KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YER TUTUCU METODU İLE METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ VE UYGULAMAYA YÖNELİK TASARIM

İSMET AYDIN

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YER TUTUCU METODU İLE METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ VE UYGULAMAYA YÖNELİK TASARIM

İSMET AYDIN

Yrd.Doç.Dr. Alpay Tamer ERTÜRK Danışman,	Kocaeli Üniversitesi	.....
Prof.Dr. Levon Jozef ÇAPAN Jüri Üyesi,	İstanbul Arel Üniversitesi	.....
Yrd.Doç.Dr. Ersin Asım GÜVEN Jüri Üyesi,	Kocaeli Üniversitesi	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 30.06.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, geleceğin malzemelerinden biri olarak görülen metalik köpüklerin daha iyi anlaşılabilmesi, teknolojide ki yaygın kullanımının geliştirilmesi ve Türkiye'de endüstriyel üretimi bulunmayan bu yeni malzeme sınıfının olgunlaşmasında dünyanın gerisinde kalmamak adına bilimsel bulgu üretilmesi arzulanmıştır.

Tez çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübesini esirgemeyen, kendisinden çok şey öğrendiğim değerli danışman hocam Yrd.Doç.Dr. Alpay Tamer ERTÜRK'e teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tez sırasında çok önemli yardımlarını gördüğüm arkadaşım Mak. Müh. Süleyman ŞİŞMAN'a en samimi teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmaya laboratuvar desteği sağlayan Ford Otosan İhsaniye MYO yönetim kuruluna teşekkür ederim.

Son olarak da bugünlere gelebilmem için beni yetiştiren, gösterdikleri sabır ve her türlü destek için sevgili Babama, Anneme, her iki kardeşime ve yıllarca benim yanımda olan bütün dostlarıma en yürekten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Haziran - 2016 İsmet AYDIN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii
ÖZET ix
ABSTRACT x
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 3
1.1. Metalik Köpükler ve Hücresel Malzemeler 3
1.2. Metalik Köpük Üretim Yöntemleri 4
1.2.1. Ergiyik metal içerisine gaz enjeksiyonu yöntemi ile metalik köpük üretimi 5
1.2.2. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi yöntemi ile metalik köpük üretimi 7
1.2.3. Formgrip yöntemi ile metalik köpük üretimi 9
1.2.4. Toz metalürjisi yöntemi ile metalik köpük üretimi 10
1.2.5. Yer tutucu yöntemi ile metalik köpük üretimi 12
1.3. Metalik Köpüklerin Kullanım ve Uygulama Alanları 14
1.3.1. Otomotiv endüstrisi 14
1.3.2. Hava ve uzay endüstrisi 17
1.3.3. İntegral zırh malzemesi olarak metalik köpükler 17
1.3.4. Hafif yapılar 18
1.3.5. Metalik köpüklerin fonksiyonel uygulamaları 18
2. METALİK KÖPÜKLERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ 21
2.1. Metalik Köpüklerin Mekanik Özellikleri 21
2.1.1. Metalik köpüklerin non-lineer deformasyon davranışları 21
2.1.2. Metalik köpüklerin enerji sönümleme davranışları 22
2.2. Metalik Köpüklerin Matematiksel Modellenmesi 23
2.3. Metalik Köpüklerin Geometrik Modellenmesi 27
2.3.1. Bilgisayarlı mikrotomografi 28
2.3.2. Geometrik modellemenin sonlu elemanlar yöntemine adaptasyonu 29
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 32
3.1. Malzeme ve Metot 33
3.2. Deney Düzeneği 36
3.3. Numunelerin Hazırlanması 38
3.4. Yoğunluk Ölçümü 39
3.5. Mikroyapı Analizleri 40
3.6. Sertlik Testleri 41
3.7. Basma Testleri 42

3.8. Mikro-CT Tarama 43
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME 45
4.1. Metalik Köpük Üretimi Ön Deneme Çalışmaları 45
4.2. Numune Kesitleri 46
4.3. Gözenek Morfolojisi 48
4.4. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları 55
4.5. Sertlik Ölçüm Sonuçları 56
4.6. Basma Testi Sonuçları 57
4.7. X-ray Analizleri 59
4.8. Mikroyapı İncelemeleri 61
4.9. Mikro-CT Analizleri 64
4.10. Uygulamaya Yönelik Tasarım 68
4.11. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Alüminyum Köpük Malzeme Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 70
4.11.1. Deform-3D analiz sonuçları 71
4.11.2. Msc marc mentat analiz sonuçları 78
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 84
KAYNAKLAR 87
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 91
ÖZGEÇMİŞ 92

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Farklı hücresel metaller; (a) alüminyum metalik köpük, (b) demir esaslı hücresel metal, (c) metal sünger formunda sinterlenmiş bronz tozu, (d) alüminyum sünger, (e) nikel sünger 3
Şekil 1.2. Gözenek morfolojileri (a) açık hücreli alüminyum köpüğün SEM görüntüsü, (b) kapalı hücreli alüminyum köpüğün fotoğrafik görüntüsü 4
Şekil 1.3. Metalik köpüklerin üretim yöntemleri 5
Şekil 1.4. Ergiyik metal içerisine gaz enjeksiyonu yöntemi ile metalik köpük üretimi 6
Şekil 1.5. Gaz enjeksiyonu yöntemiyle üretilmiş iki farklı yoğunluk ve hücre boyutuna sahip metalik köpük 7
Şekil 1.6. Köpürtücü madde ilavesiyle elde edilen metalik köpük gözenek morfolojisi 8
Şekil 1.7. Köpürtücü madde ilavesiyle metalik köpük üretimi yönteminin şematik gösterimi 8
Şekil 1.8. Formgrip yöntemiyle metalik köpük üretim aşamaları 9
Şekil 1.9. Formgrip yöntemiyle üretilmiş metalik köpük yapısı 10
Şekil 1.10. Toz metalürjisi yöntemiyle metalik köpük üretim aşamaları 11
Şekil 1.11. TiH_2 köpük içerisinde zamana bağlı davranışı 11
Şekil 1.12. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş alüminyum esaslı metalik köpük 12
Şekil 1.13. Yer tutucu yöntemiyle metalik köpük üretim aşamaları 13
Şekil 1.14. Yer tutucu yöntemiyle üretilmiş alüminyum metalik köpük morfolojisi 13
Şekil 1.15. Metalik köpüklerin gözenek yapısı ve uygulama alanlarına göre sınıflandırılması 14
Şekil 1.16. Metalik köpüklerin otomotiv endüstrisinde kullanım amaçları 15
Şekil 1.17. Metalik köpüklerin otomotiv endüstrisinde kullanım yerleri 15
Şekil 1.18. Çarpışma kutusu örneği 16
Şekil 1.19. Motor montaj kelepçesi soldan sağa; boş döküm, alüminyum köpük doldurulmuş yekpare parça, kesit görüntü 16
Şekil 1.20. Uzay endüstrisinde alüminyum köpük kullanım yerleri 17
Şekil 1.21. Cymat alüminyum köpüğün integral zırh malzemesi olarak patlama performansı 18
Şekil 1.22. Alüminyum sandviç panel ile üretilmiş kaldırma kolu 18
Şekil 1.23. Farklı gözenek boyutlarına sahip alüminyum sünger 19
Şekil 1.24. Alüminyum köpük susturucular 19
Şekil 1.25. Metalik köpük ısı değiştiriciler 20
Şekil 2.1. Metalik köpüklerin deformasyon bölgeleri 22
Şekil 2.2. Metalik köpüklerde ve metal malzemede sönümlenen enerjinin karşılaştırılması 23

Şekil 2.3. Açık hücreli basit köpük modeli (a) model parametreleri, (b) üç boyutlu model görünüşü 23
Şekil 2.4. (a) açık hücreli köpük modeli, (b) deformasyon altındaki köpük davranışı 24
Şekil 2.5. Kelvin hücre modeli 26
Şekil 2.6. (a) karakteristik hücre kenarı, (b) kiriş kesit alanının uzunluk ile değişimi 27
Şekil 2.7. X-ray ile bilgisayarlı tomografi şematik gösterimi 28
Şekil 2.8. Mikro-CT metodunun işlem basamakları 29
Şekil 2.9. Al köpük CAD modeli (a) alporas, (b) alulight 29
Şekil 2.10. Miedzinska ve Szymczyk tarafından yapılan numerik modelleme çalışması 30
Şekil 2.11. Farklı deformasyon altında açık hücreli nikel köpüğün Von Mises gerilme değişimleri (a) 0,00002 mm, (b) 0,0001 mm, (c) 0,004 mm yer değiştirme altında modelleme sonuçları 31
Şekil 3.1. Vakum döküm proses akış şeması 32
Şekil 3.2. Alüminyum alaşım serileri ısı işlem kabiliyetleri 33
Şekil 3.3. Alüminyum seri numaralandırılması 34
Şekil 3.4. (a) deney düzeneği fırın tertibatı, (b) döküm kalıpları tasarım kesit görünümü 37
Şekil 3.5. Ultrasonik temizleme cihazı 38
Şekil 3.6. Microcut hassas kesme makinesi 39
Şekil 3.7. Hassas kesme sırasında köpük görünümü 39
Şekil 3.8. Hassas tartı kütle ölçümü 40
Şekil 3.9. Nikon SMZ-745T stereo mikroskop 41
Şekil 3.10. Vickers sertlik cihazı 42
Şekil 3.11. Dartec üniversal test makinesinde basma deneyi 43
Şekil 3.12. Tübitak MAM, Malzeme Enstitüsü bilgisayarlı tomografi cihazı 44
Şekil 4.1. Yetersiz akma sonucu oluşmuş numuneler 45
Şekil 4.2. Proses sonrası köpük görüntüsü (TS2) 46
Şekil 4.3. Proses sonrası köpük görüntüsü (TS3) 46
Şekil 4.4. Farklı seriler için alüminyum metalik köpük kesit görüntüsü (a) TS1, (b) TS2, (c) TS3 47
Şekil 4.5. Çözdürme öncesi alüminyum köpük 48
Şekil 4.6. TS1 serisi numuneleri için 0,67x optik görüntüleri 49
Şekil 4.7. TS1 serisi numuneleri için 20x optik görüntü 50
Şekil 4.8. TS2 serisi numuneleri için 0,67x optik görüntü 51
Şekil 4.9. TS2 serisi numuneleri için 20x optik görüntü 52
Şekil 4.10. TS3 serisi numuneleri için 0,67x optik görüntü 53
Şekil 4.11. TS3 serisi numuneleri için 20x optik görüntü 54
Şekil 4.12. TS1 serisinin çözdürme öncesi 10x optik görüntüsü 55
Şekil 4.13. Sertlik değerlerinin mikroskop altındaki görünümü (a) esas malzeme, (b) TS1, (c) TS2, (d) TS3 56
Şekil 4.14. TS1 serisine ait gerinme-gerilme eğrisi 58
Şekil 4.15. TS2 serisine ait gerinme-gerilme eğrisi 58
Şekil 4.16. TS3 serisine ait gerinme-gerilme eğrisi 59
Şekil 4.17. TS1 serisi X-ray görüntüsü 60
Şekil 4.18. TS2 serisi X-ray görüntüsü 60
Şekil 4.19. TS3 serisi X-ray görüntüsü 61

Şekil 4.20. Sem mikroyapı görüntüsü 61
Şekil 4.21. 3 noktada yapılan EDS analiz sonuçları 62
Şekil 4.22. SEM mikroyapı görüntüsü 63
Şekil 4.23. 2 noktada yapılan EDS analiz sonuçları 63
Şekil 4.24. TS1 serisi tomografik görüntüsü 64
Şekil 4.25. TS2 serisi tomografik görüntüsü 64
Şekil 4.26. TS3 serisi tomografik görüntüsü 65
Şekil 4.27. Seg3D program ara yüzü ve TS1 seri görüntüsü 66
Şekil 4.28. ImageVis3D program ara yüzü ve TS2 seri görüntüsü 67
Şekil 4.29. Autodesk Meshmixer program ara yüzü ve TS3 seri görüntüsü 67
Şekil 4.30. Materialise 3-matic programı ara yüzü 68
Şekil 4.31. Volkswagen Golf şasi görünümü 69
Şekil 4.32. Çarpışma kutusu tasarımı 69
Şekil 4.33. Analizlerde kullanılan köpük geometrik modelleri (a) TS1, (b) TS2, (c) TS3 70
Şekil 4.34. TS1 serisine ait sonlu elamanlar analiz modelleri ve kontak çiftleri 71
Şekil 4.35. TS1 serisi basma yönündeki deformasyon davranışı 71
Şekil 4.36. TS1 serisinin %50 deformasyon altındaki davranışı 72
Şekil 4.37. TS1 serisi %50 deformasyon altındaki gerinme dayanımı 72
Şekil 4.38. TS2 serisi %50 deformasyon altındaki gerinme dayanımı 73
Şekil 4.39. TS3 serisi %50 deformasyon altındaki gerinme dayanımı 74
Şekil 4.40. %50 deformasyon altındaki seri gerilme dağılımı (a) TS1, (b) TS2, (c) TS3 75
Şekil 4.41. %50 deformasyon altındaki yükleme değerleri (a) TS1, (b) TS2, (c) TS3 76
Şekil 4.42. TS1 serisi gerilme-gerinme grafiği 77
Şekil 4.43. TS2 serisi gerilme-gerinme grafiği 77
Şekil 4.44. TS3 serisi gerilme-gerinme grafiği 78
Şekil 4.45. TS1 serisi basma testi analizi deplasman görünümü 78
Şekil 4.46. TS2 serisi basma testi analizi deplasman görünümü 79
Şekil 4.47. TS3 serisi basma testi analizi deplasman görünümü 79
Şekil 4.48. Deneysel verilerin MSC Marc Mentat'a entegrasyonu 80
Şekil 4.49. TS2 serisi %50 deformasyon altındaki gerinme dağılımı 80
Şekil 4.50. TS2 serisi %50 deformasyonda yükleme kuvveti değerleri 81
Şekil 4.51. TS2 serisi gerilme-gerinme grafiği 81
Şekil 4.52. TS3 serisi %50 deformasyon altındaki gerinme değerleri 82
Şekil 4.53. TS3 serisi %50 deformasyon altındaki z yönündeki yükleme kuvveti değerleri 82
Şekil 4.54. TS3 serisi gerilme-gerinme grafiği 83

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Alüminyum seri tanımları 34
Tablo 3.2. 6082 alaşımının kimyasal özellikleri..... 35
Tablo 3.3. 6082 alaşımının mekanik özellikleri 35
Tablo 3.4. 6082 alaşımının fiziksel özellikleri 35
Tablo 3.5. Deney serilerinin içerikleri..... 36
Tablo 4.1. Numune yoğunlukları ve göreceli yoğunlukları..... 55
Tablo 4.2. Numune serileri sertlik ölçümleri..... 57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ρ^* : Köpük yoğunluğu, (kg/m^3)
ρ_s : Matris malzeme yoğunluğu, (kg/m^3)
E^* : Köpük elastiklik modülü, (N/mm²)
E_s : Matris malzeme elastisitesi, (N/mm²)
δ : Deformasyon
σ_f : Köpük akma gerilmesi, (N/mm²)
σ_s : Matris malzeme akma gerilmesi, (N/mm²)

Kısaltmalar

IFAM : Fraunhofer Institute for Advanced Materials (Fraunhofer Malzeme Araştırma Merkezi)
MAM : Tübitak Marmara Araştırma Merkezi
NaCl : Sodyum Klorür
SCI : Scientific Computing And Imaging (Bilimsel Bilgi İşlem Ve Görüntüleme)

YER TUTUCU METODU İLE METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ VE UYGULAMAYA YÖNELİK TASARIM

ÖZET

Bu çalışma, yer tutucu metodu ile alüminyum metalik köpük üretim yöntemine dair temel esasları, deneysel çalışmaları, bilgisayarlı modelleme ve endüstriyel uygulamaya yönelik bir çalışma örneğini kapsamaktadır. Ayrıca alüminyum metalik köpüklerin basma davranışları incelenmiş, matematiksel modellenmesi yapılmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle basma dayanımları simüle edilerek mekanik özellikleri açıklanmıştır. Deneysel çalışmalarda, yer tutucu malzeme olarak NaCl partikülleri kullanılmış, akabinde suda çözdürülerek açık hücreli alüminyum metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 3 farklı NaCl partikül boyutuna göre metalik köpüklerin mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Yapılan mikro incelemeler ve mekanik testler neticesinde alüminyum metalik köpüklerin matematiksel modellenmesi ve sonlu elemanlar yöntemiyle elastiste modulünün tespiti üzerine yaklaşım geliştirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda açık hücreli metalik köpüklerin matematiksel modellemesinde kullanılan elastisite modülü için sonlu elemanlar yönteminde kullanılmak üzere düzeltme katsayısı gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum Köpük, Matematiksel Modelleme, Metalik Köpük, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Yer Tutucu Metodu.

PRODUCTION OF METALLIC FOAM WITH SPACE HOLDER METHOD OF APPLICATION DESIGN

ABSTRACT

This study involves the basic principles of metal foam manufacturing with space holder method, experimental studies, computerized modeling and also a sample study for industrial application. This study also includes the analysis of aluminum metal foam's compression behavior, its mathematical modeling was performed and a simulation was made in order to explain the compression resistance with the finite elements method. In experimental studies, NaCl particles were used as a space holder material. Open cell aluminum metal foam production was made possible after dissolving the particles in water. Furthermore, the changes in the mechanical properties of metal foam were examined according to different NaCl particle sizes. After micro examinations and mechanical tests, the aim was to determine an approach to the young module with the help of mathematical modeling of aluminum metal foam and the finite element method. In accordance with the obtained result, it was concluded that a fixing coefficient is required for finite elements method which is used for young modules in the open cell metallic foam's mathematical modeling.

Keywords: Aluminum Foam, Mathematical Modeling, Metal Foam, Finite Elements Method, Space Holder Method.

GİRİŞ

Gelişen teknoloji doğrultusunda düşük yoğunluklu ve yüksek mekanik özelliklere sahip malzemelere olan ihtiyacın artması, araştırmacıları sürekli bir arayış içerisine itmektedir. Gözenekli malzemeler ise bu hususta mühendislik malzemeleri içerisinde önemli bir yere sahiptir [1].

Metalik köpükler, köpük görünümlü gözenekli bir yapıya sahip metal malzemelerden imal edilmiş endüstriyel mamullerdir. Darbe yönünden bağımsız enerji sönümleme özelliği, kendine özgü lineer olmayan deformasyon davranışları, düşük özgül ağırlık ve yüksek rijitlik gibi mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde son yıllarda oldukça önem kazanmış yeni bir malzeme sınıfıdır. Bu malzemelerin yapısal kullanım alanları arasında otomotiv, demiryolu, gemi ve uzay endüstrileri ile biyomedikal uygulamalar gelmektedir. İşlevsel uygulamalar arasında ise filtreleme, ısı dönüştürücüleri ve soğutma sistemleri gibi uygulamalar sayılabilir [2].

Metalik köpükler ile ilgili ilk yazılı çalışma, 1948 yılında Benjamin Sosnick tarafından cıva ile alüminyum köpük üretimi üzerine yapılmıştır [3]. John Elliot 1961'de aynı metodu tekrarlayarak metalik köpüğü üretmiştir [4]. 1963 yıllında ise United Aircraft Corporation firması tarafından patenti alınan köpürtücü ajan kullanılarak metalik köpük üretim yöntemini geliştirilmiştir [5]. Daha sonra birçok üretim yöntemi geliştirilmiş olsa da üretim tekniklerinin karmaşık ve pahalı olması, tasarımın uygunsuzluğu, tekrar edilebilirliğin düşük olması, test prosedürlerinin eksikliği gibi nedenlerden dolayı yapılan çalışmalar akademik düzeyden öteye gidememiştir [6,7]. 2000 yılında metalik köpüklerin üretim ve özellikleri hakkında Gibson ile Ashby tarafından kullanım kılavuzu hazırlanmış ve bu yapılara olan araştırmalar gelişen teknolojinin getirisi olarak büyük oranda ivme kazanmıştır [2].

Metalik köpük üretimini alüminyum, çelik, titanyum, bakır, nikel, magnezyum, altın ve çinko gibi metaller ve alaşımları ile yapılabilmektedir. Özellikle alüminyum ve alaşımları düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci, diğer metallere nazaran üretim

kolaylığı ve uygun maliyet gibi karakteristik nitelikleri sebebiyle daha fazla tercih edilmektedir [8,9].

Bu çalışmada, yer tutucu metodu ile alüminyum köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Fiziki testlerin yanında bilgisayar ortamında modellemesi ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizler yapılmıştır. Yapılan çalışmada sıkıştırılmış NaCl partikülleri kullanılarak elde edilen metalik köpüklere basma testi uygulanıp basma davranışları ele alınmış, ayrıca Msc Marc-Mentat ve Deform-3D programları ile yapılan sonlu elemanlar analizlerinde basma kuvveti altında davranışı modellenmiş ve simüle edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve farklılıklar incelenmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

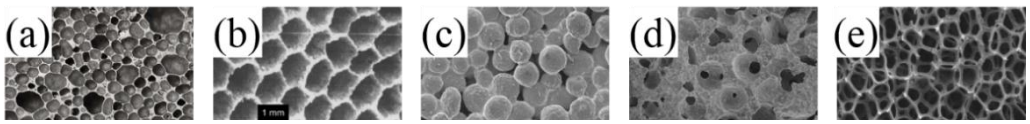
1.1. Metalik Köpükler ve Hücresel Malzemeler

Doğada bulunan kemik, ahşap, mantar ve sünger gibi gözenekli yapılar hem yapısal hem de fonksiyonel amaçlar için kullanılır. İnsanoğlu, varoluşundan itibaren yüzyıllardır doğayı taklide yönelmiş ve doğal gözenekli malzemeleri değişik amaçlarlar için kullanmıştır. Günümüzde bazı mühendislik problemleri de gözenekli malzemeler kullanılarak çözülmüştür [10].

"Metalik köpük" veya "köpük metal" kavramları günümüzde boşluk içeren bütün metal yapılar için kullanılan bir terim haline gelmiştir. Doğal ürün olmadıklarından dolayı "köpük" terimi bu yapıları tam anlamıyla ifade etmemektedir. Bu yüzden "metalik köpük" şeklinde belirtilirler [11].

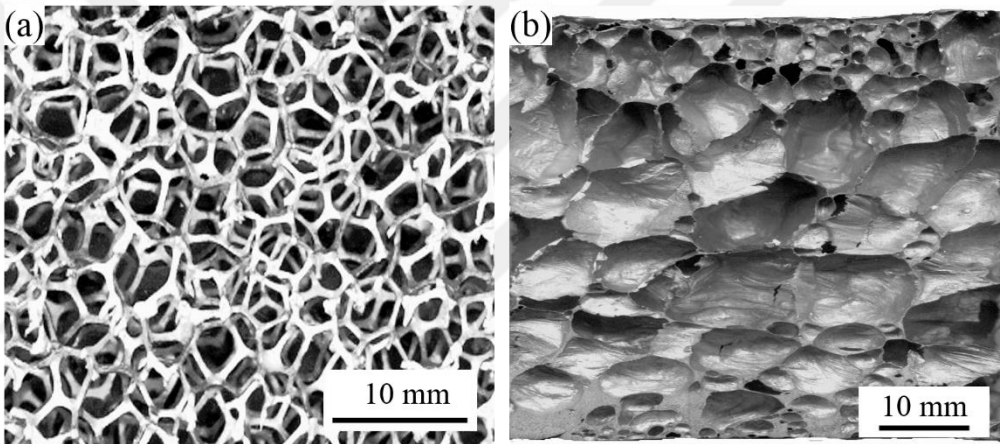
Metalik köpükleri tam anlamıyla tanımlayabilmek için, pratikte ve literatürde kullanılan benzer ifadeler arasında bazı ayrımlar yapılmalıdır. Şekil 1.1'de farklı hücresel metallere ait gözenek morfolojileri görülmektedir;

— Hücresel metaller: Yapılarında çeşitli boyutlarda dağılmış gaz boşlukları içeren metalik yapıyı tanımlayan en genel ifadedir.
— Gözenekli metaller: Genellikle gözenekleri yuvarlak şekilli ve birbirinden yalıtılmış hücresel metallere verilen addır.
— Katı Metal köpükler: Gözenekli metallerin bir türüdür. Genellikle polihedral (çok yüzlü) hücrelere sahiptirler ve gözenekler yuvarlak veya elipstir.
— Metal süngerler: Genellikle birbirine bağlı gözeneklerin oluşturmuş olduğu hücresel metallerin özel morfolojideki türüdür.



Şekil 1.1. Farklı hücresel metaller; (a) alüminyum metalik köpük, (b) demir esaslı hücresel metal, (c) metal sünger formunda sinterlenmiş bronz tozu, (d) alüminyum sünger, (e) nikel sünger [12,13]

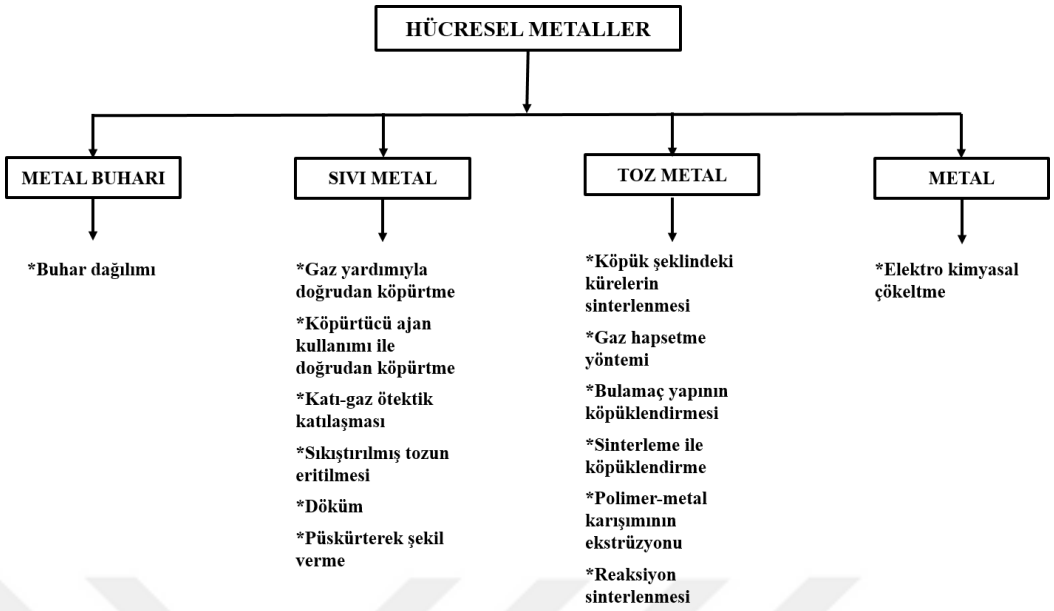
Köpük malzemelerde her bir gaz kabarcığının oluşturduğu hacim "hücre" olarak adlandırılır. Hücre, hücre duvarları ve hücre köşelerinden oluşur. Hücre duvarı iki gaz kabarcığının oluşturduğu sınır, hücre köşesi ise gaz kabarcığının kesiştiği yerdir. Metalik köpükler sahip oldukları gözeneklerin boyutuna ve şekline, hücre morfolojisine (açık veya kapalı hücre geometrisine), hücre topolojisine, yoğunluğuna bağlı olarak karakterize edilirler. Bu neticede metalik köpükler açık ve kapalı hücreli olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 1.2'de açık ve kapalı hücreli köpük yapıları gösterilmektedir. Gözenekler birbirinden hücre duvarı ile ayrılmış, bir başka değişle izole halde ise bu tip köpüklere kapalı hücreli köpük, eğer gözenekler birbiri ile bağlantılı halde bulunuyorsa açık hücreli köpük olarak adlandırılır [2,14].



Şekil 1.2. Gözenek morfolojileri (a) açık hücreli alüminyum köpüğün SEM görüntüsü, (b) kapalı hücreli alüminyum köpüğün fotoğrafik görüntüsü [15]

1.2. Metalik Köpük Üretim Yöntemleri

Metalik köpüklerin üretimi ile ilgili çalışmalar sonucunda 1950'li yıllardan günümüze kadar birçok üretim metodu geliştirilmiştir. Şekil 1.3'te farklı üretim metotları metalin faz durumuna göre sınıflandırılmıştır.

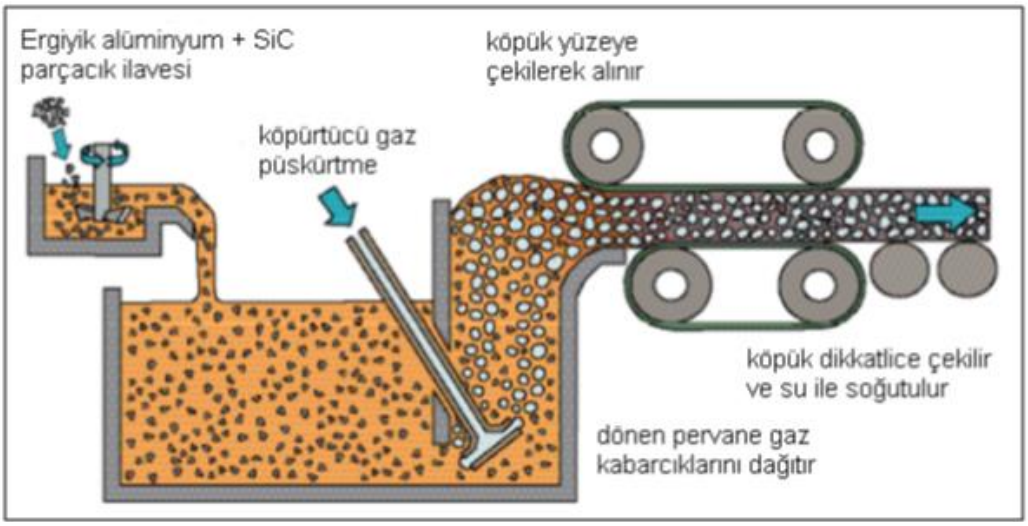


Şekil 1.3. Metalik köpüklerin üretim yöntemleri [9,10]

1.2.1. Ergiyik metal içerisine gaz enjeksiyonu yöntemi ile metalik köpük üretimi

Hydro Aluminium Corp. (Norveç) ve Cymat Aluminium Corp. (Kanada) firmaları bu yöntemi alüminyum ve alaşımlarını köpürtmek için aktif bir şeklide kullanmaktadır (yöntemin patenti Alcan International tarafından geliştirilmiştir). Ergiyik viskozitesini arttırmak ve kabarcık çeperlerindeki drenajı engellemek için ergiyik içerisine takviye parçacıklar (silisyum karbür, alüminyum oksit veya magnezyum oksit) ilave edilir. Takviye parçacıkların hacimsel oranı %10-20 aralığında ve parçacık ebatları 5-20 μm arasındadır. Parçacık takviyeli alüminyum ergiyiğin hazırlanması üretimin ilk aşamasını oluşturur. Bu süreçte parçacıkların alüminyum tarafından ıslatılabilmesi ve homojen dağılması için çeşitli karıştırma teknikleri geliştirilmiştir [9,10,14].

İkinci aşamada ergiyik içerisine pervane veya nozul yardımıyla hava, azot veya argon gazı enjekte edilmesiyle köpürtme gerçekleşir. Köpük kalitesi gaz kabarcık kalitesi ve kabarcıkların ergiyik içerisinde homojen ile doğrudur ilişkilidir. Yükselen kabarcıklar ve metal ergiyik karışımı sıvı üzerinde yüzerek köpük yapısını oluşturur (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Ergiyik metal içerisine gaz enjeksiyonu yöntemi ile metalik köpük üretimi [16]

Bu yöntem ile üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluğu 0,069 g/cm^3 ile 0,54 g/cm^3, ortalama gözenek çapı 3 ile 25 mm ve gözeneklerin duvar kalınlığı 50 ile 85 µm arasındadır. Bu değerler gaz enjeksiyon hızı, nozul titreşim frekansı veya pervane hızı gibi parametrelerin ayarlanmasıyla değiştirilebilir [9,16].

Cymat Aluminium Corp. 2,5 ile 5 cm aralığında değişen kalınlıkta ve 1,5 m genişlikteki alüminyum köpük için saatte 1000 kg üretim hattına sahiptir [17]. Hydro Aluminium Corp. 70 cm genişlikte, 8-12 cm kalınlıkta ve 2 m uzunluğundaki alüminyum köpük levha için saatte 500-600 kg üretim kapasitesine sahiptir [10,14].

Bu yöntem büyük miktarlarda ve sürekli üretim için elverişlidir. Bu yöntemin bir dezavantajı elde edilen köpüklerin kesme ve işleme gibi ikincil bir işleminden geçirilmesi gereklidir. Ayrıca köpük taşıma bantların etkisiyle oluşan kayma kuvveti gözeneklerin uzamasına sebep olur [10].

