
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

GEÇİŞLİ GÖZENEKLİ YAPILAR İÇİN SEÇİCİ LAZERLE ERGİTME YÖNTEMİNE YÖNELİK GEOMETRİ TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Mustafa KAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2019

Mustafa KAŞ tarafından hazırlanan "GEÇİŞLİ GÖZENEKLİ YAPILAR İÇİN SEÇİCİ LAZERLE ERGİTME YÖNTEMİNE YÖNELİK GEOMETRİ TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Başkan: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ulaş YAMAN

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 29/04/2019

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Mustafa KAŞ

29/04/2019

GEÇİŞLİ GÖZENEKLİ YAPILAR İÇİN SEÇİCİ LAZERLE ERGİTME YÖNTEMİNE YÖNELİK GEOMETRİ TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa KAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2019

ÖZET

Gözenekli yapılar kafes elemanların düzenli veya düzensiz halde yapı içerisinde tekrar etmesiyle oluşurlar. Bu yapılar atomik seviyeden makro boyutlara kadar iskelet, ağaç, mantar, mercan dâhil birçok alanda doğanın en güzel tasarımlarını oluştururlar. Bulundukları yapının başta mekanik olmak üzere, termal ve akustik özelliklerini iyileştirirler. Günümüzde artık birçok alanda yapay olarak üretilip kullanılan gözenekli yapılar, gözeneği oluşturan kafeslerin şekli, oryantasyonu, boyutu ve ayrıca yapı içerisindeki dağılımının değiştirilmesiyle yapıya geçiş kazandırılarak geçişli gözenekli yapılara dönüştürülebilir. Bu yapılar uzay ve havacılık gibi alanlarda büyük önem arz eden daha hafif ve dayanıklı yapıların oluşturulması, medikal alanda ise implant ve protez üretiminde vücut anatomisine uygun yapıların oluşturulmasında çokça kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, gözenekli yapılar geleneksel üretimlerin kısıtlarını ortadan kaldıran eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiştir. Gözeneklere doğadan ve nümerik analizlerden esinlenerek geçiş kazandırılmıştır. Gözenekli yapı tasarımda içten dışa artan ve azalan strut çapları kullanarak geçişli yapılar hazırlanmıştır. Tasarımlar Seçici Lazer Ergitme (SLE) teknolojisi ile üretilmiş ve üretilen numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri boyutsal olarak, hassas terazi, SEM-EDS ve çekme-basma cihazlarında yapılan testlerle karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar üretilebilirlik, gözeneklilik, maksimum basma gerilmesi ve elastik modül bakımından değerlendirilmiştir. Tasarımların mekanik özellikleri yoğunluklarına göre hesaplanmış ve strut çapını 0,3 mm den 0.4 mm e arttırmanın basma mukavemetinde %23 lük artış sağlandığı gözlenmiştir.

Science Code : 91438

Key Words : Eklemeli imalat, seçici lazer ergitme, gözenekli yapılar

Page Number : 81

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF GEOMETRY DESIGN FOR SELECTIVE LASER MELTING METHOD GRADED POROUS STRUCTURES

(M. Sc. Thesis)

Mustafa KAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2019

ABSTRACT

Porous structures are formed by the repetition of the lattice elements in regular and/or stochastic structure. These structures can be examples of the most beautiful designs of nature from atomic to macro dimensions in many areas like skeletons, trees, mushrooms and corals. They improve the thermal, acoustic and especially mechanical properties of the structure. Nowadays, porous structures, which are artificially produced and used in many areas, can be turned into functionally graded porous structures by providing transition to the structure with changing the shape, orientation and size of the lattices forming the pores and also their distribution within the structure. These structures are commonly used in production of lighter and more durable structures which have great importance in areas such as space and aerospace and in medical field, they are used in production of implants and prostheses for creating suitable structures for body anatomy. In this thesis, porous structures are produced by additive manufacturing method which eliminates the constraints of traditional production. Pores became functionally graded by designs which were inspired by the nature and numerical analyses. Functionally graded structures were designed by using strut diameters increasing and decreasing from inside to outside in porous structure. The designs were characterized by the tests performed with calipers, precision scales, SEM-EDS and uniaxial compressive devices for physical and mechanical properties of the samples produced with selective laser melting (SLM) technology. The obtained results were evaluated in the scope of producibility, porosity, maximum compression stress and elastic modulus. The mechanical properties of the designs were calculated according to their densities and it was observed that increasing the strut diameter from 0.3 mm to 0.4 mm increased the compressive strength by 23%.

Science Code : 91438

Key Words : Additive manufacturing, SLM, porous structures

Page Number : 81

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması ve diğer akademik çalışmalarımda bilgi, beceri ve deneyimiyle karşılaştığım sorunlar karşısında bana yön gösteren ve desteğini hiç esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Maddi manevi desteklerini hiç esirmeyen, değerli annem Fadime KAŞ'a, babam Yılmaz KAŞ ve kardeşim Cennet KAŞ'a çok teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmam süresince hep yanımda olup bana destek veren kardeşlik duygusunun kan bağından öte olduğunu hissettiren sevgili dostlarıma teşekkürlerimi sunarım. Son ve en önemlilerinden olan, tez çalışmasında kullanılan test numunelerini Ermaksan Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş. üretim tesislerinde seçici lazer eritme cihazı EnaVision ile üretme imkânı sunan ERMAKSAN (Bursa/Türkiye) ailesine desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ÖZETİ 3

2.1. Eklemeli İmalat 3

2.1.1. Eklemeli imalat teknolojileri 6

2.1.2. Eklemeli imalat için tasarım 12

2.2. Gözenekli Yapılar 15

2.2.1. Gözenekli yapıların temeli kafes elemanlar 17

2.2.2. Gözenekli yapıların tasarımı ve üretimi 20

2.2.3. Eİ ile üretilmiş gözenekli yapıların karakterizasyonu 22

2.3. Geçişli Gözenekli Yapılar 23

2.3.1. Geçişli gözenekli yapıların tasarımı ve üretimi 25

2.3.2. Eİ ile üretilmiş geçişli gözenekli yapıların karakterizasyonu 28

2.4. Literatürdeki Benzer Çalışmalar ve Katkılar 29

3. MATERYAL VE YÖNTEM 31

3.1. Materyal 31

Sayfa

3.1.1. Üretimde kullanılan Ti-6Al-4V metal toz malzeme 31
3.1.2. Cihazlar ve sistemler 32
3.2. Yöntem 34
3.2.1. Ön tasarım ve sonlu elemanlar analizi 34
3.2.2. Tasarım 36
3.2.3. Üretim 40
3.2.4. Mekanik testler 42
3.2.5. Numunelerin fiziksel özelliklerin incelenmesi 43
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR 45
4.1. Giriş 45
4.2. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi 45
4.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi 54
4.3.1. Deformasyon Mekanizmaları 59
4.3.2. Elastik Modül – Gözeneklilik İlişkisi 61
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 63
5.1. Öneriler 64
KAYNAKLAR 65
EKLER 77

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Eİ teknolojileri ve kullandıkları hammaddeler 6

Çizelge 3.1. Ti-6Al-4V metal tozu özellikleri 31

Çizelge 3.2. Gözenekli tasarımları oluşturan yapıların ölçüleri 38

Çizelge 3.3. İşleme Parametreleri 40

Çizelge 4.1. Tasarımların kuru ağırlık ölçümüne göre gözeneklilik oranları 46

Çizelge 4.2. Ti-6Al-4V gözenekli numunelerin kopma ve izafi kopma gerilmeleri 58

Çizelge 4.3. Ti-6Al-4V Tasarımların Elastik Modülleri..... 61

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Eİ ile üretim sürecinin genel akış şeması 4

Şekil 2.2. Bağlayıcı püskürtme teknolojisi çalışma prensibi şematik görünümü 7

Şekil 2.3. Direkt enerji yığma teknolojisi şematik gösterimi 8

Şekil 2.4. Filament kaynaklı ergiyik yığma sistemi..... 9

Şekil 2.5. Malzeme püskürtme teknolojisi çalışma prensibi..... 9

Şekil 2.6. Toz yataklı birleştirme sisteminin çalışma prensibi 10

Şekil 2.7. Tabaka yapıştırmalı parça birleştirme sistemi 11

Şekil 2.8. Tarayarak ışıkla kürleme sisteminin şematik görünümü 11

Şekil 2.9. Eİ için tasarım süreci 13

Şekil 2.10. Konvansiyonel sistemlerinin Eİ sistemine çevrilmesindeki aşamalar…….. 14

Şekil 2.11. Kemik yapısının şematik görünümü..... 17

Şekil 2.12. Stokastik bakır köpük ve stokastik polimer köpük..... 17

Şekil 2.13. a) CAD tabanlı kafes yapılar, b) kapalı yüzey tabanlı kafes yapılar, c) topoloji optimize edilmiş kafes yapılar..... 20

Şekil 2.14. Fonksiyonel geçişli yapıların sınıflandırılması, soldaki kompozisyon geçişli yapı, ortadaki mikro yapı geçişli yapı, sağdaki geçişli gö-zenekli yapı..... 24

Şekil 2.15. Farklı izafi yoğunluk oranlarında Ti-6Al-4V alaşımından gözenekli yapı tasarımı: a) basamaklı şekilde oluşturulan geçişli gözenekli yapı; b) devamlı şekilde oluşturulan geçişli gözenekli yapı; c) ve d) tasarımların izafi yoğunluk oranları..... 26

Şekil 3.1. Tez çalışması akış şeması..... 34

Şekil 4.1. Tasarım ve hata kaynaklı gözenek çeşitleri ve ölçüm yöntemleri..... 47

Şekil 4.2. Numunelerin yoğunluğuna karşın gözeneklilik oranları 49

Şekil 4.3. AlSi10Mg alaşımdan SLE ile kafes yapılardan üretilen gözenekli numune-nin gerilim-gerinim eğrisi..... 55

Şekil 4.4. Numunelerin yoğunluğuna karşın kopma gerilmelerinin değişimi 56

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.5. Tasarım A, B, C, D gerilim-gerinim eğrisi Ti-6Al-4V 57

Şekil 4.6. Ti-6Al-4V Tasarım A, B, C, D elastik bölge eğrileri 62

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Solda geleneksel ve Eİ ile üretilmiş uçakta kullanılan bağlantı parçası [8], sağda ise Eİ üretilen ortopedik sabitleme aparatı..... 5

Resim 2.2. Sırasıyla giroid, elmas ve pirimitif (a), (b), (c) kafes yapıların, x, y ve z ekseninde periyodik olarak oluşturdukları gözenekli yapılar (d), (e), (f) 18

Resim 2.3. A) Octet-truss kafes yapısının basma yüklemesine karşı mekanik tepkisi (B) Octet-truss kafes yapı gözenekli formu (C) Octet-truss kafes yapıların SEM görüntüsü (D) Tetrakaidecahedron kafes yapısının basma yüklemesine mekanik tepkisi (E) Tetrakaidecahedron kafes yapı gözenekli formu (F) Tetrakaidecahedron kafes yapıların SEM görüntüsü. 19

Resim 2.4. SLE yöntemi ile Ti-6Al-4V malzemesinden (a) basamaklı ve (b) düzgün devamlı, geçişli gözenekli yapıda üretilen numunelere örnekler..... 27

Resim 3.1. Ti-6Al-4V (15-45 μm) metal tozunun taramalı elektron mikroskopu görüntüsü 32

Resim 3.2. Basma testlerinin yapıldığı Instron universal test makinesi (model 3369).... 33

Resim 3.3. Katı modele uygulanan sınır koşulları..... 35

Resim 3.4. FEM analiz sonucunun geçişli gözenekli yapıya uyarlaması 36

Resim 3.5. Tasarımların strut çaplarına göre hacimsel modelleri 37

Resim 3.6. Tasarımların üstten görünüşünün iki boyutta CAD çizimleri 37

Resim 3.7. Rhombik dodekahedron kafes yapısı gösterimi..... 38

Resim 3.8. Kafes elemanlardan oluşturulmuş gözenekli yapı tasarımları 39

Resim 3.9. (A) Tasarım A, (B) Tasarım B, (C) Tasarım C, (D) Tasarım D için CAD programından alınan üretimde büyütme yönünde kesit görüntüleri 39

Resim 3.10. Üretilen numunelerin tezgâhtan çıkarıldığı anda ki görüntüsü..... 40

Resim 3.11. Numunelerin içerisinde kalan toz parçacıklarının basınçlı hava ile temizlenmesi 41

Resim 3.12. Ultrasonik temizleme ünitesi ile gözenekli yapı içerisinde ki kalan tozların temizlenmesi 42

Resim 4.1. Farklı yöntemlerle ölçülmüş tasarım gözeneklilik oranları 46

Resim 4.2. Düğüm noktasında üretimsel hatalara bağlı oluşan mikro kusur gözenekler 48

Resim **Sayfa**

Resim 4.3. Tasarımları oluşturan düğüm ve strutların taramalı elektron mikroskopu altında ki görüntüsü 50

Resim 4.4. Düğüm noktasında numune yüzeyine yapışan ham tozların elektron mikroskopu altında ki görüntüsü 51

Resim 4.5. Sol üstte CAD programından alınan 300 µm'lik strut çapı, sağ üstte ise SLE ile üretilen strutın çapı, sol altta CAD programından alınan 400 µm'lik strut çapı ve sağ altta ise SLE ile üretilen strutın çapı gösterilmektedir 52

Resim 4.6. Sol üstte CAD programından alınan 1.47 mm'lik diyagonal gözenek çapı çapı, sağ üstte ise SLE ile üretilen gözeneğin diyagonal çapı, sol altta CAD programından alınan 1.284 mm'lik diyagonal gözenek çapı ve sağ altta ise SLE ile üretilen gözeneğin diyagonal çapı 53

Resim 4.7. SLE teknolojisiyle üretilen Ti-6Al-4V numunenin strut kesitinde yapılan EDS analizi 54

Resim 4.8. Gözenekli Ti-6Al-4V numunelerin a)Tasarım A, b)Tasarım B c)Tasarım C, d)Tasarım D, basma kafaları arasında gösterdiği deformasyon davranışları 59

Resim 4.9. Ti-6Al-4V tasarımların soldan sağa sırasıyla Tasarım A'dan D'ye deformasyon mekanizmaları 60

Resim 4.10. Basma testi sırasında kopan strutların farklı büyütme oranlarında taramalı elektron mikroskopu görüntüleri 60

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
$\boldsymbol{\rho_n}$	Numunenin yoğunluğu
$\boldsymbol{\rho_t}$	Ham tozun yoğunluğu
$\boldsymbol{V_{CAD}}$	Numunenin CAD geometrisinden alınan gözenekli hacmi
$\boldsymbol{V_{n,d}}$	Numunenin dolu hacmi
$\boldsymbol{W_{n,h}}$	Numunenin havadaki ağırlığı
$\boldsymbol{W_{n,s}}$	Numunenin sudaki ağırlığı

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
CAD	Computer aided design
DED	Yönlendirilmiş enerji biriktirme
EBM	Elektron ışını eritme
EDS	Energy dispersive spectrometry
Eİ	Eklemeli imalat
FDM	Fused deposition modelling
GGY	Geçişli gözenekli yapı
LENS	Lazer gücü net şekillendirme
PVA	Polivinil Alkol
SLE	Seçici lazer ergitme
SEM	Scanning electron microscopy
µCT	Micro computed tomography
3D	Three dimensional

1. GİRİŞ

İnsanoğlu, yüzyıllardır doğal gözenekli malzemeleri günlük hayatlarında kullanmışlardır. Gözenekli yapılar doğada ahşap, sünger, mantar, kil, bal petekleri, mercan ve kemikler gibi pek çok şekilde bulunmaktadır. Yapılan incelemelerde doğada bulunan gözenekli yapıların, belirli gözenek geçişine sahip olduğu gözlenmiştir. Yapı içerisinde bulanan bu geçişin fonksiyonel gereksinimlere göre yüzyıllar süren bir evrim sonucu geliştiği düşünülmektedir.

Gözenekli yapılar yapay olarak birim kafes yapıların düzenli veya düzensiz sürekli tekrarıyla oluşturulur. Günümüzde üzerine yapılan akademik çalışmalar ile önemi ve kullanım alanı gittikçe artan gözenekli yapılar, birçok alanda farklı amaçlar için doğadan esinlenerek yapay olarak üretilmeye başlanmıştır. Gözenekli yapının yoğunluğunun yapıyı oluşturan ana malzemenin yoğunluğuna oranı izafi yoğunluk olarak adlandırılır. İzafi yoğunluk gözenekli yapıların mekanik ve fiziksel özelliklerini karakterize etmek için kullanılır. İzafi yoğunluğun kademeli ya da sürekli halde gözenekli yapı içerisinde değiştirilmesiyle Geçişli Gözenekli Yapı (GGY) elde edilir. GGY konsepti, ilk olarak Japonya'da 1984'de uzay araçları için 2000 K sıcaklığına dayanabilecek termal bariyer malzemesi olarak kullanılmıştır [1]. Gözenekli yapılara geçiş kazandırarak doğadaki yapılar taklit edilmeye ve geleneksel tasarımlara göre üstün tasarımlar oluşturulmaya başlanmasıyla yeni nesil malzemeler üretilmeye başlanmıştır. GGY bulunduğu malzemenin mekanik, fiziksel, termal, akustik ve biyolojik özelliklerini iyileştirirler. GGY'ler kullanılarak oluşturulan malzemelerin kazanabileceği başlıca özellikler ve kullanım alanları aşağıdaki gibidir.

