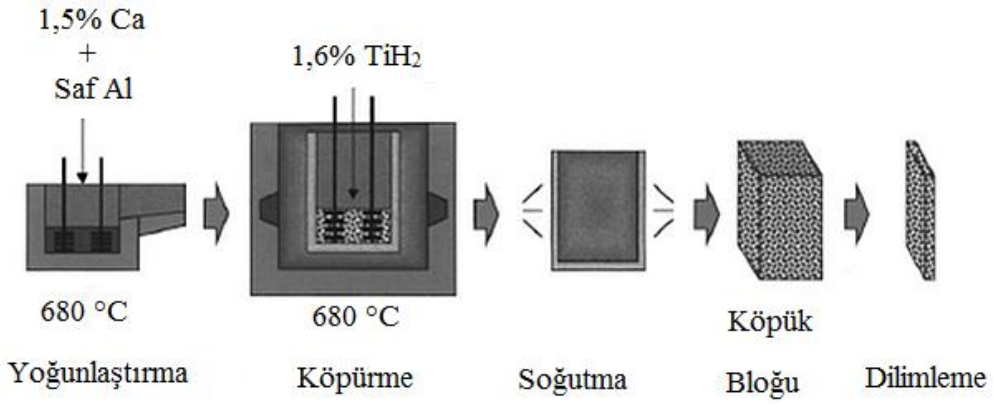
şekilde kesilerek kullanılır. Yüksek miktarda seramik parçacık içeriğinden ötürü MMC köpüklerin işlenmesinde çeşitli problemlerle karşılaşılması muhtemeldir [8, 11].

Doğrudan köpüklendirme işleminin avantajları sürekliliği olan bir bantta büyük miktarlarda köpük elde edilmesi ve düşük yoğunluklu üretimin mümkün olmasıdır. MMC köpükler üretim metodunun getirdiği bu avantajlar sayesinde diğer hücresel metalik malzemelere nazaran daha ucuzdur. Kanada merkezli Cymat şirketi tarafından işletilmekte olan üretim hattı saatte 1000 kg köpük sağlama kapasitesinde olup 1,5 m kadar genişlikte ve 2,5 ila 15 cm kalınlık ölçülerinde üretim yapmaktadır. Doğrudan köpürtme işleminin muhtemel bir dezavantajı üretilen köpüklerin ilave bir kesme işlemine tabi tutulma gerekliliğidir, zira bu uygulamadan sonra dış yüzey açık hücrelerden oluşur. Ayrıca, MMC köpükler hücre duvarlarında bulunan takviye parçacıklardan ötürü genel olarak köpürtme tekniğinin istenmeyen bir etkisi sonucu kırılgandırlar. Belirli bir şekle sahip parçaların yarı sıvı köpük döküm yöntemiyle kalıp içerisinde üretilebilmesi için yapılan çalışmaların yanı sıra elde edilen köpük yapının silindirlerle şekillendirilmesi bahsedilen bu dezavantajları ortadan kaldırılmaya yönelik çalışmalardandır [8, 11].

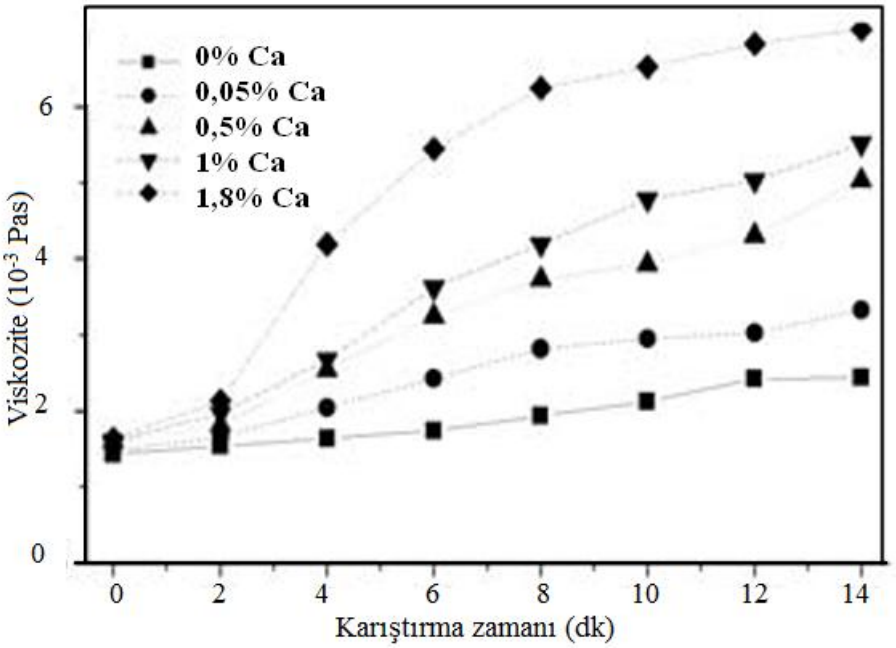
Takviye parçacıkların sıvı eriyikte neden olduğu bozucu etkilerden kaçınmak için katkısız metalik eriyiğe gaz enjekte edilerek saf köpük üretimi önerilir. Düşük viskoziteden kaçınmak amacıyla köpürtme prosesi erime noktasına çok yakın bir değerde uygulanır. Aralıksız soğutulan sürekli döküm prosesinde eriyik içerisinden yükselen gaz kabarcıkları vasıtasıyla üretim gerçekleşir. Kabarcıklar katılaşan sıvıdan uzaklaşır ve köpük yapı şekillenir [8, 11].

Köpürtücü ajan kullanılarak köpürtme yöntemi ise doğrudan köpüklendirme diğer temel yöntemlerden biridir. Eriyiklerin doğrudan köpürtülmesi için bir ikinci alternatif yol eriyiğe köpürtücü gaz enjeksiyonu yerine köpürtücü ajan ilave etmektir. Köpürtücü ajan ısının etkisi altında ayrışarak gaz salınımına başlamasının ardından köpürtme prosesi tetiklenir. Bu durum prosesin modern bir versiyonu Şekil 1.7'de açıklanmıştır. Küçük ölçekli ticari keşif 1986'dan günümüze Shinko Wire, Amagasaki, Japonya tarafından günlük 1000 kg hacminde üretilmektedir. Bu teknikte kalsiyum 680 ^{o}C 'de alüminyum eriyiğe ilave edilir. Eriyik bir kaç dakika

süreyle karıştırılır ve kalsiyum oksit (CaO), kalsiyum-alüminyum oksit ($CaAl_2O_4$) hatta Al_4Ca metalik bağlı bileşiklerin oluşumu sayesinde viskozite sürekli olarak artış gösterir ve sıvı metal yoğunlaşır. Karıştırmanın çeşitli kalsiyum ilaveleri için alüminyum eriyiğin viskozitesi üzerindeki etkisi Şekil 1.8'de görülmektedir. Köpük üretimi için genel olarak ağırlıkça %1,5—3 oranında kalsiyum ilavesi gerekmektedir. Viskozitenin uygun değere ulaştırılmasının ardından hidrojen gazı salınımıyla köpükleştirici ajan olarak kullanılan titanyum hidrit (TiH_2) sıcak viskoz sıvıya (tipik değer ağırlıkça %1,6) ilave edilir. Eriyik nihayet yavaş yavaş genişlemeye başlar ve kademeli olarak köpürtme kanalını doldurur. Köpük oluşumu sabit basınç altında gerçekleşir. Kalıbın alüminyum alaşımının erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa inmesinden sonra sıvı köpük katı alüminyum köpük halini alır ve daha sonraki işlemler için kalıptan dışarı alınabilir. Genel olarak köpüklendirme proseslerinde büyük bir parti köpük üretim için süreç 15 dk kadar sürebilir. Buradan varılacak nokta üretim parametrelerinin dikkatle ayarlanmasıyla homojen köpük yapısına ulaşılabilmenin mümkün olduğudur. Esas itibariyle bu yöntemle üretilmiş olan köpükler için, ticari adlandırmasıyla Alporas, diğer yöntemlere nazaran daha homojen yapılı alüminyum köpüklerin elde edilmesi mümkün olup, döküm metotlarıyla üretim bu kıyasın dışında düşünülmelidir. Bu türden köpüklerin gözenek morfolojini Şekil 1.9'da görmek mümkündür. Sadece ortalama hücre çapı ve eriyiğin viskozitesi arasında değil aynı zamanda üretilen köpüğün son yoğunluğu ile viskozite arasında da ampirik yani deneysel bir ilişki vardır [8, 11, 19, 22, 23].

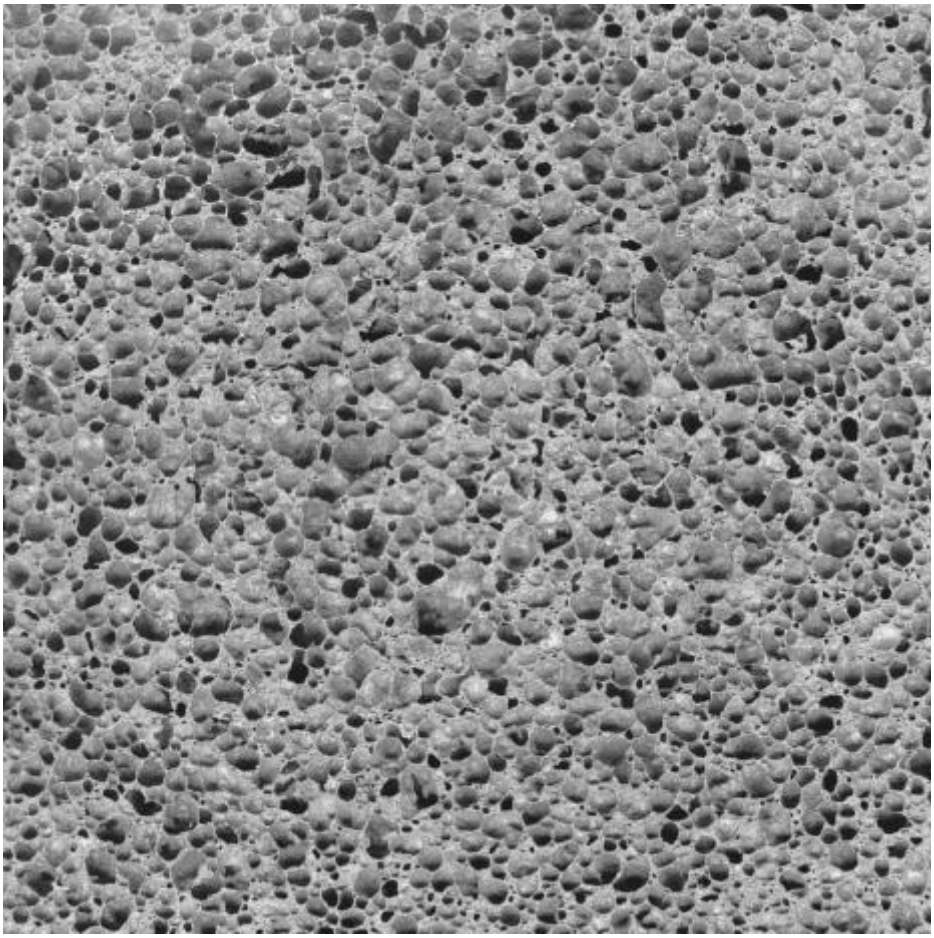


Şekil 1.7. Ajan ilavesiyle eriyiklerin köpüklendirilmesi (Alporas yöntemi) [11, 19]



Şekil 1.8. Karıştırma süresinin kalsiyum ilavesinden sonraki bir alüminyum eriyiğin viskozitesi üzeresine etkisi [11]

Literatürde zirkonyum hidrid de (ZrH_2) köpürtücü ajan olarak alüminyum köpüklerin üretimi için önerilmektedir, tercih edilen konsantrasyon oranı ağırlıkça % 0,5—0,6 ve köpürtme sıcaklığı aralığı 670—705 °C dir. Shinko Wire firması tarafından alüminyum köpükler 2050x650x450 mm ölçülerindeki partiler halinde üretilmektedir. Dökülmüş bir köpük bloğun kütlesi yaklaşık olarak 160 kg dır, ürünün en dış tabakası da dahil olmak üzere yoğunluğu 0,27 gr/cm^3 dür. Bloklar halinde kesim yapıldıktan sonra yoğunluk değeri 0,18—0,24 gr/cm^3 aralığında, ortalama gözenek boyutu 2—10 mm aralığında değişmektedir. Dökme köpük bloğun gerek yatay gerekse dikey boyutunda yoğunluk gradyanları gözlemlenir, düşük yoğunluk bölgeleri bloğun üst ve orta bölgesinde yer almaktadır. Bloklar arzu edilen kalınlıklarda kesilir (5—200 mm standart kalınlık 10 mm). Alporas köpükler üzerindeki mekanik ve diğer bazı özellikleri ölçülmüştür. Epoksi reçine ile bağlanmış Alporas köpüklerden sandviç yapılar üretilerek karakterize edilmiştir. Alporas köpükler su ile veya kimyasal buharla yüzeyine uygulanan şartlandırma ile kimyasal dayanım kazandırılırlar [8, 11, 12].



Şekil 1.9. TiH_2 ilavesi ile üretilmiş alüminyum köpüğe ait 80x80 mm^2 lik bir parçanın gözenek yapısı [11]

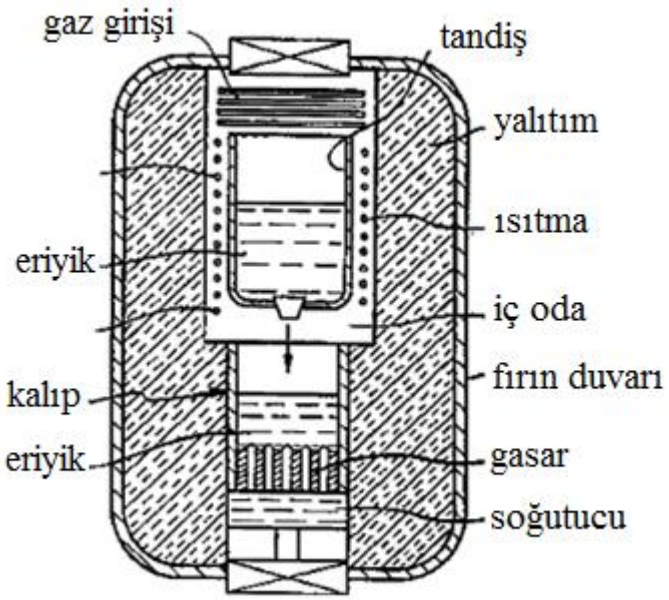
Alporas yöntemiyle üretilen köpükler daha önceden ele alınan MMC köpüklere göre çok daha pahalıdır. Üretimi seri köpük imalat uygulaması haline dönüştürmeye yönelik veya karmaşık şekilli köpük parçaların üretimine yönelik bazı çalışmalar ele alınmıştır. Alüminyum için uygulanan yönteme benzer şekilde düşük erime sıcaklığına sahip alaşımların içerisine köpürtme ajanı enjekte edilerek ve hatta demir alaşımlarının dahi bu yöntemle köpürtülebileceği stabilizasyon amacıyla da demir eriyiğe tungsten tozu ilavesinin uygulanabileceği iddia edilmektedir. Alüminyum eriyiğin viskozite özelliklerinin geliştirilmesinde kalsiyum kullanımı yerine oksijen, hava ve diğer gaz karışımlarının eriyik içerisinden geçerkenki kaynama etkisinden faydalanma (alümina oluşuna neden olur) bir ikinci olarak alümina tozu, silikon karbür, alüminyum cürufu, hurda alüminyum köpüğü ilavesi ve son olarak metalik viskozite artırıcı katkı maddeleri kullanılması da mümkündür. Bununla birlikte uygun yoğunluğun ayarlanması son derece zordur, karmaşık sıcaklık döngüleri ve karıştırma gerektirir. Viskozite özelliklerini geliştirmek için 20 mm arasında bir

ortalama parçacık boyutuna sahip manganez oksit (MnO_2) tozu kullanılarak oldukça umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Metal hidrür tozların eriyiğe karıştırılmasından kaynaklanan bir kısım sorunlardan ilkin Al—Mg gibi düşük erime noktasına sahip ötektik öncü alaşımın hazırlanmasının ardından köpürtme ajanının ayrışma olmadan ilave edilmesiyle ve sonra diğer sorun olan saf alüminyum gibi daha yüksek erime noktasına sahip alaşımların köpürtülmesiyle kaçınmak mümkündür. Bu sıvı köpüklendirme işleminin detaylı irdelemesi Jarema ve Niebylski isim araştırmacıların patentlerinde bulunmaktadır. Metodun ilginç bir türevi Ptashnik tarafından önerilmiştir. Bu öneriye göre köpürtme ajanı sıvı alaşıma katılaşma sıcaklığının hemen üzerindeki bir sıcaklıkta ilave edilir fakat bu sıcaklığın köpürtme ajanının ayrışma sıcaklığının altındaki bir değerde olması gerekliliği vardır. Metalin yoğun olarak karıştırılmasının ardından istenilen biçime sahip kalıp boşluğunda katılaşmasına izin verilir. Esas köpüklenme kompozitin köpürtme ajanının ayrışma sıcaklığının üzerine ısıtılmasıyla ikinci adımda gerçekleşmektedir. Gaz oluşumuyla kabarcıklar üretilir ve hacim artışı sağlanır. Bu metot kompakt toz ergitme metodunu andırmaktadır. Eriyiklerin köpürtme ajanları ile doğrudan köpüklendirilmesinin ilk versiyonları çeşitli araştırmacılar tarafından alüminyum ve çinko için 1970'li yıllarda gerçekleştirilmiştir [8, 11, 12].

1.2.1.2. Katı gaz ötektik katılaşma (Gasars)

Yirmi yıl kadar önce geliştirilen bu metot bazı sıvı ötektik metallerin hidrojen gazı ile biçimlendirilmesine dayanmaktadır. Bu metallerden birisinin yüksek basınç altında (50 atm'e kadar) hidrojen atmosferinde eritilmesiyle hidrojen içeren homojen eriyik elde edilir. Eğer sıcaklık bu noktadan azaltılırsa, eriyik ötektik dönüşüme uğrar heterojen iki fazlı katı gaz sistemi oluşur. Eğer sistemin kompozisyonu ötektik konsantrasyona yeterince yakınsa segregasyon görülebilir. Çünkü ötektik kompozisyon sistem basıncına bağlıdır. Dış basınç ve hidrojen içeriği birbirine bağlı olarak ayarlanmalıdır. Eriyikten ısının uzaklaştırılması yönlemiş katılaşmaya neden olur. Katılaşmanın yönlenmesi sıvı içerisinden başlayarak ilerler, tipik olarak ilerleme hızı 0,05—5 mm/sn olup, hidrojen içeriği katılaşma düzlemine yakın bölgede artar ve gaz kabarcıkları oluşur. Üretim parametreleri kabarcıklar geriye kalan sıvıdan dışarıya çıkmayacak, ancak katılaşma bölgesine yakın kaybolacak ve katı içerisinde hapsolacak şekilde seçilmelidir. Sonuç itibariyle oluşan gözenek

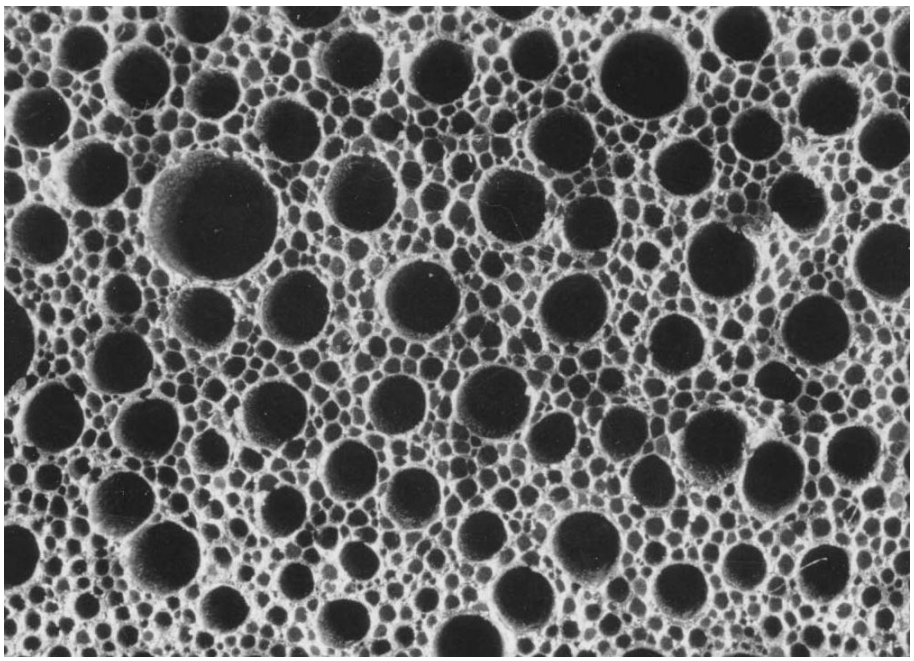
morfolojisi hidrojen içeriği, eriyik üzerindeki basınç, soğuma hızı ve doğrultusu, eriyiğin kimyasal kompozisyonundan ötürü kararlı haldedir. Genel olarak büyük ölçüde uzamış gözenekler katılaşma doğrultusunda yönlenir [8, 12, 24].



Şekil 1.10. Gasar yöntemi için uygulama aparatı [11]

Pratik olarak uygulanabilecek muhtemel bir gasar imalat metoduna ait çizim Şekil 1.10'da görülmektedir. Bu yöntemle elde edilmiş gözenek yapısı katılaşma doğrultusunda alınan Şekil 1.11'de verildiği üzere küresel görünümdedir. Gözenek çapları 10 μm ila 10 mm, uzunlukları 100 μm ila 300 mm, en boy oranı 1 ila 300 ve gözeneklilik miktarı % 5—75 aralığındadır. Gözenek boyut dağılımı küçük ve büyük gözenek ve birleşimlerin eş zamanlı büyümesinden ötürü üniform değildir. Gözenekler konik hatta oluklu yapıda olabilir. Eriyik üretiminde bir otoklav kullanılır, eriyik hidrojen ile şarj edilir ve son olarak katılaştırılır. Silindirik döküm kalıpları kullanıldığı zaman soğumaya bağlı olarak radyal ve eksenel gözenekler oluşmaktadır. Gasar yönteminin nikel, bakır, alüminyum ve magnezyum uygulamaları literatürde yer almaktadır. Bu metallerin yanında tekniğin bazı çelik türleri, kobalt, krom, molibden ve hatta seramikler için uygulanabilir olduğu ön görülmektedir. Gözenek morfolojisi ve mikro yapısı karakterize edilmektedir. Buna göre Gasar yönteminde homojenlik çoğu zaman tatmin edici olmasa ve ilave iyileştirmeler gerektirse de çeşitli uygulamalarında kullanımı mümkündür. Çeşitli çalışmalarda gasar yöntemi ile üretilmiş köpüklerin mekanik özelliklerinden olan

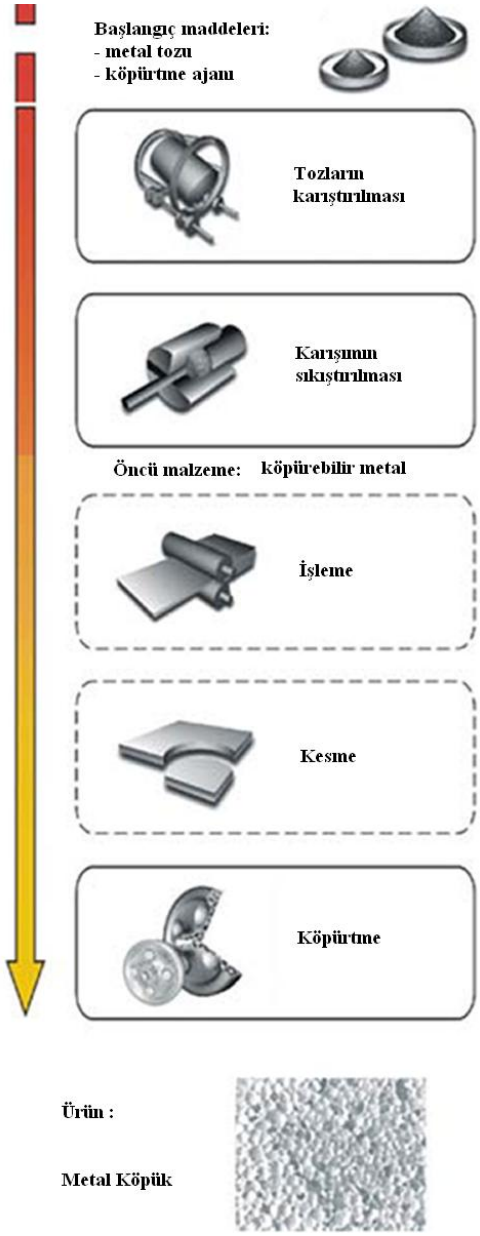
çekme-basma dayanımı, young modülü, poisson oranı karakterize edilmektedir [8, 11, 24].



Şekil 1.11. Gasar yönteminde yüzeye normal yönde gözeneklerin yapısı görülmektedir [11]

1.2.1.3. Kompakt toz ergitme tekniği

Köpükleştirilmiş metalleri Fraunhofer Enstitüsü'nde (Bremen, Almanya) geliştirilmiş bir metotla üretmekte mümkündür. Bu üretim prosesinin ana fikri nispeten eski bir düşüncedir, ancak metot bir miktar karmaşıktır bu sebeple son zamanlarda köpük üretimi mümkün olmuştur. Bu metot kimi zaman toz metalürjisi olarak adlandırılır, çünkü başlangıç malzemeleri metal tozlarıdır, ancak esas köpüklendirme sıvı halde meydana gelir. Üretim süreci temel metal tozları, alaşım tozları veya metal toz karışımlarının köpürtme ajanı ile karıştırılmasıyla başlar. Ardından karışım yoğun bir yapı oluşturmak için kompaktlanarak yarı tamamlanmış ürün halini alır. Şekil 1.12'de diyagram verilmiştir [8, 12, 22].

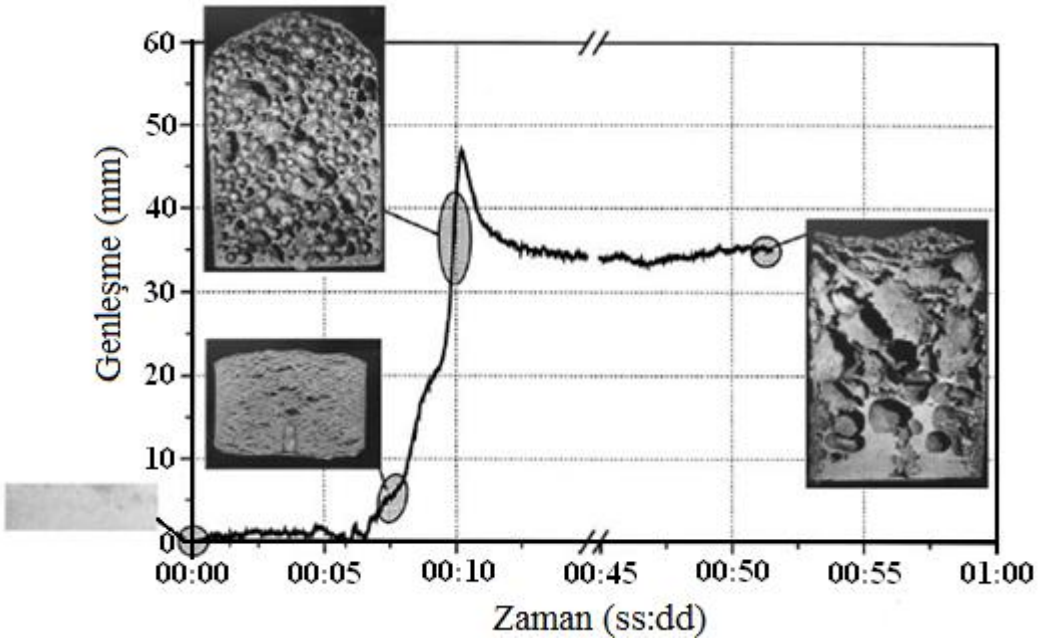


Şekil 1.12. Kompakt toz ergitme tekniği [11]

Prensip olarak kompaktlama köpürtme ajanının metal matrise kayda değer herhangi bir kalıntı gözenek boşluğu kalmadan gömülmesini sağlayacak herhangi bir teknikle uygulanabilir. Bu noktada uygulanabilecek farklı kompaktlama metotlarına örnek olarak sıcak tek eksenli veya çok eksenli basma, çubuk ekstrüzyon, toz haddeleme verilebilir. Kompaktlama metodu öncü (precursor) malzemesinin istenilen şekline göre belirlenir. Ekstrüzyon şu an için en ekonomik metot olarak görünmektedir ve bu sebeple tercih edilen bir yoldur. Çeşitli en boy oranına sahip dikdörtgen kesitli profiller genellikle haddelemeyle elde edilen ince tabakalardan yapılmaktadır. Öncü

üretimi ileriki üretim basamaklarında hataya neden olabilecek herhangi bir kalıntı gözenek ve başka kusurlara sebebiyet verilmesi için son derece dikkatle gerçekleştirilmesi gerekmektedir [8, 25].

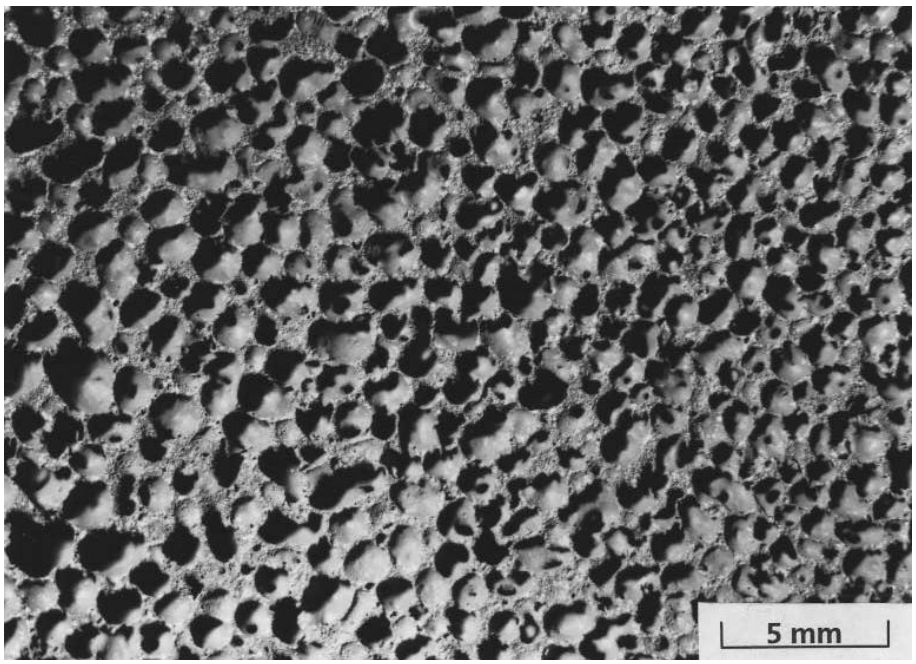
Bir sonraki işlem basamağı matris malzemenin erime noktasına yakın bir sıcaklıkta uygulanan ısıl işlemdir. Yoğun matris malzeme içerisine homojen olarak dağılmış köpürtme ajanı ayrışır. Tahliye olmuş gaz kompaktlanmış öncü malzemeyi genleşmeye zorlar, böylece gözenekli yapı biçimlenir. Tam genleşme için ihtiyaç duyulan süre sıcaklık ve öncü boyutuna bağlı olup birkaç saniye ile dakikalar mertebesinde tamamlanır. Şekil 1.13 bir öncü alüminyum ile TiH_2 kompakt malzemenin genleşme eğrilerini göstermektedir. Genleşmiş köpüğün hacmi bazı morfoloji örnekleri ile beraber zamanın bir fonksiyonu olarak çeşitli genleşme aşamalarında gösterilmiştir [11, 25].



Şekil 1.13. 750 °C 'de köpürtülen alüminyum/TiH_2 kompaktların genleşme davranışı. Zamanın fonksiyonuna bağlı olarak metal bir numunenin hacim değişikliği ve 9 mm yükseklik 32 mm çaplı öncü ile beraber dört farklı genişleme görüntüsü [11]

En yüksek genleşme bölgesi oldukça üniform köpük morfolojisine uygun ve köpük çökmesinden önce görülür. Maksimum genleşmenin derecesi ve bu genleşmenin bir sonucu olan katı metal köpüğün yoğunluğu, köpürtme ajanının miktarı ve sıcaklık,

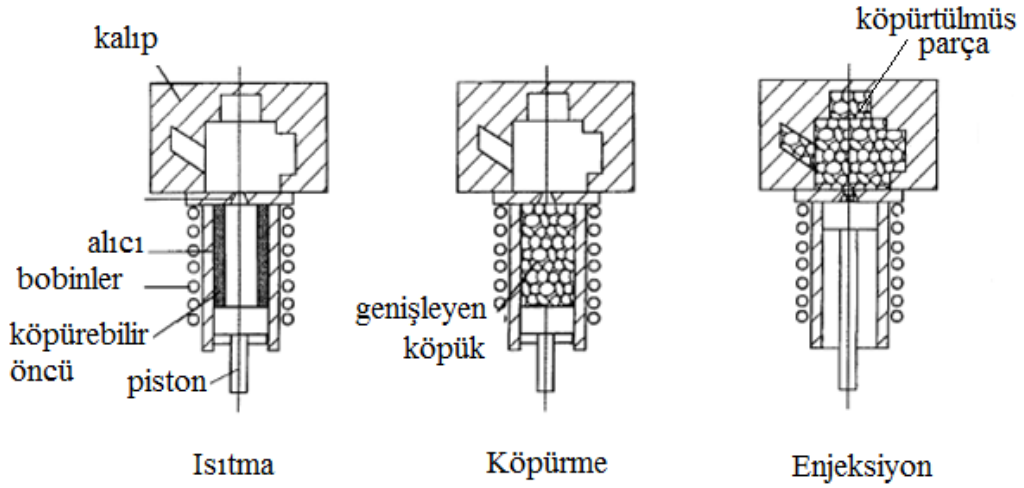
ısıtma hızı gibi diğer köpürtme parametrelerinin ayarlanmasıyla kontrol edilebilir [11, 22].



Şekil 1.14. Kompakt toz ergitme tekniğiyle üretilmiş bir kurşun köpüğün kesit görüntüsü [11]

Çinko ve alüminyum alaşımları için titanyum veya zirkonyum hidrür (TiH_2, ZrH_2) köpürtme ajanı olarak kullanılır. Çelikler $SrCO_3$ gibi karbonatlar kullanılarak köpürtülebilir. Eğer hidrürler köpürtme ajanı olarak kullanılırsa %1 den daha az bir içerik oranı birçok durumda yeterlidir. Bu metodun kullanımı alüminyum ve alüminyum alaşımlarıyla sınırlı olmayıp kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı metal ve alaşımları için uygun köpürtme ajanı ve üretim parametrelerinin seçilmesiyle köpüklerinin üretilmesi de mümkündür. En sık köpükleştirilen alaşımlar her ne kadar saf alüminyum ve dövme alaşımları olsa da 2xxx ya da 6xxx gibi alaşım serileri de kullanılmaktadır. AlSi7Mg (A356) ve AlSi12 gibi dökme alaşımlar da düşük erime sıcaklıkları sebebiyle sıklıkla kullanılır ve iyi köpürme özelliğine sahiplerdir. Esas itibariyle hemen hemen herhangi bir alüminyum alaşımının dikkatle seçilen üretim parametreleriyle köpürtülmesi mümkündür. Şekil 1.14 bir kurşun köpüğe ait tipik kesit alanını göstermektedir. Bu görüntü incelendiğinde üretim prosesinin tipik bir sonucu olarak hücre ölçüleri ve şekillerinin dağılımının kesin bir rastgelelik gösterdiği anlaşılmaktadır. Bir parça öncü malzemenin fırın içerisinde köpük halini alması belirsiz şekildeki bir metal köpük yumrusunun genleşme

doğrultuları kesin olarak sınırlanıncaya kadar devam eder. Bahsedilen kalıplama içerisinde istenilen şekilde boşluğa sahip kalıba öncü malzemenin yerleştirilmesi ve burada ısıtılarak köpürtülmesiyle yapılır. Bu yolla nihai ölçülere yakın şekle sahip parçalar elde edilebilir. Bu durum öncü malzeme parçasının kalıp geometri şekline uyum sağlama ve köpüklenme sürecinde kalıp içerisinde akış koşullarını iyileştirme adına avantajlı olabilir. Genişlemekte olan köpük yapının uygun kalıplara enjeksiyonu ile oldukça karmaşık parçaların üretilmesi dahi mümkündür. Bu prosese ait şematik anlatım Şekil 1.15'de sunulmuştur. Buna göre, bir miktar köpürebilir öncü malzeme erime noktasına yakın bir sıcaklığa kadar kapalı hazne içerisinde ısıtılır. Köpürmenin başlamasıyla öncü yarı katı hale gelir, kütle kalıp içerisine hareketli bir piston vasıtasıyla enjekte edilir ve kalıp içerisinde genleşmenin tamamlanmasına müsaade edilir [8, 11].



Şekil 1.15. Köpük enjeksiyon işlemi [11]

Eğer üretim dikkatle kontrol edilmezse, köpürtülen parçaların gözenek yapısı oluşması muhtemel hatalardan etkilenebilir. Bununla beraber, üretim metodu karmaşık hacimli parçaların ekonomik olarak kütlesel üretimine yönelik önemli bir adım sayılabilir. Öz bölgesinde metal köpük yapı içeren ve iki yüzeyinde metal sac bulunan sandviç panellerin imal edilmesi, uygun ölçülerdeki bir parça köpüğün sacların yüzeyine yapıştırılmasıyla kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Alternatif olarak, salt bir metalik bağa ihtiyaç duyuluyorsa, konvansiyonel alüminyum veya çelik saclara köpürebilir öncü malzeme tabakası haddelenerek kaplama yapılabilir. Sonuç itibariyle elde edilen kompozit yapı derin çekme benzeri ilave bir adımla deforme edilebilir. Son ısıl işlem ile sadece köpürebilir öz genişler ve yüzey sacları mevcut

halini korur, ardından sandviç yapıların Şekil 1.16'da verildiği hali alması sağlanır [8, 11, 26].

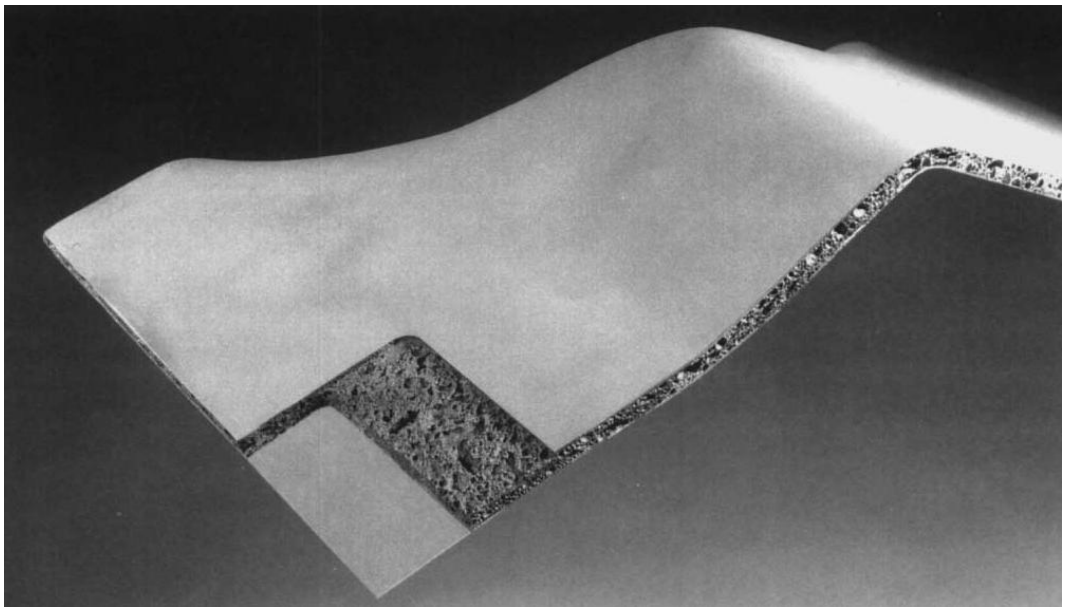


Şekil 1.16. Alüminyum köpük özlü (12 mm kalınlık) ve iki çelik sac yüzeyli sandviç panel [11]

Alüminyum köpükler alüminyum sacların yanı sıra çelik veya titanyum saclarla kombine edilmesi mümkündür. İkinci durumda köpürme esnasında sac yüzeyin erimesi dikkate alınmak zorunda değildir, öz malzemesi ve yüzey saclarının farklı erime noktalarına sahip olabilirler. Alüminyum/alüminyum köpük sandviç yapısı otomobil üreticisi Karmann (Osnabrück, Almanya) ve Fraunhofer Enstitüsü (Bremen, Almanya) tarafından bir konsept araç için yapısal alüminyum köpük uygulamalarında geliştirilmiştir. Bu parçaların bir örneği Şekil 1.17'de görülmektedir. Bu tür sandviçler 2 m uzunluk ve 1 m genişliğinde üç boyutlu olarak şekillendirilmektedir [11, 27].

Tüplerin veya rastgele şekilli sütunların çeşitli yöntemler kullanılarak alüminyum köpükle doldurulması mümkündür. En kolay yöntem köpürebilir öncü bir çubuk malzemenin boş sütunun içerisine yerleştirildikten sonra beraberce fırına yerleştirilmesidir. Öncü malzeme köpürmeye başlar ve sonunda parça tamamen dolar. Bu yöntemin dezavantajı sadece köpük malzemeye göre yüksek erime sıcaklığına sahip tüplerin kullanılabilmesidir. Örneğin çelik tüpler alüminyum köpük

ile doldurulabilir. Alternatif bir yöntem basit bir çubuk kullanmak yerine boşluk kısmına tam olarak sıkı geçen köpürebilir donatı uygulamaktır. Ardından köpük sadece dış bölümün merkezine doğru genişleyebilir ve köpürme esnasında mekanik bir destek sağlanmış olur. Ayrıca, parça ve köpük arasındaki termal temas köpürme esnasındaki yüksek sıcaklıktan parçayı korur. Üçüncü bir seçenek olarak, eşmerkezli iki tüp kompozit yapıda iki bileşenin metalürjik bağa sahip olması için beraber ekstrüde edilir. Dış tüp normal bir alüminyum alaşımı iken içteki tüp için köpürebilen bir malzeme seçilir. Daha sonraki köpürme adımında içeride kalan tabaka tüpün merkezine doğru genleşir ve sonunda boşluğu doldurur. Bir diğer kompozit oluşturma yöntemi ön şekillendirilmiş alüminyum köpük gövde üzerine alüminyumun termal püskürtülmesiyle yoğun bir dış alüminyum köpük tabakası oluşturmaktır. Şekil 1.18'de böyle bir örnek gösterilmektedir. Elbette ki bu teknik sadece tüplerle sınırlı değildir. Hemen hemen bütün formdaki köpük gövdelerin kaplanması mümkündür [11, 22, 28].



Şekil 1.17. Alüminyum/alüminyum köpük sandviç (TiH_2 köpürtücü ajanın içeren öncünün hadde ile sac yüzeye kaplanmasıyla elde edilmiş 10 mm kalınlıklı sandviç levha) [11]



Şekil 1.18. Alüminyum yüzey üzerine alüminyum köpük kaplanmış 60 mm uzunluklu bir parça, alt kısım kaplama yapılmamış alüminyum köpük, orta kısım termal püskürtme sonrası yapı, üst kısım son işleme [11]

Son olarak, eğer konvansiyonel kum kalıba dökümde alüminyum köpük parçalar öz olarak kullanılırsa yapısal bir kompozit üretimi mümkün olur ve köpükleştirilmiş öz tamamen dökme bileşen içerisinde kalır [11].

Metalik köpük ve seramik kompozitlerin üretilmesi de mümkündür. Alüminyum köpük (AlSi12) 100 kPa basınç altında 500 ° C 'de alümina plakalarla difüzyonla bağ oluşturabilir. Alternatif olarak, bir 6061 alaşımlı alüminyum köpük sabit uzaklıktaki iki alümina seramik tabaka arasında köpük oluşumuna izin verilerek yerinde bağlanır. Birçok metalik köpük parçanın üretimi yeterince üniform sıcaklık sağlayan ticari olarak satışı olan geleneksel fırınlarda gerçekleştirilmesi mümkündür. Ancak, parçaların uygun maliyetle kitlesel üretimi için uygun kalıplara veya kaplanmış levhalara yerleştirilen köpürebilir öncü malzemeyi çeşitli ısıtma bölgelerine iletilerek köpürmesini ve ardından soğumasını sağlanan sürekli fırınları kullanmak tercih edilir [11].

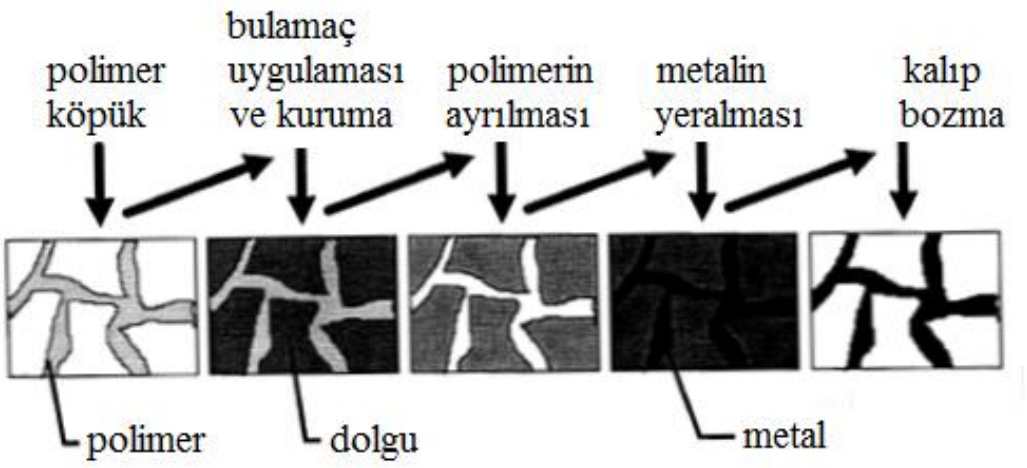
Hatta sürekli üretim yerine otomatik olarak doldurulan veya boş bırakılan kalıpların kullanılmasıyla parti üretiminin yapılması da mümkündür. Bu durumda her bir döngüden kalıpların uygun sıcaklığa soğutulması gerekliliği kalmayacaktır. Kalıp köpürme sıcaklığı ile daha düşük sıcaklık olan köpüğün katı hale geldiği sıcaklık arasında tutulabilir. Bu sayede daha fazla enerji korunabilir, bir köpük parçanın üretimi için gereken zaman büyük ölçüde azaltılabilir ve iş gücü miktarı en aza indirilir. İçi boş olan bölümlerin metal köpükle doldurulması için kullanılabilecek yararlı bir araç, içerisinde köpürebilir telin eritilerek doldurulması gereken boşluğa sürekli olarak köpük sağlayan mobil bir köpük enjeksiyon cihazı olabilir. Bu sistemin avantajları sürekli çalışma, lokal köpük dolgu imkanı ve parçanın düşük termal etkiye maruz kalmasıdır [11].

Kompakt toz eritme tekniği konusunda çeşitli güncel geliştirme çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmalardan birisi köpürebilir öncü malzeme elde ederken titanyum hidrür parçacıkların toz kullanımı yerine doğrudan alüminyum eriyik içerisine eklenmesidir. Erken hidrojen ayrışmasını önlemek için eriyiğin karıştırma sonrasında erime noktasının altındaki bir sıcaklığa hızla soğutulması gerekmektedir. Alternatif olarak, titanyum hidrürün ayrışması ısıl işlem uygulanarak pasifleştirilebilir. Bu yöntemle son derece düzenli gözenek morfolojisine sahip köpükler elde edilmiştir. İlginç bir ayrıntı olarak şunu belirtmek gerekir ki bu fikirler hali hazırda 50 yıl önce düşülmüş fakat uygulanamamıştır. Kompakt toz eritme tekniği Schunk GmbH ve Honsel AG, Almanya ile Mepura ve Neuman, Avusturya'da kurulu bulunan küçük ölçekli ticari işletmelerde uygulanmaktadır. Bu yöntemle üretilen alüminyum köpükler için foaminal ve alulight ticari adlandırmaları kullanılmaktadır [11].

1.2.1.4. Döküm yöntemleri

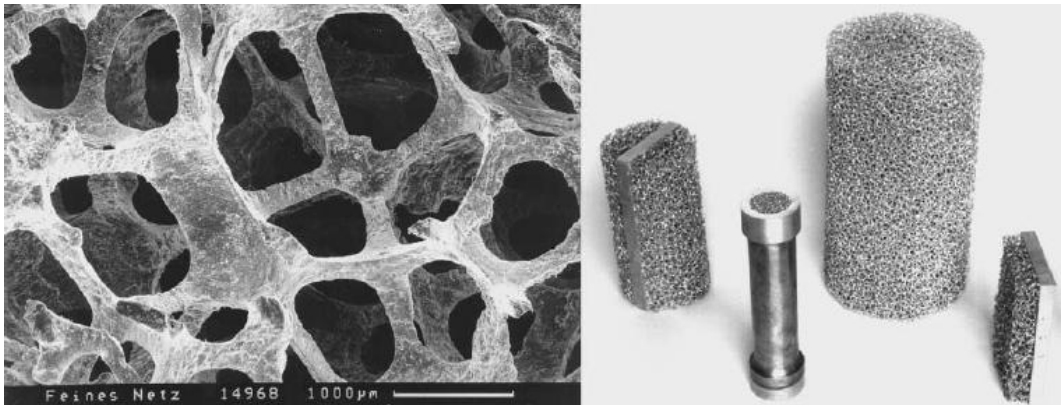
Köpüklerin eritilmiş metalin doğrudan köpürtme işlemine tabi tutulmadan da polimer köpükler ile hassas döküm yöntemiyle üretilmesi mümkündür. Şekil 1.19'da bu uygulamanın şematik bir açıklaması görülmektedir. Bu yöntemde bir polimer köpük örneğin poliüretan köpük bir başlangıç noktası olarak kullanılmaktadır. Polimer köpük kapalı gözenek yapısına sahipse kafesleştirme işlemiyle açık gözenekli bir yapının oluşturulması gerekmektedir. Sonuç itibariyle açık gözenekli polimer köpük yapısı elde edilir ve ardından açık hücreler yeterli seviyede ısı dayanım özelliği bulunan mullit ($3Al_2O_3.2SiO_2$), fenolik reçine, kalsiyum karbonat karışımı ya da

basit bir alçı bulamacı ile doldurulur. Uygulanan bulamacın kurumasından sonra ısı tesiriyle polimer bünyeden uzaklaştırılır ve polimer köpük yapısının bir kopyası özelliği taşıyan boşluğa metal eriyik dökülerek doldurulur. Eğer kılcal boşlukların doldurulmasında sıvı metalin basit yerçekimi etkisiyle dökümünde sorun yaşanıyorsa kalıba basınç ve ısıtma uygulanması gerekebilir. Kalıp malzemesinin çıkarılmasından sonra metalik yapı elde edilir. Bu süreçte karşılaşılan zorluklar kılcallıkların tam olarak doldurulması, katılaşma yönünün kontrolünün sağlanması ve üretimi yapılan çok ince yapılı parçaya hasar vermeden kalıp malzemesinin uzaklaştırılmasıdır [8, 11, 12, 29].



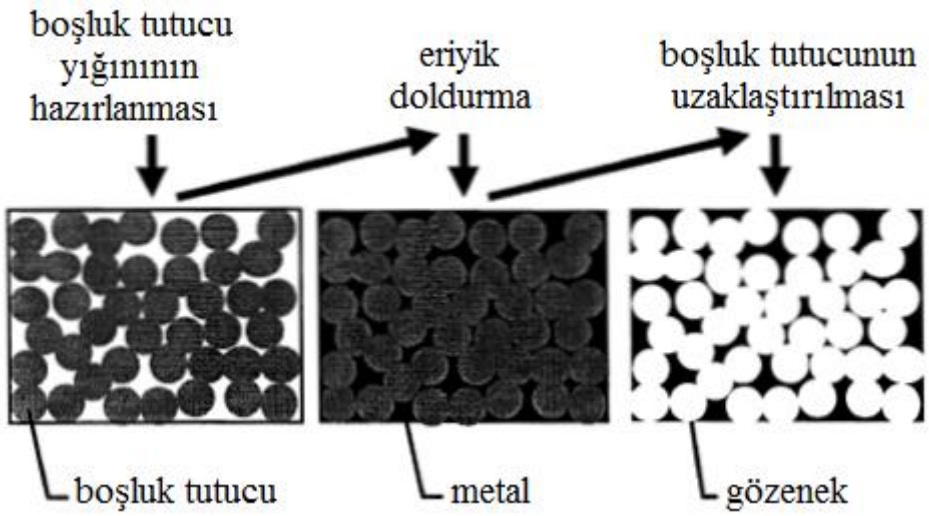
Şekil 1.19. Hassas döküm yöntemi ile hücresel metallerin üretimi [11]

Bu türden köpüklerin ERG (Oakland, USA) firması duocel ticari adıyla ve bildirildiğine göre Japonya'da bir başka firma tarafından da satışı gerçekleştirilmektedir. Çeşitli tasniflerle 2—16 gözenek/cm (5—40 ppi) aralığında sınıflandırılmışlardır. Karmaşık şekilli parçalar polimer köpüğün istenilen şekle uygun ön kalıplanmasıyla imal edilebilir. Aachen Üniversitesi'nde yapılmış alüminyum köpük parçalara ait bazı örnekler Şekil 1.20'nin sağ tarafında görülmektedir. Alüminyum alaşımlarından 6101 ve AlSi7Mg (A356) gibi türler bu yöntemde genel olarak kullanılırlar fakat bakır, magnezyum gibi diğer metallerin üretimde kullanılmaları da mümkündür. Ön görülebileceği üzere nihai metal ürünün yoğunluğu ve köpük morfolojisi polimer öncü tarafından belirlenir. Elde edilen ürünlerin gözenek oranı genellikle yüzde 80 ila 97 arasında değişir.



Şekil 1.20. Sol: duocel malzemeye ait SEM görüntüsü, Sağ: hassas döküm yöntemiyle üretilmiş bazı parça örnekleri [11]

Metalik kafes yapılı blok malzemelerin başlıca avantajları teorik sınıra oldukça yakın, hesaplanma ile tahmini mümkün olan ve tekrarlanabilir mekanik mukavemet değerine sahip olmalarıdır. İçi boş kürelerin etrafına sıvı metalin dökülmesiyle ya da metal eriyiğin içerisinde vermikulit veya pişirilmiş kil parçacıklarını, çözünebilir tuzları, genleştirilmiş gevşek granül kil yığınlarını, kum topakları, köpürtülmüş cam küreleri inorganik dolgu maddeleri olarak kullanmak mümkündür. Granüller döküm sonrasında her iki durumda da metalik ürün içerisinde kalır yada uygun bir çözücü veya termal işlem uygulanarak bünyeden arındırılır. Söz konusu işlemin şematik hali Şekil 1.21'de görülmektedir [11, 30, 31].



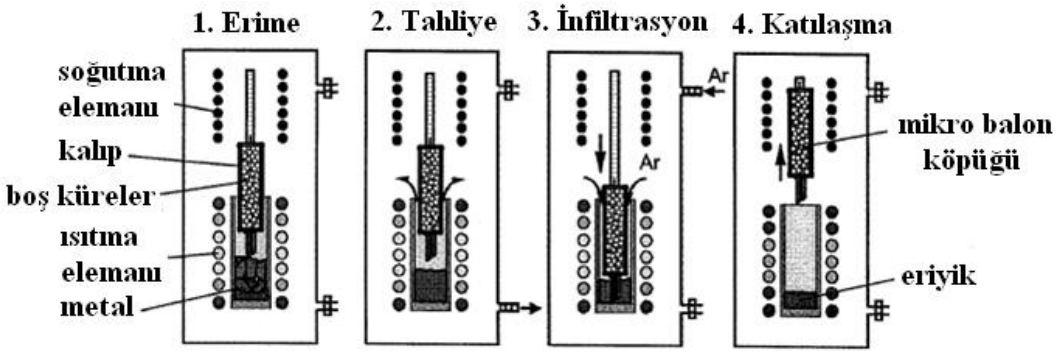
Şekil 1.21. Yer tutma dolgu maddeleri kullanarak hücresel metalik malzemelerin üretimi [11]

Eğer eriyin katılaşma hızı yeteri kadar hızlı ise polimer küreleri organik yer tutucu olarak kullanılabilir. Diğer bir gereksinimde basınçlı döküm makinesinde olduğu gibi

yüksek basınç etkisi altında boşlukların arasından süzdürmedir. Boşluk tutucu tuzlar su içerisinde çözdürülerek yapıdan uzaklaştırılır. Kum topakları bağlayıcılarının ısı etkisiyle parçalanması halinde kolaylıkla temizlenebilirken polimer kürelerin yakılması gerekmektedir. Alüminyum, çinko, kurşun, kalay gibi oldukça geniş bir metal grubunun bu yolla şekillendirilmesi mümkündür. Üretim sonrasında oldukça üniform bir yapı ve neredeyse isotropik köpük özellikleri elde edilir. Sandviç panellerin üretilmesi de mümkündür. Boşluk tutucu kullanımının en avantajlı taraflarından birisi elde edilen köpük yapının gözenek büyüklüğü dağılımının dolgu amaçlı kullanılan granüllerin boyut dağılımı sayesinde yakından kontrol edilmesidir. Boşluk tutucular ile elde edilebilen maksimum gözenek hacim oranı %80'in altında iken, doğrudan köpüklendirme yöntemleriyle elde edilen köpüklerde bu oran %98'e kadar çıkabilmektedir [11, 30, 34].

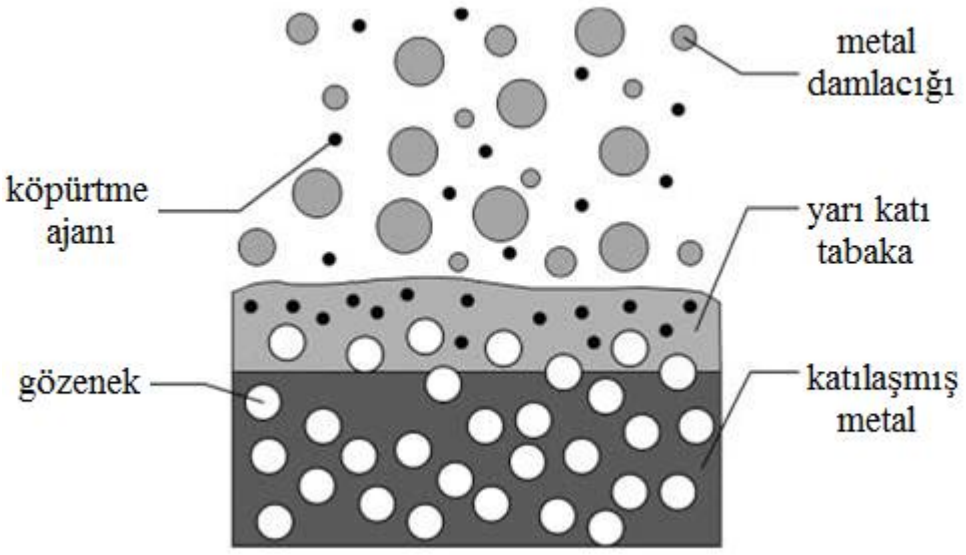
1.2.1.5. Sprey şekillendirme (Osprey) yöntemi

Sprey şekillendirme yöntemi farklı metal ve alaşımlarının üretimine olanak sağlayan bir metottur. Metal eriyik sürekli olarak atomize edilir ve küçük metal damlacıklarının hızla uçuştuğu bir sprey meydana getirilir. Damlacıklar bir alt tabaka kütük, sac, tüp gibi belirlenen şekle uygun yoğun bir birikinti oluşturmak üzere seçilen parametrelere göre toplanıp büyürler. Spreyle biçimlendirilmiş malzemeler düşük miktarda oksit içerir, ince taneli veya yüksek miktarda yarı kararlı alaşım fazları mevcuttur. Genellikle bu özelliklerin kombinasyonu geleneksel döküm yöntemleriyle elde edilemez. Şekil 1.22'de verilen diyagram mikro balon köpüklerinin imali için uygulanabilecek bir yöntem örneğini şematize etmektedir. Açıklaması yapılan bu yöntemde ticari olarak temin edilebilen 2,1—3,6 mm çapındaki içi boş alümina küreler ve 100—200 mm et kalınlığı kullanılmıştır. Küreler çelik bir kalıp içerisine dizilmiş ve yüksek yoğunluklu sıkı paket düzenini sağlamak için vibrasyon uygulanmıştır. Ardından küre yığını 700 °C 'de magnezyum eriyiği ile basınç altında infilitre edilmiştir [8, 11, 32].



Şekil 1.22. Mikro balon köpüğü (syntactic foam) üretiminde işlem basamakları [11]

Sprey işlemini bir özelliği özellikle çekici kılmaktadır. Oksitler, karbürler veya saf metaller gibi tozların sprey içerisinden enjeksiyon edilip bunların tepkimeye girmesine müsaade edilerek yada sıvı metal damlacıkları tarafından ıslatılması ve metal içerisine dahil olarak tabaka üzerine çöktürme yoluyla tabakanın özelliklerinin iyileştirilme olanağı vardır. Karbür ve oksit tozları ilave edilirse bu yöntemle metal matrisli kompozitlerin üretilmesi mümkündür. Enjekte edilmiş olan tozların erimiş metal ile temas halinde olmaları ve büyük miktarda gaz salınımında bulunmaları durumunda, gözenek yapısı oluşturulabilir. Şematik açıklama Şekil 1.23'de sunulmuştur. Bu yöntem ile %60 oranına kadar gözeneklilik elde etmek mümkündür. Ancak gözenek morfolojisinin dağılımı düzen bakımından zayıftır [11].