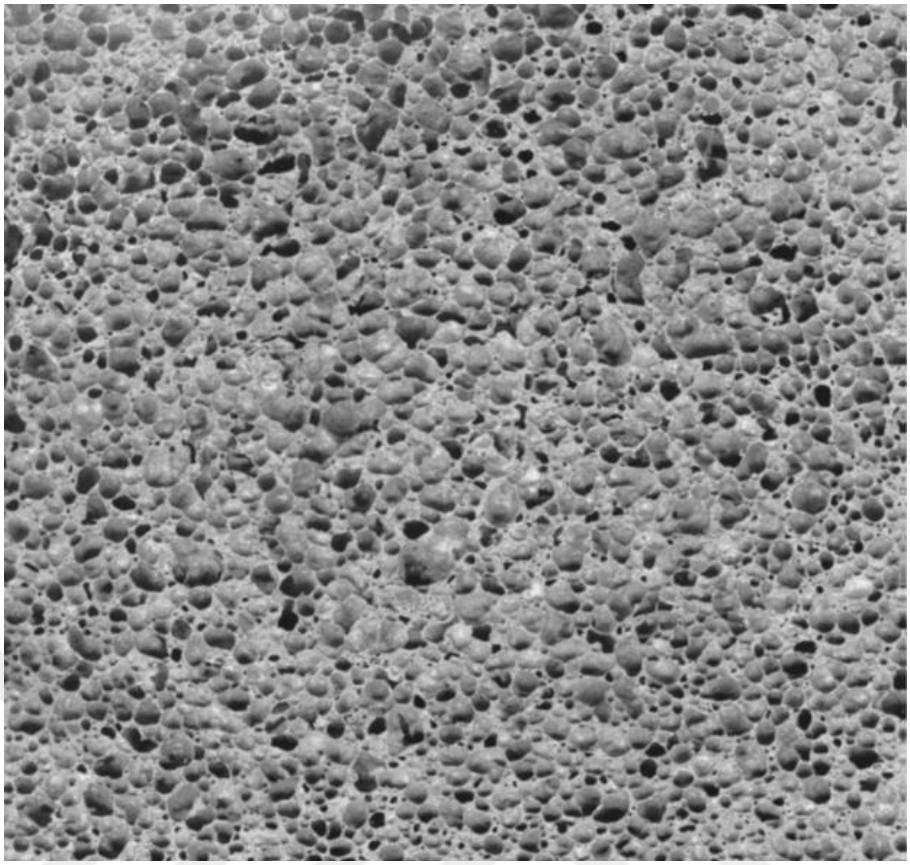


Şekil 1.5. Gaz enjeksiyonu yöntemiyle üretilmiş iki farklı yoğunluk ve hücre boyutuna sahip metalik köpük (Hydro Aluminium, Norveç) [10]

1.2.2. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi yöntemi ile metalik köpük üretimi

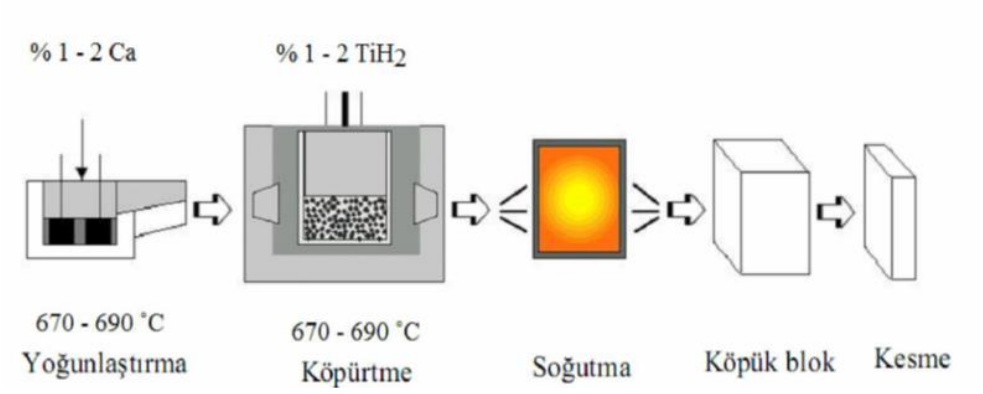
Bu yöntem ticari olarak Shinko Wire Company (Japonya) tarafından 1986'dan beri aktif olarak kullanılmaktadır. ALPORAS adıyla da tanınan bu yöntem günlük 1000 kg üretim potansiyeline sahiptir. Ergiyik içerisine direkt gaz enjekte etmek yerine, köpürtücü madde (TiH_2, ZrH_2, $CaCO_3$) ilavesiyle köpürtme işlemi yapılır.

Bu yöntemin ilk aşamasında ergiyik alüminyum içerisine viskozitesini artırmak için %1-2 oranında kalsiyum veya kalsiyum oksit ilave edilir ve karıştırılır. Viskozite istenilen seviyede ulaştığında ergiyik içerisine 5–20 μm çapında %1–2 oranında TiH_2 eklenir. Köpürtücü madde ergiyik içinde çözünerek hidrojen gazı açığa çıkarır [2,10]. Sıvı metal hidrojen gazının etkisi ile genleşerek kalıbın şeklini alır. Şekil 1.6'da ALPORAS yönteminin gözenek morfolojisi ve Şekil 1.7'de proses şeması görülmektedir.



Şekil 1.6. Köpürtücü madde ilavesiyle elde edilen metalik köpük gözenek morfolojisi [10]

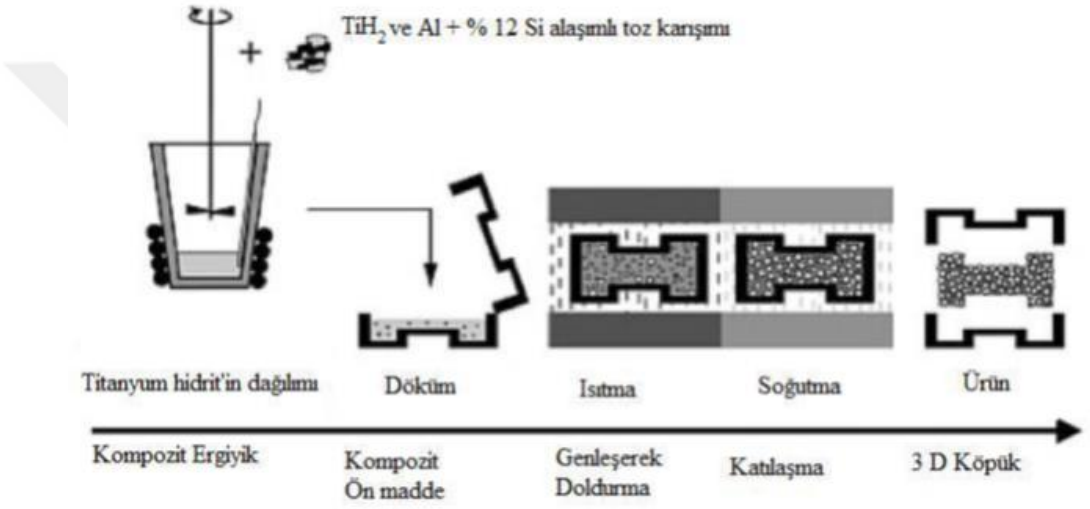
ALPORAS yönteminin kontrolü basınç, sıcaklık ve zaman parametrelerine bağlıdır. Bu yöntemle üretilen köpük malzemelerin yoğunluğu 0,18 ile 0,24 g/cm^3 değerleri arasındadır. Bu yöntemle küçük ve homojen hücre boyutlu metalik köpükler elde etmek mümkündür [2].



Şekil 1.7. Köpürtücü madde ilavesiyle metalik köpük üretimi yönteminin şematik gösterimi [9,10]

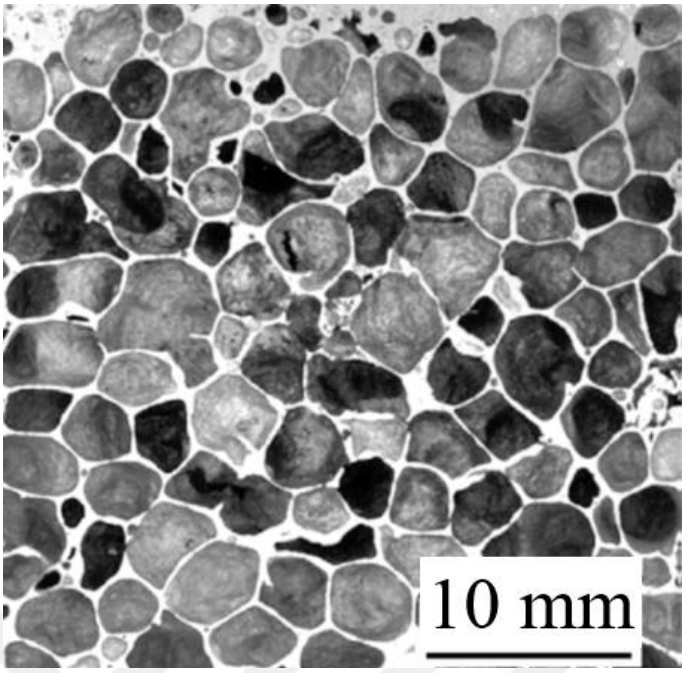
1.2.3. Formgrip yöntemi ile metalik köpük üretimi

Formgrip (Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors) yöntemi olarak adlandırılan bu yöntemde ilk aşamada TiH_2 tozları ısıl işleme tabi tutulur, bu sayede üzerlerinde oluşan oksit tabakası ergiyik içerisinde çözünmelerini geciktirilir. 620 $^{\circ}C$'de ergiyik halde bulunan alüminyum ile TiH_2 tozları karıştırılarak öncül materyal elde edilir. İşlemin bir sonraki etabında bu materyaller kalıplar içerisine yerleştirilir ve ergitilerek yapısındaki hidrojenin ayrışması sağlanır. Bunun sonucu gözenekli yapı oluşur. Şekil 1.8'de yöntemin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.8. Formgrip yöntemiyle metalik köpük üretim aşamaları [17]

Elde edilen metalik köpüğün yoğunluğu 0,1-0,3 g/m^3 ve hücre boyutu 2-8 mm seviyelerindedir. Şekil 1.9'da bu yöntemle üretilmiş metalik köpüğün gözenek morfolojisi gösterilmiştir. Bu yöntemin avantajları içerisinde homojen gözenek dağılımı ve karmaşık parçaların ikincil bir işleme gereksinim duyulmadan üretilebilirliği sayılabilir. Başlıca dezavantajları ise kullanabilen malzeme çeşitsizliğinin sınırlı olması ve ergiyik viskozitesi yeterli seviyede değilse, köpük yapısının katılaşmadan önce sönmesidir [18].

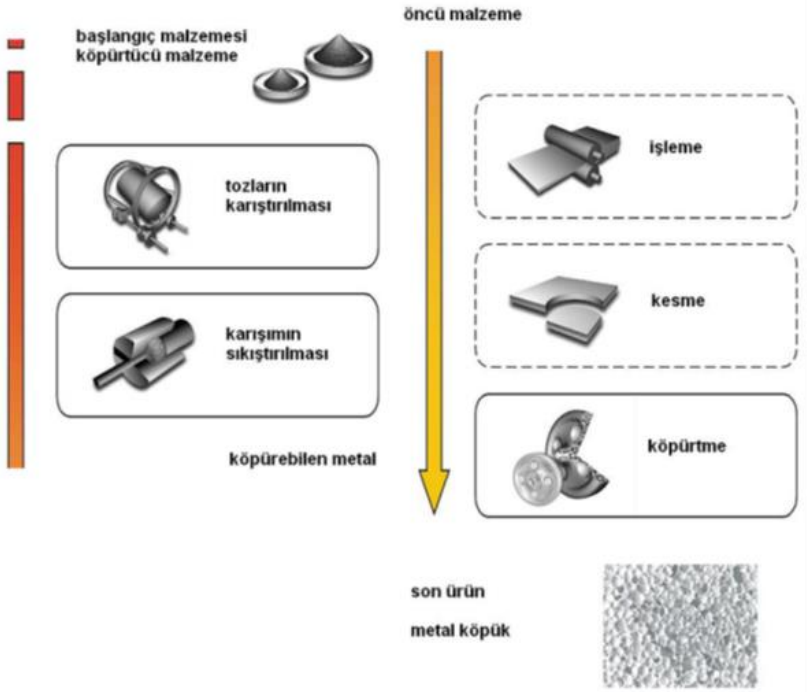


Şekil 1.9. Formgrip yöntemiyle üretilmiş metalik köpük yapısı [17]

1.2.4. Toz metalürjisi yöntemi ile metalik köpük üretimi

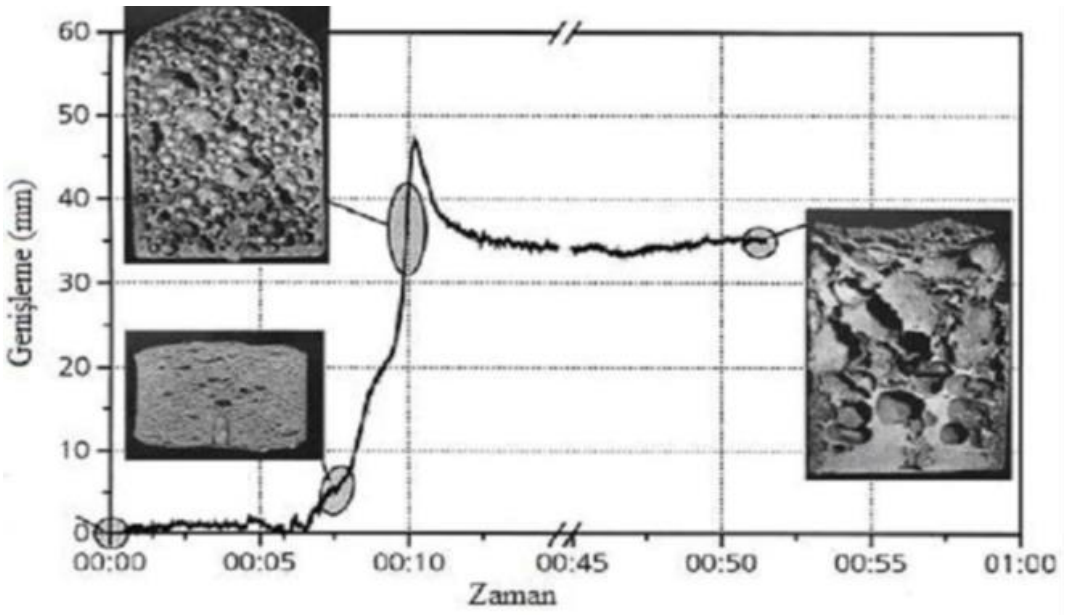
Alulight ve Foaminal ticari adları ile tanınan, toz metalürjisi ile metalik köpük üretimi Almanya'da Fraunhofer Malzeme Araştırma Merkezi (IFAM) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemin bilimsel ve endüstriyel kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Diğer metalik köpük üretim yöntemlerinden ayrılan en önemli özelliği köpürtülecek malzemenin hazırlanış aşamasında ergitilmeye ihtiyaç duyulmayışıdır. Köpük oluşumu sıvı fazda gerçekleşmesine rağmen, başlangıç materyali olarak metal tozlarının kullanılması sebebiyle yönteme "toz metalürjisi" denilmiştir [10].

Üretim prosesi, metal tozların köpürtücü ajan ile karıştırılması ile başlamaktadır. Yoğunluğun sağlanması için karışım preslenerek sıkıştırılır. Bu adımda kaide köpürtücü ajanın metal matris içinde açık gözenekli yapı bırakmadan preslenmesidir. Bu işlem tek eksenli sıkıştırma, ekstrüzyon veya haddeleme tekniklerinden herhangi biri ile yapılabilir. Bir sonraki aşama yarı mamulün, matris malzemenin ergime sıcaklığa yakın bir sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmasıdır. Bu sırada köpürtücü ajanın gaz salınımı ile gözenekli yapı elde edilir [10,14,19]. Şekil 1.10'da yöntemin şematik gösterimi verilmiştir.



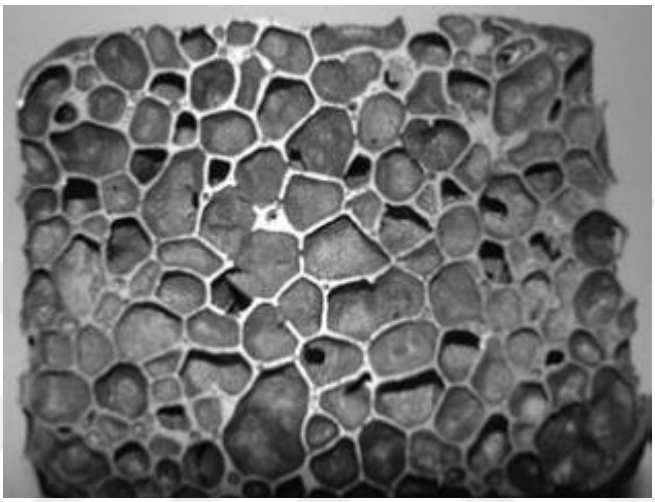
Şekil 1.10. Toz metalürjisi yöntemiyle metalik köpük üretim aşamaları [9,10,19]

Toz metalürjisi yöntemiyle metalik köpük üretiminde sıcaklık ve zaman köpük kalitesini etkileyen en önemli parametrelerdir. Şekil 1.11'de yöntemin zamana bağlı köpük oluşum aşamaları verilmiştir.



Şekil 1.11. TiH_2 köpük içerisinde zamana bağlı davranışı [9,10]

Son ürüne yakın üretim yapılabilmesi yöntemi cazip kılmaktadır. Maliyetinin yüksek olması ve çok büyük parçaların yapılamaması ise yöntemin dezavantajları arasındadır. Ayrıca ürün çeşitliliği sadece alüminyum ve alaşımları ile sınırlı değildir. Pirinç kurşun, altın, kalay ve çinko gibi metaller ve diğer alaşımlar da bu yöntemle köpürtülebilmektedir [10]. Şekil 1.12'de toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş alüminyum köpük gözenek morfolojisi gösterilmiştir.

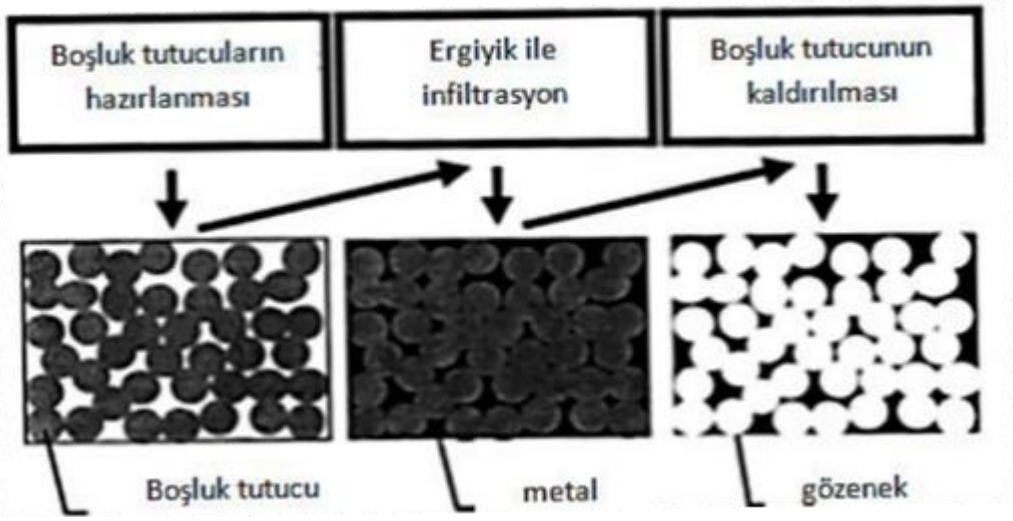


Şekil 1.12. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş alüminyum esaslı metalik köpük [21]

1.2.5. Yer tutucu yöntemi ile metalik köpük üretimi

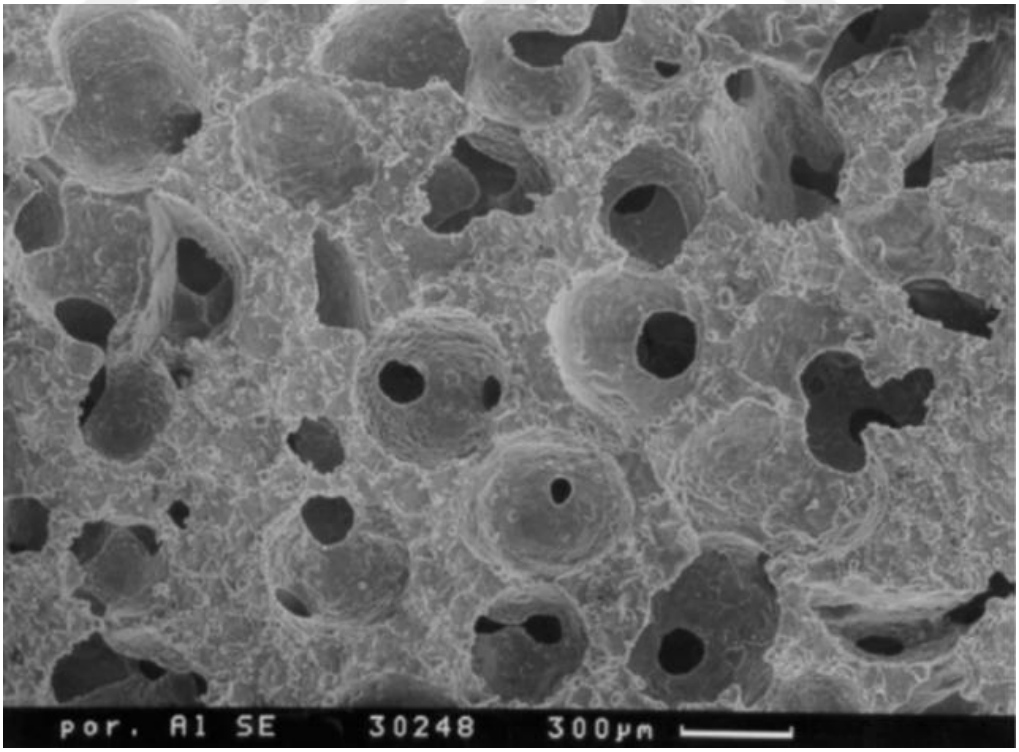
Metalik köpükler, organik veya inorganik taneciklerin veya düşük yoğunluklu içi boş küreciklerin arasına döküm yolu ile üretilebilirler. İşlem sonrası tanecikler ya köpük yapısı içerisinde gömülü kalır ya da uygun asit veya çözücü veya ısıl işlem ile uzaklaştırılır [10]. Şekil 1.13'te yöntemin şematik gösterimi verilmiştir.

Çözülebilen tuzlar (NaCl), genişleyen kil tanecikleri, kum paletler, vermikülit, köpürtülmüş cam küreler veya alüminyum oksit boş küreler inorganik yer tutucu malzemeler olarak, eriyik katılaşması hızlı olması koşulu ile polimer küreler ise organik yer tutucu malzeme olarak kullanılabilirler. Yer tutucu malzemeleri ön ısıl işleme tabi tutmak, özellikle yüksek işlem sıcaklığında veya düşük uygulama basıncında eriyiğin öncü katılaşmasını engellemek için uygulanabilir. Tanecikler arası vakum oluşturmak ya da eriyiğe basınç uygulamak önemli bir ön koşuldur [10,22].



Şekil 1.13. Yer tutucu yöntemiyle metalik köpük üretim aşamaları [9,10]

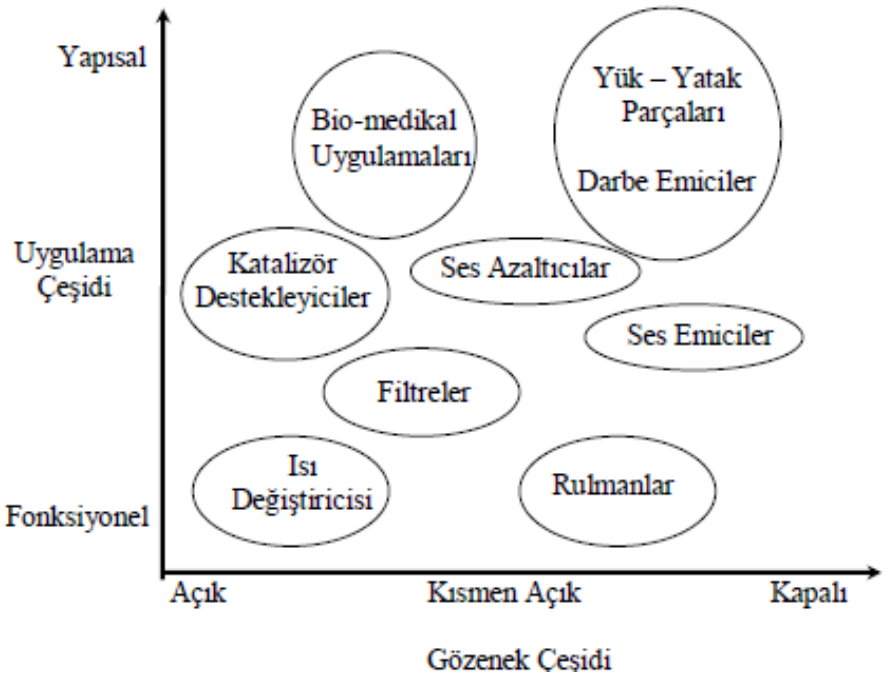
Tane boyutlarının ayarlanabilir olması gözenek boşluk dağılımının kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Elde edilen köpüğün yoğunluğu 1,1 g/cm^3 seviyesinde olmasına rağmen, gözeneklilik oranı %80 ile kısıtlıdır. Bu yöntemle elde edilmiş köpük yapısı Şekil 1.14'te gösterilmiştir [10].



Şekil 1.14. Yer tutucu yöntemiyle üretilmiş alüminyum metalik köpük morfolojisi [10]

1.3. Metalik Köpüklerin Kullanım ve Uygulama Alanları

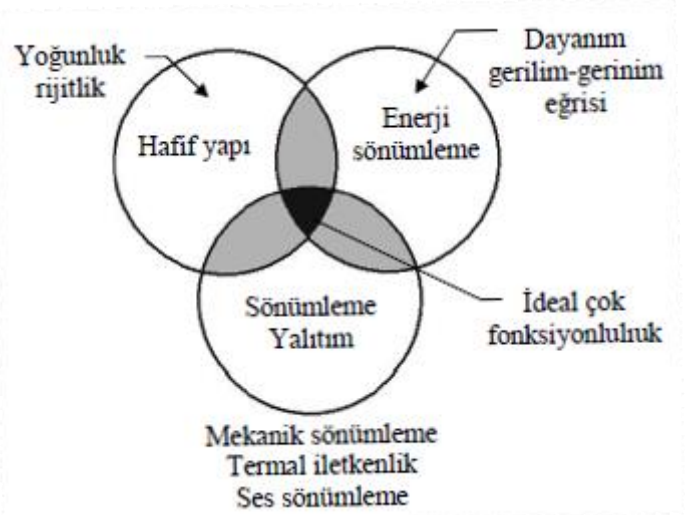
Metalik köpükler ilgi çekici özellikleri sayesinde sadece bilimsel araştırmalarda değil aynı zamanda endüstriyel uygulamalarda da kendine yer edinmiştir. Teknolojinin getirisi olarak gelişen metalik köpük anlayışı birçok mühendislik probleminin çözümünde kullanılmıştır. Kullanımları açık veya kapalı hücreli yapıya sahip olmalarına göre yapısal veya fonksiyonel uygulama alanları şeklinde sınıflandırılır. Metalik köpükler hafifliğin ve enerji sönümleme özelliğinin arandığı otomotiv, demiryolu, inşaat, uzay ve gemi endüstrileri gibi yapısal uygulamalarda ya da filtreleme, ısı dönüştürücü, soğutma sistemleri gibi fonksiyonel uygulamalarda kullanılmaktadır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15. Metalik köpüklerin gözenek yapısı ve uygulama alanlarına göre sınıflandırılması [10]

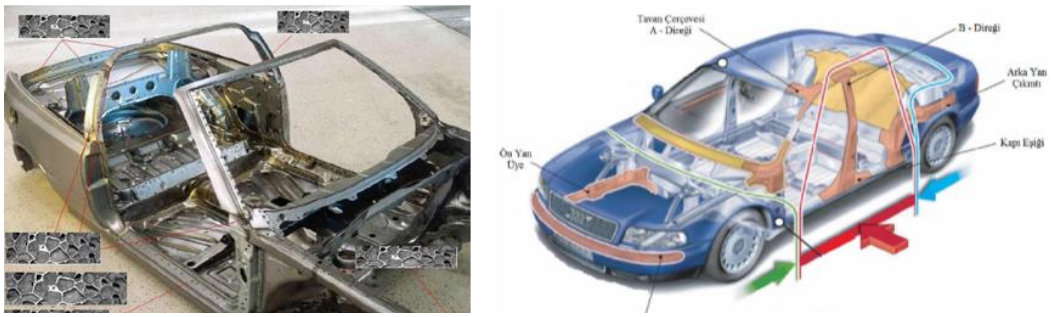
1.3.1. Otomotiv endüstrisi

Otomotiv endüstrisindeki rekabetin artması ile üreticilerin geliştirdiği yeni konsept ve ekipmanların sürüş keyfini arttırmasının yanı sıra getirdiği hafiflik özelliği ile aracın yakıt tüketim performansını doğrudan etkilemektedir. Buna ilaveten üretici firmalar için yolcu güvenliği, hala gelişime açık konulardan biridir. Şekil 1.16'da metalik köpüklerin otomotiv endüstrisinde kullanım amaçları sınıflanmıştır.



Şekil 1.16. Metalik köpüklerin otomotiv endüstrisinde kullanım amaçları [10]

Otomobillerde yolcu güvenliğini arttırmak için araçların ön ve arka kısımlarında şase ve tampon arasına yerleştirilen çarpışma kutuları (crash boxes) darbe anında yüksek deformasyon davranışı sergileyerek çarpışma enerjisini sönümlerler. Bu konudaki kullanım yerleri Şekil 1.17'de görülmektedir. Çarpışma kutuları, içerisine metalik köpük doldurulmuş profillerdir. Bu kutular 20 km/s'ye kadar varan hızlardaki çarpmalarda bütün çarpışma enerjisini sönümleyerek deforme olurlar ve araç şasesinde oluşabilecek muhtemel hasarları minimize ederler. Şekil 1.18'de deformasyon sonrası bir çarpışma kutusu örneği görülmektedir. Çarpma yönünden bağımsız olarak içerisine köpük doldurulmuş profiller, boş profillere oranla %25-30 daha fazla enerji absorbe etmektedir [10].



Şekil 1.17. Metalik köpüklerin otomotiv endüstrisinde kullanım yerleri [1,23]



Şekil 1.18. Çarpışma kutusu örneği [1]

Otomobillerde bir başka uygulama alanı olarak metalik köpükler motor bloklarında ses ve titreşim sönümleme elemanı olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.19'da LKR (Avusturya) ve BMW tarafından geliştirilmiş metalik köpük kullanılarak üretilmiş motor bloğu örneği gösterilmektedir [24].



Şekil 1.19. Motor montaj kelepçesi soldan sağa; boş döküm, alüminyum köpük doldurulmuş yekpare parça, kesit görüntü [24]

1.3.2. Hava ve uzay endüstrisi

Hava-uzay endüstrisinde kullanılan petek yapıların maliyetinin yüksek olması, alüminyum köpük levhalara veya metal köpük sandviç panellere ilgiyi arttırmıştır. Boeing (ABD) firması, helikopterlerin kuyruk kısımlarında alüminyum metalik köpük kullanımın yollarını geliştirmiştir. Uzay araçlarının iniş takımlarında enerji absorbsiyon elemanı olarak ve uydular da yük taşıyan yataklarda takviye eleman olarak değerlendirilmektedir [10]. Şekil 1.20'de Ariane 65 isimli rokette alüminyum metalik köpükten yapılmış koni biçimli bir adaptörün genel görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1.20. Uzay endüstrisinde alüminyum köpük kullanım yerleri [25]

1.3.3. İntegral zırh malzemesi olarak metalik köpükler

İntegral zırh malzemesi olarak metalik köpük kullanımının tercih sebebi, patlama anında oluşan enerjiyi sönümlemek ve metalik köpüklerin hafiflik özelliğini kullanmaktır. Bu konuda yapılan araştırmalara göre alüminyum köpüklerin patlama deformasyonu köpük yoğunlaşana kadar devam etmektedir. Kısacası köpük malzeme tamamen yoğunlaşana kadar patlama enerjisini dağıtır ve akabinde alt tabakaya aktarır. Patlama sonrası meydana gelen bir deformasyon örneği Şekil 1.21'de görülmektedir. Köpük kalınlığı ile sönümlenen patlama enerjisi ile doğrudan ilişkilidir [26].



Şekil 1.21. Cymat alüminyum köpüğün integral zırh malzemesi olarak patlama performansı [26]

1.3.4. Hafif yapılar

Alüminyum köpükler ve köpük sandviç yapılar araçlardaki ağırlığın azaltılması ve mekanik özelliklerinin artırılmasına katkı sağlamaktadır (Şekil 1.22). Yapılan araştırmalarda sandviç panellerin diğer çelik yapılara oranla %25 hafiflik, %700 mukavemet artışı gözlemlenmiştir. Teupen firması (Almanya) yüksek çalışma platformlarında metalik köpük sandviç yapıları karma kolu desteği olarak geliştirmişlerdir [10,27].



Şekil 1.22. Alüminyum sandviç panel ile üretilmiş kaldırma kolu [10,27]

1.3.5. Metalik köpüklerin fonksiyonel uygulamaları

Filtrelerde metalik köpükler gaz veya sıvılardan katı partikülleri süzmek ya da gaz-sıvı karışımlarının içinden katı veya sıvı parçaları süzmek amacı ile kullanılmaktadır (Şekil 1.23). Bu tür uygulamalarda açık hücreli metalik köpükler tercih edilmektedir [28].



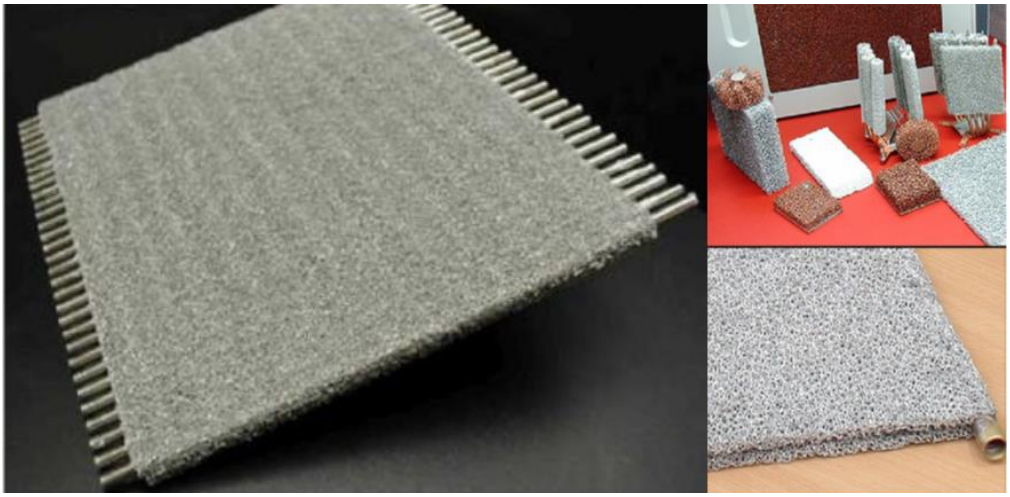
Şekil 1.23. Farklı gözenek boyutlarına sahip alüminyum sünger [28]

Susturucular, kompresör gibi gürültülü cihazlarda ses seviyesinin kontrolü amacıyla gaz çıkışı bölgesine metalik köpük yerleştirilir (Şekil 1.24) [12].