- Otomotiv, uzay ve havacılık: Yüksek mukavemet, düşük ağırlık (hafifletme)
- Elektrik elektronik cihazlar: Kontrol edilebilir ısıl ve elektriksel iletkenlik
- Tıbbi araçlar ve implantlar: Kontrol edilebilir biyolojik ve mekanik özellikler (Osseointegrasyon, stress shielding etkisi)

GGY'ler yakın geçmişe kadar sadece geleneksel üretim yöntemleriyle üretilebilmekteydi. Geleneksel üretim yöntemlerinden fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme, plazma püskürtme, katman katman döküm gibi yöntemler kullanılmıştır [2]. Ancak bu üretim yöntemlerinin en büyük dezavantajı gözenek içinde ki geçişin kontrol edilememesinden kaynaklı doğal yapıların birebir taklit edilememesidir. Son yıllarda kullanım alanı gittikçe artan ve geometrik kısıtlamalar olmadan üretim yapma imkânı sunan

Eklemeli İmalat (Eİ) teknolojisi, gözenekli yapıların istenen formda ve geçişe sahip olarak üretilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu teknoloji gözeneklerin yapı içerisinde dağılımı, geometrisi ve şeklini üretim açısından istenen düzeyde kontrol etmeyi mümkün kılar.

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V tozundan Seçici Lazer Ergitme (SLE) teknolojisi ile üretilen, homojen gözenekli ve geçişli gözenekli yapılarda, gözeneklilik ve gözenek geçiş yönünün fiziksel ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla hem homojen gözenekli hem de geçişli gözenekli yapıda tasarımlar yapılması ve ayrıca geçiş yönünün yapı üzerindeki etkilerini incelemek için gözenekli yapılara zıt yönde geçiş kazandırılması hedeflenmiştir. Yapılan mekanik ve fiziksel karakterizasyon testlerinde tasarımların üretilebilirliği, üretilen numunelerde gözenekli yapıya verilen geçişin doğru şekilde karakterize olup olmadığı, gözenekli yapıya geçiş kazandırmanın etkisinin homojen gözenekliliğe göre karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Bu tez çalışması giriş, literatür taraması, materyal ve yöntem, deneysel sonuçlar ve tartışma, sonuç ve öneriler olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde gözenekli ve geçişli gözenekli yapılarla ilgili bilgi verilmiş ayrıca bu araştırmanın motivasyonu ve amacı kısaca tartışılarak tezin kapsamı anlatılmıştır. İkinci bölümde Eİ temelleri ve Eİ teknolojileri hakkında bilgiler verilerek sınıflandırma yapılmış ve Eİ için tasarım süreci anlatılmıştır. Ayrıca bölüm 2'de gözenekli yapıların tasarımı, üretimi, mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine literatür incelemeleri de sunulmuştur. Bölüm 3'te materyal ve yöntem bilgileri, fiziksel özelliklerin belirlenmesi, SEM kullanarak mikro yapı incelenmesi ve mekanik özellikler elde etmek için basma testi uygulamalarının prosedürleri sunulmuştur. Kullanılan her ekipman hakkında kısaca bilgiler verilmiştir. Deneysel sonuçlar ve tartışma bölümünde ise mikro yapı ve mekanik özellikleri belirlemek için yapılan testlerin sonuçları, tasarımlar arasındaki karşılaştırmalar, deneysel sonuçlardan çıkarılan bulgular verilmiştir. Sonuç ve öneriler bölümünde tez kapmasında yapılan deneysel test ve ölçümlerden elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilip ayrıca oransal olarak değerlendirmesi yapılmıştır ve gelecek çalışmalara ışık tutması amacıyla öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Eklemeli İmalat

Görsel örnek ürün üretmek amacıyla 1900'lü yılların ortasında kullanılmaya başlanan Eİ, gelişen teknolojisi akademik çalışmaların artması ve alınan ticari patentlerin sürelerinin dolmasına paralel 21. yüzyılda artık prototip üretmekten öteye geçerek gereksinime göre tasarlanan fonksiyonel parçaların nispeten seri üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. En genel anlamıyla Eİ 3B tasarım dosyasındaki bilginin kullanılan üretim tekniğe özgü tezgâhlarla malzemenin katman katman bir biri üzerine yığılmasıyla üretim yapma teknolojisi olarak açıklanabilir. ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu) F-2792 standardı bu üretim teknolojisini şöyle tanımlamaktadır: "Eklemeli İmalat, talaş kaldırmalı üretim teknolojilerinin aksine, genellikle katman üzerine katman eklenmesiyle 3B model verisinden nesneler yapmak için bir malzeme birleştirme işlemidir" [3].

Hızlı prototipleme olarak, 1980'lerin ortalarında 3D Systems şirketinin SLA-1'i sunmasıyla ortaya çıkan ve ürünlerin prototiplerini doğrudan bilgisayar destekli tasarım (CAD, Ing. Computeder Aided Design) verisini kullanarak imal etmek için kullanılan teknoloji o zamandan beri hız, parça doğruluğu ve ürün özelliklerinin iyileştirilmesi gibi alanlarda önemli bir gelişme göstermiş ve uygulama alanlarını genişletmiştir [4]. Ayrıca, bu teknolojinin özelliklerinin ve kullanımının giderek artmasına paralel olarak, hızlı prototipleme terimini kullanmak yerine, üretim endüstrisi ve akademik alanda Eİ ve genel kamuoyu tarafından 3D baskı teriminin kullanımını da beraberinde getirmiştir [5].

Eİ ile 3D görsel CAD dosyasının fiziksel parçalara dönüştürülmesi belirli adımları takiben gerçekleşir ve üretim sonrası parçaya bazı son işlemler uygulanması gerekebilir. Eİ üretim teknolojisinde kullanılan adımlar genel olarak şu şekildedir [6] .

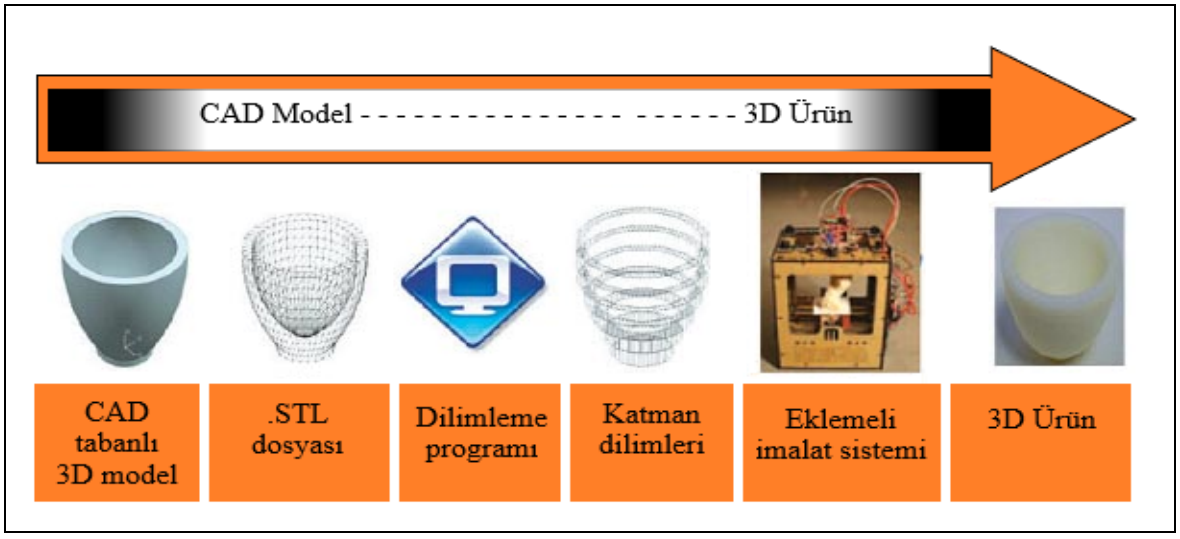
- Parçanın dış görünümünü tanımlayan 3D CAD dosyasının oluşturulması
- CAD dosyasının katmanları ve diğer parametreleri içeren STL dosya formatına çevrilmesi
- STL dosyasının Eİ makinesinin program ara yüzüne gönderilmesi ve bu aşamada parçaya özgü boyutlandırma, pozisyon verme ve destek yapısı oluşturma gibi modifikasyonların yapılması, 3B tasarımın iki boyutlu katmanlara ayrılması, üretim

sırasında katmanları oluşturmak için gerekli tarama parametrelerinin belirlenmesi; malzeme, enerji miktarı, katman kalınlığı gibi

- Üretim aşaması; bu aşamada hammadde bitmesi veya güç kesilmesi olması gibi hatalar dışında üretim otomatik gerçekleşir
- Üretimi tamamlanan parçanın, makineden çıkarılması
- Parçanın temizlenmesi, kullanıldıysa destek yapıların kaldırılması gibi son işlemlerin uygulanması
- Üretim sonrası istenen yüzey özelliklerinin verilmesi için taşlama, parlatma, kumlama, boyama gibi işlemler

Kullanılan Eİ teknolojisine göre üretilen ham yapıya mukavemet kazandırmak için sinterleme ya da yüksek ısı girdisi ile üretim yapılan teknikler için parça içinde homojen olmayan ısı dağılımına paralel parçada oluşabilecek ısıl gerilmelere bağlı çarpılmalar ve kalıntı gerilmeler bağlı deformasyonların önüne geçmek için ısıl işlem veya sıcak izostatik presleme gibi üretim sonrası uygulamalar gerekebilir.

Eİ teknolojileri geleneksel üretim yöntemlerine göre operatörden neredeyse bağımsız olarak kendi kendine üretim yapabilecek 'akıllı fabrikalar' olarak ta tanımlanabilir. Ayrıca, ürünün pazara çıkış hızının yüksek olması, cihazların kompakt hali ile az yer kaplaması otomasyona uygun olması ve nesnelerin interneti teknolojisini kullanabilmesi nedeniyle Endüstri 4.0 devriminin bir parçası olarak kabul edilebilir. Eİ teknolojisinde uygulanan genel akış şeması Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Eİ ile üretim sürecinin genel akış şeması

Eİ teknolojisinin sağladığı en büyük fayda tasarım kısıtlarını konvansiyonel yöntemlere nazaran olmaması ve gereksinime özgü üretim hızının çok yüksek olmasıdır. Ayrıca Eİ teknolojileri, maksimum hammadde tasarrufu, kişiselleştirilmiş parça üretimi gibi avantajları ile de mevcut üretim teknolojilerine göre avantajlar sağlamakta, kesici takım gibi ekstra sarf malzemesi ihtiyaçları gerektirmemektedir. Bu nedenlerden dolayı Eİ teknolojisi havacılık, otomotiv, sanat ve tıp endüstrisi gibi birçok sektörün ilgisini çekmektedir. Havacılık sektöründe kullanılan hammaddenin genelde pahalı metal parçalardan olması en az malzeme sarfiyatı ile doğrudan parça üretilmesi ve karmaşık ve yüksek performanslı ürünlerin herhangi bir takım gerektirmeden kolayca üretilebilmesi gibi üretim kısıtlamalarını getirmemektedir [5]. Eİ teknolojisinin en çok kullanıldığı bir diğer sektör ise sağlık alanıdır. Deforme olmuş dokuların yerini alabilen ve hem mekanik hem de biyolojik açıdan gerçek doku örneğinin yerini tutabilen implant üretimi için kullanılmaya başlanılan Eİ sonraları canlı doku örnekleri üreterek yapay organ yapımı için çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Eİ teknolojilerinden toz yataklı birleştirme teknolojileri olan Elektron Işını Eritme (EBM) ve SLE teknolojileri uzay, havacılık ve tıp alanın içerisinde ortopedik implant üretimi amaçları için aktif olarak kullanılmaktadır. Hava araçlarının tasarımında ana hedef hafif parça bileşeni üretmektir ve bu Eİ teknolojileri ile sağlanabilmektedir. Ortopedik implant üretiminde ise mekanik ve biyolojik özelliklerin aynı anda karşılanması en önemli isterdir. Resim 2.1'de gösterildiği gibi geleneksel parçalar optimizasyon yöntemleri ile tekrar tasarlanıp Eİ teknolojileri ile daha hafif ve dayanıklı olarak üretebilmekte ayrıca ortopedik implantlar gözenekli formda üretilerek doğal doku yapısı taklit edilebilmektedir [7].



Resim 2.1. Solda geleneksel ve Eİ ile üretilmiş uçakta kullanılan bağlantı parçası [8], sağda ise Eİ üretilen ortopedik sabitleme aparatı [9]

2.1.1. Eklemeli imalat teknolojileri

İlk önceleri sadece görsel amaçlı prototip oluşturmak için kullanılan Eİ yöntemi geometrik kısıtlamaların olmaması, artık malzeme miktarının çok az olması ve kompleks parçaların tek seferde üretilebilmesi nedeniyle kullanımı gün geçtikçe artmış, evrilmiş ve birbirinden farklı üretim yöntemleri ortaya çıkmıştır. Bu farklılığı yaratan en önemli unsur kullanılan malzeme özelinde geliştirilen teknolojilerdir. Çizelge 2.1'de temel Eİ teknolojileri ve kullandıkları hammaddeler gösterilmektedir.

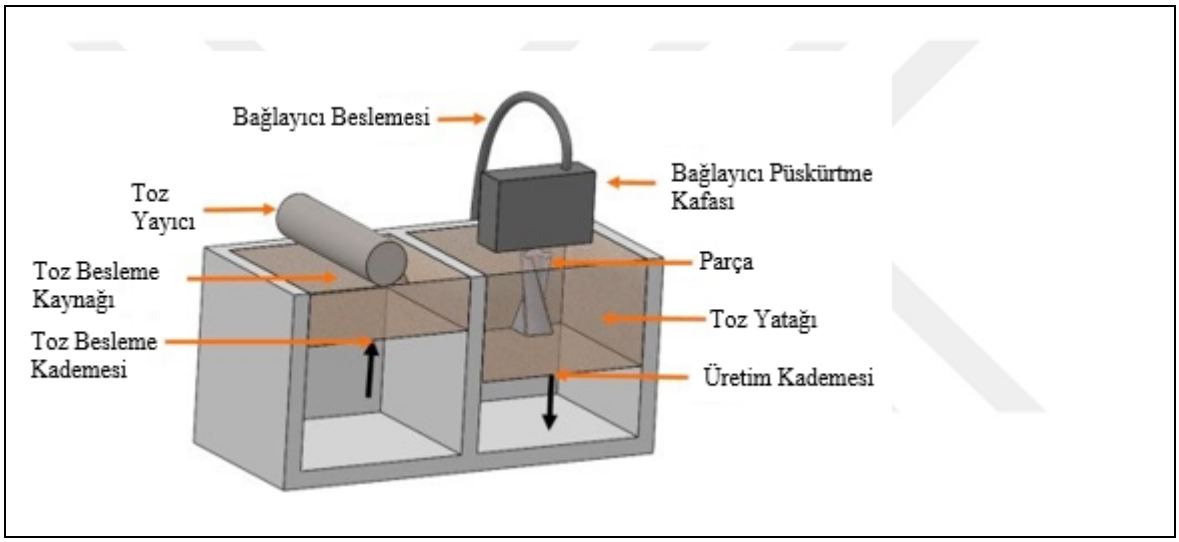
Çizelge 2.1. Eİ teknolojileri ve kullandıkları hammaddeler [10]

Hammadde	Örnek Malzeme	Eklemeli İmalat Teknolojileri						
		Işıkla Kürleme	Malzeme Püskürtme	Bağlayıcı Püskürtme	Toz Yatalı Birleştirme	Malzeme Yığma	Direkt Enerji Yığma	Tabaka Yapıştırmalı Parça Birleştirme
Termoset Polimers	Epoksi ve Akrilikler	X	X					
Temoplastik Polimers	Poliamid, ABS,PPBS		X	X	X	X		X
Odun	Kağıt							X
Metal	Çelik, Titanyum Alaşımı, Kobalt-Krom			X	X		X	X
Endüstriyel Seramik Malzemeler	Alümina, Zirkonya, Silikon Nitrit	X		X	X			X
Yapısal Seramik Malzemeler	Çimento, Döküm Kumu			X	X	X		

Eİ teknolojisi kendi içerisinde farklı şekillerde sınıflandırılabilmektedir. Kullanılan yöntemlerde ki temel farklar hammadde ve ardışık katmanları birleştirme tekniğidir. Farklı teknolojilerin gün geçtikçe sayısının artması nedeniyle oluşan karmaşanın ve belirsizliğin önüne geçmek için 2010 yılında ASTM gurubunun yayınladığı başlıkta, "ASTM F42 – Additive Manufacturing", Eİ teknolojisi 7 temel kategoriye ayırmıştır [3].

Bağlayıcı püskürtme

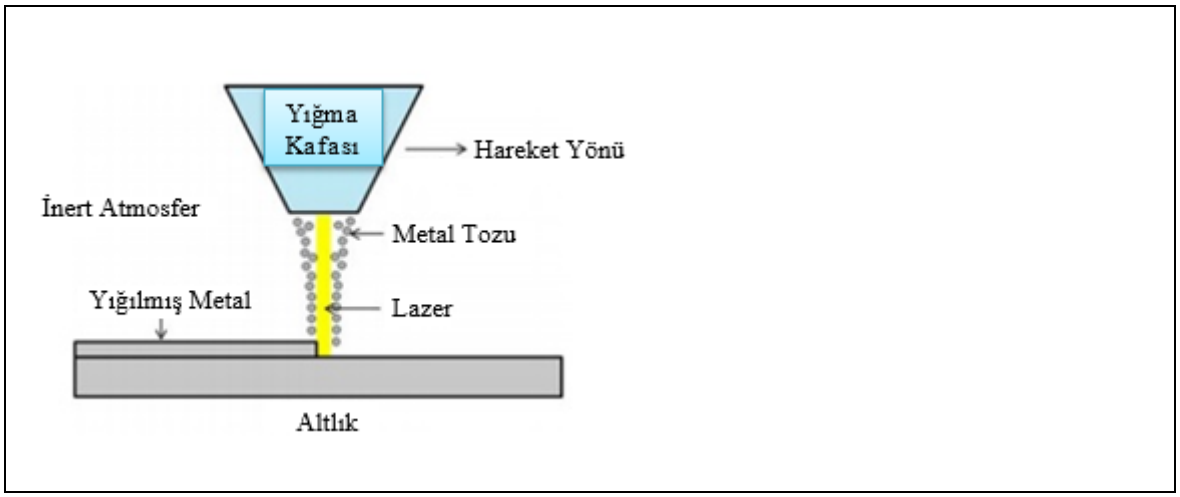
Toz hammaddeden parça üretmek için 3B CAD bilgisinden alınan bilgiye göre üretim kademesi üzerine serilen tozun belirli bölgelerine bağlayıcı sıvı püskürterek parça büyütme yöntemidir. Katman katman toz serme ve bağlayıcı püskürtme işlemi 3B fiziksel obje tamamlana dek sürer. Şekil 2.2'de bağlayıcı püskürtme teknolojisin görseli şematize olarak verilmiştir. Baskı esnasında yüksek ısı girdisi olmadığı için termal gerilme ve çarpılma olmaz fakat üretimden hemen sonra parça çok kırılgan olduğu için parçaya ham (green) parça adı verilir ve mukavemetini arttırmak için sinterleme işlemi uygulanması gerekir.