Şekil 1.23. Sprey şekillendirme ile metal köpük üretimi [11]

1.2.2. Hücresel metallerin katı halde üretilmesi

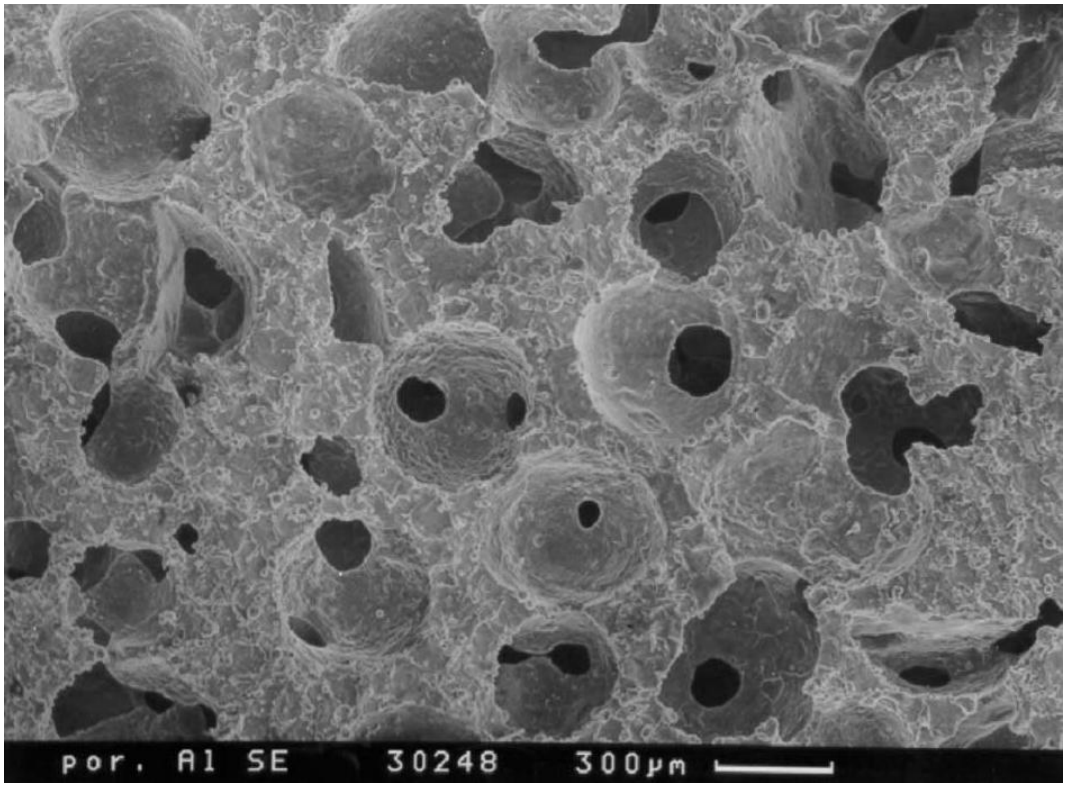
Erimiş metal yerine, toz halindeki katı metal hücresel metalik yapıların üretiminde kullanılabilir. Metal tozu üretim süreci boyunca tamamen katı halde kalır ve sadece sinterleme veya diğer katı hal işlemlerinden geçer. Bu durum sonuçta elde edilen hücresel yapının morfolojisi için çok önemlidir. Sadece sıvı haldeki yüzey gerilimi kapalı gözeneklerin oluşma eğilimini artırır. Halbuki sinterlenmiş gözenekli ürünler sinter boyunlarına bağlanan çok veya az küresel partiküllerin olduğu izole halde tipik açık morfolojidedir. Bu yöntemle imal edilmiş bazı parçalar Şekil 1.24'de görülmektedir. Parçaların kompakt kısımları gözenekli bölümlerle beraber yapısal bir kompozittir, en uzun silindirik parçanın boyu 130 mm dir. Bu şekilden aynı zamanda köpük kompozitler ile alüminyumun bir arada üretilebilirliği örneklenmektedir. Yivler malzemenin köpük olmayan kısımlarında pnömatik cihazın gaz çıkışının eklenebileceği bir nem alma elemanı bağlayabilmek için açılmıştır [8, 11].



Şekil 1.24. Sinterlenmiş gözenekli ürünler

Boşluk tutucu teknolojisinin yüksek basınç infilitrasyon yöntemiyle açık gözenekli bir alüminyum malzemenin gözenek morfolojisi Şekil 1.25'de görülmektedir. Buradaki yapıda dolgu malzemesi tamamen uzaklaştırılmış, yoğunluk 1,1 gr/cm^3 değerinin altındadır. Son zamanlarda, tozların basit sinterlenmesiyle elde edilen gevşek yığınlar gözenekli metallerin elde edilmesinde en kolay yöntemdir, üretim

aşamaları toz metalürjisi yöntemlerine uygundur. Toz kompakt içerisine gaz hapsetme, boşluk tutucu dolgu malzemeleri, köpürebilir metalik toz çamuru kullanımı gibi daha gelişmiş teknolojilerle gözenekli yapı oluşumu sağlanabilir [11].

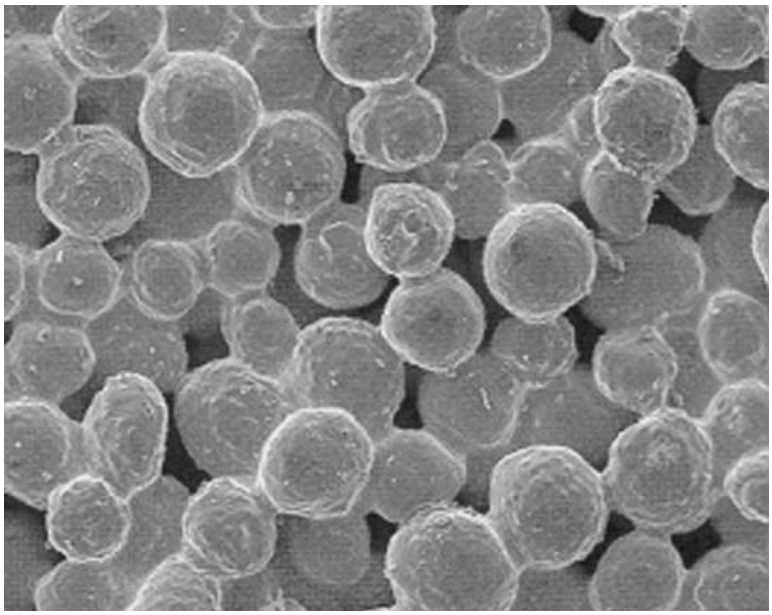


Şekil 1.25. Boşluk tutucu dolgular kullanılarak üretilmiş bir hücresel alüminyum malzeme, yoğunluk 1,1 gr/cm^3 [11]

1.2.2.1. Metal tozların sinterlenmesi

Günümüzde gözenekli metalsel ürünlerin çok çeşitli uygulamalar için kütlesel üretimine başlanılmıştır. Titanyum ve süperalaşımlar da dahil olmak üzere çok çeşitli metallerin kullanılmasına rağmen bronz ve paslanmaz çelik ticari uygulamalarda daha sık kullanılırlar. Genel olarak, gözenekli yapıların üretimi toz ayrıştırma ve hazırlama, sıkıştırma veya kalıplama ve sinterleme gibi çeşitli adımlar içermektedir. Serbest paketleme ya da ağırlık sinterlemesi broz (Cu89Sn11) için en çok başvurulan yöntemdir. Mukavemet değerleri göreceli olarak düşük olsa da sinter sıcaklığı 820 ^{o}C civarında olup, % 20 ila 50 arasında gözeneklilik oranı elde etmek mümkündür. Bu türden bir malzeme Şekil 1.26 'da görülmektedir. Tozların kalıpta eksenel kompaktlanması, izostatik presleme veya haddeme ile kompaktlanması sonucu parçacıkların temas noktalarında soğuk kaynamalarıyla sinterleme öncesi yeşil kırılganlık dayanımı artar. Bu işlemi izleyen sinterleme uygulamasından sonra

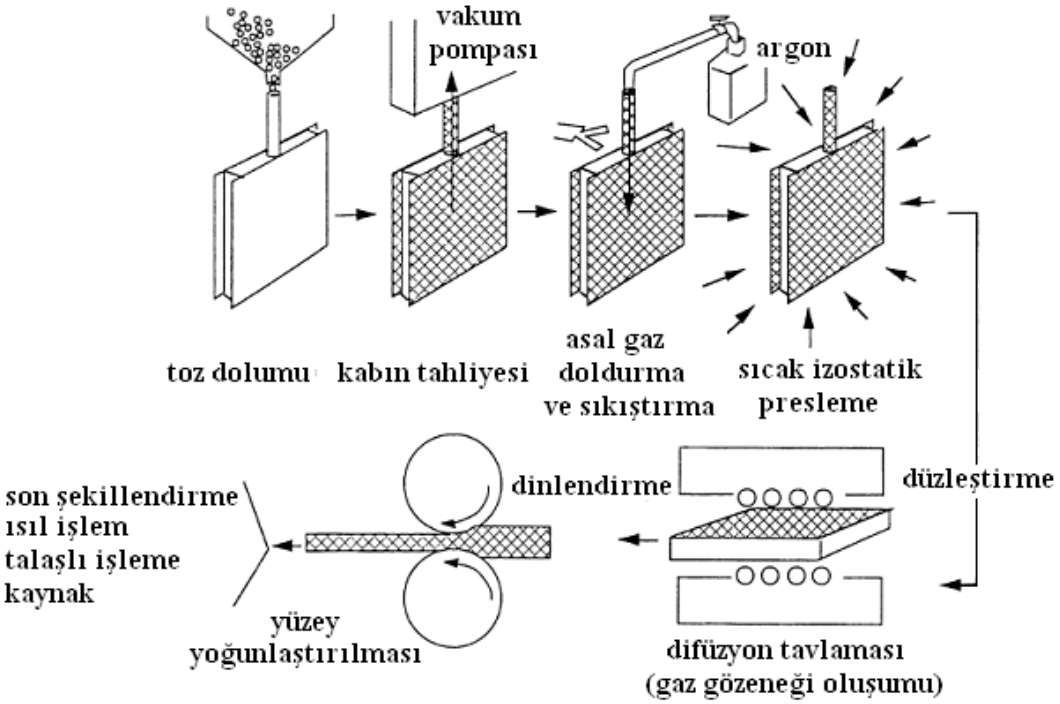
yoğunluk ve dayanım artırır ve çok ince gözeneklilik karakteristiğine sahip parçalar elde edilir. Islak toz püskürtme tekniği ince tozlarla bağlayıcı çamurların taşıyıcı bir sıvı ile beraber gözenekli altlık üzerine spreylenmesiyle oluşur. Daha sonra oluşturulan kaplama tabakasının kurutulması ve difüzyonu bir vakum veya hidrojen atmosferi altında gerçekleştirir. Bu yöntemle oldukça ince gözeneklerin (1 mm 'den daha az) elde edilmesi mümkündür. Alüminyum alaşımlarının tozları ve granülleri kullanılarak gözenekli metalsel yapı oluşturmak bahsi geçen diğer metallere nazaran daha zordur. Çünkü alüminyum yüzeyi genel olarak yoğun bir oksit tabakası ile kaplı durumdadır ve bu oksit tabakası parçacıkların birbirlerine sinterlenmesini önleyici rol oynar. Bu sorunu aşmak için toz veya granül karışımlarında oksit filmlerini kırmak ve partiküller arasında metalik bağ oluşturmak için presleme esnasında deformasyon uygulanabilir. Alternatif olarak, sinterleme işlemine yardımcı olan bakır, silisyum veya magnezyum tozu gibi 595—625 °C aralığında düşük erime sıcaklığında ötektik alaşım sağlayan ilaveler kullanılabilir. Basınçsız sinterleme için alüminyum granüller ve sinterleme yardımcıları sinterleme öncesi alaşımlandırma sürecinin mekanik olarak uyarılması (indüklenme) amacıyla öğütülebilir. Ulaşılan yeni toz yapısı metal lifler içererek gözenekli metalik yapıların üretimi için yeni olanaklar açmaktadır [8, 11].



Şekil 1.26. Yaklaşık 100 mm çaplı partiküllerin sinterlenmesiyle elde edilmiş gözenekli bronz yapısı [11]

1.2.2.2. Gaz hapsetme tekniği

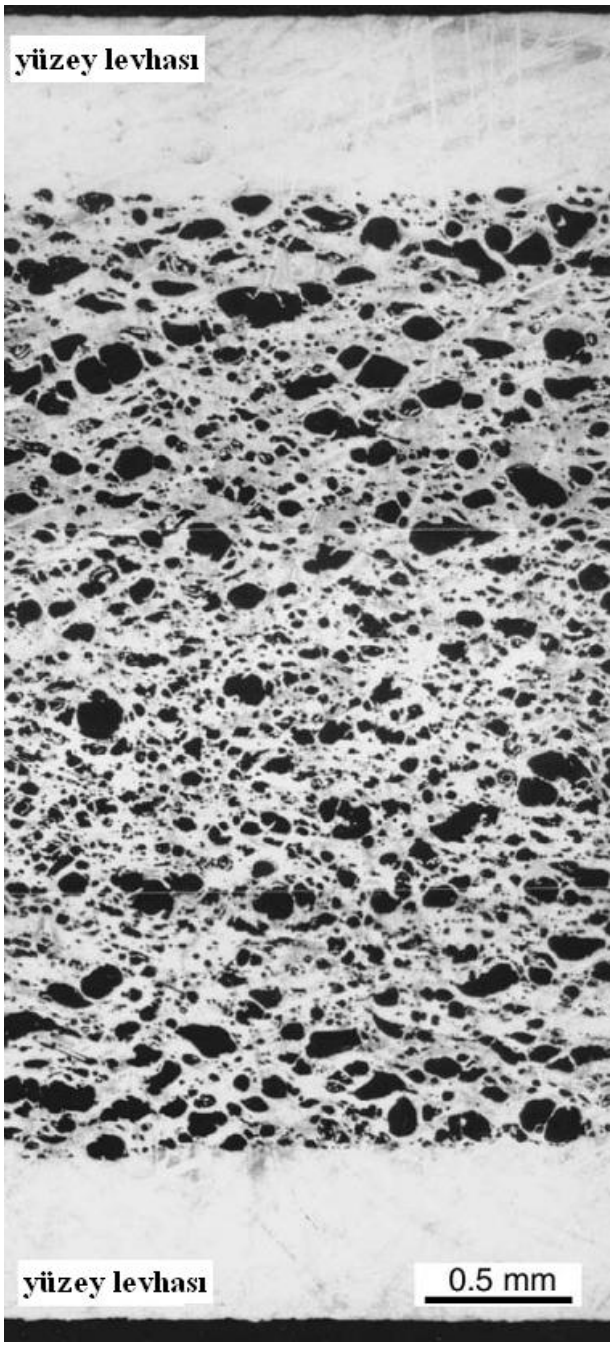
Hücresel metaller kompakt toz ergitme tekniğinde bahsedilen prosese benzer şekilde ancak bir köpürtücü ajan ve metal eritme olmaksızın imal edilebilir. Bunun için tozlar yoğun bir öncü malzeme elde etmek için sıkıştırılır. Sıkıştırma esnasında malzeme içerisine gaz hapsolmasına müsaade edilir. Bir ikinci adımda öncü malzemenin ısıtılması söz konusudur ve metal genleşmesine hapsolmuş gazın doğurduğu iç basınç neden olur. Genleşme katı halde iken gerçekleşmektedir ve bu nedenle gerçek köpürmeden bahsedilemez. Ancak yapıda katı halde gerçekleşen bir sürünme süreci söz konusudur. Bu yöntem Amerikalı uçak üreticisi Boing tarafından gözenekli titanyum yapılar elde etmek üzere uygulanmaktadır. Şekil 1.27'de yöntemin uygulaması şematize edilmiştir [8, 11].



Şekil 1.27. Gaz hapsetme tekniği [11]

Kabın duvarlarının toz içermesi durumunda muhtemel iki fonksiyondan bahsedilebilir. Tozların sızdırmaz bir şekilde tutulmasının yanı sıra, bu bölgelerde ısıl işlem sonrası hücresel çekirdek yapı üzerinde yoğun bir dış tabaka oluşturarak köpükleştirilmiş çekirdek barındıran iki yüzeydeki levha yapısıyla sandviç yapıların üretimine olanak tanınabilir. Bu yöntem izlenerek elde edilmiş olan bir sandviç yapı kesiti Şekil 1.28'de görülmektedir. Büyük bir levha olarak 1,2 x 2,1 m ölçülerinde

kesildikten sonra genleşme öncesi yoğunlaştırma için sıcak haddelenir. Elde edilen yapının bağıl yoğunluğu dökme titanyum yoğunluğunun % 66 sı kadardır [11].



Şekil 1.28. Gaz hapsetme tekniği kullanılarak imal edilmiş Ti6Al4V malzemeden gözenekli öze sahip sandviç yapı [11]

1.2.2.3. Çamurların köpüklendirilmesi

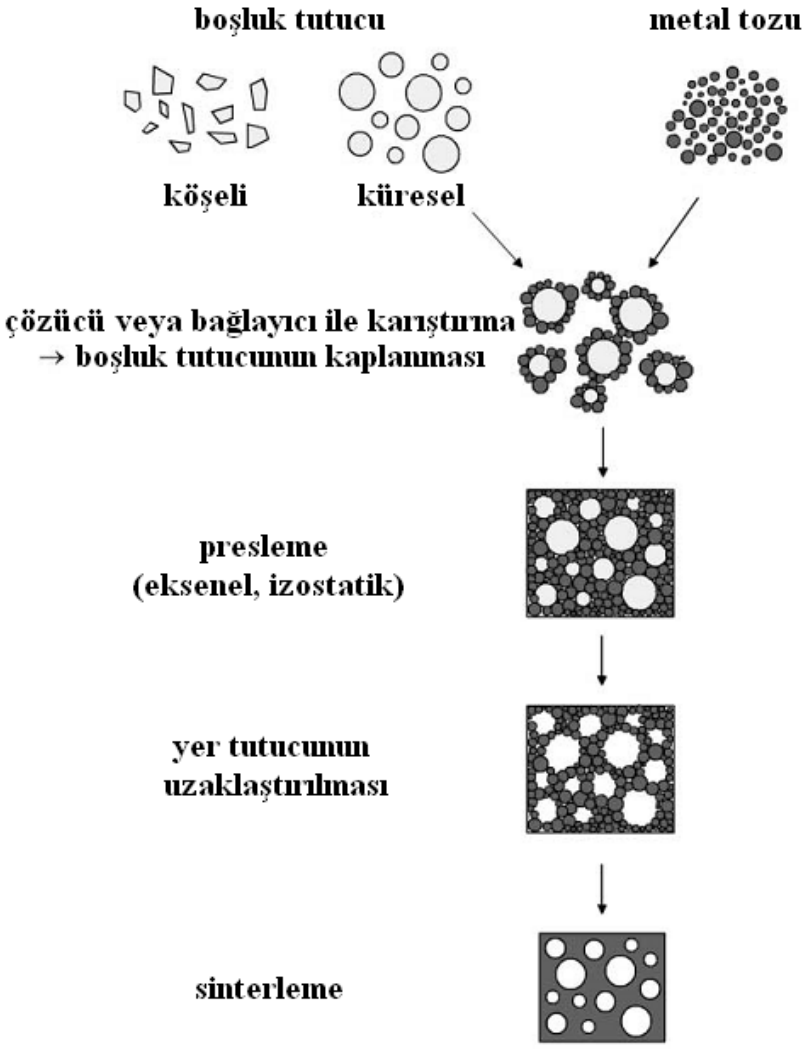
Metalik köpükler metal tozu, köpürtme ajanı ve bazı reaktifler içeren bir çamur bulamaç hazırlanarak da üretilebilir. Karıştırıldıktan sonra bulamaç bir kalıp içerisine

dökülür ve yüksek sıcaklığa bırakılır. Katkı maddeleri ve köpürtücü ajanın etkisiyle bulamaç çamur viskoz hal alarak gazın genleşmesiyle beraber yapı da genleşmeye başlar. Yeterli stabilizasyon önlemlerinin alınması durumunda genişletilmiş bulamaç yapısı korunabilir ve tamamen kurutulmasından sonra da kayda değer dayanım değerine sahip olan bir metal köpük üretimi için sinterleme işlemi uygulanır. Alüminyum tozlarından ortofosforik asit ile alüminyum hidroksit ya da hidroklorik asit köpürtme ajanı olarak kullanılarak köpükler imal edilmektedir. Elde edilen bağıl yoğunluk değeri %7 'den daha azdır. Bu yöntemle ilgili olarak üretilen köpük malzemeler için halen yetersiz dayanım ve çatlaklı yapı oluşumu söz konusudur. Bulamaç çamurları açık gözenekli metalik köpük üretimi için alternatif olarak kullanılabilir. Bu amaca yönelik olarak açık gözenek yapısına sahip bir polimer köpük içerisinde gümüş ve gümüş oksit tozlarının karışımını barındıran bir bulamaca daldırılır. Daha sonra bu şekilde kaplanan köpük kurutularak polimerin yanacağı ve metal tozu parçacıklarının aralarında sinterlenmeye başlanacağı bir sıcaklığa kadar ısıtılır [8, 11, 35].

1.2.2.4. Yer tutucu katkılara dayanan hücresel metaller

Döküm yöntemlerine benzer şekilde gözenekli sünger benzeri malzemeler dolgu malzemeleri ve metal tozlarının kullanımıyla elde edilebilir. Bu tekniğin döküm yöntemlerinden farkı yer tutucu malzemenin büyük bir kısmının inflitre edilen sıvı metal yerine ince metal tozu ile doldurulmasıdır. Yöntem Şekil 1.29'da şematize edilmiştir. Metal tozu kuru takviye malzemeleri yığınına, uygun bir çözücü içerisine ve hatta organik bir bağlayıcı içerisine doldurulur, boşluk tutucular ve metal tozları karıştırılması mümkündür. Seramik parçacıklar, içi boş küreler, polimer taneleri, içi boş polimer küreleri, tuzlar ve metaller dahi boşluk tutucu olarak kullanılabilir. Doldurulan yığına daha sonra oda sıcaklığında basit bir sıkıştırma uygulanabilir ya da boşluk tutucuların ısıya dayanımları söz konusu ise sıkıştırma miktarını arttırma ve toz parçacıkları arasındaki sinterleme sürecini başlatma için yüksek sıcaklıklarda presleme uygulanır. Her iki durumda da, içerisinde gömülü tanecikler barındıran metal matrisli bir kompozit yapı elde edilir. Eğer metal içeriği yeteri kadar düşükse boşluk tutucu malzemenin bünyeden nerdeyse tümüyle uzaklaştırılması bir ileri işlem adımıyla mümkündür. Çünkü dolgu malzemesinin birbirleriyle olan bağlantılısı ağ yapısı oluşturur. Bu uygulama ısıl işlem, yıkama veya su bazlı bir çözücü

kullanılarak yapılabilir. Son bir sinterleme adımı daha yoğun gözenekli metal ağının oluşturulması amacıyla uygulanabilir. Örnek olarak titanyum köpüklerin üretiminde şu üç yoldan birisi izlenebilir. Birinci yol boşluk tutucu olarak polimer küreler kullanmaktır. Titanyum tozu ile beraber polimer kürelerden oluşan yığın titreşim kullanılarak yüklendikten sonra soğuk presleme yapılır, takiben uygulanan ısıl işlemle polimer bünyeden uzaklaştırılır ve son olarak sinterleme uygulanır. Elde edilen yapı Şekil 1.30 (sol)'da görülmektedir [35, 36].



Şekil 1.29. Metal tozlarından gözenekli metalsel yapıların üretiminde boşluk tutucu tekniği

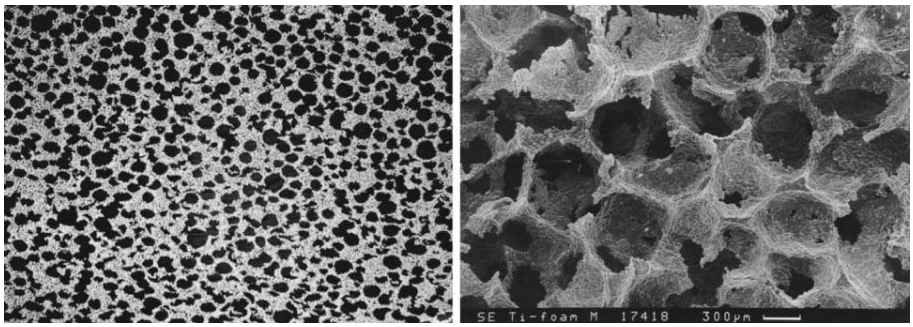
Alternatif olarak ikinci yol magnezyum metal granüllerin dolgu maddesi olarak kullanımıdır. Bu süreçte magnezyum granül yığını titanyum tozu ile doldurularak elde edilen karışım magnezyum erime noktasının çok altındaki bir sıcaklıkta

preslenir. Ardından magnezyum granülleri 1400 °C sıcaklığında uzaklaştırılır, bu sıcaklıkta titanyum parçacıklar arasında sinterleme sürecide eşanlı olarak başlar [11].

Bu durum için magnezyumun düşük kaynama noktası (1107 °C) ve titanyum ile tam çözünmezlik durumu bir avantajdır. Şekil 1.30 (sağ)'da bu yolla üretilen bir malzeme yapısı görülmektedir. Son olarak yüksek gözenek oranına sahip titanyum üretimi için üçüncü yol boşluk tutucu olarak 0,4 ila 2,5 mm tane boyutlarında karbamid (üre) ile 45 mm den daha az tane boyutlarında petroleterle nemlendirilen titanyum tozları kullanımıdır. Karışımlar 166 MPa basınç altında preslenerek 170 °C sıcaklıkta ısıl ileme maruz tutulur ve son olarak 1400 °C ye ısıtılır. Elde edilen gözenek oranı %70 mertebesindedir. Paslanmaz çelik (316L) ve bazı nikel esaslı süper alaşımlarda %60 ila 80 arasında değişen gözenek oranlarında hücresel katılar olarak işlenmişlerdir [11, 36, 37].

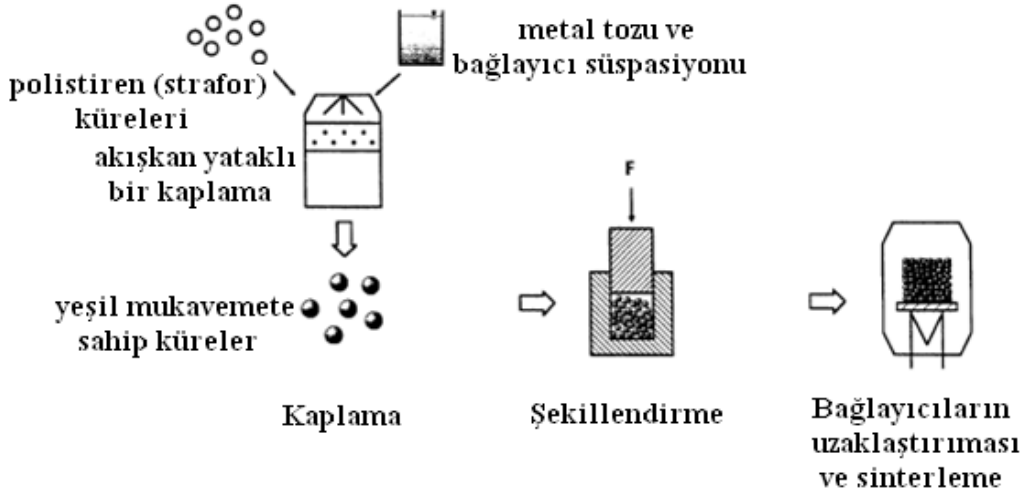
1.2.2.5. İçi boş metalsel küreler

Bakır, nikel, çelik ya da titanyum esaslı içi boş küreler yüksek oranda gözenekli yapılar oluşturmak için sinterlenerek kullanılabilirler. Metalik içi boş kürelerin elde edilmesi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Polimer kürelerin üzerine söz konusu metalin kimyasal ve elektriksel kaplamanın kombine uygulanmasından sonra ki adımda polimer yapıdan uzaklaştırılır veya bir diğer yol olarak polimer kürelerin (örn., polistiren) bir bağlayıcı ve metal süspansiyon ile kaplanmasından sonra yoğun bir metal kabuk elde etmek için sinterleme uygulanır bu esnada polistiren uzaklaştırılır. Şekil 1.31 'de üretim yolu gösterilmektedir [8, 11, 38].



Şekil 1.30. Toz metalurjisi yöntemiyle hücresel titanyum üretiminde boşluk tutucu olarak polimer (solda) ve magnezyum (sağda) granülleri kullanımı [11]

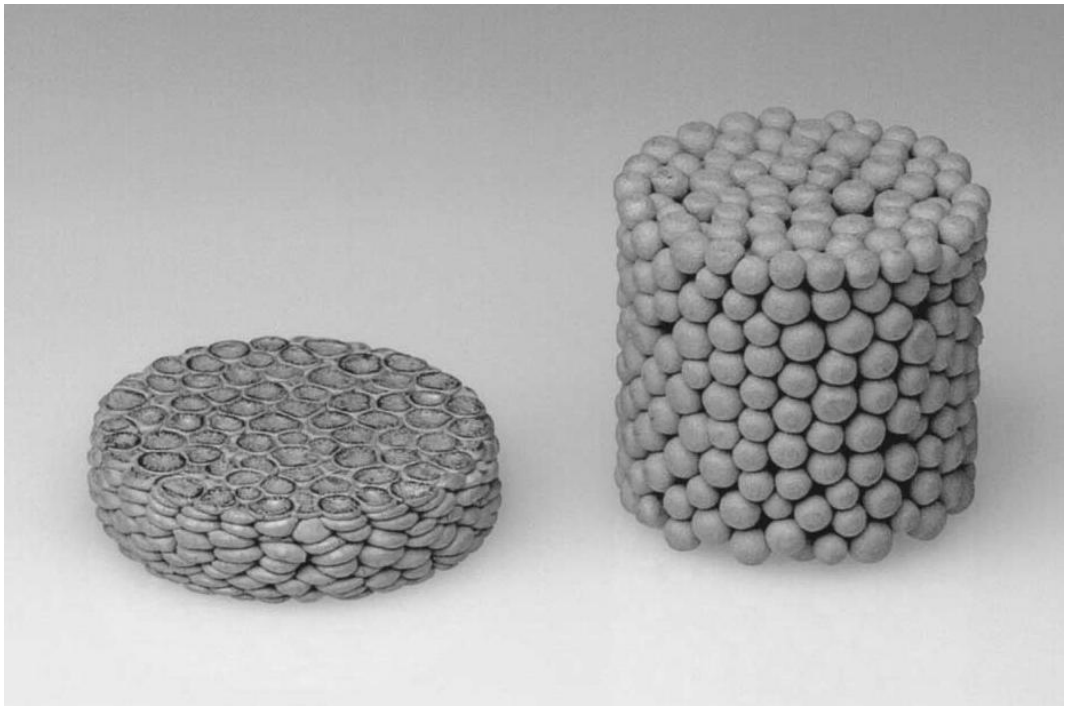
Diğer bir yol metal tozu, metal oksit tozu veya metal hidrit tozu çamurlarından mikro küreler oluşturma amacıyla eşeksenli nozullarla üfleme uygulanır ve küreler damla tüpü içerisinde kurutularak sinterleme veya deoksidasyon uygulanır. Son bir yol metalik eriyiklerin atomize edilmesi ve bunun için içi boş kürelerin şekillendirileceği parametrelerin seçimidir. Olağan küre çapları 0,8 ila 8 mm aralığında, duvar kalınlıkları 10 ila 100 mm aralığındadır. İçi boş küreler hafif yapılı, açık ve kapalı gözenekli, düzenli ve düzensiz yapıdaki hücresel malzemelerin üretiminde kullanılabilir. Eğer küreler birim hücre (Bravais kafesi) düzenine göre dizili durumdaysa, örneğin sinterlemeden önce, düzenli bir malzeme yapısı elde edilir. Balmumu petekler kullanılarak istiflemeye yardımcı olmak mümkündür. Sinterleme sırasında kuvvet uygulanmasıyla küreler deforme edilerek sinterlemede kiriş noktalarının artmasına öncü olan çok düzlemli cisimler halini alırlarken bununla beraber açık gözeneklilik derecesinde azalma meydana gelir. Yapıştırıcı bir bulamaç kullanımı tekil küreler arasındaki teması artırılabilir [11, 38].



Şekil 1.31. İçi boş küre yapıların üretiminde genleştirilmiş polistiren (strafor) kaplama işlemi [11]

Bu uygulama oksit kürelerin birbirleri arasında bir oksit bulamaç ile bağ oluşturmaları, deoksidasyonun gerçekleştirilmesi ve tek adımda sinterleme uygulanması için bir yoldur. Alternatif olarak, bulamaçla kaplanarak bir arada tutulan polistiren kürelerle işleme başlanabilir. Ardından bağlayıcının ayrıştırılması ve yapıştırma tek adımda sağlanır. Açık gözenek yapısı için çok ince olmayan duvar

kalınlıklarına sahip küreler kullanılır. Bu yollardan birisi ile Ti-6Al-4V alaşımı ile hücreler arası gözeneklilik içeriği %36, küre boşluğunda gözeneklilik %44, %20 oranında katı hacimli hücre duvarlarına sahip ve genel yapı olarak 0,9 gr/cm^3 yoğunluk oranına sahip tipik bir hücresel metal elde edilebilir. Sinterlenmiş açık bir içi boş küre örneğine ait tek eksenli deformasyon öncesi ve sonrası örnek Şekil 1.32'de görülmektedir. Metal tozu ile küreler arasındaki boşlukları doldurarak uygulanacak bir sinterleme sonrası kapalı yapılar elde edilebilir. Bu durumda ince duvarlı küreler yeterli olmaktadır. Sandviç tipi yapılar basit bir şekilde içi boş kürelerin toplu olarak iki levha arasında sinterlenerek gerek küreler arasında gerekse yüzey levhaları ile küreler arasında bir bağ oluşturulmasıyla imal edilebilir [11, 39].



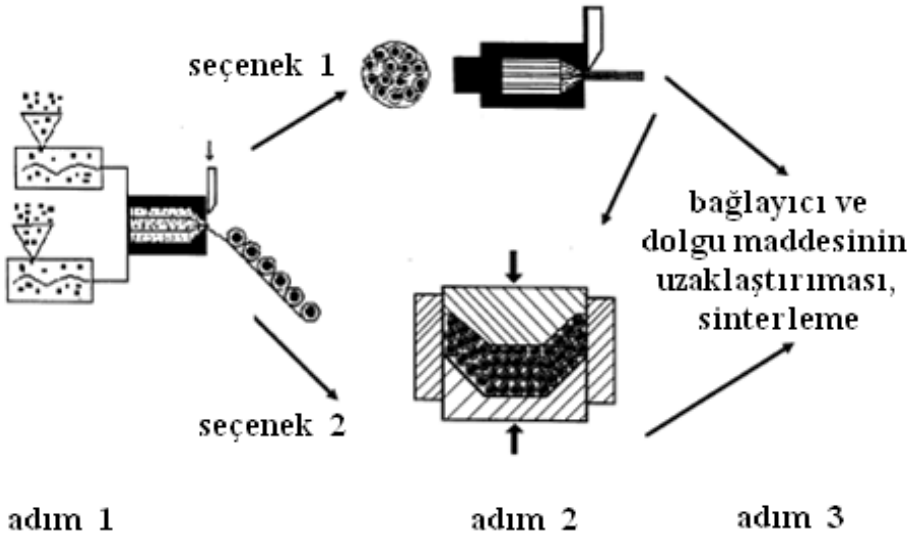
Şekil 1.32. Sinterleme ile paslanmaz çelik kürelerden imal edilmiş açık içi boş küre yapısının tek eksenli deformasyon öncesi ve sonrası görünümü, parçaların çapları yaklaşık 20 mm [11]

İçi boş küre yapıların avantajlarından biri gözeneklerin rastgele dağılımlı değil düzenli olmasıdır. Metallerin doğrudan köpüklendirilmesi ve kompakt toz ergitme tekniğinde tarif edildiği gibi içi boş küre yapılarının istenen düzene uygun dizilimiyle bu ayarlamayı yapmak mümkündür. Bu nedenle içi boş küresel yapıların mekanik ve diğer fiziksel özellikleri rastgele gözenek boyutuna sahip "gerçek köpüklere" nazaran tahmin edilebilir özelliktedir. Başka bir avantajı ise prensip olarak süper alaşımlar, titanyum alaşımları ve intermetalikler gibi malzeme yelpazesinin tamamının toz

metalürjisi yönteminde kullanımı mümkündür. Bunun doğal bir sonucu olarak yüksek sıcaklık uygulamalarında da içi boş küre yapıları kullanılabilir. Metal tozu, sıvı metal arasındaki boşlukların doldurulması yerine infiltrasyon uygulanabilir, yapının tam olarak doldurulduğundan emin olmak amacıyla tercihen basınç uygulanması ve kürelerin ön ısıtılması mümkündür. Döküm yöntemleri kısmında anlatılan işlemlerle burada uygulamanın direk bağlantısı söz konusudur [11, 39, 40].

1.2.2.6. Metal tozu bağlayıcı yöntemleri

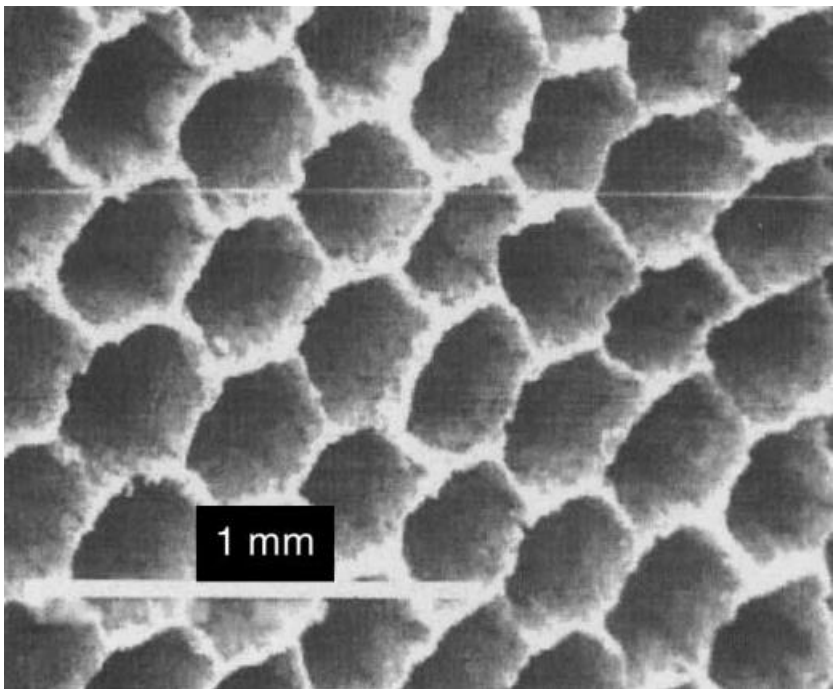
Bu yöntemde gözenekli malzemeler ve parçaların üretimi için metal tozu ve polimer bağlayıcı karışımlarına presleme veya ekstrüzyon uygulamasından sonra ısıl işlem yapılır. Herhangi bir boşluk tutucu kullanılmamasına rağmen %50 oranına kadar gözenekli yapı elde etmek mümkündür. Benzer şekilde, yönlendirilmiş gözenek yapısına sahip olan kanal çapları birkaç mikrondan birkaç milimetre arasında değişen çeşitli metallerden ve alaşımlarından malzemeler üretilebilmektedir. Gerekli işlem adımları Şekil 1.33'de açıklanmıştır [8, 11].



Şekil 1.33. Metal tozlarıyla yönlendirilmiş gözenekli hücresel metallerin üretimi [11]

İlk olarak uçucu bir boşluk tutucu ile plastik bağlayıcı karışımı içeren çekirdeğe sahip ve bir metal tozu/ bağlayıcı karışımından kabuk yapısı olan ikili malzemeden (bimaterial) üretilmiş çubuklar hazırlanır. Daha sonra elde edilen çubukların demetleri yeşil mukavemet kazanana kadar preslenir. Bu noktada takip edilebilecek diğer yol demetlere ekstrüzyon uygulanarak yeşil mukavemete sahip gelişi güzel

kesitli bir malzeme veya eksenel preslemeyle karmaşık şekilli gene yeşil mukavemete sahip malzemenin elde edilmesidir. Üçüncü aşamada, bağlayıcı ve boşluk tutucu yapıdan uzaklaştırılır ve metal tozu sinterleme işlemiyle bağlanır. Demirden üretilmiş bir mikro-petek örneği Şekil 1.34'de görülmektedir [11].



Şekil 1.34. Altıgen kesitli yönlendirilmiş gözenekli demir numunesi (gözenek oranı %86) [11]

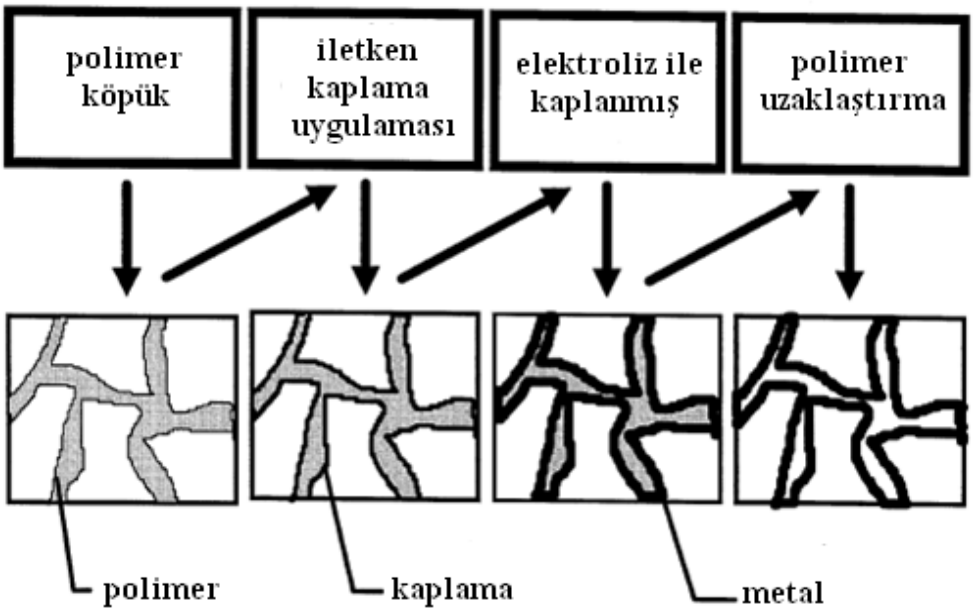
1.2.2.7. Reaksiyon sinterlemesi

Ti + Al, Fe + Al veya Ti + Si gibi metal tozu karışımlarının reaksiyon sinterlemesi yöntemiyle gözenekli yapıların elde edilebilirliği bilinmektedir. Bu durum çok bileşenli bir sistemin bileşenlerinin birbirleri içinde farklı difüzyon katsayılarının bulunmasından ileri gelmektedir [11].

1.2.3. Elektro—çökeltme tekniği

Çökelme tekniği bir elektrolit içinde iyon çözülmesi durumda olduğu gibi metallerin iyon durumuna geçmesiyle başlar. Açık gözenekli polimer köpük üzerine metal elektriksel olarak çökeltilir. Uygulama Şekil 1.35 'de görülmektedir. Bu prosedürde ve döküm yöntemleri içerisinde bahsedilen hassas döküm yönteminde metalik halde gerçek köpükleşme oluşmamaktadır. Bu yöntemde proses esnasında metal ile yer değiştirecek bir polimer köpük kullanımı da mümkündür. Polimer köpük üzerine

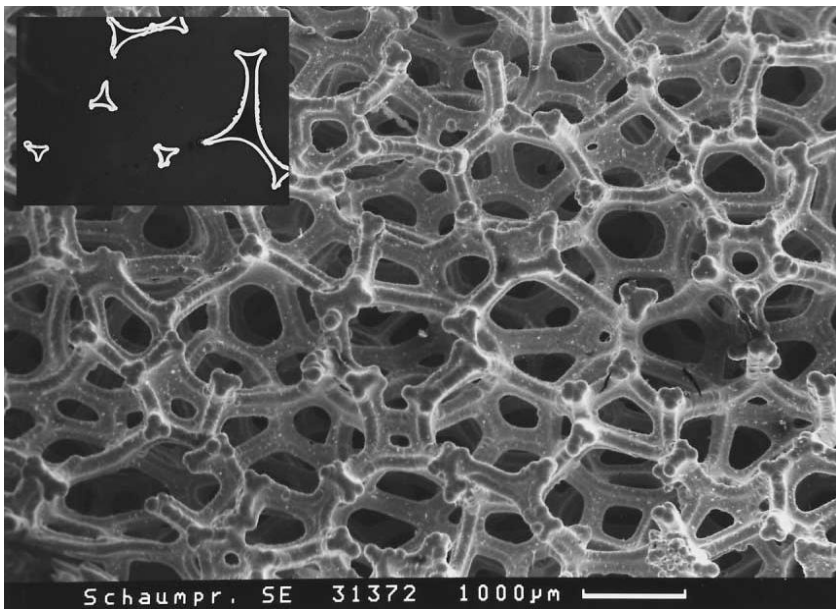
elektro çökertme yönteminin uygulanması için polimer köpük yapısının bir miktar elektriksel iletkenliğe sahip olması gerekir. Bu iletkenliğin sağlanabilmesi için polimer köpük grafit veya karbon siyahı esaslı iletken bir bulamaca daldırılır ya da akım kullanılmaksızın kaplama yapılabilen bir çözeltiye daldırılır veya polimere katot durumuna geçecek ince bir iletken tabaka ile kaplama işlemleri uygulanır [11, 41].



Şekil 1.35. Metalik köpük üretiminde elektro çökertme tekniği [11]

Elektrolitik kaplama sonrası polimer metal/polimer kompozit yapısından ısıl işlem uygulanarak uzaklaştırılır. İçi boş olan metalik payandaların üç boyutlu düzeni Şekil 1.36 'da görülmektedir. Fotoğrafa ilave edilmiş küçük görüntüde payandaların boşluğu görülmektedir. Çeşitli gözenek derecesine sahip köpükler 2,5 ila 30 hücre / cm (6—70 ppi) aralığında imal edilebilir. Hücre boyutu olarak 3,2 ila 0,5 mm ve yüzey alanı dağılımı 500 ila 7500 m^2/m^3 değerlerine karşılık gelir. Tercih edilen metaller olarak nikel veya nikel-krom alaşımları olmasına rağmen bakır köpükler de yapılabilir. Nikel-krom köpükler alternatif nikel ve krom kaplama uygulamalarıyla üretilmektedir. Ardından uygulanan ısıl işlemle meydana gelen ısıl etki sonucu iki metalin karşıt iyonların iç difüzyonu (interdifüzyonu) ile alaşım oluşumu sağlanır. Bu türden köpükler ticari olarak Retimet (Dunlop, İngiltere), Celmet (Sumitomo Elektrik, Japonya) ve Recemat (Seac, Hollanda) isimleri ile satılmaktadır. Sumitomo firmasının üretim hacminin yıllık binlerce ton aralığında olduğu belirtilmektedir.

Nikel veya nikel—krom köpükler için levhalar 2 ila 20 mm kalınlık aralığında ve 0,4 den 0,65 g/cm^3 arasında değişen yoğunluktadır. Bu türden köpüklerin yoğunluğunun ortalama gözenek boyutundan tamamen bağımsız olduğu tespit edilmiştir [11, 41, 43].

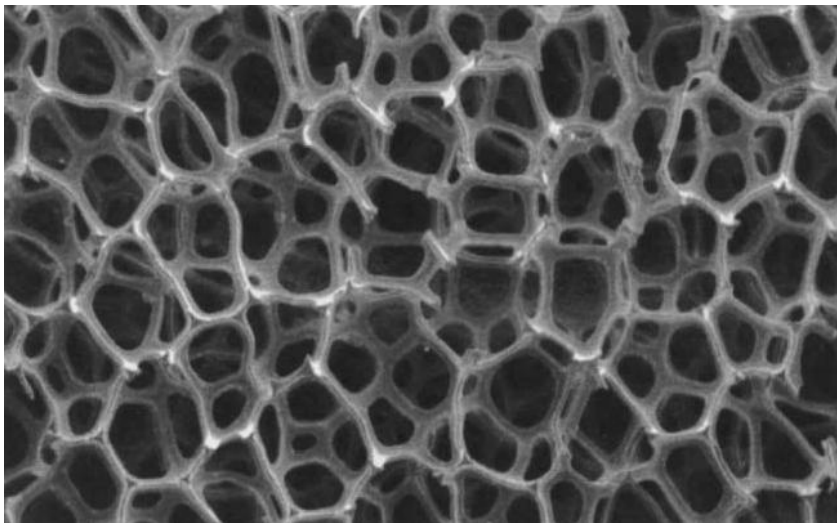


Şekil 1.36. Elektro çökeltme tekniği ile üretilmiş nikel köpük ve içi boş payanda kenarlarının mikro görünümü [11]

1.2.4. Buhar çökeltme

Metal köpüklerin bir değer üretim yolu gaz halindeki metal veya metalikler bileşikler kullanılarak yapılan üretim metodudur. Bu yöntemde üretilecek köpük ya da hücresel malzeme geometrisini tanımlayacak katı bir öncü yapı gerekmektedir. Örnek olarak daha önce döküm yoluyla köpük üretiminde de kullanımından bahsedilen ağ yapılı poliüretan köpükler veya kafes blok yapılı polimer öncüler kullanılabilir. Bir vakum odasında metal buharı elde edilerek soğuk öncü üzerine buhar yoğuşturulur. Polimer öncü yüzeyine yoğuşturulan metal tabakalar halinde birikerek buhar yoğunluğu ve maruz kalma süresi tarafından karakterize edilen belli bir film kalınlığına ulaşır. Bu işlemin gerçekleştirilmesinin bir yolu ark buhar çökeltmedir. Alternatif olarak, nikel köpüklerin üretiminde öncü üzerine nikel kaplanmasında yararlanılabilecek çok düşük sıcaklıklarda uygulanan oldukça verimli bir yol nikel karbonil ($Ni(CO)_4$) kullanımıdır. Nikel karbonil Ni +4CO tepkimeye sokularak $Ni(CO)_4$ reaksiyon ürünü olarak elde edilir. Nikel karbonil 120 °C sıcaklığın üzerine çıkıldığında nikel ve karbon monoksite ayrışan bir tür gazdır. Bu özelliğinden ötürü söz konusu

sıcaklıklarda üzerine yönlendirilen nikel karbonil gaz akışı sayesinde polimer öncünün kaplanması mümkün olmaktadır. Ayrışma esnasında açığa çıkan nikel öncü üzerine birikerek metalik kaplama oluşur. Kızılötesi (infrared) ısıtma sistemi kullanılarak karbonil ayrışması (dekompozisyon) için gereken sıcaklıkta polimer kolaylıkla muhafaza edilebilir. Soğutmadan sonra polimer bünyeden ısı ya da kimyasal yöntemler kullanılarak çıkartılabilir. Elektro çökeltme tekniğinde de elde edildiği türden içi boş payandalardan müteşekkir bir malzeme elde edilir. Bu yöntem kullanılarak ticari üretimi yapılan nikel köpükler incofoam adıyla 3,3 mm kalınlığa kadar ince tabaka halinde bulunmaktadır. Bu malzemenin saflığı (%99,97Ni) oldukça yüksek olup 0,2 ila 0,6 g/cm^3 yoğunluk aralığındadır ve orta yoğunlukta bir köpüğün çekme dayanımı 0,6 MPa civarındadır. Şekil 1.37 'de görülmekte olan incofoam köpük yapısı Şekil 1.36 'da verilmiş olan elektro çökeltme ile üretilmiş yapı ile önemli ölçüde benzerdir. Bu malzemenin hali hazırdaki en temel kullanım alanı pil elektrodları için destek malzemesidir [11, 44].



Şekil 1.37. Nikel karbonil yöntemiyle üretilmiş Incofoam yapı örneği (20 ppi) [11]

Tablo 1.1 açıklanan bütün üretim yöntemlerini özetlenmektedir. Elde edilebilecek gözeneklilik oranı için sınırlar ve her bir prosesin uygulanabileceği metal türü verilmiştir. Tabi ki burada belirtilen bilgiler konusunda sürekli yapılan araştırmalar sonucu değişiklikler ve eklemeler devam etmektedir. Burada belirtilen ticari üretim durumlarının varlığı malzemelerin stok tutulan bir üretimi olduğuna değil talep doğrultusunda makul bir süre içerisinde temininin mümkün olduğuna işaret etmektedir.

Tablo 1.1. Hücresel metaller ve metal köpükler için üretim metotları

Kategori	Metot	Gözeneklilik (%)	Metal Türü	Ticari Üretimi
Sıvı halden üretim	Gaz enjeksiyonu ile doğrudan köpürtme	80-97,5	Al, Zn	Var
	Köpürtücü ajan kullanılarak doğrudan köpürtme	91-93	Al, Zn	Var
	Katı—gaz ötektik katılaşma (Gasars)	5-75	Ni, Cu, Al, Mg	Yok
	Kompakt toz ergitme tekniği	60-90	Al, Zn, Pb	Var
	Polimer köpükler ile hassas döküm	80-97	Al, Zn	Var
	Kafes yapılı blok malzemeler	---	Al	Yok
	Yer tutucu malzemeler etrafına döküm	≤65	Al, Zn, Pb, Cu	Var
	Sprey şekillendirme (Osprey) yöntemi	≤60	Çelikler, Cu	Yok
Katı halden üretim	Metal tozların sinterlenmesi	20-80	Bronz, Çelikler	Var
	Gaz hapsetme tekniği	≤45	Ti	Yok
	Çamurların köpüklendirilmesi	≤93	Al	Yok
	Yer tutucu katkılara dayanan hücresel metaller	≤70	Ti	Yok
	İçi boş metalsel küreler	≤80	Çelikler	Yok
	Metal tozu/bağlayıcı yöntemleri	---	Fe, Cu	Yok
	Reaksiyon sinterlemesi	≤50	TiAl, FeAl	Yok
Elektro—çökeltme tekniği	Elektro—çökeltme tekniği	92-95	Ni, Cu	Var
Buhar çökeltme	Buhar çökeltme	93-97,5	Ni, Ni-Cr, Cu	Var

1.3. Alüminyum Köpüklerin Köpürtücü Ajan ile Üretimleri

Yüksek sıcaklıklarda iç yapısını daha iyi koruyabilmesi (stabil), bunun yanında yönden bağımsız olarak darbe ve titreşim sönümleyebilmesi, elektromanyetik kalkan özelliği bu malzeme tipinin olumlu özellikleridir. Ergime noktaları aşağı yukarı temel alaşımınkiyle aynıdır. Bununla birlikte malzeme yüzeyi çoğunlukla bir oksit

tabaka ile kaplıdır. Bu tabaka sayesinde ergime noktası oldukça yüksektir. Bu tabaka yüzeydeki gözenek boyutlarını (çaplarını) düşürmesine rağmen gözenek sayısının artmasına sebep olur. Tabakanın kalınlaşması gözenekli yapıyı destekler ve ergime sıcaklığını üst değerlere çeker. Eğer malzeme yeterli bir zaman süresince havada ya da bir oksit banyosu içerisinde ısıtılırsa tabaka daha fazla kalınlaşır ve daha stabil bir hal alır [8, 18, 45].

Morfolojik düzensizlikler, hücre elipsliği, homojen olmayan hücre kalınlığı ve hücre boyutu dağılımının plato gerilimini azalttığı tespit edilmiştir [16, 18].

Metalik köpük üretim yöntemleri ise sıvı metal, toz metalurjisi, metal gazı, metal iyonu ana başlıkları altında ele alınarak Tablo 1.2'de gösterilmiştir. Yöntemler metalin süreç başlangıcındaki fiziksel durumuna göre aşağıda gruplandırılmıştır.

Tablo 1.2. Metalik Köpük Üretim Yöntemleri [18]

Sıvı metal	Toz metalürjisi	Metal gazı	Metal iyonu
• Gaz kullanılarak doğrusal köpüklendirme • Köpüren malzeme kullanarak köpüklendirme • Katı-gaz ötektik katılaştırma • Toz paketinin eritilmesi • Döküm • Püskürtme ile köpüklendirme	• Boş kürelerin sinterlenmesi • Gaz hapsetme • Çamur köpüklendirme • Boşluk doldurucular eklenerek sinterleme • Toz ve fiber metallerin şişirilmesi • Polimer-metal karışımlarının sıcak haddelenmesi • Tepkime sinterlemesi	• Buhar çökelmesi	• Elektro-kimyasal çökelti oluşturma

Katı hal köpüklendirme bir tür toz metalürjisi ile köpük üretimidir. Bu yöntemde metal tozu tüm süreç boyunca katı halde kalır ve sinterleme yolu ile rijit bir yapıya kavuşur. Bu durum son morfoloji için oldukça önemlidir çünkü sadece sıvı hal durumunda yüzey gerilmesi kapalı gözenek oluşumuna sebep olur. Bu durumun tersine katı hal sinterlemesi ile üretilen gözenekli metaller tozlar arasında oluşan

boyunlarla birbirine bağlanan açık morfolojide az çok küresel gözeneklerden oluşur [8].

Gözenekli yapı üretimi toz ayırma ve hazırlama, paketleme, kalıplama ve sinterleme basamaklarından oluşur. Alüminyum tozlarının veya granüllerinin sinterlenerek gözenekli yapı haline getirilmesi daha önce bahsedilen metallere göre çok daha zordur çünkü alüminyumun yüzeyi genellikle sinterlenmeyi önleyen oksit tabakası ile kaplıdır. Bundan kaçınmak için alüminyum toz paketi deforme edilerek yüzeyindeki oksit tabakası kırılır ve böylece metal tozları arasında metalik bağ oluşturulabilir. Buna alternatif olarak bakır, magnezyum veya silisyum gibi düşük ergime sıcaklığına sahip ötektik oluşturucu metaller eklenerek 595 – 625 °C arasında sinterleme sağlanabilir [46].

Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile metalik köpük üretim yönteminde, direkt olarak TiH_2, ZrH_2 ve $CaCO_3$ gibi köpürtücü madde ilave edilerek köpürtme yapılır. Köpürtücü maddelerin en büyük dezavantajı, ergiyik içerisine tozlar ilave edildikten hemen sonra gaz ayrışma reaksiyonu (ısıl ayrışma veya oksidasyon) başlamasıdır. Bu yüzden yüksek kalitede köpük üretimi, gözenek yapısının kontrolü ve köpürtme yönteminin kontrolü çok zordur [18]. Japonya'da Shinko Wire Company şirketi 1986 yılından beri bu yöntem ile üretim yapmaktadır. Bu yöntem ALPORAS olarak adlandırılır [47, 48].

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının köpürtülmesinde sıklıkla kullanılan köpürtme ajanı TiH_2 dür. Saf alüminyumun ergime sıcaklığının çok altındaki sıcaklıklarda TiH_2' ün hidrojen salımı gerçekleşir. Bu nedenle düşük ergime sıcaklığına sahip AlSi7, AlSi12, AlMgSiCu ve AlSiCu gibi alaşımlar köpük hücre oluşturmak için tercih edilir. Ayrıca, TiH_2 'ün hidrojen gazı salımını geciktirmek için ısıl işlem uygulanabilmektedir [49-52].

İlk aşamada köpürtülecek metal veya alaşım atmosfer ortamında ve sabit sıcaklıkta ergiyik hale getirilir. Bu esnada viskoziteyi ayarlamak için belli oranlarda Ca—Al_2O_3, kalsiyum—alüminyum oksit (CaAlO) veya kalsiyum oksit (CaO) ergiyik içerisine ilave edilir ve yaklaşık 700 rpm hızda 5—10 dakika karıştırılır. İkinci aşamada, köpürmeyi sağlamak üzere yaklaşık % 0.5—2.5 oranında ve 5—20 μm çaplarında partikül şeklindeki köpürtücü madde (TiH_2, $CaCO_3$) ilave edilir.

Karışımın içerisinde homojen dağılımının sağlanması için yaklaşık 1200 rpm hızda birkaç dakika karıştırılır. Ergiyik tamamen köpürtüldüğünde, hidrojen kaçışı ve kabarcıkların birleşmesinden veya çökmesinden önce soğutularak katılaştırılır [46].

İlave edilen TiH_2 ve $CaCO_3$ Denklem (1.1) ve (1.2)'de verilen şekilde ayrışarak H_2 ve CO_2 gazı açığa çıkar.

$$TiH_2 + Isı \rightarrow Ti(k) + H_2(g) \quad (1.1)$$

$$CaCO_3 + Isı \rightarrow CaO + CO_2 \quad (1.2)$$

Isı artışı, köpürtücü maddedeki gazın ayrışmasına ve serbest bırakılmasına sebep olur. Açığa çıkan H_2 veya CO_2 gazı gözenek oluşturucu olarak davranır. Kısa bir süre İçinde ergiyik, kalıp içerisinde yavaş yavaş yayılmaya ve genişlemeye başlar. Daha sonra sabit basınçta kalıp içerisinde köpürtülür. Alaşımın ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kalıp içerisinde soğutulur [53].

Toz metalürjisi yöntemi ile metalik köpük üretim yöntemi ile metalik köpük üretimi Ailen ve arkadaşları tarafından çalışılmış ve patenti alınmıştır. Metal tozları ve köpürtücü madde olarak TiH_2, ZrH_2 veya $CaCO_3$ tozları karıştırılmış, soğuk preslenmiş ve yaklaşık 400–480 °C sıcaklıkta haddelenmiştir. Köpürtücü madde metal matris içerisine ilave edilmiş ve homojen bir şekilde karıştırılmıştır [16]. Takviye parçacıkları CYMAT yönteminde % 10—20 hacminde ve 5—20µm boyutları arasında ilave edilir [54].