Şekil 1.24. Alüminyum köpük susturucular [12]

Isı değiştirici olarak açık hücreli alüminyum metalik köpükler korozyon direnci, yüksek termal iletkenlik özelliklerinden dolayı tercih edilirler. Kapalı hücreli metalik köpükler ise düşük termal iletkenliklerinden dolayı termal kalkan olarak kullanılır. Şekil 1.25'te metalik köpük matrisi içine gömülmüş tüplerden oluşturulan gelişmiş yüksek sıcaklık radyatörü gösterilmiştir [1].



Şekil 1.25. Metalik köpük ısı değiştiriciler [1]

2. METALİK KÖPÜKLERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

2.1. Metalik Köpüklerin Mekanik Özellikleri

Metalik köpüklerin mekanik özellikleri, sahip oldukları açık veya kapalı hücre morfolojisi, hücre duvarını oluşturan ana malzeme ve göreceli yoğunluk parametrelerine bağlıdır. Göreceli yoğunluk (ρ^*/ρ_s), köpük yoğunluğunun (ρ^*) hücre duvarını oluşturan malzeme yoğunluğuna (ρ_s) oranı olarak tanımlanır. Bunların da ötesinde, köpük özellikleri köpük yapısı (hücre boyutu veya şekli), izotropisi ve kusurları (kıvrımlı, buruşuk veya kırık hücre duvarları) ile de değişkenlik göstermektedir. Ayrıca bal peteği yapısına sahip malzemelerin modellenmesi bir nebze kolayken düzensiz yapıya sahip hücresel köpük yapıların modellenmesi karmaşıktır. Bu yüzden metalik köpüklerin mekanik yaklaşımları basma etkisi altında göstermiş oldukları sıra dışı deformasyon davranışları ile temsil edilirler [2].

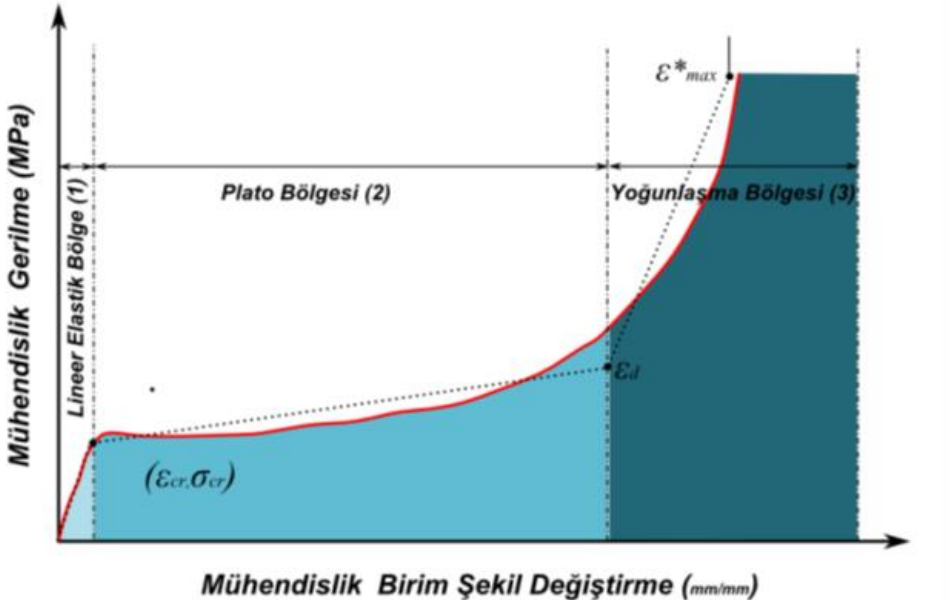
2.1.1. Metalik köpüklerin non-lineer deformasyon davranışları

Mühendislik malzemeleri arasında metalik köpükleri özel yapan basma etkisi altında göstermiş oldukları non-lineer deformasyon davranışlarıdır. Quasi-static yük altında metalik köpükler üç farklı bölgede deformasyon etkisi gösterirler. Bu üç bölge sırasıyla; lineer elastik bölge, çökme (plato) bölgesi ve yoğunlaşma bölgesidir (Şekil 2.1).

Birinci bölgede, gözenek yapısı göz ardı edilerek, tipik bir gerilme-gerinme eğrisi gösteren yığınsal malzeme olarak düşünülebilirler. Bu bölge "lineer elastik bölge" olarak adlandırılmaktadır ve bu bölgede metalik köpükler elastik olarak deforme olurlar. Birinci bölge hücre duvarlarının bükülmesi ile sona erer.

İkinci bölgede, çökme deformasyonun sınırlandığı elastik bölgeden deforme olmamış diğer kısımlara katlanarak sıçramasıyla ilerler. Çökme işlemi kademeli ilerlemesi sebebiyle birim şekil değiştirme oranı artış gösterirken, gerilme nispeten çok küçük bir değişim sergilemektedir. Bu yüzden gerilme-gerinme eğrisi yatay bir süreç

sergilediğinden dolayı bu bölgeye "plato bölgesi" denmektedir. Kritik bir seviyede hücre duvarlarının birbirine temas etmesi ile deformasyon davranışı diğer bölgeye sıçrar. Üçüncü bölgede, hücre boşluklarının kaybolması ile gerilme davranışı hücre duvarını oluşturan malzeme seviyesine yaklaşmaya başlar. Bu bölgede gerilme-gerinme eğrisinde sert bir yükseliş görülmektedir. Bunun sonucunda yoğunlaşma gerçekleşir [29].

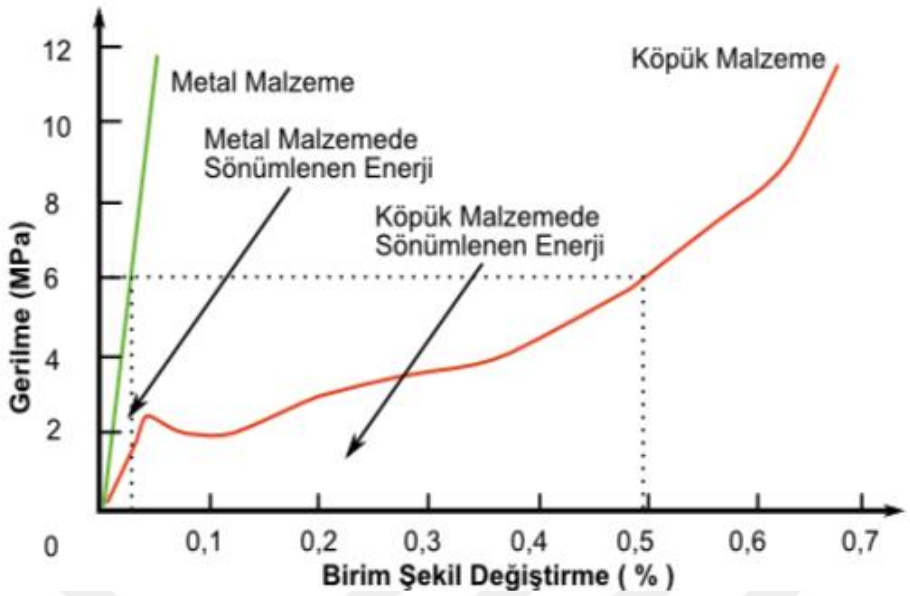


Şekil 2.1. Metalik köpüklerin deformasyon bölgeleri [30]

2.1.2. Metalik köpüklerin enerji sönümleme davranışları

Metal malzemelerle metalik köpüklerin enerji sönümleme davranışlarının karşılaştırılması Şekil 2.2'de görülmektedir. Metalik köpüklerin enerji absorbsiyon elemanı olarak da uygulama alanı bulmaktadır. Gerilme-gerinme grafiğinin altında kalan alan metallerin enerji sönümleme kapasitelerini göstermektedir. Metalik köpüklerde ise bu enerji plato bölgesinin altında kalan alanın yoğunlaşma bölgesine kadar olan kısmıdır. Denklem (2.1) de enerji sönümleme formülasyonu gösterilmektedir;

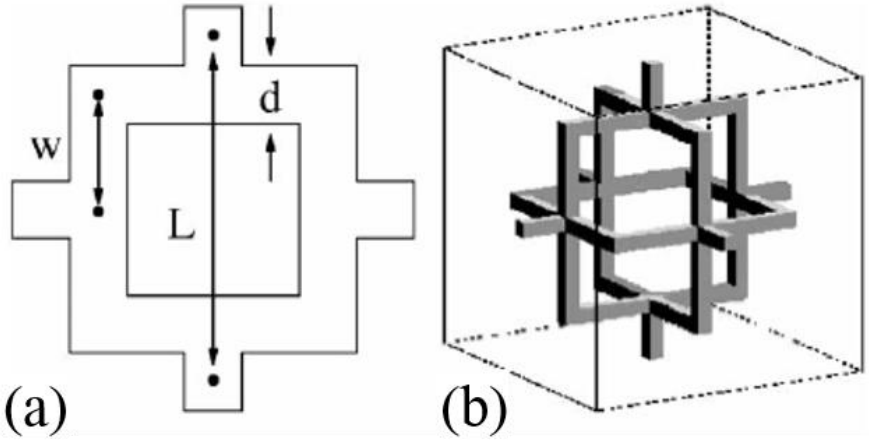
$$U = \int_0^{\varepsilon_d} \sigma d\varepsilon \qquad (2.1)$$



Şekil 2.2. Metalik köpüklerde ve metal malzemede sönümlenen enerjinin karşılaştırılması [30]

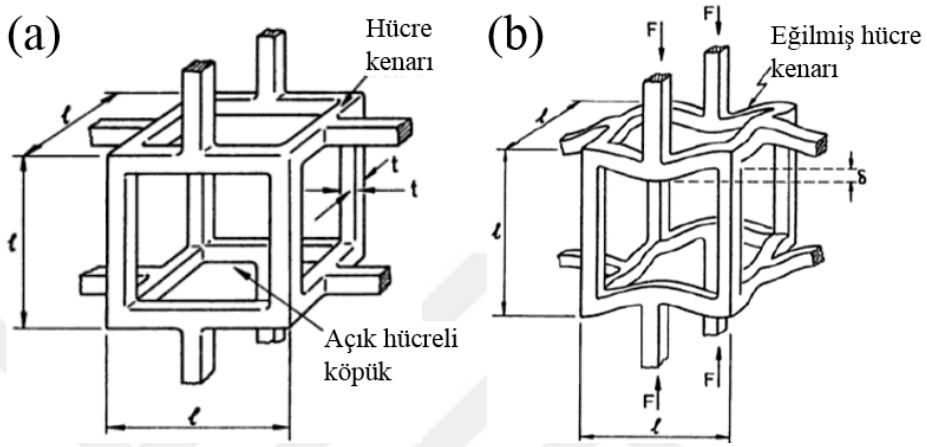
2.2. Metalik Köpüklerin Matematiksel Modellenmesi

Hücresel yapıların tasarımı gerçekleştirilirken mikroyapıları ile mekanik, termal, akustik vb. özellikleri arasındaki ilişkiye gereksinim duymaktadır. Gibson ve Ashby bu malzemelerin temel seviyede anlaşılması hususunda üstün bir araştırma sunmuşlardır [31]. Şekil 2.3'te Gibson ve Ashby tarafından tasarlanmış açık hücreli basit köpük modeli gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Açık hücreli basit köpük modeli (a) model parametreleri, (b) üç boyutlu model görünüşü [31]

Gibson ve Ashby yapmış oldukları deneysel ve teorik çalışmalar sonucunda gözenekli yapıların elastik, plastik, sürünme ve kırılma davranışlarını detaylı olarak izah etmişlerdir. Şekil 2.4'te hücre geometrisine bakılmaksızın boyutsal parametreler kullanılarak modellenmiş açık hücreli köpük yapısı ve deformasyon altındaki davranışı görülmektedir.



Şekil 2.4. (a) açık hücreli köpük modeli, (b) deformasyon altındaki köpük davranışı

Boyutsal parametrelerin (hücre uzunluğu, ℓ; hücre kenar kalınlığı, t, Timoshenko'nun kiriş teorisinde deformasyonun, δ; kuvvetin, F; bir fonksiyonu olarak yazılması sonucunda hücresel köpüklerin mekanik davranışları açıklanmıştır. Bu yaklaşım sonucunda hücresel köpüklerin elastisite modülünün ve akma dayanımının göreceli yoğunluğa bağlı formülasyonu elde edilmiştir. Denklem (2.2) ile Denklem (2.5) arasında açık ve kapalı hücreli köpükleri için elastisite ve akma gerilmesi formülasyonu gösterilmektedir.

Açık hücreli köpüler için:

$$\frac{E_f}{E_s} = c_1 \left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^2 \tag{2.2}$$

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_s} \sim c_2 \left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}} \tag{2.3}$$

Kapalı hücreli köpükleri için:

$$\frac{E_f}{E_s} = \phi\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^2 + (1+\phi)\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^2 + \frac{P_0(1-2(\frac{\rho_f}{\rho_s}))}{E_s(1-(\frac{\rho_f}{\rho_s}))} \tag{2.4}$$

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_s} \sim 0,3\phi\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}} + 0,4(1-\phi)\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^2 \tag{2.5}$$

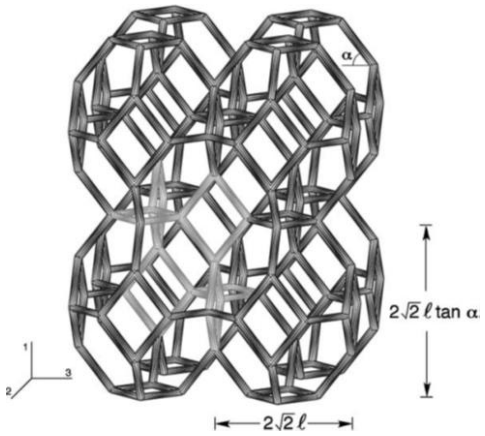
Bu denklemlerde E_f köpük elastisite modülü, E_s köpük yapıyı oluşturan asıl malzeme elastisite modülü, σ_f köpük akma gerilmesi, σ_s köpük yapıyı oluşturan asıl malzeme akma gerilmesi, c_1 ve c_2 mikroyapı katsayıları, P_0 atmosferik basınç ve ϕ kapalı hücreli köpüklerin gözenek duvarındaki katı oranı olarak tanımlanır. Deneysel veriler sonucunda c_1, c_2 katsayılarının açık hücreli hücresel köpükler için sırasıyla 1,0 ve 0,3 olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca açık hücreli hücresel yapılarda poisson oranı $\nu = 1/3$ kabul edilmiştir [31].

Zhu ve arkadaşları açık hücreli hacim merkezli kübik çok yüzlü bir model üzerinde benzer bir yaklaşım geliştirmiştir. Denklem (2.6) ve Denklem (2.7) de gösterildiği üzere elde edilen sonuçlar doğrultusunda elastisite modülü ve poisson oranı göreceli yoğunluğun bir fonksiyonu olarak tanımlamışlardır [32];

$$\frac{E_f}{E_s} = c_z\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^2 + (1+c_z\frac{\rho_f}{\rho_s})^{-1} \tag{2.6}$$

$$\nu = \frac{1}{2}\left(\frac{1-c_z(\frac{\rho_f}{\rho_s})}{1+c_z(\frac{\rho_f}{\rho_s})}\right) \tag{2.7}$$

Eşitliklerde ki c_z katsayısı hücre kenarının kesit alanına ve atalet momentine bağlı bir katsayıdır. Eşkenar üçgen kesit alanına sahip olan hücresel yapılarda c_z=1,09, silindirik kesit alanına sahip olan hücresel yapılarda ise c_z=0,9 kabul edilir.



Şekil 2.5. Kelvin hücre modeli [33]

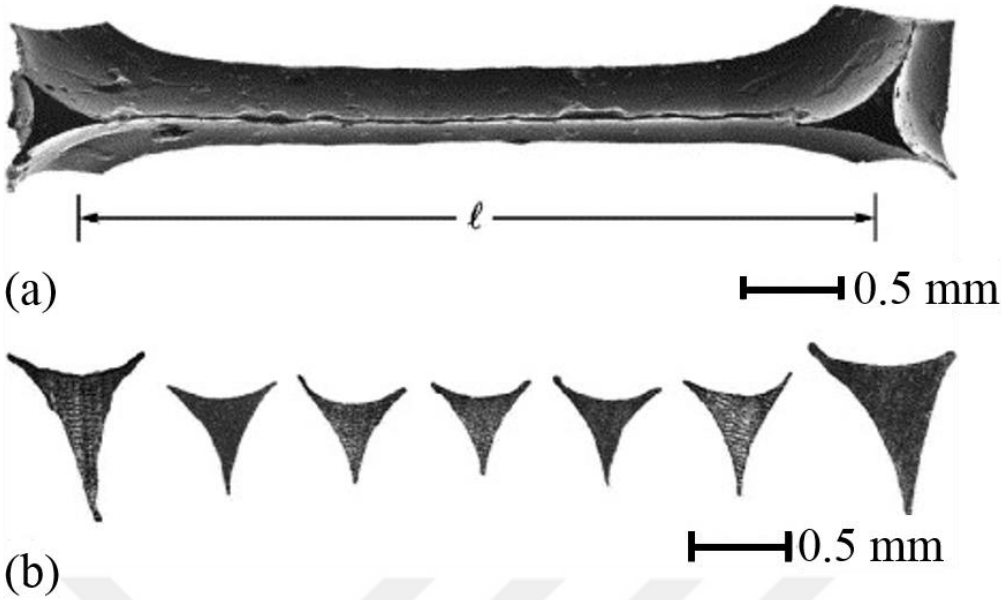
Benzer bir yaklaşım da Warren and Kraynik tarafından yapılmıştır. Model olarak açık hücreli hacim merkezli Kelvin (tetrakaidecahedral) hücre modeli tercih edilmiştir (Şekil 2.5). Elde edilen sonuçlar Denklem (2.8) ve Denklem (2.9) da görülmektedir ve daha önceki çalışmalara büyük oranda benzerlik göstermektedir [33];

$$\frac{E_f}{E_s} = \frac{c_w\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^2(11+4c_w\frac{\rho_f}{\rho_s})}{10+31c_w\frac{\rho_f}{\rho_s}+4c_w{}^2\frac{\rho_f{}^2}{\rho_s}} \tag{2.8}$$

$$\nu = \frac{1}{2}\left[\frac{(1-c_w\frac{\rho_f}{\rho_s})(10+c_w\frac{\rho_f}{\rho_s})}{10+31c_w\frac{\rho_f}{\rho_s}+4c_w{}^2\frac{\rho_f{}^2}{\rho_s}}\right] \tag{2.9}$$

Eşkenar üçgen kesit alanına sahip olan hücresel yapılarda c_w=1,0, silindirik kesit alanına sahip olan hücresel yapılarda ise c_w≈0,827 kabul edilir. E_f köpük elastisitesi, E_s esas malzeme elastisitesi olarak tanımlanmaktadır.

Başka bir yaklaşım ise Gent ve Thomas tarafından hücre kenarlarının bükülmesinden ziyade gerilmesi temeline dayanan bir matematiksel model ortaya koyulmuştur [34]. Yakın zamanda ise Gong ve arkadaşları her türlü yükleme koşulu için hücre kenar morfolojisinin matematiksel modelleme üzerinde etkisini inceleyerek daha gerçekçi yaklaşımlar elde etmeyi amaçlamışlardır [35]. Şekil 2.6'da Gong ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan hücre kenar geometrisi gösterilmiştir. Hücre kenar kiriş kesit alanın kirişin orta kısımlarına doğru lineer azaldığı anlaşılmıştır.



Şekil 2.6. (a) karakteristik hücre kenarı, (b) kiriş kesit alanının uzunluk ile değişimi

2.3. Metalik Köpüklerin Geometrik Modellenmesi

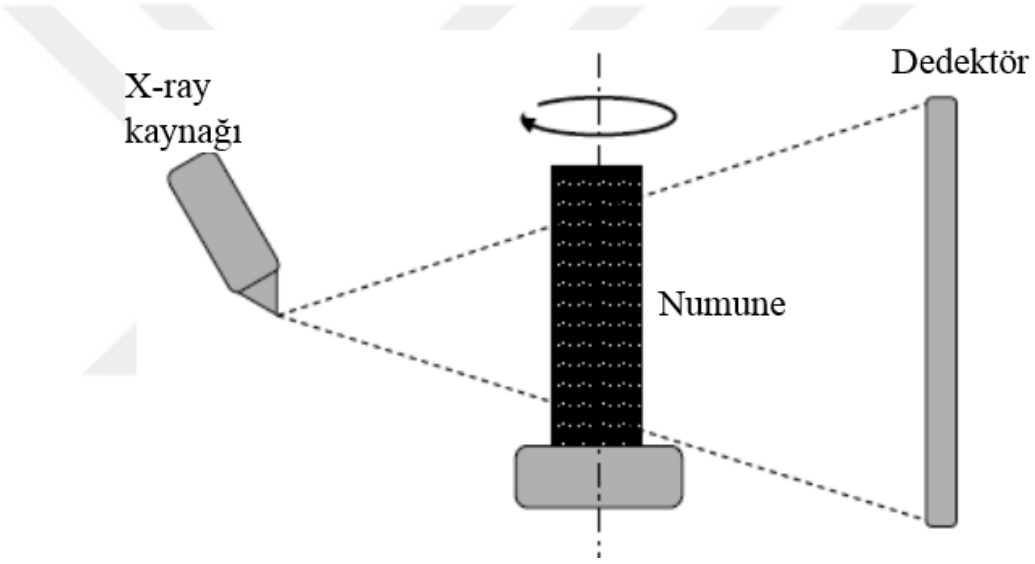
Matematiksel yaklaşımlar sonucunda metalik köpüklerin mekanik davranışlarının göreceli yoğunluk ve hücre morfolojisine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte gerçek anlamda dikkate alınabilecek bir modelleme yaklaşımı için sadece bu iki özelliğe bağlı olarak yapılan açıklama yeterli görülmemektedir. Bu bilgilere ilaveten mikroyapı özelliklerinin (hücre kalınlığı ve eğriliği, yapı içindeki hücre dağılımı) incelenmesi bu malzemelerin davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi hususunda yardımcı olacaktır. Bu sebepten ötürü geometrik modellemeye duyulan ihtiyacın getirisi olarak yapılan bazı çalışmalar temel seviyede kalmışlardır [36,37].

Gelişen morfoloji inceleme teknolojisinin etkisi ile yapılan bazı çalışmalar sonucunda hücresel metallerin daha gerçekçi geometrik modellerinin yapılabileceği anlaşılmıştır [38,39]. Bu morfoloji inceleme metotları arasında en yaygın uygulama ile bilgisayarlı mikrotomografik (mikro-CT) taramadır. Mikro-CT metodu ile belirli bir çözünürlüğe sahip 3 boyutlu piksel görünümü elde edilebilir. Bu görüntünün çeşitli paket programlar ile 3 boyutlu mesh yapıya aktarılması sayesinde mekanik davranışlarının gerçeğe yakın incelenmesi ve günümüz mühendislik problem çözüm tekniklerinde aktif kullanımı sağlanmaktadır.

Hücresel metallerin gerçek geometrilerine yakın bir sonlu elemanlar modeli oluşturarak elde edilecek yüksek kalitede ki tahminler ile bu malzeme türünün oldukça doğru ifadesi yapılmış olabilecektir. Bu şekilde son ürün olarak ortaya çıkmış bir ürünün incelenip özelliklerinin tahlil edilmesi prosesine tersine mühendislik (reverse engineering) denilmektedir.

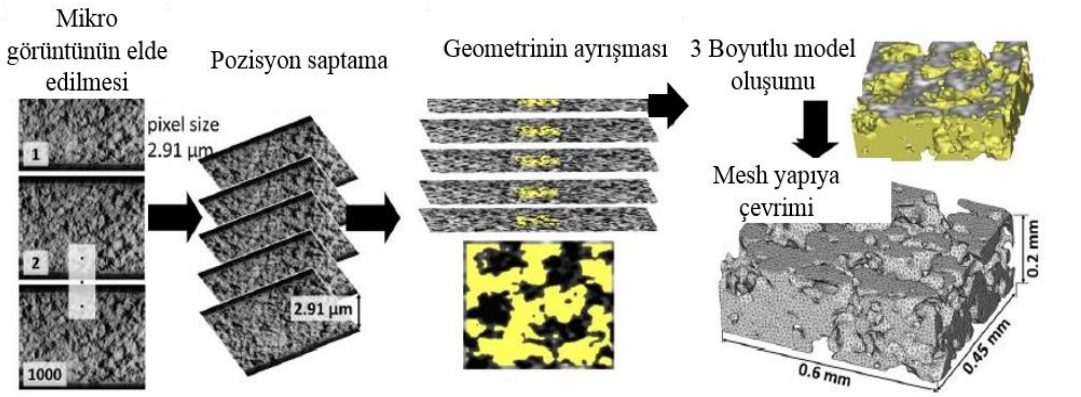
2.3.1. Bilgisayarlı mikrotomografi

Metalik köpüklerin 3 boyutlu görüntülerinin elde edilmesinde bilgisayarlı mikrotomografik tarama metodu en yaygın kullanıma sahip ve doğruya en yakın sonuçları veren yöntemdir. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 2.7'de görülmektedir.



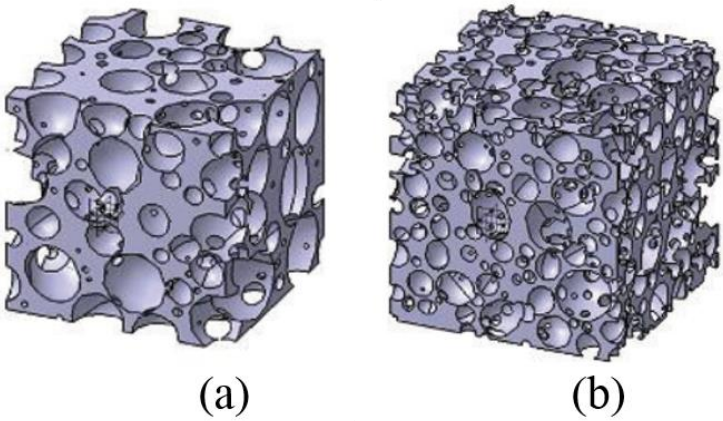
Şekil 2.7. X-ray ile bilgisayarlı tomografi şematik gösterimi [40]

Bu teknolojide numunenin birden fazla radyografik görüntüsü tek eksenli bir dönme sırasında alınarak uygun bir şekilde birleştirilmesiyle 3 boyutlu bir tarama görüntüsü elde edilir. Bu görüntü piksellerinin tersine mühendislik yazılımı ile görüntü kirliliğinin giderilmesi, yüzeyinin tesviye edilmesi gibi işlemlerden geçmesi sonucunda 3 boyutlu STereo Lithography (STL) formatına dönüştürülür. Bu formatta elde edilen veri bir 3D Computer-Aided Drawing (CAD) yazılımına aktarılabilir, akabinde ise gerekli sonlu elemanlar yazılımında modellemesi yapılabilir [40]. Şekil 2.8'de bu metodun işlem basamakları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Mikro-CT metodunun işlem basamakları [39]

Carofalo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada mikro-CT tarama yöntemiyle 3D modellemesi yapılarak, sonlu elmanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Şekil 2.9'da bu çalışma sonucunda elde edilmiş 3D model gösterilmiştir [38].



Şekil 2.9. Al köpük CAD modeli (a) alporas, (b) alulight [38]

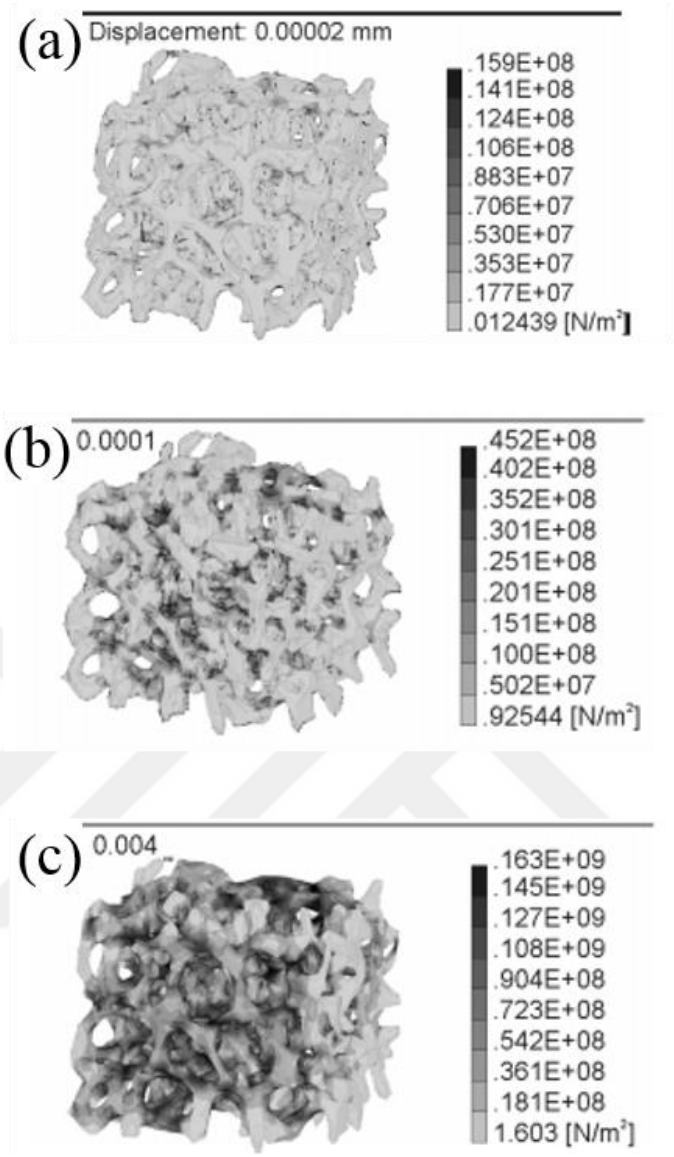
2.3.2. Geometrik modellemenin sonlu elemanlar yöntemine adaptasyonu

Miedzinska ve Szymczyk tarafından yapılan numerik modelleme çalışmasında ise elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Test verilerinden çıkan sonuçlar ile deneysel veriler arasında uyumluluk teyit edilmiştir [41].



Şekil 2.10. Miedzinska ve Szymczyk tarafından yapılan numerik modelleme çalışması [41]

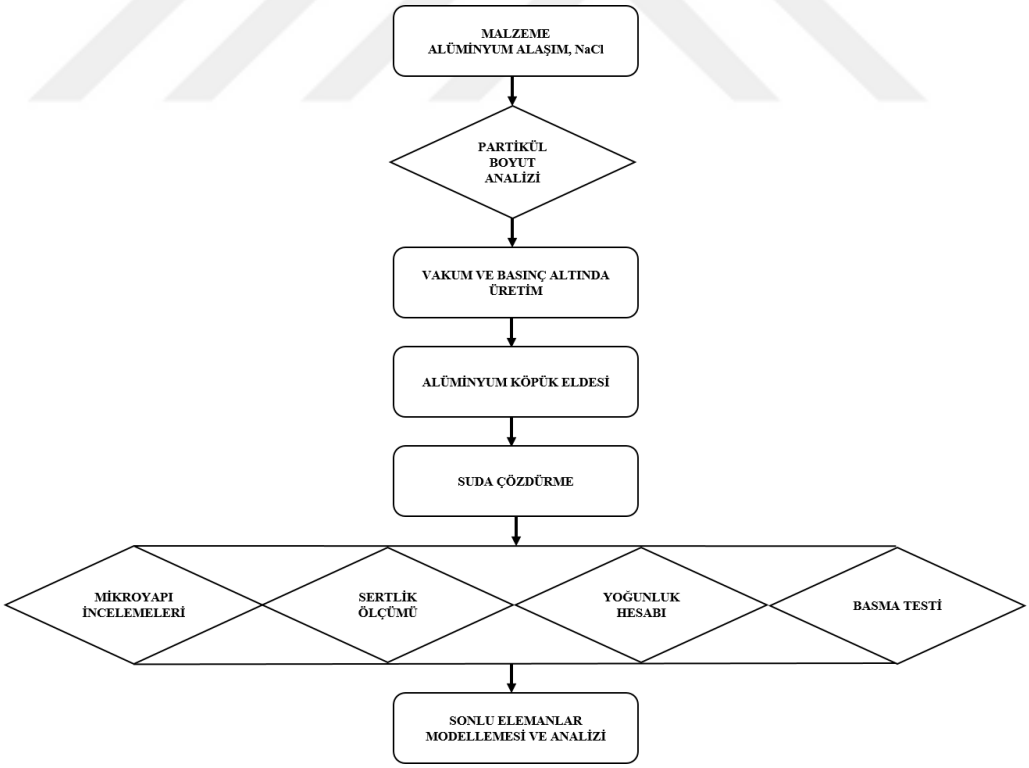
Michailidis ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise açık hücreli nikel köpük yapının deneysel verileri ile sonlu elemanlar yöntemi verilerinin karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda tek eksenli yükleme altında yapı çökmeleri hücre kenarlarına yakın olduğu kanaatine varılmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan simülasyonlar sonucunda benzer kanıya varılmıştır. Yükleme altında oluşan gerilmenin ilk etapta bölgesel bükülmelere akabinde ise yapıda kırılmalara yol açtığı görülmüştür. Şekil 2.11'de bu testler neticesinde elde edilen farklı deformasyon altında Von Mises gerilme değişim sonuçları gösterilmektedir [42].