Şekil 2.2. Bağlayıcı püskürtme teknolojisi çalışma prensibi şematik görünümü [11]

Direkt enerji yığma

Yoğunlaştırılmış termal enerji üretilecek olan parçanın hammaddesini ekstrüzyon işlemine benzer bir yöntemle eriterek robotik kollar vasıtasıyla 3B nesnenin CAD geometrisine göre katman katman yığması ile parça oluşturulur, bu yüzden malzeme yığma veya biriktirme teknolojisi olarak adlandırılır. Kullanılan enerji lazer, elektron ya da ark olabilir. Ayrıca kullanılan enerji kaynağının yanında hammadde malzemesinin kullanım şekline (toz veya tel gibi) farklı teknolojiler mevcuttur. Direkt enerji yığma teknolojisin görseli, Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Genelde hammadde enerji kaynağı etkileşiminin yani ergimenin olduğu bölge soy gaz (koruyucu gaz) ile çevrili olur. Koruyucu gaz ergiyik havuzunu atmosferin olumsuz etkilerinden korumak ve dış kuvvetlerin etkisinden koruyarak dağılmasını önlemek için kullanılır.

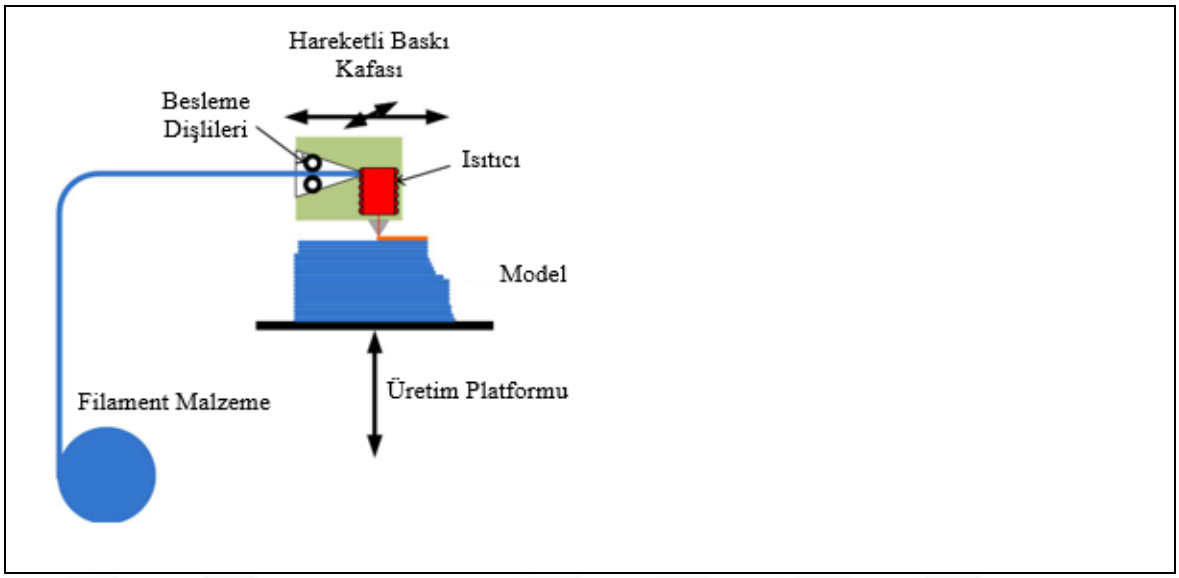


Şekil 2.3. Direkt enerji yığma teknolojisi şematik gösterimi [12]

Ergiyik yığma

Genelde FDM teknolojisi olarak bilenen bu teknik üretimi yapılacak parçanın hammaddesinin eritildikten sonra nozul içerisinden dışarı itilerek CAD verisine göre üst üste yığılması yöntemidir. Her katman ekstrüde edildiğinde, önceden oluşturulmuş katmana bağlanır ve katılaşır. Üretim genellikle çarpılma ve deformasyonu engellemek amacıyla ısıtmalı tabaka üzerine yapılır. Üretim esnasında destek yapısı kullanmak gerekebilir böyle bir durumda üretim sonrası destek yapılar çıkarılarak parçaya son şekli verilir. Ergiyik yığma teknolojisin görseli, Şekil 2.4'te verilmiştir.

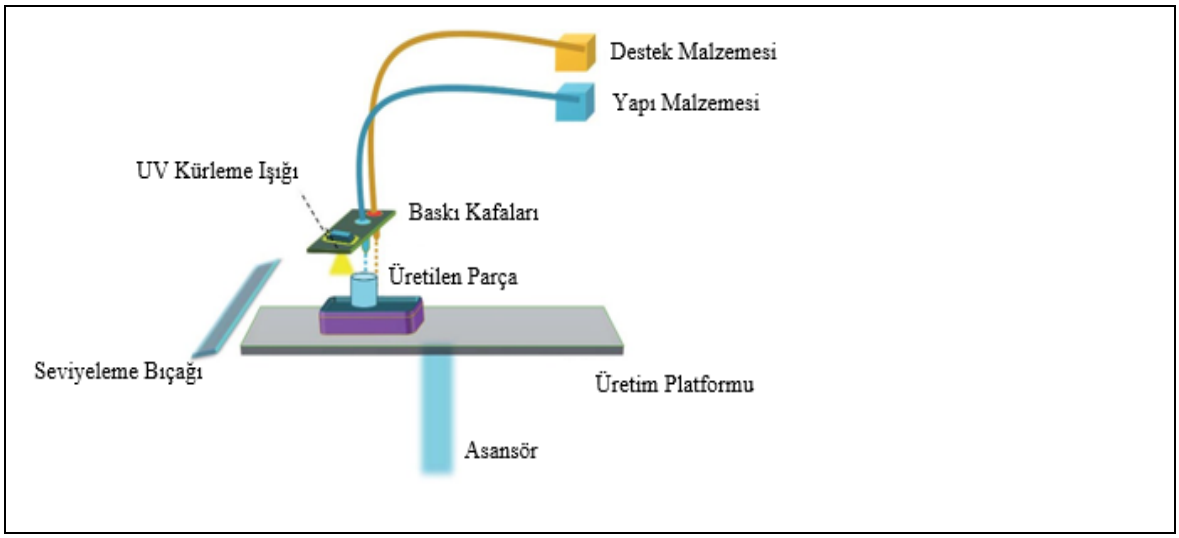
Son yıllarda çıkan ergiyik yığma teknolojine ile çalışan bazı cihazlar birden fazla nozula sahip olabiliyor. Böylece üretimde ya birden farklı malzeme kullanılabiliyor ya da nozullardan diğeri yapısı farklı destek malzeme üretmek için kullanılabiliyor. Genelde bu tip cihazlarda destek yapısı olarak Polivinil Alkol (PVA) kullanılıyor bu malzemenin özelliği su içerisinde kendiliğinden çözünebiliyor olmasıdır. Nozullardan birisi parça malzemesi için diğeri ise suda çözünebilen (PVA) destek malzemesi için kullanılır böylece üretim sonrası destek yapılar mekanik bir müdahaleye gerek kalmadan suda çözünerek kolayca yapıdan uzaklaştırılabilir.



Şekil 2.4. Filament kaynaklı ergiyik yığma sistemi [13]

Malzeme püskürtme

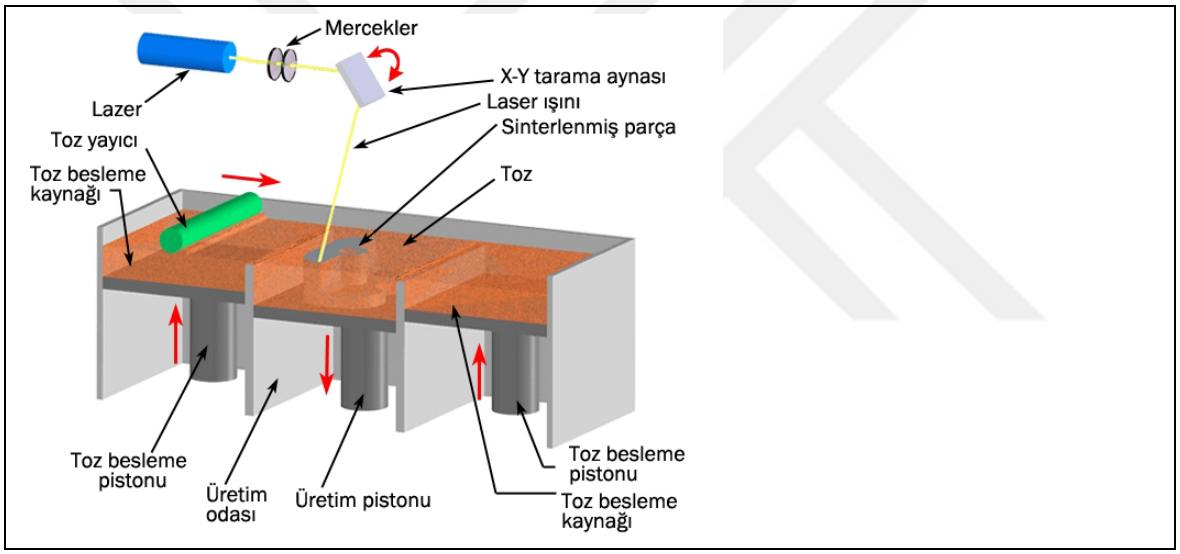
İki boyutlu ev kullanımı yazıcılar ile benzer prensipte çalışan teknik, parça malzemesinin ve destek yapı malzemesinin damlacıklarını baskı kafasından tabla yüzeyine bırakır ve ilk tabaka bırakılan malzemenin katılaşması ile oluşur. Daha sonra ki katmanlar, bir önceki katmanların üzerine inşa edilerek parçanın üretimini tamamlanana dek süreç devam eder. Üretim esnasında her tabaka bırakıldıktan sonra UV ışığı ile taranarak kürlenir ve sertleştirilir. Malzeme püskürtme teknolojisin görseli, Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Malzeme püskürtme teknolojisi çalışma prensibi [14]

Toz yataklı birleştirme

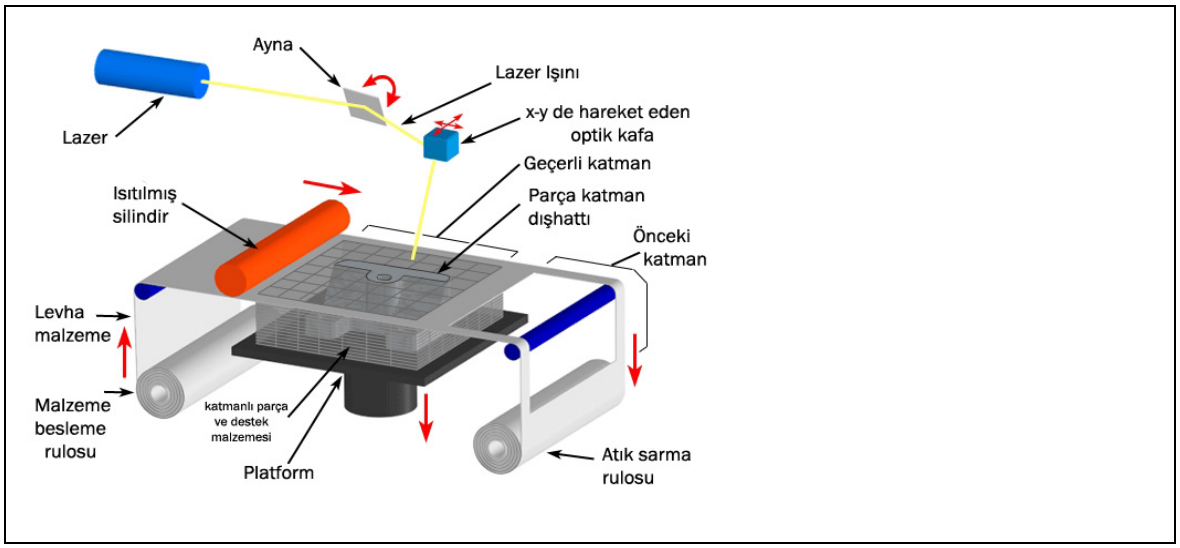
Üretim haznesinde ki tozların yoğunlaştırılmış bir enerji kaynağı vasıtasıyla bir noktada eritilmesi ve katılaşması temel prensibine dayanır. Çok ince bir toz malzeme katmanı, parça üretim plakası yüzeyi üzerine bir silindir veya bıçak ile serilir. Enerji kaynağından gönderilen ışın, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi parçanın bir tabakasını üretmek için seçici olarak tozu tarayarak birbirine bağlanmasını sağlar. Bir katman tamamladıktan sonra, bütün parça tamamlana kadar ardışık toz katmanları serilip tarama işlemine devam edilir. Bu üretim tekniğinde kullanılan enerji kaynağına göre; Lazer ya da Elektron kaynağı gibi, iki temel üretim yöntemi vardır, enerji kaynağı olarak lazer kullanan sistemler SLE, elektron ışını kullanan sistemler EBM olarak adlandırılır.



Şekil 2.6. Toz yataklı birleştirme sisteminin çalışma prensibi [15]

Tabaka yapıştırmalı parça birleştirme

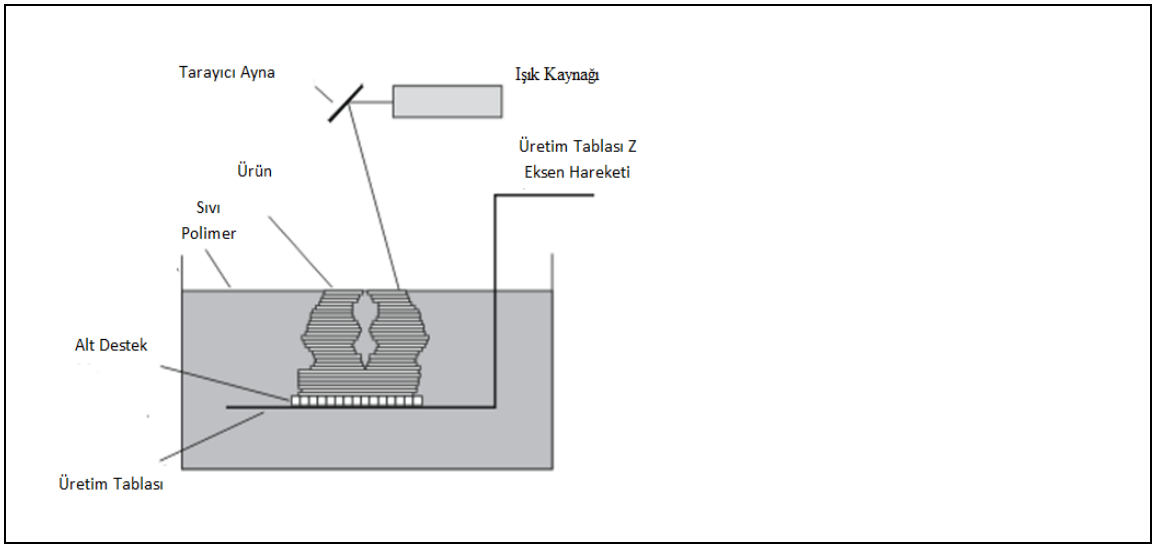
Üretimi yapılacak malzemenin tabakalar halinde üst üste yığılması ve ultrasonik kaynağa benzer bir teknoloji kullanılarak birbirine kaynaklanması ve sonrasında ise bir lazer ya da mekanik kesici yardımıyla istenen formun oluşturulması yöntemidir. Tabaka yapıştırma işleminin bir şeması, Şekil 2.7'de gösterilmektedir. İşlem, katı hal yapışması ile gerçekleştiğinden, malzeme bağlanmasının gerçekleşmesi için erime noktasına ulaşılması gerekli değildir yani üretilen parça kullanılan hammaddenin özelliklerini taşır. Kalıntı gerilmeler oluşmaz.



Şekil 2.7. Tabaka yapıştırmalı parça birleştirme sistemi [15]

Işıkla kürleme

Sıvı foto polimerin seçici ışık kaynağı olan UV ışık ile kürlenerek katı malzeme oluşturulmasıdır. UV lazer ışını sıvı reçine üzerinde CAD geometrisine uygun olarak reçinenin kürlenerek katılaşması sağlayarak ilk katmanı oluşturur. Bir katman tamamlandığında, daha sonra üretim platformu aşağı veya yukarı doğru hareket eder, oluşan boşluk sıvı reçine ile dolar ve parça tamamlanana dek işlem devam eder. Düz bir reçine tabakası sağlanması için yüzey tarama işleminden önce bir bıçak ile yüzey süpürülür. Tarayarak ışıkla kürleme işleminin şeması, Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Üretilen parça ultraviyole ışık altında fırında sinterlenerek istenen mekanik özellikler kazandırılır.