Köpürtme işlemi katı haldeki matris malzeme ile sıkıştırılmış köpürtücü toz karışımlarından oluşan öncü ara ürün ile başlar [55, 56]. Bu öncü ara ürünler matris malzemenin ergime sıcaklığına ısıtılarak köpük yapı sağlanır (powder compact melting, P/M). Sıkıştırılmış toz tabletlerde alüminyum metal tozu ve köpürtücü ajan esas yapıyı oluşturur. AlSi7, AlSi12, AlSi6Cu4, AlMg1SiCu ve benzeri alaşım tozlarının iyi köpürme gösterdiği bilinmektedir [53].

Hazırlık aşamasında deney numunesi fırın içinde köpürtülürse, metalik köpüğün parçalanacağı sonucuna varılabilir. Metalik köpük genişledikçe tanımlanmamış biçimde sınırlanır. Bu sayede yüksek gözenekli yapıların elde edilmesi sağlanır ve karmaşık şekilli parçalar üretilebilir [48].

Hücreli metal yapılar gaz oluşturucu malzeme eklenmeden ve metal eritilmeden de oluşturulabilir. Bunun için tozlar yoğun bir paket oluşturacak şekilde preslenir. Presleme sırasında tozların aralarına gaz girmesine izin verilir. Toz paketi ısıtıldığında içinde sıkışmış olan gaz genleşir ve katı hal sürünmesi sonucu hücreli yapı oluşur. Bu yöntem hava taşıtları üreticisi Boeing (ABD) firması tarafından titanyum parça üretiminde kullanılmaktadır [57].

Alüminyum sandviç paneller alüminyum yüzey plakaların üzerine köpük öncü kütüğü giydirilmesi ile oluşturulur. Daha sonra plaka, köpürtücü ajanın etkin olması için ısıtılır. Bu, köpük çekirdek yapı kalınlığının yaklaşık %400 genişlemesine ve %80 gözeneklilikte bir yapıya neden olur [58].

1.4. Metalik Köpüklerin Yapısal ve İşlevsel Özellikleri

Köpükler ve diğer yüksek gözenekli hücresel yapıdaki malzemelerin çok ilginç mekanik ve fiziksel özellikleri barındırdıkları bilinir. Örneğin çok düşük spesifik ağırlıklı yapı bağlantılarının yüksek dayanıma sahip olması veya yüksek ısıl iletimle beraber yüksek gaz hapsedebilmeleri gibi. Bu nedenlerle hücresel malzemelerin doğada yapısal veya fonksiyonel amaçla bulunduklarını (ağaç veya kemikler gibi) sıklıkla görürüz [11].

Alüminyum köpükler tıpkı ağaç, mercan, kemik ve ekmek gibi hücresel yapıdadır. Köpük yapının göreceli yoğunluğu, köpük yapısının yoğunun metalsel malzeme yoğunluğuna bölünmesi ile elde edilir. Köpük yapının göreceli yoğunluğu değer olarak 0,3 gr/cm^3 den küçük olup 0,02—0,1 gr/cm^3 aralığındadır. Alüminyum köpük yapısının yoğunluğu 1 gr/cm^3 olarak bilinen suyun yoğunluğundan düşük olup <0,81 gr/cm^3 değerindedir, bu yüzden suda yüzebilmektedir [11, 15, 16].

Son dönemde insan yapımı hücresel malzemeler, polimer köpükler teknolojinin hemen her dalında geniş uygulama alanına sahip önemli malzeme gruplarından birisidir. Daha az bilineni şudur ki alaşımlar hatta metaller hücresel yapıda veya köpük olarak üretilebilir ve bu malzemeler oldukça ilginç özellikler taşırlar. Yakın gelecekte bu malzemelerin şaşırtıcı yeni uygulamaları beklenmektedir [11].

Metalik köpükler çekme gerilmesi altında kırılgan davrandığından bu malzemelerden mekanik olarak yararlanma alanları basma kuvvetlerinin baskın olduğu alanlardır.

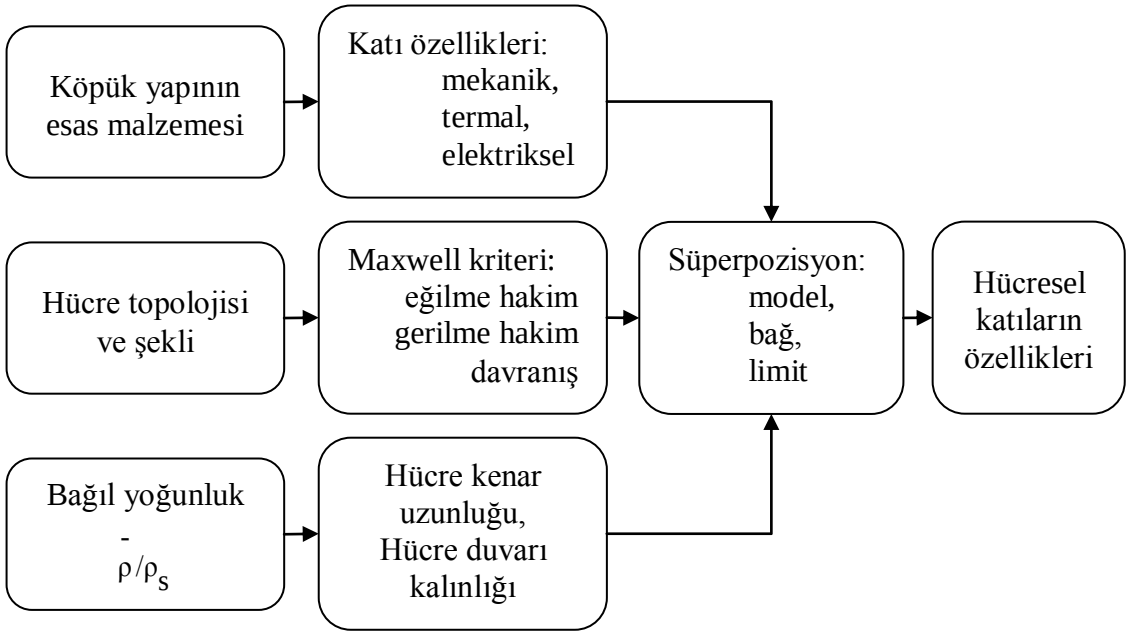
Basma kuvvetlerine maruz kaldığında hücre duvarlarının plastik bükülmeye uğraması nedeniyle metalik köpüklerin enerji emebilme özelliği yüksektir. Uygulanan kuvvetin iletim miktarı gözenek özellikleri ile kontrol edilebildiğinden geniş plastik gerinim potansiyeli metalik köpükleri enerji emilimi gerektiren uygulamalar için ideal malzeme haline getirmektedir [14].

İki çeşit alüminyum köpük hücre yapısı tanımlanmaktadır. Bunlar, kapalı hücre yapısı ve açık hücre yapısıdır. Kapalı hücre yapısı köpük hücreleri, açık hücre yapısı ise sünger hücrelerinde gözlemlenen yapıdadır. Kapalı hücre köpük yapısında hücreler sıkı bir düzende iken açık hücre köpük yapısında hücreler birbiriyle bağlantılı olarak bulunurlar. Açık hücre yapısındaki hücreler arası bağlantılar destek olarak adlandırılırlar. Kapalı köpük hücreleri birbirlerinden hücre kenarları ile ayrılırlar. Metalik köpüklerde hücreler arası sıralı birleşme yüzeyleri ile köpük yapısı oluşmuş durumdadır [8, 18].

Hücresel malzemelerin özelliklerini üç temel faktör etkiler. Bunlar; üretilmiş olan köpük yapının esas malzemesinin özelliği, köpük hücre topolojisi ve şeklidir. Köpük yapının bağıl yoğunluğu $\bar{\rho}/\rho_s$, $\bar{\rho}$ köpük yapının yoğunluğu, ρ_s köpük yapının esas malzemesinin yoğunluğudur [11]. Metalik köpük 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 [3]. Metal köpükler deformasyon bantlarının sağladığı özel deformasyon mekanizmaları sayesinde mükemmel enerji emebilme kapasitesine sahiptir ve bu nedenle kara taşıtlarında tampon olarak kullanılır [20, 59, 60]. Hafif ve sağlam alüminyum sandviç yapılar arabaların ağırlıklarını azaltmak için yapılan çalışmalara oldukça yardımcı olmuştur. 3 boyutlu bu sandviç paneller arabalardaki orijinal çelik panellerden yaklaşık olarak 8 kat daha sağlam olup, %25 daha hafiftir [20]. Metalik köpükler darbe emme özellikleri sayesinde son yıllarda zırh sistemlerinde de kullanılmaktadır. Yu ve arkadaşları 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 [61]. İçyapının köpük şeklinde olması darbe yönüne bağlı olmaksızın yüksek darbe enerjilerini sönümleme kabiliyetini ve aynı zamanda hafifliği sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda iç yapısını daha iyi koruyabilmesi (stabil), bunun yanında kuvvet yönünden bağımsız olarak darbe ve titreşim sönümleyebilmesi, elektromanyetik kalkan özelliği bu tür yapıların olumlu özelliklerinden başlıcalarıdır. Köpük yapıların ergime noktaları aşağı yukarı üretimde kullanılan ana alaşımınkiyle aynıdır. Bununla birlikte malzeme yüzeyi çoğunlukla bir oksit tabaka ile kaplıdır. Bu tabaka sayesinde ergime noktası oldukça yüksektir. Bu tabaka yüzeydeki gözenek boyutlarını (çaplarını) düşürürken gözenek sayısının artmasına neden olur. Tabakanın kalınlaşması gözenekli yapıyı destekler ve ergime sıcaklığını yükseltir. Eğer köpük yapı yeterli bir zaman süresince havada ya da bir oksit banyosu içerisinde ısıtılırsa tabaka daha fazla kalınlaşır ve daha stabil bir hal alır [11].

İçyapının köpük şeklinde olması darbe yönünü dikkate almadan yüksek darbe enerjisini sönümlemesini ve aynı zamanda hafifliği sağlamaktadır. Şekil 1.38'de dizayn değişkenleri verilmiştir.



Şekil 1.38. Dizayn değişkenleri [13]

Gözenekli malzemelerin en önemli özellikleri yapısal ve işlevsel özelliklerini belirleyen gözenek miktarı (göreceli yoğunluk), şekli ve dağılımıdır. Yoğunluk ve

hücre yapısından başka matris metalinin alaşım kompozisyonu ve metalurjik durumu köpük yapının mekanik özelliklerini belirleyen temel değişkenlerdir [8, 57]. Göreceli yoğunlukla basma mukavemeti ve elastik modülü arasında açık bir ilişki bulunmaktadır [16]. 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. Eşeksenli gözenek yapısına sahip malzeme izotropik özellik gösterirken az miktarda uzamış veya düzleşmiş gözeneğe sahip malzemede dahi yöne bağlı özellik değişimi gözlemlenir [3]. Yapısal malzemelerin en önemli özelliklerinden biri doğrusal elastik davranışlarıdır. Metalik köpükler birçok yapısal işlev gerektiren uygulamalarda kullanıldığından performanslarını belirleyen en önemli parametreleri elastik modülü ve basma mukavemetidir [60].

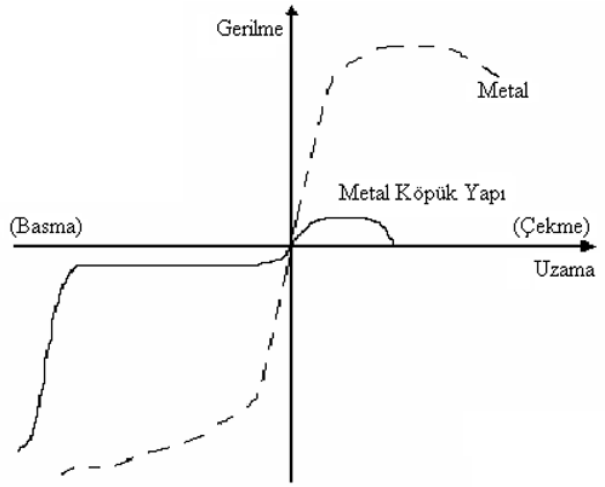
1.5. Metalik Köpüklerin Mekanik Özellikleri

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, 62]. Kapalı hücreli köpükler açık hücreli olanlara nispetle daha yüksek mukavemet, rijitlik ve darbe dayanımına sahiptir. Hücre duvarları tarafından izole edilmiş gözeneklerin içini kaplayan gaz basma esnasında hücre duvarlarının hareketi sebebiyle sıkıştığından basıncı arttırır. Bu basınç artışı elastik modülü hesaplamalarında oldukça önemli rol oynar [63]. 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. Evans ve arkadaşları köpüklerin birbirinden oldukça farklı özellikler gösterdiğini ortaya çıkarmıştır [64].

Metal köpükler üç bölgeye ayrılabilecek karakteristik bir basma gerilme-gerinim davranışı gösterirler. Düşük gerinimlerde (< % 1—2) elastik deformasyon gösteren köpükler % 60—80 gerinime kadar gerilmenin sabit olduğu bir platoya sahiptirler. Basma gerilme-gerinim grafiğinin üçüncü bölgesinde ise yoğunlaşma gerinimine

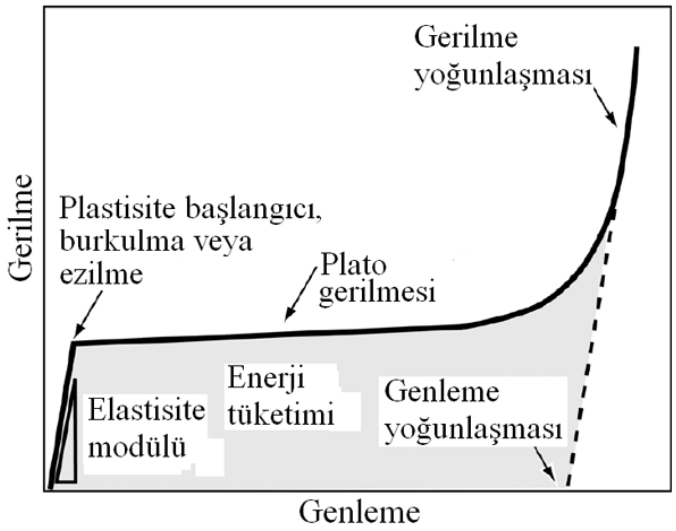
ulaşırlar ve hücre duvarlarının yıkılıp birleşmesi ile yoğunlukları artar. Gerilmenin sabit olduğu uzun plato sayesinde metalik gözenekli malzemeler belirli bir gerilme sınırını aşmadan enerji emebilme yeteneğine sahiptirler [59, 60, 65].

Şekil 1.39'da bir örneği verilen alüminyum köpüklerin tipik gerilme—uzama grafikleri göz önüne alındığında köpük yapı, katı metalik yapı açık bir şekilde karşılaşılmayan lineer elastik bir davranış göstermektedir. Çekme gerilmesi tarafında maksimum gerilme küçük uzamalara karşılık gelir (genellikle %1—4) [3, 46, 62].

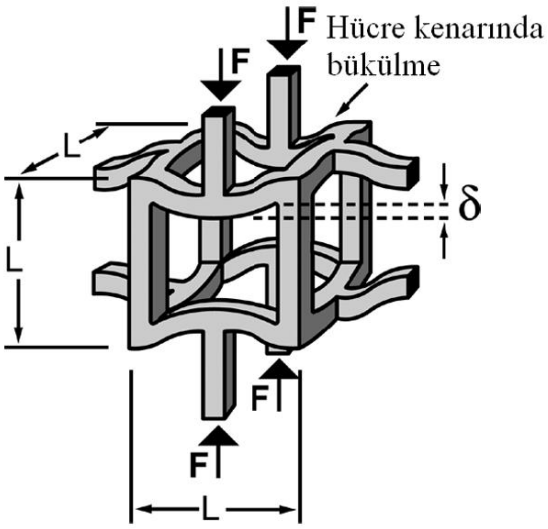


Şekil 1.39. Metal ve metalik köpük yapının gerilme uzama davranışlarının kıyaslanması

Şekil 1.40 Eğilme-hakim kafes yapısının basma etkisinde gerilme-genleme eğrisini göstermektedir. E modulünün hakim olduğu sınıra kadar lineer elastik davranış göstermektedir. Gerilme devam ettiğinde elastik sınır aşılır hücre kenarları akma, eğilme ve kırılma gösterir. Takip eden yükleme sonucu, neredeyse sabit olan ve plato gerilmesi olarak adlandırılan gerilmenin hakim olduğu bölgede yapıdaki çöküş devam eder. Çöküş süreci hücrenin karşı yüzü gerilme etkisine girene kadar devam eder. Bu noktadan sonra genleme yoğunlaşması başlar ve gerilme eğrisi dik bir eğimle yükselir [13, 65].



Şekil 1.40. Hücresel katıya ait bir gerilme genleme eğrisi ve önemli parametreler [13]



Şekil 1.41. Düşük bağlantılı hücre yapısı yüklendiği zaman hücre kenarında meydana gelen bükülme [13]

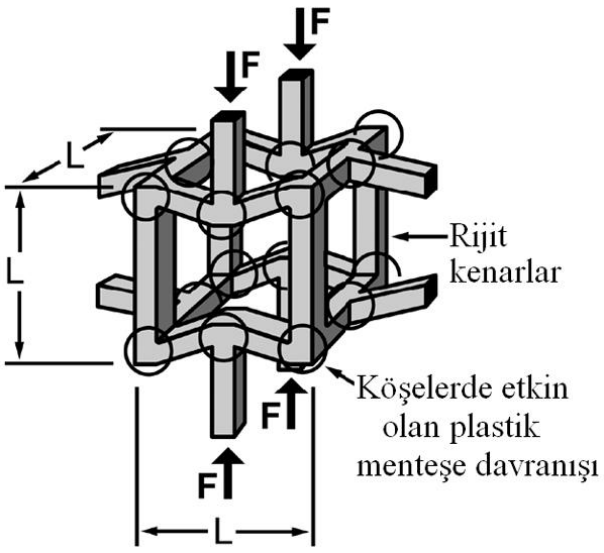
Basma yükü etkisi altında üç muhtemel çöküş mekanizması görülebilir. Bunlardan biri, en düşük gerilme ile oluşur. Mekanik özellikler aşağıda belirtilen metodla hesaplanır. Şekil 1.41'de görüldüğü üzere basma gerilmesi σ etkisiyle hücre kenarları bükülmeye neden olan $F \infty \sigma L^2$ kuvvetine maruz kalır, bu kuvvet δ kadar çöküşe neden olur. Yani L uzunluğunda bir payanda tam orta noktasından F kuvveti etkisine maruz kalırsa δ kadar yer değiştirir [13, 66].

$$\delta \infty \frac{FL^3}{E_s I} \tag{1.3}$$

Denklem (1.3)'de E_s köpük yapının esas malzemesinin elastisite modülü, $I=t^4/12$ hücreyi oluşturan payandaların karekesit atalet momenti ve t kare kesit uzunluğudur. Bütün hücreyi etkileyen basma genlemesi $\varepsilon \infty 2\delta / L$ dir. Bu sonuçların birleştirilmesi ile köpük hücre yapısının elastisite modülü $\tilde{E} = \sigma / \varepsilon$ elde edilir [13, 67].

$$\frac{\tilde{E}}{E_S} \infty \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \right)^2 \tag{1.4}$$

Denklem (1.4) durumunda $\tilde{E} = E_S$ olursa, $\tilde{\rho} = \rho_s$ sonucunun çıkmasını bekleriz, bu ilişkide bir orantı sabiti söz konusudur. Hem deneysel olarak hem de sayısal hesaplama ile bulunan sonuçlar bu eşitlik olgusunu doğrulayıcı yöndedir ve orantı sabiti bu yolla bulunur. Benzer yaklaşım çökme kuvveti modeli oluşturmak üzere kullanılabilir ve bu yolla plato gerilmesi elde edilebilir. Hücre duvarları plastik gerilme değeri aşıldığında sırada Şekil 1.42'da görüldüğü gibi akma gösterir [13, 67].



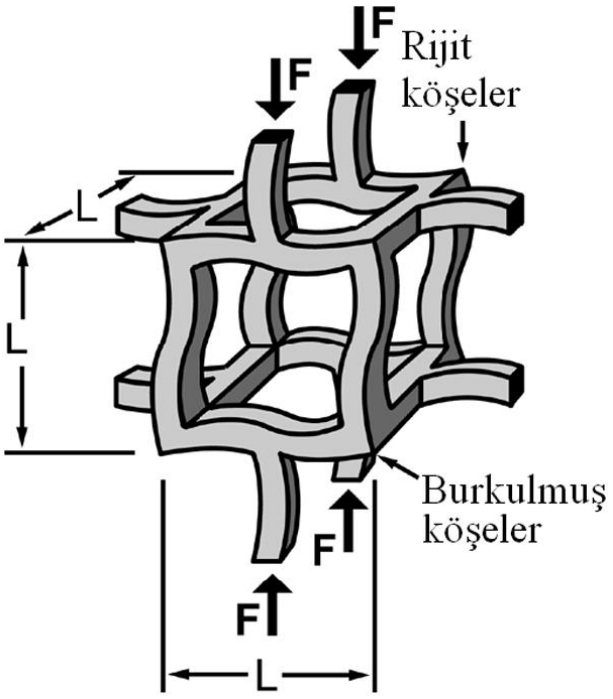
Şekil 1.42. Sünek malzeme esaslı köpükler hücre kenarları plastik bükülme göstererek çökerler [13]

$$M_f = \frac{\sigma_{y,s} t^3}{4} \tag{1.5}$$

Denklem (1.5)'de $\sigma_{y,s}$ köpük yapının esas malzemesinin akma dayanımıdır. Bu momentin köpük yapının maruz kaldığı basma gerilmesi ile ilişkisi $M \infty FL \infty \sigma L^3$ olarak ifade edilir. Bu sonuçlar birleştirilerek çökme dayanımı ($\tilde{\sigma}_{pl}$) elde edilir [13, 66, 67]. Bu dayanımın hesap yöntemi Denklem (1.6)'da verilmiştir.

$$\frac{\tilde{\sigma}_{pl}}{\sigma_{y,s}} \infty \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \tag{1.6}$$

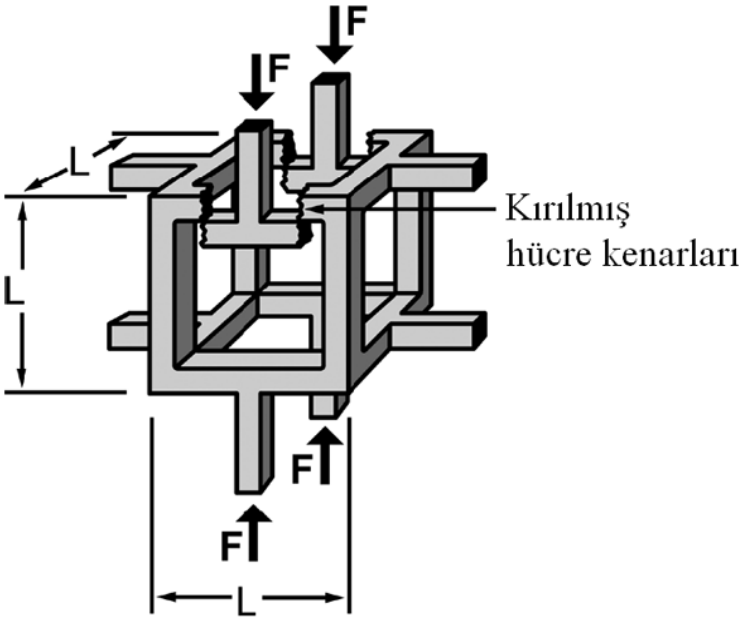
Hem deneysel olarak hem de sayısal hesaplama ile bulunan orantı sabiti yaklaşık 0,3 tür.



Şekil 1.43. Hücre kenarlarının elastik burkulması ile elastomerik köpük çöker [13]

Şekil 1.44'de görüldüğü gibi gevrek yapılı köpükler hücre kenarlarında meydana gelen kırılma sonucu çöker. Seramik köpükler genel olarak bu çökme mekanizmasını gösterirler. Şekil 1.43 ve Şekil 1.44'de görüldüğü üzere elastomerik köpükler akma ile değil elastik burkulma sonucu çökerler. Gevrek yapılı köpükler ise hücre duvarı kırığı sonucu çökeler. Basit boyutsal ölçekleme ile de plastik çökme davranışı açıklanabilir. L uzunluğundaki bir payanda F_b (Euler burkulma kuvveti) basma kuvveti altında burkulur [13, 67]. Burada;

$$F_b \propto \frac{E_S L}{L^2} \propto \frac{E_S t^4}{L^2} \tag{1.7}$$



Şekil 1.44. Gevrek yapılı köpüklerde çökme [13]

Kuvvet $F = \sigma F^2$ değerine ulaştığında, gerilme köpük yapının elastik çökme değerine $\tilde{\sigma}_{el}$ bağlı olarak çökmesine neden olur. Bu ilişki şu şekildedir.

$$\frac{\tilde{\sigma}_{el}}{E_S} \propto \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_S} \right)^2 \tag{1.8}$$

Daha karmaşık modelleme ile orantı değerinin 0,05 olduğu bulunur.

Eğilme momenti değeri eşitlikte $M_f = \frac{\sigma_{y,s} t^3}{4}$ verilen değeri aştığında hücre duvarları kırılır. Bir payandanın kırılma modülü $\sigma_{cr,s}$ olarak ifade edilir ve formülde $\sigma_{y,s}$ ifadesiyle değiştirilir. Ezilme gerilmesi eşitliği aynı plastik çökme gerilmesi gibi yazılabilir. Orantı sabiti 0,2 dir;

$$\frac{\tilde{\sigma}_{cr}}{\sigma_{cr,s}} \propto \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \right)^{3/2} \tag{1.9}$$

Gerilmenin dik bir eğrisellikle artması anında yoğunlaşma tamamen geometri etkidir. Hücrelerin karşı yüzeyleri basma sonucu temas eder ve bu noktada daha fazla eğilme veya burkulmanın oluşması mümkün değildir. Eğer basmanın genleme etkisiyle bağıl yoğunlukta artışa neden olduğunu düşünürsek, basit geometri ile genleme yoğunlaşması ($\tilde{\varepsilon}_d$) şu şekilde bulunur [13, 67];

$$\tilde{\varepsilon}_d = 1 - \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \right) / \left(\frac{\rho_{crit}}{\rho_s} \right) \tag{1.10}$$

Burada ρ_{crit}/ρ_s yapının kilitlendiği bağıl yoğunluktur. Bu orantı ifadesinin doğruluğu deneysel olarak ortaya koyulmuştur. Kilitlenmenin oluştuğu yoğunlaşma değeri deneysel olarak $\rho_{crit} / \rho_s \approx 0,6$ bulunur [13].

Köpük yapılı kafesler gerilme genleme eğrilerinin uzun ve düz plato bölgesi sayesinde yastıklama, paketleme veya darbeye karşı koruma amacı ile sıklıkla kullanılırlar. Faydalı enerji yani köpük yapılı kafeslerin birim hacimlerinde sönümleyebildikleri enerji $\tilde{U}$ (gerilme–genelme eğrisi altındaki alan) yaklaşık olarak [13, 67];

$$\tilde{U} \approx \tilde{\sigma}_{pl} \tilde{\varepsilon}_d \tag{1.11}$$

Burada $\tilde{\sigma}_{pl}$ değeri için daha önceden formülü verilmiş olan akma, burkulma veya kırılma dayanımlarından hangisi en küçük değerde ise o değer alınır.

Bükme-hakim davranış açık hücreli köpük yapıları ile sınırlı değildir. Birçok kapalı hücreli köpük yapısı da yukarıda açıklanan çözümlemelere uyarlar, bu ilk bakışta beklenmeyen bir durumdur, çünkü hücre yüzeylerinin oluşan gerilmeleri taşıması beklenir. Bu konunun açıklamasının altında yatan gerçeklik hücre yüzeylerinin çok ince olmasıdır. Hücre yüzeyleri çok düşük gerilmelerle eğilir veya kırılırlar. Hücre yüzeylerinin rijitlik ve dayanım özelliklerine katkıları oldukça azdır ve yükün büyük çoğunluğunu hücre kenarları taşır [13, 67].

1.6. Metalik Köpüklerin Termal Özellikleri

Hücresel katılar oldukça kullanışlı ısı transferi özelliklerine sahiptirler. Hücreler içlerinde sıkışmış gaz barından küçük odacıklardır. Kafes boyunca olan ısı transferinin tamamı payandalar ve hücrelerdeki durgun hava (veya başka bir akışkan) üzerinden gerçekleşir. Payandaların ortama üçte biri her bir eksene paralel olarak uzanır ve bu durum ısı iletkenliğini şu şekilde tarif edebileceğimizi gösterir [13, 68, 69].

$$\tilde{\lambda} = \frac{1}{3}\left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)\lambda_s + \left(1 - \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)\right)\lambda_g \tag{1.12}$$

Burada eşitliğin sağındaki birinci ifade katı hücre yüzeyleri ve kenarlarından olan ısı iletimini (ısıl iletkenlik λ_s) açıklamaktadır ve ikinci ifade hücrelere hapsolmuş gazların ısı iletimini (ısıl termal iletkenlik λ_g; kuru hava için $\lambda_g = 0,025 \mathrm{Wm^{-1}K^{-1}}$) açıklamaktadır. Bu ifade çok düşük yoğunluklu köpükler için yeterli yaklaşıklıkta bir sonuç verir, ancak $\tilde{\rho}/\rho_s$ yaklaşımında tamamen farklı bir durum söz konusudur. Bunun nedeni payandaların bağlı oldukları eklemlemelerdir. Şöyle ki $\tilde{\rho}/\rho_s$ değeri yükseldikçe, eklemlenmeler giderek artan bir hacim kesirine sahip olur. Bu hacim kesiri t^3/L^3 olarak belirlenir. Köpük yapıların karakterizasyonunda dikkate alınan bağıl yoğunluk formülü $\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \propto \left(\frac{t}{L}\right)^2$ vasıtasıyla, $\left(\tilde{\rho}/\rho_s\right)^{3/2}$ olarak ölçeklenir. Böylece ek bir terim ekleme ihtiyacı nedeniyle formülasyon şu hali alır [13, 68, 69].

$$\tilde{\lambda} = \frac{1}{3}\left(\left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right) + 2\left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)^{3/2}\right)\lambda_s + \left(1 - \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)\right)\lambda_g \tag{1.13}$$

Formülasyonda köpük yapıda bulunan gaz ile ilgili terim genellikle ihmal edilir. Elde edilen formülasyona göre $\tilde{\rho} = \rho_s$ olması durumunda $\tilde{\lambda} = \lambda_s$ sonucuna ulaşılır. Bu özellikleri düşük bağıl yoğunluklu köpük yapıların ısı yalıtımında kullanılabilmesine

olarak tanır. Köpük yapıların termal iletimleri farklı bir yoldan oranlama yapabiliriz. Şöyle ki;

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \tag{1.14}$$

Burada ifade edilen C_p özgül ısıdır ve birimi J kg^{-1} K^{-1} dir. Hücresel bir yapının özgül ısısı ($\tilde{C}_p$) yapının esas malzemesi ile aynıdır. Buradan, basitleştirme yapmak üzere yapıdaki gaz tarafından olan iletim ihmal edilerek, ısıl iletkenlik katsayısını $\tilde{a}$ olarak hesaplayabiliriz [13, 68, 69].

$$\tilde{a} = \frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{\rho}\tilde{C}_p} \approx \frac{1}{3}\left(1+2\left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)^{1/2}\right)\frac{\lambda_s}{\rho_s C_{p,s}} \tag{1.15}$$

Buradaki hesaplamanın bağıl yoğunluktan büyük ölçüde bağımsız olması şaşırtıcı bir sonuçtur. Hücresel yapıların termal genleşme katsayıları ısı iletimlerinde olduğu gibi esas yapı malzemelerinden farklı değildir. Bu nedenle termal genleşme katsayıları için bir formülasyon oluşturma gereği yoktur [13, 68, 69].

1.7. Metalik Köpüklerin Elektriksel Özellikleri

Yalıtkan köpükler düşük dielektrik sabite sahip yapısal malzeme olarak dikkat çekmektedir. Bağıl yoğunluk azaldıkça dielektrik sabiti hava veya vakum ortamlarında 1'e yaklaşır.

$$\tilde{\varepsilon} = 1+(\varepsilon_s - 1)\left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right) \tag{1.16}$$

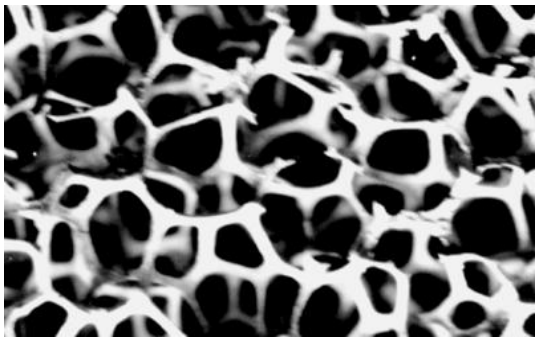
Burada ε_s hücre duvarlarının yapı malzemesine ait dielektrik sabitidir. Hücresel yapıların elektriksel iletkenlik davranışları ısıl iletkenlik davranış için ortaya konulan eşitlikle benzer yapıdadır. Isıl iletkenlik değerleri, elektriksel iletkenlik değerleri ile yer değiştirilerek eşitlik yazılır [13].

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{1}{3}\left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)\varepsilon_s + \left(1 - \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)\right)\varepsilon_g \tag{1.17}$$

Burada gaz iletkenliği genellikle göz ardı edilebilir.

1.8. Eğilme—Hakim Yapılar

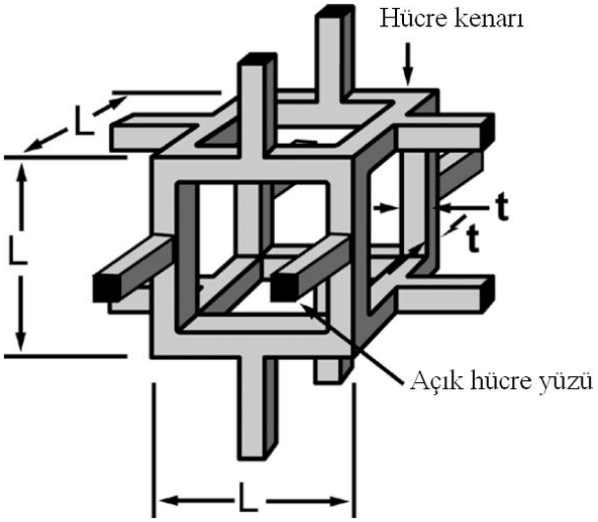
Şekil 1.45'de bir açık hücreli köpük görüntüsü görülmektedir. Açık hücreli köpük yapısı kafes yapılı malzeme tiplerinden biridir. Payandaların eklemlenmesi ile oluşmuş bir yapı tipidir ve eklemlenmiş bağlantıların zayıf olması bu köpük yapısının karakteristik özelliğidir [13, 70].



Şekil 1.45. Tipik bir hücresel yapı, açık hücreli köpük [13]

Açık hücrelerin topojisi yükleme durumunda hücre kenarlarının bükülmesine neden olur. Hatta hücreler kapalı olduğunda da oluşacak deformasyon ağırlıklı olarak bükülme şeklindedir. Çünkü kapalı hücrenin ince yüzeyleri kolayca bükülebilir [13, 70].

Açık hücreli köpük yapıda bulunan idealize hücre modeli Şekil 1.46'da görülmektedir. Bu yapı gaz veya sıvı içeren bir boşluk ile çevrelenmiş katı payandalardan oluşmaktadır. Köpük yapıların karakterizasyonunda dikkate alınan bağıl yoğunluğa bir gösterge olması için Şekil 1.46 'da anılan t büyüklüğü L büyüklüğüne kıyasla oldukça küçüktür [13, 70].



Şekil 1.46. Açık hücreli köpük yapıda bulunan idealize hücre modeli [13]

$$\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \propto \left(\frac{t}{L}\right)^2 \tag{1.18}$$

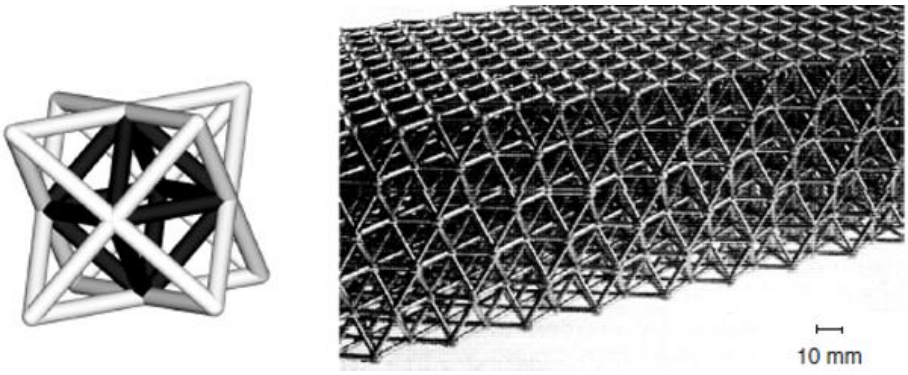
Burada $\tilde{\rho}$ köpük yapının yoğunluğu, ρ_s köpük yapının esas malzemesinin yoğunluğu, t hücre kenar kalınlığı, L hücre boyutudur [13].

1.9. Gerilme—Hakim Yapılar

Şekil 1.47'de mikro kafes yapısının bir örneği gösterilmektedir. Görülen bu yapıda M=18 dir ve bir çerçeve mekanizması ya da iç gerilmeli yapı bulunmamaktadır. Bu yapı M≥0 olduğu birçok yapı türünden birisidir ve mekanik davranışı gerilme hakim yapıdadır. Bu başlık altında gerilme—hakim yapılı mikro payanda kafes malzemelerinin özellikleri daha önceden ifade edilen yaklaşımlara benzer şekilde ele alınmaktadır [13, 71, 72].

Mikro payandalardan oluşmuş bir malzemeye yükleme yapıldığında daha önce değinilen çerçeve mekanizması bulunmadığından, yapı payandaların elastik gerilmesi ile yükleme kuvvetine karşı koyar. Yapıya basit yükleme yapıldığında, yükleme yönü ne olursa olsun yapıyı oluşturan payandaların ortalama üçte biri gerilme taşır. Böylece,

$$\frac{\tilde{E}}{E_s} \approx \frac{1}{3}\left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right) \tag{1.19}$$



Şekil 1.47. Mikro—payanda yapısı (M>0) ve oluşturduğu birim hücre [13]

Elastik sınıra ulaşıldığında bir veya daha fazla payanda seti plastik akma gösterir, burulur veya kırılır, bütün yapının dayanımını en düşük çökme yükü belirler. Payandaların plastik davranış göstermesi durumunda çökme gerilmesi:

$$\frac{\tilde{\sigma}_{pl}}{\sigma_{y,s}} \approx \frac{1}{3}\left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right) \tag{1.20}$$

Bu ifade yapı çekmeye veya basmaya yüklendiğinde payandaların akmaya başladığı sınırdır. Payandalar yapısal olarak ince uzun ise, akma göstermeden önce burulabilirler. Bu durumda daha önce değinilen burkulma hakim davranış anlatımına benzer olarak burkulma dayanımı için şu orantı yazılabilir [13, 71, 72].

$$\frac{\tilde{\sigma}_{el}}{E_s} \propto \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)^2 \tag{1.21}$$

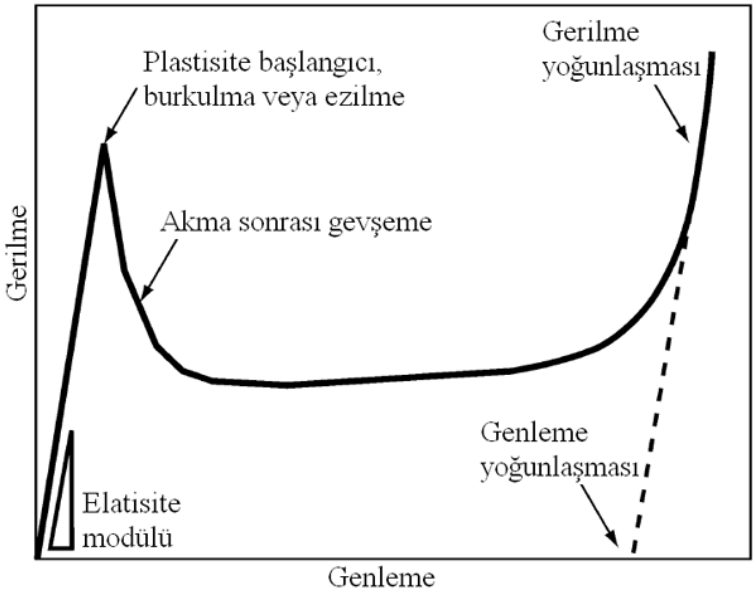
Payanda bağlantı şekillerine göre orantı sabitinin değeri değişir. Bir payandanın burkulmasının en çok t/L değerine bağlı olduğunu ve bu değerinde bağıl yoğunlukla orantılı olduğu hatırlanırsa burkulmanın gözenek düzenine bağlı olmasını beklemeyiz. Uygulamada elastomerik köpüklerin her zaman burkulma deformasyonu görülür; rijit polimer köpükler $\tilde{\rho}/\rho_s \leq 0,05$ ve metalik köpükler $\tilde{\rho}/\rho_s \leq 0,01$ değerlerinde burkulur [13, 71, 72].

Ayrıca payandalarda kırılma da görülebilir. Bir seramik veya daha başka gevrek malzemeden üretilmiş kafes yapı payandaların kırılması ile çökecektir. Yapının gerilme hakim olması kuvvet taşıyan payandaların ilk olarak hasarlanması anlamına gelmektedir. Çökme gerilmesini ($\tilde{\sigma}_{cr}$) şu şekilde orantılıyabiliriz [13, 71, 72].

$$\frac{\tilde{\sigma}_{cr}}{\sigma_{cr,s}} \infty \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \right) \tag{1.22}$$

Burada $\sigma_{cr,s}$ ifadesi payanda esas malzemesine ait çekme etkisinde kırılma dayanımıdır. Bu formülde orantı sabitinin tespiti daha zordur. Gevrek kırılma payandalarda mevcut kusur durumu ve dağılımlarına bağlı olarak gerçekleşen bir süreçtir. İlk payandanın hasara uğrama durumu bütün yapının hasarlanmasını tetikler [13, 71, 72].

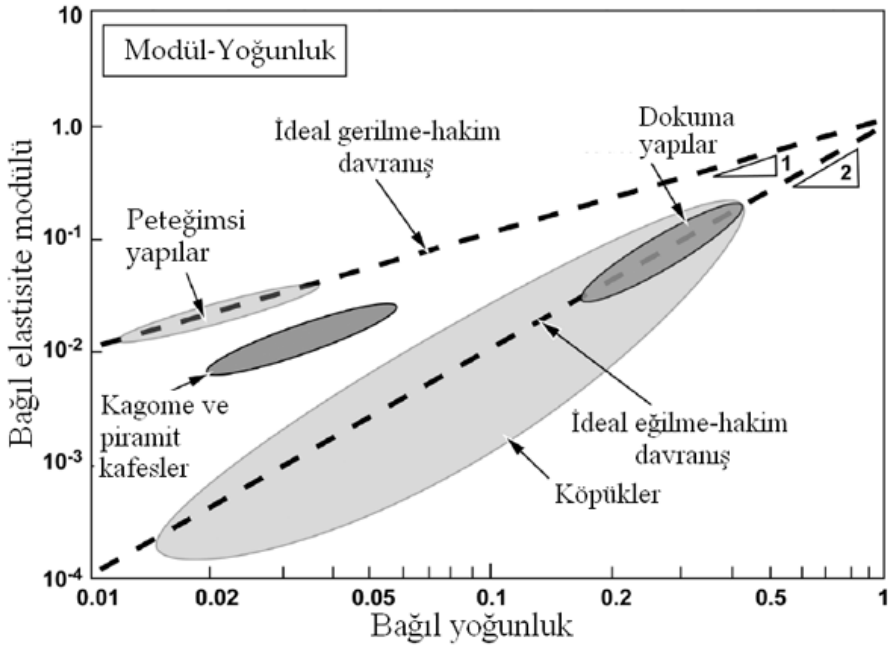
Yükleme başlangıcında yüksek rijitlik ve dayanıma sahiplerdir ancak akma sonrası gevşeme gösterirler. Buradan çıkacak esas sonuç gerilme hakim kafes yapısında elastisite modülü ve çökme dayanımının eşit bağıl yoğunluğa sahip eğilme hakim köpük yapılara göre çok daha yüksek olmasıdır. Bu sonuç gerilme hakim köpükleri hafif yapısal uygulamalar için en iyi seçim yapar. Ancak deformasyon mekanizmalarından çekme, basma yerine bükülme mevcuttur. İlk akma değerini plastik burkulma takip eder veya gevrek payandalar çöker bu durum akma sonrası gevşemenin görülme nedenidir (Şekil 1.48). Akma sonrası gevşeme metalik köpükleri enerji emici olarak kullanım uygulamaları için daha uygun bir malzeme yapar. Akma sonrası görülen sistem sonlanır ve daha önce ifade edilen genlemenin yoğuşlaması ile gerilmenin yoğunlaşması görülür [13, 71, 72].



Şekil 1.48. Gerilme—hakim yapıda şematik gerilme-genleme eğrisi [13]

Bu sonuçlar Şekil 1.49 ve Şekil 1.50'de özetlenmiştir ve bağıl elastisite modülü ve bağıl dayanım değerleri bağıl yoğunluğa göre grafikleştirilmiştir. Grafiklerde hücreler içerisinde şu ana kadar araştırılmış hücresel yapılar gösterilmiştir. Şekil 1.49'da iki kırık çizgi ideal gerilme hakim ve eğilme hakim kafesleri üretilmiş oldukları malzemelere göre bağıl dayanım değerlerinin bağıl yoğunluk değişimiyle x=1 ve y=1 noktasında konumlandırmaktadır. Gerilme hakim prizmatik mikro yapılara ait modüller birinci eğride ($\overline{\rho}/\rho_S$ orantılı) ve eğilme hakim hücresel mikro yapılara ait modüller ikinci eğride birincinin karesiyle orantılı bulunmaktadır. Peteğimsi yapılar, sandviç panellerde çekirdek yapı ve egzos katalizörlerinde destek yapısı olarak olağanüstü verime sahiptirler ve bu uygulamalarda birinci seçenektirler. Yükleme petek yapının altıgen tam olarak eksenine yapılırsa, Şekil 1.49'da ideal gerilme eğrisi üzerinde yer alırlar. Altıgen eksenleri yükleme için son derece uyumludur. Köpükler oldukça geniş yoğunluk aralığına sahiplerdir ve eğilme hakim davranış gösterirler. Şekil 1.49 eğilme hakim davranışı örneklemektedirler. İdeal davranışa sahip köpüklerin bağıl modülleri ikinci kırık çizgi boyunca uzanır. Köpüklerin çoğu bu hattın altında bir değere sahiptir. Bunun nedeni üretim metotlarından kaynaklıdır. Köpüklerin yapıları sıklıkla heterojendir ve yapılarının bazı kısımlarında güçlü bazılarında ise zayıf özellik barındırırlar. Zayıf bölgeler rijitlik ve dayanım değerlerini düşürmektedir. Dokumalar kafes yapılıdırlar ve iki

boyutlu tel kafes yığınların lehimlenmesi ile oluşturulmuşlardır. Yoğunlukları yüksek olup ideal bükme hakim yapıdadırlar. Düşük yoğunluklu kafeslerin etkin potansiyelinden faydalanmak örme işleminin gerektirdiği yeteneği ortaya koymaya bağlıdır. Piramit şekilli kafesler piramidin taban ve kenarları boyunca yapılandırılmış payandalardan oluşur, Şekil 1.47 bu yapıya örnektir. Piramit şekilli kafesler tam üçgen yapılıdırlar ve gerilme hakim özellik gösterirler, ancak ideal hattın altında yer alırlar. Kagome kafeslerin ismi bir tür Japon dokumasından gelir ve piramit yapıdan daha üstün niteliktedir. Kagome kafesler en düşük kütle ve rijitlik oranına sahiptir [13, 71, 72].

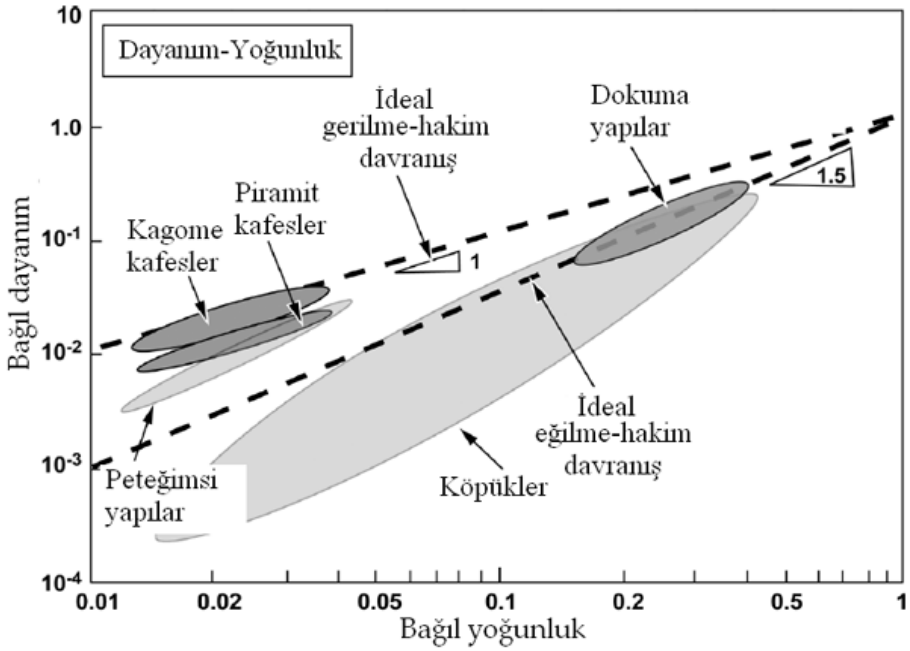


Şekil 1.49. Farklı hücresel yapılar için logaritmik ölçekte bağıl elastisite modülüne karşı bağıl yoğunluk değerleri [13]

Şekil 1.50'de ifade edilen dayanım rijitlikle çok benzer bir ifade olsa da aralarında bir takım farklılıklar mevcuttur. Burada ideal yapılar kırık çizgilerle gösterilmiştir. Gerilme hakim prizmatik mikro yapılara ait dayanım birinci eğride ($\bar{\rho}/\rho_s$ ile orantılı) ve eğilme hakim hücresel mikro yapılara ait dayanım ikinci eğride $\left(\bar{\rho}/\rho_s\right)^{3/2}$ ile orantılı) bulunmaktadır.

Peteğimsi yapılar, altıgen eksenine paralel sıkıştırılmış olsalar dahi, ideal gerilme hakim davranış gösteren malzemeler için oluşturulmuş olan eğrinin altında konumlandırılırlar, çünkü ince hücre duvarları kolayca burkulur. Metalik köpüklerde

peteğimsi yapılarla aynı nedenle düşük performans gösterirler. Hiç bir köpük yapı iç yapılarında barındırdıkları yapısal kusurlar nedeniyle ideal eğilme hakim davranış hattına ulaşamamaktadır. Yeni nesil dokuma yapılar ideal eğilme hakim davranış gösteren malzemeler için oluşturulmuş hattın üzerinde yer alırlar. Piramit şekilli ve Kagome kafesler ideal gerilme hakim performansa yakın özellik gösterirler. Eğilme ile gerilme ayrımı mekanik özellikler üzerinde son derece etkindir fakat termal ve elektriksel özellikleri etkilemezler [13, 71, 72].



Şekil 1.50. Farklı hücresel yapılar için logaritmik ölçekte bağıl dayanım karşı bağıl yoğunluk [13]

1.10. Maxwell Denge Kriteri

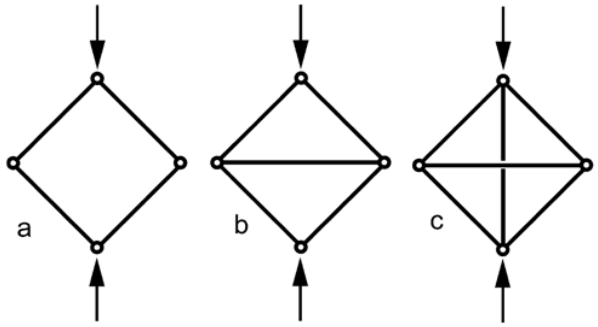
Eğer bir kafes yapılı malzeme zayıf payanda bağlantılı ise düşük rijitlik değerlerine sahiptirler. Bunun sebebi hücre kenarlarının bükülmeye olanak sağlayan bir yapıda olmasıdır. Hücre kenarlarının uzamaya elverişli olacak şekilde yapılandırılması mümkün müdür düşüncesi mikro kafes fikrini doğurmuştur. Bu konuyu anlamak için, çok temel ve basit bir kural olan Maxwell denge kriterine ihtiyaç vardır. Pin mafsallı yani eklemlenme kısmından menteşeli, b payandaları ve j sürtünmesiz bağlantılardan oluşan (Şekil 1.51 'de görüldüğü gibi) iki boyutlu statik ve kinematik olarak sınırlı yani rijit ve yük altında çökmeyen bir çerçeve için koşul şöyledir [13, 73].

$$M = b - 2j + 3 = 0 \tag{1.23}$$

Üç boyutlu durumda için eşdeğer denklem,

$$M = b - 3j + 6 = 0 \tag{1.24}$$

Yük altında oluşan bir kıvrılma mekanizmasıdır. Eğer bağlantı noktaları sabit ise payandalar hep birlikte bükülür. Şekil 1.47'de görüldüğü gibi bu durumda üçgen çerçeve içerisinde eğilme hakim yapı oluşur.



Şekil 1.51. Pin mafsallı çerçeve

Çerçeve içerisinde payandaların yatay yönlü gerilme taşımasından dolayı bükülmeyen bir yapı vardır. Bu yapı gerilme hakim yapıdır ve aşırı sınırlı olarak adlandırılır. Eğer yatay çubuk kısaltılırsa, dikey çubuk dışarıdan bir yükleme olmasa dahi gerilme taşımaya başlar ve iç gerilmeli yapı haline gelir.

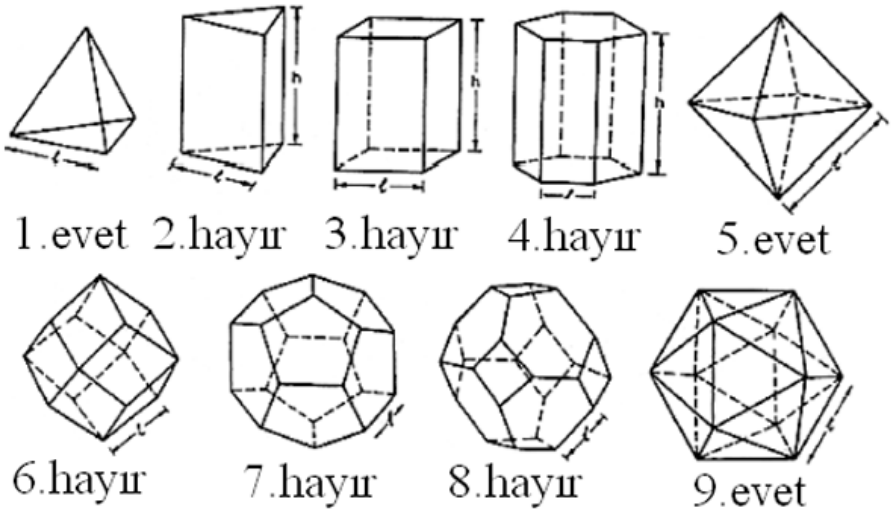
Şekil 1.51a'da olduğu gibi M<0 olması durumunda, çerçevede geçerli olan mekanizma bir veya daha fazla serbestlik derecesine sahiptir. Yer değişimlerine izin veren doğrulturlarda yapı rijitlik ve dayanım göstermez. Eğer kafes yapılarda olduğu gibi yapıdaki eklemlenmeler kilitlenmişse Şekil 1.47'deki gibi çerçeveyi oluşturan barlar yük etkisiyle bükülür. Şekil 1.51b'de olduğu gibi M=0 olması durumunda, çerçevede bir mekanizma bulunmaz. Yükleme durumunda çerçeveyi oluşturan alt bileşenler pin mafsallı olsalar dahi çekme veya basma gerilmesi taşırlar ve gerilme hakim yapı oluşur. Eklemlerin kilitlenmesi bu durumda biraz daha farklıdır. Çünkü narin yapılar eğilme etkisiyle gerildikleri için daha rijittir. Buradaki temel ilke gerilme hakim yapıların yapısal verimliliğinin eğilme hakim yapılardan yüksek olmasıdır [13, 73].

Şekil 1.51c'de şematize edilen çerçeve iç gerilmeli yapıyı göstermektedir. M>0 olması durumunda iç gerilmeli yapı ile karşılaşılır. Dikey payandanın boyunun kısalması diğer payandalarda basma gerilmesine neden olur. Bu durum yapı içerisinde söz konusu olan bir gerilme dağılımı ile dengelenir. Yapı içerisinde payandaların taşıdığı gerilmede hiç bir dış kuvvetin etkisi yoktur. Çünkü Şekil 1.51 'de belirtilen mekanizmaları dikkate almamışlardır [13, 73].

Üç buyutlu durum için bir genelleme olan Maxwell kuralı Calladine tarafından ortaya konmuştur. Buna göre,

$$M = b - 3j + 6 = s - m \tag{1.25}$$

Burada s Şekil 1.51c'de belirtilen iç gerilme yapılarının sayısı ve m Şekil 1.51a'da belirtilen mekanizma sayısıdır. Denklik matrisinin rankı ile s ve m bulunabilir. Bunu açıklamak için çerçevenin tam olarak yapısal analizi yapılmalıdır. Tam rijit bir çerçevede yani statik ve kinematik olarak sınırlanmış kafes yapısında s=m= 0 eşitliği söz konusudur. Maxwell kanunun niteliğinin sağlanması için gerekli değil yeterli koşul Denklem (1.16)'nın incelenmesi ile açıklanır. Bu denklem sol taraftan yok oluşu ifade eder ve mekanizmaların sayısı ile iç gerilme yapılarının sayısı eşit ve sıfır olur [13, 73, 74].



Şekil 1.52. Çokyüzlü hücreler [13]

Maxwell denge kriteri kafes yapıları hakkında fikir verir ve köpüklerin neredeyse her zaman eğilme hakim davranış gösterme nedenini açıklar. İdealize edilmiş bazı hücre

şekli örnekleri Şekil 1.52'de görülmektedir. İzole hücreler Maxwell denge kriter şartlarını yerine getirirler ve rijit yapılıdırlar. Şekil 1.52'de evet ibaresi ile gösterilmişlerdir. Bu kriteri sağlamayanlar ise hayır ibarelidirler ve Şekil 1.51a'da görülen mekanizmadadırlar. Bir hücre için en iyi modelleme genel olarak bir köpüğün doldurduğu boşluk şeklinin ortalamasıdır. Ancak 2–4, 6 ve 8 numara ile gösterilen boşluk doldurma şekillerinin hiçbiri rijit yapılı değildir. Hatta $M \geq 0$ değerine sahip bir çokyüzlü hücre yapısı yoktur. Farklı şekil yapılarına sahip köpükler $M \geq 0$ değerine sahip olmaktadırlar. Örneğin, dörtyüzlü ve sekizyüzlü yapılarının birlikte boşluk doldurma durumu rijit çerçeve yapısını oluşturur. Şekil 1.52'de görülen 2–4, 6, 8 numaralı boşluk doldurma şekilleri $M<0$ değerine sahiptirler ve eğilme hakim yapıdadırlar. Maxwell denge kriteri bir sonraki kısımda ele alacağımız gerilme hakim kafeslerin tasarımı için bir reçete verir [13, 73].

1.11. Metalik Köpüklerin Karakterizasyonu

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 makro yapısının 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 ısıl iletkenlik ölçümleri olarak sıralanabilir [3, 75-78].

Göreceli yoğunluk geometrik hesaplama, kantitatif görüntü analizi 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 [79-81].

$$\rho^* = W1\ \rho w / [W2-W3] \qquad (1.26)$$

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

$$\rho w = 1{,}0017 - 0{,}0002315T \quad (1.27)$$

Gözenek boyut dağılımı ise makro boyuttaki (10—100 μm) gözenekler için cıvalı porozimetre, daha küçük boyutlardaki gözenekler için helyum piknometre kullanılarak ölçülebilmektedir [82].

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 [83].

Anizotropik yapılı 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 örneğin tek yönlü desteklenmiş kompozit malzemelerde basma ve çekme davranışları birbirinden çok farklıdır [84].

Basma testlerinde deformasyon modunu belirleyen en önemli değişken numunelerin yükseklik/çap (L/D) oranıdır. L/D oranının 5'den büyük olduğu durumlarda numunelerde bükülme meydana gelir. Bu tip numuneler elastik ve plastik bükülme analizi için uygun numunelerdir. L/D oranı 5'den küçük numuneler bükülme göstermez ve hem kırılgan hem sünek malzemelerin, basma testleri için uygun boyutta numunelerdir. Bununla birlikte pratik uygulamalar 2,5'den yüksek L/D oranına sahip sünek malzemelerin uygulanan yüke gösterdikleri tepkinin tatminkar olmadığını ortaya çıkarmıştır. Bu geometrilerde 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 [84].

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 elastik, akma, plastik deformasyonlardan kaynaklı kırılma mukavemeti gibi birçok mekanik özelliğinin belirlenmesinde en yaygın kullanılan yöntem çekme testidir. Ancak deformasyon miktarı çekme sırasında malzemelerin boyun vermesi ile sınırlıdır. Bu standartta silindirik test numuneleri L/D oranlarına 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 1,52,0 arasında olduğu ifade edilmiştir. Optimum test hızı ise 0,003-0,005 m/m dk. (≅ 0,8 x10-3 – 1,4 x10-3 m/m s.) olarak belirtilmiştir. Basma gerinim-gerilme grafiğinde akma mukavemeti % 0,2 gerinim noktasından grafiğe çizilen paralelin (ofset) gerinim-gerilme eğrisini kestiği nokta olarak 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 [85, 86].