Şekil 2.11. Farklı deformasyon altında açık hücreli nikel köpüğün Von Mises gerilme değişimleri (a) 0,00002 mm, (b) 0,0001 mm, (c) 0,004 mm yer değiştirme altında modelleme sonuçları [42]

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada yer tutucu metodu ile alüminyum metalik köpük üretimi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar dört farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların ilk aşamasını tasarlanmış olan üretim sistemi ile farklı boyut ve oranlarda çözünebilen yer tutucu tuzlar kullanılarak yapılan üretim prosesini kapsamaktadır. İkinci aşamada üretilen metalik köpüklerin mekanik özelliklerinin ve NaCl takviye oranlarının yapıya etkisinin incelenmesi için basma ve mikro sertlik testleri uygulanmıştır. Sonraki aşamada ise mikroyapının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Son aşamada deney numunelerinin modellenerek elde edilen analiz sonuçlarının gerçek değerler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 3.1'de deneysel çalışmaların proses akış şemasına göre gerçekleştirilme aşamaları gösterilmektedir.

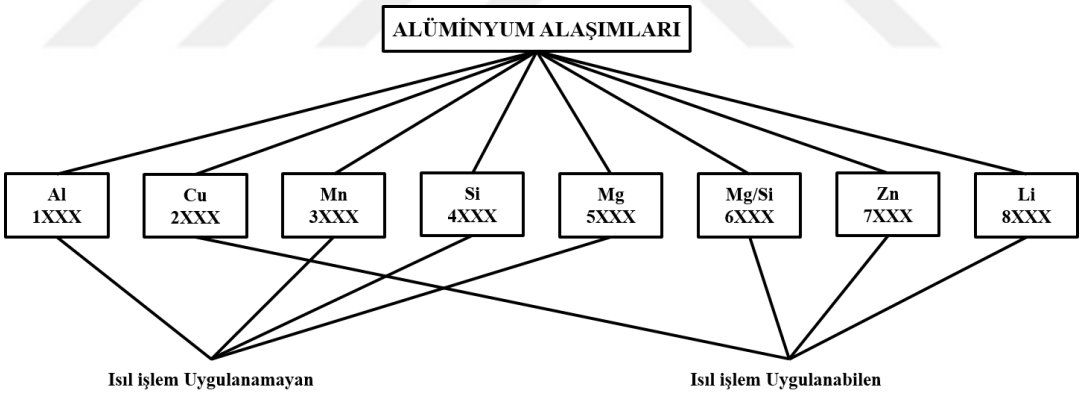


Şekil 3.1. Vakum döküm proses akış şeması

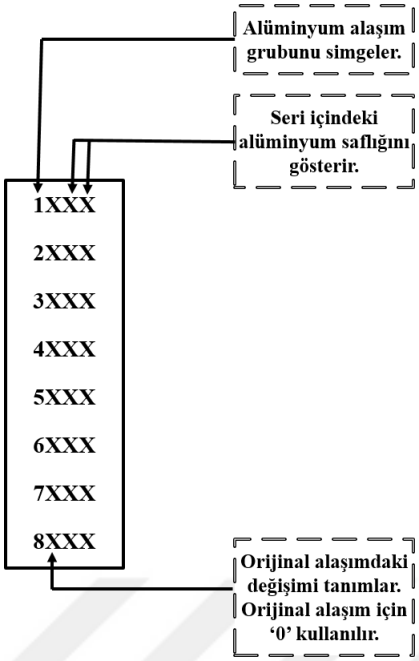
3.1. Malzeme ve Metot

Alüminyum, demir-çelik malzemelere kıyasla yaklaşık üç kat daha hafif olması ve mekanik özelliklerinin üstünlüğü nedeniyle günümüzün en çok kullanılan ikinci metal türüdür. Alüminyum alaşımların özellikleri alaşım elementlerine (bakır, silisyum, magnezyum, mangan ve çinko) bağlı olarak değişir.

Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlem mukavemeti iyileştirme için uygulanan bir prosestir. Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları olmak üzere iki ana alt gruba ayrılmıştır. Alüminyum dövme ve döküm alaşımların bir kısmına ısıl işlem uygulanabilmektedir. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlar 2xxx, 6xxx, 7xxx ve 8xxx serileri, ısıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları ise 1xxx, 3xxx, 4xxx ve 5xxx serileri olarak sınıflandırılabilir. Şekil 3.2'de alüminyum alaşım serilerin ısıl işlem kabiliyetleri ve Şekil 3.3'te alüminyum alaşım serilerin isimlendirilmesi gösterilmektedir [43].



Şekil 3.2. Alüminyum alaşım serileri ısı işlem kabiliyetleri [43]



Şekil 3.3. Alüminyum seri numaralandırılması [43]

Tablo 3.1. Alüminyum seri tanımları [43]

Al Serisi	Alaşım Elementi	Açıklama
1xxx	Saf Al	Elektrik ve kimya endüstrilerinde kullanılmaktadır.
2xxx	Al-Cu	Havacılık sektöründe kullanılmaktadır.
3xxx	Al-Mn	Sıvı tank ve mimari yapılarda kullanılmaktadır.
4xxx	Al-Si	Kaynaklı yapılarda ve otomobil parçalarında kullanılmaktadır.
5xxx	Al-Mg	Korozyon direncine ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılmaktadır.
6xxx	Al-Mg-Si	Ekstrüzyon ile üretilen parçalarda kullanılır.
7xxx	Al-Zn	Uçak parçalarının imalatında kullanılır.
8xxx	Al-Li	Uçak ve uzay sanayinde kullanılmaktadır.

6xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımlar en yaygın kullanılan ve geniş bir uygulama alanına sahip ekstrüzyon alaşımlarıdır. 6xxx serisi alüminyum alaşımları 7xxx serisi kadar mukavemet özelliği göstermemelerine rağmen iyi şekillendirilebilirlik, işlenebilirlik ve iyi korozyon direnci gösterdiklerinden dolayı tercih edilen bir alaşım türüdür. Bu çalışmada 6082 alüminyum alaşımı çalışmada kullanılmak üzere seçilmiştir. 6082 alaşımının kimyasal özellikleri Tablo 3.2'de, mekanik özellikleri Tablo 3.3'te, fiziksel özellikleri Tablo 3.4'te gösterilmiştir [44].

Tablo 3.2. 6082 alaşımının kimyasal özellikleri

% Ağırlık	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Cu	Ti
Minimum	0,7	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Maksimum	1,3	1,2	1,0	0,5	0,25	0,2	0,1	0,1

Tablo 3.3. 6082 alaşımının mekanik özellikleri

Isıl işlem (Temper)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Akma Dayanımı (Mpa)	Sertlik (HB)	Elastisite Modülü (Gpa)
T4	205	110	60	70
T5	270	230	80	70
T6	290	250	95	70

Tablo 3.4. 6082 alaşımının fiziksel özellikleri

Alaşım	Yoğunluk (g/cm^3)	Ergime Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	Spesifik Isı Kapasitesi ($J/g^{\circ}K$)	Isı İletim Katsayısı ($W/cm^{\circ}K$)	Genleşme katsayısı ($1/^{\circ}K10^{-6}$)
6082 (AlSi1MgMn)	2,70	555-650	0,88	1,80-1,89	24

Çözünen tip yer tutucu malzeme olarak kaya tuzu olarak kullanılan kayaç halinde NaCl (Sodyum Klorür) tercih edilmiştir. Kayaç halindeki tuzların küçük tane boyutlarına ayrışması için gerekli kırma işlemi çekiç vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan yer tutucu tuzlar 1, 2, 3 ve 4 mm ebatlarında boşluğa sahip tel elekler

kullanılarak elek analizinden geçirilmiştir. Bu süreç sonrasında 1 - 2, 2 - 3 ve 3 - 4 mm olarak 3 farklı tane boyutlarında tuz serileri elde edilmiştir. Bu farklı tane boyut serilerinden yola çıkılarak metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Deney serilerinin içerikleri Tablo 3.5'te gösterilmiştir. Deney serileri yer tutucu tane boyutunun hücre morfolojine etkisi baz alınarak hazırlanmıştır.

Tablo 3.5. Deney serilerinin içerikleri

Deney Serisi	Esas Metal	Ergitme Sıcaklığı(°C)	NaCl Tane Boyutu (mm)	Proses Süresi (dk.)
TS1	6082 Al Alaşımı	770	1 – 2	140
TS2	6082 Al Alaşımı	770	2 - 3	110
TS3	6082 Al Alaşımı	770	3 - 4	110

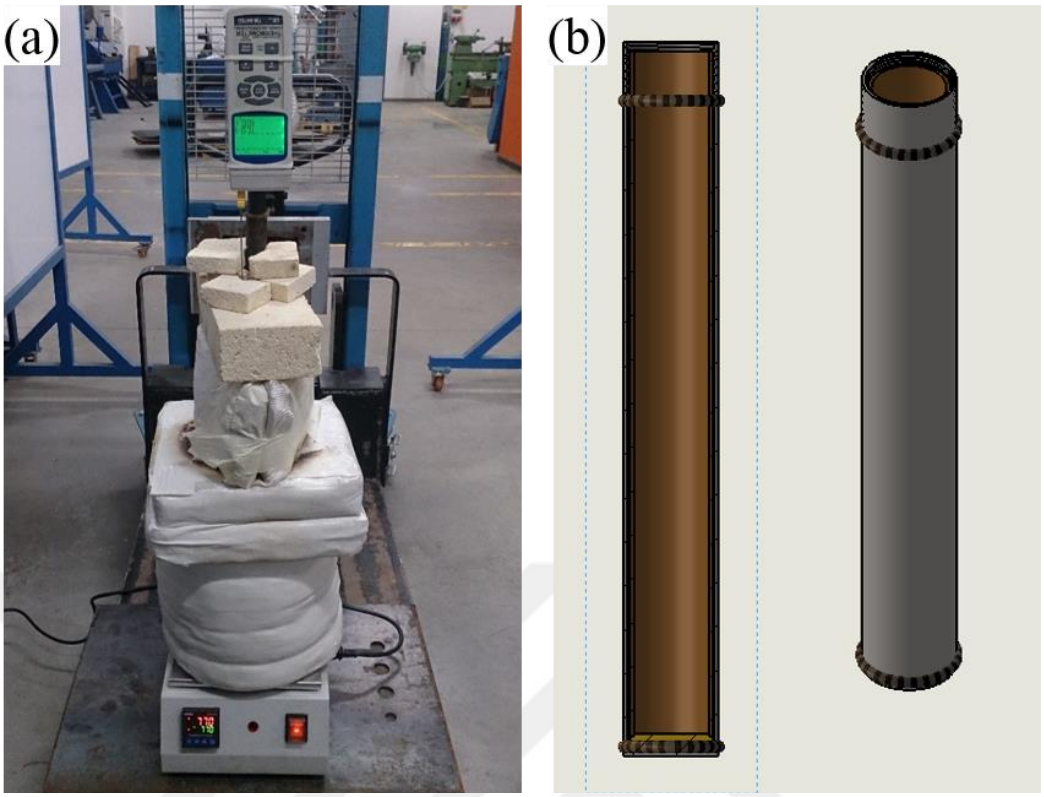
3.2. Deney Düzeneği

Bu çalışmada kullanılmak üzere tasarlanmış metalik köpük hazırlama ünitesi ergitme fırını, vakum ünitesi, kompresör, ergitme potası, koruyucu atmosfer kalıbı ve kontrol ünitesi sistemlerinden oluşmaktadır. Deney düzeneği için gerekli vakum ve kompresör sistemi Kocaeli Üniversitesi F. O. İhsaniye MYO talaşlı imalat atölyesinden temin edilmiştir. Ergitme işlemleri için tercih edilen NTS Makina marka endüstriyel fırının izolasyonu iç kısımdan refraktör tuğla, dış kısımda ise taş yünü kaplanarak sağlanmıştır.

Ergitme ünitesi aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- Sıcaklık kontrolü
- Kontrollü atmosfer
- 1200 °C maksimum sıcaklık
- 1,3 kW güç

Fırın ve kalıp sıcaklık kontrolü termostat ve ısılçift vasıtasıyla temin edilmiştir. Deneyde kullanılan fırın tertibatı Şekil 3.4(a)'da gösterilmiştir. Kalıp malzemesi olarak Ilta Inox marka 1 ¼" dış çapında, 2 mm et kalınlığında, 304 kalite, TP304L/1.4307 4301/304 üretim kodlandırılmasına sahip paslanmaz çelik boru kullanılmıştır. Şekil 3.4(b)'de döküm kalıp tasarımı kesit görünümü gösterilmiştir.



Şekil 3.4. (a) deney düzeneği fırın tertibatı, (b) döküm kalıpları tasarım kesit görünümü

Alüminyum köpük üretim prosesi 3 aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada kalıp içerisine yerleştirilen yer tutucu NaCl ile 6082 serisi alüminyum parça vakum basıncı etkisinde ergime sıcaklığının hemen altında bekletilmiştir. Burada NaCl tanelerinin kurutularak bünyesindeki fiziksel suyun ve sıcaklık etkisi ile ortaya çıkabilecek ve döküm kusurlarına yol açabilecek gazlardan arındırılmak amaçlanmıştır. Bu kurutma ve vakum proses başında uygulanarak üretim sırasında çıkabilecek su buharının ve istenmeyen gazların gözenek kusurlarına sebebiyet vermesine kaçınmak amaçlanmıştır. Vakum basıncı altında bekleme süresi 60 dk. olarak belirlenmiştir. Bu süre zarfından yukarıda belirtilen kurutma işleminin yeterli olacağı kanısına varılmıştır.

Vakum sistemi temel olarak vakum pompası, manometre, vakum tankı, kalıp, fitre ve bağlantı borularından oluşmaktadır. Kalıp içerisindeki havanın tahliyesi kontrol vanalarının açılıp kapatılması ile manuel gerçekleştirilmiştir. Santrifüj tip bir vakum pompası ile 700 mmHg vakum basıncı kalıp içerisine uygulanmıştır.

Üretimin ikinci aşamasında vakum hattı kapatılarak atmosfer basıncı altında fırın alüminyum ergime sıcaklığına çıkarılmıştır. Bu sırada atmosfer basıncını oluşturan havada nem istenmediği için proses nem arıtma sitemi bulunan kompresör vasıtasıyla yapılmıştır. Bu işlem sırasındaki bekleme süreleri tane boyutuna göre değişiklik göstermektedir. TS1 deney serisi için 90 dk., TS2 ve TS3 için 60 dk. olarak ön görülmüştür.

Son aşamada ise alüminyum ergiyip yer tutucu NaCl partikülleri arasına dolmasından sonra kalıp içerisine 8 bar kompresör basıncı uygulanır. Burada ki amaç alüminyumu tuzların içerisine doğru iterek tuzları tam olarak kavraması hedeflemektedir. Basınç altında bekleme süresi olarak 60 dk. seçilmiştir. Yeterli tutma miktarından sonra kalıp bozularak numune çıkarılır.

3.3. Numunelerin Hazırlanması

Elde edilen numuneler Protech marka PMYU12 model ultrasonik temizleyici vasıtasıyla su içinde tutularak çözünme işlemine tabi tutulmuştur. Suyun çözdürme özelliğini artırmak amacıyla her numune sonrası su değiştirilmiştir. Ultrasonik temizleyici çalıştırma parametreleri, sabit frekans değeri olan 40 kHz de, 60 $^{\circ}$C sıcaklıkta ve 30 dk. bekletilmesi olarak belirlenmiştir. Şekil 3.5'te ultrasonik temizleme cihazı gösterilmiştir.

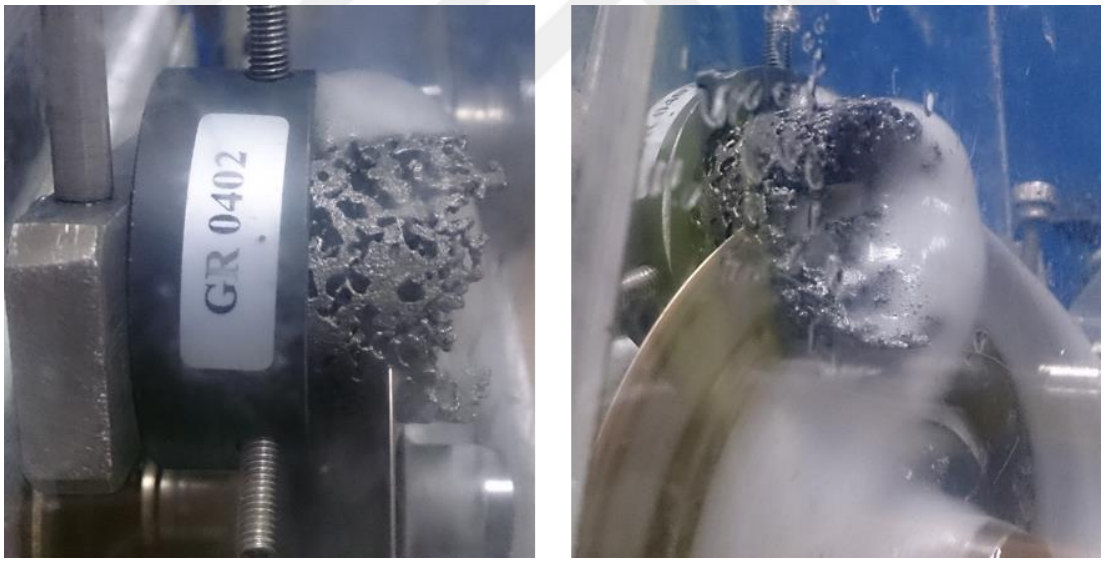


Şekil 3.5. Ultrasonik temizleme cihazı

Metalik köpüklerin üretim sonrası köpük içyapısını görmek amacıyla hassas kesme makinesi kullanılmıştır. Hücre morfolojisini bozmamasının yanı sıra mikroskobik incelemeler için iyi bir yüzey kalitesinde işlem yapmak için tercih edilmiştir. Şekil 3.6'da gösterilen Metkon marka düşük hızlı mikrocut 125 modeli hassas kesme amaçlı kullanılmıştır. Şekil 3.7'de metalik köpüklerin kesme sırasındaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.6. Microcut hassas kesme makinesi



Şekil 3.7. Hassas kesme sırasında köpük görünümü

3.4. Yoğunluk Ölçümü

Üretilen metalik köpük numunelerin yoğunlukları hacim ve kütle formülleri ile hesaplanmıştır. Kütle değerleri 2/10000 gr hassasiyetli Scaltec marka SBC 31 model hassas tartı ile ölçülmüştür. Şekil 3.8'de hassas tartı ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Hassas tartı kütle ölçümü

3.5. Mikroyapı Analizleri

Üretilen metalik köpük numuneler makroyapı incelemesi yapılmak amacıyla kesit alınıp, sırasıyla 1000, 1200 ve 2400'lük zımpara ile su ortamında zımparalanmıştır. Akabinde 1 μm elmas pasta ile parlatılmıştır. Nikon SMZ-745T model stereo mikroskop ile numune ara yüzeyleri incelenmiş ve görüntüleri kaydedilmiştir. Şekil 3.9'da kullanılan Nikon SMZ-745T model stereo mikroskop gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Nikon SMZ-745T stereo mikroskop

3.6. Sertlik Testleri

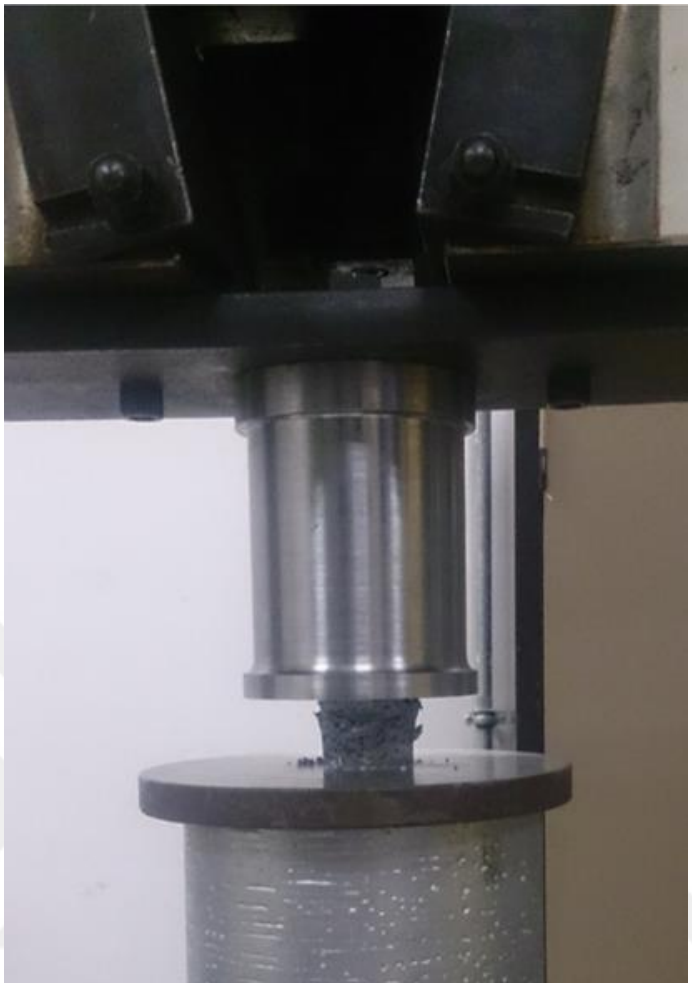
Üretilen metalik köpük numunelerin sertlik testleri ZWICK/ZHV 10 sertlik test cihazı ile yapılmıştır. Zımparalanan numunelerin Vickers sertlikleri 19,62 N test yükü altında 30 saniye tutulması sonucu oluşan deformasyon izleri Nikon SMZ-745T mikroskopta ölçülerek görüntüsü alınmıştır. Şekil 3.10'da sertlik cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Vickers sertlik cihazı

3.7. Basma Testleri

Üretilen metalik köpük numunelerin basma dayanımlarının incelenmesi için uygulanan basma testleri Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği ABD laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Basma deneyleri Dartec üniversal test makinesinde gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler tek eksenli 1 mm/dk. ilerleme hızında deformasyona tabii tutulmuştur. Şekil 3.11'de test cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Dartec üniversal test makinesinde basma deneyi

3.8. Mikro-CT Tarama

Üretilen metalik köpük numunelerin mikroyapılarının daha iyi incelenmesi ve sonlu elemanlar yöntemine adaptasyonu için gerekli tahribatsız muayene yöntemi olarak, son dönemlerde geçerliliği en fazla ve en yaygını olan bilgisayarlı mikro tomografik muayene yöntemi tercih edilmiştir. Mikro-CT tarama işlemi Tübitak Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme Enstitüsünde gerçekleştirilmiştir. Kabinli x-ışını radyoskopi cihazı olarak YXLON marka Y.MU2000 DCT modeli kullanılmıştır. Taratma işlemi sırasında 200 kV, 4 mA, 1 mm filtre ve 0,4 mm odaklama verileri kullanılmıştır. Bu işlem sonrasında 3 farklı deney serisine ait tomografik görüntü ve veriler elde edilmiştir. Şekil 3.12'de bilgisayarlı tomografi cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Tübitak MAM, Malzeme Enstitüsü bilgisayarlı tomografi cihazı

Elde edilen tomografik görüntüler University of Utah Scientific Computing and Imaging (SCI) Institute tarafından hazırlanan open source görüntü segmantasyon ve işleme programı Seg3D ve hacim işleme programı ImageVis3D yardımıyla STL formatına çevrilmiştir. Akabinde Meshmixer ve 3-matic mesh programları vasıtasıyla numune üzerinden parça kesilerek sonlu elemanlar yönteminde kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Sonlu elemanlar analiz programı olarak Msc Marc Mentat ve Deform-3D kullanılmıştır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

4.1. Metalik Köpük Üretimi Ön Deneme Çalışmaları

Yer tutucu metodu ile metalik köpük üretimi prosesinde sıvı alüminyumun kalıp içerindeki yer tutucu NaCl partikülleri arasına akmasını sağlamak için tutma sıcaklığının ayarlanması, tutma sürelerinin ayarlanması ve uygulanan basınç değerinin ayarlanması gibi ön etüt çalışmaları değerlendirilmiştir. Ulaşılan veriler neticesinde homojen dağılımlı alüminyum köpük eldesi için sistem optimizasyonu sağlanmaya çalışılmıştır.

Yöntemin ilk denemelerinde tutma sıcaklığı olarak 700 °C kullanılmıştır. Alüminyum ergiyik viskozitesinin NaCl partikülleri arasına sızmaya yetmediği görülerek kademeli olarak sıcaklık yukarı çekilmiş ve 770 °C sıcaklıkta elverişli numuneler üretilebildiği gözlemlenmiştir. Kullanılan NaCl partikül boyutlarının küçüldükçe ergiyik akmasının zorlaşacağı düşünüldüğünden, proses daha yüksek sıcaklıklara çıkartılmış, bu seferde NaCl partiküllerinin kristalize olarak sıcaklık artışından olumsuz etkilendiği kanısına varılmıştır. Bu nedenden dolayı küçük çaplı NaCl partiküllerin kullanımında tutma süresi değişken olarak kullanılmıştır. Şekil 4.1'de yetersiz akma sonucu oluşmuş numuneler gösterilmiştir. Ayrıca uygulan basınç, NaCl partikülleri deforme etmemesi açısından 8 bar seviyesinde tutulmuştur.



Şekil 4.1. Yetersiz akma sonucu oluşmuş numuneler

4.2. Numune Kesitleri

Yer tutucu yöntemiyle elde edilen alüminyum metalik köpük numunelerin boyutları, döküm sonrası numunelerin üst kısımda kalan kalıntı alüminyum ve alt kısımda oluşan asimetrik kısımların kesilerek deneyler için uygun hale getirilmiştir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te farklı seriler için dökülen numune ile testlerde kullanılmak üzere kesim öncesi numune resimleri verilmiştir.

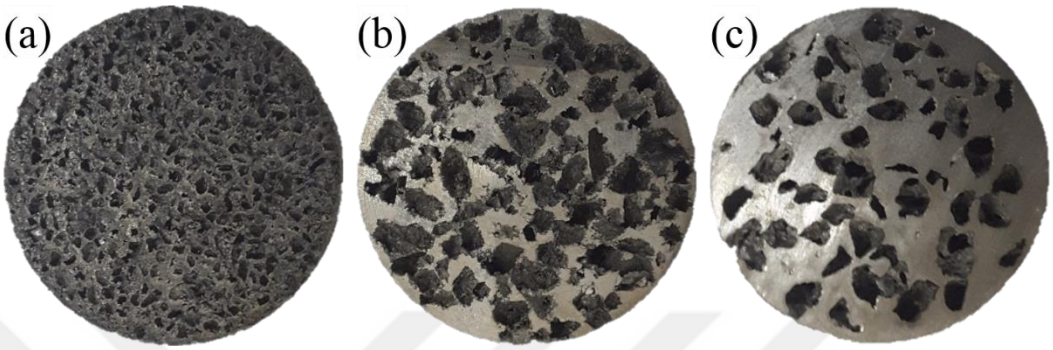


Şekil 4.2. Proses sonrası köpük görüntüsü (TS2)



Şekil 4.3. Proses sonrası köpük görüntüsü (TS3)

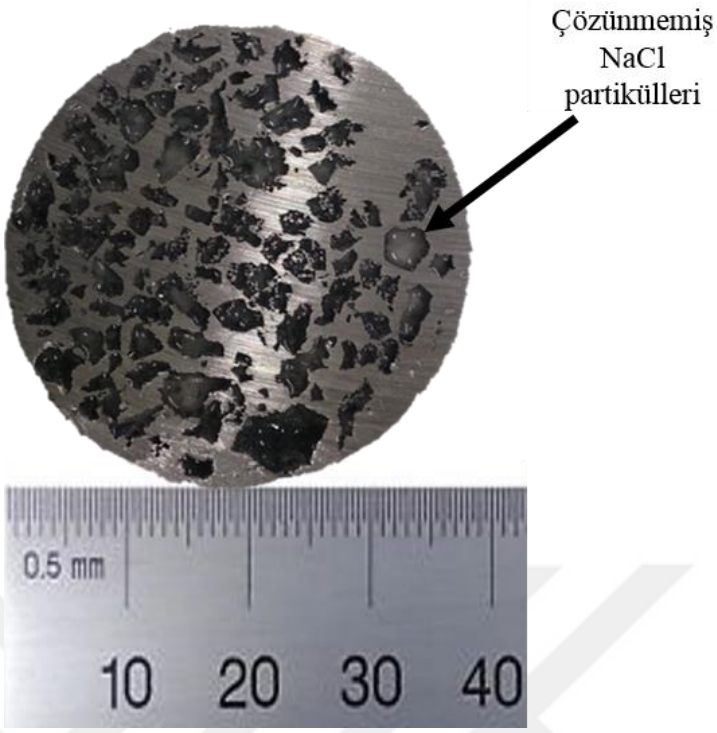
Elde edilen alüminyum metalik köpük numunelerin kesitleri alınarak iç kısımlardaki alüminyum ve NaCl dağılımı incelenmiştir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi kesit görüntülerinde açık hücreli köpük yapısına sahip oldukları anlaşılmaktadır. Ayrıca gözeneklerin köpük boyunca homojen dağıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4. Farklı seriler için alüminyum metalik köpük kesit görüntüsü (a) TS1, (b) TS2, (c) TS3

Alüminyum metalik köpük üretim sırasında kullanılan yer tutucu NaCl partikül boyutuna göre köpük içerisindeki hücre boyutunun da paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca alüminyum metalik köpük numunelerin proses esnasındaki durumları göz önüne alındığında hücre kenar kalınlıklarının alt kısımlara doğru nispeten azaldığı görülmüştür. Numunenin alt kısımlarında daha sıkı ve kapalı bir gözenek morfolojisine sahip olduğu, buna sebep olarak da alt kısımlardaki NaCl partiküllerin üstlerine binen yükten dolayı sıkıştığı ve ergiyik alüminyumun doldurması gereken boşlukların ufaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.5'te çözünme işleminden önce içerisinde NaCl partikülleri bulunan numune gösterilmiştir.

Benzer şekilde yoğunluk ölçümlerin hassas yapılabilmesi için numuneler mikrocut yardımıyla uygun hale getirilmiş ve hazırlanan tüm numuneler üzerinde yoğunluk ölçümleri yapılmıştır.

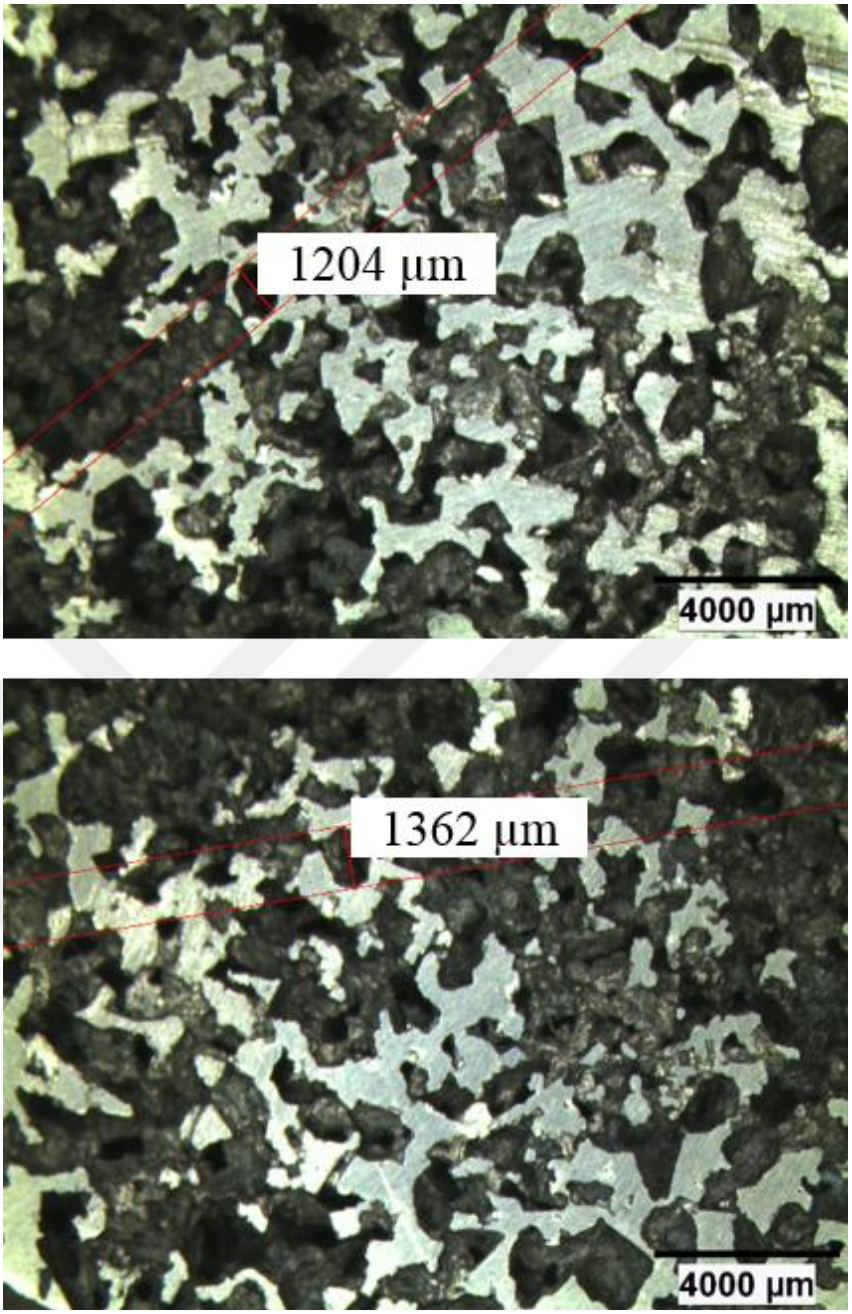


Şekil 4.5. Çözdürme öncesi alüminyum köpük

4.3. Gözenek Morfolojisi

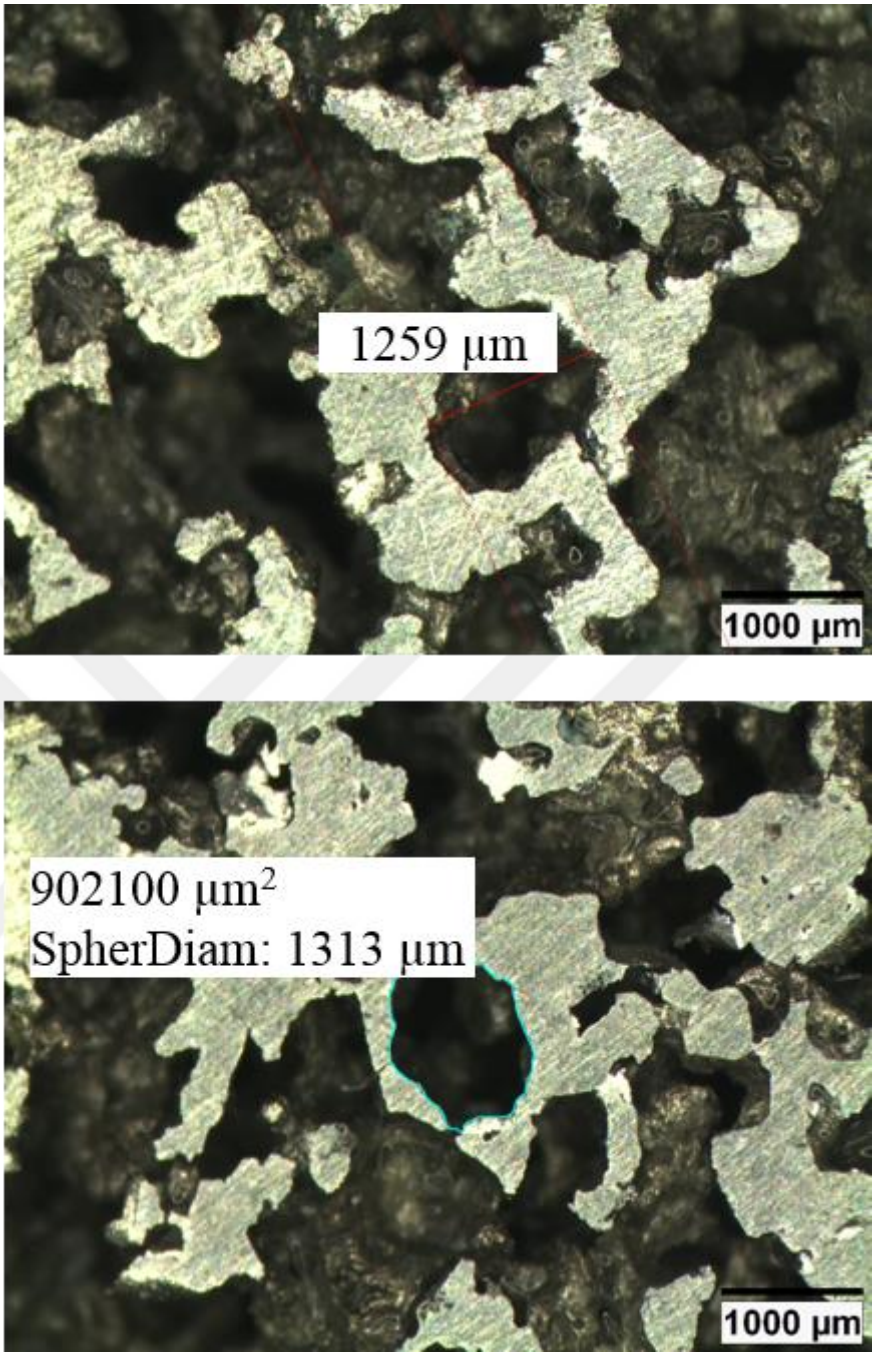
Elde edilen alüminyum köpük numunelerinin optik mikroskop tarafından çekilen görüntülerinde oluşan hücre morfolojilerinin homojen bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. NaCl partiküllerini çözdürme sonrası hücrelerin tam olarak ayırt edilebildiği görülmekte ve alüminyumun ergime esnasında NaCl partikülleri etrafını tam olarak sarmış olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 4.6'da TS1 serisinin optik mikroskop altında 0,67x optik yakınlaştırma ile çekilmiş hücre görüntüleri gösterilmiştir. Alüminyumun kesit alanına homojen yayıldığı görülmektedir. TS1 serisi için oluşan hücre çaplarının 1,2 mm ve 1,3 mm seviyelerinde olduğu ölçülmüştür.