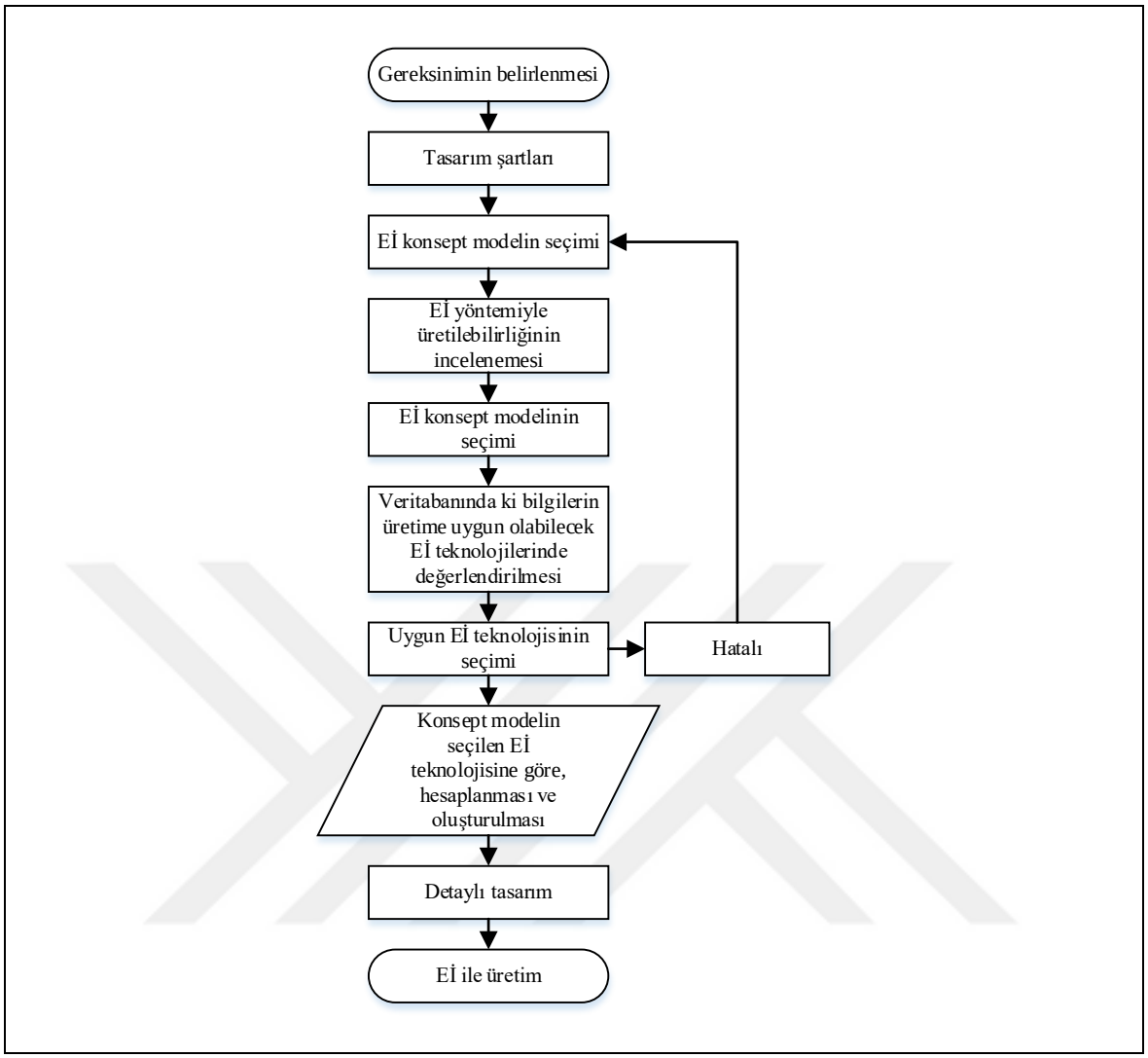
Şekil 2.8. Tarayarak ışıkla kürleme sisteminin şematik görünümü [16]

2.1.2. Eklemeli imalat için tasarım

İlk yatırım, sarf malzeme, bakım giderlerinin fazla olması ve yeterli sayıda tasarımcı, tasarım programı, tezgâh operatörü olmaması ayrıca üretim hızının ve hacminin düşük olması Eİ teknolojisini en kısıtlayıcı yönleridir. Eİ yönteminin bu dezavantajlarını ortadan kaldırmak ve geleneksel üretim yöntemlerine göre üstünlüklerini tam olarak ortaya çıkabilmek için Eİ yöntemine özgü yenilikçi tasarımların yapılması gereklidir çünkü Eİ teknolojisinin geleneksel üretim teknikleri karşısındaki en büyük avantajı geometrik kısıtlar olmadan neredeyse hayal edilebilen bütün tasarımların üretilebilmesidir.

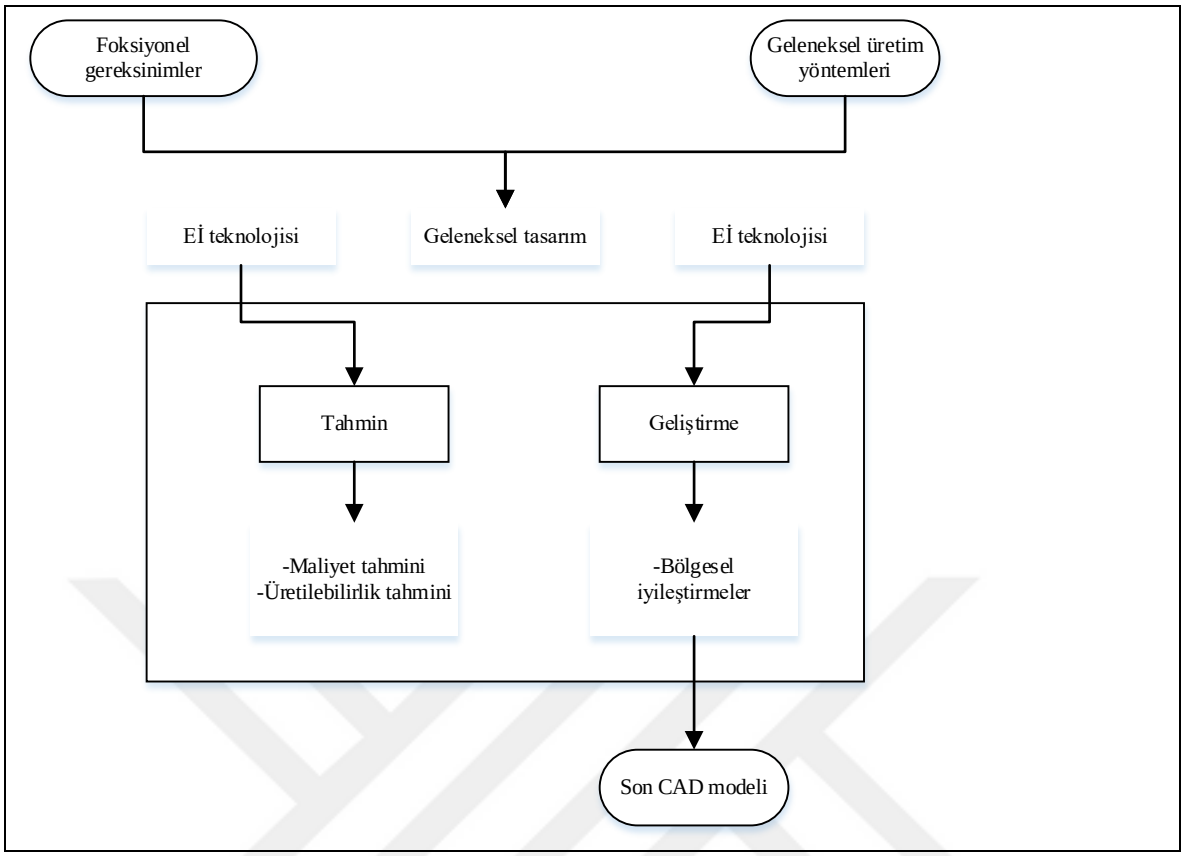
Günümüzde Eİ teknolojilerinde üretim süreçlerinin giderek gelişmesiyle doğrudan yekpare işlevsel ürünler üretilebilmektedir. Bu üretim tekniği ile kütle ve maliyet azaltmanın yanında parça işlevselliğinin artması sağlanarak verimliliğin artması sağlanır [17]. Üretimi yapılan parçanın boyutu, ağırlığı veya simetri özelliği gibi tasarım kriterlerin montajı gerekli parçalarda montaj süresine etkisi literatürde mevcuttur [18]. Eİ teknolojisinin sağladığı özgürlükler montaj süresini düşürdüğü hatta normalde montaj gerektiren tasarımların artık tek parçada üretilebilmesine de imkân sağlamasıdır [19]. Eİ için tasarımın bir diğer önemli özelliği ise gerekli tasarım kriterleri göz önüne alınarak yapılan tasarımlarla üretim sonrası herhangi bir ikincil işleme gerek duyulmadan nihai parçaların üretilebilmesidir [20]. Eİ için tasarım yaparken malzeme seçimi, üretim tekniği gibi unsurlar göz önünde bulundurularak, geometrik özgünlük, fonksiyonel parçalar için karmaşık geometride parça üretimi, daha az malzeme ve enerji tüketimi için topoloji optimizasyon uygulamaları kullanılabilir [21]. Eİ için parça tasarımı iki şekilde yapılabilir, en baştan eklemeli imalata göre tasarım yapmak ya da hali hazırda bulunan tasarımları eklemeli imalata göre uyarlamak [20].

Eİ için en baştan tasarım yapma süreci gereksinimin belirlenmesi ile başlar ve buna tasarım şartlarının eklenmesiyle devam eder. Tasarım şartları da belirlendikten sonra belirli bir parça veya ürünün Eİ kullanılarak üretilmesinin uygunluğunun kontrolü yapılır. Bir sonraki adım, kullanıcının tasarım ihtiyaçlarına uygun model seçeneklerini seçmek zorunda olduğu “konsept model” seçim sürecidir. Seçilen modele göre, tasarımcı kendi parçalarının veya ürünlerinin tasarımında uygulanabilecek çeşitli tasarım özelliklerini Eİ teknolojisi için değerlendirir. Tasarımcı daha sonra uygun Eİ teknolojisini seçerek ve tasarım özelliklerini seçtiği teknolojiye uygulayarak tasarımı tamamlar [22]. Şekil 2.9'da Eİ için tasarım süreci genel hatlarıyla verilmiştir.



Şekil 2.9. Eİ için tasarım süreci [22]

Eİ için diğer bir tasarım yöntemi ise hali hazırda kullanılan parça tasarımlarının Eİ yöntemine adaptasyonudur. Ponche, R. ve ark. [17] çalışmasında geleneksel üretim yöntemleri için kullanılan tasarımlardan ağırlık, maliyet, üretim zamanı gibi değişkenleri göz önünde bulundurarak Eİ yöntemine özgü olan ve fonksiyonel olarak kullanılabilecek ürünlerin imalatına uygun yeni tasarım yaklaşımları geliştirmişlerdir. Şekil 2.10'da konvansiyonel üretim sistemlere özgü tasarımların koşul şartlarının Eİ teknolojisine uyarlanması şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.10. Konvansiyonel üretim sistemlerinin Eİ sistemine çevrilmesindeki aşamalar [17]

Eİ, iteratif ürün geliştirme sürecini önemli ölçüde hızlandırır, son yıllarda Eİ için tasarım konsepti parça üretimindeki benzersiz avantajları nedeniyle çok sayıda tasarımın bu şekilde yapılmasını sağlamıştır [23]. Eİ teknolojisine yönelik tasarımlar geliştirmek için geleneksel tasarım programlarından ziyade bu teknolojiye yönelik tasarım programları kullanılması gerekmektedir. Bu araçlarla hazırlanan tasarımın analizini yapmak için geometriyi başka bir programa aktarmaya genellikle ihtiyaç duyulmaz. Birçok durumda, geometri değişiklikleri kolayca yapılabilir ve analiz edilebilir, böylece tasarımlar hızlıca tekrarlanabilir. Performans gereksinimlerini karşılayan ve tasarım kriterleri ile uyumlu nihai bir tasarım elde etmek için gerekli üretim süreçleri tek araçla verimli bir şekilde yapılabilir. Eİ için tasarım geliştirmenin önemine vurgu yapılan çalışmalarda Eİ için tasarım konusuna yeterince hâkim olunmazsa bu teknolojinin kazandırdığı avantajlardan tam anlamıyla faydalanılamayacağı belirtilmiştir [23]. Bu konuda yetişmiş Eİ yöntemine özgü tasarımlar yapabilen kişi sayısının az olması nedeniyle bu teknolojiden günümüzde tam olarak verim alınamıyor. Eİ teknolojisindeki en önemli eksikliklerden birisi Eİ için tasarım bilgisinin bilinmemesinin yanında Eİ için tasarıma uygun tasarım programlarının yetersizliği ve bu programlara yetkin kişilerin az olmasıdır.

2.2. Gözenekli Yapılar

Gözenekli (ya da süngerimsi doğal yapılarda kullanılan ismiyle) yapı özellikle tahta, kemik, sünger, mercan gibi doğal malzemelerde bulunarak birçok uygulama alanında yüzyıllardır kullanılmaktadır. Gibson [24], bazı doğal gözenekli malzemelerin mekanik özellikleri hakkında kapsamlı bir inceleme yapmıştır. Meyers ve ark. [25] biyolojik gözenekli malzemelerin yapısı ve özellikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Kullanım alanı ve oluşum şekli oldukça geniş olan gözenekli yapılar doğal veya yapay olarak amaca yönelik ya da kusurlara bağlı oluşmaktadır.

Gözenekli yapılar en genel şekilde içerisinde boşluklar içeren yapılar olarak tanımlanır [26]. Gözenekli yapılar doğal malzemelerden esinlenerek yapay olarak üretilip birçok alanda kullanılmaya başlanmış ve son yıllarda yoğun bir araştırma konusu haline gelmiştir. Yapay olarak üretilen gözenekli yapılar kafes elemanların dağılımına ve şekline göre stokastik (rastgele) ve periyodik gözenekli yapılar olmak üzere ikiye ayrılır. Genellikle, ikincisi (periyodik gözenekli yapılar), mekanik özellikleri kolayca tasarlanabilen düzenli ve tekrarlanabilir kafes yapılarından oluşmaktadır.

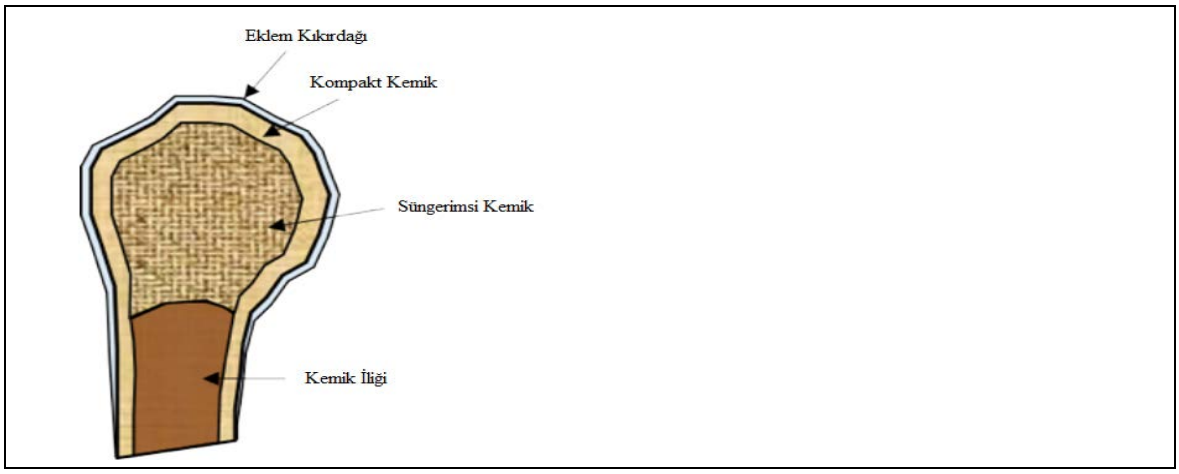
Özellikle Eİ teknolojisiyle üretilen parçalarda bulunan gözenekli yapılar üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Eİ ile üretilen parçalar için çoğu durumda, gözeneklilik ortaya çıkması istenmeyen bir olay olup, en aza indirgenmesi istenir, çünkü gözeneklilik üretilen parçanın mukavemet, sertlik ve yüzey kalitesi gibi malzeme özelliklerini olumsuz etkiler [26]. Eİ ile üretilen parçalarda gözenekliliği minimize etmek ve olabildiğince yoğun parça üretebilmek için yapılan çalışmalar mevcuttur [27, 28].

Ancak gözenekliliğin parça içerisinde istemli olarak oluşturulduğu tasarımlarda mevcuttur. Gözenekli yapıların istemli olarak üretilip birçok alanda fonksiyonel olarak kullanılmasının sebebi nispeten düşük bir kütle, iyi enerji emilimi, termal ve akustik yalıtım özellikleri ile birlikte yüksek dayanım gibi yüksek performans özellikleri sunabilmesidir [29, 30]. Hafif yapı tasarımı için yapı içerisinde gözeneklilik kullanımı yapının ağırlığını önemli ölçüde azaltabilir [31]. Böylece, otomotiv ya da havacılık endüstrisinde gözenekli yapılarla oluşturulan daha hafif yük taşıma bileşenleri ile hem daha ekonomik hem de daha ekolojik avantajlar sağlanmış olur.

Ayrıca Liverani, E. ve ark. çikolata fabrikasında kullanılan motor parçasını Eİ'e yönelik tasarımla gözenekli formda üretilmesi üzerine çalışmışlardır. Normalde bu parça hafif olması nedeniyle alüminyumdan üretilmekte ve toksik etkisinden dolayı gıda maddeleri ile direk teması istenmediği için teflon ile kaplanması gerekmektedir. Kullanılan alüminyum yerine 316 paslanmaz çelik kullanımı bu ikincil işlem gereksinimini ortadan kaldırmaktadır. Ancak çeliğin yoğunluğunun alüminyumdan daha yüksek olduğu için parçalar daha ağır hale geldiğinden çelikten üretilen parçanın içyapısı gözenekli hale getirilerek üretilmiş ve alüminyumla eşdeğer ağırlığa indirgenmiştir. Motor parçasının çelikten üretilmesi sağlanarak teflon kaplama gereksinimi ortadan kaldırılmış böylece hem maliyet hem de üretim zamanından kazanılmıştır [32].