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} s^{-1}'in altındaki gerinim hızları) altındaki davranışlarına benzer olduğu görülmüştür. Metalik köpüklerin enerji emilim özelliklerinin karakterizasyonu için plato gerilmesi ve yoğunlaşma gerinimi gibi basma özelliklerinin köpük özellikleri ile değişiminin belirlenmesi gerekir. Gibson ve Ashby'nin geliştirdiği kübik hücre modeline göre gözenekli malzemelerin elastik modülleri ve plato gerilmeleri ile göreceli yoğunlukları aşağıdaki denkliklerle ilişkilendirilmiştir. (2.1) ve (2.2) numaralı eşitlikler açık hücreli köpükler, (2.3) ve (2.4) numaralı eşitlikler kapalı hücreli köpükler için geçerlidir [3, 62].

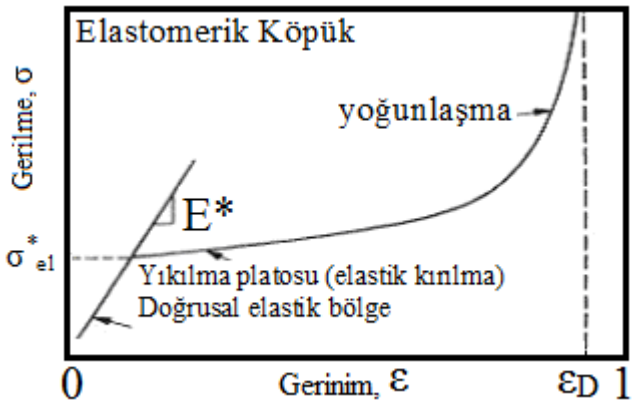
Açık hücreli köpükler için $$\frac{E^*}{E_s} = C_1\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 \qquad (1.28)$$

Açık hücreli köpükler için $$\frac{\sigma_{yl}}{\sigma_{ys}} \approx 0,3\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{3/2} \qquad (1.29)$$

Kapalı hücreli köpükler için $$\frac{E^*}{E_s} = \phi\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + (1+\phi)\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + \frac{P_0(1-2v^*)}{E_s(1-\rho^*/\rho_s)} \quad (1.30)$$

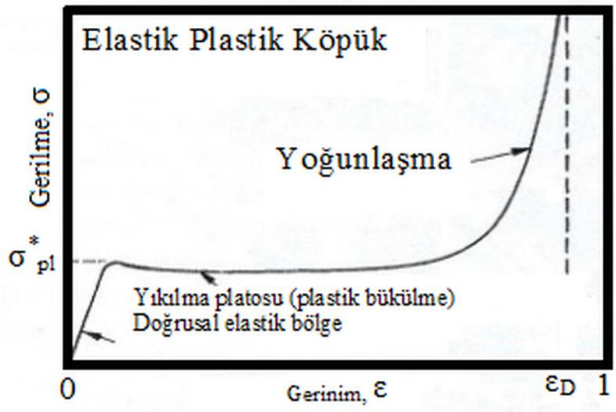
Kapalı hücreli köpükler için $$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} \approx 0,3\left(\phi\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{3/2} + 0,4(1-\phi)\frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (1.31)$$

Burada C1 sabiti bütün geometrik orantı sabitlerini kapsar ve literatürde yapılan çalışmalar bu sabitin yaklaşık 1 olarak alınması gerektiğini göstermektedir. Bütün köpükler düşük gerinim değerlerinde doğrusal elastik davranış gösterirler. Bu bölgedeki eğim elastik modülünü (E*) verir. Artan kuvvetle gerilme-gerinim grafiğinde uzun bir yıkılma platosu gözlenir ve bu bölgeyi sabit kuvvette gerilmenin oldukça dik şekilde arttığı yoğunlaşma bölgesi izler [3, 62].

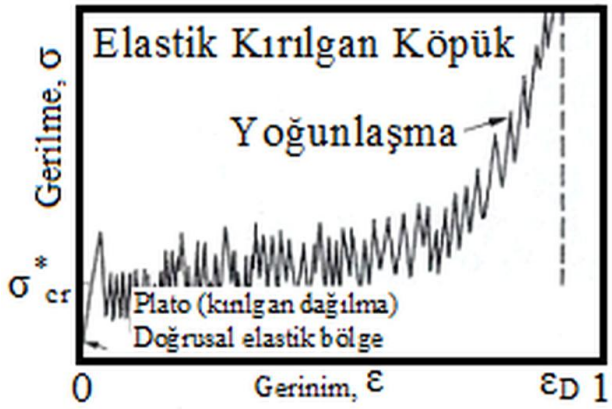


Şekil 1.53. Elastomerik köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği [3]

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 kırılgan köpüklerde (seramik vs.) gözenek duvarlarının birbirine çarparak dağılması ile meydana gelir. Gözenekler neredeyse tamamen yıkıldığında gözenek duvarları birbirine değer ve uygulanan gerinim katı malzemenin kendisini sıkıştırmaya başlar. Bu durum gerilme-gerinim grafiğinin son bölgesinde gerilmenin hızla artmasına neden olur [62].



Şekil 1.54. Elastik-plastik köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği [3]



Şekil 1.55. Elastik-kırılgan köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği [3]

2. MALZEME ve YÖNTEM

2.1. Malzeme ve Üretim Yöntemi

Çalışmada kullanılan alüminyum tozu 200µm tane boyutlu Gürel Makina A.Ş. Kocaeli tarafından üretilmiş GR-AP-09 ticari isimli ürün kullanılmıştır. Alüminyum tozlarının üretimleri başlangıç olarak 1900'lü yıllardır. Alüminyum tozlarının ticari olarak ilk üretimleri ince tabakalar halinde olup daha sonraki yıllarda gelişen teknoloji sayesinde daha saf, ince ve küresel tozların üretimi mümkün olmuştur. Gerçekleştirilen ilk uygulamalarda atomize alüminyum tozunun üretimi için bilyeli değirmen kullanılarak alüminyum pigment üretimi yapılırken, ikinci dünya savaşıyla alüminyumun güçlü patlayıcıların üretilmesinde kullanımı atomize alüminyum için önemli bir pazar ortaya çıkarmıştır. Atomize alüminyumun savaş sonrası yıllarda kimyasallar, metalürji ürünleri, roket yakıtı ve eczacılık ürünlerinde kullanımı artmıştır. Bu ürün gruplarının kendine özgü ihtiyaçlarına yönelik olarak granül, standart atomize toz, kaplama atomize toz, küresel yapılı toz, yüksek saflıkla toz, alaşım tozu, harman tozu gibi çok çeşitli tiplerde ve farklı tane boyutlarında alüminyum tozları üretilmektedir. Alüminyum tozlarının üretim zorluğu ise hava ile belli oranda karışım oluşturan metalin patlayıcı özelliğidir. Atomizasyon işlemi alüminyum eriyiğin bir nozuldan geçip hava veya asal gazla çarpışarak ince parçalar halinde alt kısımda bulunan bir tankta toplanmasıdır. Bu işlemin ardından tozlar boyutlarına göre kategorize edilir. Alüminyum tozlarının patlayıcı özelliğinden ötürü uygulanan Alcoa işleminde ise basınç kontrol altında tutulur. Alüminyum tozlarının tipik fiziksel özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir [87-89].

Tablo 2.1. Al tozlarının fiziksel özellikleri [89]

Dövülmüş yoğunluk	2,7 gr/cm^3
Ergime noktası	660 °C
Kaynama noktası	2430 °C
800 °C de yüzey gerilimi	865 dyn/cm
Görünen yoğunluk	0,8 — 1,3 gr/cm^3
Sıkışık yoğunluk	1,2 — 1,5 gr/cm^3
Oksidinin ergime noktası	2045 °C
Al_2O_3 muhteviyatı	0,1 — 1,0 % ağırlık

Alüminyum tozunun gerçek yoğunluğu metalinkine yakındır. Ancak hem görünen yoğunluğu hem de sıkışık yoğunluğu parçacık ebadı dağılımının bir fonksiyonu olarak değişiklik gösterir. Alüminyum, üretim esnasında nem ve havadaki serbest oksijen ile kendiliğinden reaksiyona girerek toz yüzeyini kaplayan bir oksit oluşturur. Oksit içeriği tane boyutuna göre ağırlıkça yüzde 0,1 ila 1,0 arasında değişir. Daha ince tozlar, birim ağırlıkları başına daha fazla yüzey alanlarına sahip olmaları nedeniyle ağırlık olarak en yüksek oksit oranı barındırır. Alüminyum toz yüzeyi nem çekici olduğundan, ayrıca fiziksel olarak emilmiş su ve su almış alüminyum oksit de içerir. Alüminyum tozu üzerindeki oksit film kalınlığı atomize etme koşulları değişse dahi nispeten sabittir. Atomizasyon gazları olarak hava, argon ve azot kullanan ve gaz sıcaklıklarının ortam sıcaklığı ile 595°C arasında değiştiği deneylerde oksit kalınlığının, atomizasyon gaz kompozisyonu ve sıcaklıktan bağımsız olarak 5 ± 0,5 nm (50 ± 5 A) arasında değiştiği görülmüştür. Alaşımsız atomize alüminyum tozlarının kimyasal bileşimleri Tablo 2.2'de gösterilmiştir. Yüksek saflıkta ve normal alüminyum tozları için görülen safsızlıklar demir ve silisyumdur. Alüminyum havaya maruz kaldığında kararlıdır çünkü üzeri doğal olarak ince bir oksit katmanı ile kaplıdır. Ancak ince şekilde ayrılmış toz halinde alüminyumun kimyasal reaksiyon eğilimi daha yüksektir. Alüminyum tozları atomizasyondan sonra daha da oksitlenebilir ve su ile reaksiyona girerek hidrojen bırakıp alüminyum hidroksit oluşturabilir. Neme doyurulmuş oda sıcaklığında havaya maruz kalan atomize alüminyum yavaş yavaş beta alümina trihidrat ve hidrojen oluşturur [87, 89].

Belli oksijen, toz ve kıvılcım bileşiminde alüminyum toz bulutu oluşur ve patlayabilir. ABD Madenler Bürosu'nun belirlendiği şekli ile nispi patlayıcılık yanma başlatmak için gerekli ateşleme enerjisi ve havadaki toz konsantrasyonunu ölçen bir indistir. Her ne kadar neredeyse tüm metal tozlarında patlayıcılık özellikleri olsa da Al, Ti ve Mg'nin nispi değerleri çok ciddi boyutlardadır. Toz metalurjisi ile üretilmiş olan alüminyum parçalar yüksek dayanım, düşük yoğunluk, korozyon direnci, yüksek ısı ve elektrik iletkenlikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum sinterlemenin başarısı atmosfer, kaynama noktası ve ısı gibi sinterleme koşullarının uygun seçimine bağlıdır [89].

Tablo 2.2. Atomize alüminyum tozlarının tipik kimyasal analizleri [89]

	Kompozisyon, ağırlık %			Diğer metalikler	
Toz türü	Alüminyum	Demir	Silisyum	Teker teker	Toplam
Atomize	99,7	----	----	----	----
Azami	----	0,25*	0,15*	0,05	0,15
Yüksek saflıkta	99,97	----	----	----	----
Asgari	99,976	0,007	0,008	----	0,009

*Demir ve silisyum azami 0,30 % ağırlık

Kullanılan köpürtme ajanı olarak Alfa Aesar, Almanya üretimi titanyum (II) hidrür kullanılmıştır. Köpürtücü ajanın teknik özellikleri Tablo 2.3'de görülmektedir.

Tablo 2.3. Titanyum hidrüre ait teknik özellikler

Özellik	Değer
Kimyasal formül	TiH_2
Atom ağırlığı	49,92 gr/mol
Form	-325 mesh (44µm)
Yoğunluk	3,9 gr/cm3
Hassasiyet	Yanıcı
Erime noktası	450 °C

2.2. Üretim Ekipmanları

Isıtma yöntemi metallik köpük üretiminin önemli bir adımını oluşturmaktadır. TiH_2'ün ısıl işlemi için konveksiyon fırını kullanımı uygun bir tercih iken üretim yönteminin genel olarak TiH_2'ün artan sıcaklıkla ayrışarak serbest bıraktığı H_2 gazının köpük oluşum sürecindeki işlevini etkin bir şekilde yerine getirecek bir ısıtmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla beraber öncü üretiminde uygulanan presleme esnasında deforme olan alüminyum tozları üzerindeki oksit tabakasının gelişimi ve kararlılığını artırmayacak hızlı bir ısıtma işlemin etkinliği önemlidir. Bu maksatla kurulan indüksiyon ile ısıtma ve presleme yönteminin bir arada uygulandığı sistemle elde edilen öncü malzemenin köpüklendirilmesi için Şekil 2.1'de görülen fırın kullanılmaktadır. Isıtma sıcaklığı metalin yarı katı sıcaklığının az bir miktar üzerinde olmalıdır. Daha yüksek fırın sıcaklığı köpük oluşum süreci sırasında açığa çıkan hidrojenin bünyeden uzaklaşmasına neden olmaktadır. Bununla beraber bünyeden hızla uzaklaşan hidrojen gazı nedeniyle malzemenin makro geometrisinin bozulması ve kendi ağırlığını taşıyamaz hale gelmesi söz konusudur. Bahsi geçen sıcaklık seviyesinden daha düşük sıcaklık uygulamalarında ise malzeme içinde

ergimemiş bölgelerin kalması sorunu doğmaktadır. İstenmeyen bu bölgeler köpük metal yapısı içerisinde düzgün gözenek dağılımını ve koloidal yapıyı tam olarak bozucu bir unsur olarak yer alır. Bu sebeplerden ötürü ısıtma sıcaklığı köpürme süreci için önemli bir parametredir.



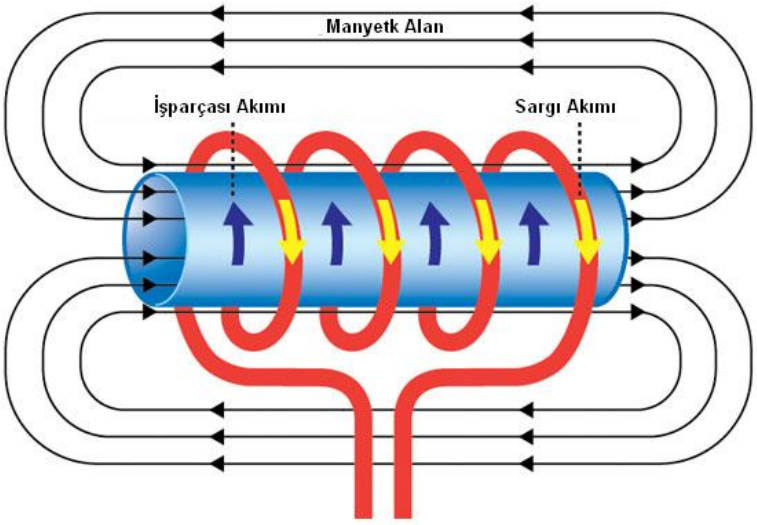
Şekil 2.1. Konveksiyon ısıtma fırını

Isıtma sıcaklığının yanı sıra bekleme süresi de optimize edilmelidir. Zira söz konusu sıcaklıkta uzun süre beklenilmesi köpük yapının çökmesine neden olurken yetersiz süre de köpük oluşumunun tam olarak meydana gelmemesiyle sonuçlanacaktır.

Yukarıda bahsedilen nedenler göz önüne alındığında malzemenin direk direnç ısıtma yöntemiyle ısıtılması verimli değildir. Konveksiyon fırınlarında ısıtma süresi oldukça uzundur, ayrıca kontrol problemleri nedeniyle homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilemez. Metallerin TiH_2 kullanılarak köpüklendirilmesinde hassas ve hızlı bir ısıtmaya ihtiyaç olduğundan indüksiyonla ısıtma bu üretim yöntemi için en idealidir. İndüksiyonda sıcaklık ve zaman kontrolüyle istenilen homojen sıcaklık dağılımı elde edilir. Buna ek olarak bu yöntem tekrarlanabilirdir. Otomasyona da uygun bir ısıtma olduğu için otomatik besleyiciler vasıtasıyla tüm üretim bilgisayar kontrollü hale getirilebilir. Çoklu ısıtma istasyonları ve cam yünü kaplı sargıların kullanımı mümkündür.

İndüksiyon ısıtma temassız bir ısıtma metodudur. Değişken manyetik alan etkisiyle iletken malzeme üzerinde kuvvet çizgileri oluşur. Bu çizgiler ise parça üzerinde bir akım oluşmasını sağlar. Şekil 2.2'de indüksiyonla ısıtma yöntemi şematize

edilmiştir. İş parçasının manyetikliği, sargı ile iş parçası arasındaki mesafe ve frekans ısıtma işlemini etkileyen parametrelerdir [90, 93].



Şekil 2.2. İndüksiyonla ısıtma yöntemi

2.2.1. Isıtma Parametreleri

Akım frekansı ile ısıtma derinliği arasında bir ilişki mevcuttur. 5-30 kHz gibi düşük frekans kalın malzemelerin tüm kesitlerinde ısıtma sağlarken, 100-400 kHz gibi yüksek frekans değerleri küçük parçalarda veya büyük parçaların sadece yüzeylerinde ısıtma sağlar. Frekans seçimi sadece sıcaklığa bağlı olmayıp, ayrıca verimliliği arttıracak ve manyetik kuvvetleri küçültecek düzeyde olmalıdır. Isıtma esnasında kullanılacak herhangi bir iletken takoz da manyetik kuvvetlerin etkisi altındadır. Malzemede ısıl etkiyle sıvı faza geçişler olması durumunda manyetik kuvvetler nedeniyle bu sıvı faz kontrolsüz bir şekilde hareket eder [90-93].

Malzeme karakteri de başka bir parametredir. İndüksiyonla ısıtılan malzemenin manyetik olma zorunluluğu yoktur. Sadece elektrik iletkenliği olması yeterlidir. Malzemenin ısınmasından sorumlu olan etmen Eddy akımlarıdır. Bazı çelik alaşımlarının indüksiyonla ısıtılması esnasında Eddy akımlarının yanı sıra başka bir ısıtma mekanizması da devreye girmektedir. Malzeme bünyesine etkiyen yoğun manyetik alan sebebiyle çelik kristalleri sürekli olarak manyetiklenir ve boşalır. Bu tekrarlı değişim malzeme içinde bir sürtünme meydana getirir ve bu da malzemenin ısınmasını sağlar. Bu mekanizmaya histerisis kaybı denir ve demir esaslı bazı alaşımlarda oldukça etkilidir. Çelik 700 °C sıcaklığın üzerinde manyetik özelliğini

kaybetmeye başlar. Bu sebeple bazı çelik alaşımları 700 °C kadar hem Eddy akımları hem de histerisis kaybıyla ısınırken 770 °C sonra sadece Eddy akımlarıyla ısınır [90-93].

Metalik köpük üretim sürecinde ısıtma derinliği önemli bir parametredir. Öncü parçanın preslenmesi esnasında gereken ısıtma uygulamasında malzeme kesitinin tamamının homojen bir şekilde ısıtılması gerekir. Malzeme içinde Eddy akımları homojen olarak dağılmaz. Akım miktarı malzeme yüzeyinde yoğunlaşırken merkeze doğru gidildikçe azalır. Malzeme bünyesindeki bu akım dağılımına yüzey etkisi denir. Bu etki nedeniyle enerjinin büyük bir kısmı malzeme yüzeyinde toplanır. Bu tabakanın derinliği frekansın ve direncin fonksiyonudur. Alüminyumun ısıtılması esnasında direnç üç katına çıkar. Böylece ısıtma derinliği artar. Isıtma derinliği şu şekilde tanımlanır:

$$\delta_{\text{ısıtma}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \tag{2.1}$$

Burada δ ısıtma derinliği (m), f frekans (Hz), μ malzemenin manyetiklenme miktarı (H/m) ve ρ ise özdirençtir (Ωm). Sargı ve takoz uçlarında ısıtma profili homojenliğini kaybederek bu kısımlarda manyetik alanın çarpılmasına neden olur. Bu çarpılmaya elektromanyetik uç etkisi denir. Uç etkisi indüksiyonla ısıtmadaki en önemli sorunlardan biridir. Bu etki sebebiyle takoz uçlarında aşırı ısınma olabileceği gibi düşük ısıtma da olabilir. Uçlarda istenilen sıcaklık değerleri frekans, sargı-malzeme geometrisi, malzeme özellikleri, yalıtım, güç yoğunluğu ve ısıtma süresine bağlıdır [92, 93].

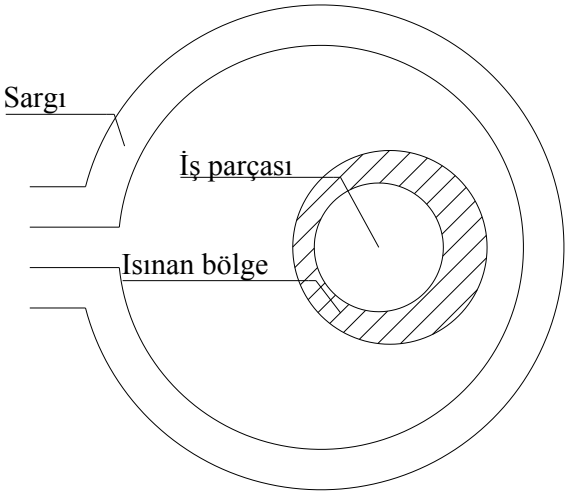
2.2.2. Konumlama boşluğu ve sargı tasarımı

Konumlama malzeme içindeki akım miktarı ve malzeme ile sargı arasındaki boşluk ile orantılıdır. Yakın konumlama genellikle malzeme içindeki akım miktarının artmasına yol açar. Sonuç olarak malzeme içinde üretilen ısı miktarı artar. Statik ısıtmada (malzeme kendi etrafında dönebilir fakat sargı içinde konumu değişemez) malzeme ile sargı arasında 1,5 mm boşluk bırakılması tavsiye edilir [94].

Konumlama boşluğu bileşik ısıtma ya da taramalı ısıtmada malzemenin düzgünlüğüne bağlı olarak 1,9 mm olabilir. Malzemelerin tamamen ısıtılması için

çoklu sargı ve düşük güç kullanılır. Bu şartlarda boşluk 6,4—9,5 mm arasında olabilir. İşlem şartları ve malzemenin sabitlenmesi boşluk miktarının asıl etmenleridir. Düzgün olmayan malzemelerde boşluk azaltılmalıdır. Yüksek frekanslarda sargı akımı azaltılmalı ve boşluk arttırılmalıdır. Orta ve düşük frekanslarda ise sargı akımı fazla ve boşluk az olabilir [90, 93].

İndüksiyon trafoya benzer bir yapıdadır. Birincil sargı sayısı ile bu sargı üzerinden geçen akımın çarpımı, ikincil sargı ile üzerinden geçen akımın çarpımına eşittir. Bu sebeple tasarım esnasında birçok önemli ayrıntıya dikkat edilmelidir. Sargı maksimum enerjiyi verecek şekilde olmalıdır. Özetle iş parçası içinden geçen manyetik akım çizgilerinin sayısı fazla olmalı böylece iş parçasında oluşan akım miktarı artarak ısıtma verimli hale gelir. Sargı yakınlarında akım yoğunlaşır ve buradan uzaklaştıkça yoğunluk azalır. Sargı merkezinde akım çok azdır. Bu sebeple tam merkeze yerleştirilen parçanın sargılara yakın kısımlarında daha fazla akım çizgisi geçer ve ısınma miktarı artar. Bu durum Şekil 2.3'de görülmektedir. Bu etki yüksek frekans altında daha da şiddetlenir.



Şekil 2.3. Merkezden kaçık yerleştirilen işparçası içinde indüksiyon ısıtma dağılımı

Sargı üzerindeki herhangi bir ek yeri manyetik alanı zayıflatır. Bu sebeple manyetik merkez ile geometrik merkez birbirinden ayrılır. Bu etki tekli sargılarda şiddetlidir. Eğer sarım sayısı artarsa her bir sargıdaki akım değeri de eklenerek artar. Fakat bunun etkisi oldukça azdır. İşlemin pratiği açısından parça tam sargıların ortasına

yerleştirilir ve boşluk miktarı azaltılır. Eğer parça kendi ekseni etrafında döndürülebilirse manyetik alandan tüm kesit homojen bir şekilde etkilenir.

Bahsedilen tüm bu esaslar göz önüne alındığında genellikle yuvarlak parçalar için helisel sargılar kullanılır. Böylece verimlilik artar. Sargı verimliliği iş parçasına geçen enerjiyle orantılıdır. Bunların yanı sıra ısınma profili, parça hareketi ve üretim miktarı da oldukça önemlidir [90-93].



Şekil 2.4. Reterm marka indüksiyon ısıtma sistemi

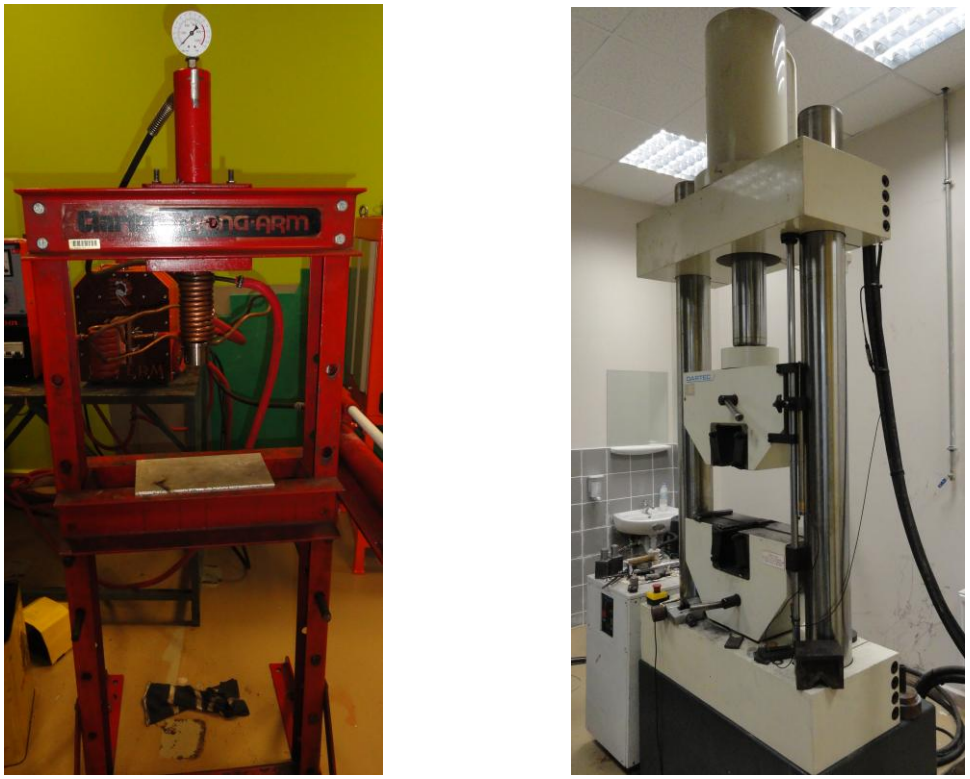
Öncü üretimlerinde Şekil 2.4'de görülen Reterm marka orta frekans indüksiyon bobini (20 kHz, 50 kW) kullanılarak 300 °Cdk^{-1} ısıtma hızında farklı sıcaklık değerlerine ısıtılarak eşzamanlı presleme gerçekleştirilmiştir. Isıtma ve tutma esnasında indüksiyon sisteminin elektriksel özellikleri Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4. Isıtma ve tutma esnasında uygulanan elektriksel büyüklükler

Konum	Frekans (kHz)	Genlik (V)	Ortalama Gerilim (V)	Sargıdaki Akım (A)
Isıtma	6,541	174	55	550
Tutma		68	20	200

Öncü malzeme üretiminde gereken presleme 10 ton kapasiteli el presi ve 60 ton kapasiteli Dartec (İngiltere) marka servohidrolik bilgisayar kontrollü çekme—basma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Her iki cihaza ait fotoğraf Şekil 2.5'de görülmektedir. Öncü numunenin boyutuna göre gereken presleme kuvveti hesaplanarak tezgâh seçilimi yapılır. Ön presleme sonrası gereken sıcaklık altında

presleme uygulaması için preslere ilave olarak ısıtma tertibatı uygulanmasına ihtiyaç vardır. Bu nedenle presleme işlemi indüksiyon ısıtma tertibatı adapte edilmiş olarak el presi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.



(a) (b)

Şekil 2.5. (a) El presi (10 ton), (b) Dartec üniversal çekme—basma test cihazı (60 ton)

2.3. Deneysel Yöntem

Değişen oranlarda TiH_2 içeriği ve farklı fırın sıcaklıklarında üretilen metal köpüklerin röntgen görüntüleri alınarak gözenek durumları analiz edilmiştir. Röntgen analizleri Şekil 2.6'da görülen Siemens marka Tridoros 5S model cihaz kullanılarak 150kV jeneratör gücü, 8mAs tüp akım değeri ve 0,25 saniye ışınlama süresi ile gerçekleştirilmiştir.

Farklı kalıp doldurma oranlarına göre üretilmiş olan metalik köpüklerin basma gerilmesi altında gösterdikleri ezilme davranışlarının analizi 60 ton kapasiteli Dartec marka servohidrolik bilgisayar kontrollü çekme—basma test cihazında gerçekleştirilmiştir.



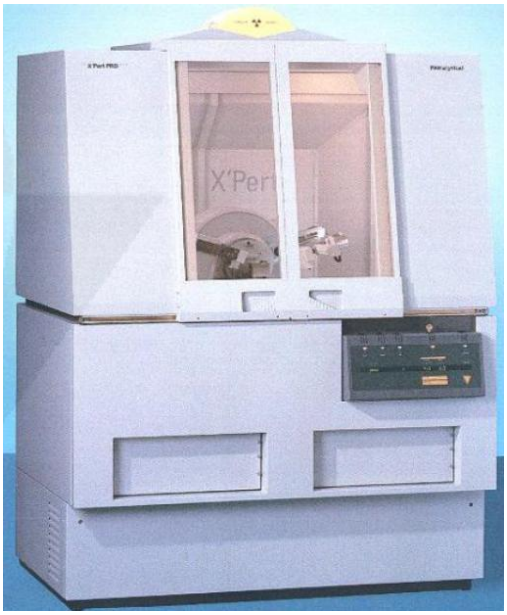
Şekil 2.6. Siemens marka tridoros 5S X ray analiz cihazı

Öncüler üzerinde yeterli tane deformasyonunun temininin tespiti için ASTM B933-09 standardının toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş parçalar için belirttiği 136° tepe açılı ucun 10 kgf yükte 10 saniye süreyle numuneye uygulanması parametreler ile Şekil 2.7'de görülen Vikers sertlik cihazıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Aynı amaçla ASTM B962-13 standardının toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş parçalar için belirttiği gibi sıvı içine daldırılmış bir katının sıvı içinde askıdaki kuvvetinin daldırma sırasında yer değiştirmesine sebep olduğu sıvı ağırlığına eşit olması prensibine göre hassas terazi ve yoğunluk kiti kullanılarak testler uygulanmıştır.



Şekil 2.7. Zwick marka Vikers mikrosertlik cihazı

Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan TiH_2 tozlarının farklı sıcaklıklar için XRD analizleri Şekil 2.8'de görülen Panalytical marka x'pert pro mpd model difraktometre cihazı kullanılmıştır. Cihazın toz analiz tutucularına yerleştirilen minimum 3 gr ağırlıklı toz numuneler 20-90° (2θ) tarama aralığında 0,02° adımlarla kanal başı 10 sn süreyle gönderilen Cu Kα radyasyonu ile analiz edilmiştir.



Şekil 2.8. X ışını difraktometre cihazı



Şekil 2.9. DSC analiz cihazı

Farklı sıcaklıklarda ısıl işleme tabi tutulmuş ve hiçbir ısıl işlem uygulanmamış toz haldeki TiH_2 numunelerine hidrojen salınım özelliğini belirleme amacıyla Şekil 2.9'de görülen Setaram/labsys marka diferansiyel taramalı kalorimetre cihazında 100 mm^3 Al_2O_3 krozeler kullanılarak DSC testleri uygulanmıştır. Testler 10 °C/dk ısıtma

hızında 25 ila 600 °C arasında ve 50 ml/dk ile test haznesine verilen argon gazı atmosferinde 80 mg miktarındaki toz numunelere uygulanmıştır.



Şekil 2.10. Nikon ters metal mikroskobu

Alüminyum ve TiH_2 tozları farklı hız ve zaman kombinasyonlarında karıştırılarak elde edilen numuneler üzerinde 100 ve 200 büyütmelerde alınan optik mikroskop görüntüleri alüminyum yapı içerisinde TiH_2 tozlarının en uygun dağılımın belirlenmesi amacıyla analiz edilmiştir. Alüminyum ve TiH_2 toz karışımlarına uygulanan 200, 250, 300 ve 350 MPa basınçlarla gerçekleştirilen preslemeler sonrasında elde edilen öncüler üzerinde yeterli tane deformasyonunun temininin tespiti için görüntü analizleri de optik mikroskop ile yapılmıştır. Çalışmada kullanılan Nikon ters metal mikroskobu Şekil 2.10'de görülmektedir.



Şekil 2.11. Jeol 6060 SEM cihazı

Presleme altında indüksiyon uygulaması sonrası mikro yapısal analizi ile üretimi gerçekleştirilen metal köpük hücre yapısının mikro yapısal analizi Şekil 2.11'da görülen Jeol 6060 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Metalik köpüklerin titreşim sönümleme karakteristiklerinin ortaya konması amacıyla hazırlanan düzenekte 8,18 gr ağırlıklı 4,5 kalibre hassas kurşun bilyenin 60 cm yükseklikten numune üzerine serbest düşmesi ile uyarılan bir tarafı sabit mesnete bağlı rijit metal köpük numunenin modal (eşdeğer, doğal) analiz frekans cevapları Şekil 2.12'de görülen Brüel Kjær marka 2625 model titreşim ölçme cihazı ve ivme ölçer kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 2.12. Brüel Kjaer titreşim ölçme cihazı

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Birinci Üretim Çalışmaları

Birinci üretim çalışmalarında viskozite ayarlama amacıyla kullanılan alüminyum oksit veya bor oksit kullanılmadan üretim yapılmıştır. Gerçekleştirilen üretimin ilk aşamasında TiH_2 ve alüminyum tozu birlikte 480 °C sıcaklıkta 3 saat süreyle ısıl işleme tabi tutulmuşlardır. Kullanılan köpürtücü ajanın ağırlıkça oranı %3 dür. Her iki bileşenin ısıl işlem sonrası hali Şekil 3.1'de görülmektedir. Bu şekilde sağda görülen TiH_2 ün ısıl işlem öncesi rengi metalik gri iken işlem sonunda pastel mavi rengini almıştır.



Şekil 3.1. Alüminyum tozu ve TiH_2 tozlarının karıştırılmadan önce ısıl işleme tabi tutulması (480 °C/ 3 saat)

Isıl işlem sonrası alüminyum tozu ve TiH_2 karışımı ağzı kapalı bir plastik tüp içerisinde 1000 d/dk hızda 30 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi Şekil 3.2'de görülmektedir. Bu işlem sonunda karışımda azda olsa heterojenlik gözlenmiş ve karıştırma hızının azaltılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

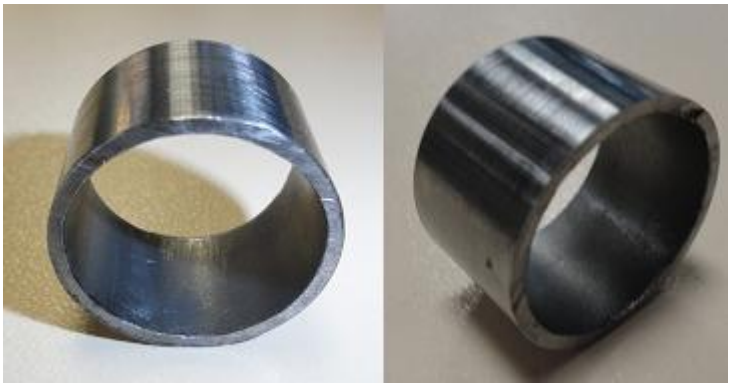


Şekil 3.2. Alüminyum tozu ve TiH_2 tozlarının karıştırılması



Şekil 3.3. Öncü ve köpük numune kalıpların hassas kesme cihazı ile hazırlanması

Öncü numune kalıbı Ø2,2 iç çapında çelik borudan Metkon Micracut 125 hassas kesme cihazında 15 mm boyunda kesilerek hazırlanmıştır. Kesilen yüzeyler presleme esnasında yüksek hassasiyetle zemine oturmanın sağlanması için 1000 kum zımparayla işlenmiştir. Üretilen öncü kalıbı Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.4. Öncü kalıp yüzükleri (Ø2,2 / h: 15)

Öncü üretiminde gereken sıkıştırma uygulamasında kullanılmak üzere silindirik bir çelik parça üniversal torna tezgâhında Ø2,2 çap ve 5 mm yüksekliğinde alt ve üst kapak olarak kullanılmak üzere 2 adet üretilip 1000 kum zımparayla yüzeyi işlenmiştir. Üretilen öncü kalıp kapağı Şekil 3.5'de görülmektedir.



Şekil 3.5. Öncü kalıp kapağı (Ø2,2 / h: 5)

Isıl işlem ve karıştırma uygulamalarına tabi tutulan alüminyum ve TiH_2 tozları hazırlanan öncü kalıp yüzüğü içerisine doldurulararak öncü kalıp kapaklarının arasında Şekil 3.6'da görüldüğü gibi el mengenesinde preslenmiştir.



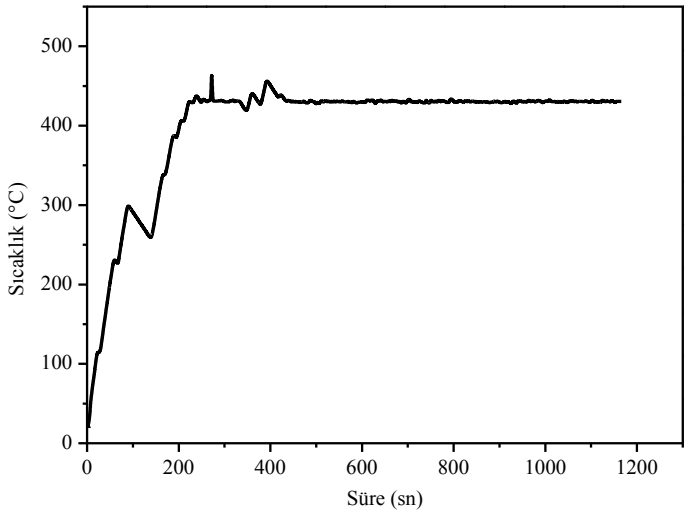
Şekil 3.6. El mengenesinde preslenmiş öncü

El mengenesinde gereken sıkıştırma miktarını ayarlamada tork metre kullanılmıştır. Kullanılan tork metre Şekil 3.7'de görülmektedir. Oda sıcaklığında uygulanan ön presleme süresi 30 dakikadır. Ön presleme sonrası 430 °C de 30 dakika süre ile ikinci presleme uygulanmıştır. Uygulanan ısıtma işlemine ait veriler Şekil 3.8'de grafikleştirilmiştir.



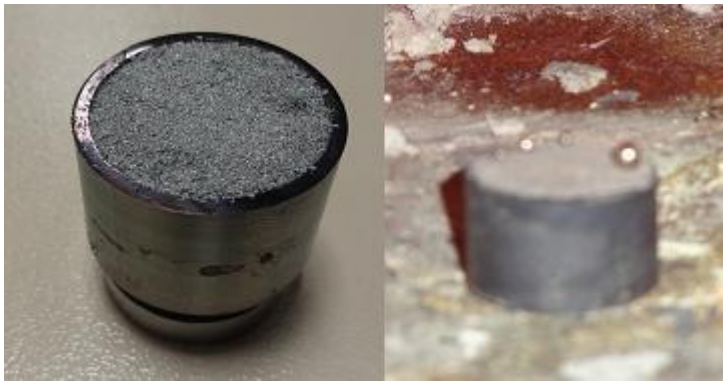
Şekil 3.7. Sıkıştırma miktarını hesaplamada kullanılan tork metre

İkinci presleme uygulamasından sonra çekilen fotoğraf Şekil 3.9 (a)'da görülmektedir. Takiben elde edilen öncü kalıptan çıkarılmaksızın 800 °C fırında köpüklenmeye bırakılmıştır.



Şekil 3.8. Öncü üretim sıcaklığının uygulanması

Fırın içerisinde 10 dakika sonrasında çekilen fotoğraf Şekil 3.9 (b)'de görülmektedir. Uygulanan işlemler sonrası öncü yüzeyinde sadece birkaç damlacık şeklinde metal eriyik oluşumu görülmüş, arzu edilen köpük yapısına ulaşılamamıştır.



(a) (b)

Şekil 3.9. (a) El mengenesinde oda sıcaklığında 30 dk ve (b) sıcaklık (430 °C / 30 dk)

Tablo 3.1. Birinci üretim çalışmalarında uygulanan büyüklükler tablosu

Deneme	Öncü kalıp çapı	Numune kalıp çapı	Al tozu ısıl işlem sıcaklığı	TiH_2 ısıl işlem sıcaklığı	Karıştırma devri ve süre	Öncü üretim sıcaklığı	Numune üretim sıcaklık ve süresi	Sonuç
1	Ø2,2	Ø2,51	430 °C	20 °C	1000dd/ 30dk	430 °C	800dd/ 10dk	Öncü toz halinde
2	Ø2,2	Ø2,51	480 °C	480 °C	45dd/ 30dk	430 °C	800dd/ 20dk	Öncü toz halinde

Alüminyum tozu ısıl işlem sıcaklığı, TiH_2 ısıl işlem sıcaklığı, tozların karıştırma devri, sıkıştırma miktarı değiştirilerek Tablo 3.1'de verilen değerlere göre yeni üretimler gerçekleştirilmiş ancak istenen öncü yapısı elde edilememiştir. Uygulanan işlem basamakları ayrı ayrı ele alınarak literatür bilgisi ışığında değerlendirildiğinde üretimin başarısızlığı konusunda varılan yargı şöyledir. Alüminyum tozuna uygulanan 480 °C sıcaklıkta 3 saatlik ısıl işlem sonrası malzeme yüzeyindeki oksit tabakasının kararlığı artarak üretim güçleşmiştir. Uygulanan 1000 devir dakika karıştırma hızının gereğinden yüksek olması sebebiyle homojen bir toz karışımı elde edilememiştir. Toz karışımının oda sıcaklığında ve fırın içerisinde preslenmesi için kullanılan el mengenesinde gereken sıkıştırma sağlanamamaktadır.

Bu tespitlere göre uygulanan yeni üretim denemesinde iki düz metal plaka arasında el presinde toz karışımı sıkıştırılarak 800 °C fırın içerisinde köpürmeye bırakılmıştır.

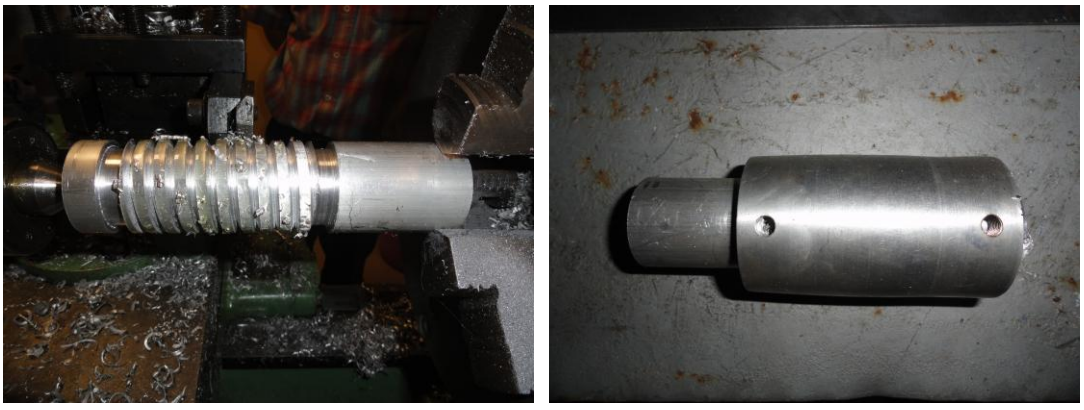
Şekil 3.10'da bu işlem sonrası elde edilen öncünün köpürerek meydana getirdiği yapı görülmektedir. Burada öncü kalınlığı %300 dolayında artmıştır. Bu üretim sonrası yeni değerlendirmelere göre sıkıştırma esnasında öncü malzemenin ısıtılması gerekmektedir. Bunun temini için prese ilave soğutma sistemi sağlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3.10. El presinde sıkıştırılmış ancak sıcaklık uygulanmamış öncünün fırın içerisinde köpürmesi

3.2. İkinci Üretim Çalışmaları

Birinci üretim çalışmalarında alüminyum tozları iki sefer fırında ısıl işleme tabi tutulmuştur. Bu durum alüminyum tozlarının yüzeyinde oluşan oksit tabakasının kararlığını arttırmış ve metalik köpük oluşumunun kısıtlanmasına neden olmuştur. Dolayısıyla üretim sürecinde alüminyum tozlarına ön ısıtma uygulanmamalıdır. Ayrıca el presinde ilave ısıtma tertibatına ihtiyaç vardır. Bu husus göz önüne alınarak yapılan yeni üretimde aşağıdaki şekillerde sunulan aşamalar uygulanmıştır.



Şekil 3.11. El presi için soğutmalı baskı takozu

Öncü üretimi sırasında indüksiyon bobini içerisine yerleştirilen kalıp içerisinde gereken ısıtma yapılırken el presiyle de diğer yandan sıkıştırma uygulanması gerekmektedir. Ancak gerçekleştirilen denemede ısı etkisiyle presin hidrolik sıvısı

dışarı tahliye olduğu için bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 3.11'de el presinin ısıl etkiye maruz kalmasını önlemek amacıyla üretilmiş sol tarafta görülen soğutma suyu dolaşım kanallarına sahip iç parça ile su giriş ve çıkışına imkan tanıyan dış parçadan oluşan 2 parçalı baskı takozu üretilmiştir. Üretilmiş olan 2 parçalı baskı takozu ile istenilen sıkıştırma sağlanamadığından Şekil 3.12'de görüldüğü üzere elde edilen üründe sadece az miktar köpürme eğilimi görülmüş fakat metalik köpük elde edilememiştir.



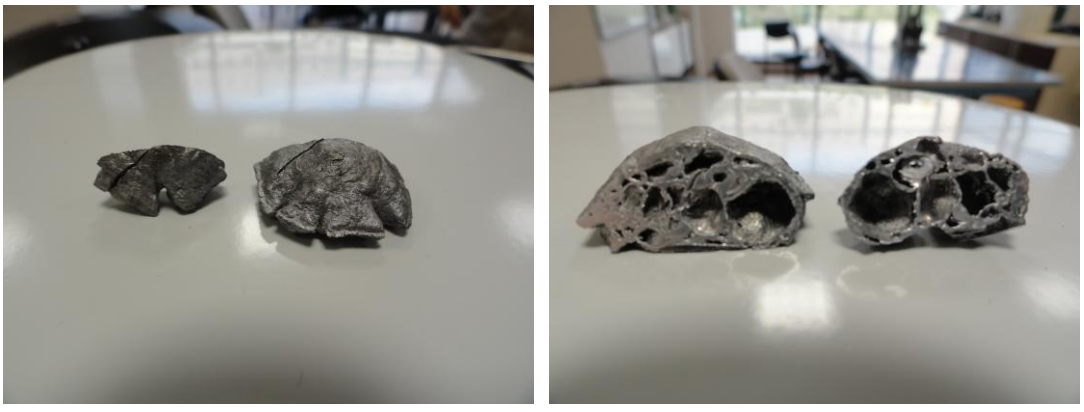
Şekil 3.12. Fırında serbest kalıpta elde edilen metalik köpük yapı

Üretilmiş olan 2 parçalı baskı takozundan beklenilen sonuç alınamadığı için el presinin pistonu üzerine içerisinden soğutma suyu geçecek bir bakır boru ısıl işlemle yumuşatılıp piston üzerine sarılarak Şekil 3.13'de görülen sistem imal edilmiş ve yapılan denemede yeterli soğutmanın temin edildiği anlaşılmıştır.



Şekil 3.13. El presine uygulanan bakır boru soğutma sistemi

Bakır borulu soğutma sistemine sahip el presiyle gerçekleştirilen üretimde alüminyum tozuna ısıl işlem uygulanmadan TiH_2 köpürtücü ajana 430 °C sıcaklıkta 3 saat süreyle ısıl işlem uygulanmıştır. Elde edilen tozlar 90 devir dakika dönme hızında 60 dakika süreyle karıştırılıp elde edilen toz karışımına el presinde 5 ton sıkıştırma basıncı altında öncü kalıbı içerisinde ön sıkıştırma uygulanmıştır. Gene el presinde uygulanan ikincil sıkıştırma 5 ton olup sıcaklık ise 400 °C dir. Elde edilen öncü kalıptan çıkarılarak 800 °C fırında 7 dakika süreyle köpüklenmeye terk edilmiştir. Elde edilen köpük yapının görüntüsü Şekil 3.14'de görülmektedir.



Şekil 3.14. İkinci üretim çalışmalarında elde edilen metalik köpük yapı

Bu üretimde metalik köpük yapısına ulaşılmışsa da gözenek boyutları numune boyutuna göre büyük ve düzensiz dağılımlıdır. Ayrıca üretilmiş olan parça deneme

üretimi olması sebebiyle boyutu itibariyle son derece küçüktür. Bu sebeple daha büyük boyutlu öncü üretilerek işlem tekrarlanmıştır. Elde edilen yeni parça Şekil 3.15'de görülmektedir. Yeni üretimde gözenek bölgesinin daha detaylı görülebilmesi için tornalama ile çap işlenmiştir. Daha büyük boyutlu bir metalik köpük elde edilmiş ise de gözenek boyutu ve dağılımı açısından arzu edilen yapı sağlanamamıştır.



Şekil 3.15. Fırında serbest kalıpta elde edilen metalik köpük yapı

Gözenek boyutu ve dağılımının homojenliğinin sağlanması amacıyla köpüklendirme işlemi serbest kalıp yerine çelik borudan hazırlanan bir metal kalıbın kullanılması yoluna gidilmiştir. Çelik kalıp hassas kesme makinesinde ortadan ikiye kesilerek fotoğraflanmıştır. Elde edilen metalik köpük Şekil 3.16'da görülmektedir. Elde edilen yeni numunede serbest kalıba göre daha homojen bir yapı elde edilmiştir. Ancak fırında köpürtülmeye terk edilen öncü çelik boru içerisinde tam ortaya yerleştirilmesi halinde daha homojen bir yapı elde edileceği kanaatine varılmıştır.



Şekil 3.16. Çelik boru içerisinde elde edilen metalik köpük yapı

İkinci üretim çalışmalarında gelinen son üretim aşamasının geliştirilmesi için üretim sürecindeki etkin faktörlerin irdelenmesi ve kullanılan tertibatın varılan sonuçlara göre değerlendirilerek yeni üretimlerin gerçekleştirilmesi için üçüncü üretim çalışmalarına geçilmiştir.

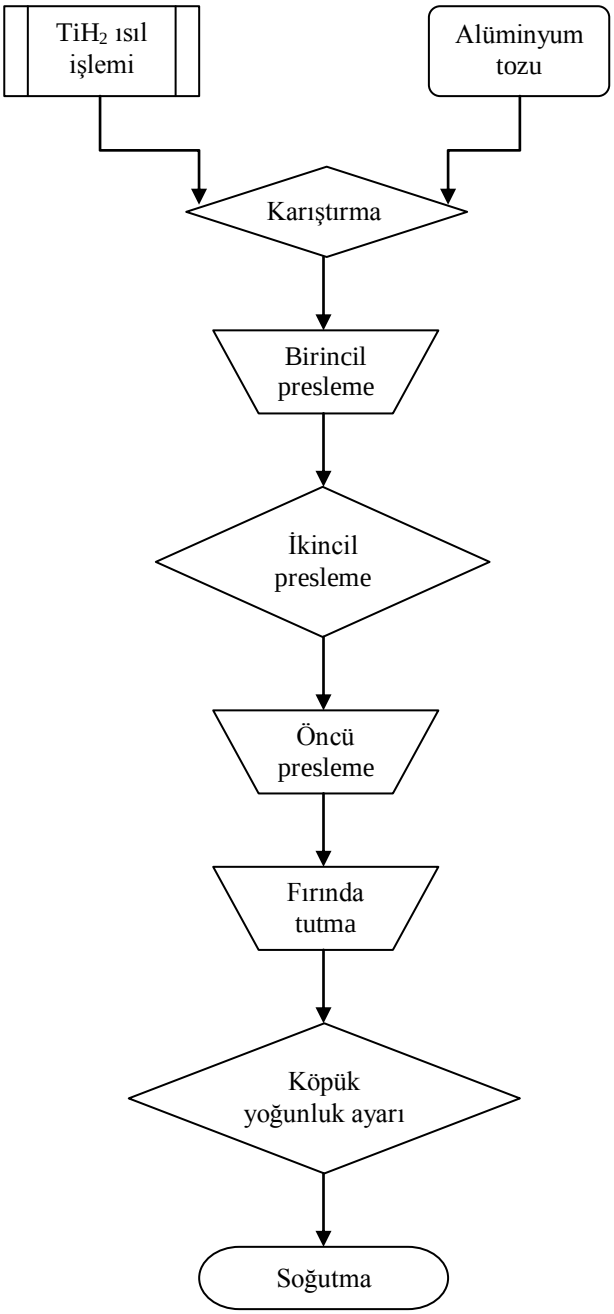
3.3. Üçüncü Üretim Çalışmaları

Titanyum hidrit içeriği, karıştırma ve presleme parametrelerinin toz metalürjisi metoduyla alüminyum köpük üretim sürecindeki etkin parametreler olarak en uygun değerlerinin tespiti üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Alüminyum köpük üretim sürecine ait akış diyagramı Şekil 3.17'de verilmiştir. Alüminyum köpüğün üretim aşamaları şöyledir: 1- TiH_2 ısıl işlemi, 2- Toz karıştırma, 3-Birincil presleme (soğuk), 4-İkincil presleme (soğuk), 5-İndüksiyon altında presleme (sıcak), 6-Fırınlama

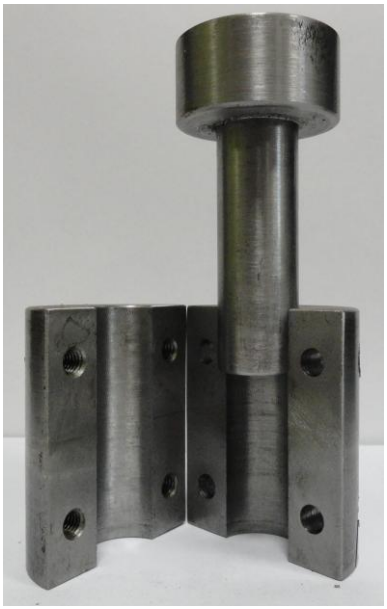
Üçüncü üretim çalışmasında alüminyum tozun erime sıcaklığı ile TiH_2 tozun reaksiyon sıcaklığı arasındaki uyumsuzluk temel problem olarak ele alınmaktadır. Esas olarak toz metalürjik proseste etkin faktörlerin araştırılması gerekmektedir.

Bu prosesin tipik özelliği elde edilen hücrelerin boyutsal ve şekilsel dağılımının bir takım düzensizlikler içinde bulunmasıdır. Toz metalürjik prosesle üretilmiş metalik köpüklerin yapısal heterojenliğinin giderilmesi konusunda proses parametreleri değerlendirilmelidir. Bu amaçla TiH_2 içeriğinin en uygun değeri, karıştırma ve presleme parametreleri daha homojen alüminyum köpük elde etme amacıyla araştırılmıştır. Alüminyum ve TiH_2 tozları farklı hız ve zaman kombinasyonlarında karıştırılarak elde edilen numuneler üzerinde alınan optik mikroskop görüntüleri alüminyum yapı içerisinde TiH_2 tozlarının en uygun dağılımın belirlenmesi amacıyla analiz edilmiştir.

Daha önceki üretim uygulamalarında öncü üretimi çelik borudan imal edilmiş boru içerisinde sıkıştırma ve ısıtma uygulanarak gerçekleştirilmiş ancak uygulanan sıkıştırma kuvvetinin toz üzerine baskısı ince kesitli çelik boru gövdesinde oluşan fıçılaşma nedeniyle öncü üretim kalıbının yeniden tasarlanmasına ihtiyaç duyulmuştur. Yeni üretilen öncü hazırlama kalıbı Şekil 3.18'de görülmektedir.



Şekil 3.17. Akış diyagramı



Şekil 3.18. Öncü hazırlama kalıbı

Birinci denemede serbest olarak daha sonraki denemelerde çelik boru içerisinde fırında köpüklenmeye bırakılan öncülerde köpüklenme süreci gözlemlenemediği için iki ayrı boyda kuvars esaslı cam boru kalıbı hazırlanmıştır. Hazırlanan cam köpüklenme kalıpları Şekil 3.19'da görülmektedir.



Şekil 3.19. Cam boru fırınlama kalıpları

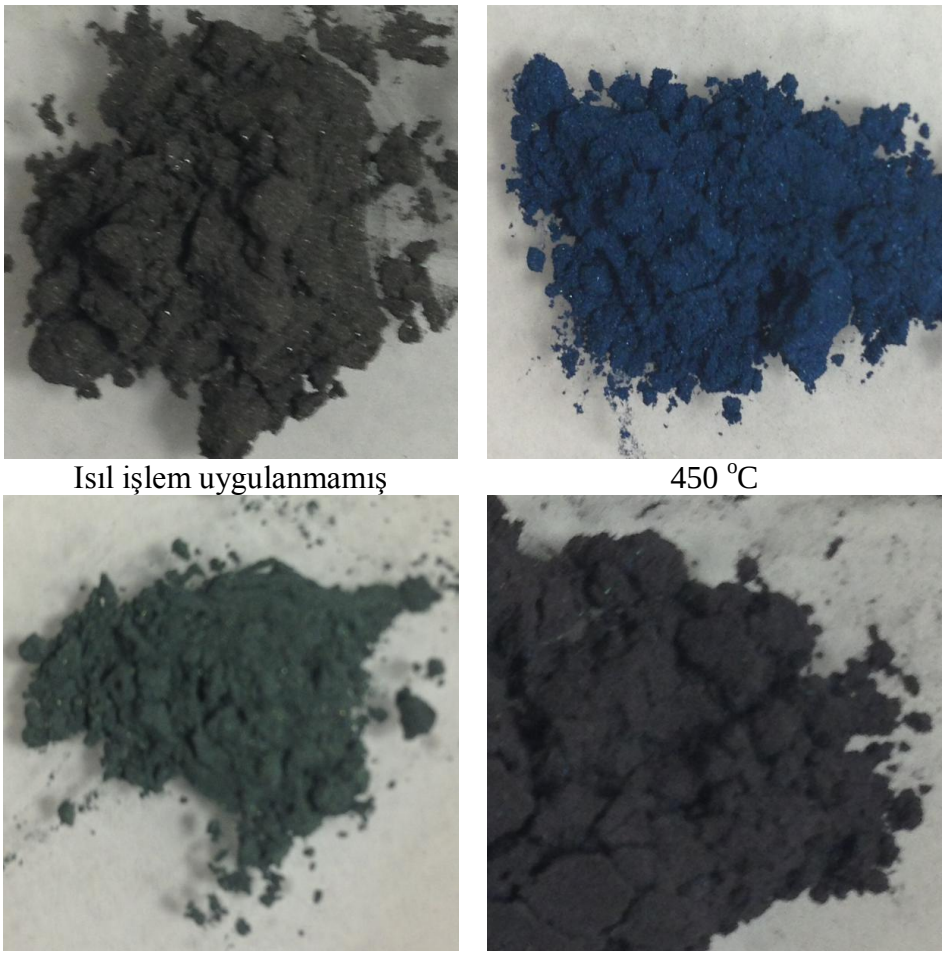
Titanyum hidrit içeriğinin en uygun miktarın belirlenmesi için ağırlıkça yüzde 0,5-1-1,5-2 oranlarında köpürtücü ajan olarak kullanılan TiH_2 içerikleri test edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda ısıl işleme tabi tutulmuş ve hiçbir ısıl işlem uygulanmamış toz haldeki TiH_2 numunelerine hidrojen salınım özelliğini belirleme amacıyla DSC

testleri uygulanmıştır. Alüminyum ve TiH_2 tozları farklı hız ve zaman kombinasyonlarında karıştırılarak elde edilen numuneler üzerinde alınan optik mikroskop görüntüleri alüminyum yapı içerisinde TiH_2 tozlarının en uygun dağılımın belirlenmesi amacıyla analiz edilmiştir. Alüminyum ve TiH_2 toz karışımlarına uygulanan 200, 250, 300 ve 350 MPa basınçlarla gerçekleştirilen preslemeler sonrasında elde edilen öncüler üzerinde yeterli tane deformasyonunun temininin tespiti için görüntü analizleri, Vikers sertlik ve yoğunluk testleri uygulanmıştır.

Toz metalürjik proseste saf metal veya alaşımların erime sıcaklıkları ile TiH_2 tozun reaksiyon sıcaklığı arasındaki uyumsuzluk temel problem olarak ele alınmaktadır. Bir grup araştırmacı [58, 95, 96] bu sorunun çözümü üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Deneysel araştırma makalelerinden bazıları hidrojen salınımının kinetiği üzerinedir [58, 96].