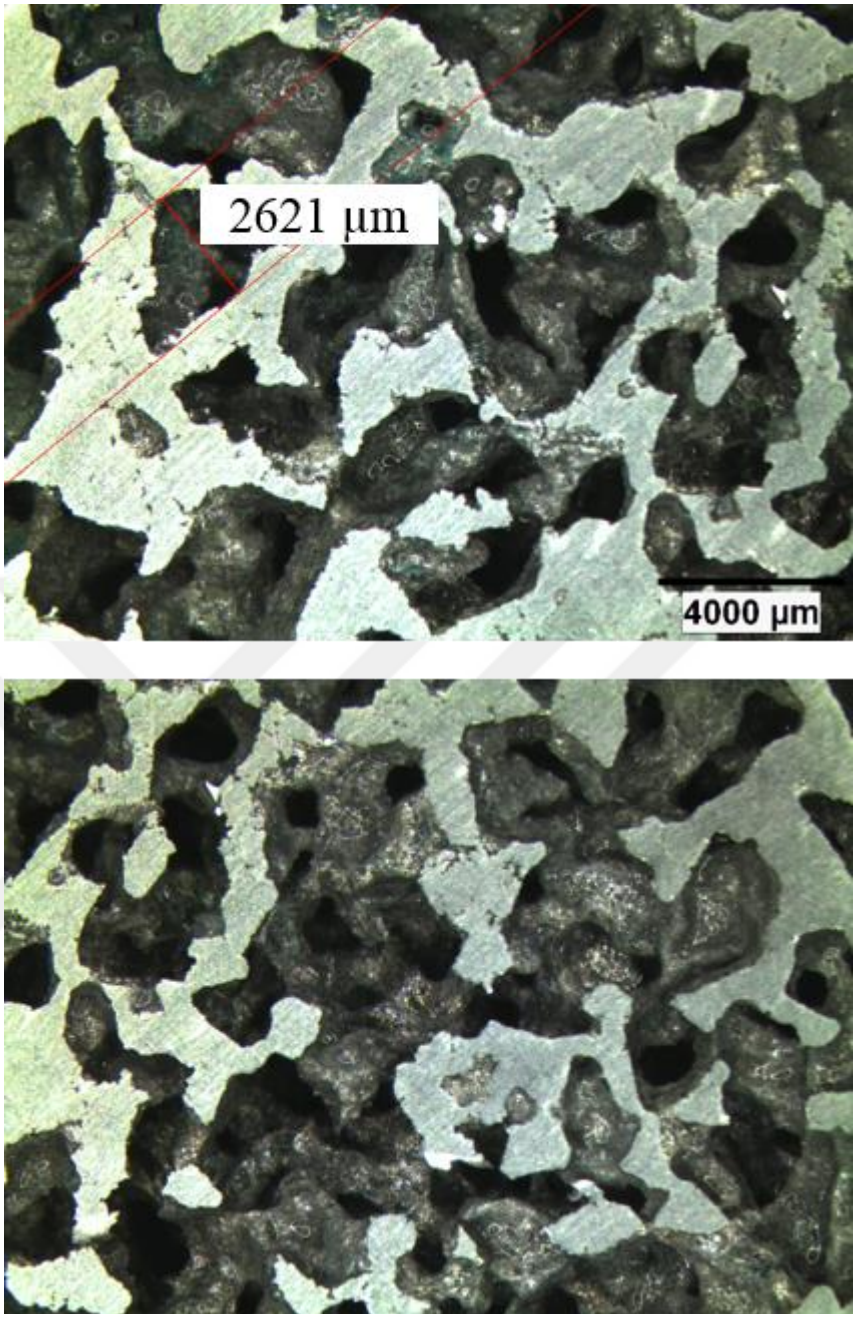
Şekil 4.6. TS1 serisi numuneleri için 0,67x optik görüntüleri

Şekil 4.7'de TS1 serisinin 20x yakınlaştırma ile çekilmiş hücre morfolojileri gösterilmiştir. Oluşan hücre alanı 0,9 mm^2 ve oluşan küre çapının 1,3 mm olduğu ölçülmüştür.



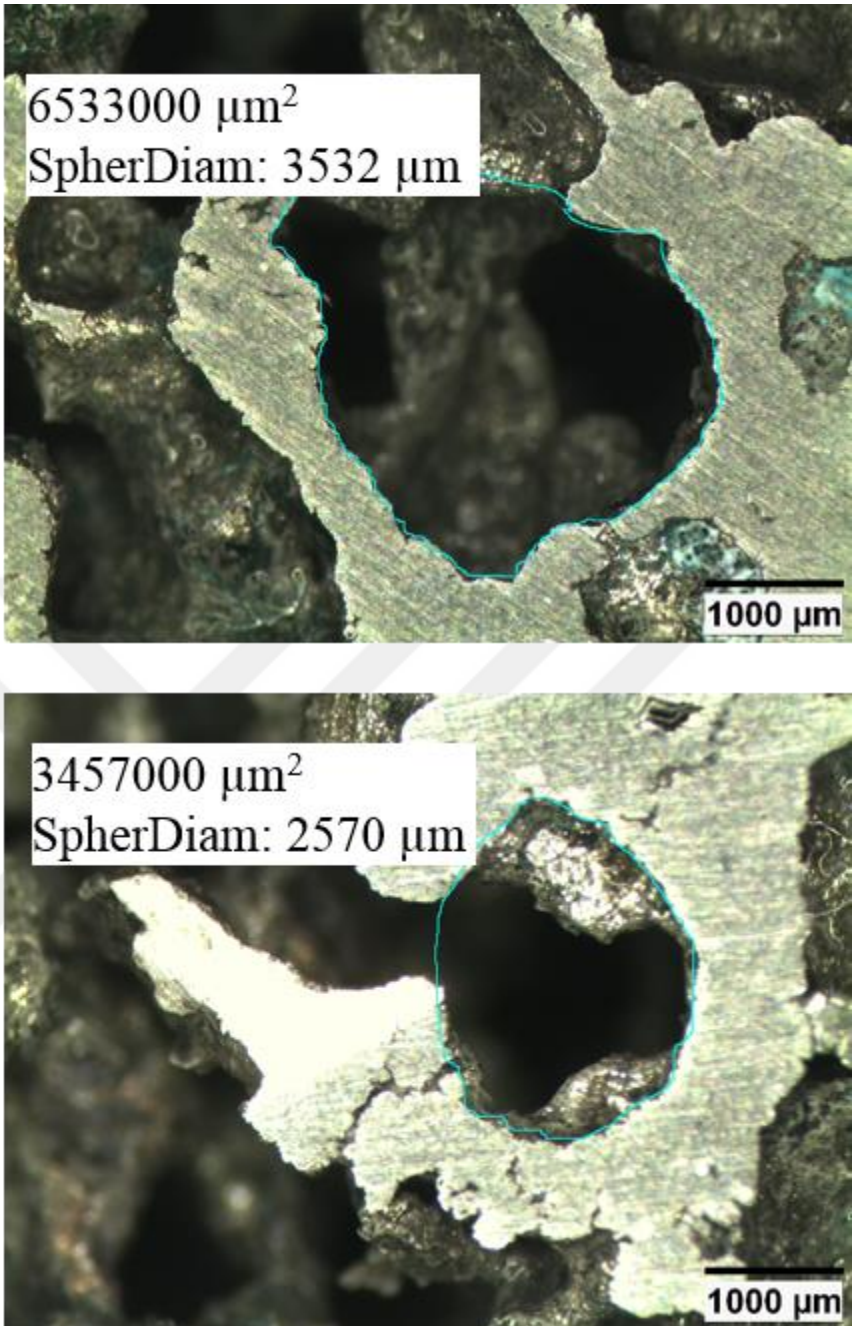
Şekil 4.7. TS1 serisi numuneleri için 20x optik görüntü

Şekil 4.8'de TS2 serisinin optik mikroskop altında 0,67x optik yakınlaştırma ile çekilmiş hücre görüntüleri gösterilmektedir. Benzer şekilde alüminyumun kesit alanına homojen yayıldığı görülmektedir. TS2 serisi için oluşan hücre çapının 2,6 mm seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir.



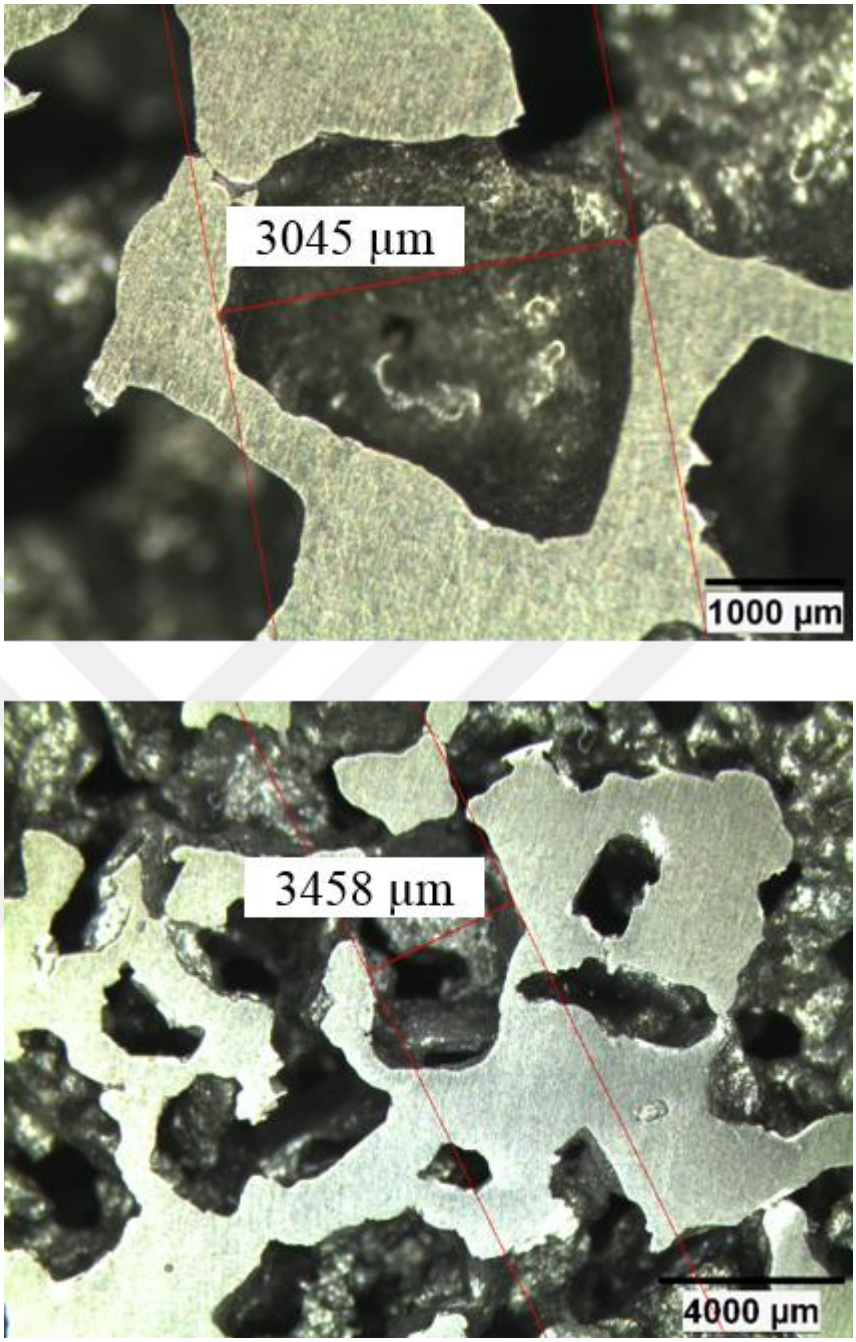
Şekil 4.8. TS2 serisi numuneleri için 0,67x optik görüntü

Şekil 4.9'da TS2 serisinin 20x yakınlaştırma ile çekilmiş hücre morfolojileri gösterilmiştir. Oluşan hücre alanı 6,4 mm^2 ve 3,45 mm^2 ve oluşan küre çapının 3,5 mm ve 2,5 mm olduğu ölçülmüştür.



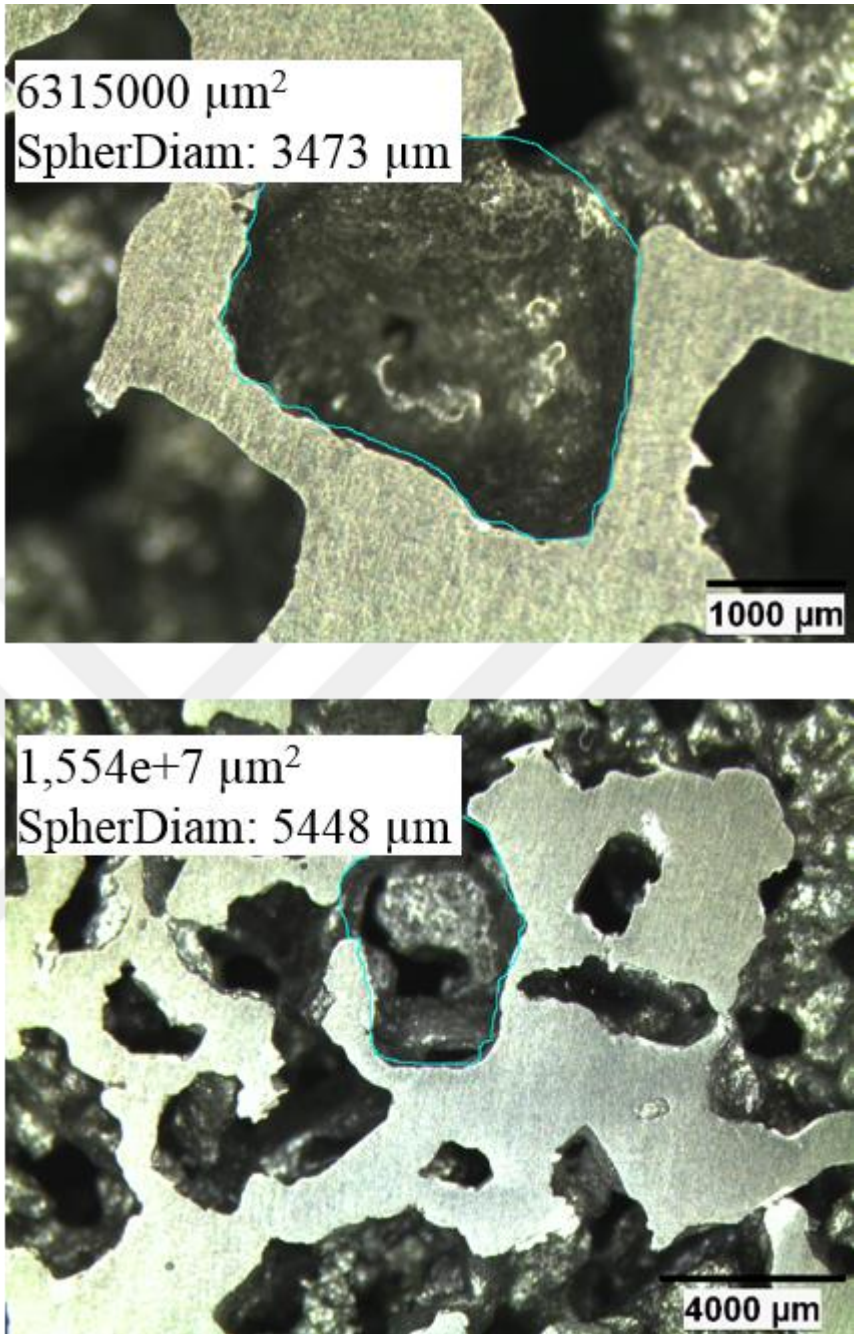
Şekil 4.9. TS2 serisi numuneleri için 20x optik görüntü

Şekil 4.10'da TS3 serisinin optik mikroskop altında 0,67x optik yakınlaştırma ile çekilmiş hücre görüntüleri gösterilmiştir. Bu seri içinde alüminyumun kesit alanına homojen yayıldığı söylenebilir. TS3 serisi için oluşan hücrelerin çapının 3,0 mm ve 3,4 mm seviyelerinde olduğu ölçülmüştür.



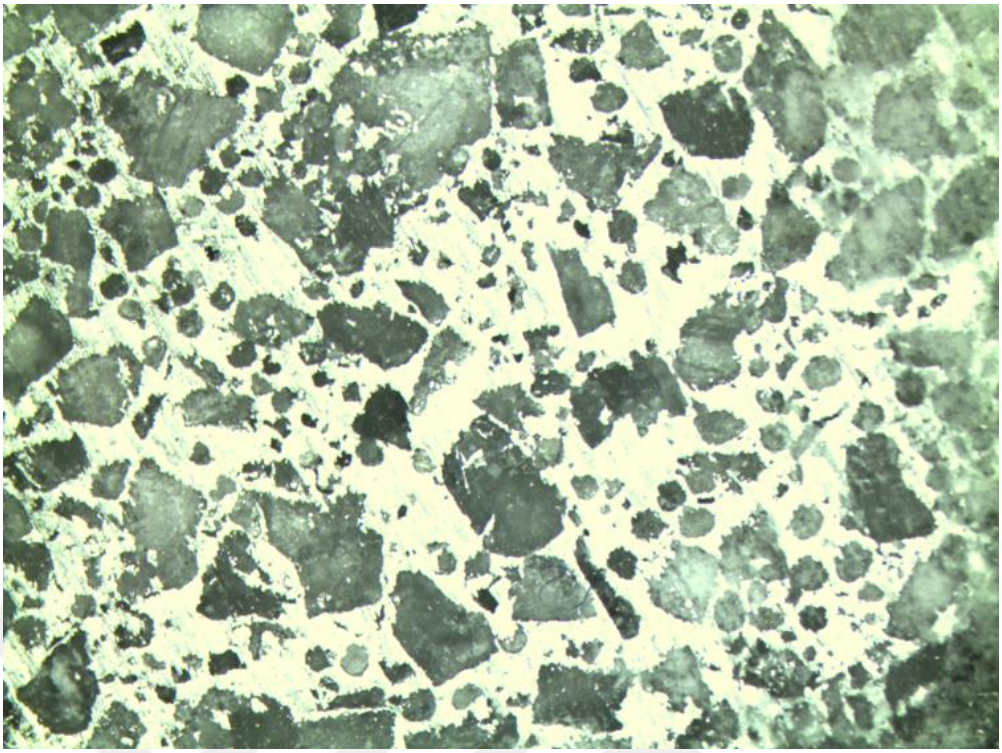
Şekil 4.10. TS3 serisi numuneleri için 0,67x optik görüntü

Şekil 4.11'de TS3 serisinin 20x yakınlaştırma ile çekilmiş hücre morfolojileri gösterilmiştir. Oluşan hücre alanı 6,3 mm^2 ve 15,5 mm^2 ve oluşan küreleri çapının 3,4 mm ve 5,4 mm olduğu ölçülmüştür.



Şekil 4.11. TS3 serisi numuneleri için 20x optik görüntü

Şekil 4.12'de üretilen alüminyum köpük numunelerin suda çözünmeden önce TS1 serisine ait alüminyum köpük ve NaCl partiküllerinin birlikte görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.12. TS1 serisinin çözdürme öncesi 10x optik görüntüsü

4.4. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Hücre boyutundaki artış köpük yoğunluğunda artışa neden olmaktadır. Yapılan ilk hesaplamalarda TS1 serisi yoğunluk ve göreceli yoğunluk değerleri en yüksek seri olarak hesaplanmış. Akabinde numunelerin X-ray röntgenleri çekilmiş ve numune içerisinde çözünmemiş NaCl partikülleri olduğu anlaşılmıştır. Hücre boyutunun küçülmesi ile ultrasonik temizlik sırasında temizleme suyunun numune içerisine ilerleyemediği, neticesinde numune içinde NaCl partiküllerin kalmasına yol açtığı düşünülmektedir. Tablo 4.1'de hesaplanan numune değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Numune yoğunlukları ve göreceli yoğunlukları

Numune Serisi	Yoğunluk (g/cm^3)	Göreceli Yoğunluk (g/cm^3)
TS1	0,384	0,102
TS2	0,303	0,112
TS3	0,342	0,126

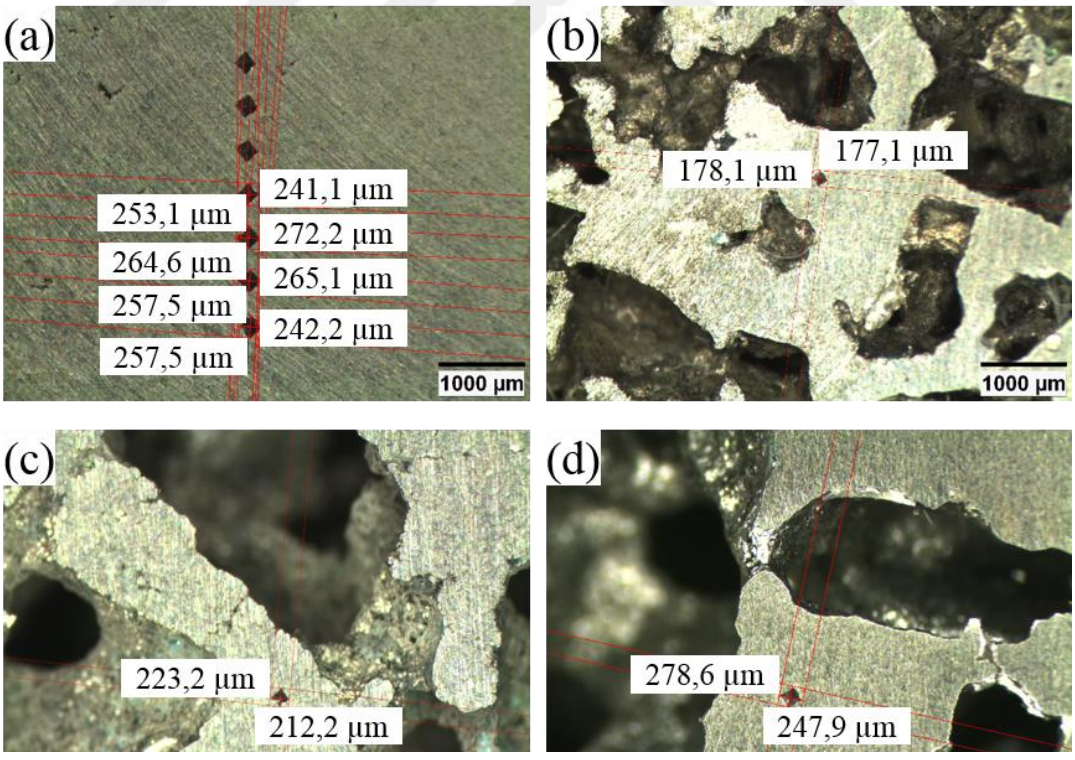
4.5. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Elde edilen numunelerin sertlik değerleri için Vickers sertlik değerleri hesaplanmıştır. İlk etapta matris malzemenin sertlik değeri tespit edilmiş, akabinde deney serilerine göre köpük malzemelerin sertlik değerleri matris malzemeye ve serilere göre karşılaştırılmıştır.

Vickers sertlik testinde tepe açısı 136° olan kare piramit elmas uç kullanılmaktadır. Sertlik hesaplaması için kullanılan formül aşağıdaki gibidir. Tablo 4.2'de deney serilerine ve esas malzemeye göre Vickers sertlik değerleri gösterilmiştir. Denklem (4.1) de sertlik formülasyonu gösterilmiştir.

$$HV = \frac{F}{A} \approx \frac{1{,}8544F}{d^2} \tag{4.1}$$

Yukarıdaki formülde F, uygulanan yük (kg), d, iz köşegenlerinin ortalaması olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.13. Sertlik değerlerinin mikroskop altındaki görünümü (a) esas malzeme, (b) TS1, (c) TS2, (d) TS3

Vickers sertlik değerleri incelendiğinde esas malzeme sertliği 57HV olarak hesaplanmış, TS2 ve TS3 serileri matris malzemeye yakın bir değerde olduğu görülmüştür. TS1 serisi ise sertlik değeri diğer serilere ve esas malzemeye göre yüksek değerde hesaplanmıştır.

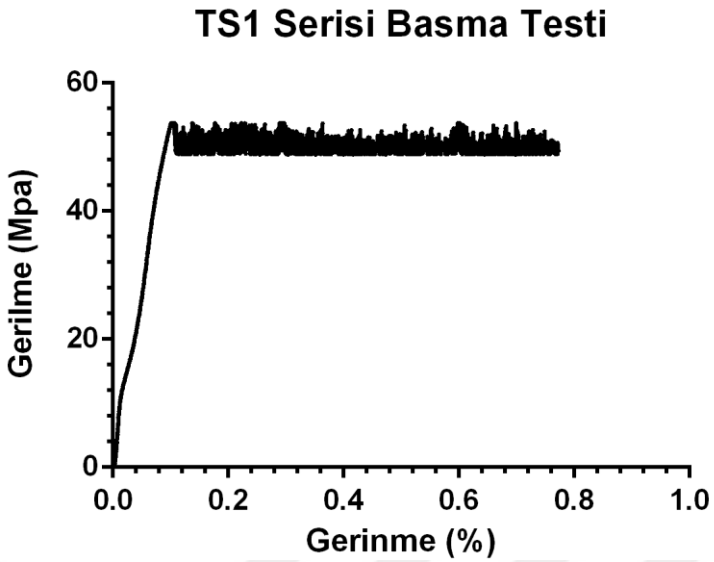
Tablo 4.2. Numune serileri sertlik ölçümleri

Numune Serisi	Vickers Sertlik (HV)
Esas Malzeme	57
TS1	117
TS2	78
TS3	54

4.6. Basma Testi Sonuçları

Elde edilen alüminyum metalik köpük numunelerin basma deneyleri her bir deney serisi için gerçekleştirilmiştir. Basma testleri seri farklılıklarını oluşturan hücre boyutları açısından karşılaştırılmış olarak aşağıda verilmiştir. Metalik köpüklerin basma yükleri altından kendine özgün göstermiş oldukları gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri 3 ana bölgede oluştuğu görülmüştür. Bu eğri üzerinde lineer elastik bölge, plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgeleri olmak üzere üç farklı bölge tanımlanabilir.

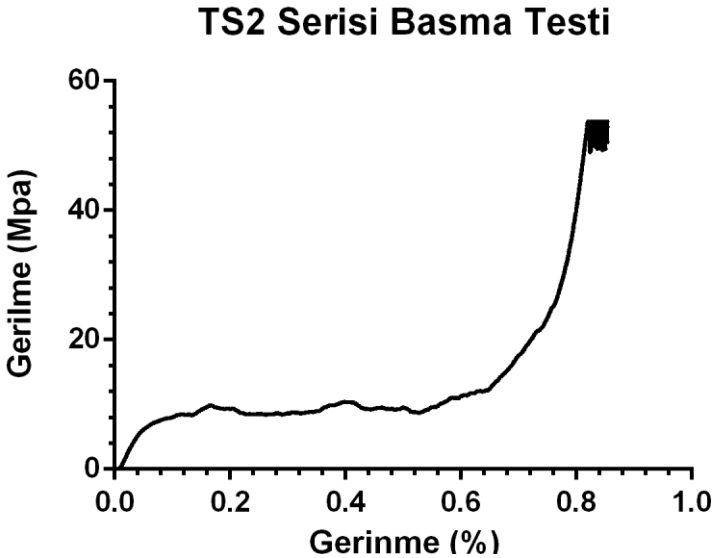
Yapılan deneyler sonucunda metalik köpük hücre boyutunun gerilme-gerinme değerleri üzerinde etkili olduğu ve hücre boyutunun değişmesi ile farklı basma karakteristik eğriler sergilediği gözlemlenmiştir. TS1 serisine ait basma deneyi gerilme-gerinme grafiği Şekil 4.14'te verilmiştir. I bölgede lineer elastik davranış % 0,1 birim uzama değerine kadar gözlemlenmiştir. Akabinde II bölgede gerinme değeri artış göstermesine rağmen gerilme değeri kısmen sabit bir değer izlemiştir. Bu gerilme değerinin plato bölgesine ait olduğu görülmüştür. Grafiğin devam eden kısımlarında ise III bölge olarak düşünülmüş gözeneklerin kaybolması sonucu gerilme değeri artış gösterdiği tahmin edilmiştir.



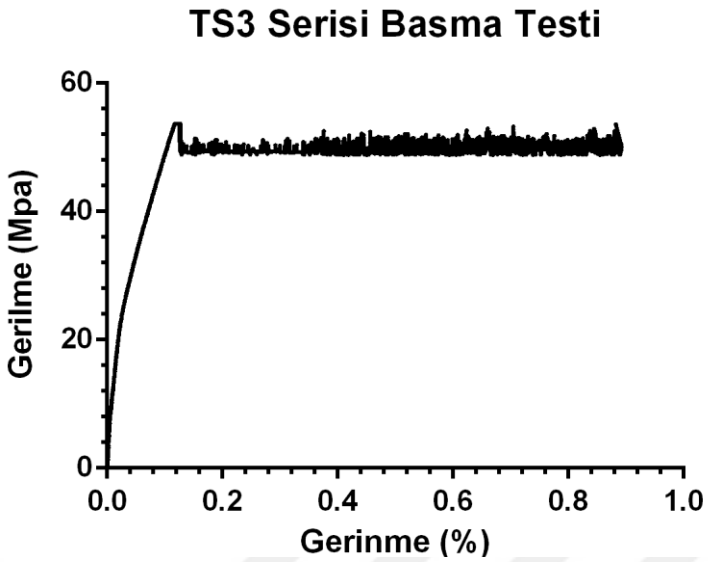
Şekil 4.14. TS1 serisine ait gerinme-gerilme eğrisi

TS2 serisine ait basma deneyi gerilme-gerinme grafiği Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda I bölgede lineer elastik davranış benzer şekilde % 0,5 birim uzama değerine kadar görülmüştür. II bölgede ise plato bölgesine ait bir deformasyon davranışı sergilemiş olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 4.16'da TS3 serisine ait basma deneyi ait gerilme-gerinme grafiği verilmiştir. Eğrinin I bölgesinde lineer elastik eğri % 0,11 birim uzama değerine kadar gözlemlenmiştir. Plato bölgesine ait bir deformasyon davranışı II bölgede gözlenmiştir.