Başka bir uygulama alanı ise tıbbi implant üretiminde kullanılmasıdır. İmplantlar zarar gören kemiğin yerine geçerek deforme olmuş bölgede biyolojik ve mekanik gereksinimleri sağlamaktadır. Bu alanda ki temel amaçlardan biri doku tutunmasını, hücre yenilenmesini ve osseointegrasyon için uygun tıbbi implantlar yapmaktır. Diğer bir amaç ise implant malzemesinin mukavemet özelliklerini doğal kemik dokusuna eşdeğer şekilde üretilmesidir. Ortopedik cerrahide, gözenekli yapılar, kemiğin yapısını ve işlevini taklit etmeye çalışan biyomateryaller olarak kullanılır [33]. Erica ve ark. [32] yaptıkları çalışmada implant uygulamalarında karşılaşılan en büyük sorun olan gerinim kalkanı etkisini ortadan kaldırmak için implantı gözenekli yapıda tasarlayarak mukavemetini doğal kemik yapısının değerine düşürmüşlerdir. Şekil 2.11'de gösterildiği gibi kemik, kıkırdak dış yüzey, ilik boşlukları ile kaplı kompakt bölge ve süngerimse bileşenlerden oluşur. Bir deformasyon durumunda kemiği yerinde tutmak ve ya diğer kemikler arasında nispi harekete izin vermek için kullanılan implant, hem kompakt hem de süngerimsi kemik özelliği taşımalıdır. İmplantı gözenekli formda üreterek tasarım, yoğunluk, kalınlık ve boşluk bakımından doğal kemik yapısına benzeterek mekanik ve biyolojik gereksinimler sağlanmış olur.

Üçüncü bir teknik uygulama alanı filtre ve hava tahliye bileşenlerinin üretiminde kullanılmasıdır [34, 35]. Bu bileşenler belirli bir gözeneklilikle belirli tür gaz ya da sıvı parçacık için yarı geçirgenlik sağlar.



Şekil 2.11. Kemik yapısının şematik görünümü

2.2.1. Gözenekli yapıların temeli kafes elemanlar

Kafes yapılar strut ve düğümlerin birleşerek ve tekrarlayarak oluşturduğu gözenekli yapıların en küçük grubudur. Ashby'e göre [36] kafes yapı, monolitik(şekilsiz) malzeme ve boşluğun birleşimiyle, yeni bir monolitik malzeme mimarisi ve eşdeğer mekanik özelliklere sahip yapıda malzeme türüdür. Yani kafes yapılar içerisinde belirli oranda boşluk bulunduran temel elemanlardır. Kafes yapılarda kendi içinde şekline göre stokastik ya da periyodik olarak ikiye ayrılır.

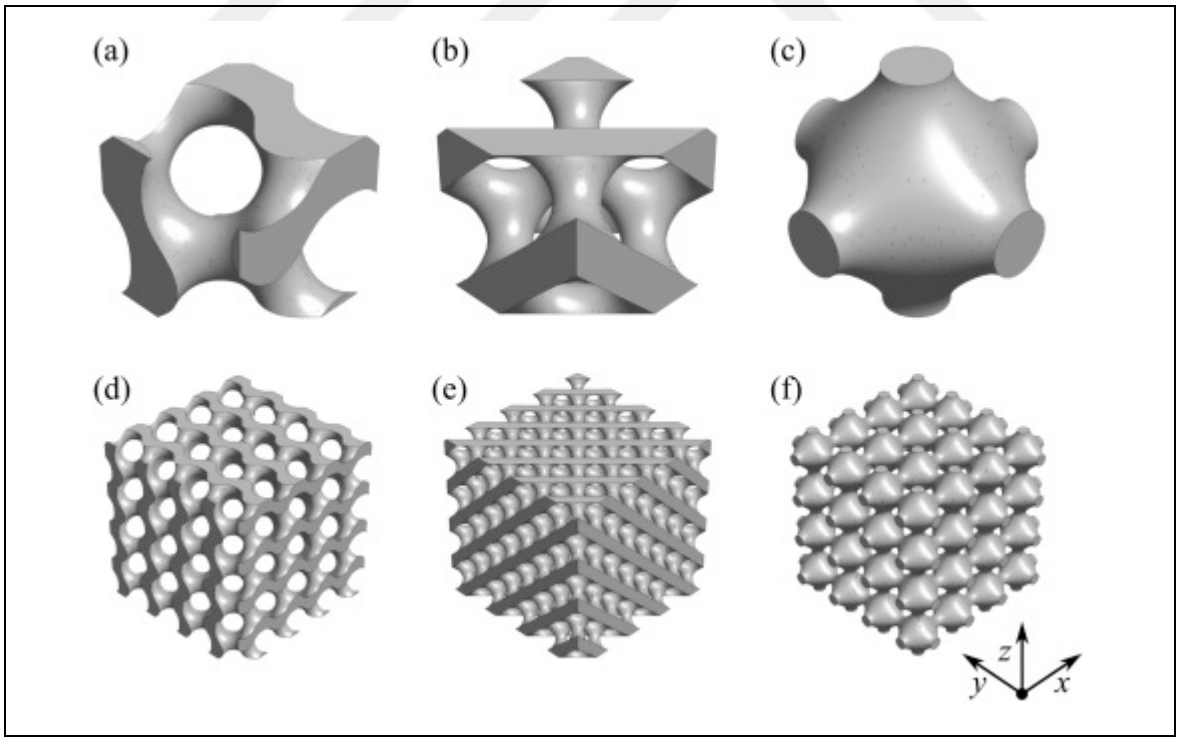
Stokastik kafes yapılar şekillerin rastgele bir olasılık dağılımı olarak tanımlanır. Bu tip randomize yapılar istatiksel olarak analiz edilebilir ancak tam olarak yeniden yaratılamaz ve öngörülemez. Kemik yapılarında, ahşapta ve toprak agregalarında bulunurlar [37]. Stokastik yapıya sahip kafes yapılarla ilgili çalışmalara genellikle biyolojik yapıların taklit edildiği ya da yerine geçtiği yapıların üretiminde karşılaşılmaktadır [38-40]. Stokastik yapılar, Şekil 2.12'de gösterildiği gibi hücrelerin boyutlarında ve şekillerinde rastgele farklılıklar gösterir.



Şekil 2.12. Stokastik bakır köpük ve stokastik polimer köpük [41]

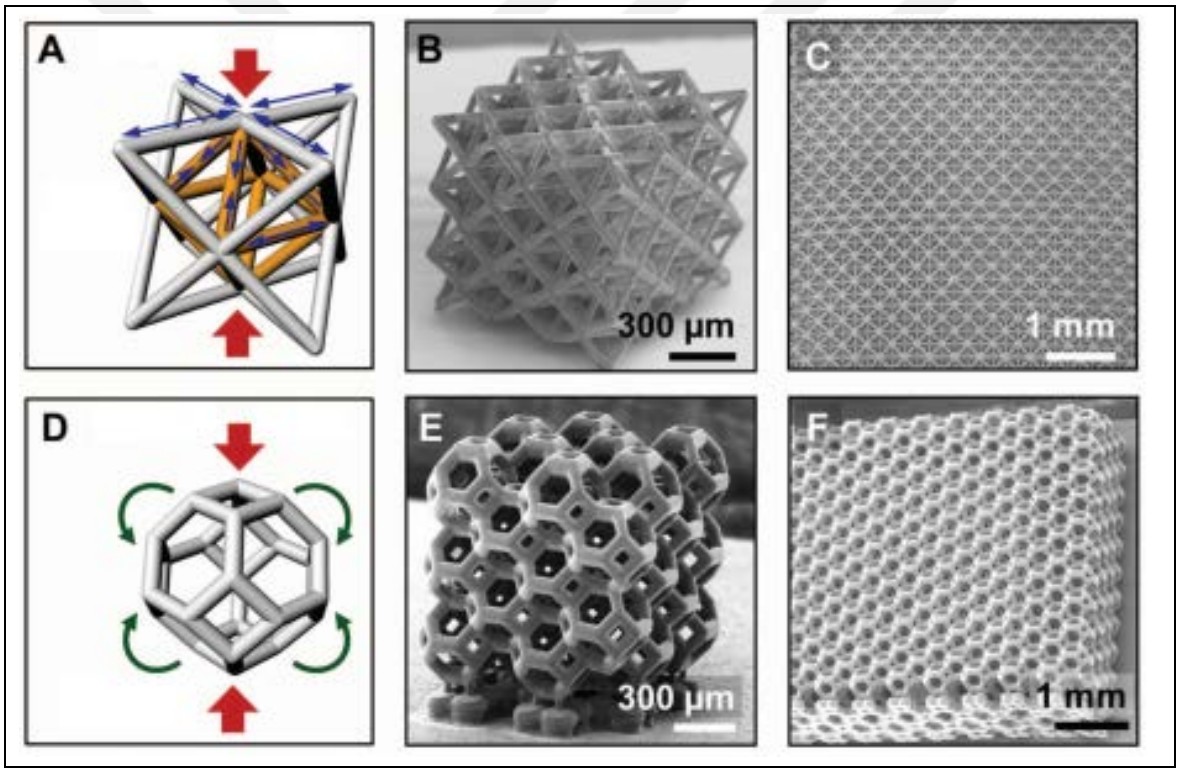
Periyodik gözenekli yapılar periyodik kafes yapıların tekrarıyla oluşurlar. Bal peteği kafes yapılarında kafes topolojisi iki ayrı eksende simetrik olarak tekrar etmesiyle periyodik şekilde oluşturulur. Ayrıca topolojinin üç ayrı eksen boyunca tekrar etmesiyle oluşturulan periyodik kafes yapılar da (ing. TMPS structures) mevcuttur.

Gözenekli yapıları oluşturan kafes yapıların periyodik formda olanları ile ilgili literatürde daha çok çalışma mevcuttur [30] örneğin küp [42-45], truncated küp [46], rhombicuboctahedron [47], rhombic dodecahedron [42, 48-50], tetrakaidecahedrons [51, 52], Weaire – Phelan [53-55] ve elmas [42, 56] çalışmalarda araştırılmıştır. Ayrıca hücresel kafes yapılar olarak gövde merkezli kübik yapı (BCC) [57], düşey sütunlarla gövde merkezli kübik (BCC-Z) [57], dik sütunlarla yönlü merkezli kübik (F2FCC-Z) [58, 59], oktahedral [60] ve Pyramidal [61] ilgili de çalışmalara rastlanılmıştır. Resim 2.2'de sırasıyla d, e, f'de verilen gözenekli yapıları oluşturmak için üç eksende periyodik olarak tekrar eden üç farklı periyodik kafes yapısı olan, giroid, elmas ve pirimitif kafes yapılar a, b, c görsellerinde verilmiştir.



Resim 2.2. Sırasıyla giroid, elmas ve pirimitif (a), (b), (c) kafes yapıların, x, y ve z ekseninde periyodik olarak oluşturdukları gözenekli yapılar (d), (e), (f)

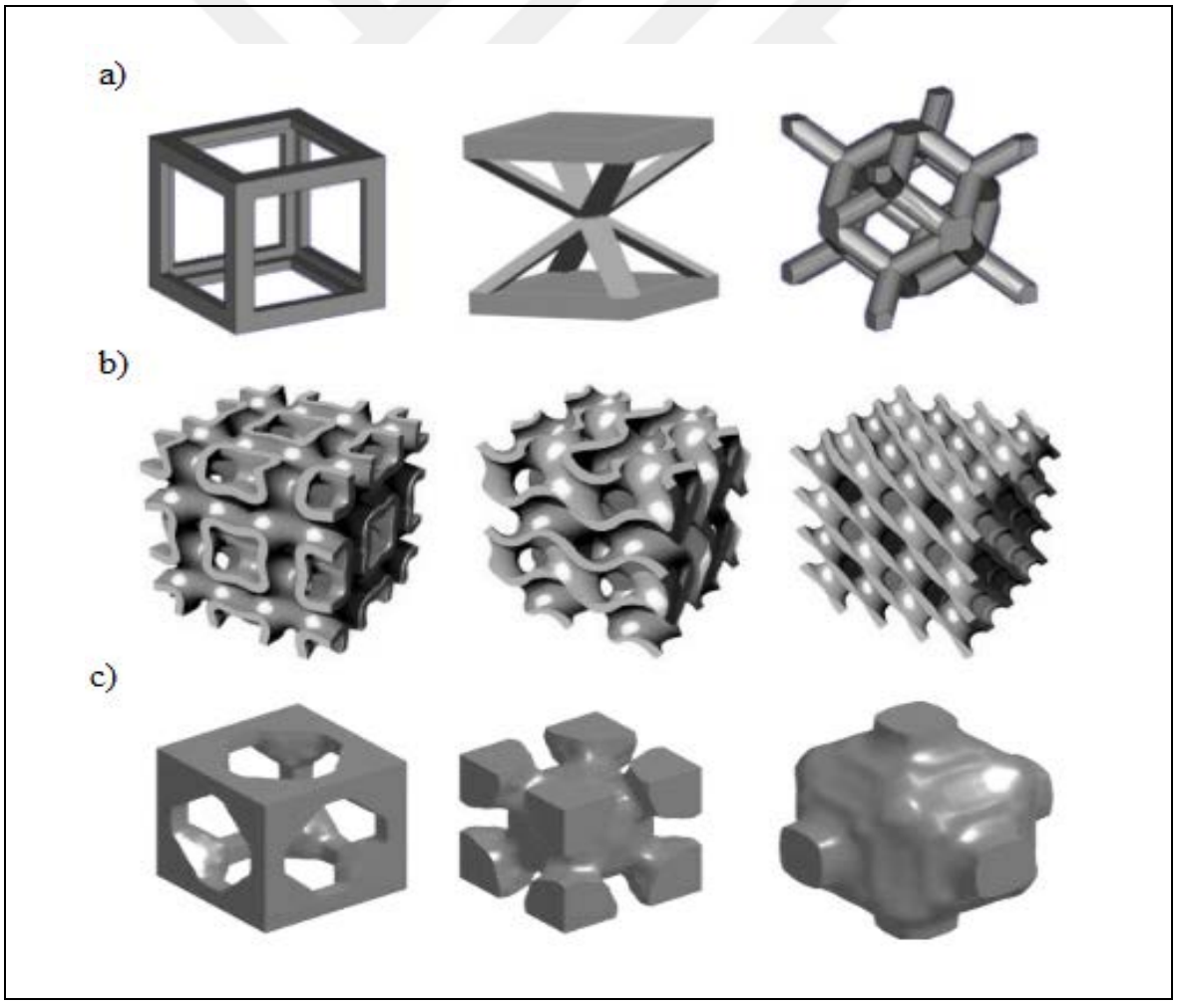
Deformasyon mekanizmasına bağlı kafes yapılar, eğilmeye-baskın yapılar ve gerilmeye-baskın yapılar olarak sınıflandırılabilir. Gerilmeye-baskın kafes yapıların elastik modülü ve başlangıç akma dayanımı, aynı nispi yoğunluğa sahip, eğilme-baskın bir hücresel malzemeden çok daha yüksektir. Bu, gerilmeye-baskın kafes yapıları hafif yapısal uygulamalar için eğilmeye-baskın yapılara göre daha çekici hale getirir. Bununla birlikte, eğilmeye-baskın yapıların aksine, bası yükleri esnasında gerilmeye baskın malzemeler strutların bükülmesinden dolayı ilk deformasyondan sonra mekanik özelliklerde keskin düşüş davranışı gözlemlenir [62]. Resim 2.3'te sırasıyla gerilmeye baskın Octet-truss ve eğilmeye baskın tetrakaidecahedron kafes yapılarının şematize, gerçek ve SEM görüntüleri verilmiştir.



Resim 2.3. A) Octet-truss kafes yapısının basma yüklemesine mekanik tepkisi (B) Octet-truss kafes yapı gözenekli formu (C) Octet-truss kafes yapıların SEM görüntüsü (D) Tetrakaidecahedron kafes yapısının basma yüklemesine mekanik tepkisi (E) Tetrakaidecahedron kafes yapı gözenekli formu (F) Tetrakaidecahedron kafes yapıların SEM görüntüsü

2.2.2. Gözenekli yapıların tasarımı ve üretimi

Gözenekli yapıları amaca uygun olarak üretebilmek için kafes elamanların tasarım ve üretim bakımından tamamen anlaşılması gerekir. Gözenekli yapıların tasarımı için literatürde birçok yöntem vardır bunlar manuel olarak oluşturma ya da doğal yapıların µCT (ing. Micro Computed Tomography) görüntülerinin CAD formatına çevrilmesidir. Gözenekli yapıların tasarımı (a) üretim tekniği, (b) malzeme, (c) kafes geometrisi, (d) kafes yapısının kütük yapıdaki malzemeye göre izafi yoğunluğu ve (e) kafes yapısını oluşturan her strut ve düğümünün maksimum kusur yoğunluğu gibi değişkenler değerlendirilerek yapılır [63]. Gözenekli yapılar tasarlanırken kullanılan kafes elaman tipleri: CAD tabanlı [64], görüntü tabanlı [65], kapalı yüzeyler [66] veya topoloji optimize edilmiş [67] yapılardan oluşur. Şekil 2.13'te temel kafes yapı tipleri gösterilmektedir.