Kontrolsüz atmosferde yapılan TiH_2 ısıl işleminde partikül yüzeylerinde bir oksit tabakasının oluştuğu bildirilmiştir [95, 96]. Temel olarak toz metalürjik proseste etkin faktörlerin araştırılması esas alınmaktadır. Toz metalürjik prosesin tipik özelliği elde edilen hücrelerin boyutsal ve şekilsel dağılımının bir takım düzensizlikler içinde bulunmasıdır. Toz metalürjik prosesle üretilmiş metalik köpüklerin yapısal heterojenliğinin giderilmesi konusunda proses parametreleri değerlendirilmelidir.

Alfa Aesar firmasından temin edilen TiH_2 tozu izotermal olarak oda sıcaklığından 10 °C/dk ısıtma hızında 450, 500 ve 550 °C sıcaklığa ısıtılarak belirtilen sıcaklıklarda 2 saat süreyle ısıl işlem gerçekleştirilmiştir. Isıl işlemler TiH_2 tozu üzerinde farklı renklenmelere yol açmaktadır. Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan TiH_2 tozlarına ait fotoğraflar Şekil 3.20'de görülmektedir.



Şekil 3.20. Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan TiH_2 tozlarına ait fotoğraflar

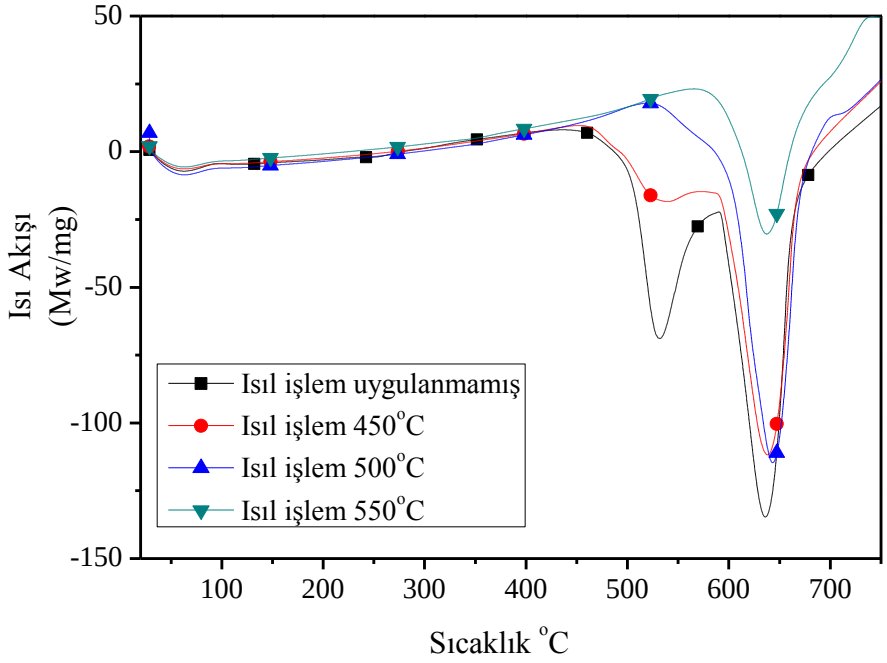
TiH_2 ajana uygulanan ısıl işleme ait plan Tablo 3.2'de görülmektedir. TiH_2 toz ajana ısıl işlem uygulanmadan ve belirtilen plan dahilinde ısıl işlemler uygulandıktan sonra DSC testleri ile karakterizasyonu yapılmıştır. DSC testleri 10 °C/dk ısıtma hızında 25 ila 600 °C arasında ve 50 ml/dk ile test haznesine verilen argon gazı atmosferinde Al_2O_3 pota içerisinde bulunan 80 mg miktarındaki toz numunelere uygulanmıştır.

Tablo 3.2. TiH_2 ajana uygulanan ısıl işlem planı

Numune	Sıcaklık (°C)	Süre (dk)
1	-	-
2	450	120
3	500	120
4	550	120

Şekil 3.21'de görüldüğü üzere elde edilen DSC eğrilerinde $TiH_2 \rightarrow Ti+H_2$ reaksiyonunda hidrojen dönüşümü endotermik özelliktedir. Isıl işlem uygulanmamış

tozun ayrışma prosesinin iki aşamalı bir endotermik reaksiyonla gerçekleştiği gözlenmiştir. Yapılan DSC analizlerinin hepsinde hidrojen dönüşümünün kanıtı olarak entropide meydana gelen büyük değişim gözlemlenmiştir. Endotermik tepkimelerin başlama sıcaklıkları yaklaşık olarak 420 ^{o}C ve ikinci tepkime aşamasının başlama sıcaklığında 580 ^{o}C olarak bulunmuştur. Ayrışma prosesi yaklaşık 750 ^{o}C'de tamamlanmaktadır.



Şekil 3.21. Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan TiH_2 tozlarının argon atmosferindeki DSC eğrileri

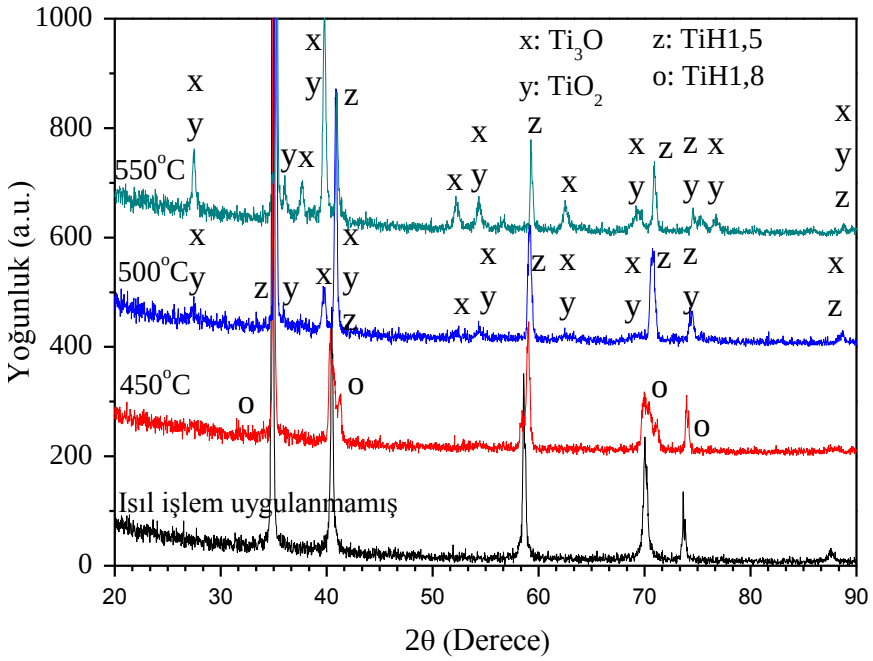
Isıl işlem uygulanan tozlara ait DSC analizlerinin endotermik aşamalarında değişiklikler görülmektedir. Uygulanan ısıl işlem sıcaklığı 450 ^{o}C olduğunda birinci endotermik reaksiyon zayıflamaya başlamakta 500 ve 550 ^{o}C sıcaklıklarda ise tamamen ortadan kalkmaktadır.

Ayrıca 500 ve 550 ^{o}C sıcaklıklarda uygulanan ısıl işlemlerde birincil hidrojen dönüşüm reaksiyonunun ortadan kalkması sebebiyle hidrojen salınımında süre ve miktar bakımından bir azalma söz konusudur.

Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan TiH_2 tozlarının farklı sıcaklıklar için XRD eğrileri Şekil 3.22'de görülmektedir. Isıl işlem uygulanmamış tozun tek fazlı yapıda

olduğu görülmektedir. Uygulanan ısıl işlemler sonrasındaki piklerin TiH_x, Ti_3O ve TiO_2 bileşiklerine uymakta olduğu belirlenmiştir.

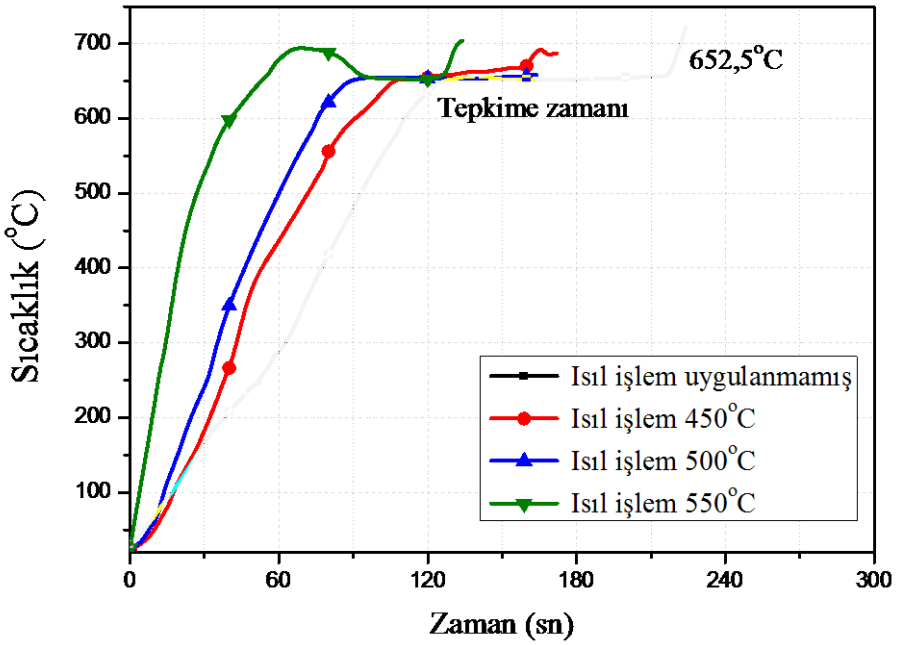
Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan TiH_2 tozları kullanılarak üretilen öncüler 800 ^oC sıcaklığa ön ısıtılmış fırında köpürmeye bırakılmış ve eş zamanlı olarak öncü numune içerisine yerleştirilen ısıl çift ile sıcaklık değerleri 2 saniye aralıklarla kayıt edilmiştir. Elde edilen verilerin grafik üzerindeki görünümü Şekil 3.23'de görülmektedir. Eğrilerin köpük oluşum sürecinin 652,5 ^oC dolayında gerçekleşmekte olduğu görülmektedir. Bununla beraber oda sıcaklığından fırın atmosferine giren numunelerde tepkime sıcaklığına kadar lineer bir sıcaklık artışından söz etmek mümkündür.



Şekil 3.22. Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan TiH_2 tozlarının farklı sıcaklıklar için XRD eğrileri

Tepkime süresi ise ısıl işlem uygulanmamış numunede en uzun iken ısıl işlem sıcaklığının arttırılmasının bu süreyi kısalttığı görülmektedir. Isıl işlem uygulanmayan numunenin 2 endotermik tepkime sürecini barındırmasından ötürü tepkime süreci diğerlerine nazaran daha uzun sürede gerçekleşmektedir. Diğer taraftan 450 ^oC'de azalmaya başlayan 500 ve 550 ^oC'de ise neredeyse tamamen kaybolan birinci tepkimenin ortadan kalkma durumu sadece ikinci tepkimenin bu ısıl işleme maruz kalan numunelerde görülmesi nedeniyle tepkime süreci daha kısa

görülmektedir. Bu durum Şekil 3.21'de verilmiş olan DSC analizlerine de bire bir uymaktadır. Gerçekleştirilen tepkime analizlerinde ısıl işlem uygulanmayan numunelerde iki kademeli yoğun H_2 salınım reaksiyonu nedeniyle köpük kararlılık ve homojenliğinin sağlanması güçleşmektedir. Isıl işlem sıcaklığı 550 ^oC olarak uygulandığı zaman birinci tepkimenin görülmemesi sebebiyle sıcaklıkta ikinci tepkime zamanına kadar lineer artışın devam etmesi söz konusudur. Aynı sıcaklıkta ısıl işlem uygulanan DSC eğrilerinde de 600-700 ^oC aralığında tek bir tepkime görülmesi bu davranışı teyit etmektedir.



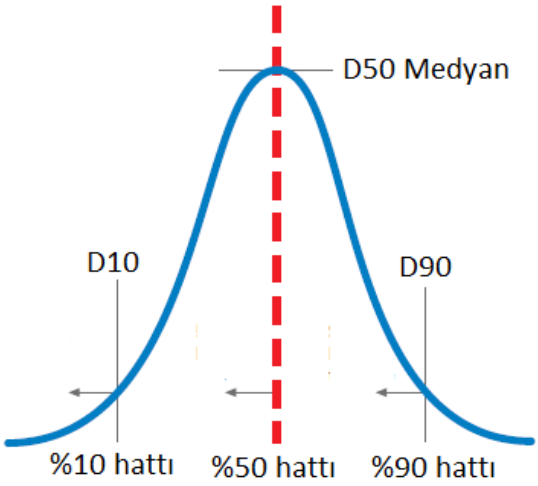
Şekil 3.23. Isıl işlem uygulanan ve uygulanmayan TiH_2 tozları kullanılarak üretilen öncülere ait köpük üretim eğrileri

Buna göre ısıl işlem sıcaklığının 550 ^oC'de uygulanması köpürme sürecindeki dengeli sıcaklık davranışını bozmaktadır. TiH_2 üzerinde gerçekleştirilen analizler neticesinde kararlı bir köpük yapısına ulaşmada 450-500 ^oC aralığında ısıl işlem uygulanmasının gerektiği sonucuna varılmıştır.

Alüminyum ve TiH_2 partiküllerinin düzenli karışımı nihai ürüne direk etki eden bir parametre olarak görülmektedir. En iyi dağılım koşullarının analiz edilmesi amacıyla 22,4-45-63 ve 90 d/dk dönme hızlarında 30, 60, 90, 120 dk sürelerde karıştırılan alüminyum tozu ile ağırlıkça %1 oranındaki TiH_2 partiküllerinin karıştırma işlemleri sonrası 100 ve 200 büyütmelerde optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Elde edilen

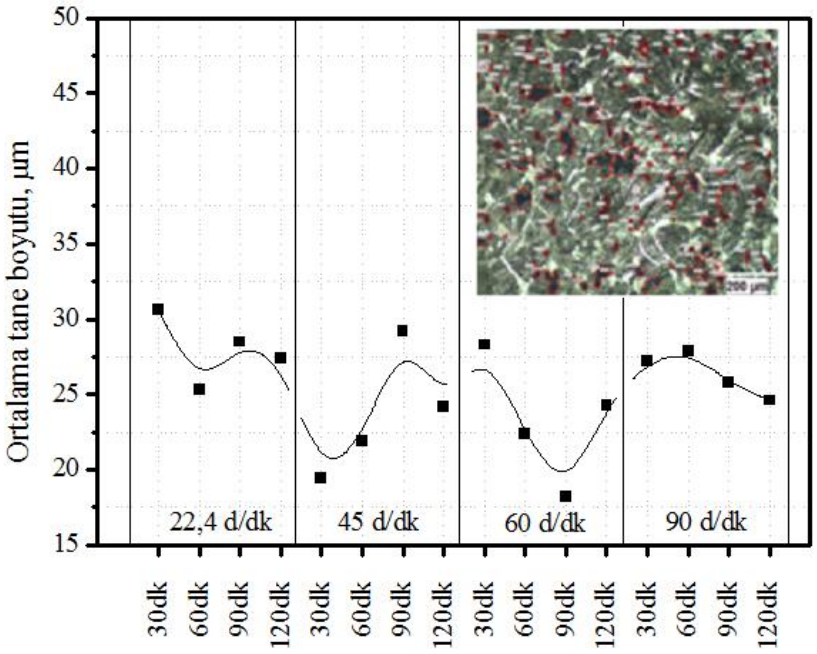
görüntüler Ek A'da verilmiştir. Titanyum hidrit partiküllerinin en boy oranı, dağılımı ve boyutsal analizleri 100 büyütmede alınan optik mikroskop görüntüleri üzerinden ayrı ayrı analiz edilmiştir. Elde edilen verilere ait grafikler Ek B'de görülmektedir.

Şekil 3.24'de partikül analizinin grafiksel dağılımı verilmiştir. Buna göre D10, D50 ve D90 büyüklükleri toplam analiz grubu içerisindeki dağımın yüzde olarak sırasıyla 10, 50 ve 90'ını ifade etmektedir. D50 aynı zamanda medyandır.



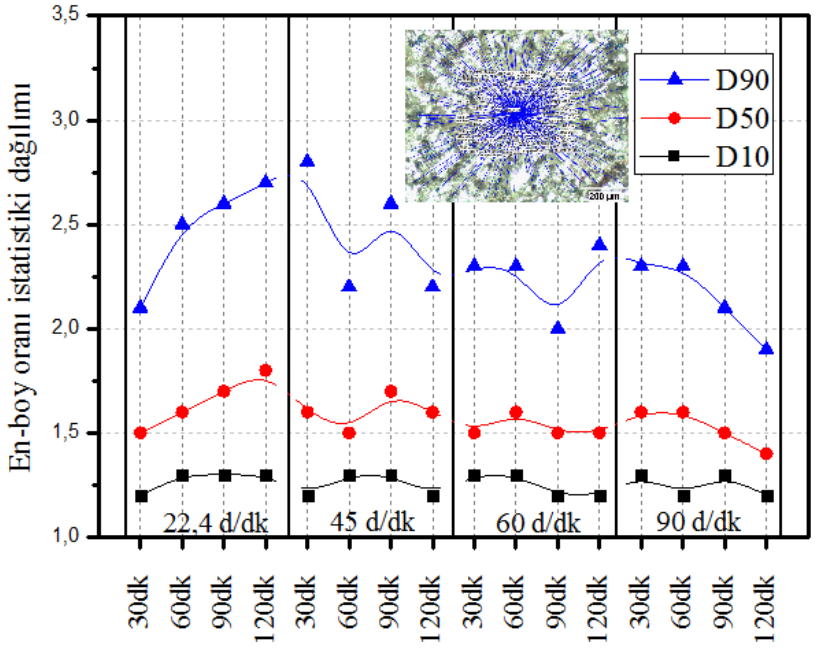
Şekil 3.24. ASTM 799'a göre dağılım

Şekil 3.25'de verilen karıştırma işlemine göre ortalama tane boyutunun değişimi grafiği incelendiğinde 32 ila 18 µm aralığında bir dağılım olduğu görülmekte ve dağılımların ortalama değerinin ise 25 µm olduğu sonucuna varılmaktadır. Homojen bir tane boyutu istenildiğinden ötürü Şekil 3.26'da verilen karıştırma işlem değişkenlerine göre en-boy oranının istatistikî dağılım grafiğinden D10 ve D90 değerlerinin mümkün olduğunca yakın olduğu bir karıştırma değeri seçmek gerekmektedir.



Şekil 3.25. Ortalama partikül dağılım grafiği

Grafik incelendiğinde 90 d/dk karıştırma hızında 90 ve 120 dk karıştırma sürelerinin istenilen sonucu verdiği görülmektedir.

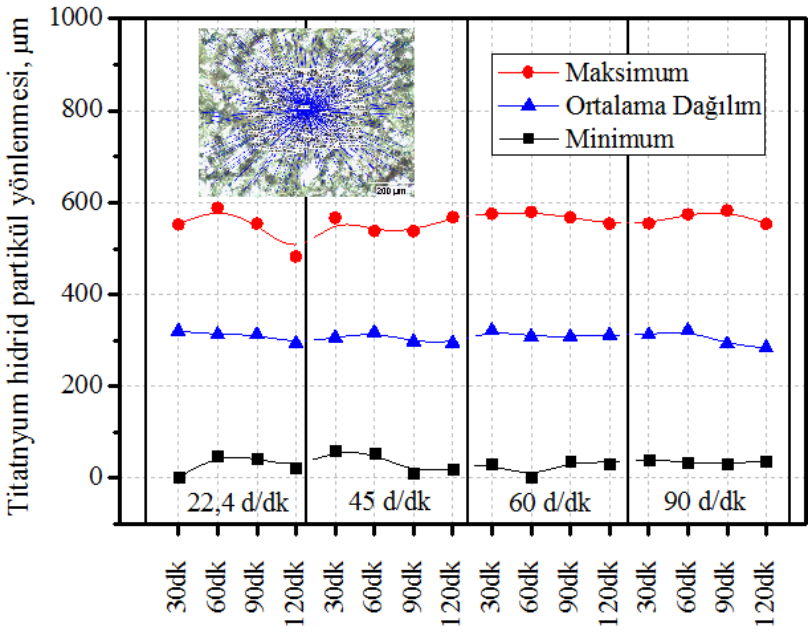


Şekil 3.26. En-boy oranı istatistikî dağılım grafiği

Söz konusu karışım için homojen bir tane boyutu kadar homojen dağılımda istenilen bir diğer özelliktir. Şekil 3.27'de karıştırma tipine göre titanyum hidrit partikül dağılım grafiği verilmiştir. Bu grafiklere göre düşük hızlarda uygulanan

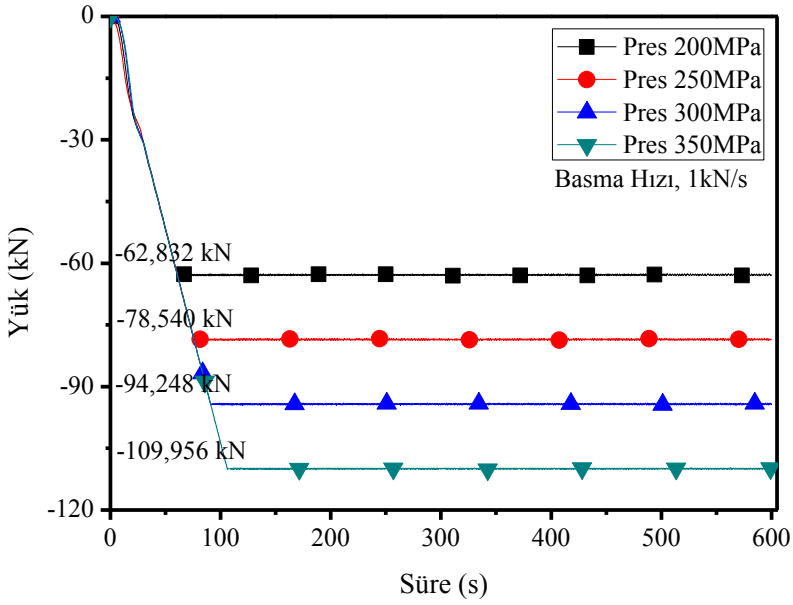
karıştırmaların maksimum ve minimum dağılma değerlerinde düzensizliklerin olduğu, 60 ve 90 d/dk da ise bu durumun ortadan kalktığı görülmektedir.

Elde edilen bulgulara göre ortalama partikül boyutunun 25 µm, istatistiksel olarak ise D10 ve D90 aralığının en dar olduğu, partikül dağılımlarının daha düzenli bulunduğu 90 d/dk karıştırma hızında 90 veya 120 dakika sürelerde karıştırma işleminin gerçekleştirilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır.



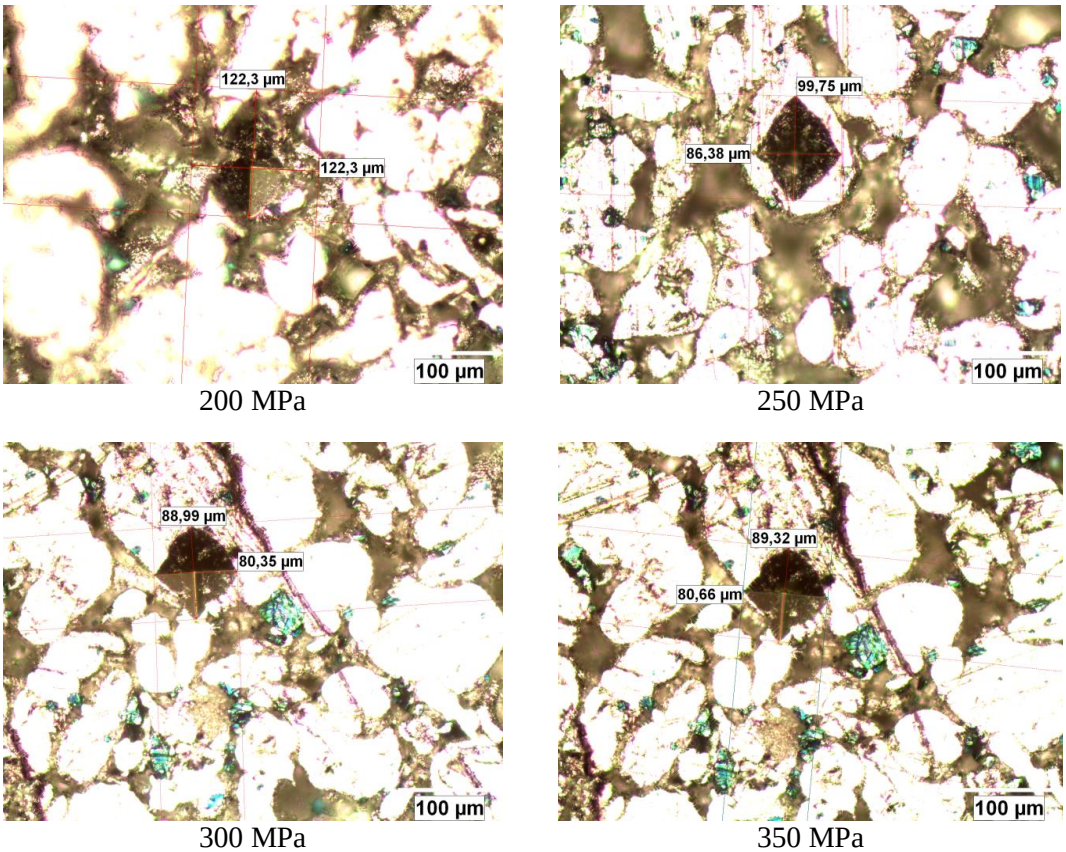
Şekil 3.27. Titanyum hidrit partikül dağılım grafiği

200 ila 350 MPa değerlerinde presleme ile elde edilmiş numuneler üzerinde oksit tabaka deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda uygulanan yüklemelerin grafiksel gösterimi Şekil 3.28'de görülmektedir. Yüklemeler 1 kN/s hızında 200, 250, 300 ve 350 MPa basma etkisi altında 600 saniye süreyle uygulanmıştır. Preslemeler sonrası elde edilen öncülere ait optik mikroskop görüntüleri Tablo 3.3'de sunulmuştur.



Şekil 3.28. Uygulanan yüklemelere ait yük-zaman grafiği

Presleme uygulaması sonrasında tanelerin deformasyon durumunu tespit etme amacıyla her bir numune için 50, 100 ve 200 büyütmelerde optik mikroskop görüntüleri alınmıştır.

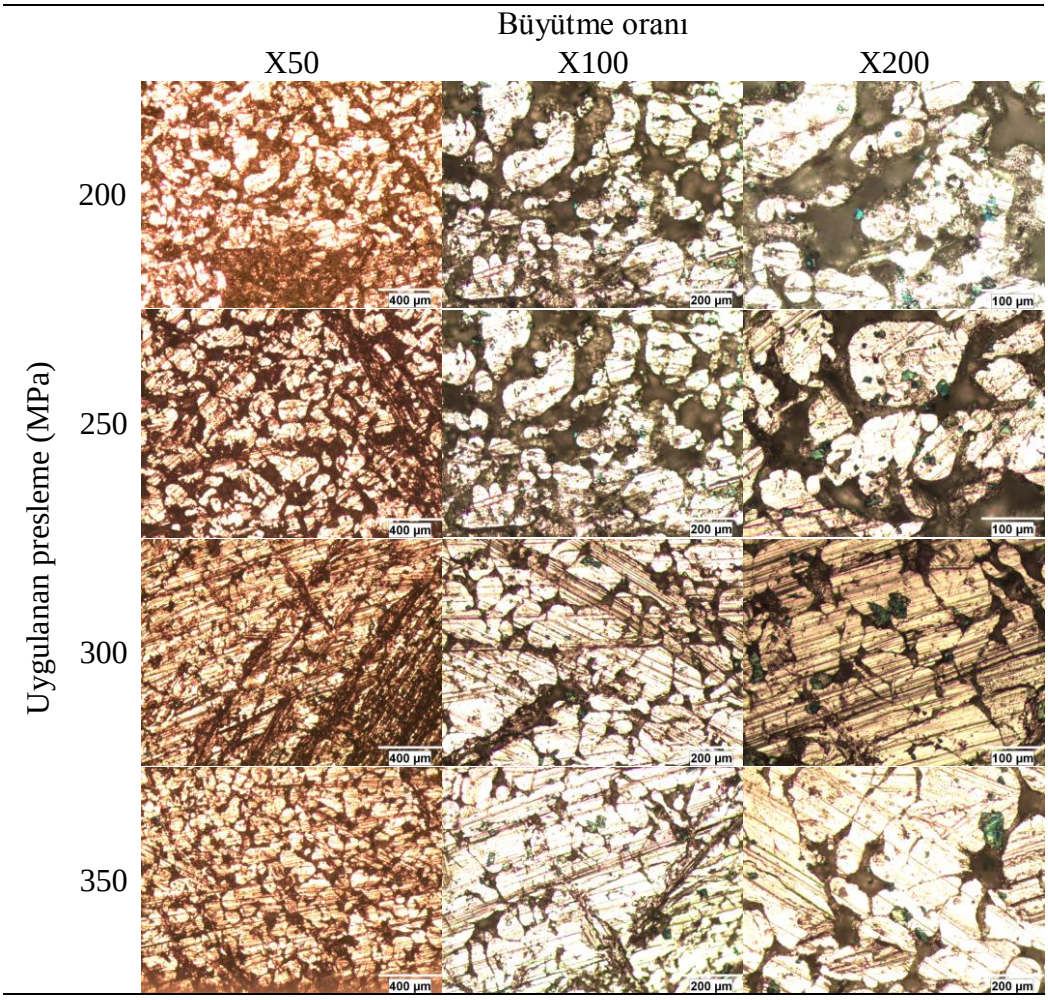


200 MPa 250 MPa

300 MPa 350 MPa

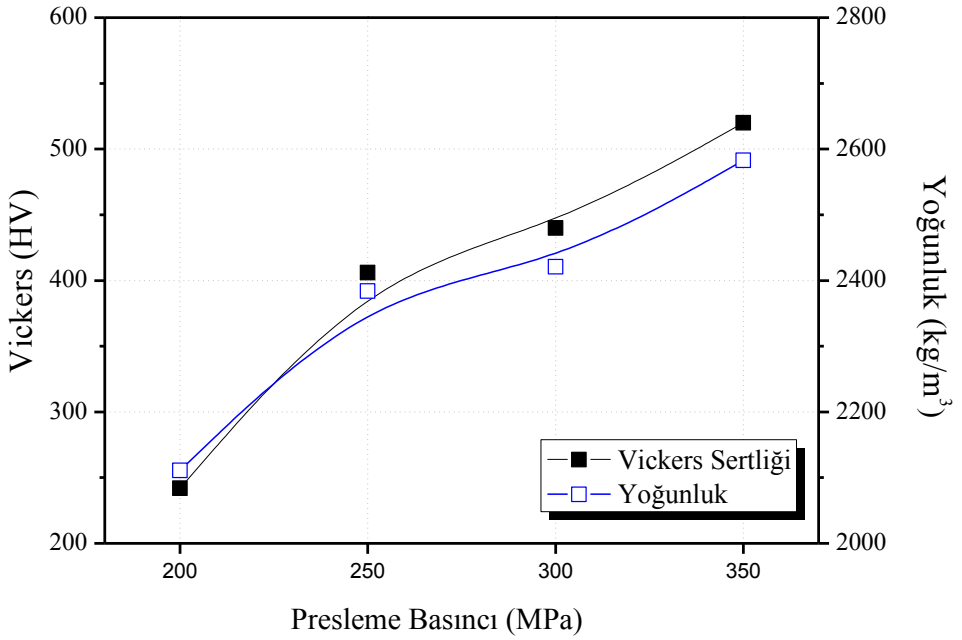
Şekil 3.29. Yüklemeler sonrası oluşturulan Vikers sertlik izleri

Tablo 3.3. Preslemeler sonrası elde edilen kompaktların 50, 100 ve 200 büyütmelerde optik görüntüleri



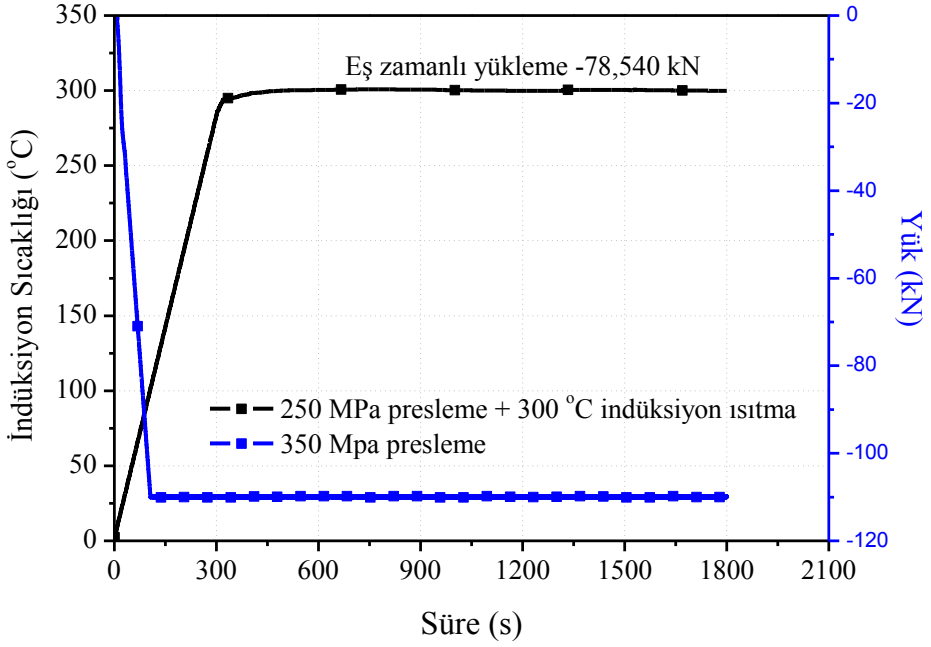
Söz konusu tablo incelendiğinde yukarından aşağıya doğru artan presleme basıncı ile taneler arası mesafenin azalmakta ve nihayet 350 MPa değerinde neredeyse tamamen kapanmakta olduğu görülmektedir. Bu durumun tespitini 200 büyütmede açık bir şekilde görmek mümkündür.

Uygulanan preslemeler sonrasında numuneler üzerinden Vikers sertlik ölçümleri ve yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Preslemeler sonrası alınan Vikers sertlik izlerine ait görüntüler Şekil 3.29'da sunulmuştur. Şekil 3.30'da ise yüklemeler sonrası oluşturulan Vikers sertlik analiz ve yoğunluk değerlerinin değişim grafiği verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde beklenilen bir sonuç olarak artan presleme basıncı ile sertlik ve yoğunluk değerlerinde birbirlerine uyumlu olan bir artış eğilimi açıkça görülmektedir.

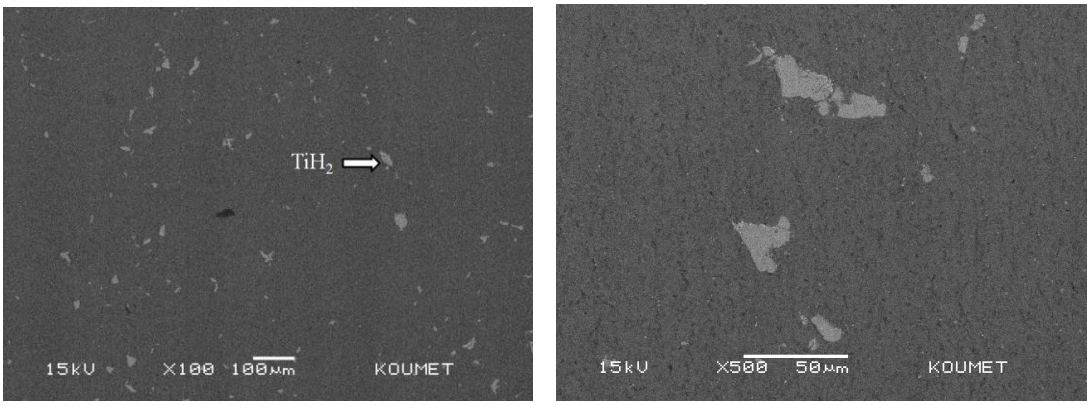


Şekil 3.30. Yüklemeler sonrası oluşturulan Vikers sertlik analiz ve yoğunluk değerlerinin değişim grafiği

İndüksiyonla ısıtma ile beraber uygulanan eş zamanlı presleme işlemine dair grafik Şekil 3.31'de sunulmuştur. Söz konusu grafikten presleme ve ısıtma işlemlerinin kararlı ve dengeli bir şekilde uygulandığı anlaşılmaktadır.

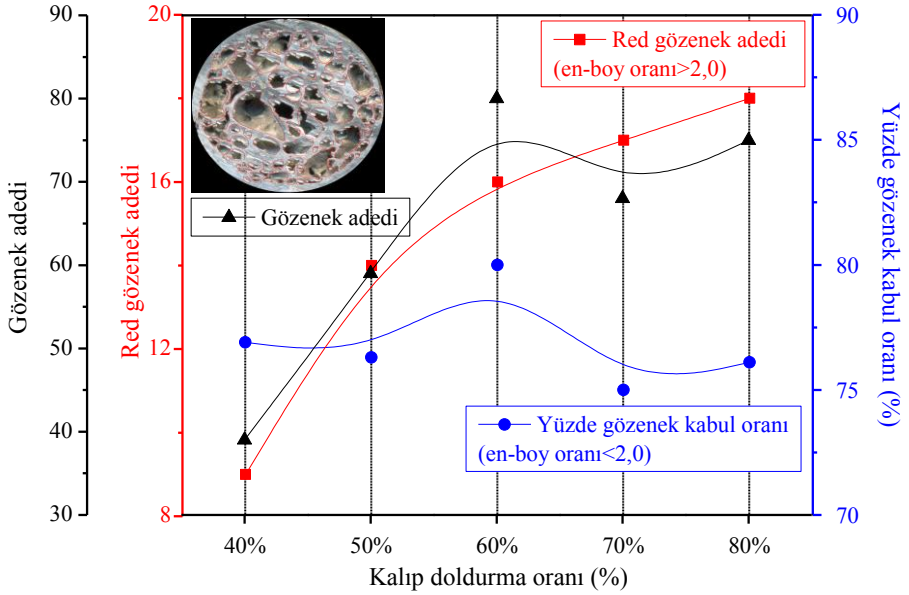


Şekil 3.31. İndüksiyon sıcaklığı, presleme yükünün ve zamana göre değişim grafiği



Şekil 3.32. Presleme altında indüksiyon uygulaması sonrası SEM görüntüleri

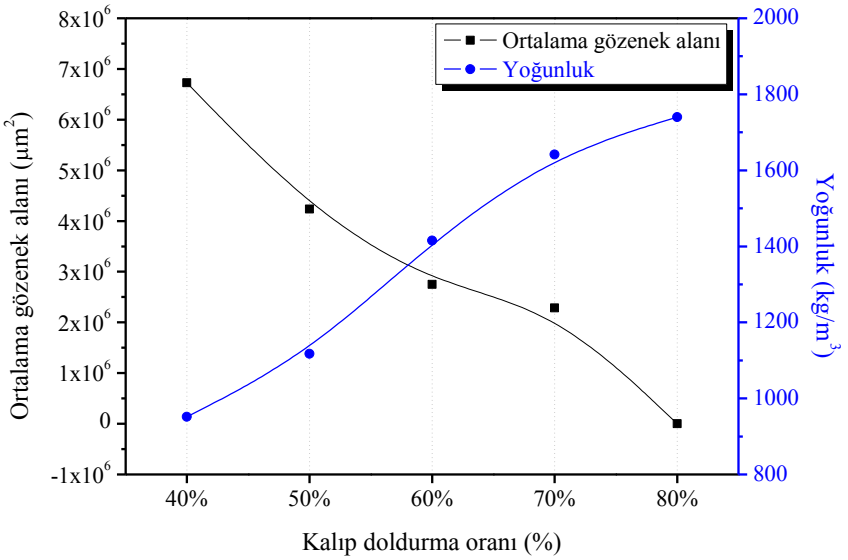
Şekil 3.32'de öncü numuneler üzerinden 100 ve 500 büyütmelerde alınan SEM görüntüleri TiH_2 parçacıklarının alüminyum matris içerisine tam ve düzenli şekilde hapsolduklarını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla presleme analizleri neticesinde 300 MPa değerinin altında bir presleme uygulamasının yetersiz kalacağı, 350 MPa değerinin ise oksit tabakasının deformasyonu ve öncü numune üretimi için en uygun değer olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.33. Toplam gözenek adedi, red gözenek adedi ve yüzde gözenek kabul oranının yüzde kalıp doldurma oranlarına göre grafiği

Alüminyum köpük üretiminde etkin parametrelere ait uygun değerlerin tespit edilmesinden sonra farklı kalıp doldurma oranında hazırlanan öncülerden üretilmiş metalik köpüklerin gözenek, en boy oranı, alansal analizleri ve basma testleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen analizlerde elde edilen verilere ait görüntü ve grafikler

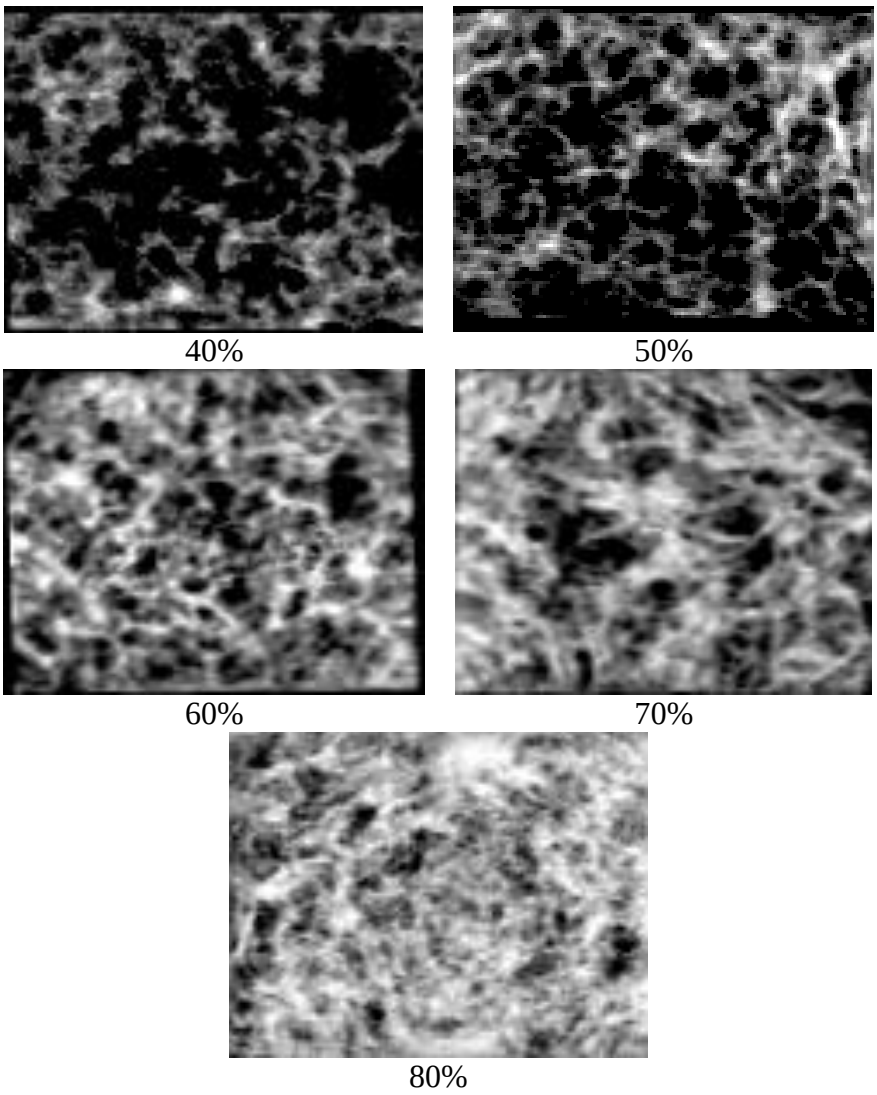
Ek C'de görülmektedir. Şekil 3.33'de üretilmiş olan metalik köpüklerin toplam gözenek adedi, red gözenek adedi ve yüzde gözenek kabul oranının yüzde kalıp doldurma oranlarına göre grafiği görülmektedir. Bilindiği üzere en boy oranı değerinin 1,0 olması durumu mükemmel gözenek yapısına karşılık gelmektedir. Bu değere mümkün olduğunca yakın gözenekler kabul edilebilir olarak değerlendirilmiş yapılan gözenek analizlerinde 2,0 değerinden küçük en boy oranları kabul edilmiş bu değerden büyük gözekler red edilmiştir. Bu grafiğe göre kalıp doldurma oranı yüzde 40'dan 80'e kadar toplam gözenek ve red edilen gözenek adetlerinin artış eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır. Yanı sıra kalıp doldurma oranının yüzde 60 olması durumunda kabul edilen gözenek sayısının en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Şekil 3.34'de kalıp doldurma oranlarına bağlı olarak ortalama gözenek alanı ve yoğunluk değerlerinin grafiksel ifadesi görülmektedir. Kalıp doldurma oranı yüzde 40'dan 80'e doğru arttırıldıkça ortalama gözenek alnının azalmakta olduğu, bunun tersine bir şekilde yoğunluk değerlerinde ise artış eğilimi olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.34. Ortalama gözenek alanının ve yoğunluğun yüzde kalıp doldurma oranlarına göre grafiği

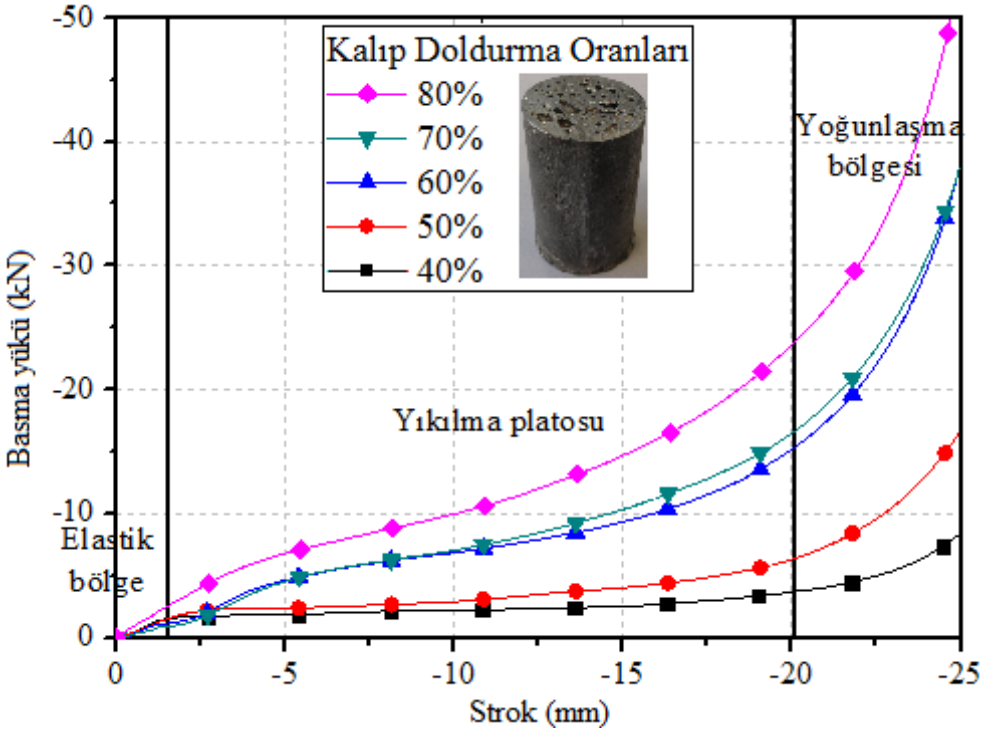
Şekil 3.35'de farklı kalıp doldurma oranlarına göre üretilmiş numunelerin röntgen analizleri görülmektedir. Röntgen analizleri Siemens marka Tridoros 5S model cihaz kullanılarak 150kV jeneratör gücü, 8mAs tüp akım değeri ve 0,25 saniye ışınlama süresi ile gerçekleştirilmiştir. Bu görüntülerden yüzde 40 ve 50 doldurma oranlarında gözeneklerin bütünlüğünde bozulmaların olduğu köpük yapı içerisinde gözenek

birleşmelerinin bulunduğu, yüzde 80 oranında ise gözenek yapısının aşırı kısıtlanmış olduğu tespit edilmektedir.



Şekil 3.35. Farklı kalıp doldurma oranlarına göre üretilmiş numunelerin X-ray görüntüleri

Farklı kalıp doldurma oranlarına göre üretilmiş olan metalik köpüklerin basma gerilmesi altında gösterdikleri ezilme davranışları Şekil 3.36'da kıyaslanmıştır. Metalik köpüklerin basma kuvveti altında karakteristik olarak gösterdikleri elastik, yıkılma platosu ve yoğunlaşma bölgeleri söz konusu şekil üzerinde belirtilmiştir. Elde edilen eğrilerden köpük malzemelerin basma kuvveti altındaki dayanımının kalıp doldurma oranı yüzde 40 dan 80'e kadar olan beş farklı değer için sıralı bir artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.36. Farklı kalıp doldurma oranlarında üretilen köpük yapıların basma gerilmesi ile ezilme davranışlarının kıyaslanması

En uygun kalıp doldurma oranının belirlenmesi için yürütülen çalışmalar neticesinde varılan sonuca göre en uygun kalıp doldurma oranının yüzde 60 olması gerektiği kanaatine varılmıştır.

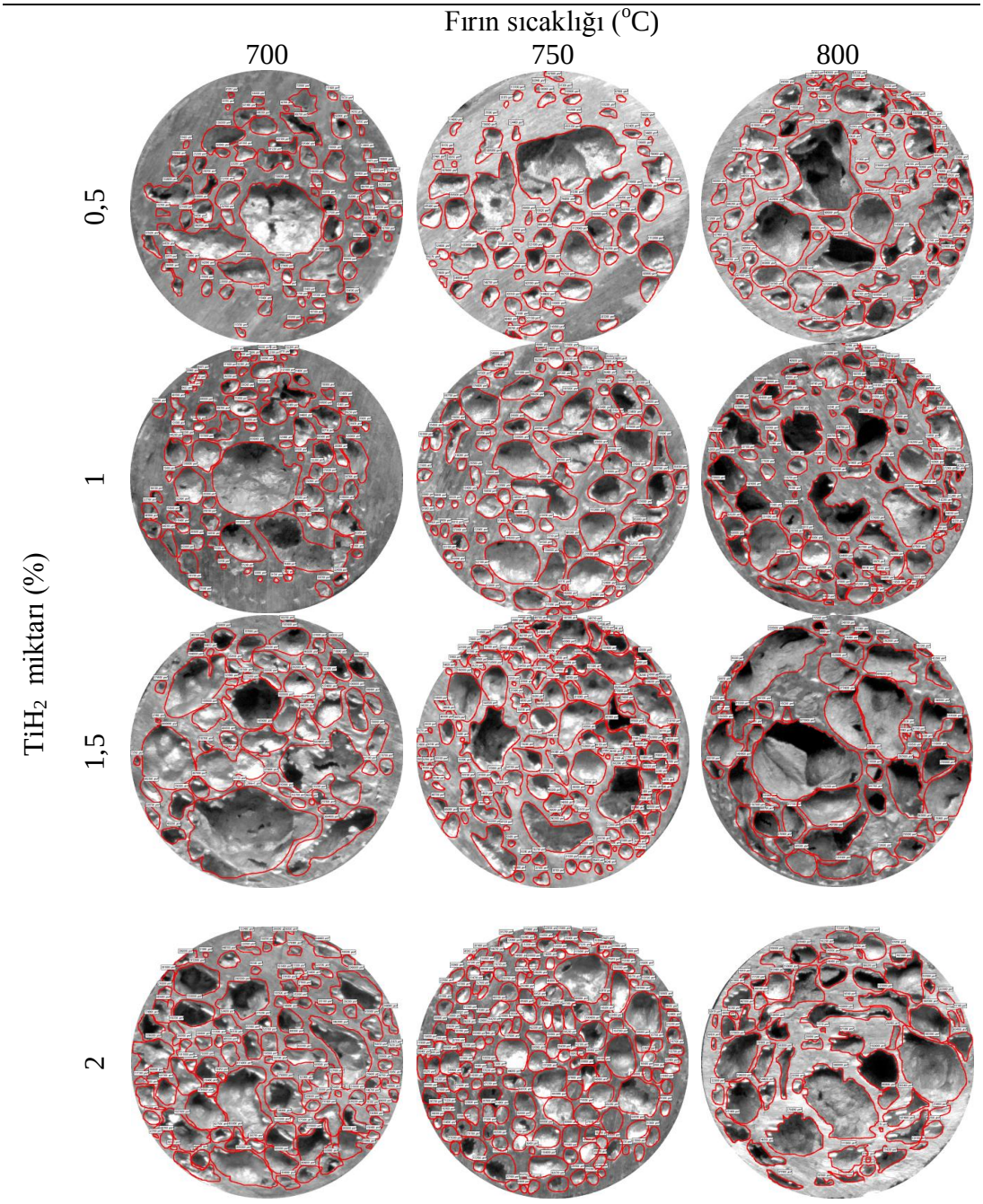
Ayrıca ağırlıkça farklı TiH_2 içeren öncü numunelerin 3 farklı (700, 750, 800 ^oC) fırın sıcaklığında metal köpüğün üretimi ve üretimlerin yüzde gözenek dağılımının milimetre cinsinden gözenek boyutuna göre grafikleştirilmesi ile küresellik değerlerinin grafikleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Köpürtücü ajan miktarı ve fırın sıcaklığı göz önünde bulundurularak yapılan analizlerde elde edilen verilere ait görüntü ve grafikler Ek D'de görülmektedir.

Tablo 3.4'de değişen TiH_2 ve fırın sıcaklıklarında üretilen metal köpüklerin kesit görüntüleri verilmiştir. Tabloda yukarıdan aşağı yönlü ilerleme ile TiH_2 miktarı artarken, soldan sağa doğru ilerlemede fırın sıcaklık değerleri artmaktadır.

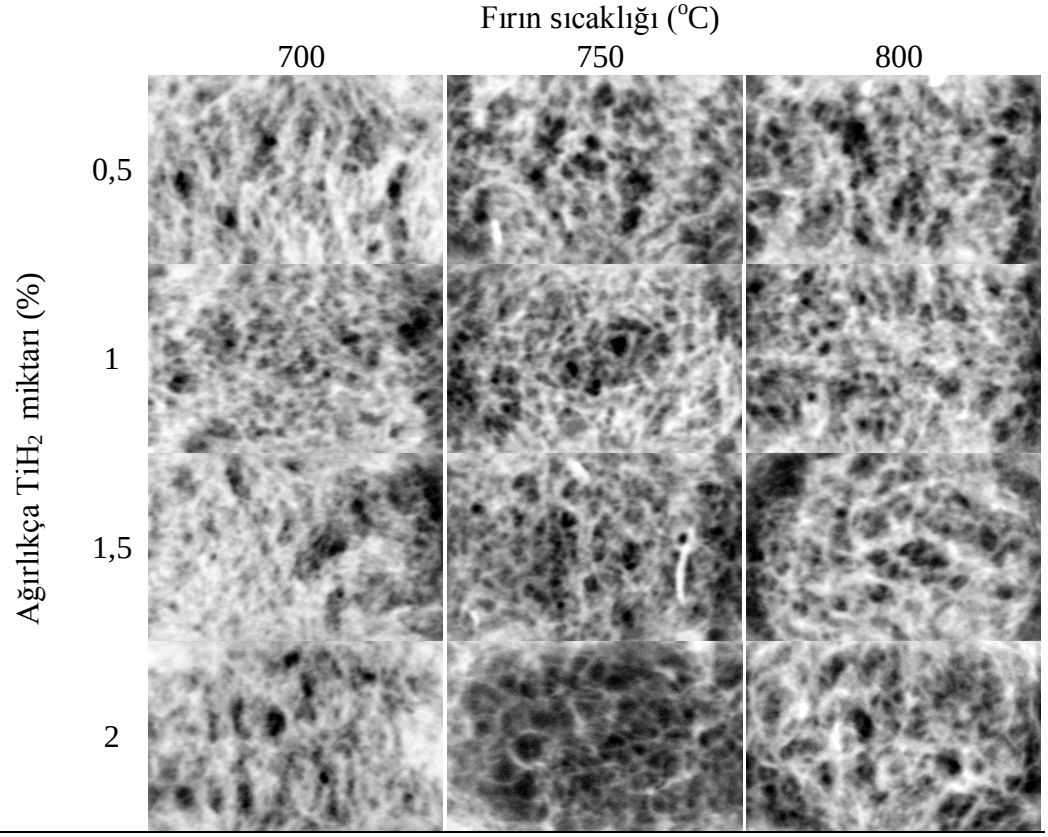
Söz konusu tablo incelendiğinde TiH_2 miktarında yüzde 0,5 oranından 2 oranına kadar gözenek yapısı düzenli bir iyileşme eğilimindedir. 750 °C fırın sıcaklığında en kararlı gözenek yapısına ulaşıldığı, 800 °C değerine çıkıldığında gözeneklerin en boy

oranlarında bozulmaların olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 3.5'de değişen TiH_2 ve fırın sıcaklıklarında üretilen metal köpüklerin röntgen görüntüleri verilmiştir. Röntgen analizleri de kesit görüntüleri üzerinde yapılan analizlerin köpürtücü ajan miktarındaki artışın gözenek yapısı üzerindeki etkisi ve 750 °C fırın sıcaklığında görülen kararlı yapı durumunu teyit etmektedir.

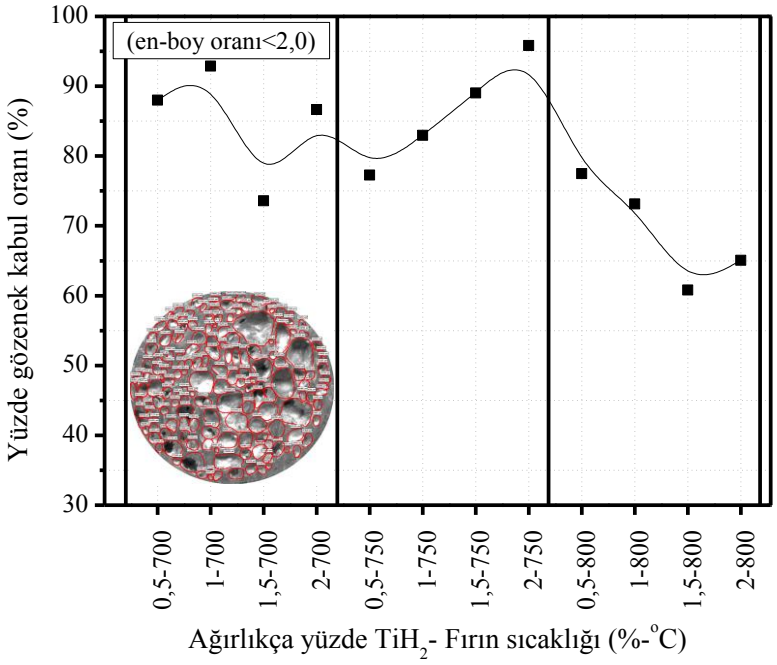
Tablo 3.4. TiH_2 miktarı ve fırın sıcaklığına bağlı metal köpük üretimleri



Tablo 3.5. TiH_2 miktarı ve fırın sıcaklığına bağlı metal köpük üretimlerinin röntgen görüntüleri



Ağırlıkça farklı TiH_2 içeren öncü numunelerin 3 farklı (700, 750, 800 °C) fırın sıcaklığında üretilen metal köpüklerin yüzde gözenek kabul oranı değerlerine ait grafik Şekil 3.37'de görülmektedir. En boy oranı 1 değeri için tam küresel durum söz konusudur. En boy oranları 2 değerinin altında olan gözenekler kabul edilebilir olarak değerlendirilmektedir. Söz konusu grafik incelendiğinde 700 ve 800 °C fırın sıcaklıklarında kararsız durum açıkça görülmektedir. Fırın sıcaklığı 750 °C seçildiğinde TiH_2 miktarına bağlı olarak yüzde gözenek kabul oranı değeri düzenli bir değişim göstermektedir. Gerçekleştirilen üretimler sonrası numuneler üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen kabul oranı grafiği ve röntgen analizlerine göre en uygun parametrenin yüzde 2 TiH_2 oranı ve 750 °C olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.37. Farklı oranlarda TiH_2 içeren öncülerin değişken fırın sıcaklığına bağlı üretimlerinde gözenek kabul oranı grafiği

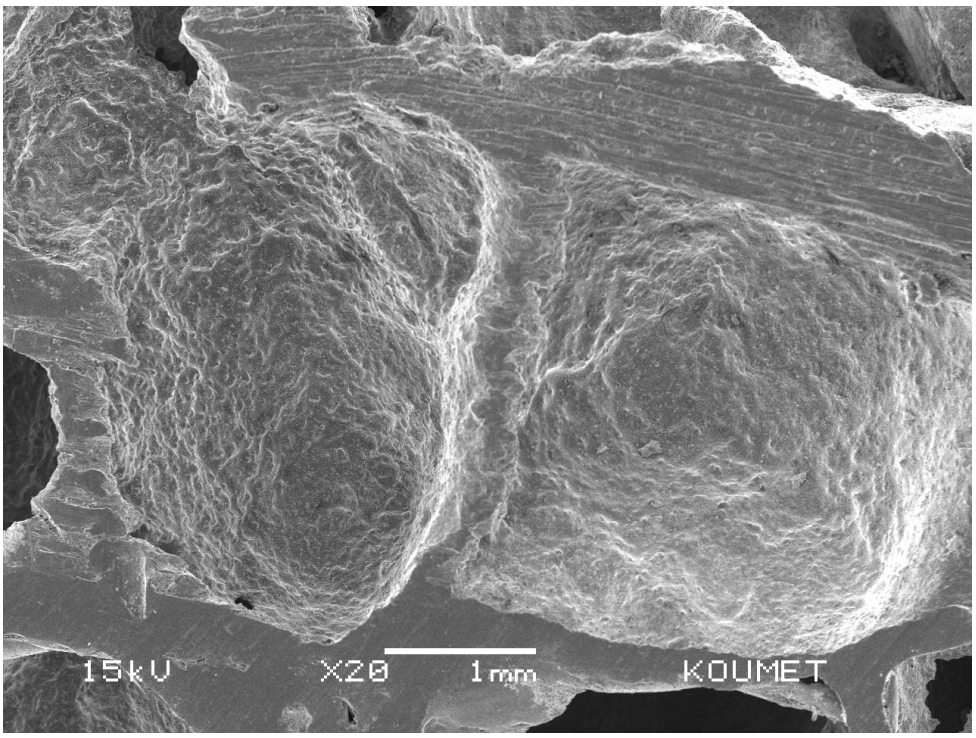
Toz haldeki alüminyumdan başlayan ve metal köpüğün elde edilmesi ile sonuçlanan üretim sürecinde yapı içerisindeki elementlerin yüzde içeriklerinin değişimleri üzerine yapılan analiz sonuçları Tablo 3.6'da verilmiştir. Buna göre Mg, Si, Cu, Mn ve Fe oranlarında belirgin bir değişime rastlanmazken Ti içeriğinin arttığı görülmektedir. Söz konusu bu durumun alüminyum tozuna ilave edilen TiH_2 köpürtücü ajandan kaynaklı olduğu son derece açıktır.