Şekil 4.15. TS2 serisine ait gerinme-gerilme eğrisi

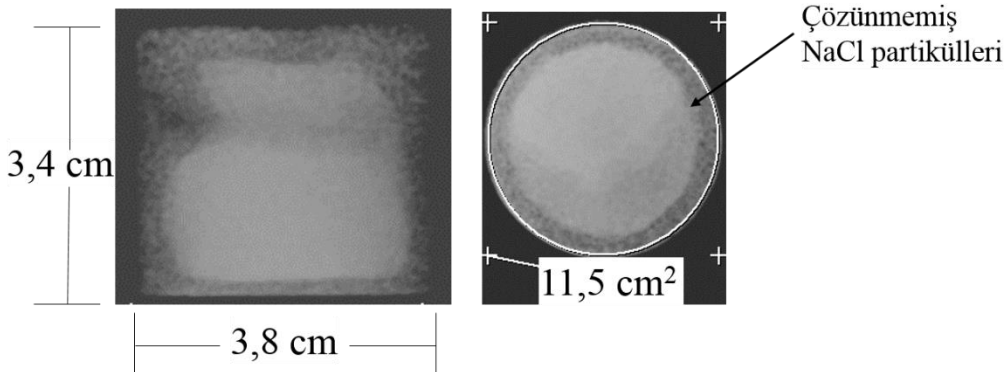


Şekil 4.16. TS3 serisine ait gerinme-gerilme eğrisi

TS1 ve TS3 serileri benzer karakteristik göstermelerine rağmen TS2 serisine göre farklı karakteristikte basma dayanımı göstermiştir. Hücre boyutundaki değişimin gerilme-gerinme grafiğini doğrudan etkilediği anlaşılmıştır.

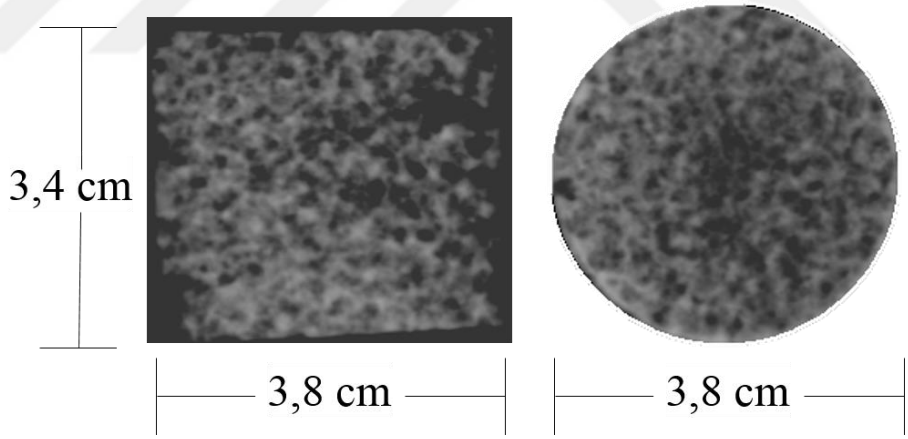
4.7. X-ray Analizleri

TS1 serisine ait numunenin X-ray görüntüsü Şekil 4.17'de verilmiştir. Hücre boyutlarının yer tutucu NaCl partikül çapına bağlı olarak seri aralığında olduğu görülmüştür. Ayrıca numune içerisinde çözünmemiş yer tutucu NaCl partiküllerine rastlanmıştır. Çözme süresinin tüm seriler için eşit tutulmasına rağmen özellikle TS1 serisinde bu duruma sık rastlanmıştır. Bunun sebebi olarak da hücre boyutunun küçülmesi ile çözdürücü suyun numune merkezine doğru tesir edemediği düşünülmektedir. Bu bulgular dahilinde hücre boyutunun düşmesi ile çözdürme süresinin artması gerektiği kanaatına varılmıştır. Daha küçük hücre boyutun da üretilmesi planlanan metalik köpükler için mevcut koşullardaki ultrasonik temizleme sisteminin yeterli olamayacağı öngörülmüştür.



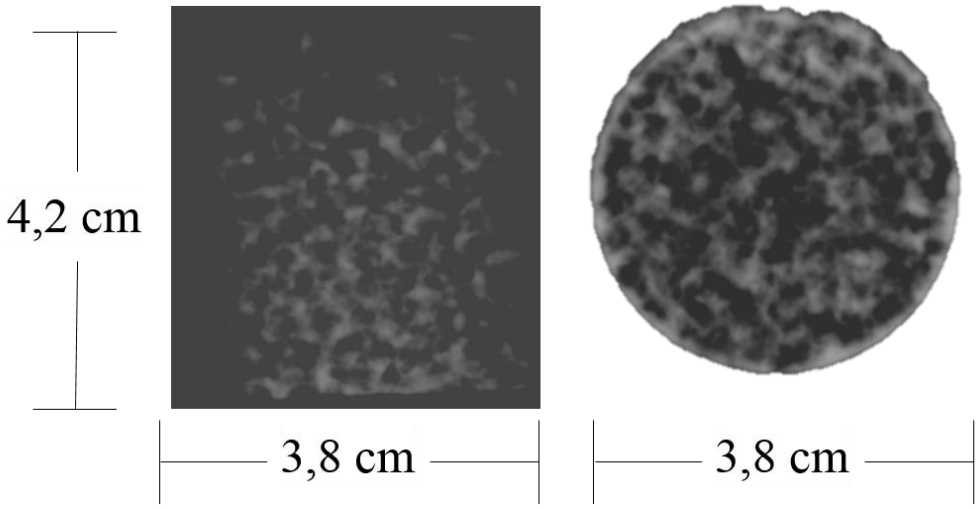
Şekil 4.17. TS1 serisi X-ray görüntüsü

TS2 serisine ait bir numunenin X-ray görüntüsü Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Hücre boyutlarının seri aralığında olduğu görülmüştür. Tüm seriler için eşit çözdürme süresinde bazı TS2 seri numunelerinin içerisinde kısmen çözünmemiş NaCl partikülleri rastlanmış, bunun nedeninin kırılan kısmi NaCl partiküllerin seri aralığının içerisinden çıkarak hücre boyutlarının düşmesine yol açtığı düşünülmektedir. Çözdürme süresinin ve çözdürme sıcaklığının artırılması ile TS2 serisi için bu sorun aşılmıştır.



Şekil 4.18. TS2 serisi X-ray görüntüsü

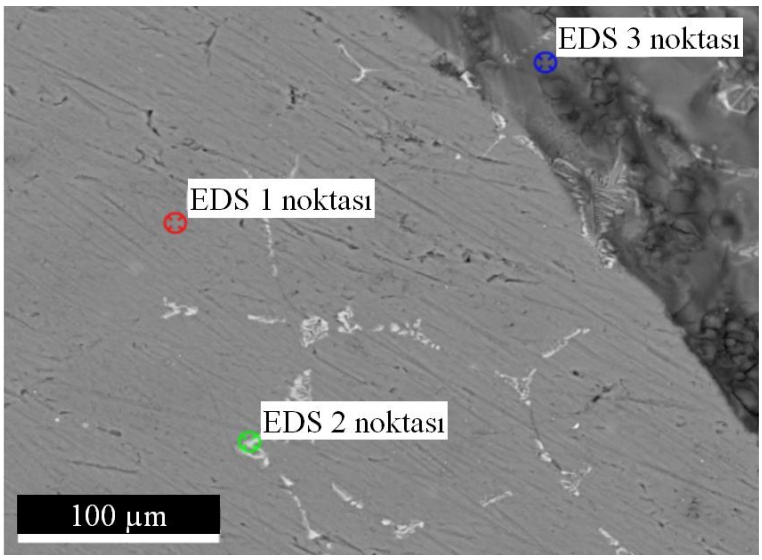
TS3 serisine ait numunenin X-ray görüntüsü Şekil 4.19'da görülmektedir. Çözdürme sonrası numuneler içerisinde çözünmemiş NaCl partiküllerine rastlanmamıştır. Hücre boyutları seri aralıklarında olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.19. TS3 serisi X-ray görüntüsü

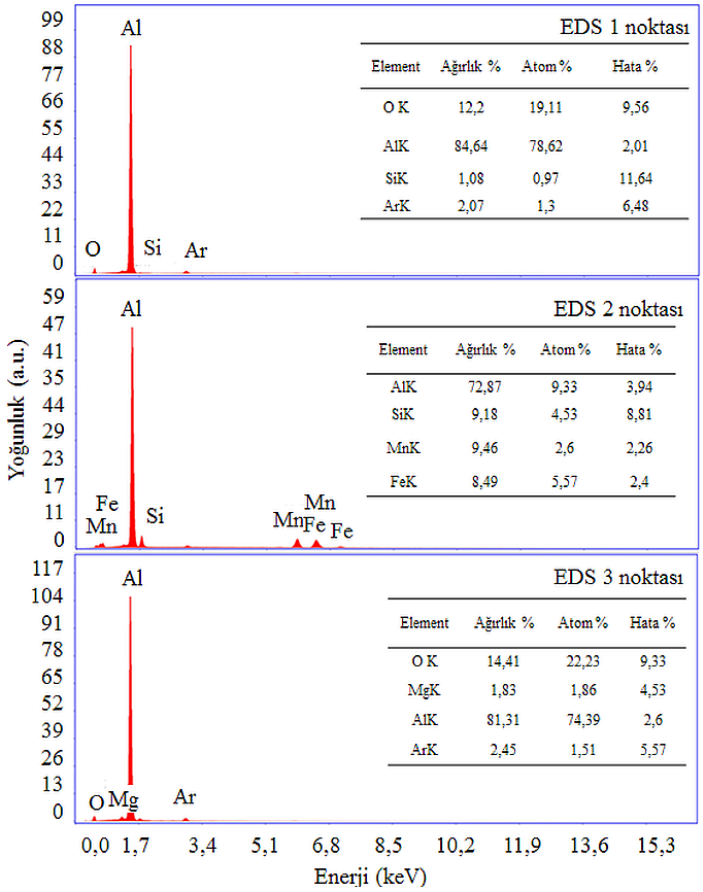
4.8. Mikroyapı İncelemeleri

Metalografik inceleme amacıyla üretimi gerçekleştirilmiş olan metalik köpüklerden hücre duvarının kesilip 2400 kum seri zımparalama işlemlerinin ardından 1 mikron koloidal parlatma uygulandıktan sonra alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 4.20'de görülmektedir.



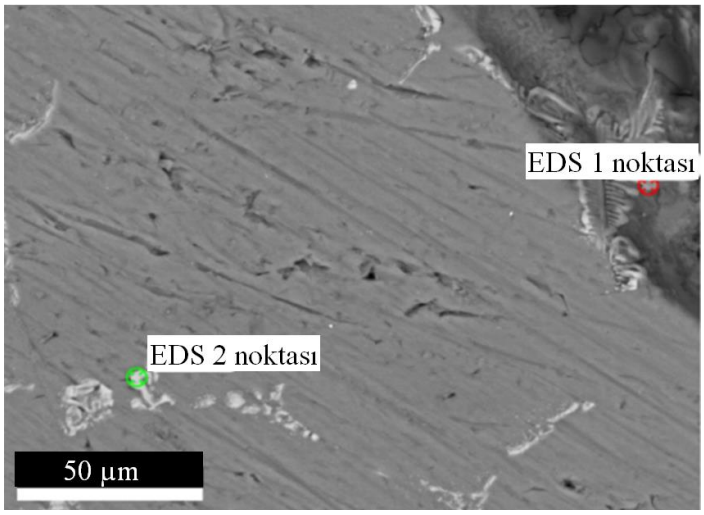
Şekil 4.20. SEM mikroyapı görüntüsü

Söz konusu görüntüden hücre duvar yüzeyi ve gözeneğe ait iç yüzey yapısı görülmektedir. Gerek hücre duvar yüzeyinde gerekse gözenek iç yüzeyinde tane sınırlarına düzenli bir hat halinde sürekli çökelti yapısı görülmektedir. Element bazında analiz yapmak üzere inceleme noktasının biri tane içi, ikincisi tane sınırı çökelti hattı ve üçüncüsü gözenek iç yüzeyi ele alınmıştır. Söz konusu bu 3 noktada yapılan EDS analiz sonuçları Şekil 4.21'de verilmiştir. Analizler incelendiğinde EDS 1 noktasında oksitlenmenin mevcut olduğu çoğunluğu Al olan ve Si içeren bir yapı tespit edilmiştir. Diğer bir nokta olan EDS 2 noktası ise taneler arası çökelti yapısını ele almaktadır. Burada yoğun alüminyumun yanı sıra Si, Mn ve Fe elementlerinin varlığına rastlanmıştır.

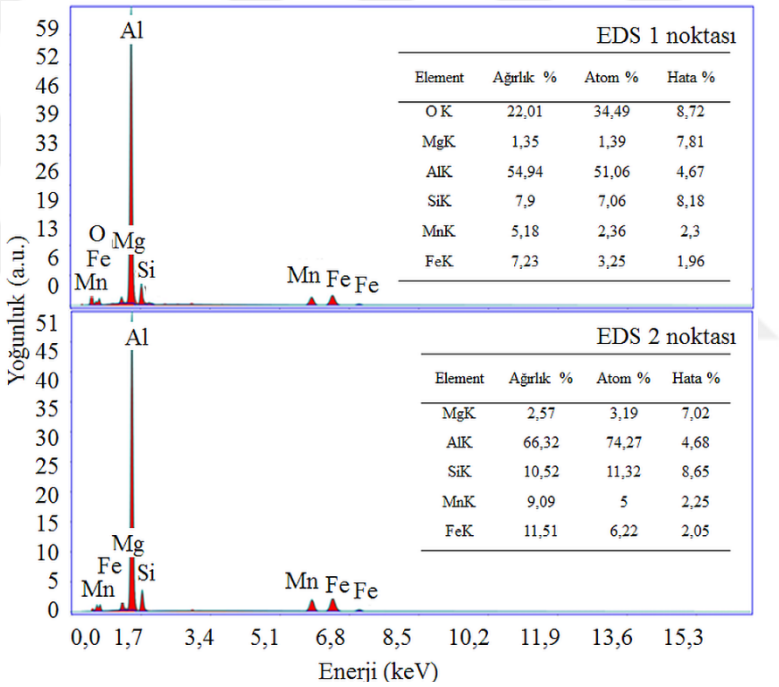


Şekil 4.21. 3 noktada yapılan EDS analiz sonuçları

Bir SEM-EDS analizi Şekil 4.22'te görülmektedir. Burada da EDS 1 ve 2 noktaları üzerinden alınan verilere göre Al, Si, Fe, Mn, Mg elementlerini barındıran intermetalik oluşumların varlığı tespit edilmiştir.



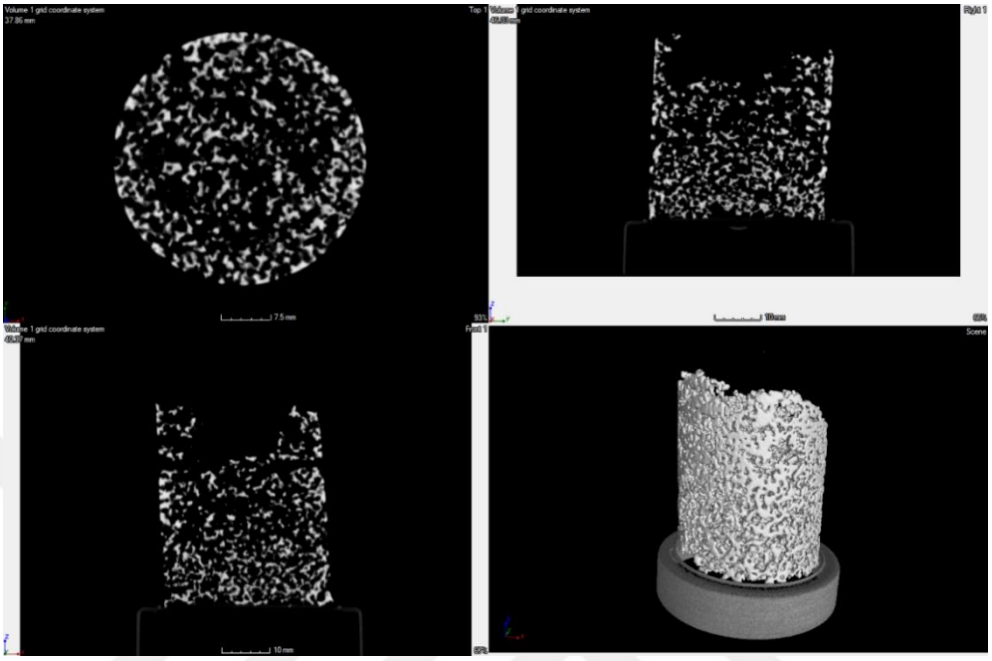
Şekil 4.22. SEM mikroyapı görüntüsü



Şekil 4.23. 2 noktada yapılan EDS analiz sonuçları

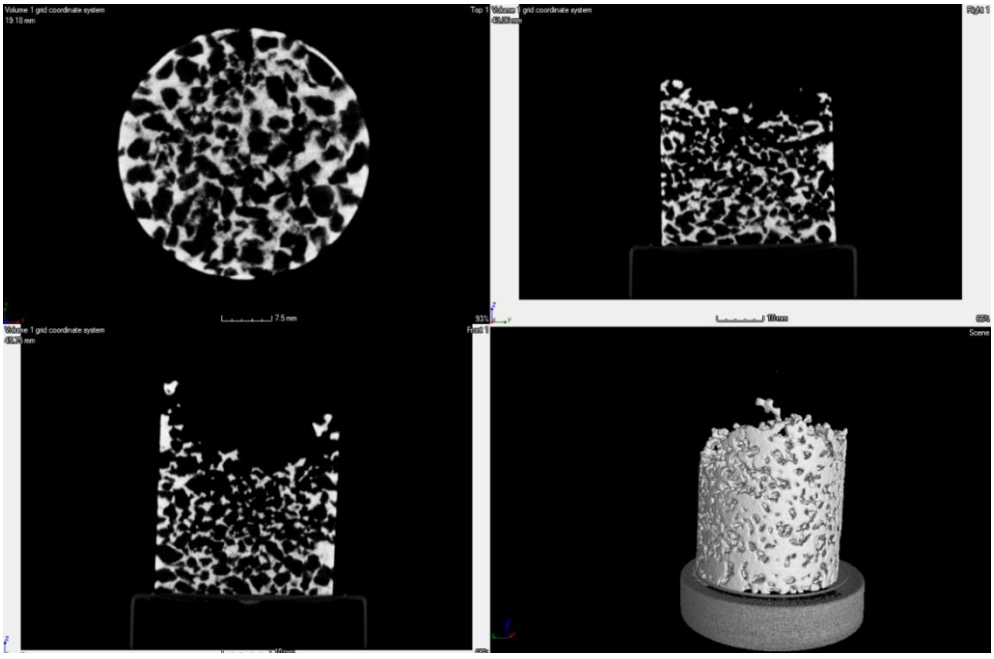
4.9. Mikro-CT Analizleri

Şekil 4.24'te TS1 serine ait bilgisayarlı tomografik görüntü verileri gösterilmiştir.



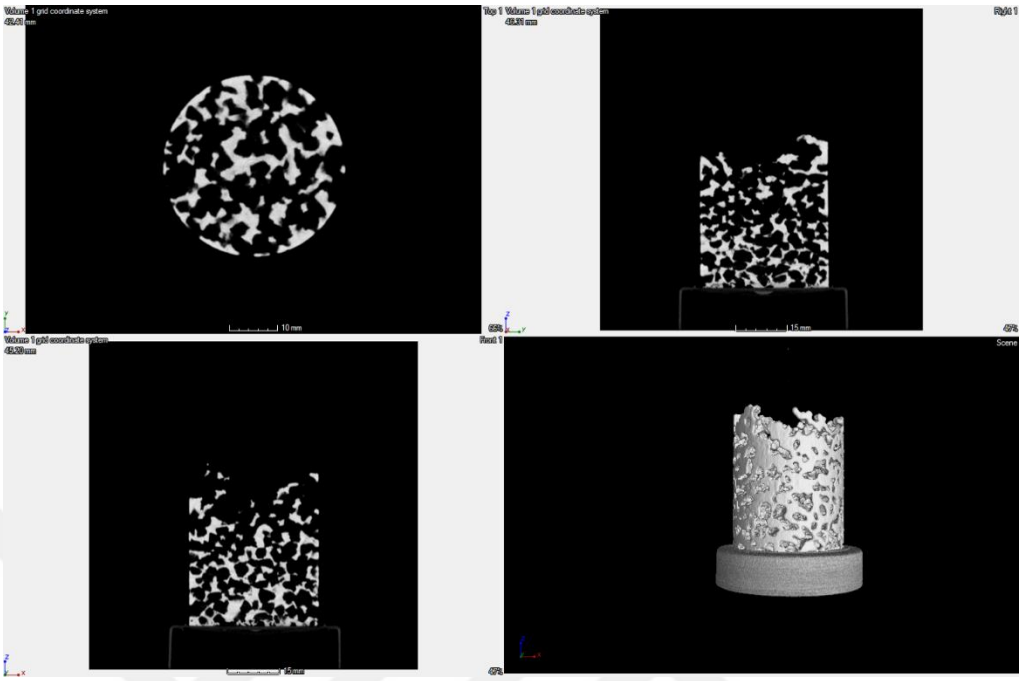
Şekil 4.24. TS1 serisi tomografik görüntüsü

Şekil 4.25'de TS2 serine ait bilgisayarlı tomografik görüntü verileri gösterilmiştir.



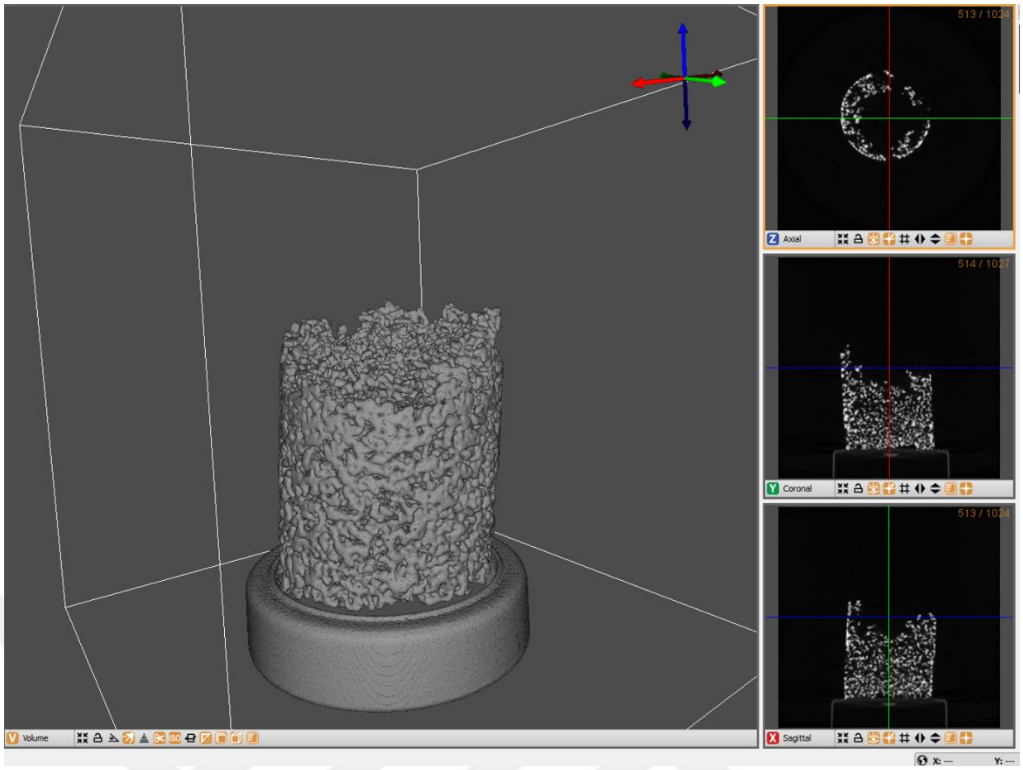
Şekil 4.25. TS2 serisi tomografik görüntüsü

Şekil 4.26’da TS3 serine ait bilgisayarlı tomografik görüntü verileri verilmiştir.



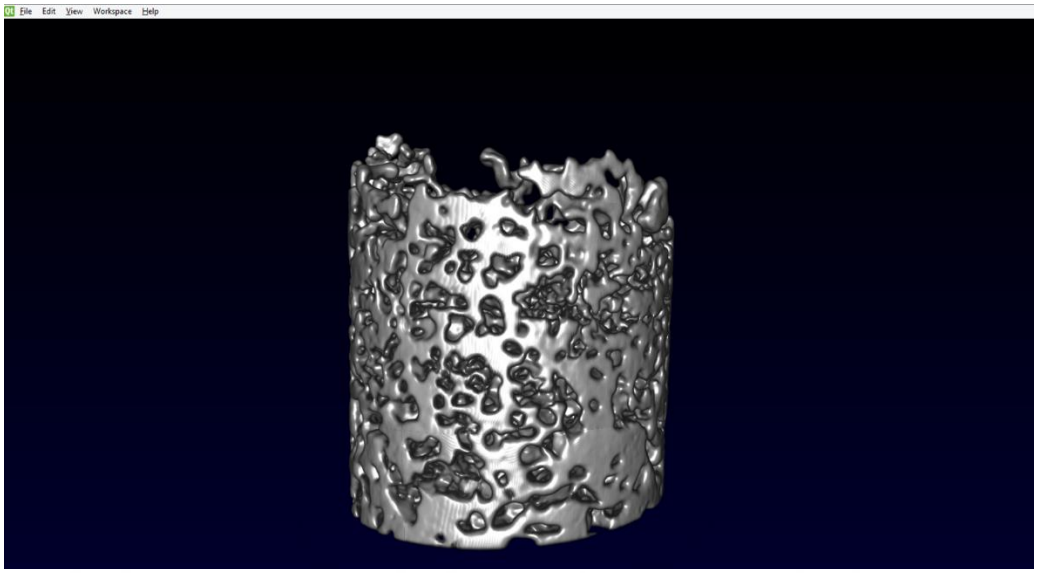
Şekil 4.26. TS3 serisi tomografik görüntüsü

Elde edilen 1024x1024x1024 çözünürlükte tomografik görüntüler çeşitli görüntü işleme proseslerinden geçerek sonlu elmanlar yönteminde kullanılmak üzere STL formatına çevrilmiştir. Bu görüntü işleme proseslerinden ilk olarak görüntü geometrisinin ayrıştırılması işlemi için Seg3D görüntü segmantasyon programı kullanılmıştır. Şekil 4.27’de Seg3D program ara yüzü ve TS1 serisi için işlenen görüntü verileri gösterilmiştir.



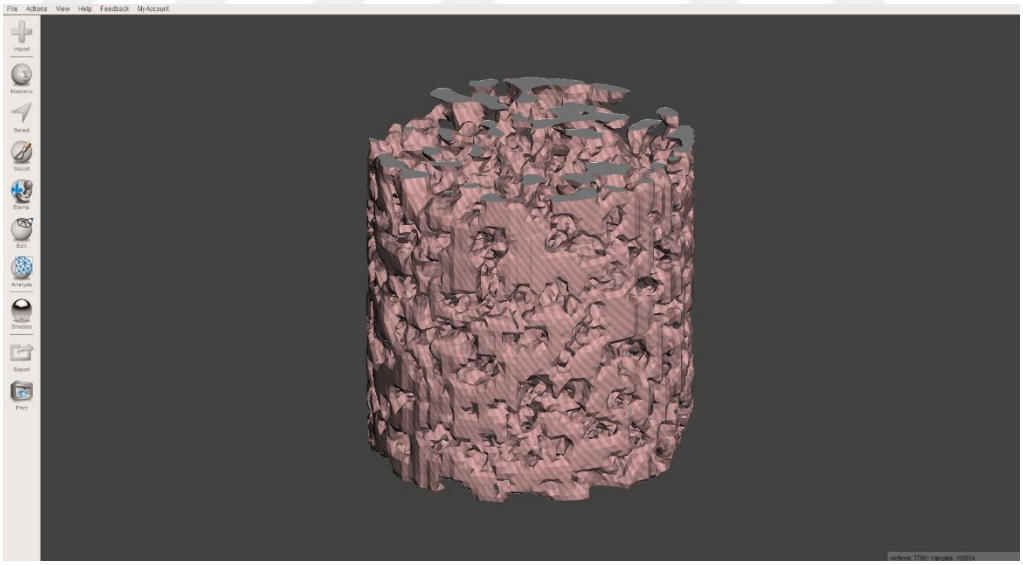
Şekil 4.27. Seg3D program ara yüzü ve TS1 seri görüntüsü

Bir sonraki görüntü işleme basamağı olarak ImageVis3D geometri render programı aracığı ile görüntü verileri STL formatına çevrilmiştir. Şekil 4.28'de ImageVis3D programının ara yüzü ve TS2 serisi için işlenen görüntü verileri gösterilmiştir. Bu basamak sonrası elde edilen veriler CAD programlarına aktarılabilmektedir. Sonlu elemanlar programında işlenebilecek seviyeye getirmek için numune üzerinde bazı değişiklikler daha yapılması gerekmektedir.



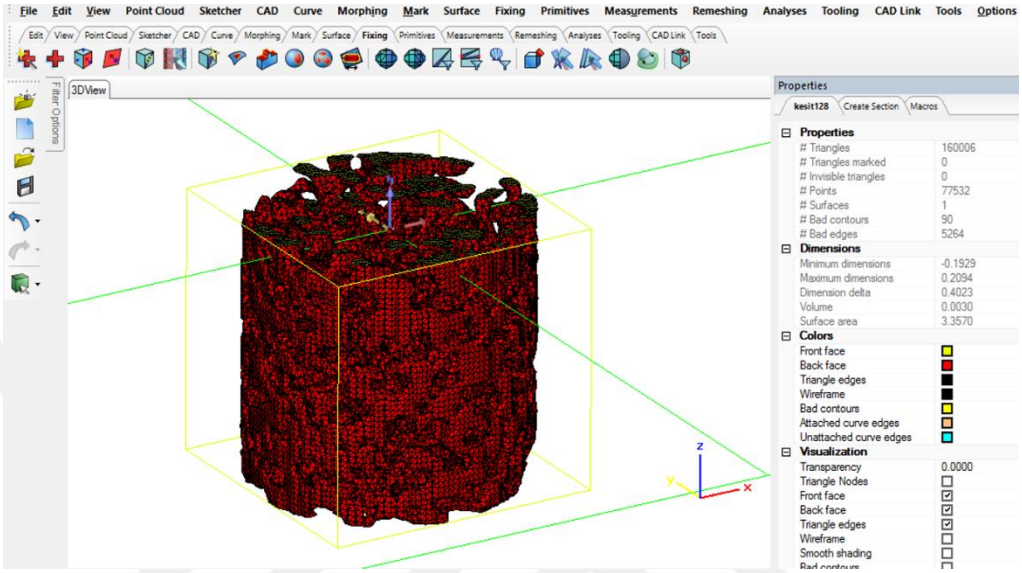
Şekil 4.28. ImageVis3D program ara yüzü ve TS2 seri görüntüsü

STL formatında elde edilen görüntü kesme işlemine tabi tutulmuştur. Bunun için Autodesk Meshmixer programı kullanılmıştır. Görüntü verileri basma simülasyonu için alt ve üst taraftan kesilerek hazır hale getirilmiştir. Şekil 4.29'da Meshmixer program ara yüzü ve TS3 serisi için işlenen görüntü verileri gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Autodesk Meshmixer program ara yüzü ve TS3 seri görüntüsü

Son görüntü işleme basamağı olarak da görüntü içerisindeki gürültünün giderilmesi ve mesh yapı içerisindeki kusurların ortadan kaldırılması için Materialise 3-Matic programı kullanılmıştır. Elde edilen verileri sonlu elemanlar programına aktarılarak çözdürülmüştür (Şekil 4.30).

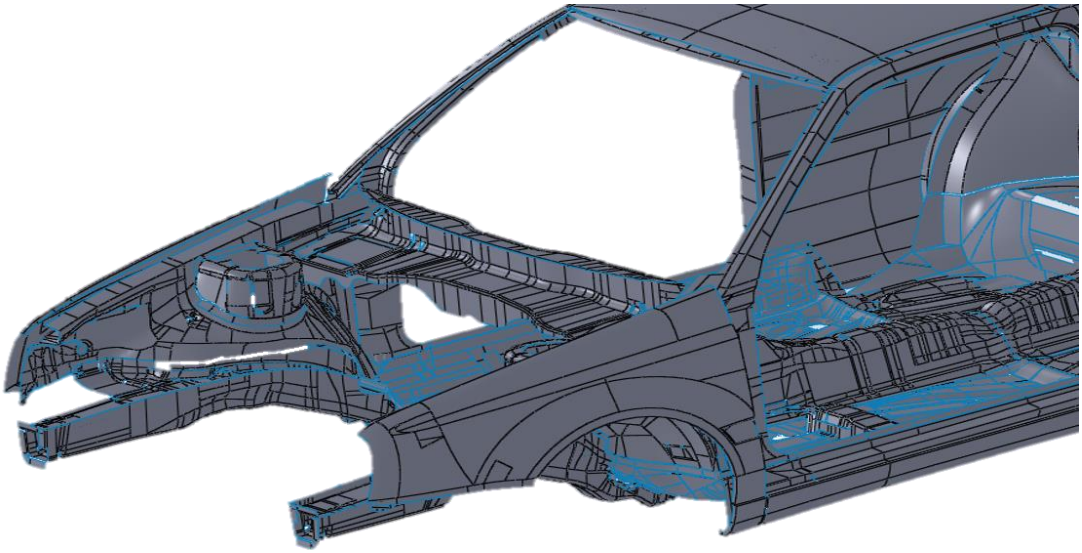


Şekil 4.30. Materialise 3-matic programı ara yüzü

4.10. Uygulamaya Yönelik Tasarım

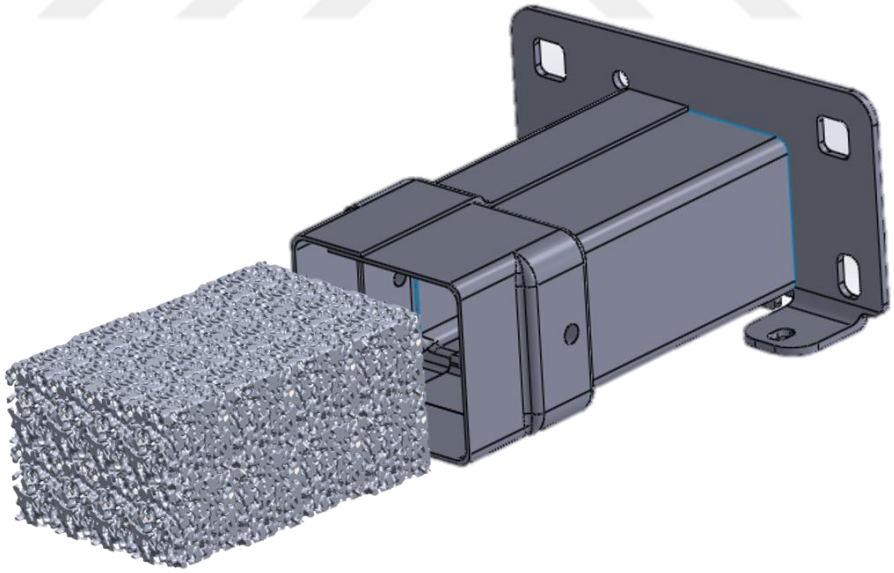
Otomotiv sektöründeki rekabetin artması ile üretici firmalar müşteri güvenliğini artırmak ve marka değerleri korumak için Ar-Ge çalışmalarına önem vermektedirler. Metalik köpükler ise özellikle otomotiv endüstrisinde kendilerine buldukları kullanım alanı ile büyük ilgi görmüşlerdir. Darbe yönünden bağımsız olarak göstermiş oldukları enerji sönümlemesi kabiliyetleri ve hafiflik gibi avantajları sebebiyle tercih edilmektedirler.