Şekil 2.13. a) CAD tabanlı kafes yapılar [68], b) kapalı yüzey tabanlı kafes yapılar [69], c) topoloji optimize edilmiş kafes yapılar [70]

Gözenekli yapılar geleneksel olarak birçok metotla üretilebilmelerine karşın hızlı, ucuz ve arzulanan malzeme geometrisine yakın nihai şekilde üretilebilmesi nedeniyle toz metalürjisi [71, 72] yöntemi en yaygın kullanılan metottur. Arzulanan gözenek miktarı, şekli ve mekanik özelliklere bağlı olarak iki ayrı toz metalürji metodu, boşluk yapıcı madde kullanımı [73] veya tozdan direkt sinterleme [74], gözenekli metal yapı hazırlamada en çok kullanılan iki metottur.

Bununla birlikte, bu teknikler, gözenek büyüklüğü, geometrisi ve dağılımın sınırlı kontrolünü sağlaması nedeniyle daha çok rastgele organize edilmiş gözenekli yapıların üretilmesinde kullanılmaktadır. Eİ ile gözenekler benzeri görülmemiş tasarım özgürlüğü ve kontrolü ile üretilebilmesiyle istenilen özellikte parçaların tasarımına imkân sağlamaktadır. Eİ süreçleri, önceden tanımlanmış ve özelleştirilmiş parçaların üretilebilmesini ve ayrıca iç hücre geometrisinin doğru kontrolünü sağlayan yöntemleri sunmaktadır [75]. Geleneksel imalat yöntemleri ile Eİ teknolojisi arasındaki bir karşılaştırma Rashed ve ark. [76] tarafından yapılarak Eİ teknolojilerinin, doğrulukları ve hassaslıkları nedeniyle geleneksel yöntemlere göre açıkça daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Toz yataklı birleştirme ve yönlendirilmiş enerji biriktirme yöntemi (DED) gözenekli yapıları üretmek için kullanılan en yaygın Eİ teknolojileridir. Literatür, metalik gözenekli parçaları basabilen iki ana toz yataklı sistem teknolojisi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bunlar EBM ve SLE teknolojileridir. Diğer bir Eİ teknolojisi olan DED, ticari ismiyle lazer gücüyle net şekillendirme (LENS) metalik gözenekli yapıları üretmekte kullanılmaktadır.

SLE ve EBM'de daha doğru geometri ve daha iyi bir hassaslık elde edilir. Bu nedenle, gözenekli yapıları üretmek için en çok kullanılan yöntemlerdir. Öte yandan LENS, birim hücre boyutunu veya şeklini kontrol etme yeteneği olmadığı için düzensiz gözenekli yapıları üretmek için kullanılabilir. LENS ile üretilen düzensiz gözenekli yapılarda, gözenekliliğin lazer gücü ve tarama hızı tarafından kontrol edilmesi ile ilgili çalışmalar mevcuttur [77].

2.2.3. Eİ ile üretilmiş gözenekli yapıların karakterizasyonu

Karakterizasyon boyutsal, mikro yapısal ve mekanik özelliklerin incelenmesini içerir. Literatürde kafes yapı türlerinin gözenekli yapıların karakteristik özelliklerine etkisini belirlemek için birçok çalışma yapılmıştır [57, 78-80]. Gözenekleri oluşturan birim hücrelerin boyutlarının mekanik özelliklere etkisini Chunze, Yan. ve ark. incelemiştir [81]. Maskery ve ark. çalışmasında, BCC örgü yapısından oluşan gözenekli yapıların içerdikleri hücrelerin büyüklüğü ve sayısının mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Yeni bir bulgu olarak; sabit bir izafi yoğunluk ve dolayısıyla parça kütlesi ile daha çok sayıda ve daha küçük hücrelerin ve daha küçük sayılarda ve daha büyük hücreli yapılara göre üstün mekanik özellikler gösterdiğini belirtmişlerdir [82]. Boyutsal karakterizasyon, strut boyutunun, gözenek boyutunun ve gözenek şeklinin değerlendirilmesi ile ilgilidir. Literatürde, optik mikroskoplar, taramalı elektron mikroskopları (SEM) ve µCT gibi, çap / gözeneklilik ölçmek için kullanılan tekniklerdir [41].

Eİ ile üretilen numunelerin en önemli kısıtlamalarından birisi hataya bağlı gözenekliliktir. Bu gözenekler yetersiz ergime, birbirine takip eden tarama çizgileri arasında boşluk oluşması gibi işleme parametrelerine bağlı oluşur ve numunenin mikro yapısını olumsuz etkiler [83]. Mikro yapıyı etkileyen diğer bir faktör de, üretilen parçanın kalınlığına bağlı olan soğuma hızıdır [84]. Algardh ve ark. [85] EBM kullanılarak basılan farklı duvar kalınlıklarındaki gözenekli yapılar için mikro yapıdaki değişimi araştırmışlardır. Duvarın daha ince olduğu durumda, soğuma hızının daha hızlı ve tane yapısının daha ince olduğu belirtmişler. Cheng ve ark. [86] kafes yapıların mikro yapısının deneysel testlerinden elde ettikleri sonuçlara göre, strut kalınlığı azaldıkça sertliğin arttığını belirtmişler.

Gözenekli yapılarının mekanik özellikleri temel olarak üç parametreye bağlıdır, kafes eleman morfolojisi, malzeme ve parçanın izafi yoğunluğu [87]. Genel olarak, morfolojisine göre stokastik (rastgele) ve sıralı (düzenli, birim hücre), olarak iki gruba ayrılan gözenekli yapıların mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediği için dikkate alınması gereken temel bir yönü temsil eder. Stokastik ile stokastik olmayan kafes yapıları arasındaki mekanik özelliklerde fark Cheng ve ark. [86] stokastik olmayan kafes yapılardan oluşan gözenekli numunelerinden daha yüksek özgül mukavemete sahip olduğunu belirtmişlerdir. Li ve ark. [68] biyomedikal uygulamalarda kullanılabilecek gözenekli yapıyı oluşturan farklı kafes yapıların gözenekli yapı üzerindeki mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Mekanik

özelliklerin esas olarak gözenekliliği oluşturan kafes yapıların bükülme ya da gerilmeye yönelik deformasyon mekanizmasına bağlı olduğunu öne sürmüşlerdir. Yánez ve ark. [88] süngerimsi kemik uygulamaları için jiroid kafes yapılarının basma kuvveti etkisi altındaki davranışını incelemişlerdir. Strut açısı, basma özelliklerini etkileyen kritik bir faktör olarak bulunmuştur: Strut açısı azaldıkça, mukavemet ve basma dayanımı artmıştır.

Kafes yapılarının mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılan bir teknik, üretilen numuneler için basma yükü altında test yapmaktır. Xiao ve ark. . [89] elektron ışını ile eritme ile üretilmiş Ti-6Al-4V kafes yapılarının basma özelliklerini test etmiş, Ti-6Al-4V kafes yapısının, aynı gözenekliliğe sahip alüminyum ve paslanmaz çelik kafes yapılarından daha iyi yük taşıma ve enerji emme kapasiteleri sergilediğini göstermiş hatta yüksek sıcaklıklarda daha da avantajlı olduğu belirtilmiştir. Tancogne-Dejean ve ark. [90], SLE yöntemi ile üretilen paslanmaz çelik mikro kafes malzemelerin farklı çekme oranları altında mekanik davranışları ve enerji emme özellikleri üzerine ayrıntılı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Alüminyum ve paslanmaz çelik ile karşılaştırıldığında, titanyum ve alaşımları daha yüksek özgül sertlik / mukavemet ve daha yüksek sıcaklık dayanımına sahiptir, bu da kafes yapıların üretiminde çokça kullanılmasına neden olmuştur.

Ahmadi ve ark. [78] kafes yapı tasarımı ve gözeneklilik oranının değiştirilmesine bağlı farklı izafi yoğunlukta gözenekli yapıların mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Gözeneklilik artışı ile mukavemetin azaldığı bununda ortopedik implant uygulamalarında gerilim kalkanı etkisini azaltmak için arzu edilen bir özellik olduğu kaydedilmiştir. Gözenekli yapıların ortopedik implant formunda gelecekteki kullanımla ilgili olarak, özellikle elastik modülünün insan kemik değerine indirgenmesi (30.5 ± 2 GPa), olası gerinim kalkanı etkisi ve takip ettiği implant doğal kemik arası gevşemenin önüne geçilmesi amaçlanmaktadır [91].

2.3. Geçişli Gözenekli Yapılar

Fonksiyonel geçişli yapılar (FGM, Ing. Functionally Graded Materials) üç farklı gruba ayrılabilir: mikro yapı geçişli, kompozisyon geçişli ve gözenek geçişli [92]. Şekil 2.14'te üç farklı tip fonksiyonel geçişli yapının gösterimi verilmiştir.

- Kompozisyon geçişli yapılar şu şekilde tanımlanabilir: “Farklı özelliklerde fakat tek fonksiyonlu malzemeleri üç boyutlu bir hacim içinde malzemelerin oranlarını dinamik olarak karıştırmayı ve çeşitlendirmeyi amaçlayan ve kompozisyonlarda geçişler yaparak, birden çok fonksiyonelli parça hali [93]
- Gözenek geçişli yapılar yapının hacmi boyunca gözenekliliğini değiştirerek malzemelerde geçişli gözenekli bir yapı oluşturulmasını sağlar. Yoğunluktaki değişim, dolayısıyla mekanik özelliklerdeki değişim, bazı uygulamalar için parçayı homojen gözeneklilikte üretmeye göre daha işlevsel hale getirebilir. Örneğin, implantların düşük gözenekliliğe sahip bölgeleri yüksek mekanik mukavemet sahiptir, yüksek gözenekli bölgeler ise kemik büyümesini destekler ve implantın doku içerisinde sabitlenmesine yardımcı olur [94]
- Mikro yapı geçişli yapılar farklı ısıl işlemlerin kontrollü olarak uygulanması ile, malzeme hacmi boyunca değişen mikro yapılara sahip bir yapı elde edilmesidir. Popovich ve ark. malzemenin mikro yapısına geçiş kazandırarak birden fazla fonksiyonlu parça üretimini incelemişlerdir [95]



Şekil 2.14. Fonksiyonel geçişli yapıların sınıflandırılması, soldaki kompozisyon geçişli yapı [96], ortadaki mikro yapı geçişli yapı [95], sağdaki geçişli gözenekli yapı [97]

Geçişli gözenekli yapılar birim hücre büyüklüğü, şekli, strut çapı ve kafes yapıların parça içerisinde dağılımı değiştirilerek oluşturulur. Özellikleri ve yapıları ile kademeli veya sürekli olarak değişebilen geçişli gözenekli yapılar farklı alanlardan araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Kafes eleman ve geçişli yapı özelliklerini birleştiren geçişli gözenekli materyaller son yıllarda geniş çapta araştırılmıştır [98-101]. Yapılan literatür çalışmalarında, homojen hücresel yapılar tarafından elde edilemeyen birçok gelişmiş özelliğin, geçişli gözenekli yapılar tarafından oluşturulabileceği kanıtlanmıştır [102].

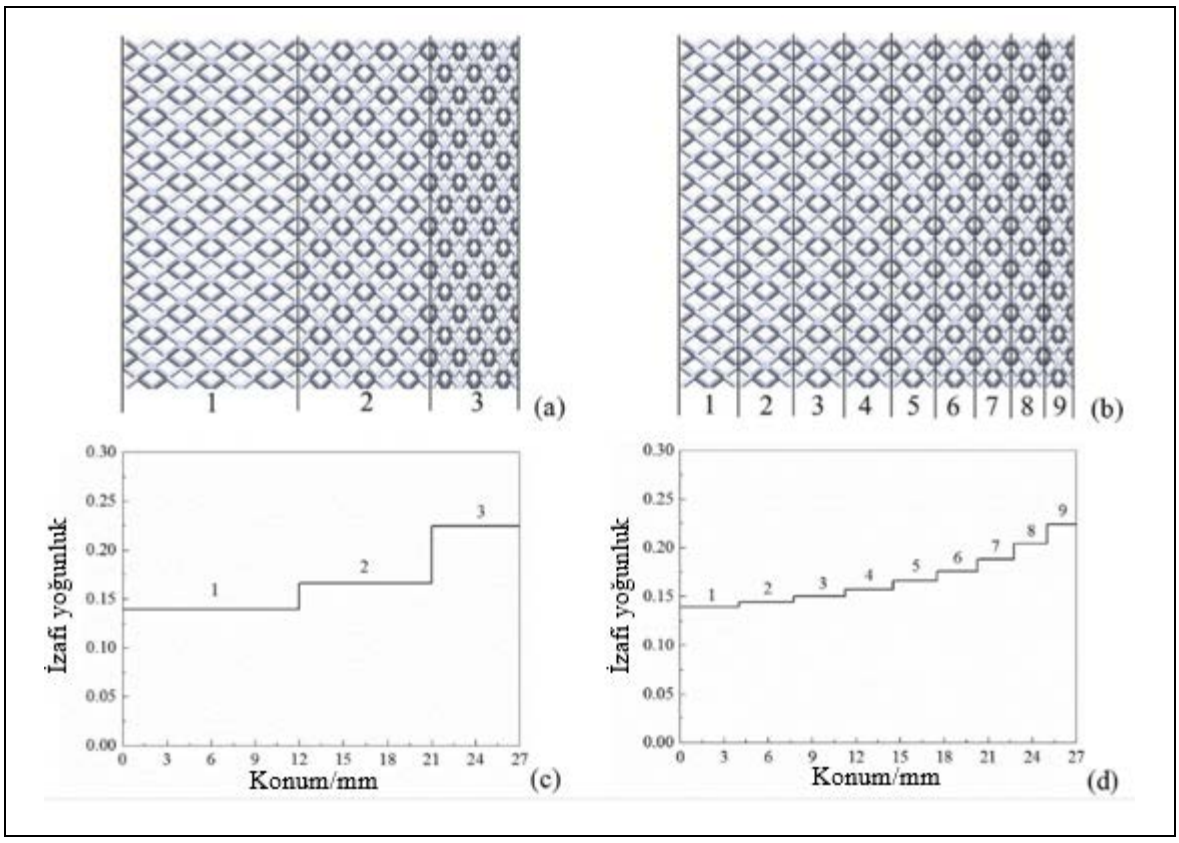
Geçişli gözenekli metalik malzemelerin, statik ve dinamik yükler altında mekanik özellikleri geniş çapta incelenmiştir [62, 103, 104]. GGY malzemelerin en göze çarpan özelliği, mükemmel darbe dayanımı ve enerji emme kapasitelerini sağlayan, gerilim-gerinim eğrilerindeki uzun plato bölgesidir. Zeng ve ark. [100], geçişli gözenekli materyallerin dinamik etkiler altındaki özelliklerini test etmiş ve düşük hız etkisi altında enerji emme kapasitesi üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu ancak, dengede olmayan bir durum ve yüksek hızlarda geçişli gözenek yapısının etkisinin daha yüksek olduğunu belirtmişler. Yüksek hız etkisi altında enerji emiliminin, yoğunluk dağılımının düzenlenmesiyle ayarlanabileceğini belirtmişlerdir. Zhang ve ark. [105], oluklu sandviç panellerin homojen ve geçişli tasarımlarda dinamik tepkisini karşılaştırmış, bu da özellikle düzgün geçiş yapısına sahip tasarımların daha fazla plastik enerjiyi emebileceğini göstermiştir. Bu sonuçlar, gözenekli malzemelerin mekanik özelliklerinin ve enerji emme kapasitelerinin, geçiş kazandırarak arttırılabileceğini kanıtlamaktadır. Ajdari ve ark. [99], geçişli gözenekli 2-D hücresel yapıların mekanik özelliklerini araştırmış ve daha yüksek yoğunluğa sahip geçişli yapıların daha yüksek elastik modül ve akma dayanımı sergilediği sonucuna varmışlardır. Refs'teki araştırma [106, 107], geçişli gözenekli yapıya sahip alüminyum sandviç yapıların tasarım gereksinimlerini karşılarken toplam ağırlığı da azaltabileceğini göstermiştir.

2.3.1. Geçişli gözenekli yapıların tasarımı ve üretimi

GGY tasarımı, gözenekleri oluşturan kafes yapıların tasarımı ile başlayıp yapıya geçişlilik kazandırmakla devam etmektedir. Bilgisayar destekli tasarımlardan veya topoloji optimize edilmiş tasarımlardan oluşturulan kafes yapılar birleştirilerek gözenekli yapı oluşturulur. Gözenekli yapı tasarımının temel değişkenleri; hücre büyüklüğü, kafes yapı şekli, strut kalınlıkları ve kafes yapıların malzeme içerisinde dağılımı farklı amaç ve gereksinimlere göre değiştirilip ya da sabit tutularak geçişli gözenekli yapı elde edilir [108].