Tablo 3.6. Alüminyum tozu, öncü numune ve metalik köpüğün yüzde element içeriği analiz değerleri

	Ti	Mg	Si	Cu	Mn	Fe
Alüminyum tozu	0,172	0,042	0,362	0,842	0,200	0,811
Köpürme öncesi	0,196	0,044	0,361	0,843	0,201	0,812
Köpürme sonrası	0,199	0,043	0,367	0,838	0,207	0,810

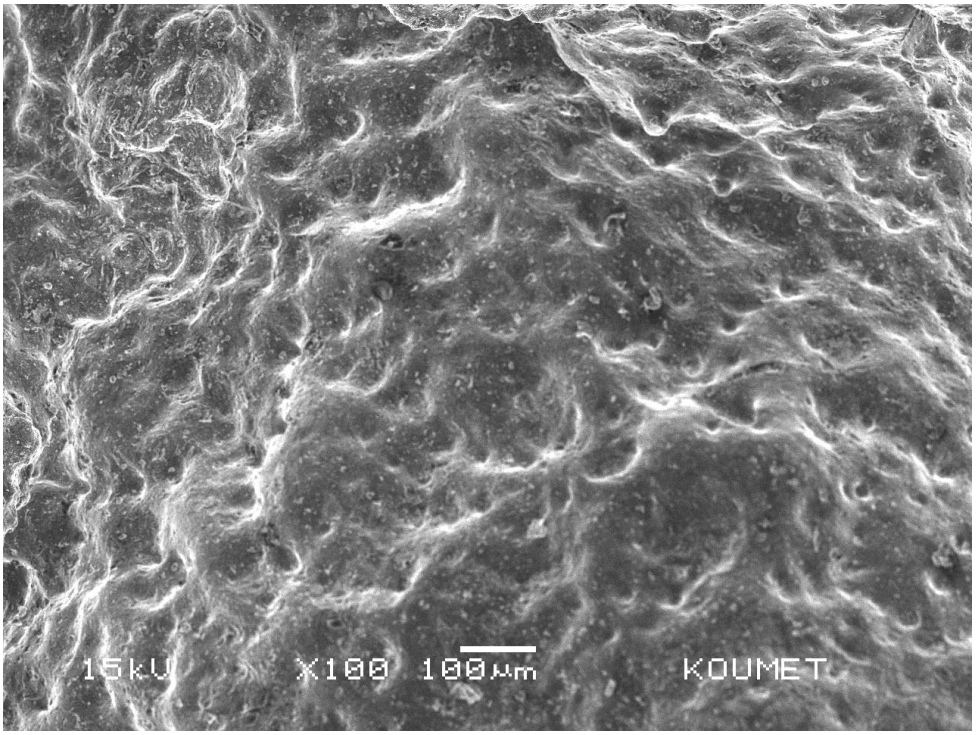
Metalik köpük hücre yapısı ve hücre duvarı taramalı elektron mikroskobu ile analiz edilmiştir. Şekil 3.38'de metal köpük hücre yapısının 20 kat büyütmede alınmış görüntüsü verilmiştir. Bu şekilde kapalı hücreli alüminyum köpük oluşum sürecinde meydana gelen gözenek yapı kesitleri görülmektedir. Gözeneklerin yarıçapları 35

mm aralığında dağılım göstermektedir. Elde edilen hücre yapıları genel itibariyle küresel olup çok yüzlü hücrelere de rastlanmaktadır.

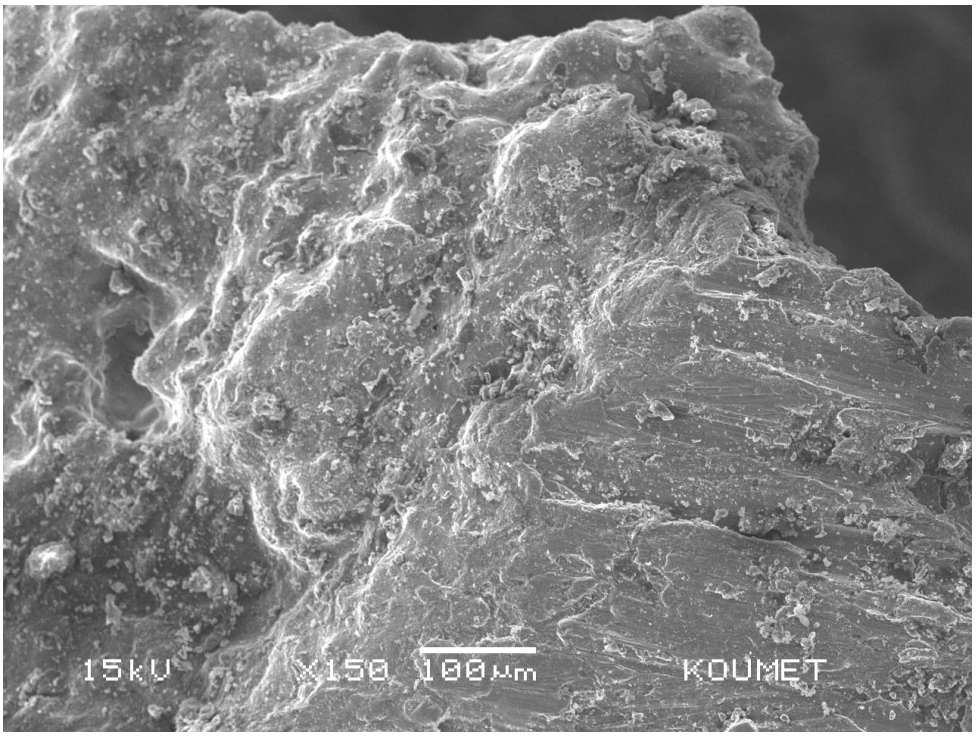


Şekil 3.38. Metal köpük hücre yapısının SEM analizi, X20

Yan yana iki hücre ortak bir duvara sahiptir ve bu duvar bir hücrenin üç kenarını prizmatik kavise sahip plato bölgesi olarak adlandırılan köpük yapısını ve duvarların çevrelerini meydana getiren bir çubukla birleştirmektedir. Şekil 3.39'da metal köpük hücre duvar yapısının 100 büyütmede alınmış görüntüsü verilmiştir. Söz konusu üretim sürecinde köpürtücü ajanın artan sıcaklık etkisi ile reaksiyon sonucu açığa çıkardığı hidrojen gazının gözenek iç duvarlarında meydana getirdiği şekillenmenin etkisi belirgin biçimde ortaya konmuştur. Şekil 3.40'da metalik köpüğün barındırdığı iki hücre arasında bulunan çubuk formlu birleşme hattı üzerinden alınmış görüntü verilmiştir. Buna göre köpük hücre duvarlarında herhangi bir çökme, çatlama ve tabaka ayrışması görülmemektedir.



Şekil 3.39. Metal köpük hücre duvar yapısının SEM analizi, X100



Şekil 3.40. Metal köpük hücre duvar yapısının SEM analizi, X150

Çalışma bütününde ulaşılan en uygun değişkenler kullanılarak üretilmiş metal köpüğün sönümleme karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla sönüm oranı parametresi tayin edilmiştir. Alüminyum köpüğün sönümleme davranışı ile

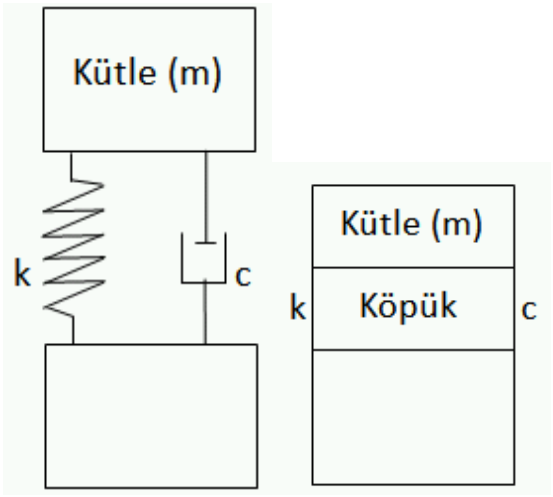
endüstriyel kullanımda olan bir sönümleme pedinin davranışı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla oluşturulan ölçüm düzeneği Şekil 3.41'de görülmektedir. Bu düzenekle beraber Brüel Kjær marka 2625 model titreşim ölçme cihazı ve ivme ölçer kullanılarak kullanılarak 8,18 gr ağırlıklı 4,5 kalibre hassas kurşun bilyenin 60 cm yükseklikten numune üzerine serbest düşmesi ile uyarılan bir tarafı sabit mesnete bağlı rijit metal köpük numunenin eşdeğer, doğal analiz frekans cevapları alınmıştır. Ek-E' de yapılan analizlere ait grafikler verilmiştir.



Şekil 3.41. Sönüm oranı parametresi analiz düzeneği

Bir damper veya izolatörün ne zaman kullanılacağını anlamak, çoğu zaman kafa karıştırıcı bir konudur. Köpükler endüstride farklı kullanım alanları bakımından çeşitli şekillerde tarif edilmektedir. Bunlar şok emici, yüksek esneklik, yavaş toparlanma, izolatör yastıkları, gerilme oranı bağımlı, yastıklama ve darbe koruyucu köpüklerdir. İhtiyaca yönelik olan metalik köpüğün belirlenmesi söz konusu olduğunda göz önünde bulundurulması gereken konu sönümlemeye mi yoksa izolasyona mı ihtiyaç duyulduğudur. Titreşim ve izolasyon konusunda temel tanımlamaları ele alacak olursak. Bir nesnenin titreşim sıklığı yada titreşim hızı

frekanstır. Rezonans frekansı olarakta bilinen doğal frekans bir sistem yada nesnenin harekete geçişi sonrasındaki salınım frekansıdır. Sönümleme sistemden kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşümüdür. Sönümleme sistemi doğal frekans halinde en enkin durumdadır. İzolasyon sisteme girmesi engellenen yüzde olarak yada desibel cinsinden temsil edilen titreşim enerjisi miktarıdır.



Şekil 3.42. Titreşim modelleri: (a) tekerlek yol (b) kütle köpük modeli

Şekil 3.42 (a)'da görülen model genellikle bir otomobil tekerleğinin yol ile olan etkileşimini tanımlamak için kullanılır. Otomobillerde tekerleğin zemin ile olan ilişkisini ele alan söz konusu sistemde bir yay (k), bir sönüm elemanı (c), ve kütle (m) temsil edilmektedir. Otomobiller için hem düz yolda ilerlemesi esnasında titreşim durumu, hem de çukurlar gibi değişik tepki kuvveti kaynakları karşısındaki durumu ele almak gerekir. Mühendislik yönüyle mevcut tepki kuvvetlerini pasifize etmek için yayın sönümleme etkisi ve amortisörün sönümleme düzeyini ayarlayabilirsiniz.

Şekil 3.42 (b)'de gösterildiği gibi köpük malzemelerin kullanımında sönümleme biraz daha güçleşmektedir. Çünkü köpük yapı hem bir yay hemde darbe emici gibi hareket etmek zorundadır. Doğal olarak bir malzeme bu görevlerden sadece birini yerine getirebilir. Bu nedenle araçlarda halen yay ve darbe emici sistem bir arada kullanılmaktadır. Bu durumun analizi ne kadarlık titreşim enerjisinin sistem tarafından iletildiğinin yani sönüm oranının tespit edilmesine dayanmaktadır. Gereksinimler göz önünde bulundurularak sisteme dahil edilecek malzemenin sönüm

oranına göre kullanılması gereken kütle miktarı bulunabilir veya farklı sönüm oranı değerine sahip başka bir malzeme kullanılabilir. Bir sistem ani darbe, şok türü bir kuvvet etkisine maruz kaldığında bu etkinin elimine edilmesi amacıyla metal köpüğün sönüm elemanı olarak kullanılması mümkündür. Ancak şok etkisinin tekrarlı olmaması esastır. Çünkü metal köpüklerin sönümlemede esneme toparlanma karakteristiği yani denge durumuna dönüş hızı tekrarlı darbeler altında yavaştır ve gecikme gösterir. İstenilen durum sistemin kendi denge durumuna en hızlı şekilde dönmesidir. Sönüm malzemeleri sistemi denge durumuna dönmeye zorlarlar bu işlevi yerine getirirken titreşim ve gürültüyü kendi bünyelerinde yayarlar. Sönümleme amacıyla kullanılan köpük tiplerinin yaygın tanımlamaları şok emici, yavaş toparlama, yastıklama, darbe koruyucudur.

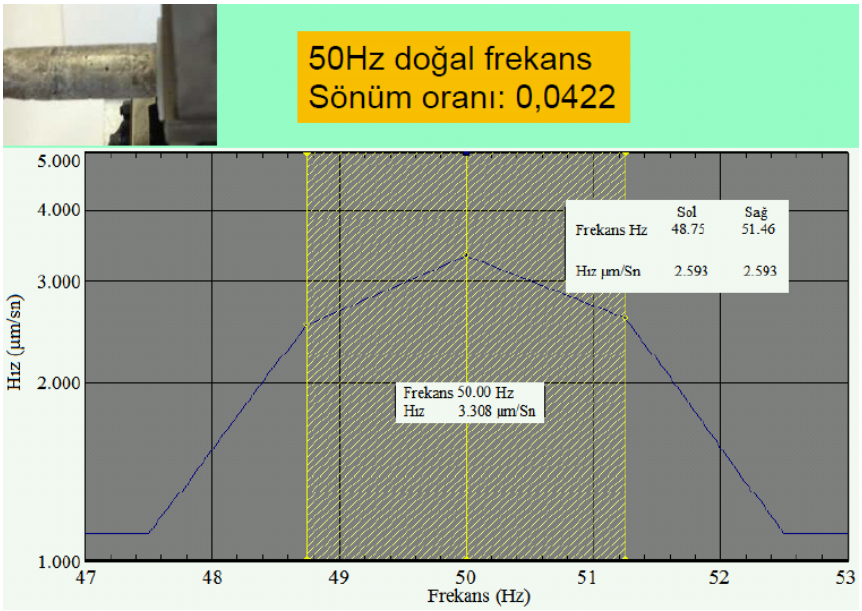
Tablo 3.7. Metal köpük numunelerin sönüm oranı ölçümleri

	F1	F2	F0	δ =F2-F1/2*F0	δ Ortalama
Numune 1	48,69	51,59	50	0,029	0,03666
	47,99	51,25	50	0,0326	
	48,41	51,59	50	0,0318	
	47,86	51,59	50	0,0373	
Numune 2	47,58	52,84	50	0,0526	0,04306
	48,96	54,08	50	0,0512	
	48,96	52,7	50	0,0374	
	47,58	52,84	50	0,0526	
	48,96	51,25	50	0,0229	
Numune 3	47,72	52,84	50	0,0512	0,04702
	47,44	52,97	50	0,0553	
	47,16	52,28	50	0,0512	
	48,55	52,7	50	0,0415	
	47,99	51,45	50	0,0346	
	46,89	52,14	50	0,0525	

Damping faktörü olarak tanımlanan boyutsuz büyüklük değeri üretilen alüminyum köpük numuneler üzerinden gerçekleştirilen ve Tablo 3.7'de verilen 15 ölçüm ortalamasından 50 Hz doğal frekansta 0,0422 olarak belirlenmiştir.

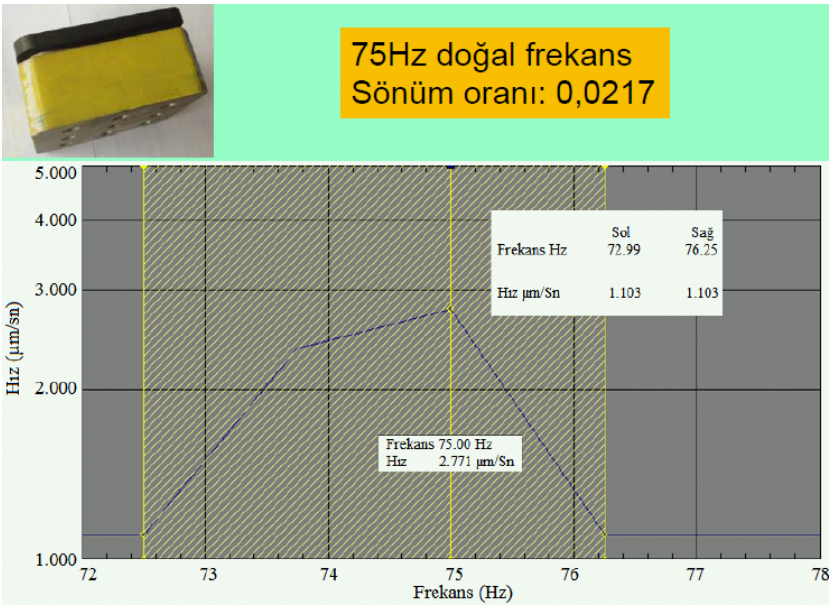
Tekrarlı titreşime maruz sistemlerde, titreşim genliğinin yüksek olması durumunda ve titreşim hali ile sistemin doğal frekansının aynı olması durumlarında metalik köpüklerin sönüm ve izolasyon elemanı olarak kullanılmaları söz konusudur. Bir sistemin iyileştirilmesinde veya titreşim düzeyinin azaltılmasında tasarım yöntemi malzemenin performansının tespiti ile aynıdır. Öncelikle başlangıç koşullarını

belirlemek gerekir. Malzemenin titreşim performansı tasarım sürecinde önemlidir. Ancak mevcut malzeme listesinde elemeler yapmak için ilk kriter bu değildir. Çalışma ortamı malzeme seçimini kısıtlayan başlıca faktördür. Örneğin toplu taşıma araçlarında gerçekleştirilen uygulamalarda yanma karşısında alev geçirmezlik, duman ve toksit salınım sınırları mevcuttur. Altyapı ve genel endüstriyel uygulamalar dayanım ve uzun ömür odaklıdır. Çalışma sıcaklığı, nem, aşınma, UV direnci ve beklenen ömür ilk ürün seçimini daraltmak için kullanılan ek filtrelerdir. Doğal frekanslarının kıyaslanması sönüm karakteristiği bakımından önemlidir.



Şekil 3.43. Alüminyum köpüğün sönüm oranı analiz sonucu

Şekil 3.43 ve Şekil 3.44'de sırasıyla alüminyum köpüğün ve endüstriyel titreşim pedinin analiz sonuçları görülmektedir. Bu analizlere göre endüstriyel titreşim pedi 75Hz doğal frekansta 0,0217 sönüm oranı, alüminyum köpük ise 50Hz doğal frekansta 0,0422 sönüm oranı değeri ile görev yapmaktadır. Bir sistem ani darbe, şok türü bir kuvvet etkisine maruz kalarak 50Hz ve üzeri titreşim etkisi altında ise bu etkinin elimine edilmesi amacıyla metal köpüğün sönüm elemanı olarak kullanılması mümkündür. Ancak şok etkisinin tekrarlı olmaması esastır.



Şekil 3.44. Endüstriyel titreşim pedinin sönüm oranı analiz sonucu

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Titanyum hidritin etkisi üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde kararlı bir köpük yapısına ulaşmada 450500 °C aralığında ısıl işlem uygulanmasının gerektiği sonucuna varılmıştır. Karıştırmanın analizinin etkisi üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde partikül dağılımlarının daha düzenli bulunduğu 90 d/dk karıştırma hızında 90 veya 120 dakika sürelerde karıştırma işleminin gerçekleştirilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır. Presleme parametlerinin etkisi üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde 350 MPa değerinin oksit tabakasının deformasyonu ve öncü numune üretimi için en uygun değer olduğu sonucuna varılmıştır. Farklı kalıp doldurma oranlarının etkisi üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde hazırlanan öncülerin gözenek analizleri ve basma testleri neticesinde toplam gözenek adedi, red gözenek adedi ve yüzde gözenek kabul oranının yüzde kalıp doldurma oranlarına göre incelenmesi, x-ray analizleri ve basma testlerine göre en uygun oranın %60 olduğu sonucuna varılmıştır. Kabul ve red gözenek oranı kriteri metal köpükler için ilk defa bu çalışmada ortaya konulmuş özgün bir kıyaslamadır. Çalışmanın içerdiği diğer bir özgünlük alüminyum köpüğün toz metalürjik metodla üretiminde proses parametrelerinin uygun değerlerinin bulunmasına yönelik çalışmalardır. Bu prosesin fırında tutma adımında kullanılan cam kalıplama uygulaması da tamamen özgün ilk defa denenmiş ve başarıyla üretimin gerçekleştirildiği bir kazanımdır.

Ağırlıkça farklı TiH_2 içeren öncü numunelerin 3 farklı (700, 750, 800 °C) fırın sıcaklığında metal köpüğün üretimi: gözenek analizlerine göre elde edilen kabul oranı grafiği ve x-ray analizlerine göre en uygun parametrenin %2 TiH_2 – 750 °C olduğu sonucuna varılmıştır.

SEM analizine göre köpük hücre duvarlarında herhangi bir çökme, çatlama ve delaminasyon görünmemektedir. Alüminyum tozu, öncü numune ve metalik köpüğün elementsel analiz değerlerine göre titanyum oranında az miktarda artışa rastlanmaktadır.

Metalik köpüğün uygulamaya yönelik sönümleme karakteristiklerinin belirlenmesi çalışmalarına göre 50 Hz ve üzeri titreşim etkisi altında ise bu etkinin elimine edilmesi amacıyla metal köpüğün sönüm elemanı olarak kullanılması mümkündür. Sönüm oranı 0,0422 dir.

Bu çalışma sonrasında alüminyum köpüklerin karakteristik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla uygun takviye edici kullanımları üzerinde çalışmalar yürütülmesini önerilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Sosnick B., Process for making foamlike mass of metal, US Patent Office, 2,434,775, 1948.

[2] Elliott J. C., Metal foam and method for making, US Patent Office, 2,983,597, 1961.

[3] Degisher H. P., Kriszt B., *Handbook of cellular metals*, Wiley-vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2002.

[4] Davies G. J., Zhen S., Metallic foams: their production, properties and applications, *J. Mater. Sci.*, 1983, **18**, 1899-1911.

[5] Wegner L. D., Gibson L. J., Microstructural design of cellular materials—II: Microsandwich foams, *Acta Metallurgica et Materialia*, 1995, **43**, 1651-1667.

[6] Banhart J., Baumeister J., Weber M., Damping properties of aluminium foams, *Materials Science and Engineering: A*, 1996, **205**, 221-228.

[7] Simone A. E., Gibson L. J., Efficient structural components using porous metals, *Materials Science and Engineering: A*, 1997, **229**, 55-62.

[8] Ashby M. F., Evans A. G., Fleck N. A. Gibson L. J., Hutchinson J. W., Wadley H. N. G., *Metal foams: a design guide*, Butterworth Heinemann, Woburn, 2000.

[9] Bram M., Stiller C., Buchkremer H. P., Stöver D., Baur D., High-porosity titanium, stainless steel, and superalloy parts, *Advanced Engineering Materials*, 2000, **2**, 196-199.

[10] Banhart J., Foam metal: the recipe, *Europhysics News*, 1999, **30**, 17-20.

[11] Banhart J., Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*, 2001, **46**, 559-632.

[12] Körner C, Singer R. F., Processing of metal foams challenges and opportunities, *Advanced Engineering Materials*, 2000, **2**, 159-165.

[13] Ashby M. F., *Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications*, Wiley-vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005.

[14] Markaki A. E., Clyne T. W., Characterisation of impact response of metallic foam/ceramic laminate, *Mater. Sci. Tech.*, 2000, **16**, 785-791.

[15] Banhart J., Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*, 2001, **46**, 559-632.

[16] Gibson L. J., Ashby M. F., *Cellular Solids*, 2nd Ed., Cambridge Solid State Science Series, Cambridge, 1997.

[17] Haydn N., Wadley G., Cellular metals manufacturing, *Adv. Eng. Mater.*, 2002, **10**, 726-733.

[18] Çinici H., Toz metalürjisi yöntemiyle alüminyum esaslı metalik köpük üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2004, 155685.

[19] Miyoshi T., Itoh M., Akiyama S., Kitahara A., Alporas aluminum foams: production process, properties, and applications, *Advanced Engineering Materials*, 2000, **2**, 179-183.

[20] Yu C. J., Eifert H., Banhart J., Baumeister J., Metal foams, *Advanced Materials and Processes*, 1998, **5**, 45-47.

[21] Yamada Y., Shimojima K., Sakaguchi Y., Mabuchi M., Nakamura M., Asahina T., Mukai T., Kanahashi H., Higashi K., Processing of cellular magnesium materials, *Advanced Engineering Materials*, 2000, **2**, 184-187.

[22] Baumgärtner F., Duarte I., Banhart J., Industrialization of powder compact foaming process, *Advanced Engineering Materials*, 2000, **2**, 168-174.

[23] Edwin R. R., Daniel B. S. S., Customization of closed-cell aluminum foam properties using design of experiments, *Materials Science and Engineering A* 2011, **528**, 2067-2075.

[24] Mukherjee M., Garcia-Moreno F., Banhart J., Defect generation during solidification of aluminium foams, *Scripta Materialia*, 2010, **63**, 235-238.

[25] Shiomi M., Imagama S., Osakada K., Matsumoto R., Fabrication of aluminium foams from powder by hot extrusion and foaming, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**, 1203-1208.

[26] Crupi V., Epasto G., Guglielmino E., Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: honeycomb vs. foam, *Marine Structures*, 2013, **30**, 74-96.

[27] Guoyin Z., Binna S., Zhaoyang Z., Xiaobing L., Yongliang M., Guangchun Y., Static three-point bending behavior of aluminum foam sandwich, *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, **540**, 275-278.

[28] Racka A., Helwig H. M., Bütowc A., Rueda A., Matijasevic B., Helfen L., Goebbels J., Banhart J., Early pore formation in aluminium foams studied by synchrotron-based microtomography and 3-D image analysis, *Acta Materialia* 2009, **57**, 4809-4821.

[29] Wichianrat E., Boonyongmaneerat Y., Asavavisithchai S., Microstructural examination and mechanical properties of replicated aluminium composite foams, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2012, **22**, 1674-1679.

[30] Smitha M., Guana Z., Cantwell W. J., Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, **67**, 28-41.

[31] Zou L. C., Zhang Q., Pang B. J., Wu G. H., Jiang L. T., Su H., Dynamic compressive behavior of aluminum matrix syntactic foam and its multilayer structure, *Materials and Design*, 2013, **45**, 555-560.

[32] Hassani A., Habibolahzadeh A., Bafti H., Production of graded aluminum foams via powder space holder technique, *Materials and Design*, 2012, **40**, 510-515.

[33] Parvanian A. M., Panjepour M., Mechanical behavior improvement of open-pore copper foams synthesized through space holder technique, *Materials and Design*, 2013, **49**, 834-841.

[34] Jha N., Mondal D. P., Dutta J., Badkul A., Jha A. K., Khare A. K., Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route, *Materials and Design*, 2013, **47**, 810-819.

[35] Shimizu T., Matsuzaki K., Nagai H., Kanetake N., Production of high porosity metal foams using EPS beads as space holders, *Materials Science and Engineering: A*, 2012, **558**, 343-348.

[36] Mansourighasri A., Muhamad N., Sulong A. B., Processing titanium foams using tapioca starch as a space holder, *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, **212**, 83-89.

[37] Manonukul A., Muenya N., Léaux F., Amaranan S., Effects of replacing metal powder with powder space holder on metal foam produced by metal injection moulding, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**, 529-535.

[38] Taşdemirci A., Ergönenç Ç., Güden M., Split Hopkinson pressure bar multiple reloading and modeling of a 316 L stainless steel metallic hollow sphere structure, *International Journal of Impact Engineering*, 2010, **37**, 250-259.

[39] Sanders W. S., Gibson L. J., Mechanics of BCC and FCC hollow-sphere foams, *Materials Science and Engineering: A*, 2003, **352**, 150-161.

[40] Fan J., Zhang J., Wang Z., Li Z., Zhao L., Dynamic crushing behavior of random and functionally graded metal hollow sphere foams, *Materials Science and Engineering: A*, 2013, **561**, 352-361.

[41] Pang Q., Wu G. H., Xiu Z. Y., Jiang L. T., Sun D. L., Microstructure, oxidation resistance and high-temperature strength of a new class of 3D open cell nickel-based foams, *Materials Characterization*, 2012, **70**, 125-136.

[42] Wang W., Burgueño R., Hong J. W., Lee I., Nano-deposition on 3-D open-cell aluminum foam materials for improved energy absorption capacity, *Materials Science and Engineering: A*, 2013, **572**, 75-82.

[43] Pang Q., Xiu Z. Y., Wu G. H., Jiang L. T., Sun D. L., Hu Z. L., Synthesis and properties of open-cell Ni–Cr–Fe–Al alloy foams by pack co-deposition process, *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, **212**, 2219-2227.

[44] Olurin O. B., Wilkinson D. S., Weatherly G. C., Paserin V., Shu J., Strength and ductility of as-plated and sintered CVD nickel foams, *Composites Science and Technology*, 2003, **63**, 2317-2329.

[45] Yang D. H., Hur B. Y., Yang S. R., Study on fabrication and foaming mechanism of Mg foam using $CaCO_3$ as blowing agent, *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, **461**, 221-227.

[46] Banhart J., Properties and applications for cast aluminum sponges, *Adv. Eng. Mater.*, 2000, **2**, 168-170.

[47] Li D. W., Li J., Li T., Sun T., Zhang X. M., Yao G., Preparation and characterization of aluminum foams with ZrH_2 as foaming agent, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, **21**, 346-352.

[48] Baumeister J., Schrader H., Methods for foamable metal bodies, US Patent 5,151,246, 1992.

[49] Matijasevic B., Banhart J., Improvement of aluminum foam technology by tailoring of blowing agent, *Scripta Materialia*, 2005, **54**, 503-508.

[50] Von-Zeppelin F., Hirscher M., Stanzick H., Banhart J., Desorption of hydrogen from blowing agents used for foaming metals, *Comp. Sci. Tech.*, 2003, **63**, 2293-2300.

[51] Kennedy A. R., The effect of TiH_2 heat treatment on gas release and goaming in Al-TiH_2 preforms, *Scripta Materialia*, 2002, **47**, 763-767.

[52] Wood J. T., Production and application of continuously cast foamed aluminum, *Fraunhofer USA Metal Foam Symposium*, Stanton Delaware, United States, 7-8 October 1997.

[53] Avarisli O., Uğuz A., Metalik köpük malzemelerin otomotiv endüstrisinde kullanılması, *Mühendis ve Makine*, 2003, **525**, 24-32.

[54] Martin R. L., Integral porous-core metal bodies and in situ method of manufacture thereof, US Patent 5,564,064, 1996.

[55] Dunand D. C., Processing of titanium foams, *Adv. Eng. Mater.*, 2004, **6**, 369-376.

[56] Gergely V., Clyne B., The formgrip process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors, *Adv. Eng. Mater.*, 2000, **2,** 175-178.

[57] Lehmhus D., Busse M., Potential new matrix alloys for production of PM aluminium foams, *Adv. Eng. Mater.*, 2004, **6**, 391-396.

[58] Matijasevic-Lux B., Banhart J., Fiechter S., Görke O., Wanderka N., Modification of titanium hydride for improved aluminum foam manufacture, *Acta Materialia*, 2006, **54**, 1887-1900.

[59] Daxner T., Böhm H. J., Rammerstorfer H. G., Mesoscopic simulation of inhomogeneous metallic foams with respect to energy absorption, *Comput. Mater. Sci.*, 1999, **16**, 61-69.

[60] Kadar C. S., Kenesei P., Lendvai J., Rajkovits Z. S., Energy absorption properties of metal foams, *VI. évfolyam 1. szám***,** Budapest, Hungary, 1-6 January 2005.

[61] Yu C. J., Claar T. D., Eifert H., Use of metal foams in armor systems, US Patent 6,698,331, 2004.

[62] Gibson L. J., Properties and applications of metallic foams, Editors: Kelly A., Zweben C., *Comprehensive Composite Materials*, 2nd ed., Pergamon Press, Oxford, 821-842, 2000.

[63] Queheillalt D. T., Katsumura Y., Wadley H. N. G., Synthesis of stochastic open cell Ni-based foams, Synthesis of stochastic open cell Ni-based foams, *Scripta Materialia*, 2004, **50**, 313-317.

[64] Evans A. G., Hutchinson J. W., Ashby M. F., Cellular metals, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 1998, **3**, 288-302.

[65] Yan C., Hao L., Hussein A., Raymont D., Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, **62**, 32-38.

[66] Shen J., Xie Y. M., Huang X., Zhou S., Ruan D., Behaviour of luffa sponge material under dynamic loading, *International Journal of Impact Engineering*, 2013, **57**, 17-26.

[67] Shen C. J., Yu T. X., Lu G., Double shock mode in graded cellular rod under impact, *International Journal of Solids and Structures*, 2013, **50**, 217-233.

[68] Mancin S., Zilio C., Diani A., Rossetto L., Air forced convection through metal foams: Experimental results and modeling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **62**, 112-123.

[69] Teruel F. E., Díaz L., Calculation of the interfacial heat transfer coefficient in porous media employing numerical simulations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **60**, 406-412.

[70] Vigliotti A., Pasini D., Linear multiscale analysis and finite element validation of stretching and bending dominated lattice materials, *Mechanics of Materials*, 2012, **46**, 57-68.

[71] Queheillalt D. T., Wadley H. N. G., Cellular metal lattices with hollow trusses, *Acta Materialia*, 2005, **53**, 303-313.

[72] Kooistra G. W., Deshpande V. S., Wadley H. N. G., Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminium, *Acta Materialia*, 2004, **52**, 4229-4237.

[73] Alkhader M., Vural M., Mechanical response of cellular solids: Role of cellular topology and microstructural irregularity, *International Journal of Engineering Science*, 2008, **46**, 1035-1051.

[74] Khandelwal S., Siegmund T., Cipra R. J., Bolton J. S., Transverse loading of cellular topologically interlocked materials, *International Journal of Solids and Structures*, 2012, **49**, 2394-2403.

[75] Raj S. V., Microstructural characterization of metal foams: An examination of the applicability of the theoretical models for modeling foams, *Materials Science and Engineering: A*, 2011, **528**, 5289-5295.

[76] Ma X., Peyton A. J., Zhao Y. Y., Measurement of the electrical conductivity of open celled aluminium foam using non-contact eddy current techniques, *NDT & E International*, 2005, **38**, 359-367.

[77] Olurin O. B., Arnold M., Körner C., Singer R. F., The investigation of morphometric parameters of aluminium foams using micro-computed tomography, *Materials Science and Engineering: A*, 2002, **328**, 334-343.

[78] Kádár C. S., Maire E., Borbély A., Peix G., Lendvai J., Rajkovits Z. S., X-ray tomography and finite element simulation of the indentation behavior of metal foams, *Materials Science and Engineering: A*, 2004, **387**, 321-325.

[79] Koza E., Leonowicz M., Wojciechowski S., Simancik F., Compression strength of aluminium foams, *Materials Letters*, 2003, **58**, 132-135.

[80] Fusheng H., Jianning W., Hefa C., Junchang G., Effect of process parameters and alloy compositions on the pore structure of foamed aluminum, *J. Mater. Process Tech.*, 2003, **138**, 505-507.

[81] Papadopoulos D. P., Konstantinidis I. C. H., Papanastasiou N., Skolianos S., Lefakis H., Tsipas D. N., Mechanical properties of Al foams, *Materials Letters*, 2004, **58**, 2574-2578.

[82] Davis N. G., Enhancement of solid-state foaming of titanium by transformation superplasticity, PhD, Northwestern University, Illinois, USA, 2002.

[83] German R. M., *Powder Metallurgy Science*, 2nd Ed., The Pennsylvania State University press, Pennsylvania, 1984.

[84] Kuhn H. A., Medlin D., *ASM Handbook: Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation*, 10th ed., ASM International Publisher, Ohio, 143-147, 2000.

[85] ASTM E9 81, *Standard methods of compression testing of metallic materials at room temperature*, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, 1981.

[86] Yu J. L., Li J. R., Hu S. S., Strain-rate effect and micro-structural optimization of cellular metals, *Mechanics of Materials*, 2006, **38**, 160-170.

[87] Gopienko V. G., Chapter 12 production of aluminum and aluminum alloypowders, Editors: Neikov O. D., Naboychenco S. S., Mourachova I., Gopienco V., Frishberg I., Lotsko D., *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*, 1st ed., Elsevier Press, Oxford, 267-283, 2009.

[88] Neikov O. D., Chapter 10 powders for porous powder metallurgy technology, Editors: Neikov O. D., Naboychenco S. S., Mourachova I., Gopienco V., Frishberg I., Lotsko D., *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*, 1st ed., Elsevier Press, Oxford, 212-223, 2009.

[89] Eisen W. B., Ferguson B. L., German R. M., Iacocca R., Lee P. W., Madan D., Moyer K., Sanderow H. Trudel Y., Production of aluminum powder, *ASM Handbook volume 7*, 2nd ed., ASM International Press, 352-380, 1998.

[90] Herring D. H., Induction heating for the rest of us, *Industrial Heating*, 2004, **71**, 12-13.

[91] Cho K. H., Coupled electro-magneto-thermal model for induction heating process of a moving billet, *International Journal of Thermal Sciences*, 2012, **60**, 195-204.

[92] Jung H. K., Kang C. G., Induction heating process of an Al–Si aluminum alloy for semi-solid die casting and its resulting microstructure, *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **120**, 355-364.

[93] Lin H. L., Chen S. C., Jeng M. C., Minh P. S., Chang J. A., Hwang J. R., Induction heating with the ring effect for injection molding plates, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012, **39**, 514-522.

[94] Zinn S., Semiatin S. L., Coil design and fabrication: Basic design and modifications, *Heat Treating*, 1988, **3**, 32-36.

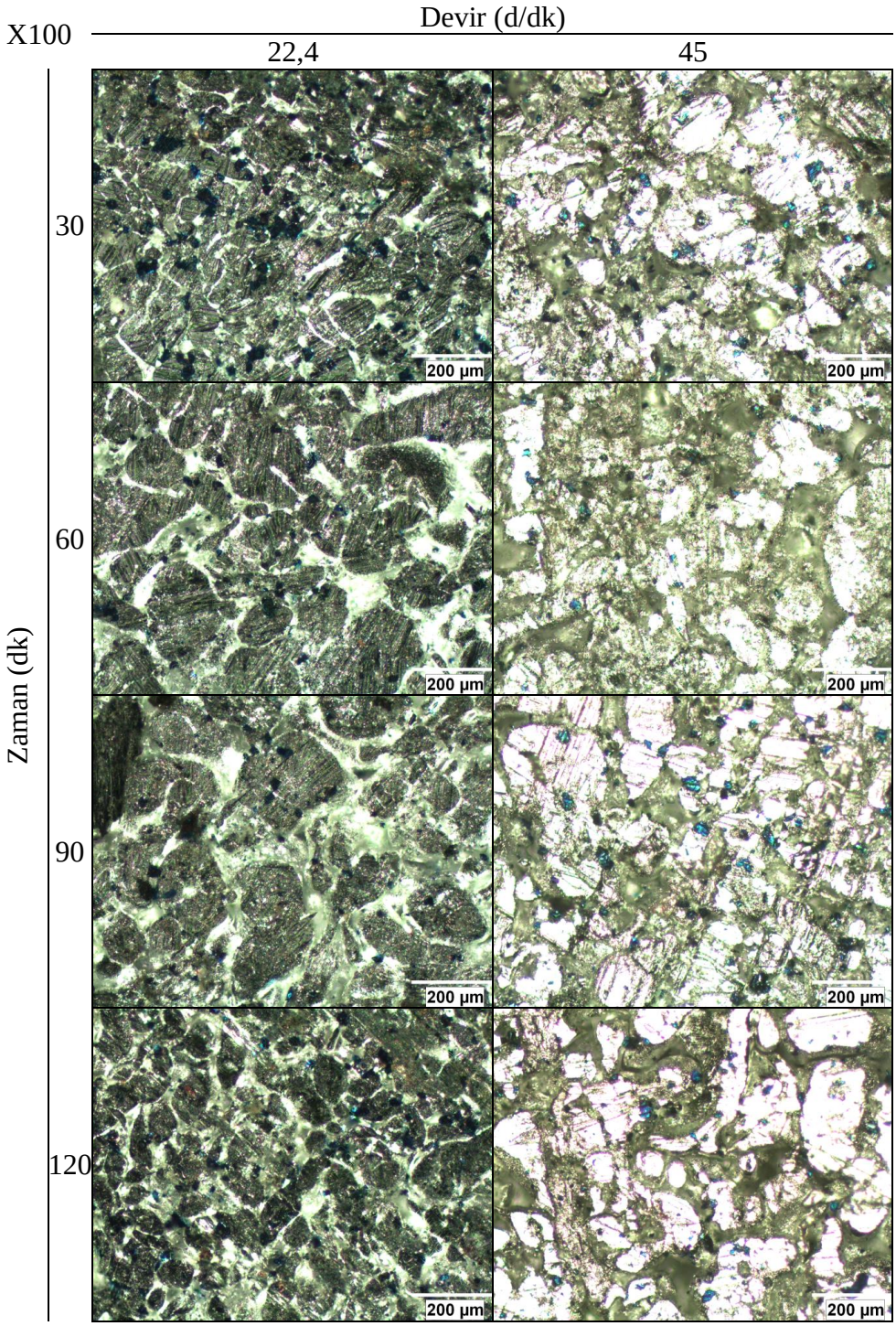
[95] Aguirre-Perales L. Y., Jung I. H., Drew R. A. L., *Acta Materialia*, 2012, **60**, 759-769.

[96] Mandrino D., Paulin I., Skapin S. D., *Materials Characterization*, 2012, **72**, 87-93.

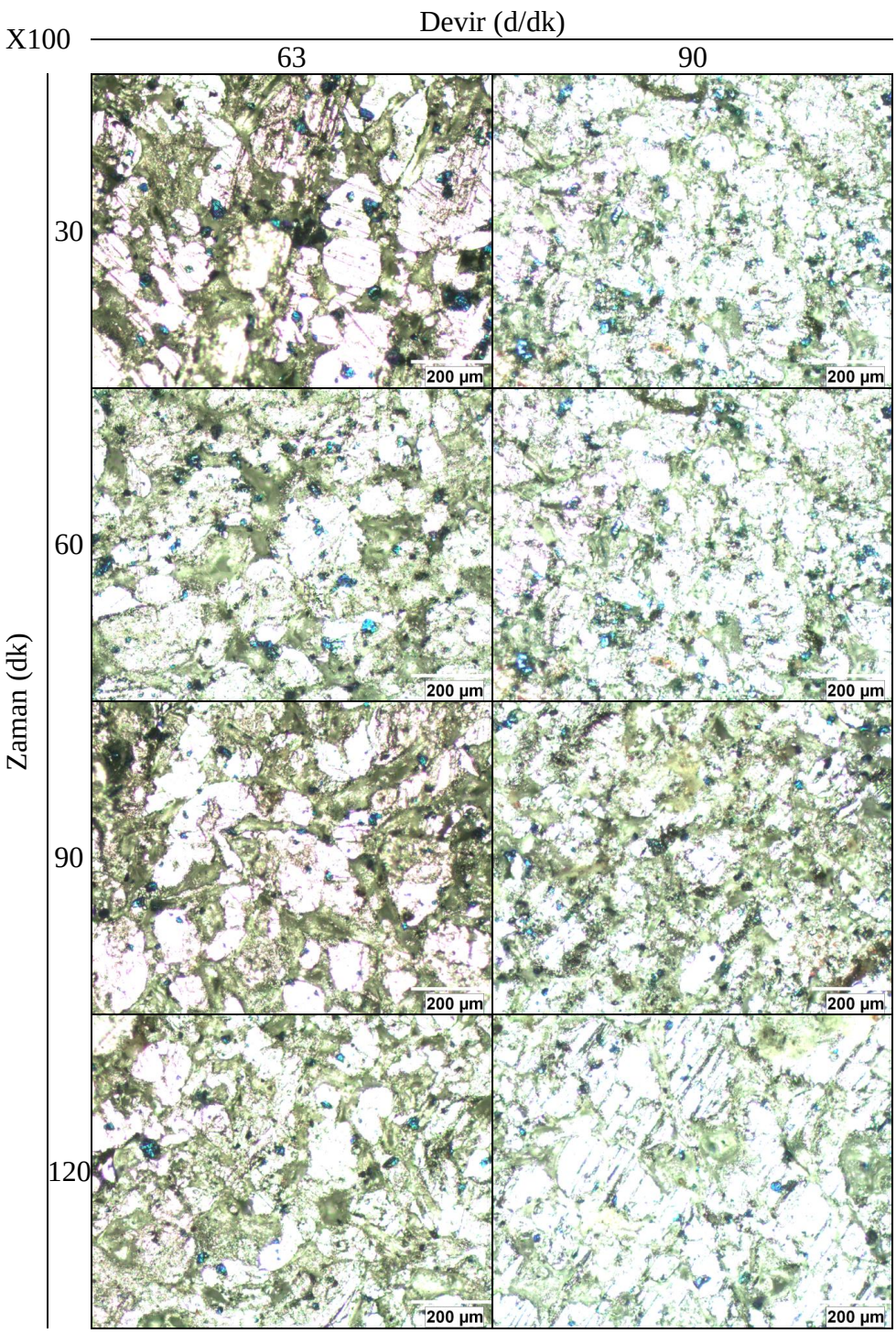
EKLER

Ek-A Karıştırma sonrası optik mikroskop görüntüleri

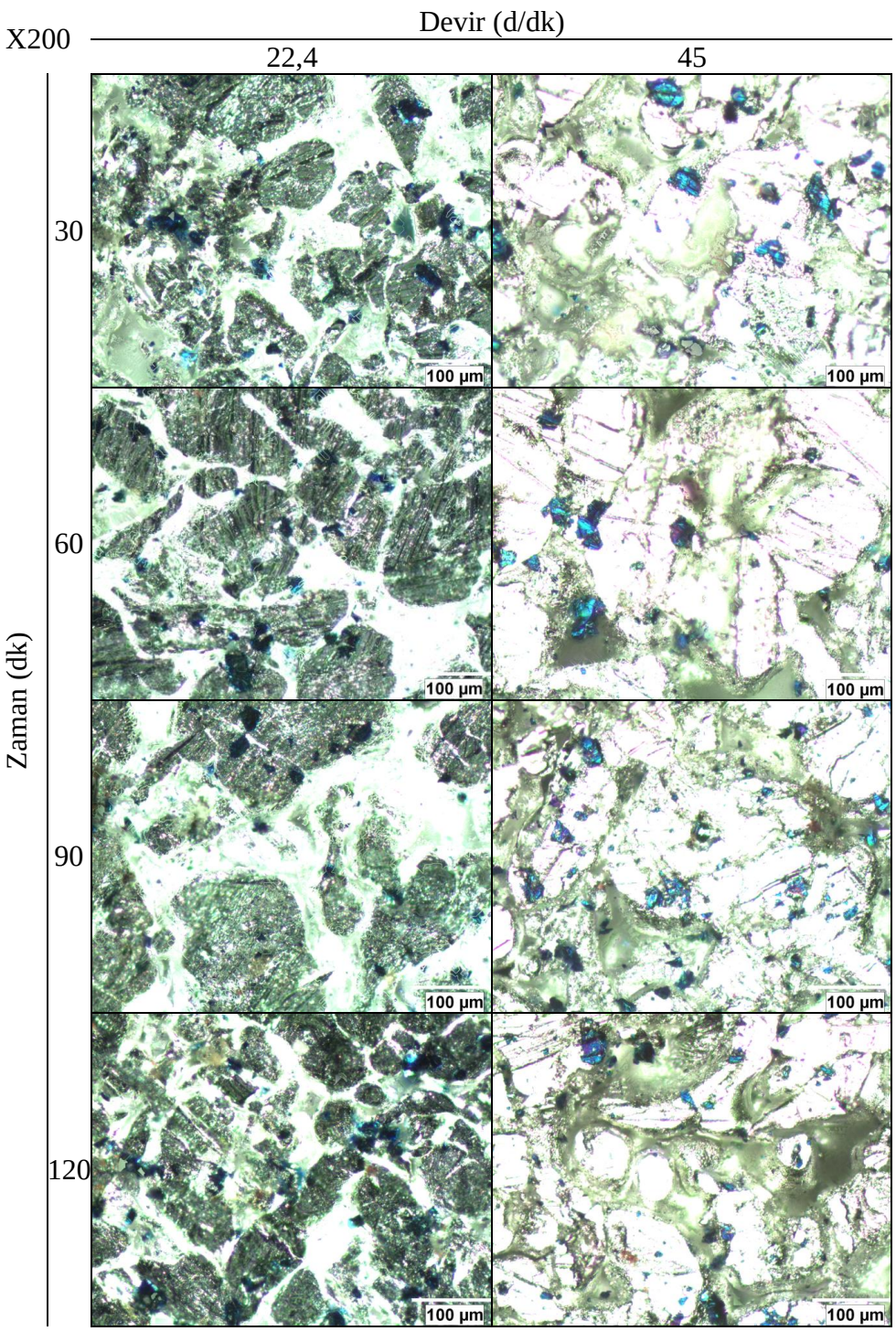
Tablo A.1.22,4 ve 45 d/dk dönme hızında 30, 60, 90, 120 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntüleri



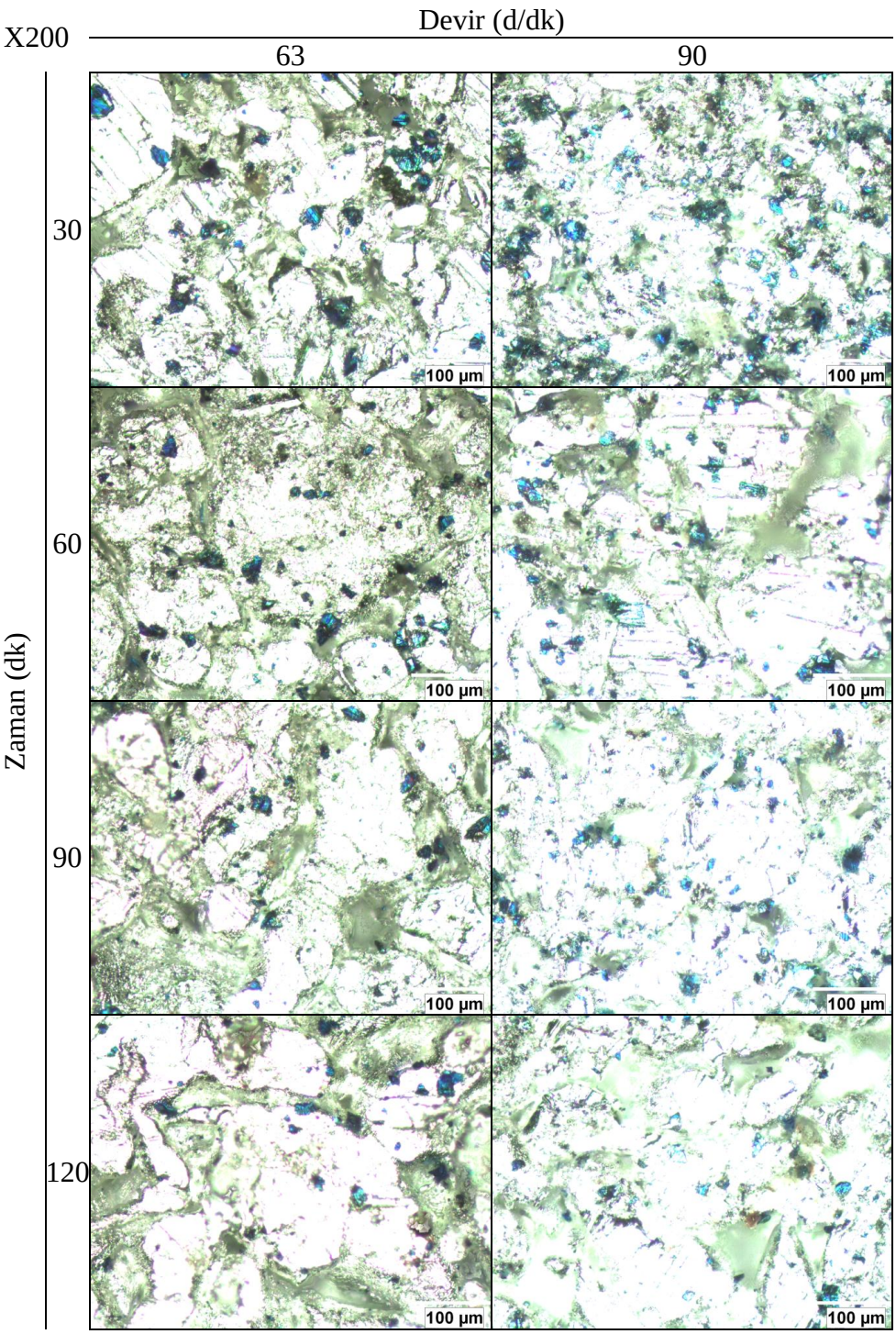
Tablo A.2. 63 ve 90 d/dk dönme hızında 30, 60, 90, 120 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntüleri



Tablo A.3. 22,4 ve 45 d/dk dönme hızında 30, 60, 90, 120 dk karıştırma süreleri sonrası 200 büyütmede optik mikroskop görüntüleri

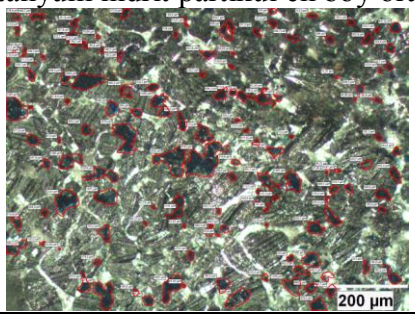
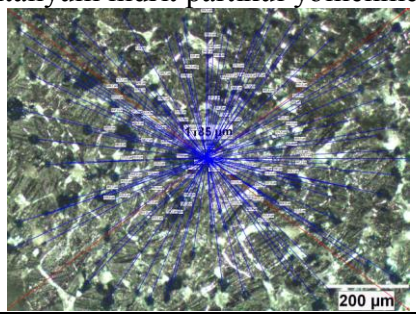
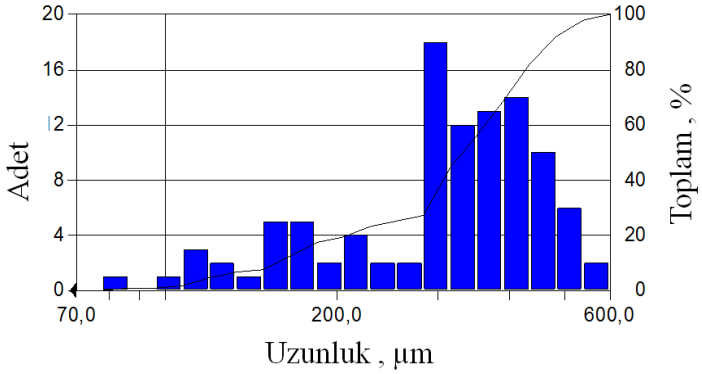
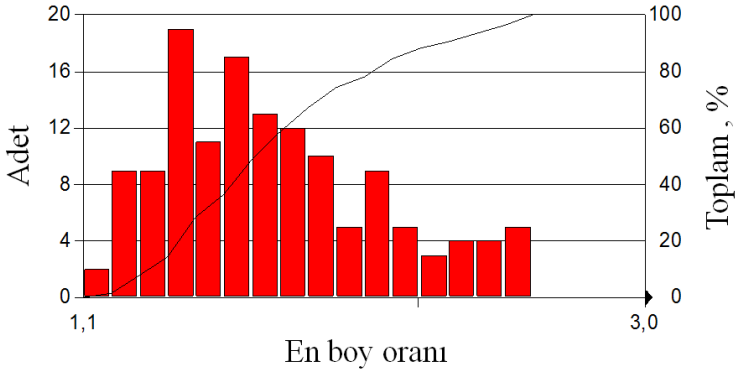
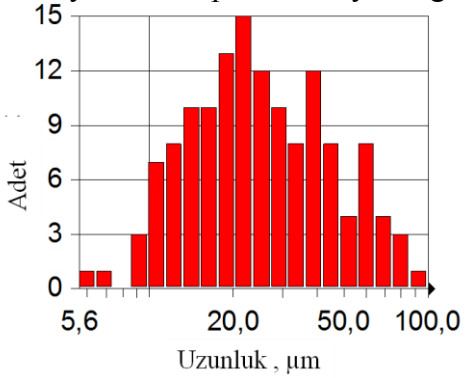


Tablo A.4. 63 ve 90 d/dk dönme hızında 30, 60, 90, 120 dk karıştırma süreleri sonrası 200 büyütmede optik mikroskop görüntüleri



Ek-B Karıştırma sonrası yazılım analizleri

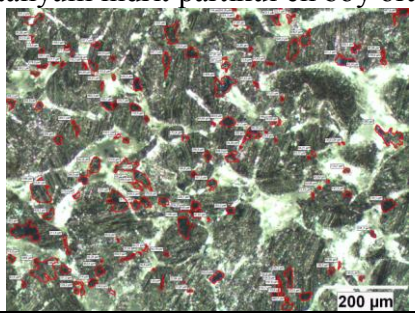
Tablo B.1. 22,4 d/dk dönme hızında 30 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

<table>
<tr><td colspan="2">Karıştırma işlem parametreleri 22,4d/dk-30dk</td></tr>
<tr><td>Titanyum hidrit partikül en boy oranı

</td><td>Titanyum hidrit partikül yönlenmesi

</td></tr>
<tr><td colspan="2">Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği

</td></tr>
<tr><td colspan="2">Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği

</td></tr>
<tr><td colspan="2">Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği

</td></tr>
</table>

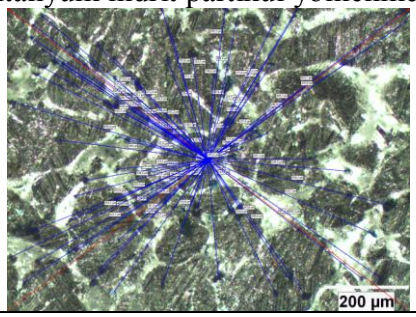
Tablo B.2. 22,4 d/dk dönme hızında 60 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 22,4d/dk-60dk

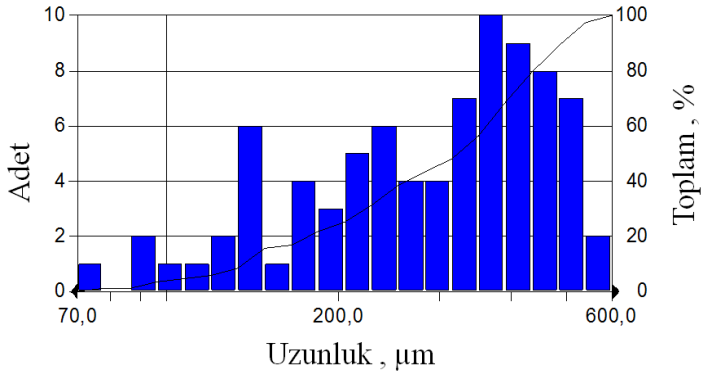
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



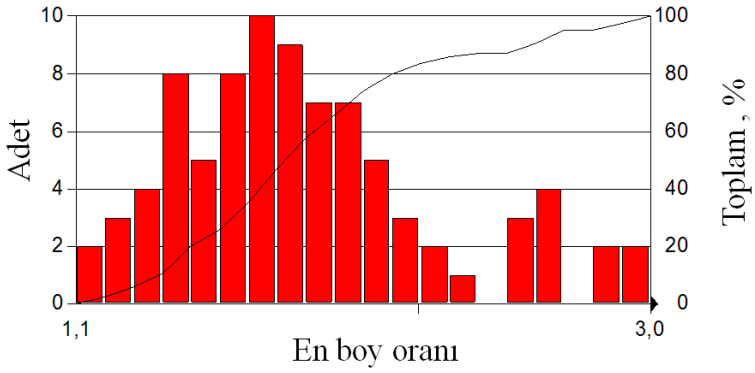
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



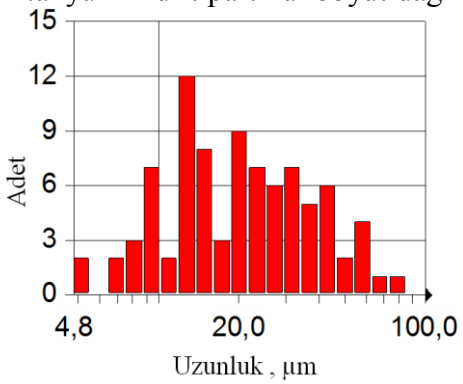
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