Bu çalışmanın diğer basamağında otomotiv endüstrisinde darbe emici olarak kullanılan çarpışma kutusu tasarımı yapılmıştır. Çarpışma kutuları araç ön tampon ile araç şasisi arasına yerleştirilen ve darbe anında gelen enerjiyi sönümlemek için tasarlanmış güvenlik elemanlarıdır. Şekil 4.31'de tasarım için referans amaçlı kullanılmış Volkswagen Golf model araca ait şasi görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.31. Volkswagen Golf şasi görünümü

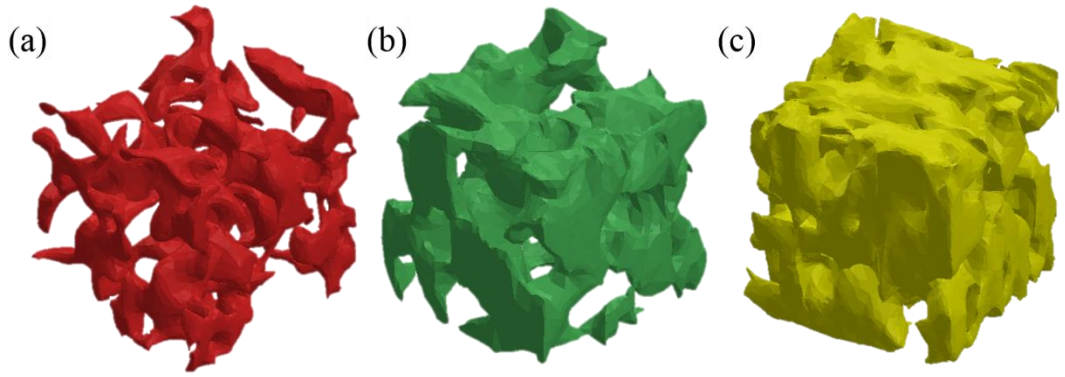
Darbe emici malzeme olarak tez bünyesinde üretilmiş alüminyum metalik köpük örneği için kolay uygulanabilecek ve bu sayede endüstriyel adaptasyonu mümkün bir tasarım taslağı yapılmıştır. Şekil 4.32'de tasarlanan çarpışma kutusu ve alüminyum metalik köpük görüntüsü verilmiştir.



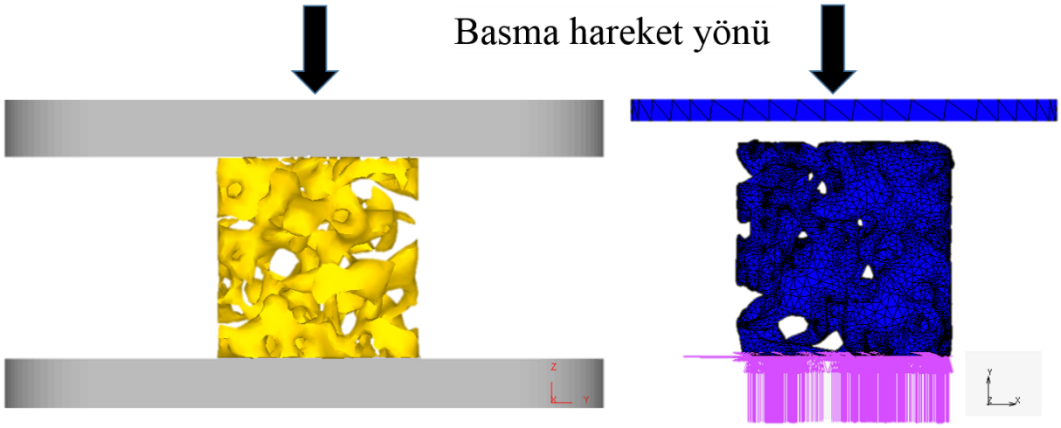
Şekil 4.32. Çarpışma kutusu tasarımı

4.11. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Alüminyum Köpük Malzeme Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Malzeme ve metot bölümümde tanımlanan malzeme tanımları ile belirtilen ilgili analizler her bir deney numunesi için 0,01 mm/s hızında tekrarlanmıştır. Modellemede kullanılan deney numuneler 10x10x10mm olarak numune içerisinden kesilerek temin edilmiştir (Şekil 4.33). Kesilen numuneler karşılaştırıldığında seriye ait hücre boyutlarının korudukları görülmüştür. Şekil 4.34'te sonlu elemanlar yöntem modeli Deform-3D ve Msc Marc Mentat ara yüzlerinde gösterilmektedir. Modelleme sırasında kesilen numuneler tek eksenli basma analizine tabi tutulmuştur. Modelleme numunenin bir taraftan sabit desteklenerek, basma yönündeki diğer taraftan ise hareketli kalıp vasıtasıyla deformasyona zorlanmıştır. Modelleme sırasında malzeme tanımı yapılırken malzeme elastiktik modülü yerine her bir serinin basma testi sonrasında elde edilmiş gerilme-gerinme grafiği adapte edilerek, programların malzeme hakkında kendi tanımlamalarını yapması sağlanmıştır. Bu şekilde analiz sırasında metalik köpüklerin göstermiş olduğu sıra dışı gerilme-gerinme grafiğinin daha aktif kullanılması ve daha gerçekçi analiz sonuçlarının elde edilmesi amaçlanmıştır.



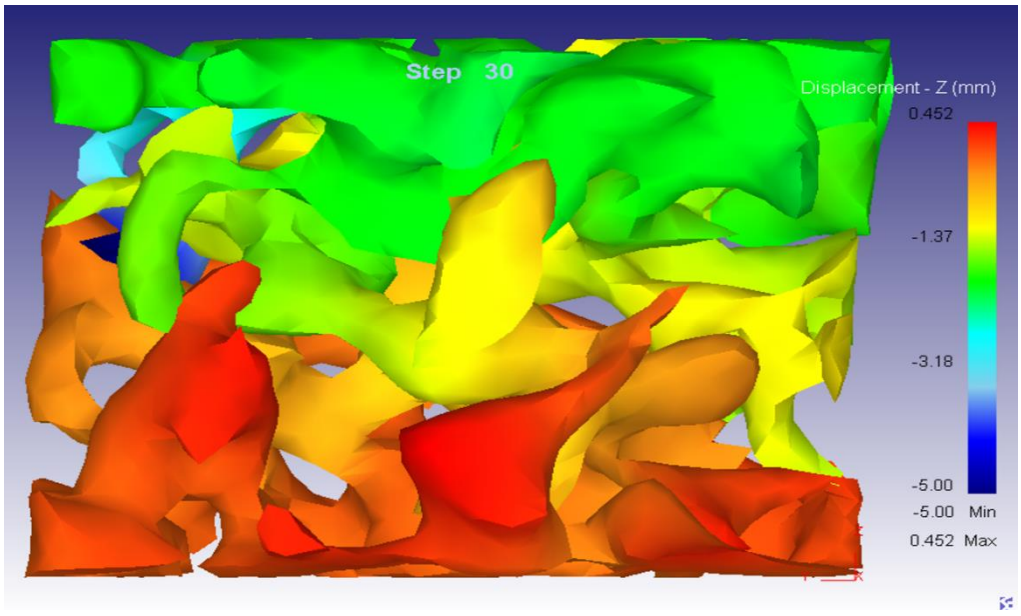
Şekil 4.33. Analizlerde kullanılan köpük geometrik modelleri (a) TS1, (b) TS2, (c) TS3



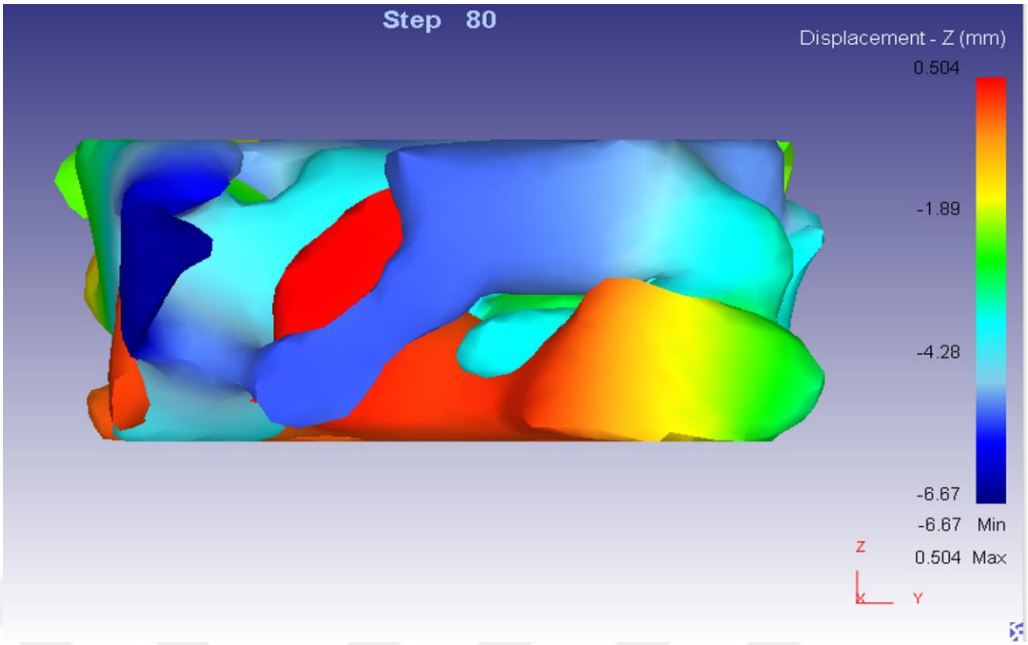
Şekil 4.34. TS1 serisine ait sonlu elamanlar analiz modelleri ve kontak çiftleri

4.11.1. Deform-3D analiz sonuçları

Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da TS1 serisine ait tek eksenli basma testi sonrasında numune deformasyonu görülmektedir. Deformasyon hareketli kalıp tarafından başlayarak kademeli olarak diğer bölgelere doğru ilerlemektedir. Deformasyon artışı kırmızıdan başlayarak maviye doğru takip etmektedir.

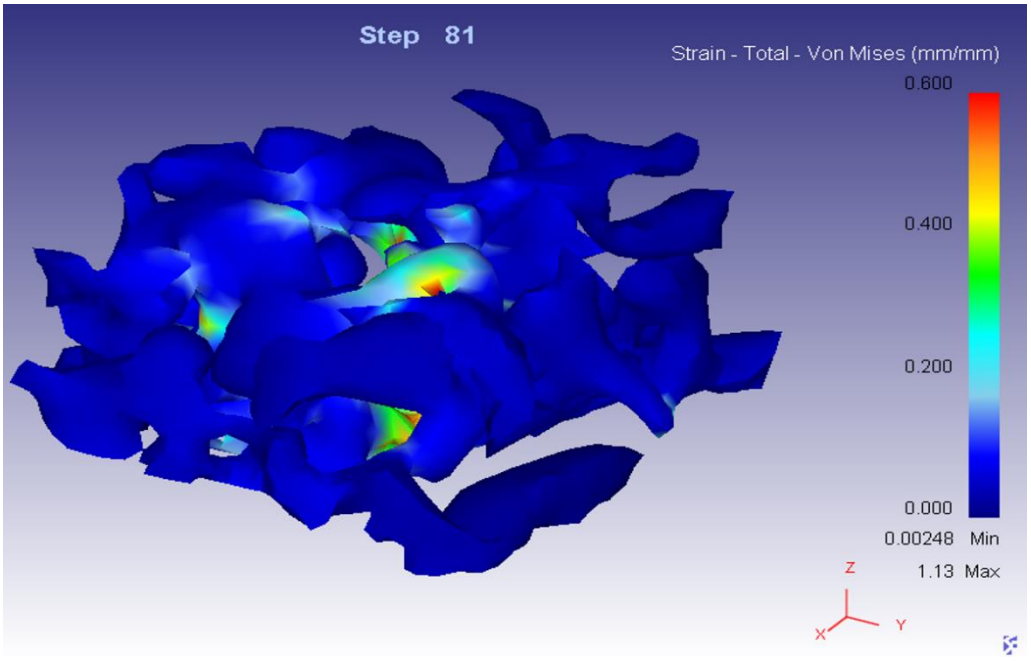


Şekil 4.35. TS1 serisi basma yönündeki deformasyon davranışı



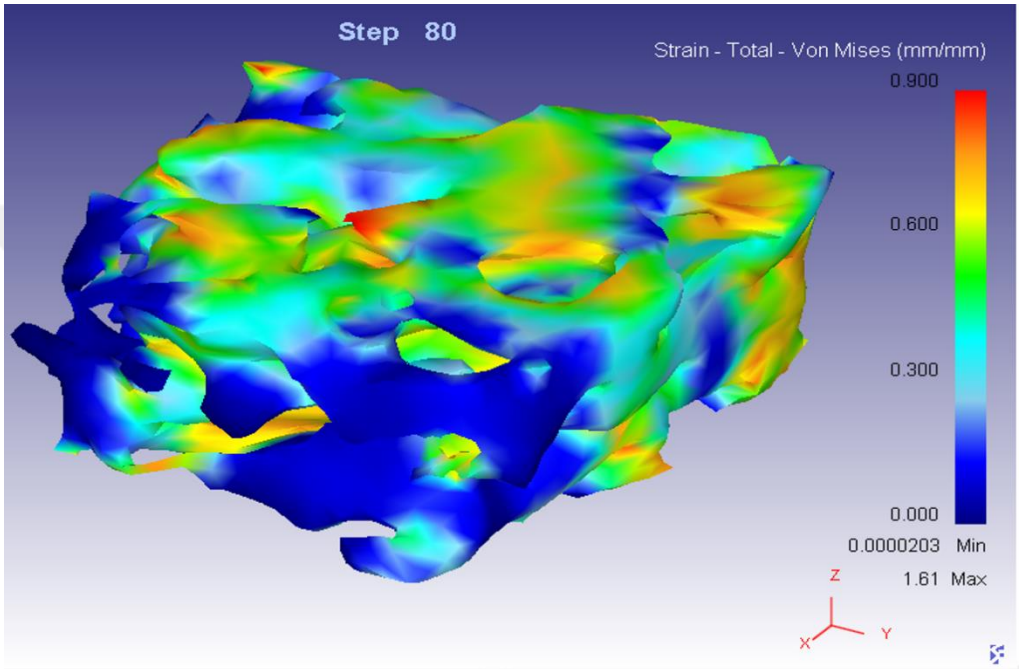
Şekil 4.36. TS1 serisinin %50 deformasyon altındaki davranışı

Şekil 4.37'de TS1 serisi için %50 deformasyon altındaki Von Mises gerinme analizi sonuçlarına bakıldığında, birim uzama değeri maksimum gerinim köpük malzemenin orta kısımlarına yakın bölgelerinde oluşmuştur. Birim uzama (gerinme) değeri ε= 0,01–0,5 aralığındadır.



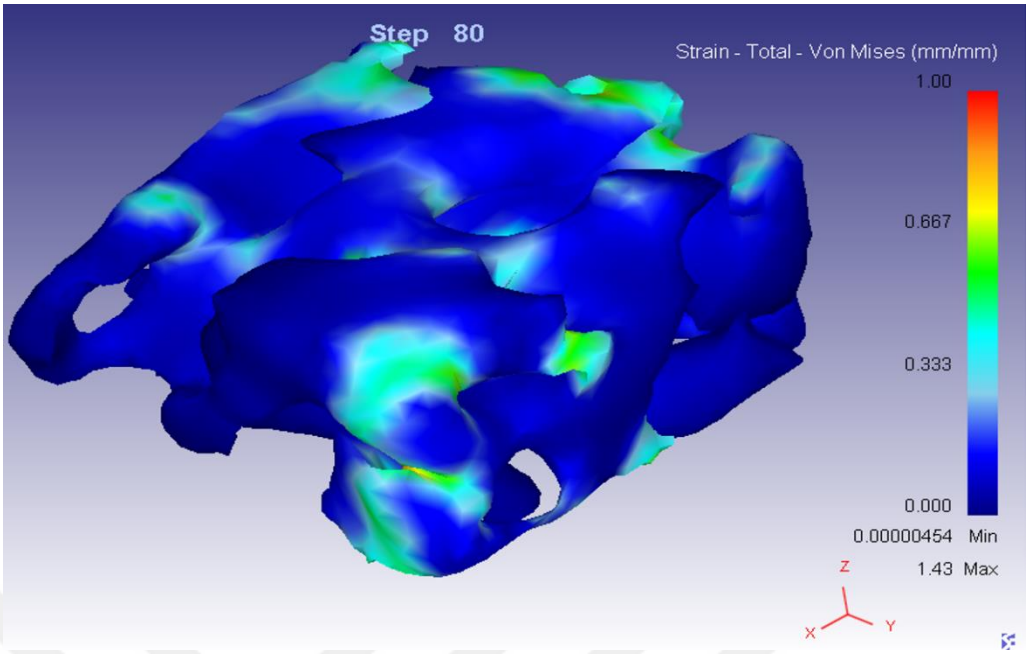
Şekil 4.37. TS1 serisi %50 deformasyon altındaki gerinme dayanımı

Şekil 4.38'de TS2 serisi için gerinme analizi sonuçlarına bakıldığında, birim uzama değeri maksimum gerinim köpük malzemenin büyük bölümüne yayıldığı görülmektedir. TS1 serisi ile karşılaştırıldığında gerilme değerinde artışın olduğu görülmektedir. Bu artışın hücre boyunun büyüdükçe hücre kenarlarında büyümesi sonucu olduğu anlaşılmaktadır. Birim uzama (gerinme) değeri ε = 0,01–0,7 aralığındadır.



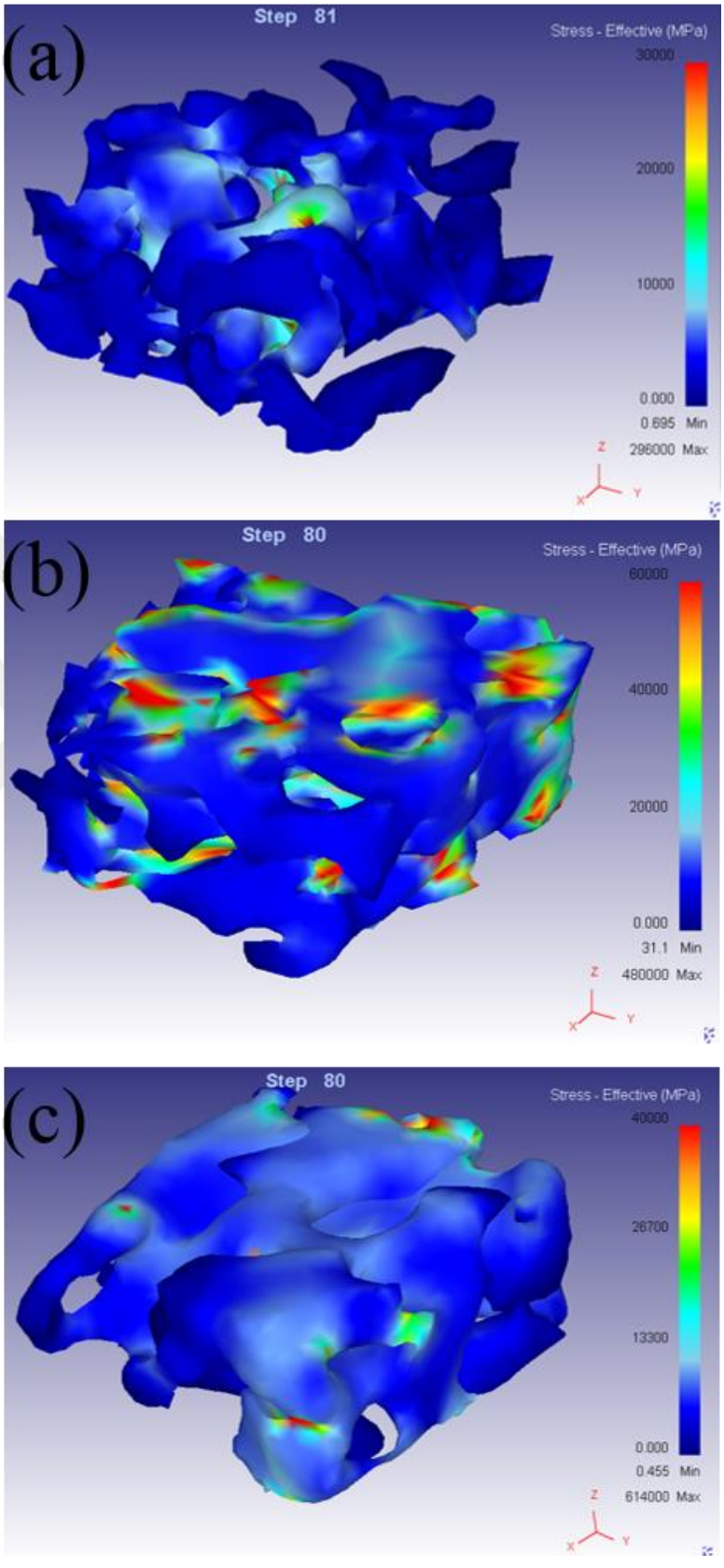
Şekil 4.38. TS2 serisi %50 deformasyon altındaki gerinme dayanımı

Şekil 4.39'da TS3 serisi için gerinme analizi sonuçlarına bakıldığında, birim uzama değeri maksimum gerinim köpük malzemenin dış kısımlarına doğru yayıldığı görülmektedir. TS1 serisi ile karşılaştırıldığında benzer bir gerilme değerinde artışın olduğu, TS2 serisi ile karşılaştırıldığında ise düşük gerinme değerine sahip olduğu görülmektedir. Birim uzama (gerinme) değeri ε = 0,01–0,5 aralığındadır.

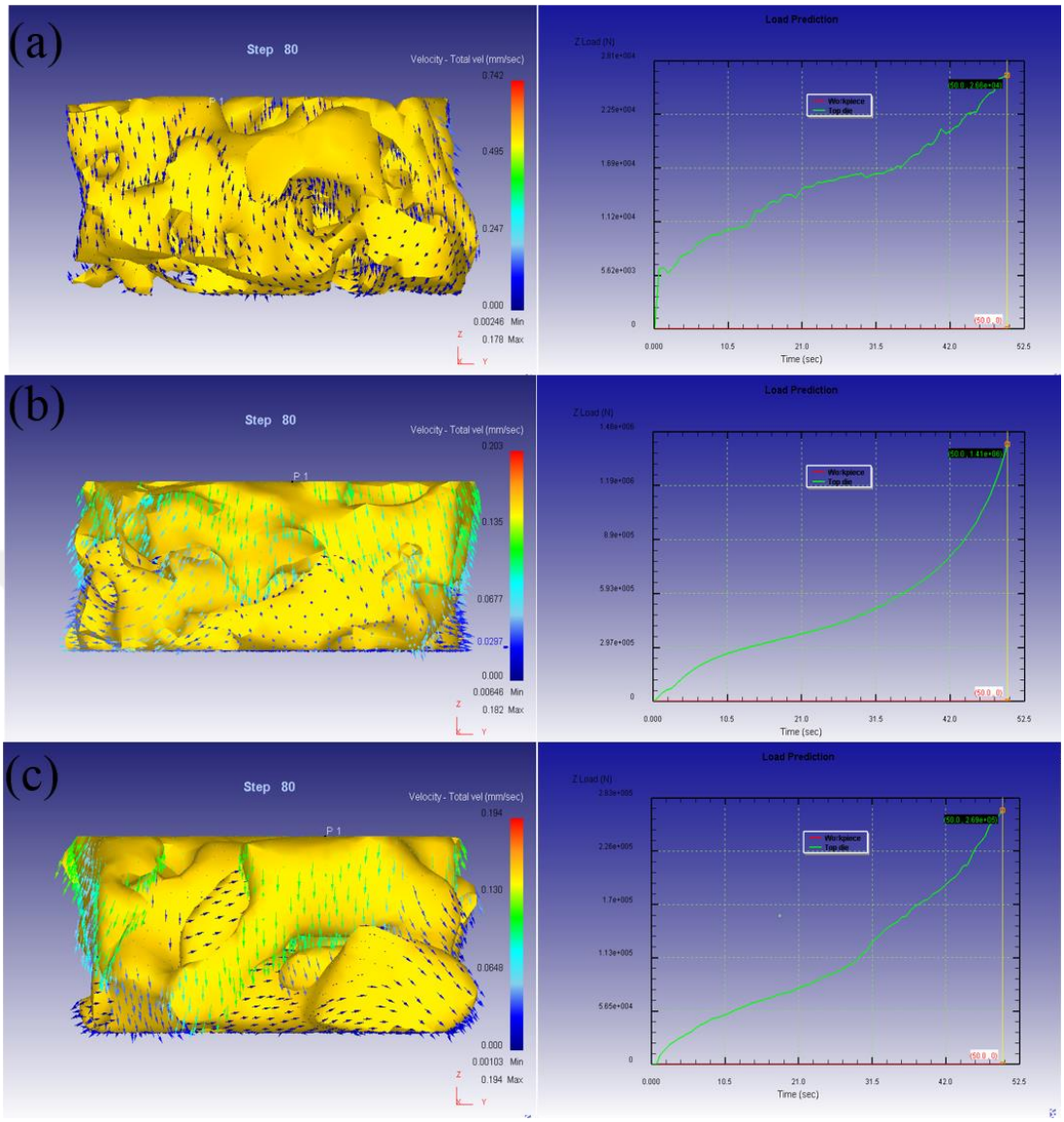


Şekil 4.39. TS3 serisi %50 deformasyon altındaki gerinme dayanımı

Şekil 4.40'da her bir seri için efektif gerilme değerleri gösterilmiştir. TS2 serisi diğer iki seriye göre daha yüksek gerilme değeri gösterdiği görülmüştür.

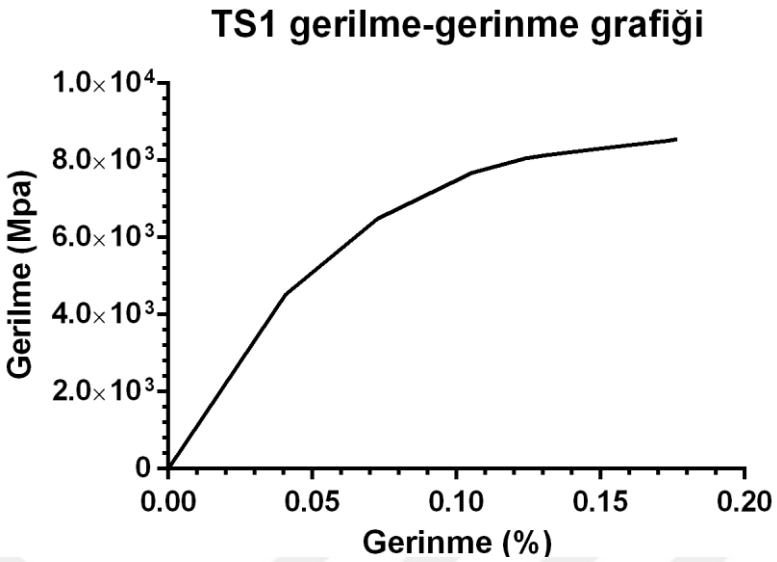


Şekil 4.40. %50 deformasyon altındaki seri gerilme dağılımı (a) TS1, (b) TS2, (c) TS3

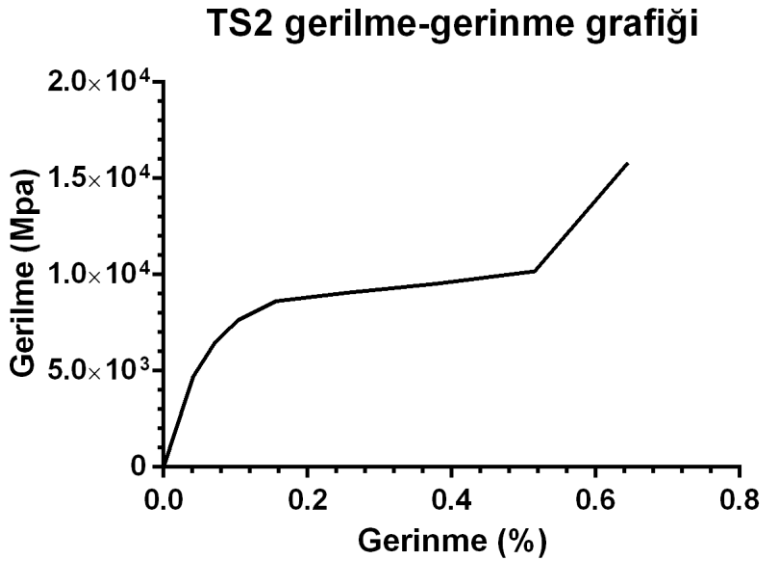


Şekil 4.41. %50 deformasyon altındaki yükleme değerleri (a) TS1, (b) TS2, (c) TS3

Yükleme koşulları değerlendirildiğinde TS2 serisinin benzer şekilde diğer iki seriden daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.41).

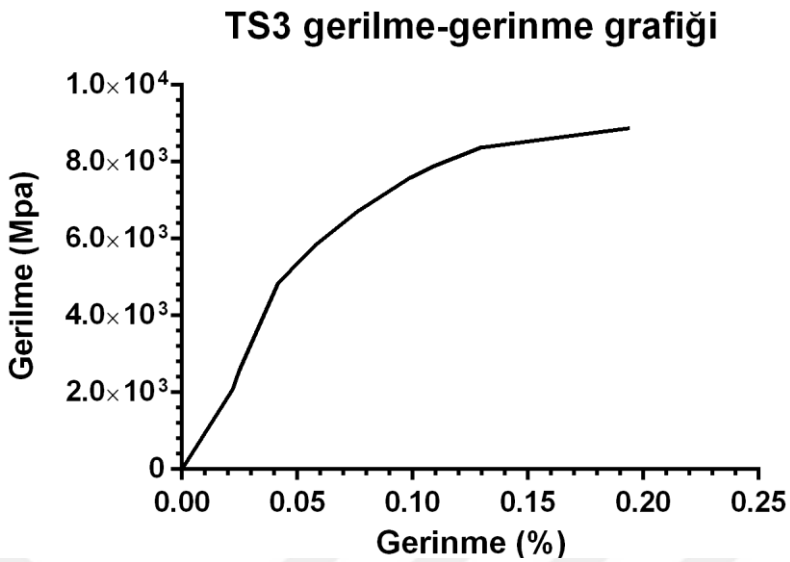


Şekil 4.42. TS1 serisi gerilme-gerinme grafiği



Şekil 4.43. TS2 serisi gerilme-gerinme grafiği

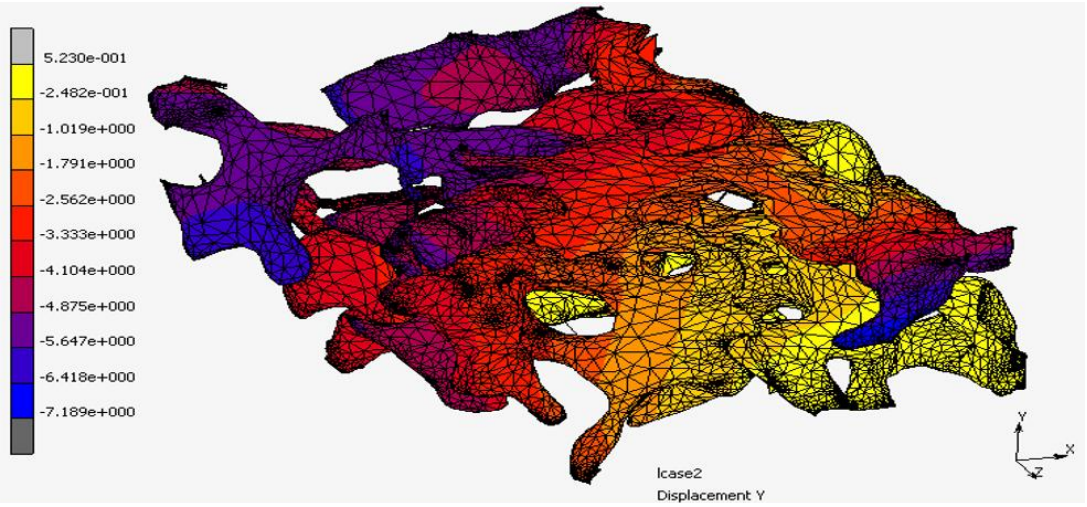
Şekil 4.42 ile Şekil 4.44 arasında her bir seri numuneleri üzerinden seçilen düğüm noktaları için gerilme-gerinme grafikleri verilmiştir. Düğüm noktalarında meydana gelen gerilme-gerinme değerlerinde köpük karakteristiğine uygun bir davranış sergilemişlerdir. Elastik bölge, plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgeleri grafikler üzerinde gözükmektedir.