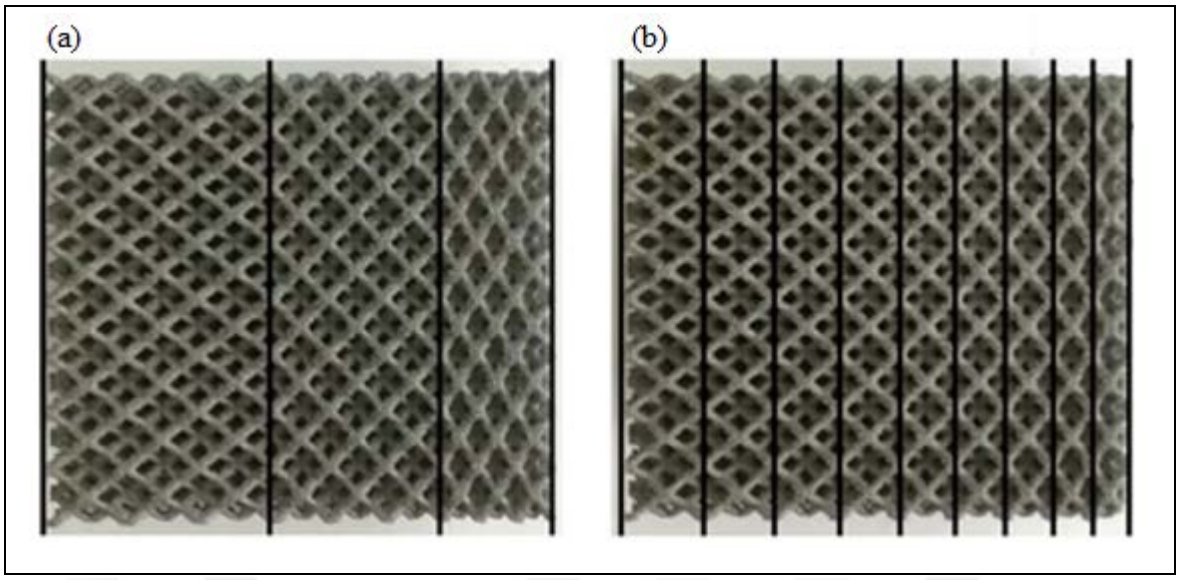
Geçişli gözenekli yapılar basamaklı ve düzgün devamlı şeklinde olmak üzere iki farklı tasarımda oluşturulabilir. Basamaklı ve düzgün devamlı GGY'lerın CAD model örnek tasarımları ve yoğunluk oranları Şekil 2.15'te verilmiştir. Ayrıca GGY'lerde hem basamaklı hem düzgün devamlı yapı için geçiş verilen yönün etkisi de tasarımsal olarak önemli bir kriterdir. Li ve ark. bal peteği benzeri bir mimari ile implant hazırlamış ve tepeden aşağıya doğru ve merkezden dışarıya doğru kademeli bir yapıya sahip GGY imal etmişlerdir.

GGY'ler mekanik özellikleri ile kemiklerinkiyle eşleştirebildiği için ortopedik uygulamalar için iyi bir aday olduğunu ortaya koyulmuştur [109].



Şekil 2.15. Farklı izafi yoğunluk oranlarında Ti-6Al-4V alaşımından gözenekli yapı tasarımı: a) basamaklı şekilde oluşturulan geçişli gözenekli yapı; b) devamlı şekilde oluşturulan geçişli gözenekli yapı; c) ve d) tasarımların izafi yoğunluk oranları [102]

Maskery ve ark. SLE ile üretilen geçişli gözenekli ve homojen gözenekli AlSi10Mg yapılarının mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Geçişli ve homojen gözenekli yapıların, tam sıkışmadan önce hemen hemen aynı miktarda enerji emdiklerini bulmuşlardır [110]. Dinamik ve statik yükler altında gözenekli yapılara basamak geçişi ve sürekli geçiş kazandırılmasına karşılık nasıl davranış sergileyeceğini incelemek için Lijun ve ark. [102] SLE ile ürettikleri Resim 2.4'de görseli verilen numuneleri test etmişlerdir.



Resim 2.4. SLE yöntemi ile Ti-6Al-4V malzemesinden (a) basamaklı ve (b) düzgün devamlı, geçişli gözenekli yapıda üretilen numunelere örnekler [102]

Önceki bölüm 2.4.2'de gözenekli parçaların üretilmesi için birçok yöntem tanıtıldı. Bunlar arasında geleneksel yöntemlerle üretimde en sık görülenler toz sinterlemesi, köpük ajanların kullanılması veya sünger replikasyonudur [111, 112]. Bu yöntemlerin ortak özelliği homojen gözenek oluşturmak için kullanılabilir olması ve gözeneklerin şekli ve boyutu üzerinde sınırlı bir kontrole sahip olmasıdır. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak, Eİ gözenek büyüklüğü, şekli ve gözenek dağılımı üzerinde çok iyi kontrol sağlar [113]. Ayrıca Eİ, gözenekli yapıların kullanımının gün geçtikçe arttığı biyomedikal mühendisliğinde, hasarlı parça anatomisine uygun karmaşık şekillerin özelleştirilmiş parçalarını üretme yeteneğine sahiptir. Bu tür karmaşık yapıların üretilmesi, son zamanlarda eklemeli üretimdeki gelişmeler ile mümkün hale gelmiştir.

Gözenekli yapıları üretmek için kullanılan iki yaygın Eİ teknolojisi, toz yataklı eritme ve yönlendirilmiş enerji kaynağı teknolojileridir. Genelde yönlendirilmiş enerji tekniği kullanıldığında gözenek şekli, boyutu ve dağılımını kontrol etmek sınırlı yeteneğe sahiptir [114]. Farklı olarak, SLE ve EBM gibi toz yataklı sistemlerin kullanımı, boyut ve dağılımda belirli bir tasarım kuralını izleyen hassas bir şekilde kontrol edilen gözenekleri üretmeyi imkân kılar [115]. Literatürde birçok Eİ ile üretilen GGY örnekleri vardır. Eİ teknolojilerinden biri olan SLE, neredeyse tam geometrik özgürlüğüne sahip net şekilli geçişli gözenekli yapıları üretebilmektedir [116].

Geçişli gözenekli yapıları üretmede Eİ teknolojilerinin kullanımı ile ilgili olarak, araştırmacılar EBM teknolojisinin kullanımını da incelemişlerdir. Van Grunsven ve ark. ve Li ve ark. EBM yöntemiyle Ti-6Al-4V GGY'ler üretmiş ve mukavemet ve enerji emilimi gibi basma özelliklerini karakterize etmişlerdir [117, 118].

2.3.2. Eİ ile üretilmiş geçişli gözenekli yapıların karakterizasyonu

Bölüm 2.2.3' deki çalışmalar sadece tek tip yoğunluk dağılımı olan gözenekli yapılar için yapılmıştır. Eİ ile üretilen geçişli gözenekli malzemeler üzerine ilk araştırmalar, Li ve ark. ve Nune ve ark.'nın üretilen parçaların gerilim-gerinim özelliklerinin tespit edilmesi üzerine yapılmıştır [118, 119]. Michaela ve ark. tarafından Ti-6Al-4V tozundan SLE ile üretilen geçişli gözenekli yapılar mikro yapı, gözeneklilik ve özellikle mekanik olarak basma ve çekme yükleri altında kapsamlıca incelenmiştir. Yapılan incelemede sıcak hadde ile üretilen referans malzeme ile karşılaştırılan geçişli gözenekli yapılar ısıl işlem uygulanmasından sonra referans malzeme ile kıyaslanabilir mikro yapıya sahip olduğu belirtilmiştir [91]. GGY'ler, patlama ve darbe yükleri altında enerji emici olarak uygulamada ümit vaat eden bir potansiyele sahip olduklarından, dinamik yükler altındaki davranışları hakkında bilgi sahibi olmak oldukça önemlidir. Ancak, Eİ ile üretilmiş geçişli gözenekli malzemelerin dinamik gerilim-gerinim ilişkisine ilişkin deneysel çalışmalar halen sınırlı sayıdadır.

GGY'leri mekanik olarak doğru şekilde karakterize etmek için mekanik özelliklere etki eden faktörlerin iyi bilinmesi gerekir. Bu yapıların mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden birisi yapı içerisindeki gözeneklilik miktarıdır. Gözenekliliğin artması ve azalması ile yapının mekanik özellikleri önemli ölçüde değişmektedir. Bu değişimi yapı içerisinde bölgesel olarak mukavemet istenen yerlerde az gözenek hafiflik istenen yerlerde daha yoğun gözenek oluşturarak çok fonksiyonlu yapıların tasarımı gerçekleştirilebilmektedir. Tıbbi implant tasarımlarında doğal kemiğin mekanik özelliklerini taklit etmek için implant içerisinde farklı gözeneklilikte yapı tasarımı çalışılmıştır [91]. Ayrıca, mekanik özellikleri etkileyen sadece gözeneklilik değil, aynı zamanda gözenekli yapıların topolojik tasarımıdır. Kafes eleman tipinin mekanik etkisini inceleyen çalışmalar literatürde mevcuttur. Statik ve yorulma yükleri altında yapılan testlerle geçişli gözenekli yapıların kafes yapılara bağlı mekanik özelliklerini karakterize eden bulgulara varılmıştır [68, 78, 120, 121]. GGY'lerin mekanik performansları, gözenekleri oluşturan birim hücrelerin içindeki strutların açıları yönleri ve lokasyonları ile de karakterizedir. Örneğin,

küp, elmas ve kesilmiş kübiktahedron arasında, kübik birim hücrelerden oluşan yapı en iyi statik performansı ve en uzun yorulma ömrünü vermiştir. Küp hücresi için, strutların yönünde yük, sadece basma gerilmelerini oluşturur. Farklı açılarda oluşturulan strutlar bulunan diğer hücrelerde, basma gerilmesine ek olarak bükülme etkilerinden kaynaklanan çekme gerilmeleri oluştuğundan, mekanik performans olumsuz yönde etkilenmiştir [121]. GGY'lerin mekanik özelliklerine etki eden diğer faktörler ise üretim tekniği ve sürecidir.

2.4. Literatürdeki Benzer Çalışmalar ve Katkılar

GGY'lerin özelliklerini oluştuğu kafes elemanın özellikleri, kafes elemanların gözenekli yapı içerisinde ki boyutu ve dizilimi belirler. Burada yapıyı oluşturan kafes elemanların şekli en önemli etkendir. Kafes yapı seçimine ek olarak, kafes yapıyı karakterize eden iki tane özellik, mekanik performansının belirlenmesinde önemlidir; kafes yapıda ki strut çapı ve birim hücrenin büyüklüğü.

Kayacan ve ark. yaptıkları çalışmada ise aynı yapı içerisinde farklı kafes yapı tipleri kullanılarak tasarımlar yapmış ve üretilen tasarımların mekanik özelliklerini incelemişlerdir [122]. Gözenekli yapılarla ilgili yapılan çalışmalarda genellikle gözeneklere geçişi sağlayan değişkenler üzerinde durulmuş ayrıca bu çalışmalarda, gözeneklilikte geçişin sadece tek yönde olduğu durumlar incelenmiştir [2, 9, 102, 108, 123-125]. Fakat doğal yapılar incelendiğinde gözenekliliğin tek yön yerine hacimsel olarak değiştiği görülmektedir. Buna ek olarak, tasarlanan geçişin yönüne nasıl karar verileceği, geçişin kazandırıldığı yönün etkisi ve gerçekten gözenekli yapılarda geçiş kullanmanın avantajları olup olmadığı ile ilgili literatürde yeterince çalışmaya yer verilmediği görülmüştür. Ayrıca geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmesi mümkün olmayan GGY'lerin Eİ yöntemiyle üretilebilirliği ile ilgili temel düzeyde çalışmalar mevcuttur.

Tasarımı yapılan parçanın mikro boyutta elemanlardan oluşması nedeniyle üretim esnasında özelliklerini etkileyen tarama hızı, giriş enerjisi ve tarama stratejisi gibi birçok parametre vardır. SLE gibi aynı süreçte bile, farklı parametreler pürüzlülüğü, mikro yapıyı, strut çapını ve yapının diğer özelliklerini etkileyebilir. Bu parametrelerin etkisi literatürde henüz yeterince belirtilmemiştir. İşleme sırasında işleme yapılan katmana verilen ısı girdisi bir önceki katmana da ısı transferi yapacağından işleme süreci boyunca her bir alt katman kendinden sonraki katmanın işlenmesi esnasından ısıl işleme tabi olacak ve bu tüm üretim

süreci boyunca tekrarlı olarak devam edecek. Burada alt katmana etkiyen sıcaklık artışının miktarını belirleyen birçok parametre olabilir bunlar; üretim haznesinin sıcaklığı, kafes elaman yapısının şekli, enerji girdisi, tarama hızı ve stratejisi gibi. Bu parametrelerin etkisini kapsamlıca inceleyen çalışmaların olmaması hedeflenen strut çapında olası değişiklikler, yapı içerisinde oluşabilecek mikro ve makro boyutta hatalar yapının fiziksel ve mekanik özelliklerine değiştirecektir. Analiz programları ile henüz Eİ'e özgü üretim değişkenlerinin verilemeyeceğinden tasarımın özelliklerini doğru şekilde analiz programları ile simüle edilemeyeceği düşünüldüğü için tasarımların direkt üretilip numuneleri mekanik ve metalografik testlere sokarak elde edilen sonuçlardan yorum yapmanın daha doğru olabileceğine karar verilmiştir.

Bu tez çalışmasında daha önce literatürde çok fazla çalışma yapılmamış olan gözenekli yapının temel elemanı birim hücrelerin strut çaplarının kademeli olarak değiştirilmesi ile geçişli gözenekli yapı tasarımı, tasarımın üretilebilirliği, mekanik ve metalografik incelemesi yapılmıştır.

Çalışmanın çıktıları olarak Eİ teknolojisine yönelik doğadan ve nümerik analizlerden esinlenerek tasarlanan gözenekli yapıların üretilebilirliği, üretilen numunelerin CAD bilgisiyle doğrulanması, fiziksel ve mekanik testlerle homojen ve geçişli formdaki gözenekli yapıların karşılaştırılması, GGY'lerde geçiş yönünün parçanın mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenecektir. Eİ ile üretilen gözenekli yapıların nasıl ve hangi yöntemlerle karakterize edileceği belirlenecektir. Elde edilen sonuçlardan ayrıca hangi tasarımın ağırlık hafifletme ve mukavemet için uygun olduğu belirlenecektir. Elde edilen bulgular ile havacılık, savunma, otomotiv, medikal gibi alanlarda gittikçe kullanımı artan gözenekli yapıların daha verimli ve etkin kullanılacağı düşünülmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu bölümde tasarımları yapılan numunelerin Eİ teknolojisi ile üretimi için kullanılan toz, numunelerin mekanik ve metalografik özelliklerinin incelenmesi adına çalışmada kullanılan üretim tezgâhı, test cihazları ve diğer sistemler anlatılmıştır. Ayrıca tasarımların nasıl yapılacağı hakkında yöntem bilgisi de bu bölümde sunulacaktır.

3.1.1. Üretimde kullanılan Ti-6Al-4V metal toz malzeme

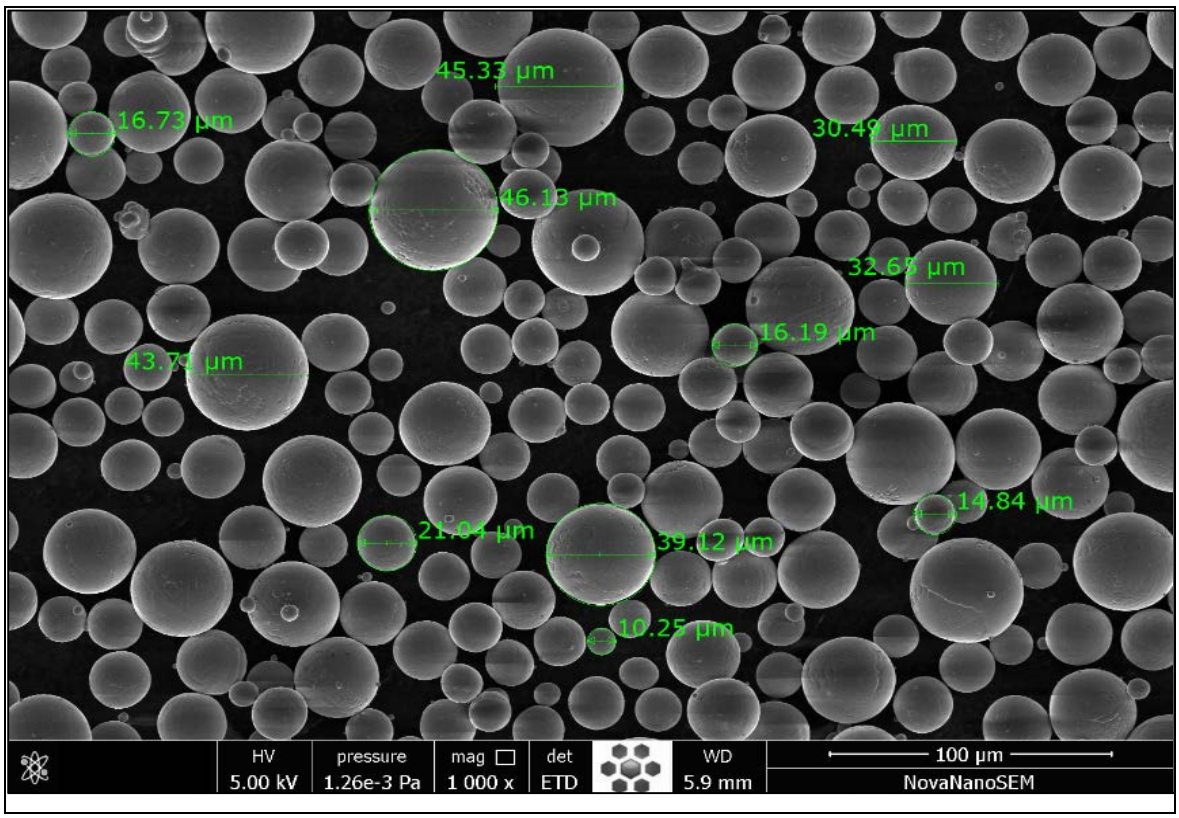
Üretim için seçilen toz, çalışma sonuçlarının birçok alana hitap edecek şekilde planlanması; implant, filtre, ısı eşanjörü, uzay ve havacılık gibi parçalara uygunluğu düşünülerek düşük yoğunluk, yüksek dayanım, üstün korozyon özellikleri ve yüksek yorulma dayanımı gibi özelliklere sahip olması göz önünde bulundurularak seçilmiştir.