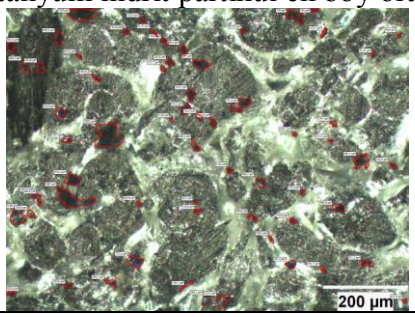
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



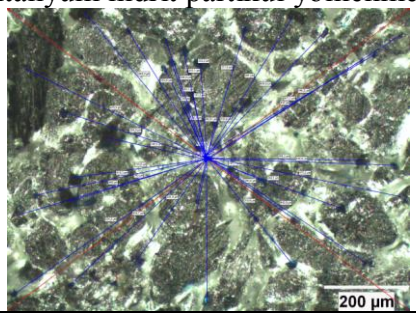
Tablo B.3. 22,4 d/dk dönme hızında 90 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 22,4d/dk-90dk

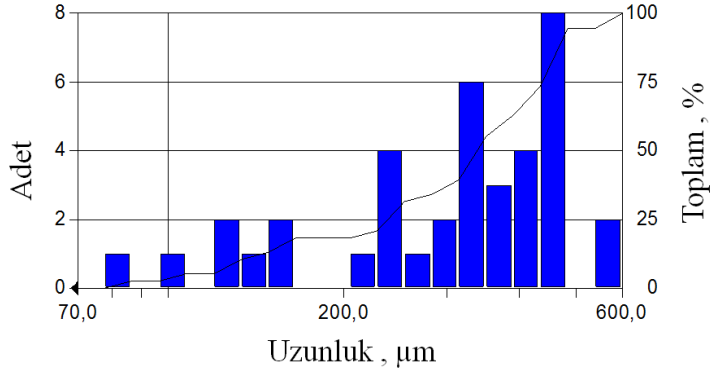
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



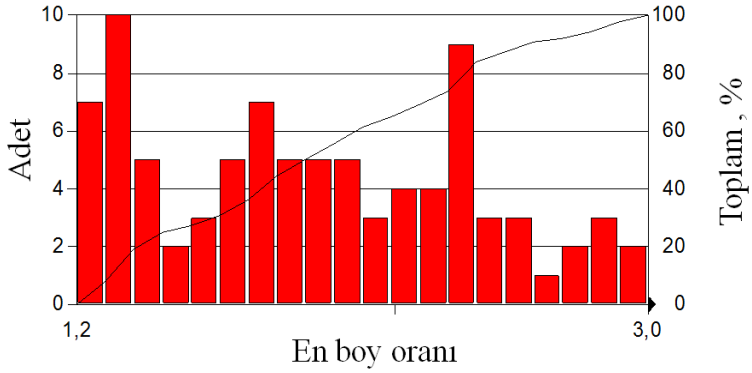
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



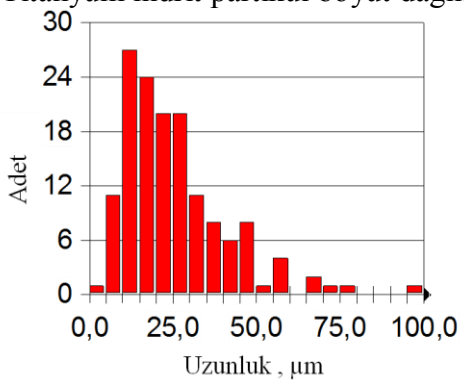
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



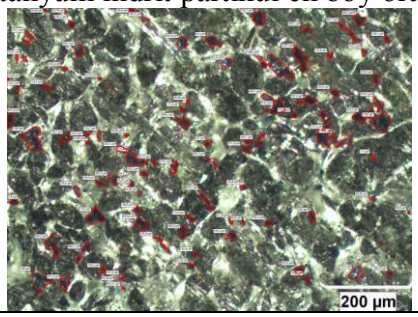
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



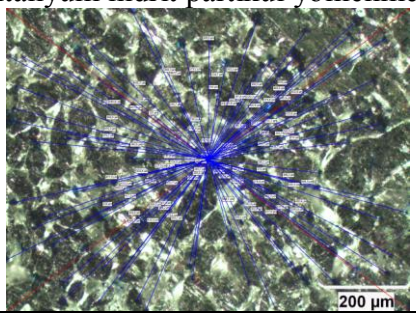
Tablo B.4. 22,4 d/dk dönme hızında 120 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 22,4d/dk-120dk

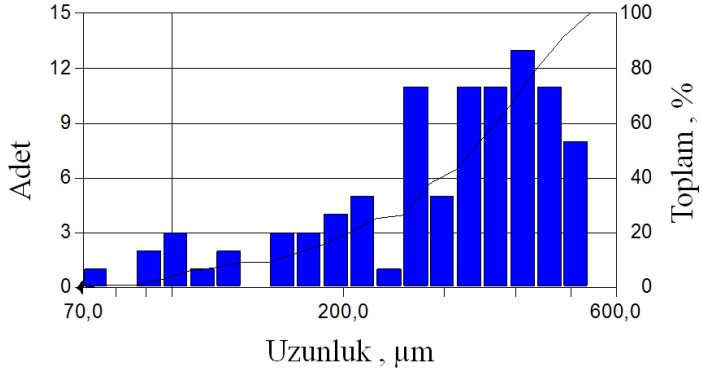
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



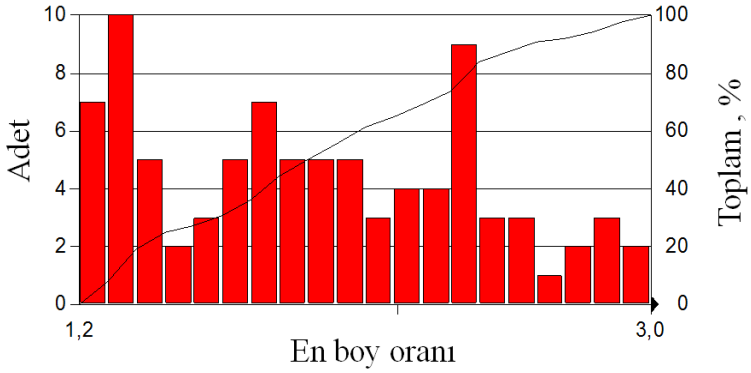
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



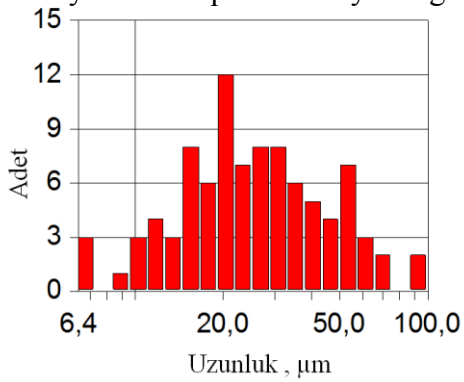
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



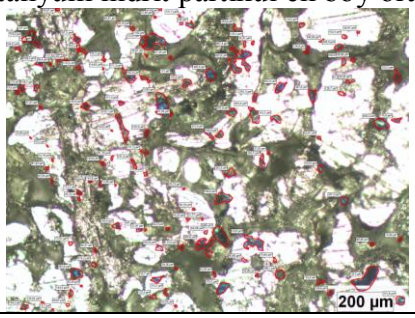
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



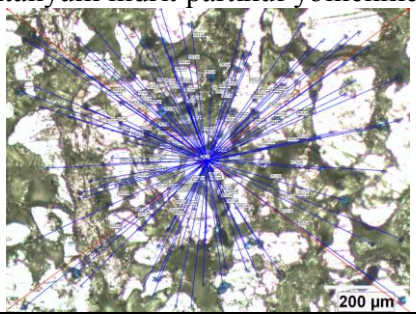
Tablo B.5. 45 d/dk dönme hızında 30 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 45d/dk-30dk

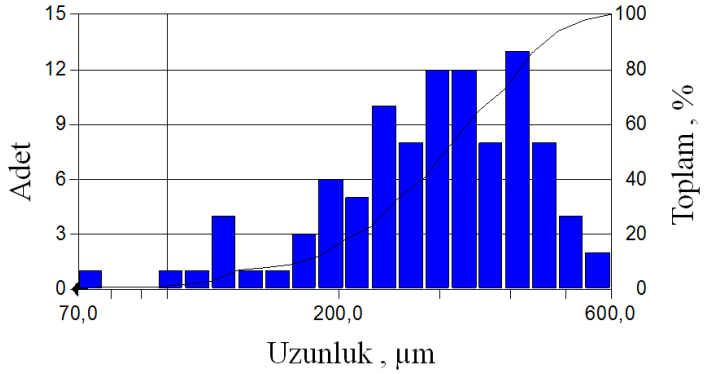
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



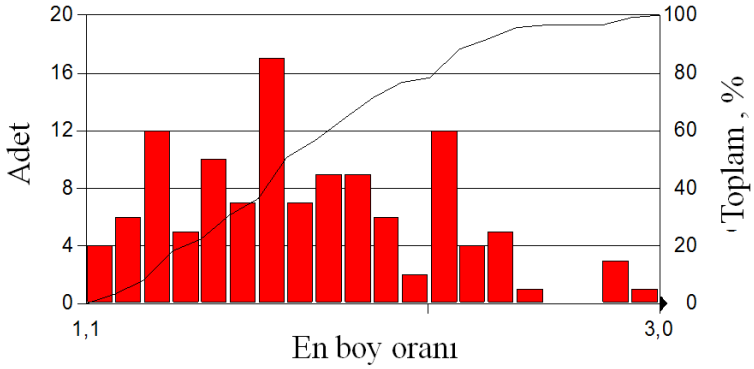
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



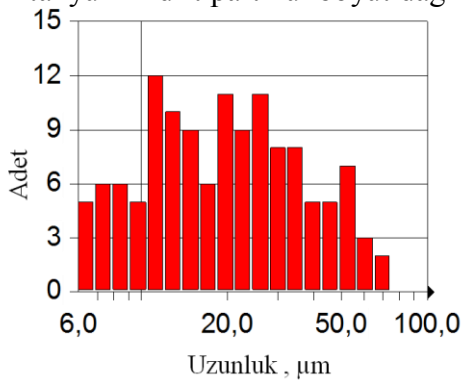
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



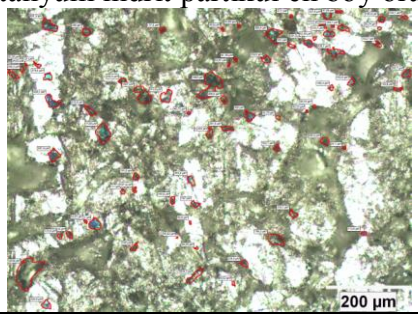
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



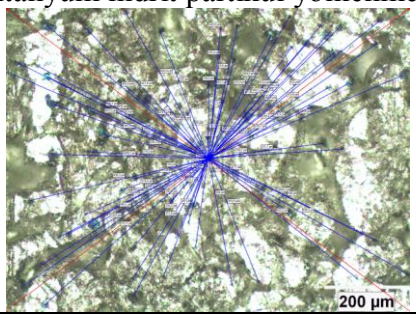
Tablo B.6. 45 d/dk dönme hızında 60 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 45d/dk-60dk

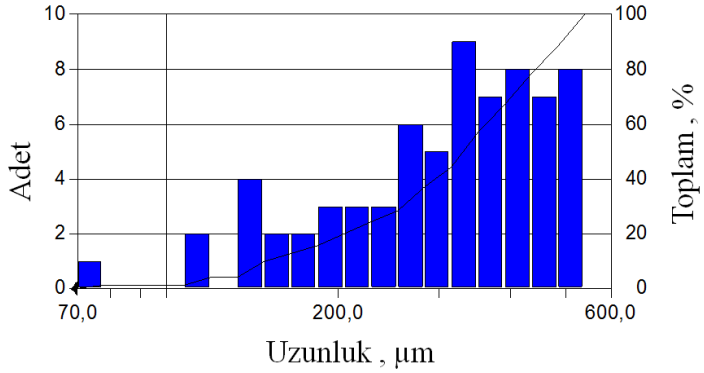
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



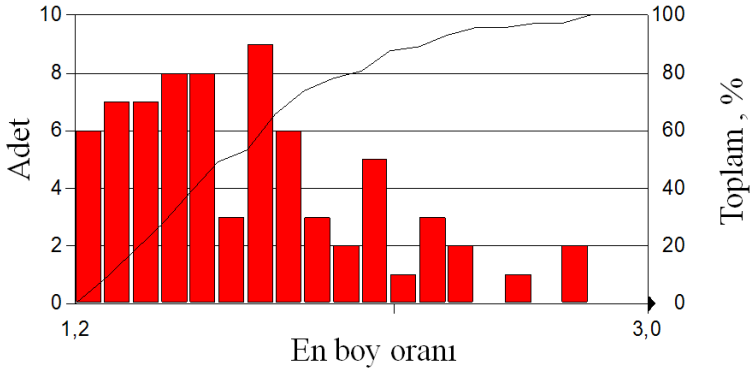
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



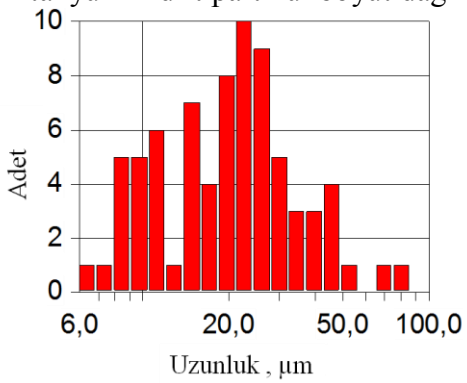
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



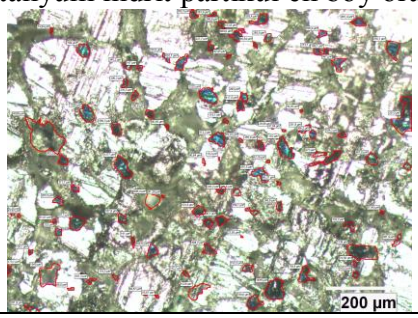
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



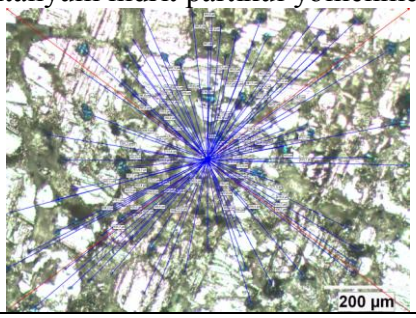
Tablo B.7. 45 d/dk dönme hızında 90 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 45d/dk-90dk

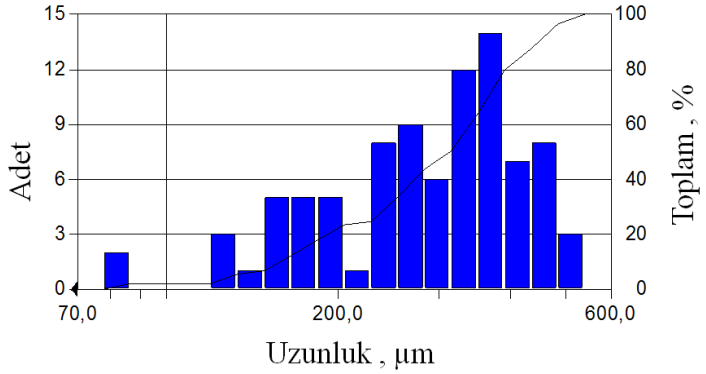
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



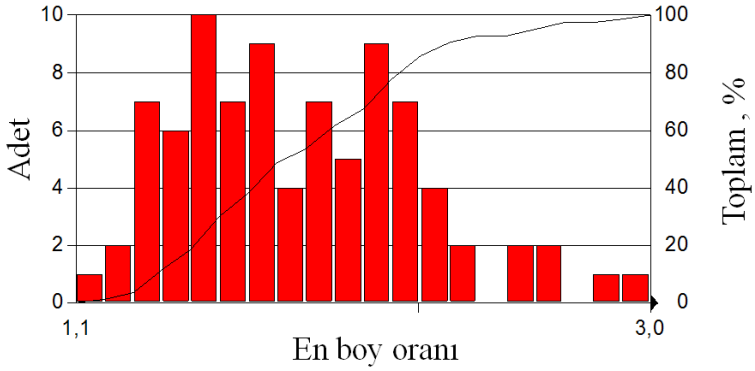
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



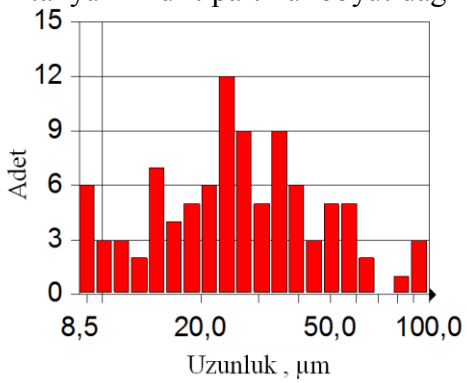
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



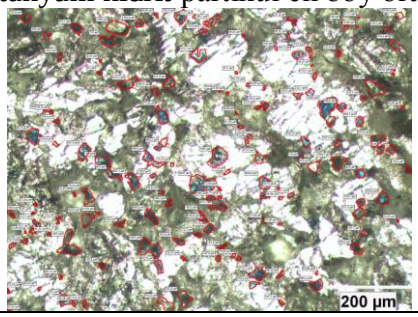
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



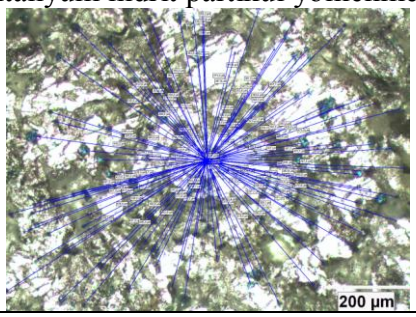
Tablo B.8. 45 d/dk dönme hızında 120 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 45d/dk-120dk

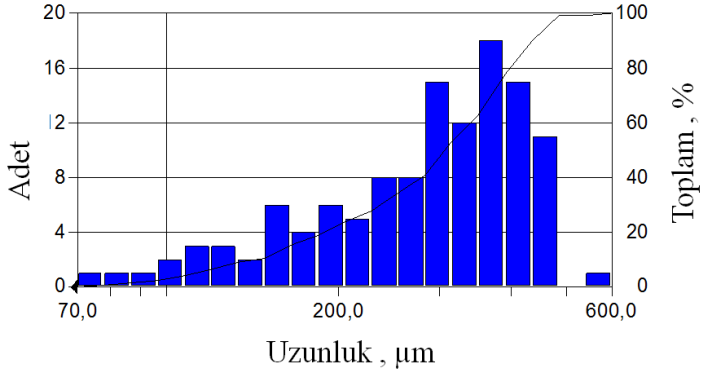
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



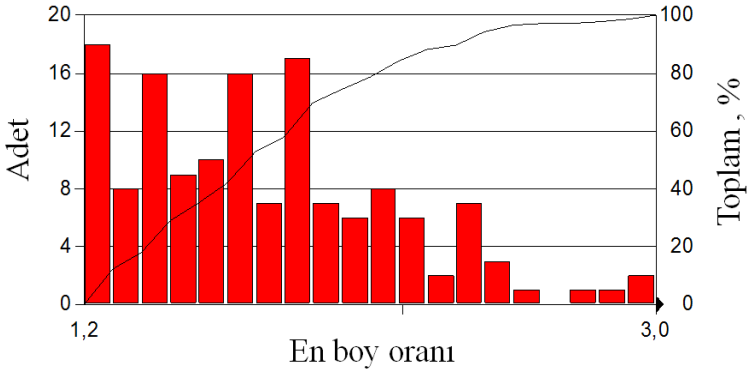
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



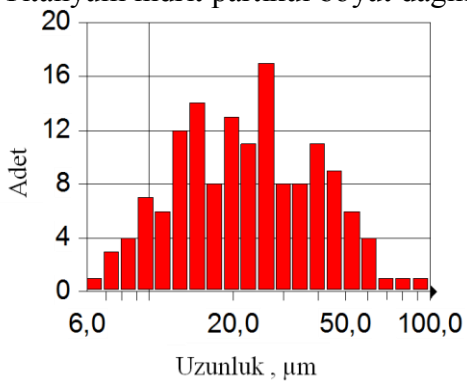
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



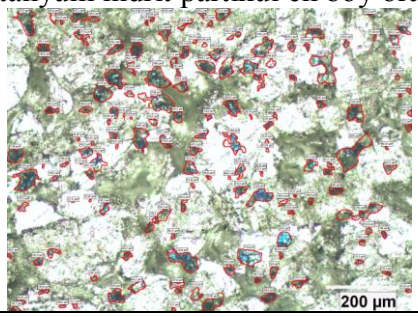
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



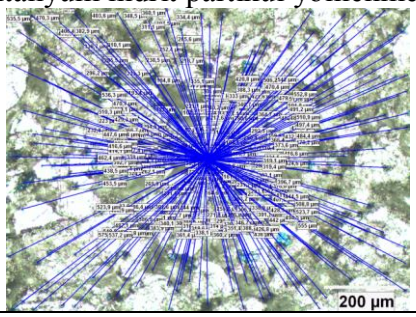
Tablo B.9. 63 d/dk dönme hızında 30 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 63d/dk-30dk

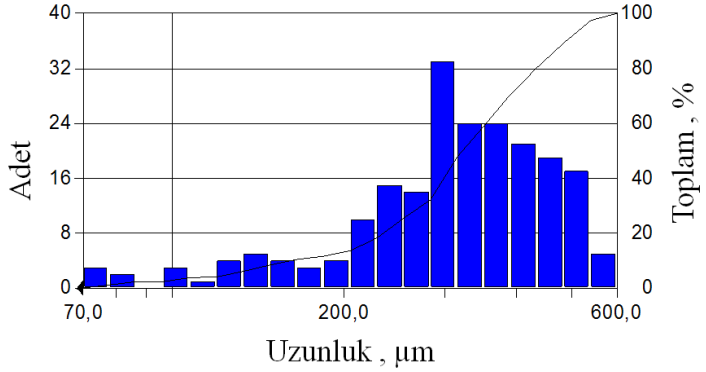
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



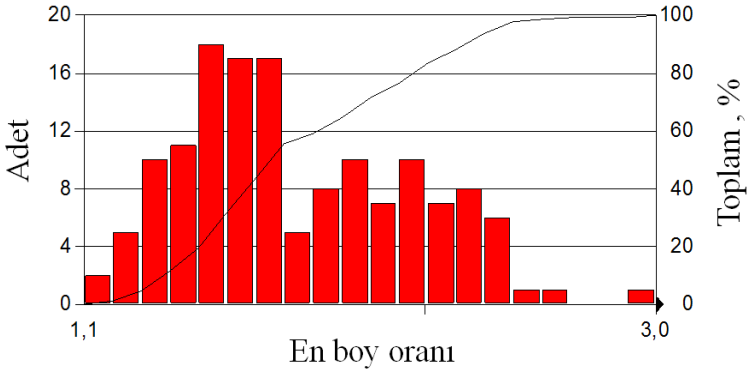
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



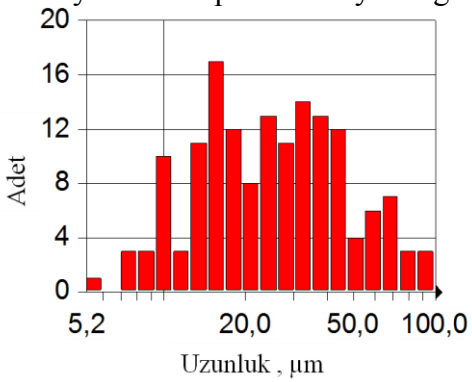
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



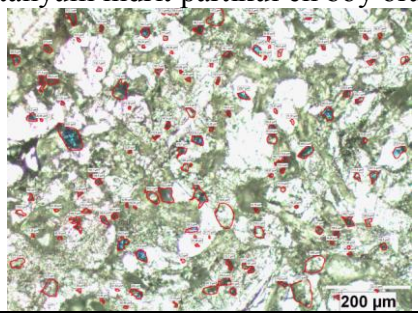
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



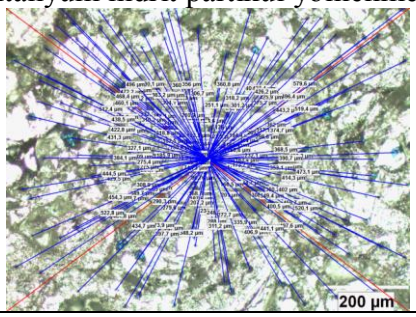
Tablo B.10. 63 d/dk dönme hızında 60 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 63d/dk-60dk

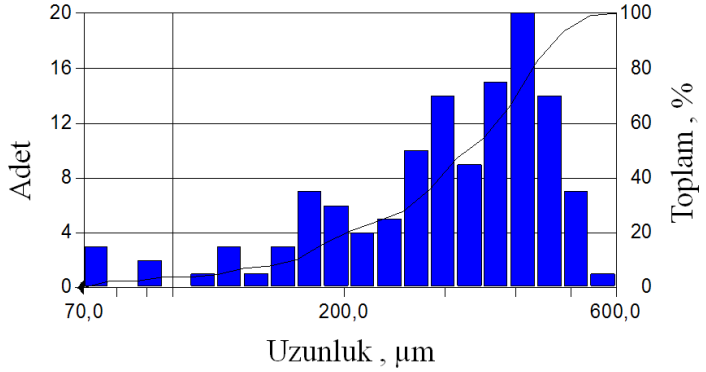
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



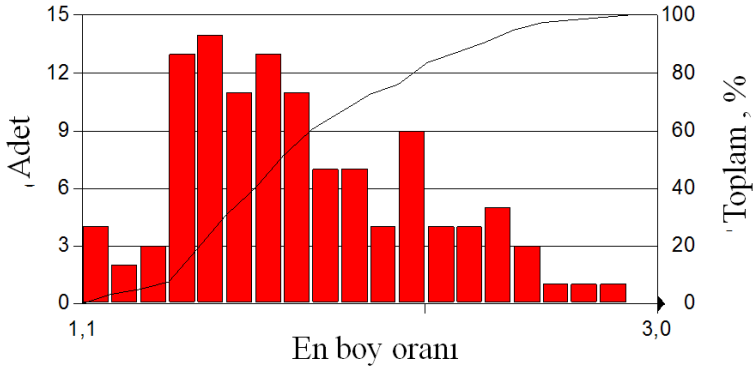
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



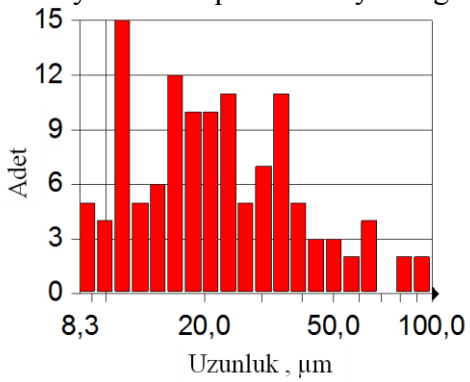
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



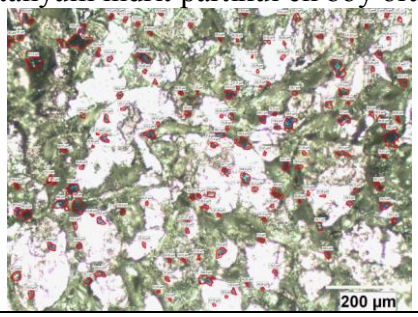
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



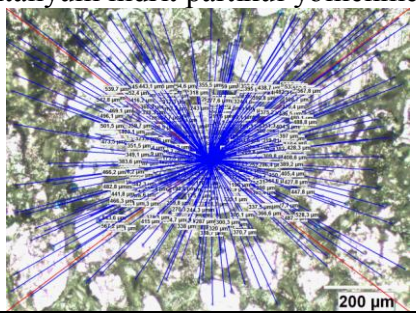
Tablo B.11. 63 d/dk dönme hızında 90 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 63d/dk-90dk

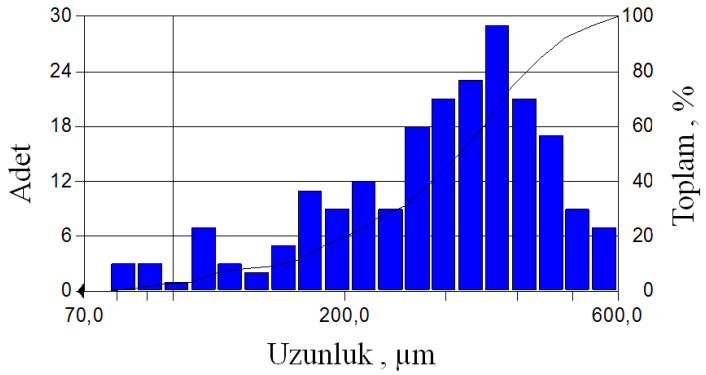
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



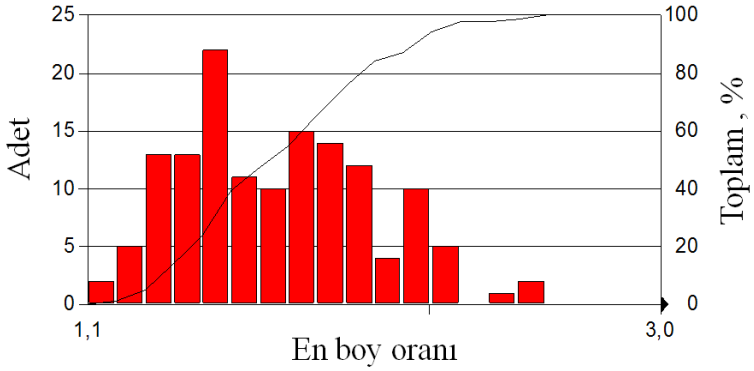
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



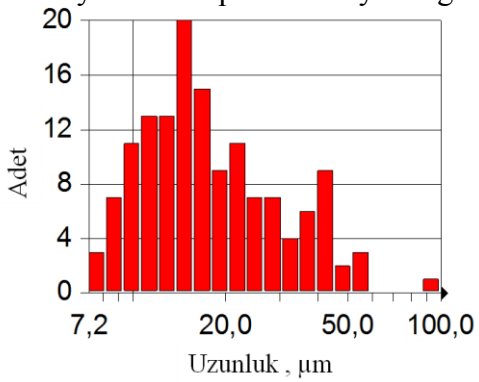
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



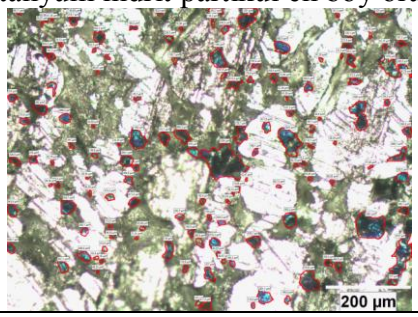
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



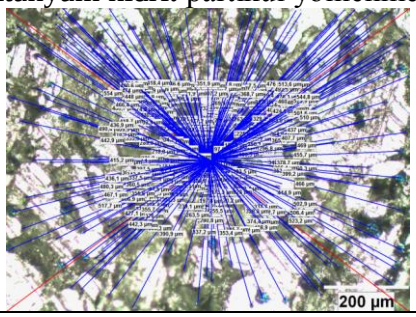
Tablo B.12. 63 d/dk dönme hızında 120 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 63d/dk-120dk

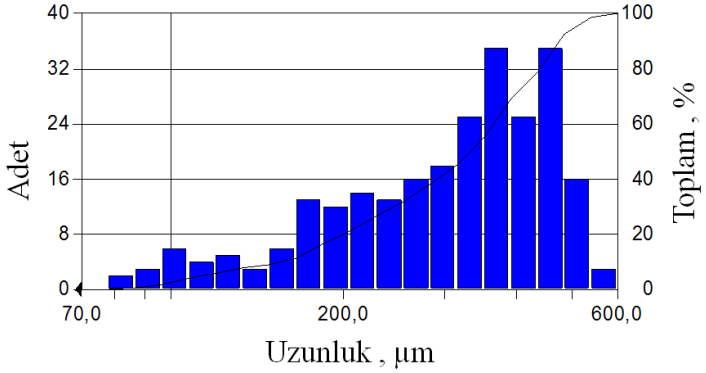
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



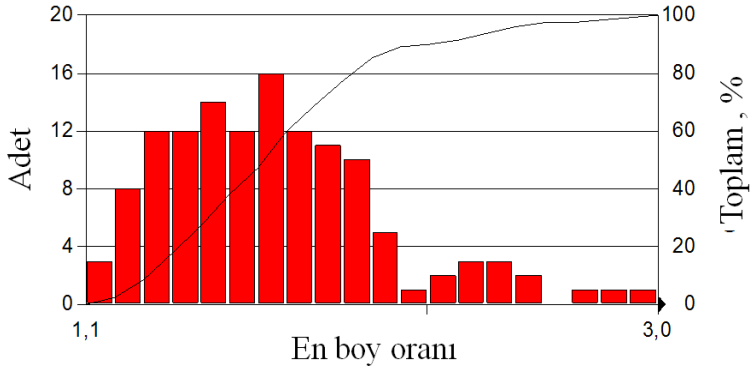
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



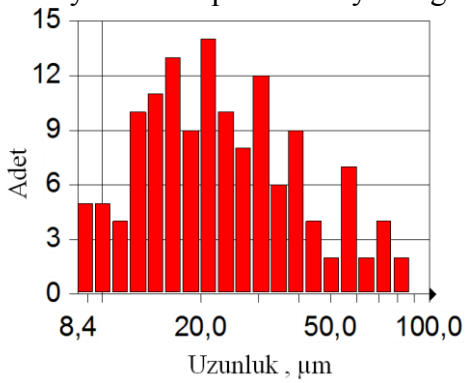
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



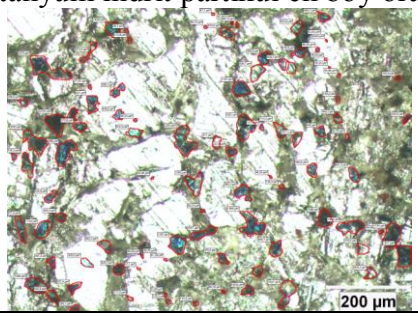
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



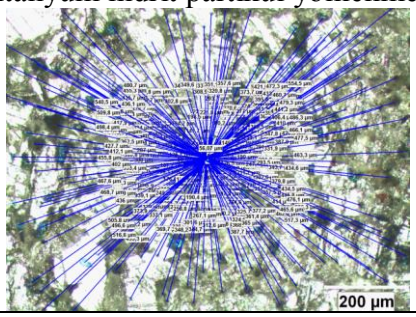
Tablo B.13. 90 d/dk dönme hızında 30 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 90d/dk-30dk

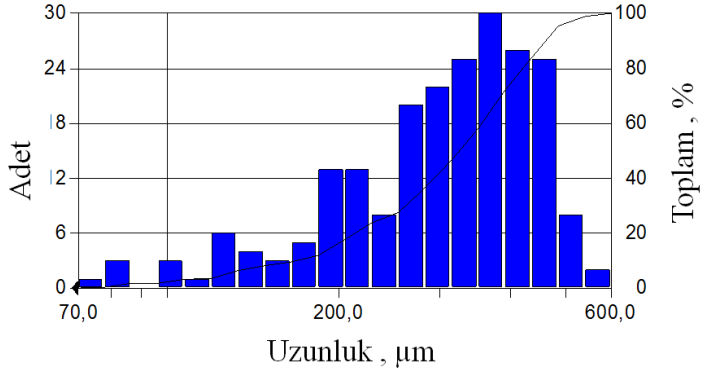
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



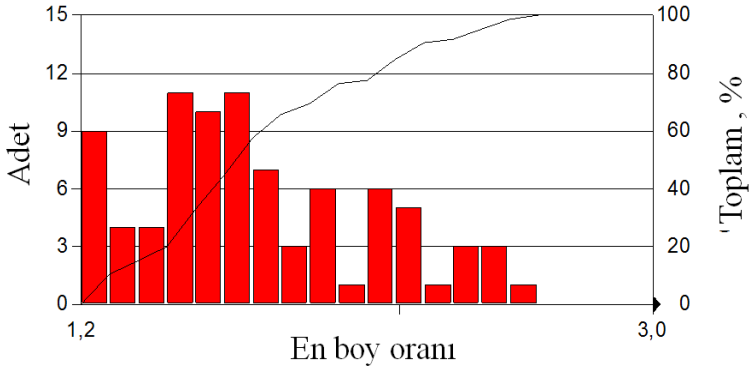
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



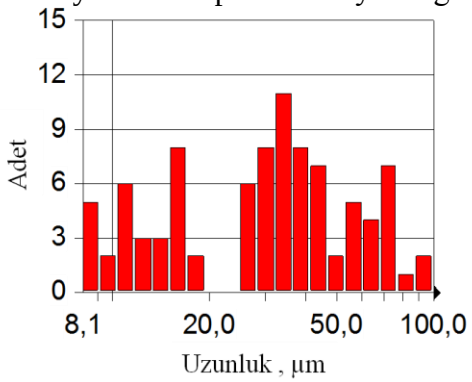
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



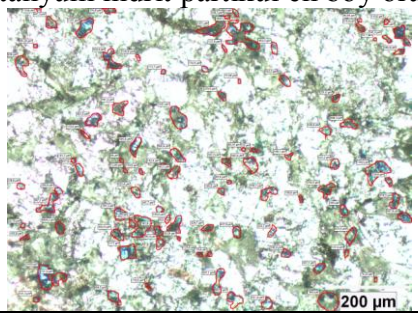
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



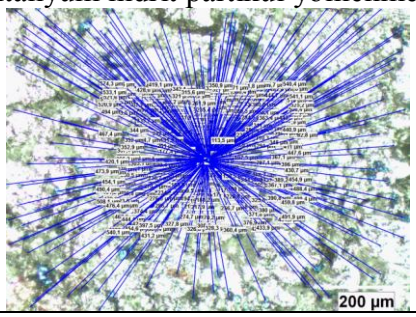
Tablo B.14. 90 d/dk dönme hızında 60 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 90d/dk-60dk

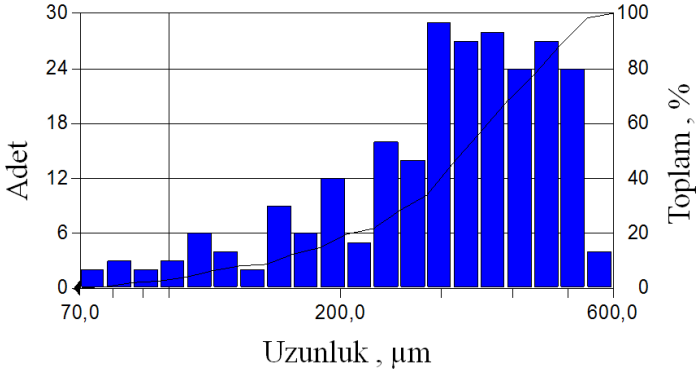
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



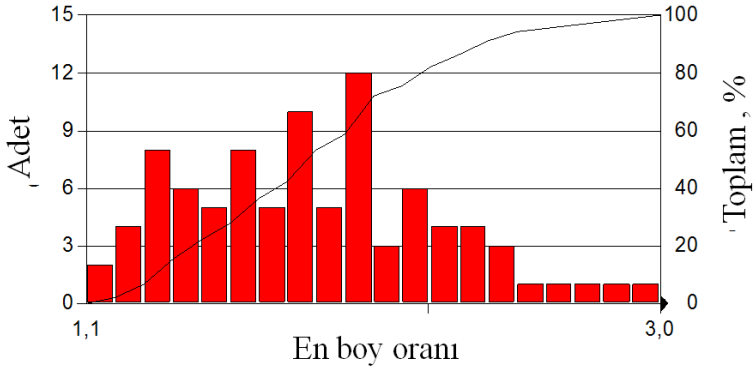
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



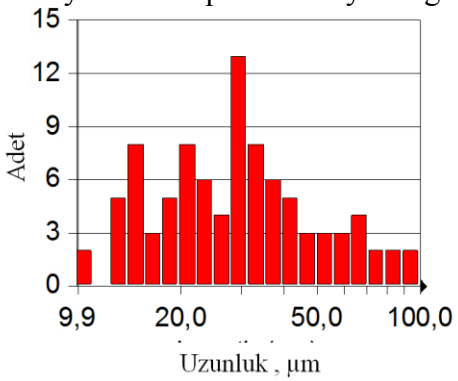
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



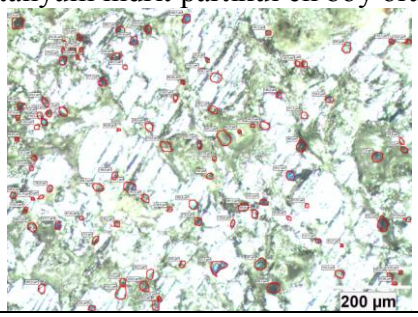
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



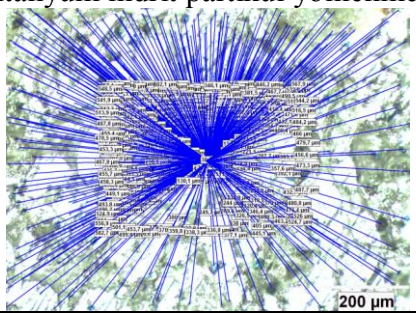
Tablo B.15. 90 d/dk dönme hızında 90 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 90d/dk-90dk

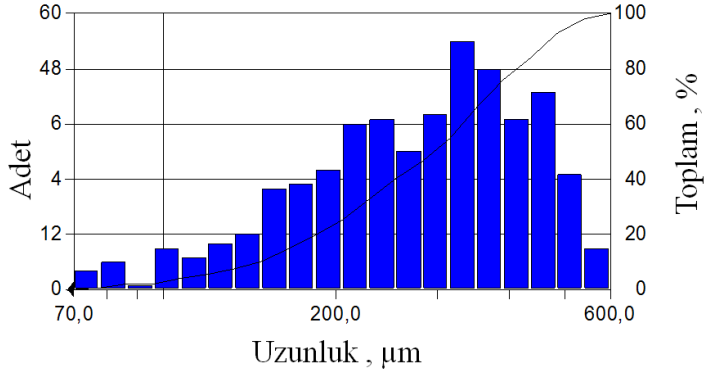
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



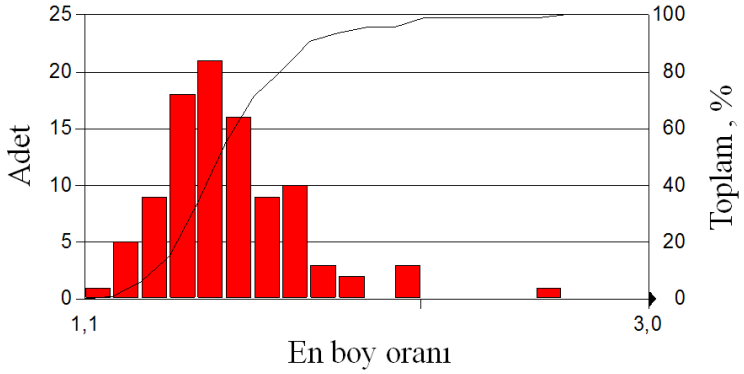
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



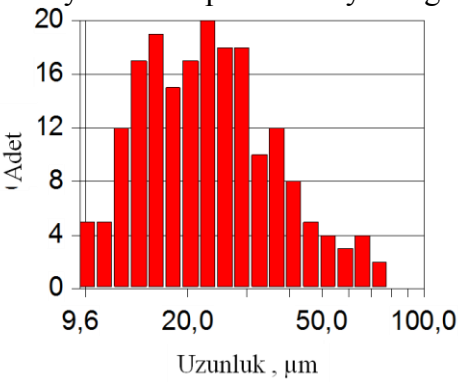
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği



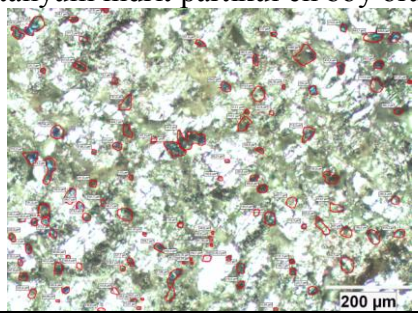
Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği



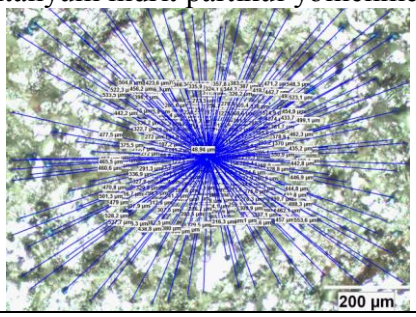
Tablo B.16. 90 d/dk dönme hızında 120 dk karıştırma süreleri sonrası 100 büyütmede optik mikroskop görüntü analizleri

Karıştırma işlem parametreleri 90d/dk-120dk

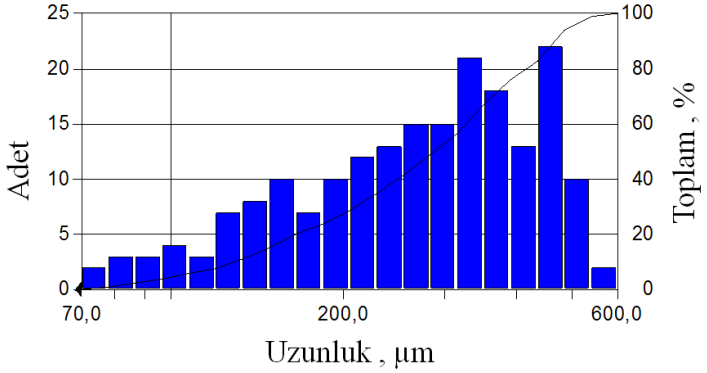
Titanyum hidrit partikül en boy oranı



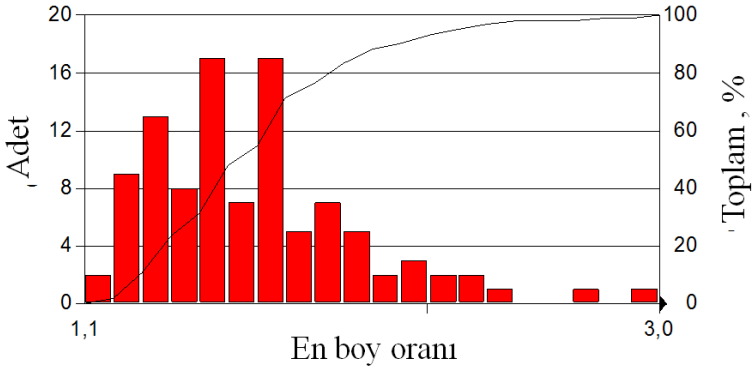
Titanyum hidrit partikül yönlenmesi



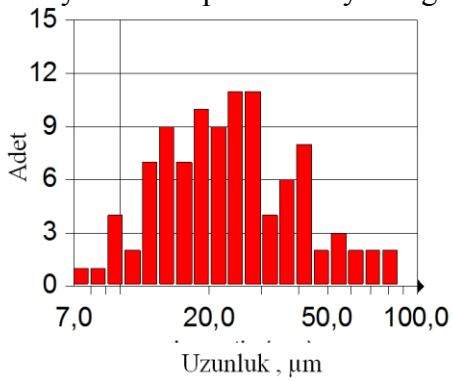
Titanyum hidrit partikül yönlenme grafiği



Titanyum hidrit partikül en boy oranı grafiği

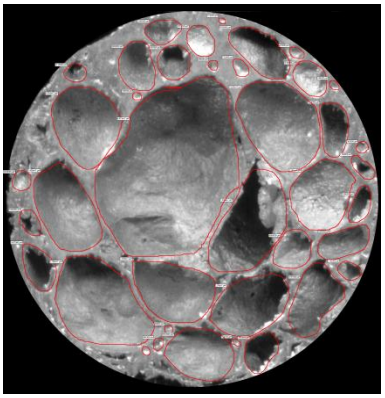


Titanyum hidrit partikül boyut dağılım grafiği

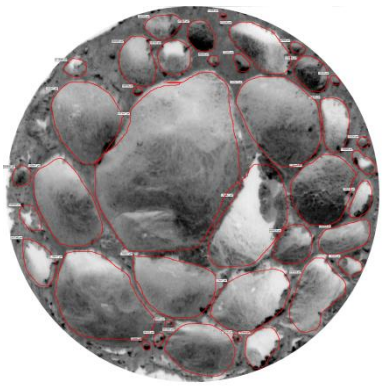


Ek-C Farklı kalıp doldurma oranlarında üretilen köpüklerin gözenek, en boy oranı ve alansal analizleri

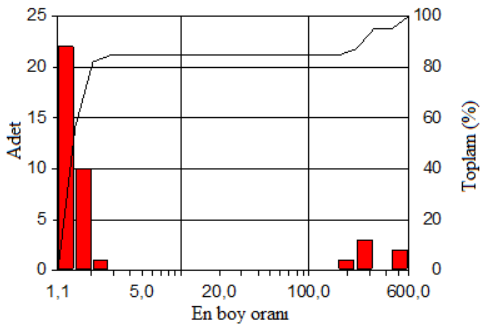
Tablo C.1. Yüzde 40 kalıp doldurma oranında üretilmiş köpüklerin gözenek (a ve b), en boy oranı (c) ve alansal (d) analizleri



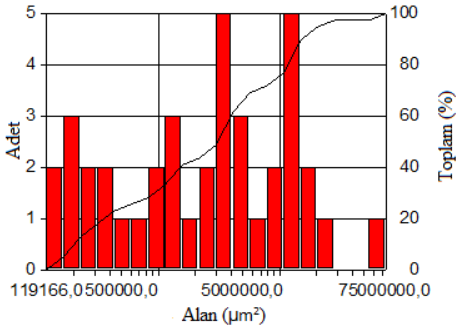
a



b

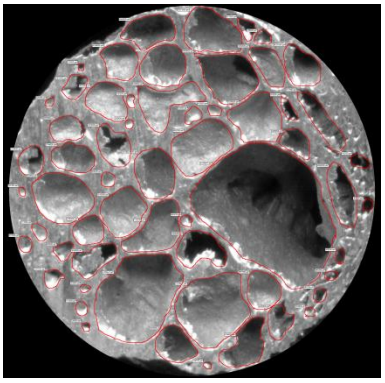


c

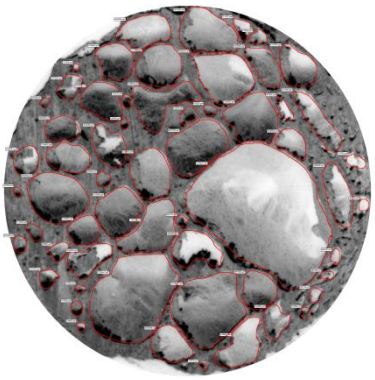


d

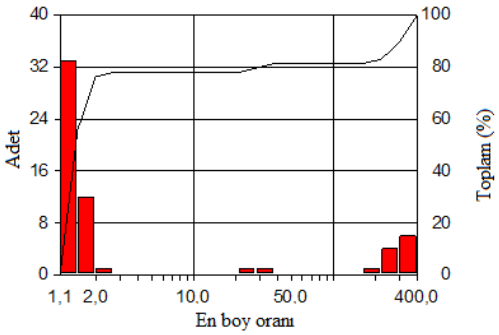
Tablo C.2. Yüzde 50 kalıp doldurma oranında üretilmiş köpüklerin gözenek (a ve b), en boy oranı (c) ve alansal (d) analizleri



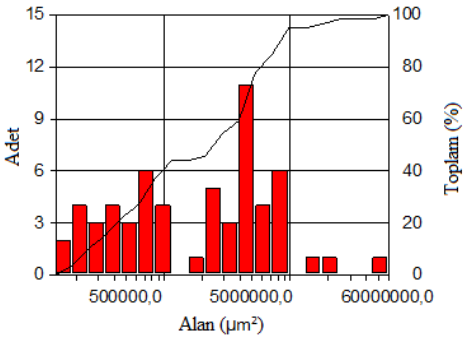
a



b

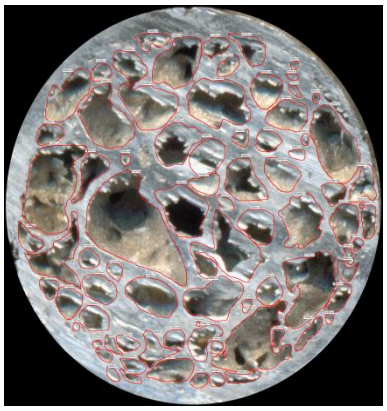


c

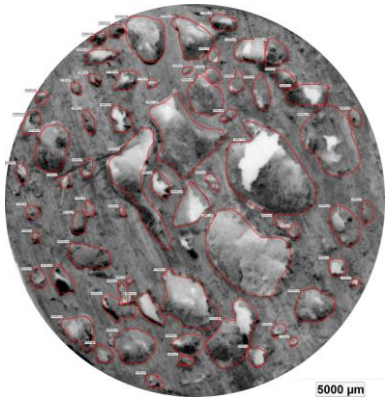


d

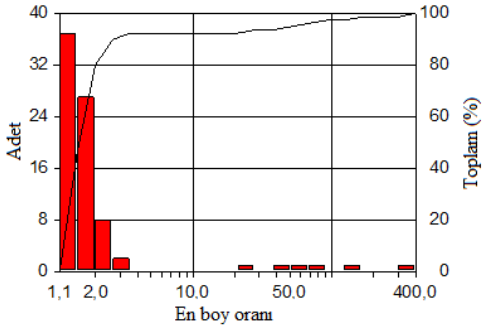
Tablo C.3. Yüzde 60 kalıp doldurma oranında üretilmiş köpüklerin gözenek (a ve b), en boy oranı (c) ve alansal (d) analizleri



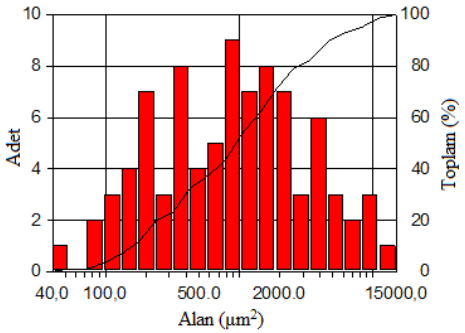
a



b

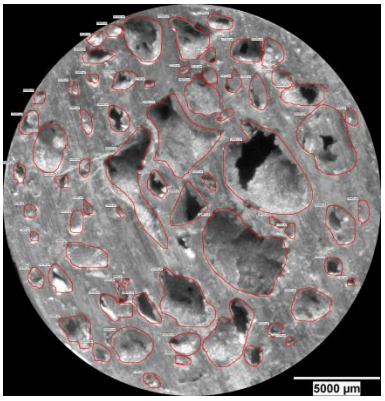


c

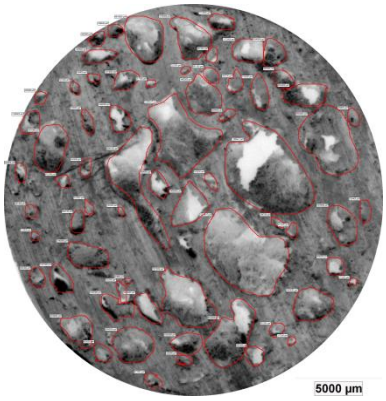


d

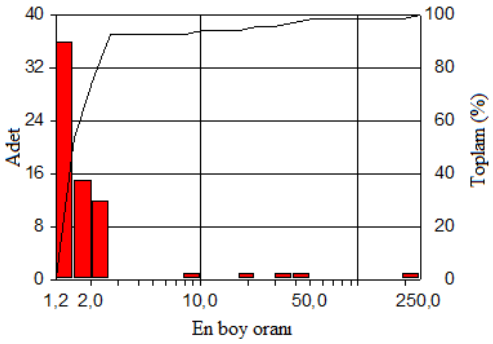
Tablo C.4. Yüzde 70 kalıp doldurma oranında üretilmiş köpüklerin gözenek (a ve b), en boy oranı (c) ve alansal (d) analizleri



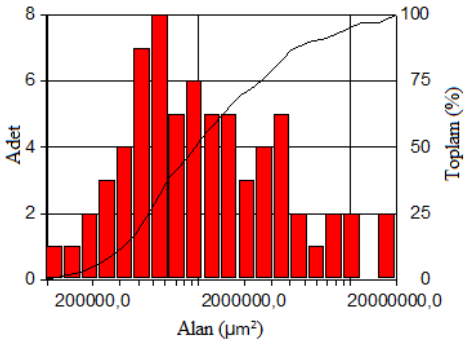
a



b

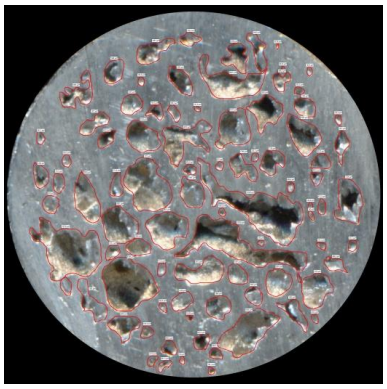


c

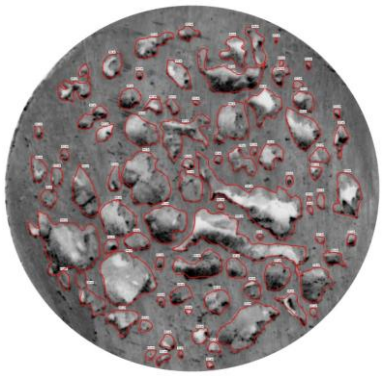


d

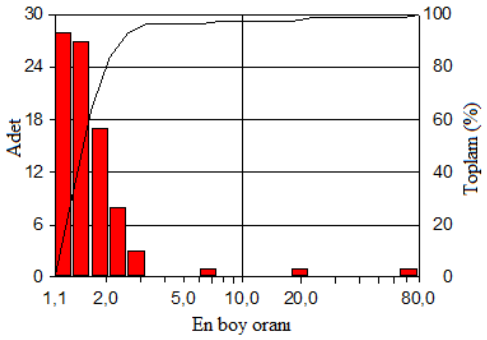
Tablo C.5.Yüzde 80 kalıp doldurma oranında üretilmiş köpüklerin gözenek (a ve b), en boy oranı (c) ve alansal (d) analizleri



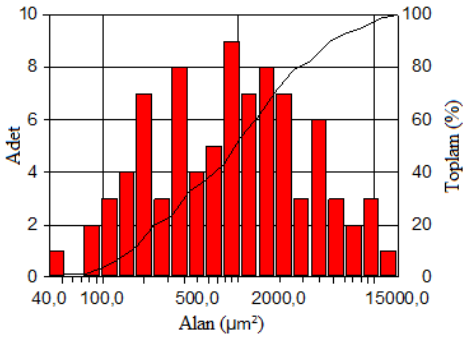
a



b



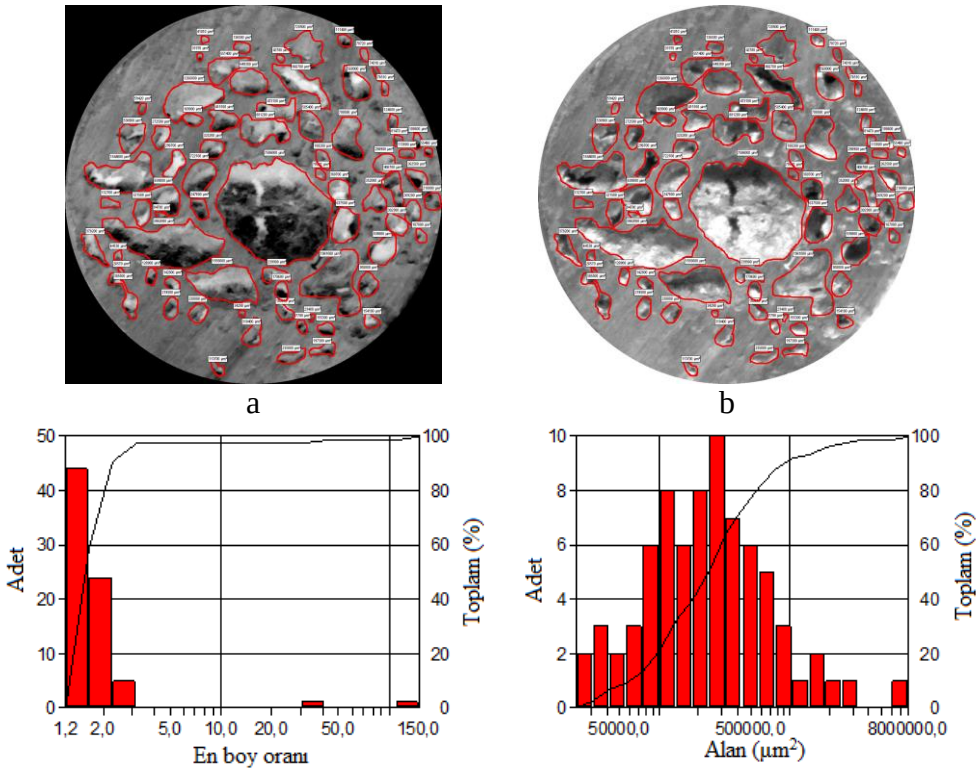
c



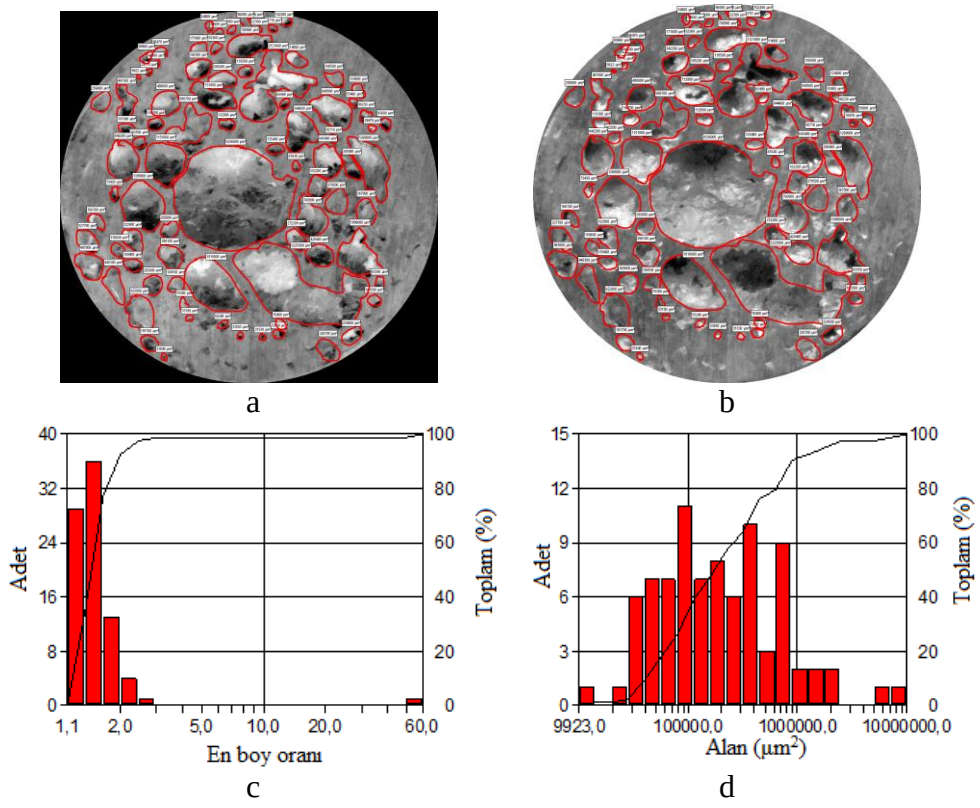
d

Ek-D TiH_2 miktarı ve fırın sıcaklığına bağlı metal köpük üretim analizleri

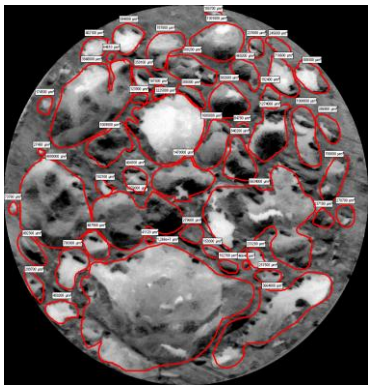
Tablo D.1. Yüzde 0,5 TiH_2 içeren öncünün 700 °C'de üretimi