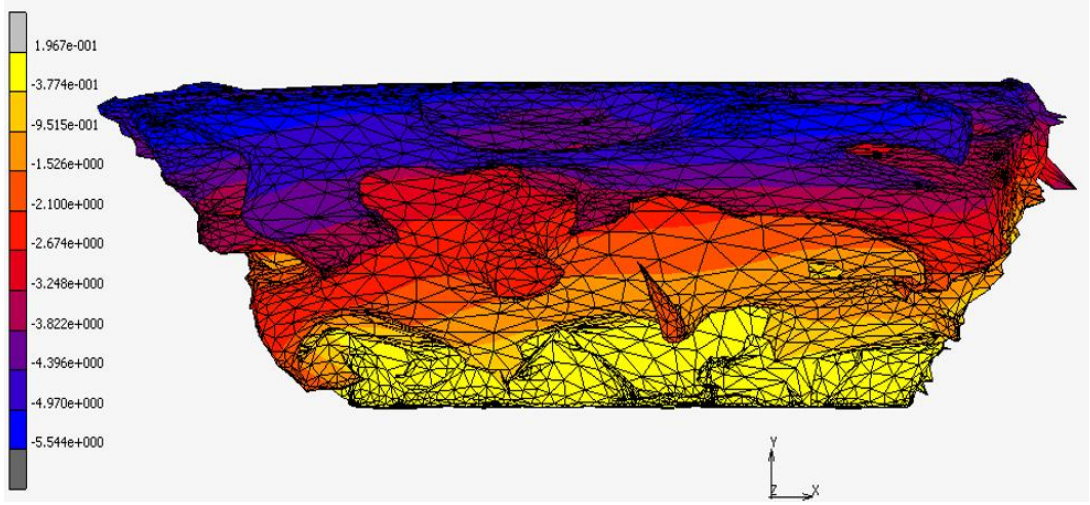
Şekil 4.44. TS3 serisi gerilme-gerinme grafiği

4.11.2. Msc marc mentat analiz sonuçları

Modelleme sırasında bir başka program olarak Msc Marc Mentat programı kullanılmıştır. Şekil 4.45'de TS1 serisine ait analiz sonucu deplasman davranışı gösterilmiştir. Deformasyon artışı sarıdan başlayarak maviye doğru takip etmektedir.

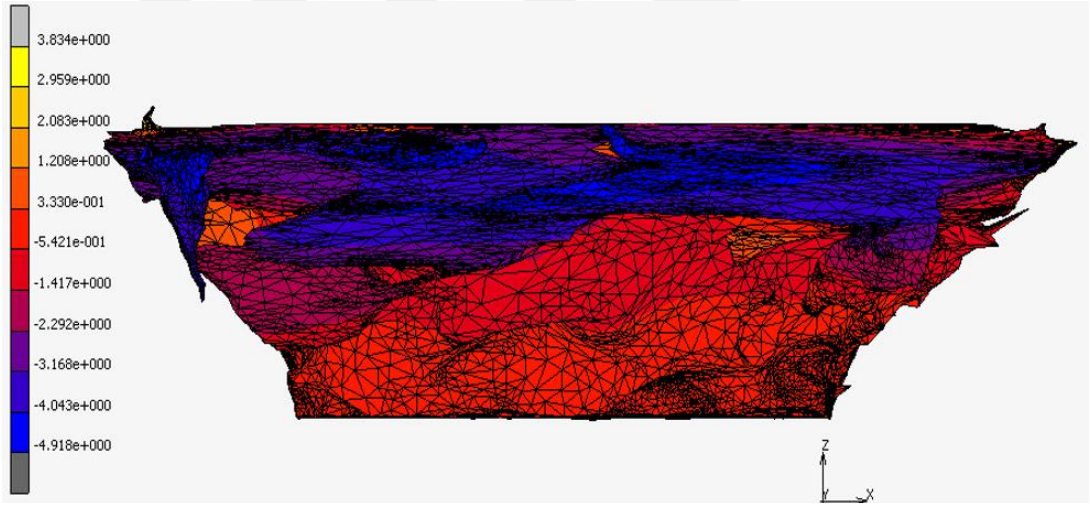


Şekil 4.45. TS1 serisi basma testi analizi deplasman görünümü



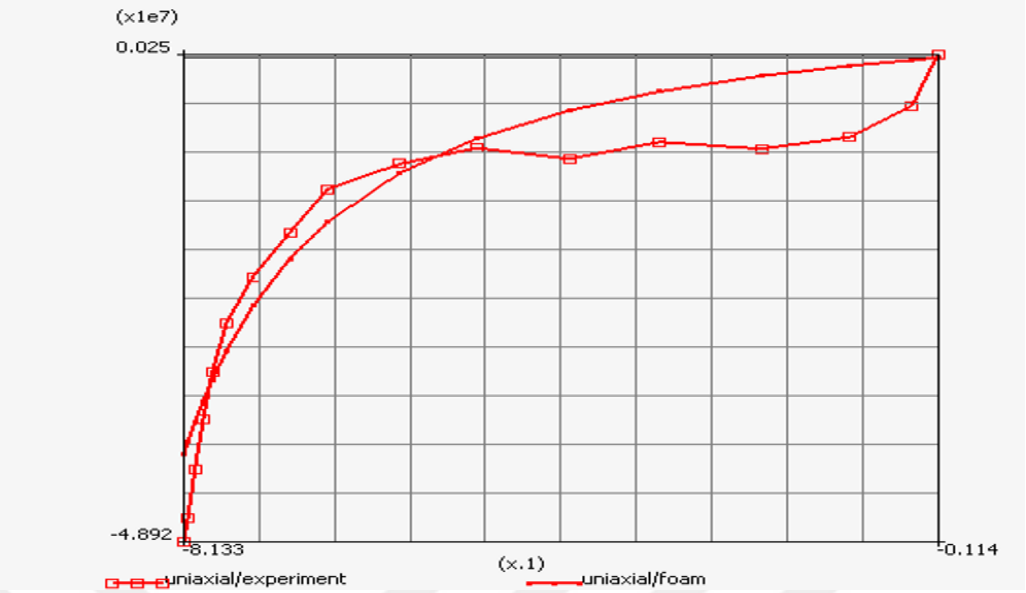
Şekil 4.46. TS2 serisi basma testi analizi deplasman görünümü

Şekil 4.47 ve Şekil 4.48'de sırasıyla TS2 ve TS3 serilerine ait deplasman değerleri gösterilmiştir.

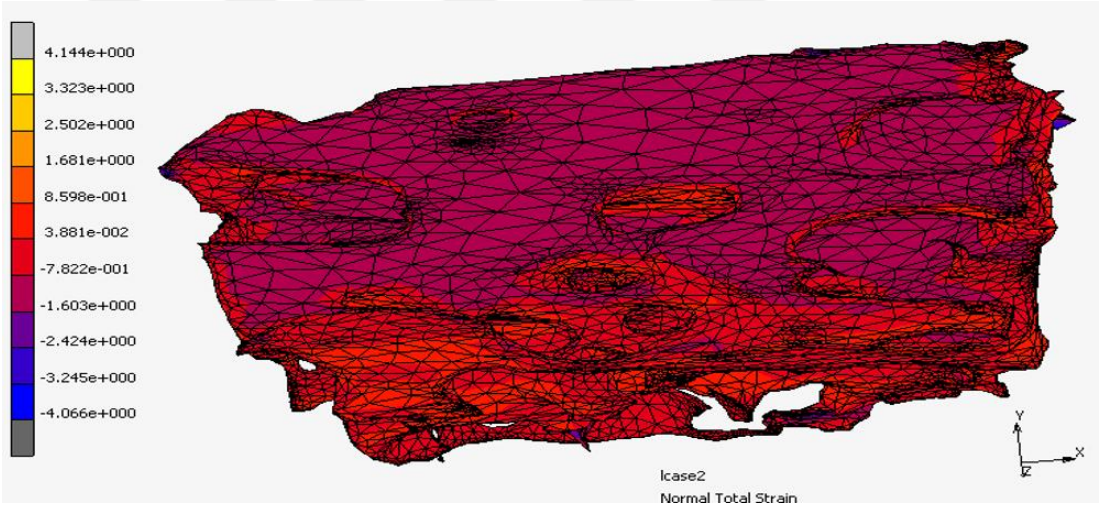


Şekil 4.47. TS3 serisi basma testi analizi deplasman görünümü

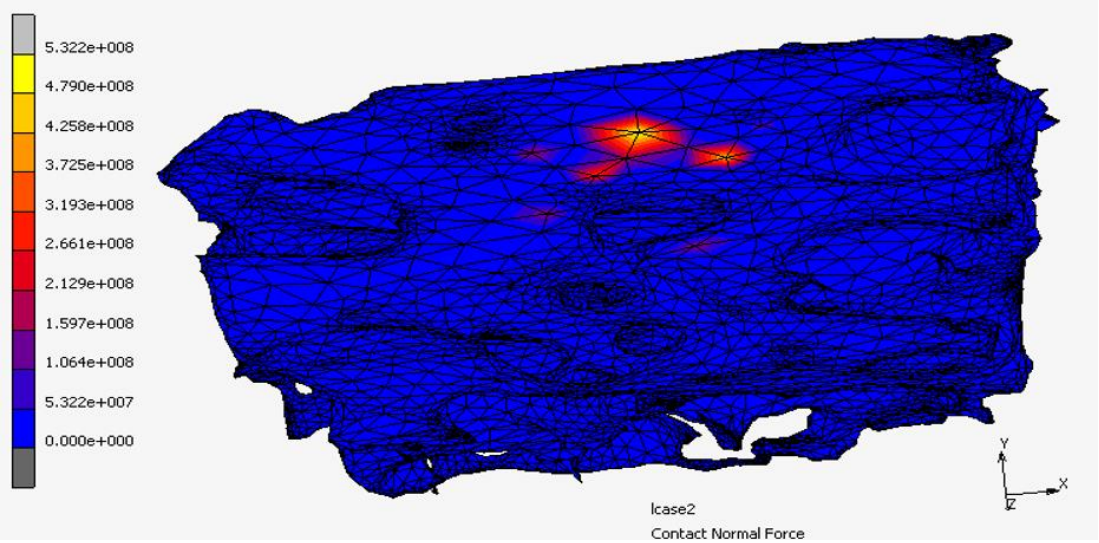
Modelleme sırasında kullanılan malzeme tanımı gerçek basma testi değerleri kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.49'da basma değerleri ile Msc Marc Mentat tarafından matematiksel formülasyona dönüştürülmüş değerler ile karşılaştırılması program girdisi olarak gösterilmiştir. Tek eksenli basma testi verileri tanımlanırken eksi değer almaktadır. Bu yüzden gerilme-gerinme grafiği negatif bölgededir.



Şekil 4.48. Deneysel verilerin MSC Marc Mentat'a entegrasyonu

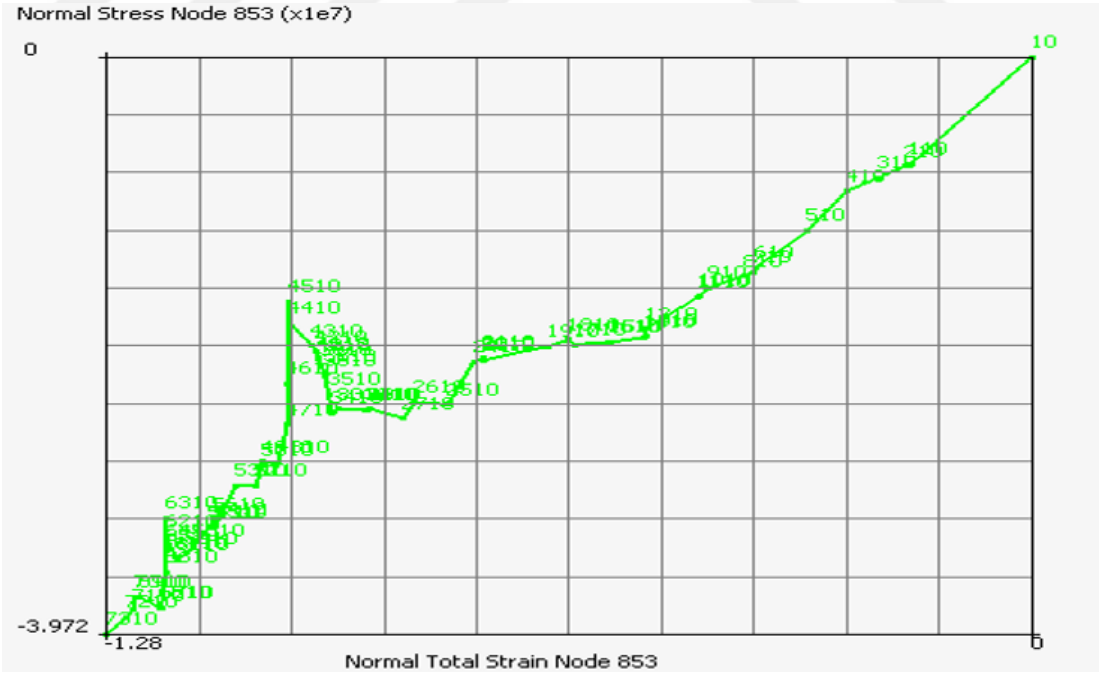


Şekil 4.49. TS2 serisi %50 deformasyon altındaki gerinme dağılımı

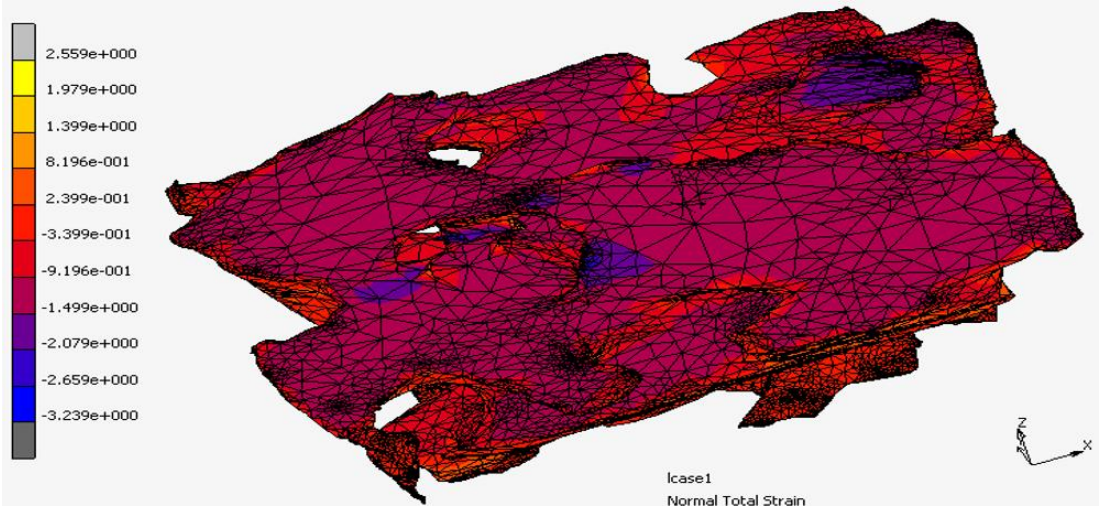


Şekil 4.50. TS2 serisi %50 deformasyonda yükleme kuvveti değerleri

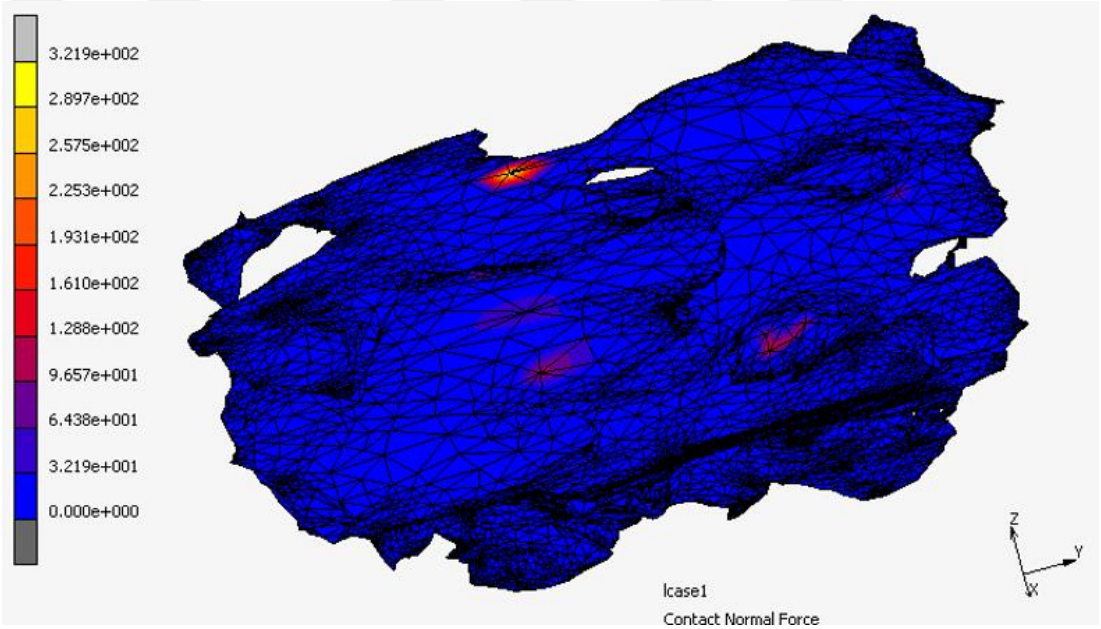
Basma sırasında element şekillerinde özellikle şekil değişiminin yüksek olduğu kısımlarda bozulma görülmektedir. Ancak modelleme sırasında non-lineer teori kullanıldığı için güvenli sonuçlar vermektedir. Şekil 4.51'de TS2 serisi için numune üzerinden seçilen düğüm noktası için gerilme-gerinme grafiği gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlarının metalik köpük değerleri ile örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 4.51. TS2 serisi gerilme-gerinme grafiği

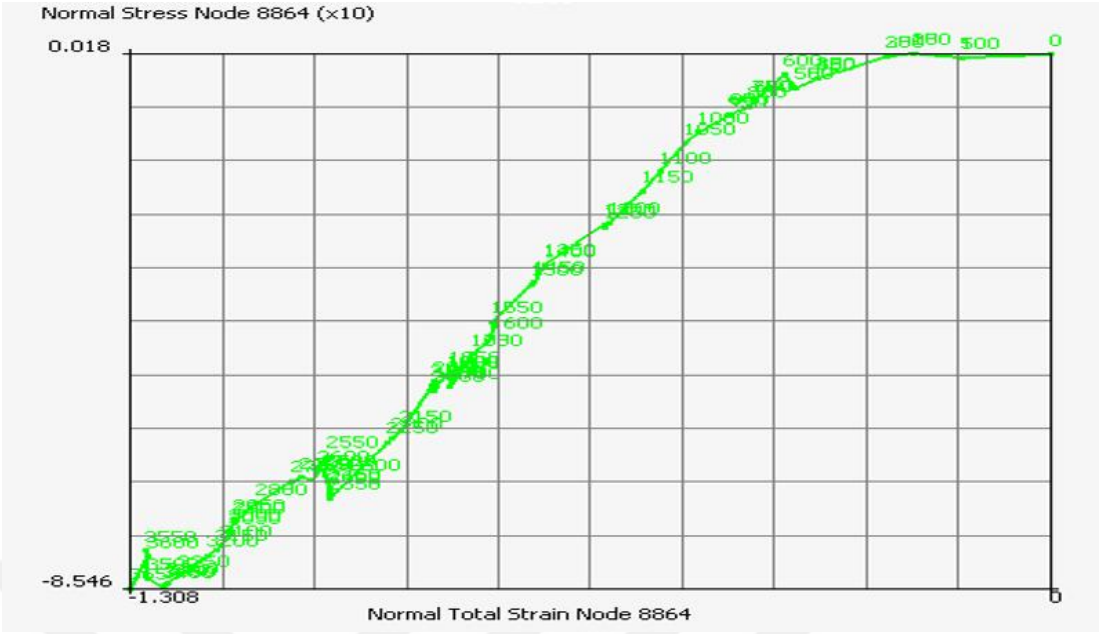


Şekil 4.52. TS3 serisi %50 deformasyon altındaki gerinme değerleri



Şekil 4.53. TS3 serisi %50 deformasyon altındaki z yönündeki yükleme kuvveti değerleri

Şekil 4.55'de TS3 serisine numune üzerinden seçilen düğüm noktası için gerilme-gerinme grafiği gösterilmiştir. Grafik verilerinin metalik köpük özeliği göstermiş olduğu görülmektedir.



Şekil 4.54. TS3 serisi gerilme-gerinme grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması sırasında yer tutucu yöntemiyle alüminyum metalik köpük üretilmiş ve elde edilen çıkarımların genel sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Çözünebilen yer tutucu malzeme NaCl olarak düşünülmüş ve yapılan ön çalışmalar neticesinde atmosfer kontrollü bir döküm ergitme deney düzeneği tasarlanmıştır. Ergitme sırasında oluşabilecek mikro kusurların önüne geçebilmek için vakum ünitesi ile deney ortamını izole etmenin sağlıklı sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca daha sonraki çalışmalarda kompresör hava basıncı yerine argon gazının kullanılabileceği ve karşılaştırma yapılabileceği kanaatine varılmıştır.
- Elde edilen metalik köpüklerin hücre boyutlarının yer tutucu NaCl malzemesinin partikül boyut büyüklüğüne bağlı değişiklik gösterdiği sonucuna varılmıştır. Yer tutucu partikül boyutu arttıkça hücre boyutları da artmıştır.
- Deney sırasında NaCl partikül boyutu olarak kullanılabilecek en küçük boyutların mevcut deney düzeneği için 1-2 mm arasında olduğu anlaşılmıştır. Daha küçük boyutlar için kullanılan düzenekte iyileştirmeye gidilmesi gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca daha küçük partiküllü üretimler için üretim sonrası yer tutucu malzemenin numune içerisinden uzaklaştırılması zorlaşmaktadır.
- Deneysel üretim sonrasında elde edilen numunelerin kesit incelemesi yapıldığında homojen bir gözenek yapısına sahip oldukları görülmüştür. Gözenek çapı küçüldükçe alüminyum ergiyik akışının zorlaştığı ve kaynama kusurlarının (soğuk birleşme) oluştuğu görülmüştür. Bu kusurlar mikro taramada kendisini mikro çizgi şeklinde göstermiş, lakin sonlu elemanlar yönteminde herhangi bir etkisine rastlanmamıştır.
- Bu metodun farklı yer tutucu boyutlarına göre üretim parametreleri 6xxx serisi alüminyum için belirlenmiştir. Farklı alaşımlar için elde edilen numunelerin köpük karakteristiğine nasıl etki yapacağı ise diğer bir araştırma konusu olarak ele alınabilir. Döküm sıcaklığının sabit tutularak, tutma süresinin değiştirilmesi ile uygun üretimler yapılabileceği anlaşılmıştır.

— Bu çalışma bünyesinde metalik köpüklerin mekanik özelliklerinin tespiti için seriler üzerinde basma testini yanı sıra yoğunluk ve sertlik testleri de uygulanmıştır. Yapılan çalışmaların ağırlığı metalik köpük üretimi ve modellemesi hususları temeline göre kurulmuştur. Bu sebeple yer tutucu metodu ile elde edilen açık hücreli metalik köpüklerin mekanik özellikleri çok fazla irdelenmemiştir. Yoğunluk ölçümü sonucunda köpük serileri arasında hücre boyutu değişimi ile yoğunluk değerleri benzer bir davranış sergilememiş ve farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu tutarsızlık sebebinin metalik köpüklerin üretim zorluğundan dolayı yoğunluk değerinin bir başlangıç değişkeni olarak belirlenememesi, çıkan sonuçlarının ise bu çalışma içerisinde aktif kullanılmayacağı düşünüldüğü için üzerinde çok fazla durulmamıştır. Sertlik testi sonuçları için ise hücre boyutu küçüldükçe sertlik değerinin artığı gözlemlenmiştir. Metalik köpüklerin sertlik sonuçlarının ölçümünün yığın malzeme gibi standart bir sonuç vermeyeceği düşünüldüğünden, malzeme sertlik karakteristiklerinin bu süreçte yorumlanması doğru bulunmamıştır. Devam niteliğindeki çalışmalarda bu metot ile üretilen metalik köpüklerin mekanik özellikleri detaylı olarak ele alınacaktır.
— Basma deneyleri neticesinde elde edilen gerilme-gerinme eğrilerinin metalik köpük karakteristiğine uygun olduğu görülmüştür. Modelleme sonucunda görülen davranışların gerçek gerilme-gerinme eğrileriyle yakın sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Her iki program için bir düzeltme katsayısına ihtiyaç vardır. İleriki çalışmalar bu katsayıların tayini üzerine yürütülebilir.
— Yapılan basma testleri modellemesi için 10x10x10mm boyutlarında numuneler kullanılmıştır. İlerleyen çalışmalar için daha büyük numune boyutlarını içeren modellemeler veya basma testi ile beraber enerji absorbsiyon ölçümü için çarpışma testleri bu kapsamda yürütülebilir.
— Modelleme sırasında metalik köpüklerin elastisite modülünün tayin edilmesi zorluğunu aşmak için basma testleri sonucu üretilen gerilme-gerinme eğrileri modelleme içerisine adapte edilmiştir. Ayrıca yalın bir elastisite modülü değeri atamak yerine bu sayede elastisite modülünün hassasiyetinin de daha iyi seviyelere çıkarıldığı düşünülmektedir.

— Deform-3D ve Msc Marc Mentat programları karşılaştırıldığında, malzeme tanımı yapılırken Deform-3D'nin gerilme-gerinme grafiğini direkt olarak kullandığı, Msc Marc Mentat ise gerilme-gerinme grafiğini matematiksel formülasyona dönüştürmesi sebebiyle elde edilen sonuçlarda farklılıklar gözlemlenmiştir.

— Modelleme ile deney çalışmaları arasında karşılaşılabilecek sorunlar aşağıda sıralanmıştır;

- Modelleme ile deney koşullarının farklı olması,
- Deney ölçümlerinin yanlış modellenmesi,
- Yanlış modelleme elemanı seçimi;
- Sınır şartlarının gerçeği yansıtmaması,
- Yanlış zaman adımı modellemesi,

KAYNAKLAR

[1] Degischer H. P., Kriszt B., *Handbook of Cellular Metals, Production, Processing and Applications*, WileyVCH, Weinheim, 2002.

[2] Ashby M. F., Evans A., Fleck N. A., Gibson L. J., Hutchinson J. W., *Metal Foams: A Design Guide*, 1st ed., Butterworth-Heinemann, Boston, 2000.

[3] Sosnick B., Process For Making Foam like Mass Of Metal, 1948, U. S. Patent No. 1,434,775., *U. S. Patent Office*.

[4] Elliot J. C., Metal Foam And Method For Making, 1961, U. S. Patent No. 2,983,597., *U. S. Patent Office*.

[5] Allen B. C., Mote M .W, Sabroff A. M., United Aircraft Corporation, Method Of Making Fgamed Metal, 1963, U. S. Patent No. 3,087,807., *U. S. Patent Office*.

[6] Banhart J., Eifert H., Metal Foams, *Fraunhofer USA Symposium On Metal Foams*, Stanton, USA, 7-8 October 1997.

[7] Schwartz D. S., Shih D. S., Evan A. G., Wadley H. N. G., Porous And Cellular Metarials For Structural Applications, *MRC Symposium Procedding*, **521**, San Fracisco, California, USA, 13-15 April 1998.

[8] Ertürk A. T., Ural K., Metalik Köpükler ve Alüminyum, *Metal Makina*, 2011, **4**(7), 110-112.

[9] Ertürk A. T., *Metalik Köpükler Ders Notu*, Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı , Kocaeli, 2016.

[10] Banhart J., Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams, *Materials Science*, DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5.

[11] Ma L., He D., Cellular Structure Controllable Aluminium Foams Produced By High Pressure Infiltration Process, *Scripta Materialia*, DOI: 10.1016/S1359-6462(99)00219-5.

[12] Banhart J., Aluminium Foams For Lighter Vehicles, *Int. J. Vehicle Design*, 2005, **37**(2/3), 114-125.

[13] Banhart J., Aluminium Foams: On The Road To Real Applications, *Mrs Bulletin*, DOI: 10.1557/mrs2003.83.

[14] Ertürk A. T., Metalik Köpükler, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 348737.

[15] Amjad S., Thermal Conductivity And Noise Attenuation In Aluminium Foams, Master's Thesis, University of Cambridge, 2001.

[16] Curran D. C., Aluminium Foam Production Using Calcium Carbonate as a Foaming Agent, Doctoral Thesis, University of Cambridge, 2003.

[17] Gergely V., Clyne B., The Formgrip Process: Foaming Of Reinforced Metals By Gas Release, *Advanced Engineering Materials*, DOI: 10.1002/(SICI)1527-2648(200004)2.

[18] Özer G., Alüminyum Esaslı Köpük Metal Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005, 198965.

[19] Banhart J., Weigand P., Powder Metallurgical Process For The Production Of Metallic Foams, *Fraunhofer USA Symposium Metallic Foams MIT-Verlag*, Bremen, 7-8 October 1997.

[20] H. Demirtaş, Toz Metalurjisi Yöntemi İle Alüminyum Esaslı Köpük Sandviç Yapı Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 269728.

[21] M. Türker, Toz Metalurjisi Yöntemi İle Alüminyum Köpük Üretimi, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (Iats'09)*, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.

[22] Ertürk A. T., Production of Aluminum Glass Fiber Reinforced Foam Synthesized by Space-Holder Technique, *Acta Physica Polonica*, DOI: 10.12693/APhysPolA.129.592.

[23] Gökmen U., Toz Metalurjisi Yöntemi İle Al Esaslı Parçacık Takviyeli Metalik Köpük Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009, 245577.

[24] Banhart J., Aluminium Foams for Lighter Vehicles," *International Journal of Vehicle Design*, 2003, **37**, 114-125.

[25] Banhart J., Seeliger H.W., Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications, *Advanced Engineering Materials*, DOI: 10.1002/adem.200800091.

[26] Schaeffler P., Rajner W., Claar D., Trendelenburg T., Nishimura H., Production, Properties, and Applications of Alulight Closed-Cell Aluminum Foams, *The Fifth International Workshop on Advanced Manufacturing Technologies*, London, 16-18 May 2005.

[27] Patrick K., Ultra-Light Aluminium Foam Materials Offer Advantages in Automotive Applications, *Idustrial Heating*, DOI: 10.4271/2000-01-0335.

[28] Banhart J., Properties And Applications Of Cast Aluminium Sponges, *1st International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures (MetFoam'99)*, Bremen, Germany, 14-15 June 1999.

[29] Lopatnikov S. L., Dynamics Of Metal Foam Deformation During Taylor Cylinder–Hopkinson Bar İmpact Experiment, *Composite Structures*, DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00039-4.

[30] İsmail Mutlu, AlZn5.5MgCu /SiCp Köpük Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Isıl İşlemin Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011, 285428.

[31] Gibson J., Ashby M. F., *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed., Cambridge Solid State Science Series, Cambridge, 1997.

[32] Zhu, Analysis Of The Elastic Properties Of Open-Cell Foams With Tetrakaidecahedral Cells, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, DOI: 10.1016/S0022-5096(96)00090-7.

[33] Warren W.E., Kraynik A. M., Linear Elastic Behavior Of A Low-Density Kelvin Foam With Open Cells, *Journal of Applied Mechanics*, DOI: 10.1115/1.2788983.

[34] Gent A. N., Thomas A. G., The Deformation Of Foamed Elastic Materials, *Appl. Polym. Sci.*, DOI: 10.1002/app.1959.070010117.

[35] Gong L., Kyriakides S., Compressive Response Of Open-Cell Foams. Part I: Morphology And Elastic Properties, *Int. J. Solids Struct*, DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2004.07.023.

[36] Pérez L., Lascano S., Aguilar C., Domanci D., Simplified Fractal FEA Model For The Estimation Of The Young's Modulus, *Materials & Design*, DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.038.

[37] Larner M., Acker J., Dávila L. P., The Random Porous Structure And Mechanical Response Of Lightweight Aluminum Foams, *Materials Research Society*, DOI: 10.1557/opl.201.264.

[38] Carofalo A., Giorgi M. D., Morabito A., Nobile R., Geometric Modelling Of Metallic Foams, *International Conference On Innovative Methods İn Product Design*, DOI: 10.1108/EC-06-2011-0070.

[39] Doroszko M., Seweryn A, Modeling Of The Tension And Compression Behavior Of Sintered 316l Using Micro Computed Tomography, *Acta Mechanica et Automatica*, DOI: 10.1515/ama-2015-0012.

[40] Joonas Köll, Modeling of Rigid Foams, Doctoral Thesis, Stockholm, Sweden, 2015.

[41] Miedzinska D., Szymczyk W., Numerical And Experimental Study Of Real Foam Microstructure Models, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2010, **10**(2), 309-314.

[42] Michailidis N., Stergioudi F., Omar H, and Tsipas D. N., Investigation Of The Mechanical Behavior Of Open-Cell Ni Foams By Experimental And FEM Procedures, *Advanced Engineering Materials*, DOI: 10.1002/adem.200800152.

[43] Davis J. R., *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*, 1st ed., ASM International, Ohio, 1993.

[44] URL-1: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6082-T6T651-Plate_148.ashx, (Ziyaret tarihi: 24 Mayıs 2016).

[45] Kenny L. D., Transtec Publications, *Materials Science Forum*, Switzerland, 19 July 1996.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] Ertürk A. T., **Aydın İ.**, Enhanced Mechanical Performance of Aluminum Glass Fiber Reinforced Foam Material by Cu Modification, *6th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress & Exhibition*, İstanbul, Turkiye, 1-3 Haziran 2016.

ÖZGEÇMİŞ

Makine Mühendisi İsmet Aydın 1989 yılında Bursa'da doğdu. İlk orta ve lise öğretimini Bursa'da tamamladı. 2007 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 1 sene İngilizce hazırlık okuduktan sonra 2012 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2014 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans yapmaya hak kazandı. Mesleki hayatının bundan sonraki döneminde akademik çalışmalarına doktora programı ile devam etmek ve araştırma geliştirme faaliyetlerinde yer almak üzerine planlamaktadır.