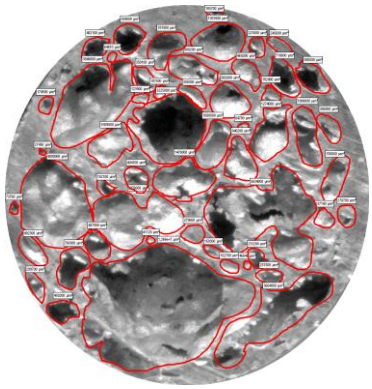
Tablo D.2. Yüzde 1 TiH_2 içeren öncünün 700 °C'de üretimi



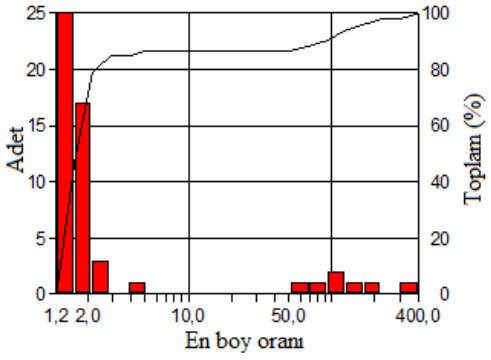
Tablo D.3.Yüzde 1,5 TiH_2 içeren öncünün 700 °C'de üretimi



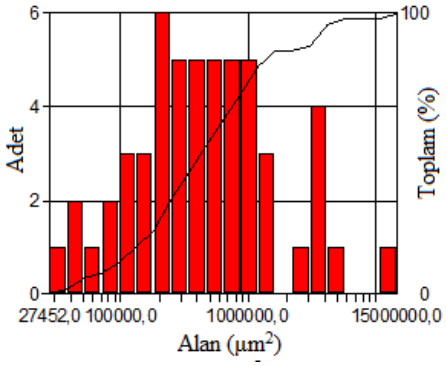
a



b

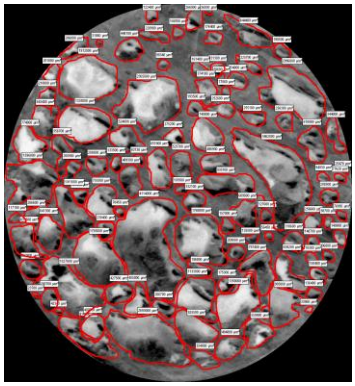


c

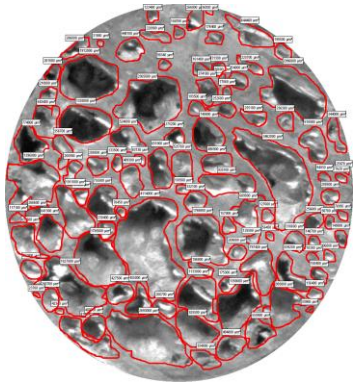


d

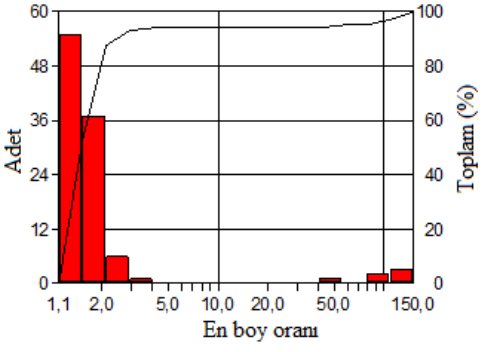
Tablo D.4.Yüzde 2 TiH_2 içeren öncünün 700 °C'de üretimi



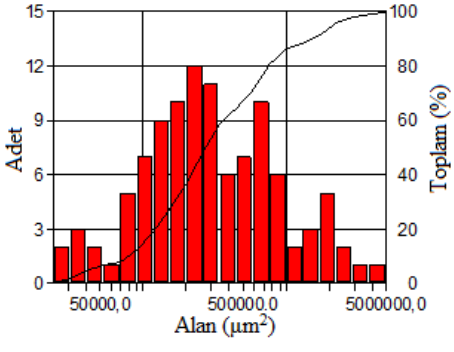
a



b

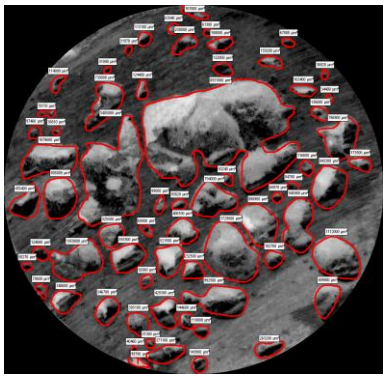


c

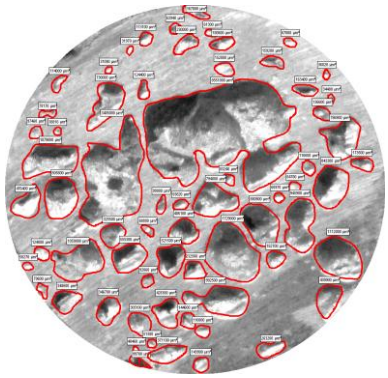


d

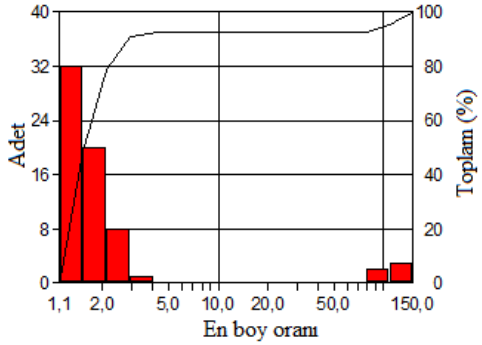
Tablo D.5.Yüzde 0,5 TiH_2 içeren öncünün 750 °C'de üretimi



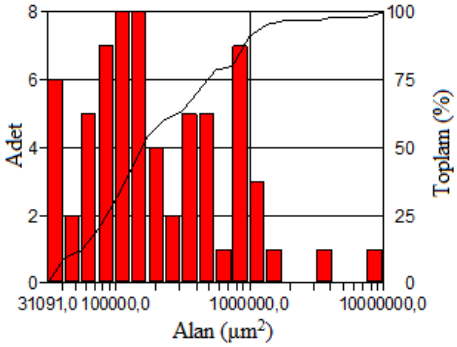
a



b

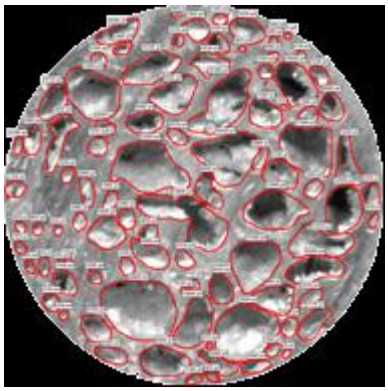


c

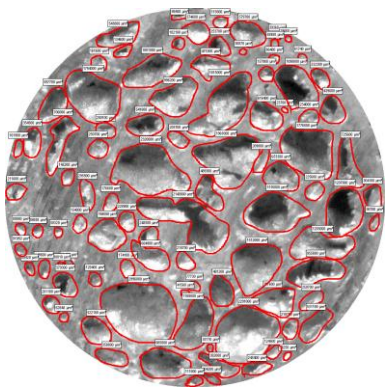


d

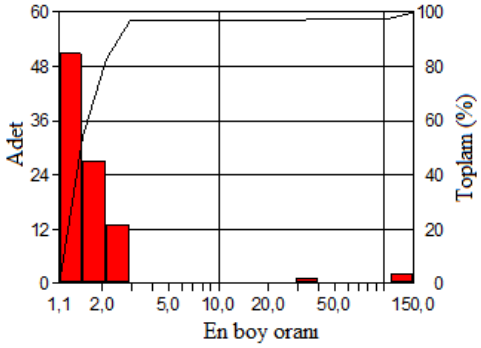
Tablo D.6.Yüzde 1 TiH_2 içeren öncünün 750 °C'de üretimi



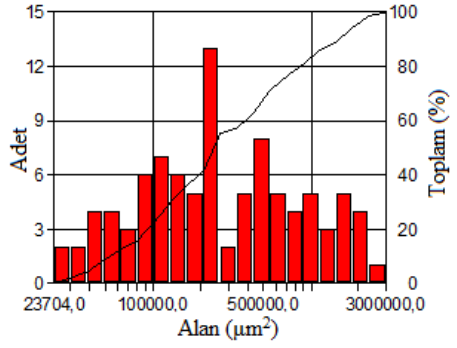
a



b

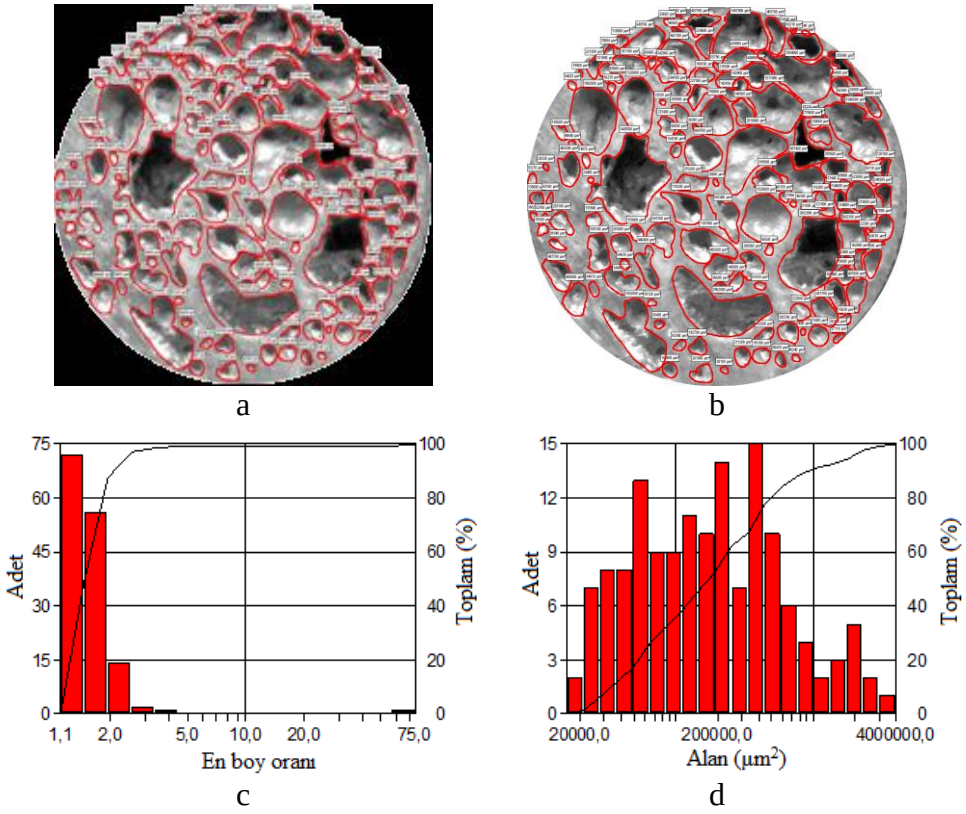


c

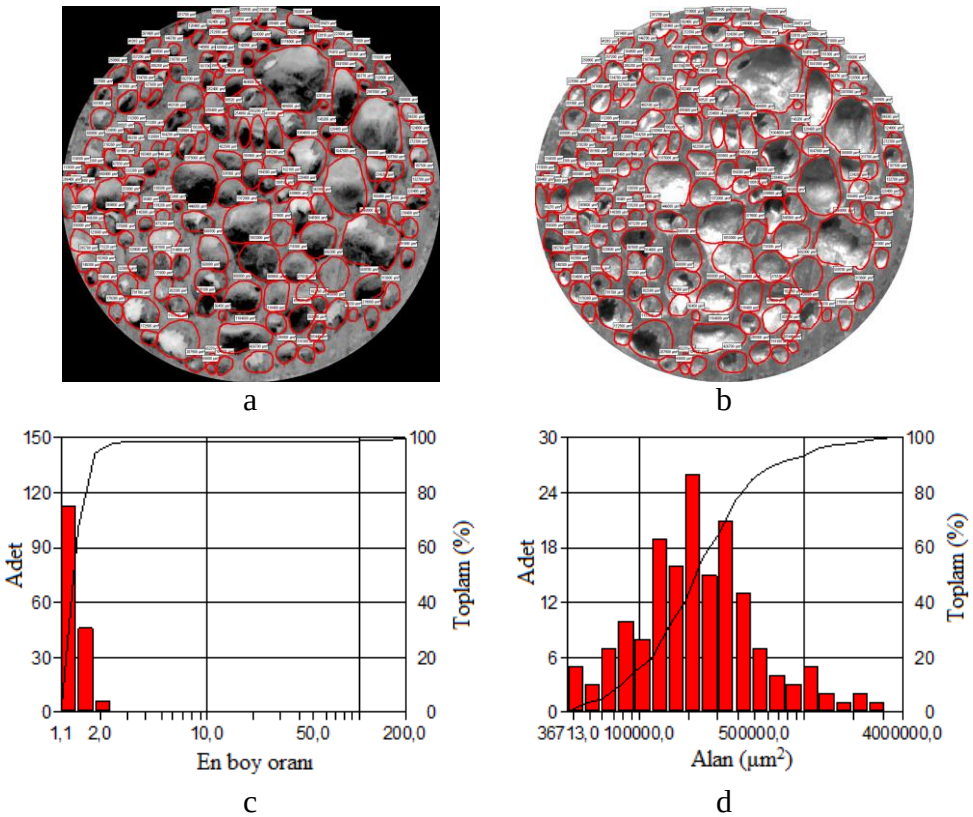


d

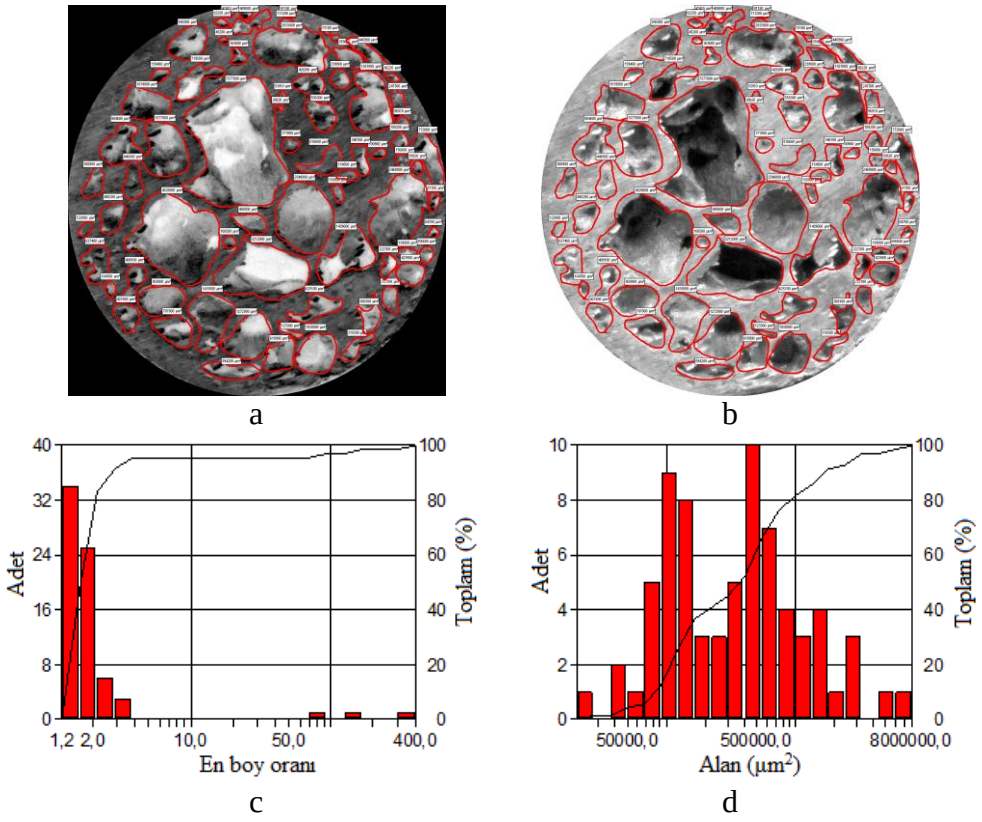
Tablo D.7.Yüzde 1,5 TiH_2 içeren öncünün 750 °C'de üretimi



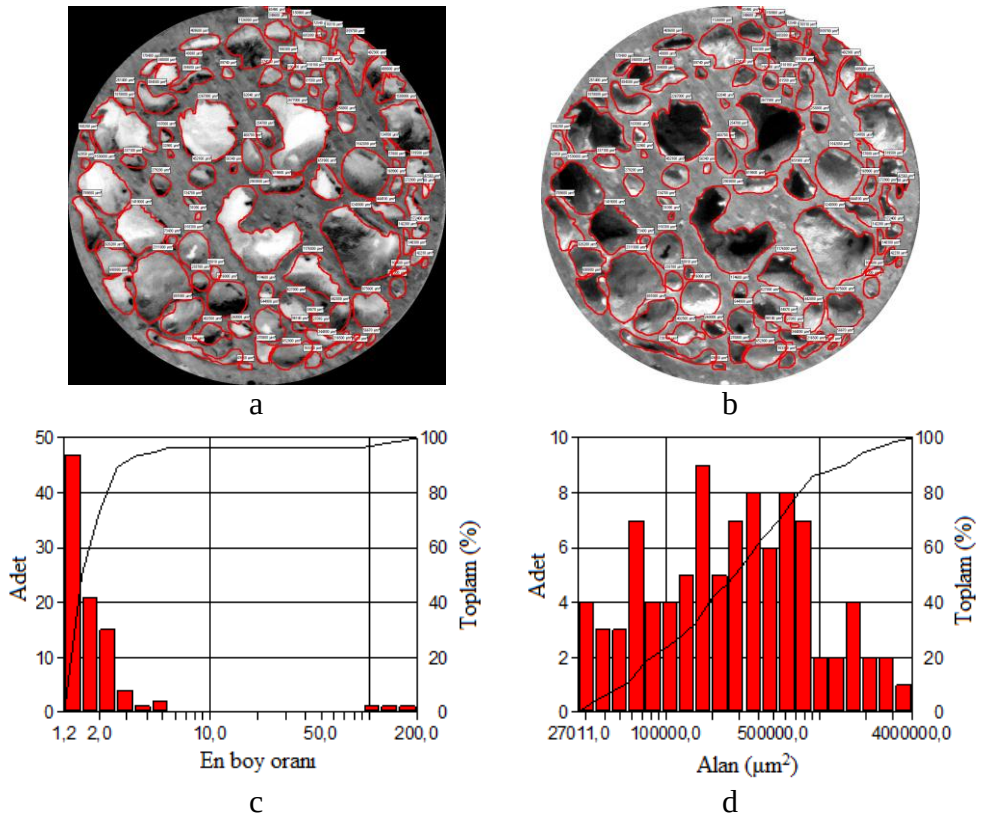
Tablo D.8.Yüzde 2 TiH_2 içeren öncünün 750 °C'de üretimi



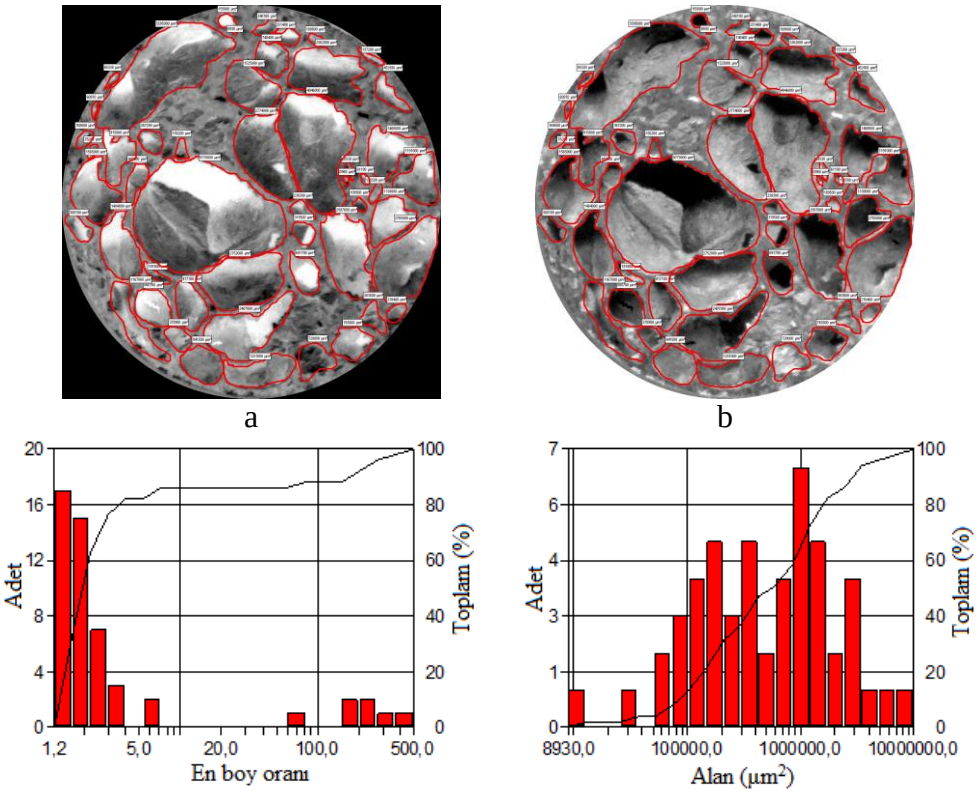
Tablo D.9.Yüzde 0,5 TiH_2 içeren öncünün 800 °C'de üretimi



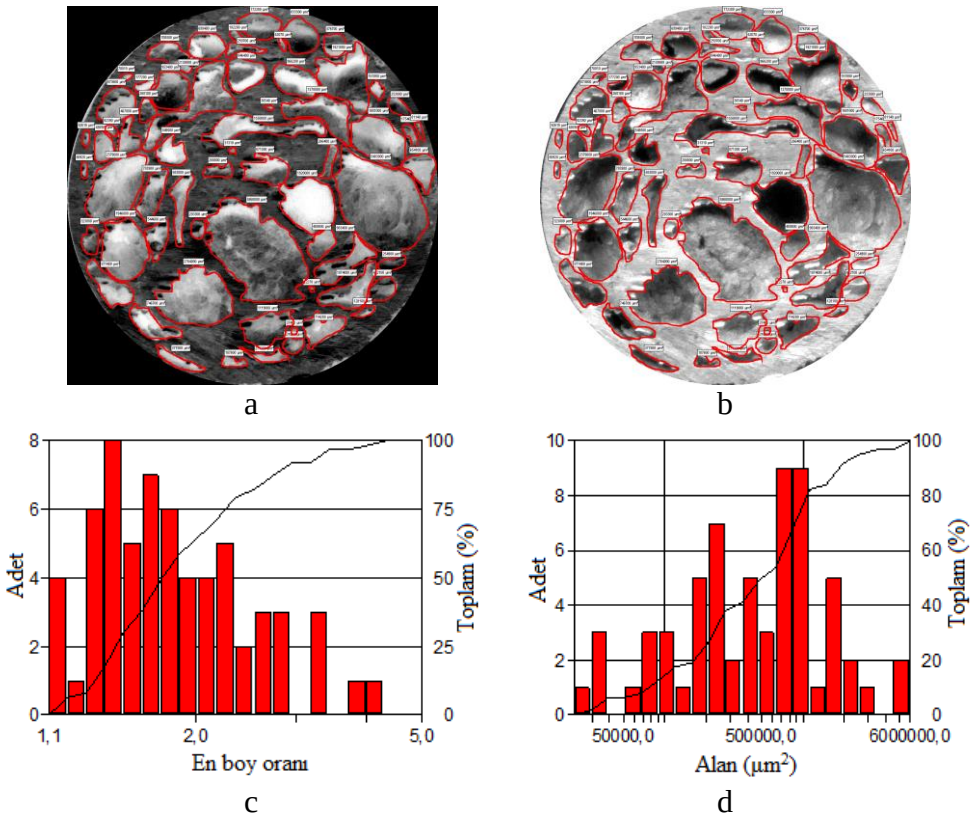
Tablo D.10.Yüzde 1 TiH_2 içeren öncünün 800 °C'de üretimi



Tablo D.11.Yüzde 1,5 TiH_2 içeren öncünün 800 °C'de üretimi

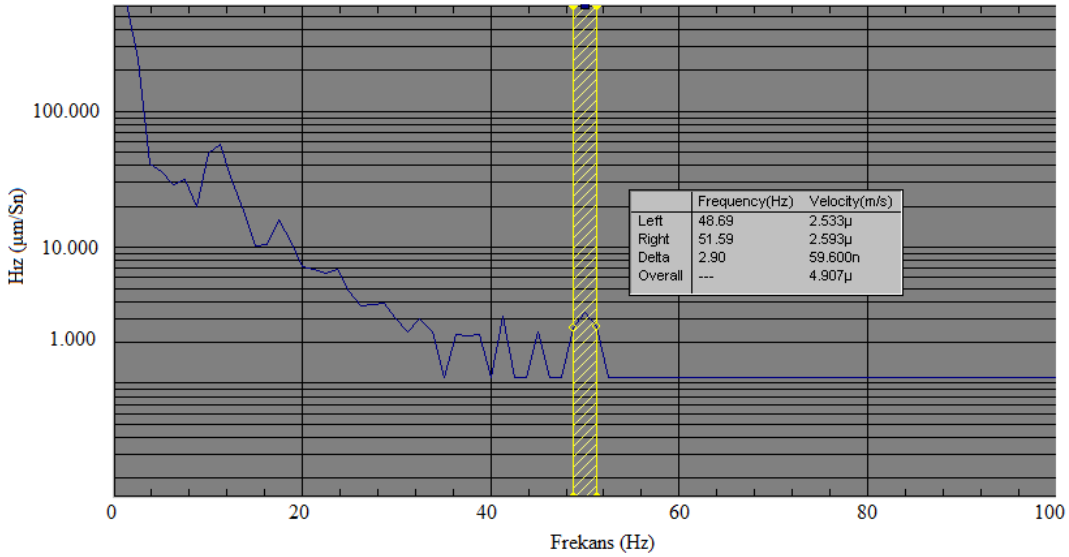


Tablo D.12.Yüzde 2 TiH_2 içeren öncünün 800 °C'de üretimi

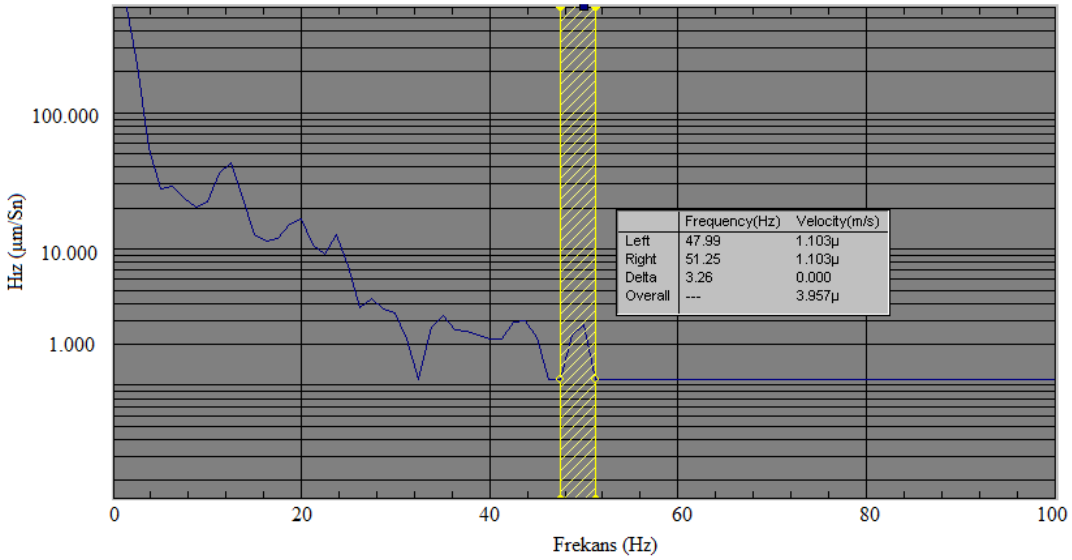


Ek-E Sönümleme analizleri

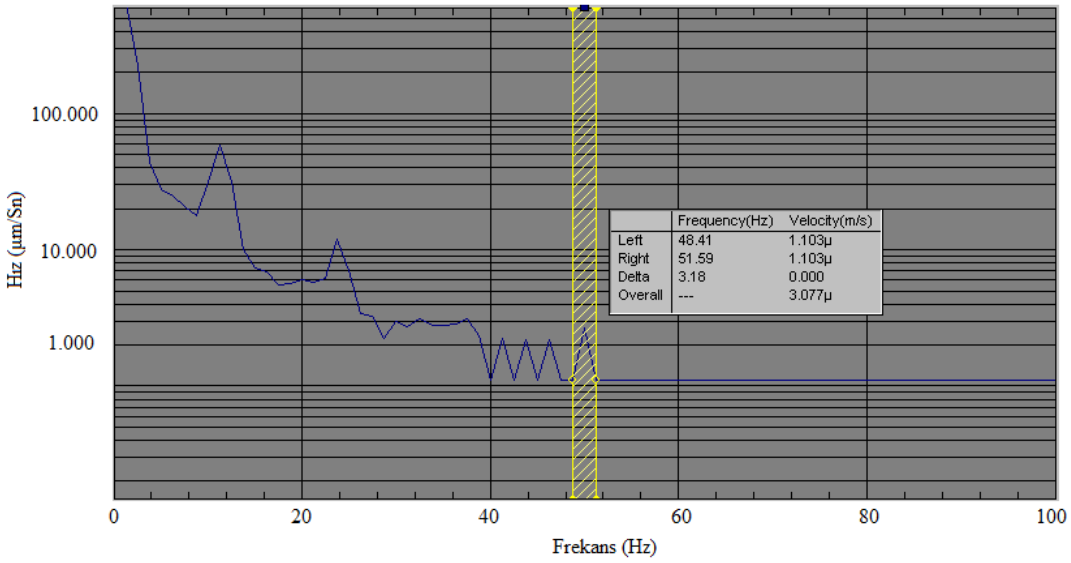
Tablo E.1. Birinci numune birinci ölçüm grafiği



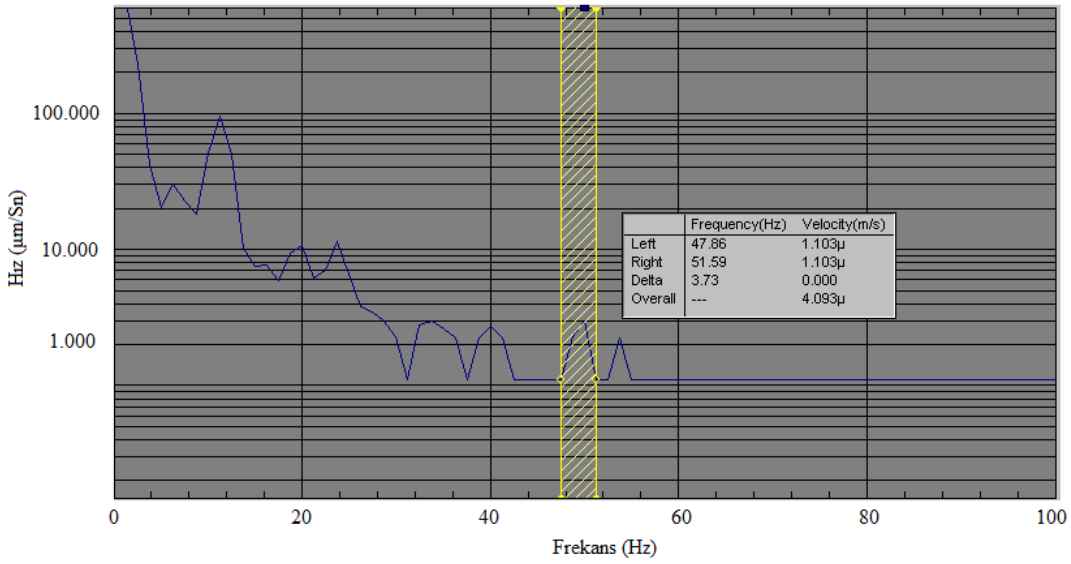
Tablo E.2. Birinci numune ikinci ölçüm grafiği



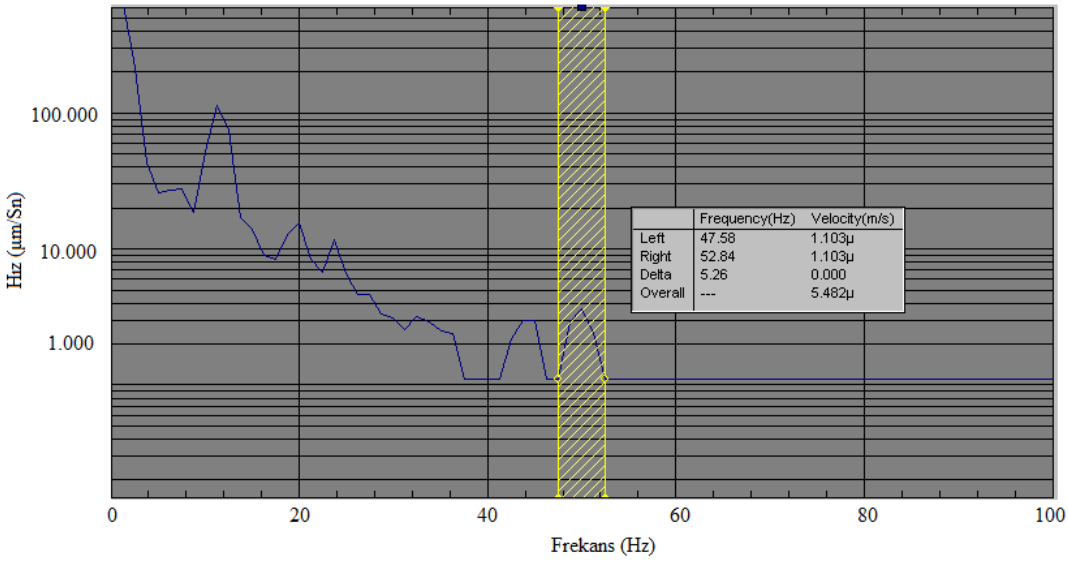
Tablo E.3. Birinci numune üçüncü ölçüm grafiği



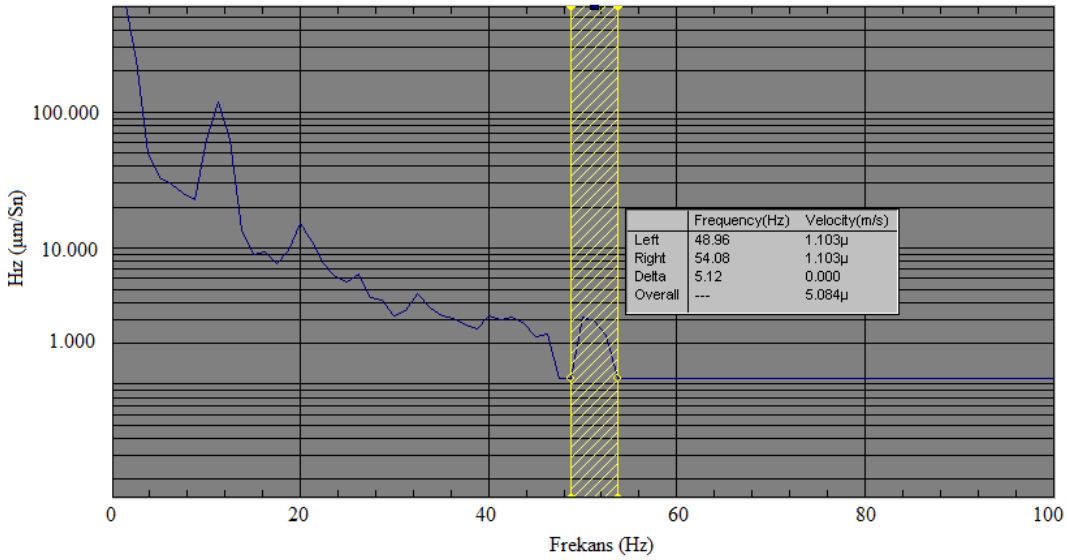
Tablo E.4. Birinci numune dördüncü ölçüm grafiği



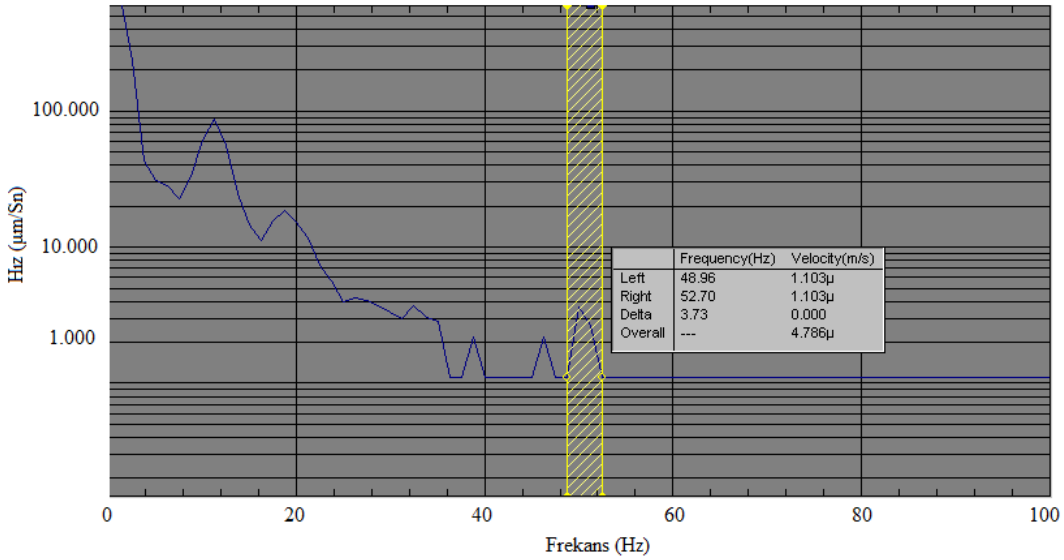
Tablo E.5. Birinci numune beşinci ölçüm grafiği



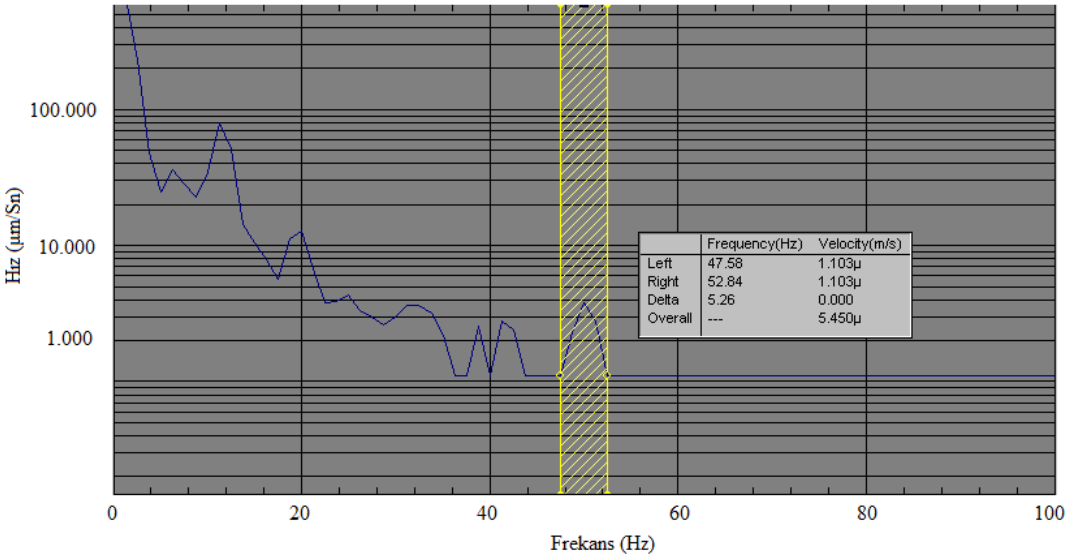
Tablo E.6. İkinci numune birinci ölçüm grafiği



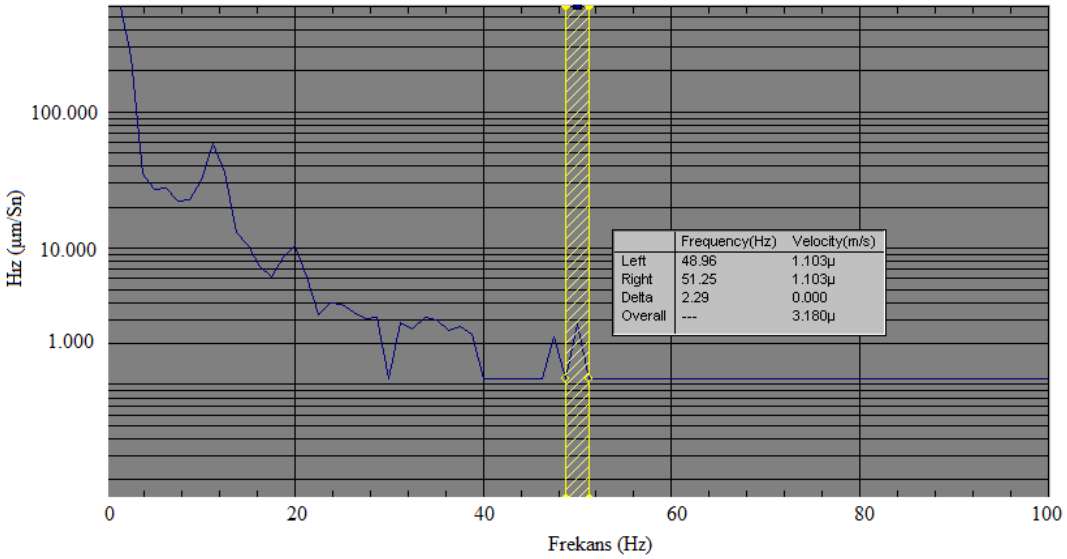
Tablo E.7. İkinci numune ikinci ölçüm grafiği



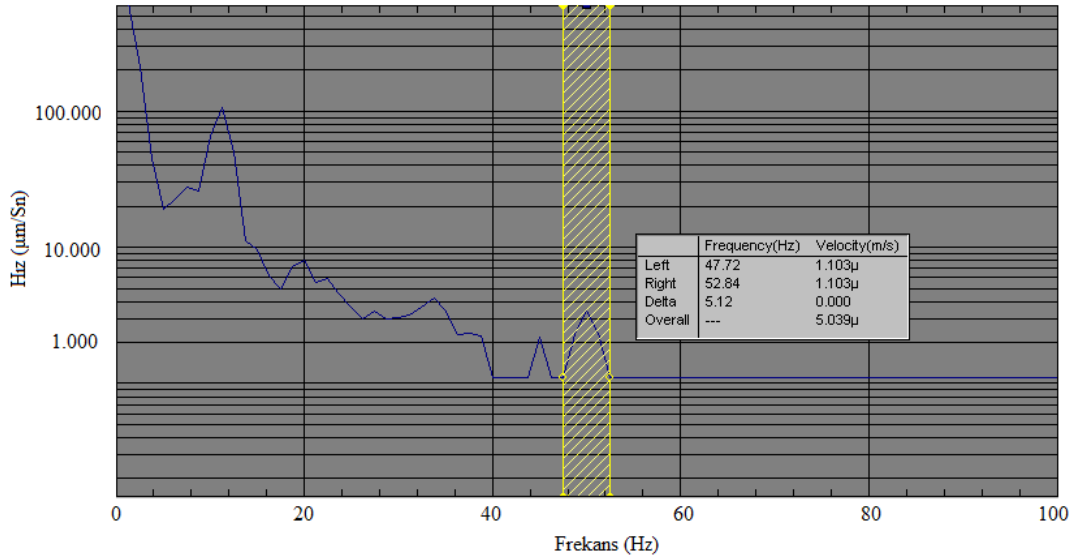
Tablo E.8. İkinci numune üçüncü ölçüm grafiği



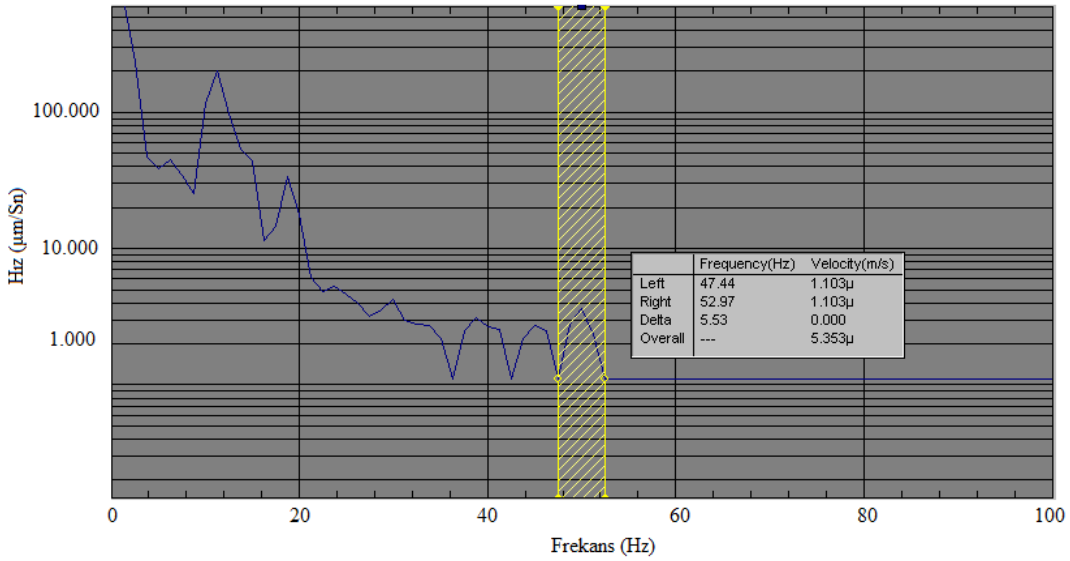
Tablo E.9. İkinci numune dördüncü ölçüm grafiği



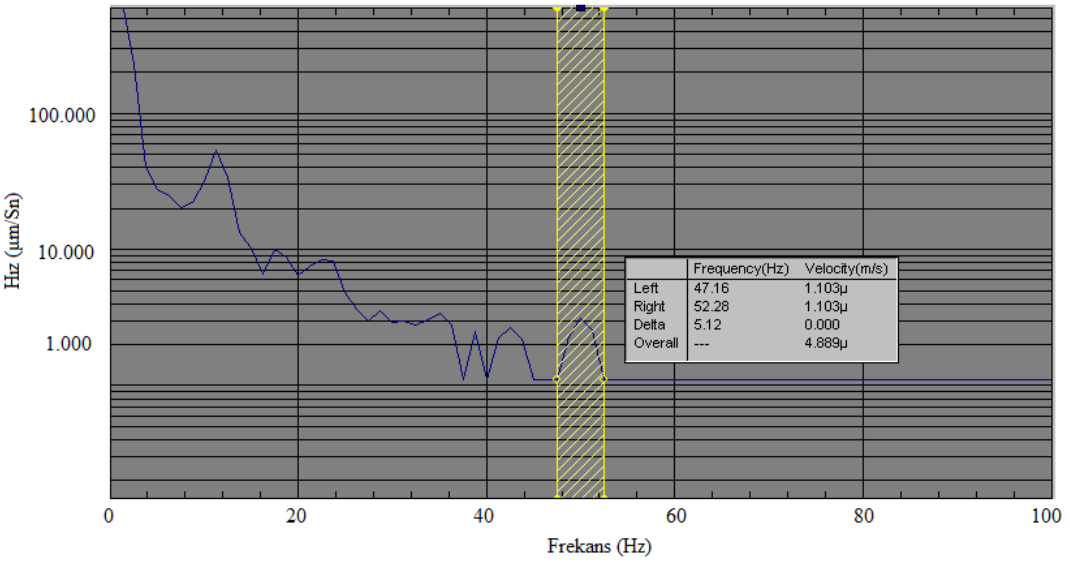
Tablo E.10. İkinci numune beşinci ölçüm grafiği



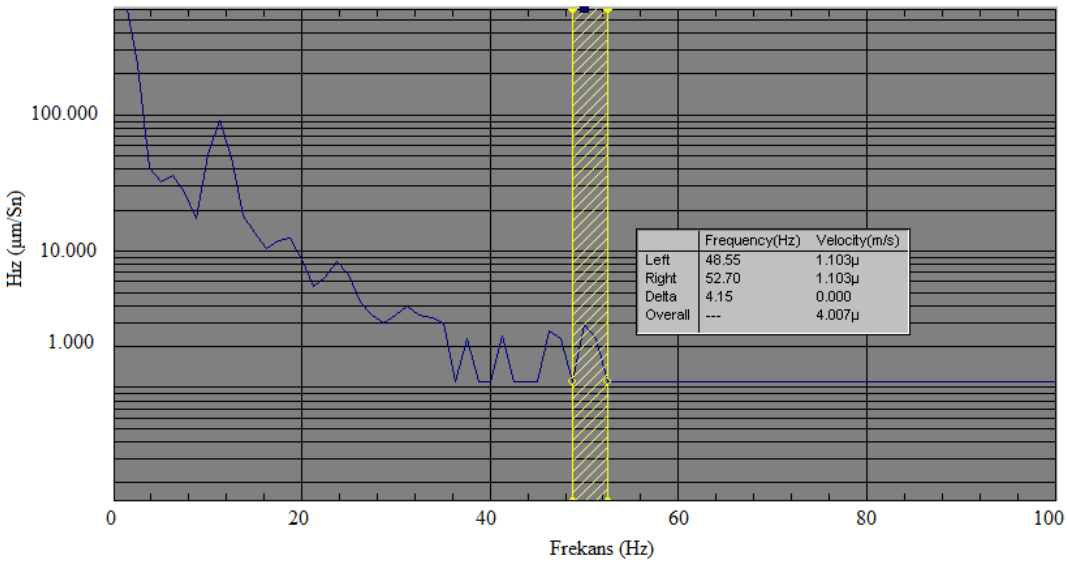
Tablo E.11. Üçüncü numune birinci ölçüm grafiği



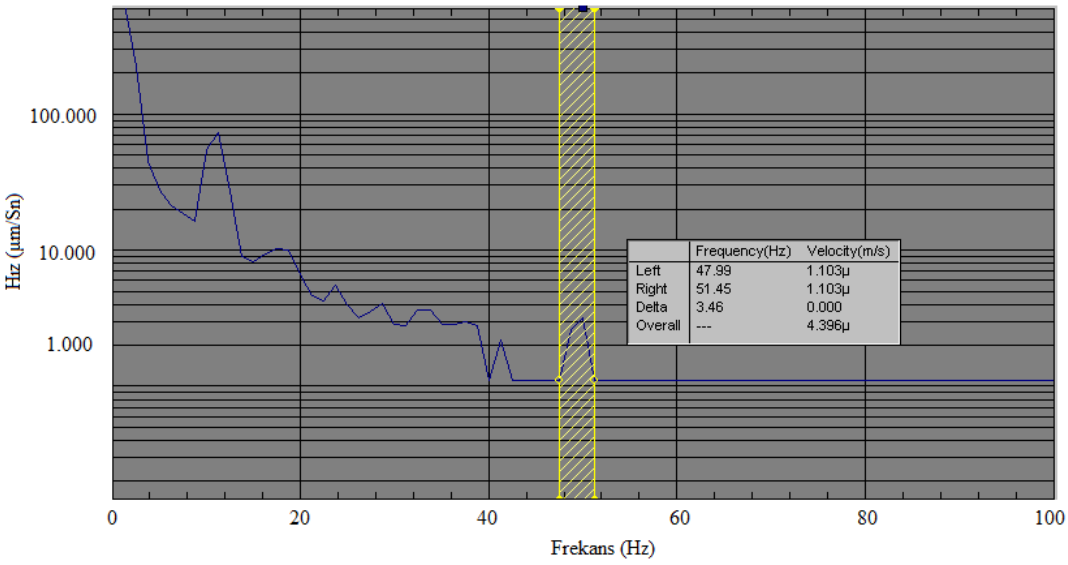
Tablo E.12. Üçüncü numune ikinci ölçüm grafiği



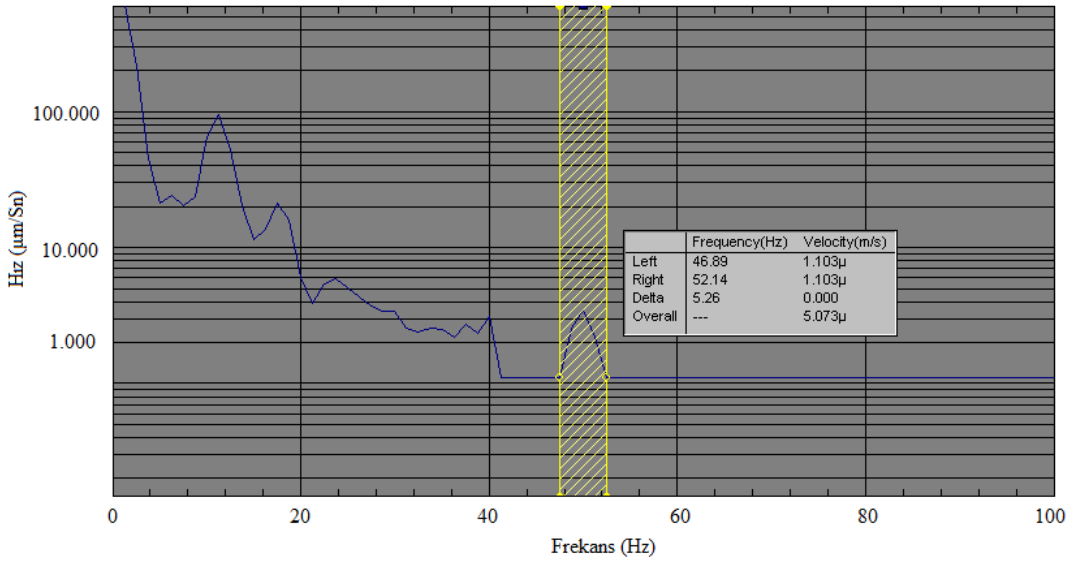
Tablo E.13. Üçüncü numune üçüncü ölçüm grafiği



Tablo E.14. Üçüncü numune dördüncü ölçüm grafiği



Tablo E.15. Üçüncü numune beşinci ölçüm grafiği



KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

[1] Arıcı A. A., **Ertürk A. T.,** Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen polietilen levhalarda kaynak bölgesi özelliklerinin belirlenmesi, *Prooceedings of 8th International Fracture Conference*, Istanbul, Turkey, 7-9 November 2007.

[2] **Ertürk A. T.**, Şahin T., Effect of different corrosion environment on thermal properties of polyethylene filled calcium carbonate materials, *12th Intenational Materials Symposium*, Denizli, Turkey, 15-17 October 2008.

[3] **Ertürk A. T.**, Takviye edici katkı maddelerinin poliolefin malzemelerin yapısı ve özellikleri üzerine etkileri, *Pagev Plastik Dergisi*, 2008, **102**, 92-96.

[4] **Ertürk A. T.**, Şahin T., Kalsiyum karbonat katkılı polietilen malzemelerde yönlendirmeye bağlı termal özelliklerin değişimi, *Pagev Plastik Dergisi*, 2008, **100**, 242-244.

[5] **Ertürk A. T.**, K. Ural, Metalik köpükler ve alüminyum, *Metal Makina*, 2011, **4**, 110-112.

[6] **Ertürk A. T**., Sahin T., Fracture behaviour of calcium carbonate filled polyethylene, *KGK-Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 2011, **64**(5), 25-29.

[7] Karabay S., Güven E. A., **Ertürk A. T.**, Trapezoidal tip ACSR/TW & ACSS/TW iletkenler ve üretim parametreleri, *Metal Dünyası*, 2011, **218**, 106-113.

[8] Karabay S., Güven E. A., **Ertürk A. T.**, Orta ve yüksek gerilim enerji kablolarında çok telli alüminyum iletkenlerinin soğuk haddeleme işleminde ovallik sorunu ve önlenmesi, *Metal Dünyası*, 2011, **220**, 96-100.

[9] Karabay S., **Ertürk A. T.**, Güven E. A., Ekstrüzyon mamullerinde eloksal sonrası görülen bantlı yapıların nedenleri, *Metal Dünyası*, 2011, **221**, 106-109.

[10] Türker M., Güven E. A., **Ertürk A. T.**, Ultrasonik yöntem ile tahribatsız malzeme muayenesi, *Metal Dünyası*, 2011, **222**, 108-115.

[11] Türker M., **Ertürk A. T.**, Güven E. A., Metalik malzemelerin ultrasonik yöntem ile muayenelerinde karşılaşılan saçılma kayıpları, *Metal Dünyası*, 2011, **223**, 75-77.

[12] Karabay S., **Ertürk A. T.**, Güven E. A., Transmisyon hatlarını koruyan opgw konstrüksiyonları ve yıldırım düşmelerine karşı tasarım kriteri, *Metal Dünyası*, 2012, **226**, 72-77.

[13] Karabay S., Güven E. A., **Ertürk A. T.**, Transmisyon hatlarında kullanılan çelik telli mamüllerin rotary ekstrüzyon yöntemiyle ömürlerinin artırılması, *Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 2-4 Nisan 2012.

[14] Güven E. A., **Ertürk A. T.**, Ölçen M., EN AW-2014 alüminyum alaşımının yarı-katı fazda mikroyapı ve küreselleşme karakteri, *Metal Dünyası*, 2012, **231**, 78-81.

[15] **Ertürk A. T.**, Şahin T., Kılavuz İ., Güven E. A., Deniz suyunun kalsiyum karbonat katkılı polietilen malzemeler üzerindeki korozif etkisi, *Pagev Plastik Dergisi*, 2012, **121**, 160-164.

[16] Karabay S., Güven E. A., **Ertürk A. T.**, Performance testing of an optical ground wire composites designed and manufactured for transmission lines and telecommunication systems, *20th Jubilee Conference On Materials and Technology*, Portoroz, Slovenia, 17-19 October 2012.

[17] **Ertürk A. T.**, Şahin T., Foaming characteristics control via tubular die length of aluminum foam, *20th Jubilee Conference On Materials and Technology*, Portoroz, Slovenia, 17-19 October 2012.

[18] Karabay S., Güven E. A., **Ertürk A. T.,** Enhancement on Al-Mg-Si alloys against failure due to lightning arc occurred in energy transmission lines, *Engineering Failure Analysis*, 2013, **31**, 153-160.

[19] Karabay S., Güven E. A., **Ertürk A. T.**, Performance testing of an optical ground wire composites, *Materiali In Tehnologije*, 2013, **47**, 119-125.

[20] **Ertürk A. T.**, Şahin T., The distribution of analysis of aluminum and TiH_2 powders in the powder metallurgy foaming process, *International Porous and Powder Materials Symposium Exhibition*, Izmir, Turkey, 3-6 September 2013.

ÖZGEÇMİŞ

Alpay Tamer Ertürk 1981 yılında Isparta ilinde dünyaya gözlerini açmıştır. İlk ve ortaöğrenimini sırasıyla Isparta ili Selçuklu İlköğrenim Okulu, Isparta Gülbirlik Orta Okulu ve Isparta Gazi Lisesi'nde tamamlayarak mesleki hayatının temellerini attığı Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü lisans eğitimine başlamıştır. Lisans mezuniyeti sonrası Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'ne 2005 yılında araştırma görevlisi olarak kabul edilmiştir. Mühendislik Fakültesi'nden mezuniyeti sonrası görmüş olduğu eğitim ve kendisine kattığı hayat görüşü Ertürk'ü akademik eğitimine devam etmeye sevk etmiştir. Bu düşünceyle Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği A.B.D.'da yüksek lisans öğrenimine başlayarak 2008 yılında Makine Yüksek Mühendisi olarak mezun olmuştur. ERTÜRK aynı birimde doktora eğitimine devam etmektedir.