Ti-6Al-4V (ASTM B348, grade 5 standartlarında) AP&C (GE Additive, Kanada) tarafından tedarik edilen toz ile numuneler üretilmiştir. Kullanılan ortalama toz boyutu 15-45 µm, aralığında olup plazma atomizasyon yöntemiyle üretilmiştir. Kullanılan toz, üretim sırasında iyi bir akışkanlık sağlaması için dar bir parçacık boyutu dağılımına ve neredeyse küresel bir şekle sahiptir. Çünkü başlangıçtaki toz kalitesi, parçacık büyüklüğü ve partiküllerin boyutsal dağılımı nihai ürün kalitesini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Eşit boyut dağılımına sahip olmayan tozlar örneğin 70 µm'ye ulaşan 10 µm'den daha küçük tozlarla uydulaşarak küreselliğini kaybeder. Kullanılan Ti-6Al-4V toza ait özellikler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Ti-6Al-4V metal tozu özellikleri

Ti6Al4V (15-45 µm) Metal Tozu Özellikleri	
Sınıf	Grade 5
Görünür Yoğunluk	2.5 g/cm^3
Partikül boyut Dağılımı	
- D10	20 µm
- D50	33 µm
- D90	44 µm
Akışkanlık	
- Hall Akış Testi	30s
- Carney Akış Testi	10s

Çalışmada kullanılan toza ait taramalı elektron mikroskopu ile alınan görüntü Resim 3.1'de verilmiştir. Ayrıca kullanılan tozla ilgili daha detaylı bilgi Ek-1'de verilmiştir.



Resim 3.1. Ti-6Al-4V (15-45 µm) metal tozunun taramalı elektron mikroskopu görüntüsü

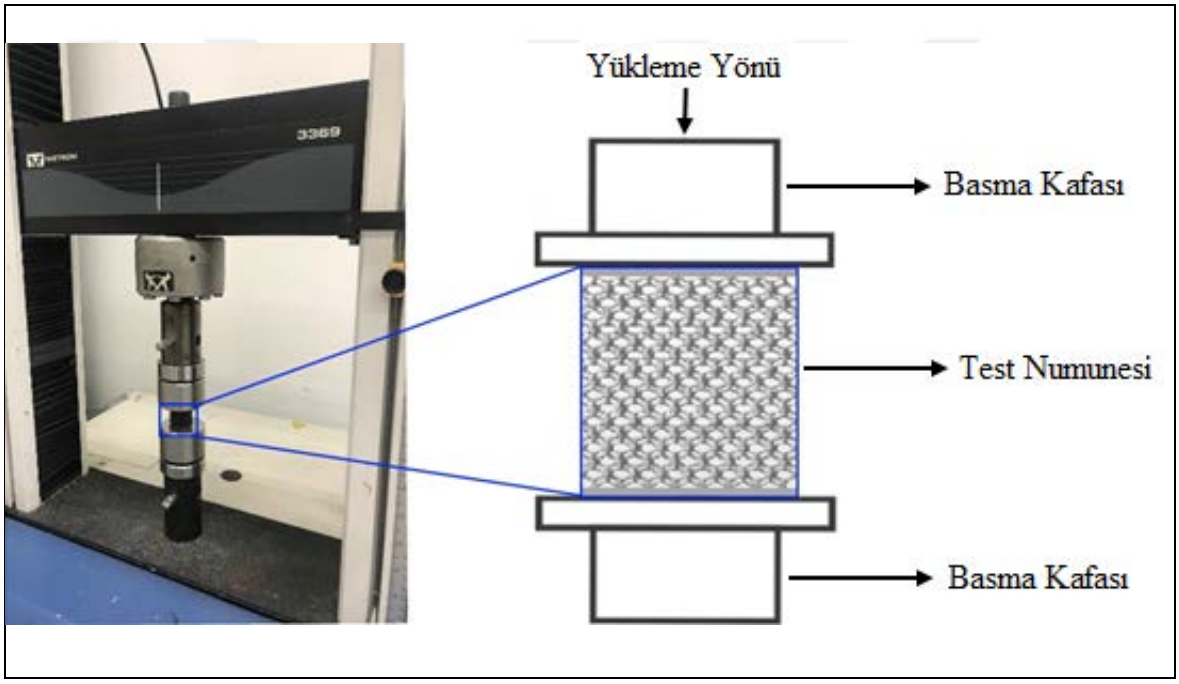
3.1.2. Cihazlar ve sistemler

Seçici lazer eritme cihazı

Gözenekli yapıda tasarlanan test numuneleri, SLE teknolojisi kullanılarak Ermaksan Enavision eklemeli imalat cihazında üretildi. SLE cihazına ait görsel ve teknik bilgiler Ek-2 de verilmiştir. Üretilen numunelerin boyutsal doğruluğu, yüzey pürüzlülüğü gibi özellikleri, delaminasyon ve çarpılma gibi hataları, kullanılan üretim teknolojisine bağlı işleme parametrelerinden etkilenmektedir. İşleme parametrelerinin doğru seçimi bu özelliklerin parça üzerindeki mekanik etkilerini optimize etmekte çok önemlidir. Ayrıca üretim için doğru tarama stratejisini belirlemek numunelerin mekanik özelliklerinin yönden bağımsız bir şekilde, izotropik olarak üretilmesi için çok önemlidir. Tarama, numune üzerinde oksidasyon ve kirliliğin önüne geçmek için üretim haznesinde yüksek saflıkta argon ile dolu bir atmosferde gerçekleştirilmiştir.

Basma test deney cihazı

Basma testleri, Resim 3.2'de gösterilen Instron 3369 üniversal test makinesi ile gerçekleştirildi. Numuneler, iki tane sertleştirilmiş çelik dairesel plaka arasına yerleştirilir. Test sırasında oluşturulan bilgi bilgisayar ile program ara yüzüne aktarılır. Her test sonucunda program ara yüzünde basma yüküne karşılık yer değiştirme eğrisi ve 0.1 saniyelik hızda elde edilen yükleme ve yer değiştirme bilgisi alınır. Yükleme kuvveti F, ölçülür birde plakanın yer değiştirmesi, plakaya bağlı fotoelektrik enkoder tarafından yüksek hassasiyetle ölçülür ve plakanın yer değiştirmesi hesaplanır.



Resim 3.2. Basma testlerinin yapıldığı Instron universal test makinesi (model 3369)

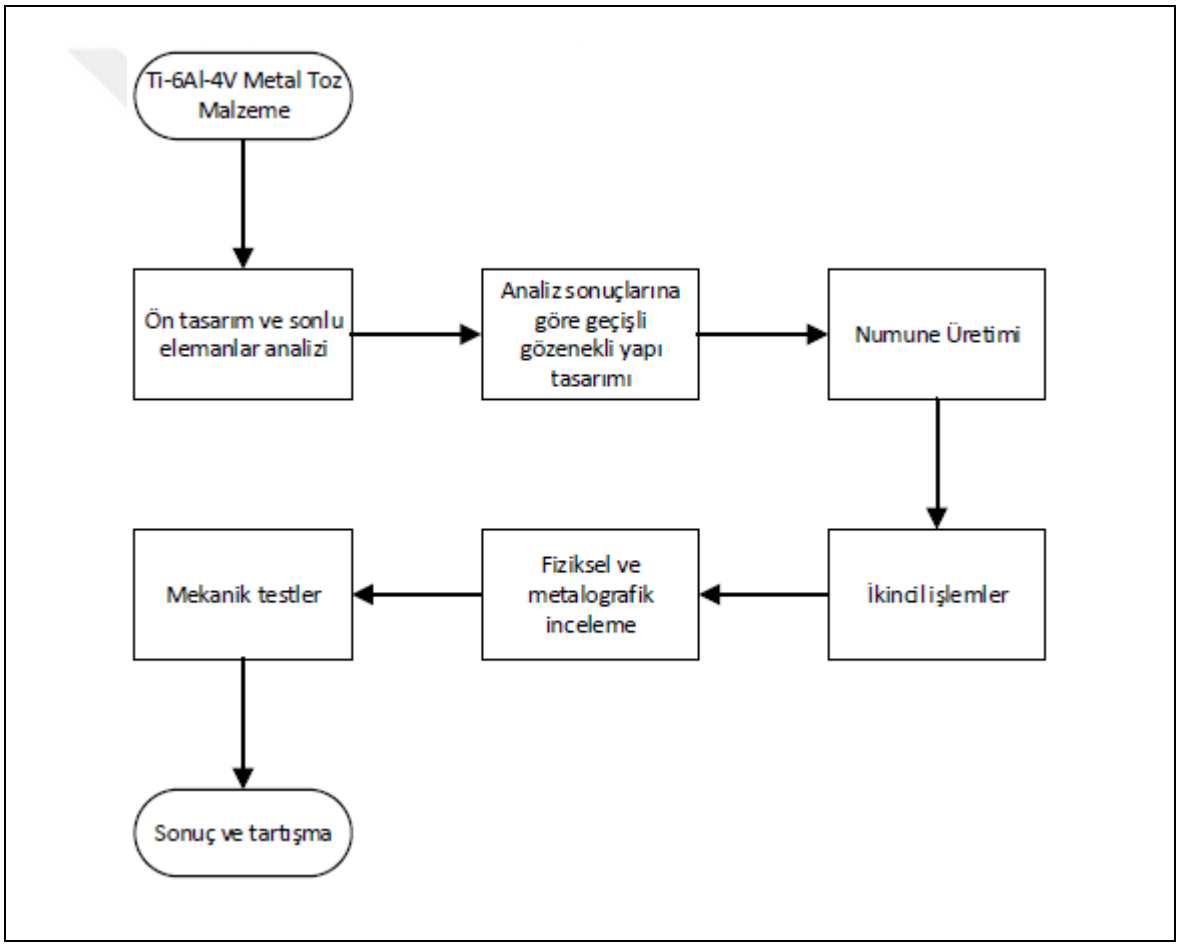
Taramalı elektron mikroskopu

Hazırlanan numune örneklerinin mikro topolojisi ve yüzey morfolojisi ve basma testi sonucu deformasyon mekanizması (SEM, JEOL JSM-6060, Japonya) taramalı elektron mikroskopu ile taranarak incelenir. Mikroskopun görseli ve teknik özellikleri Ek-3'de ayrıca verilmiştir. Ayrıca, Ti-6Al-4V numunelerin kimyasal bileşimin incelemesi de EDS (enerji dağılım spektroskopisi) analizi ile yapılır. EDS, üretim şartlarına bağlı oluşabilecek kompozisyon farklılıklarını karşılaştırmak için yapılır. Vaithilingam ve ark.'nın çalışmasında muhtemel kirleticilerden dolayı numunelerin yüzeyinde daha yüksek karbon ve azot konsantrasyonu olduğu gözlenmiştir [126]. Numune yüzeyinde yapılacak EDS analizinde yüzey

kirleticilerinden kaynaklı analiz sonuçlarının kimyasal bileşimin doğrulanmasında yanlış sonuçlar verebileceğinden strutların iç kesit yüzeyinde analiz yapılır. Bu şekilde temel alaşım elementleri doğru bir şekilde analiz edilmiş olur.

3.2. Yöntem

Bu bölümde tez çalışmasında yapılan tasarım, analiz, üretim ve gerekli test çalışmaları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Tez çalışmasında yapılan işler yapılma sırası ile akış şeması olarak Şekil 3.1'de verilmiştir.

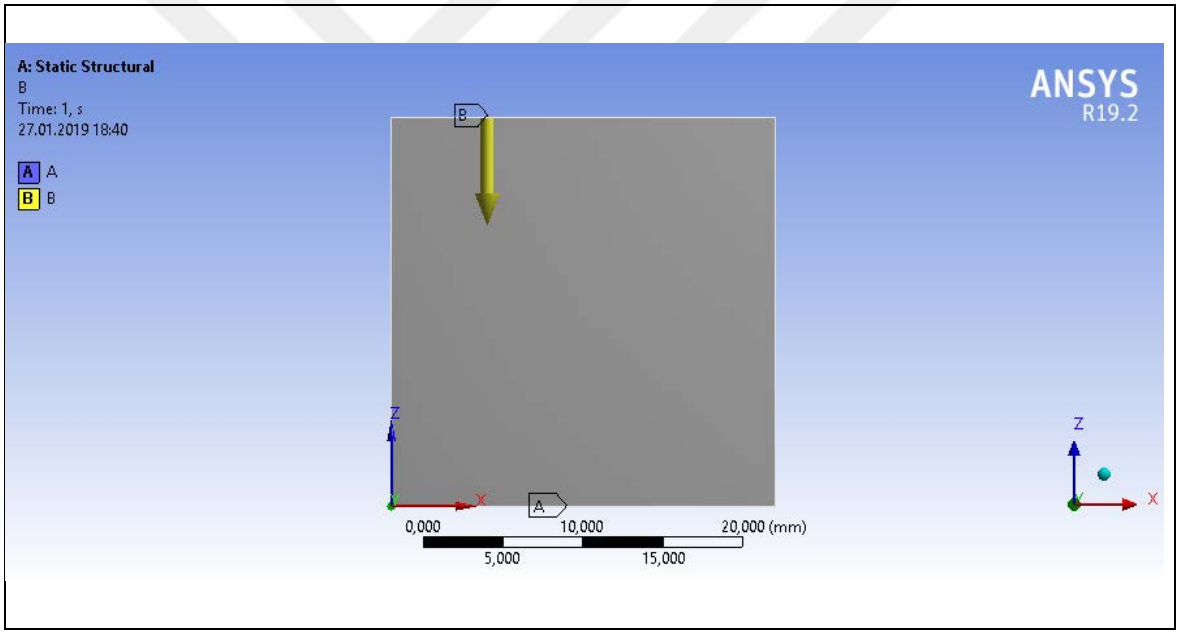


Şekil 3.1. Tez çalışması akış şeması

3.2.1. Ön tasarım ve sonlu elemanlar analizi

Bu çalışmasının amacı homojen ve geçişli gözenekli yapıların fiziksel ve mekanik etiklerini ölçmek olduğu için gözenekli yapı tasarımı çalışmanın bel kemiğini oluşturmaktadır. Doğadaki gözenekli yapılar incelendiğinde genelde homojen bir gözenek dağılımından

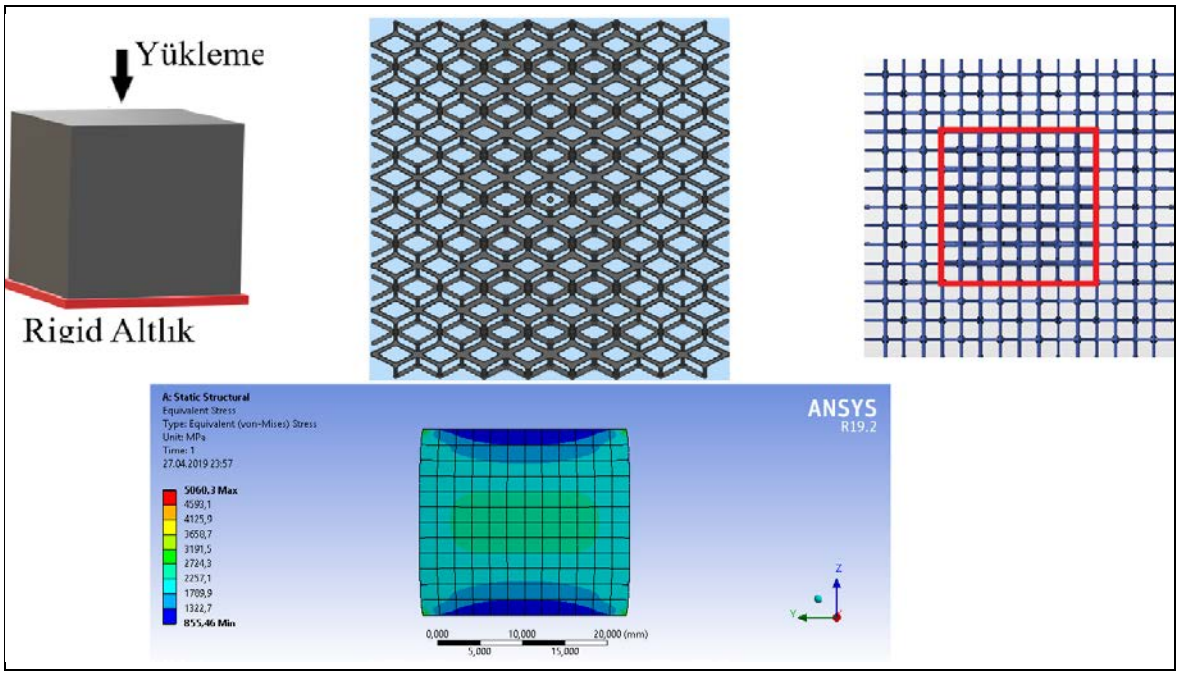
ziyada geçişli bir yapının olduğu gözlendi. Bu nedenle homojen gözenek dağılımına ek geçişli gözenekli yapı tasarımı da çalışma içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bir başka araştırma sorusu ise geçişin ne şekilde verileceğiydi içten dışa, dışta içe veya daha farklı. Biz çalışmamızda, doğada genelde içten dışa veya dıştan içe bir değişim olduğunu gözlemledik ve bunun mekanik bir nedeni olup olmadığını incelemek için katı bir yapının bası yükü altında ki mekanik özelliklerine bakarak tasarımlarımıza yön verdik. Eİ ile üretilecek numunelerin katı hali ANSYS® sonlu elemanlar programında analiz edildi. Analizde Resim 3.3'te gösterilen model kullanılmıştır. Modelde Eİ ile üretilecek numunelerde kullanılacak toz malzemesinin mekanik özellikleri kullanılmıştır. Modelleme de sınır koşulları olarak tasarımın alt kısmı A noktasında bütün yönlerde sabitlendi. Tasarımın üst kısmına B noktasına ise –z yönü doğrultusun da 0.5 mm yer değiştirme koşulu uygulandı.



Resim 3.3. Katı modele uygulanan sınır koşulları

Analiz sonucu verileri değerlendirildiğinde parçanın iç kısımlarında dış ya da kabuk olarak adlandıracağımız kısma göre daha yüksek oranda gerilim oluştuğu gözlendi. Recep, G. ve ark. yaptıkları çalışmada bası yükleri altında gözenekli yapıların deformasyon davranışı için yaptıkları yorum şu şekildedir ‘‘belli bir bası miktarından sonra tüm hücre boyutları için kafes bloğunun merkezinde deformasyon lokalleşmesi oluşmaktadır bu lokalleşmenin nedeni ve malzemenin mekanik davranışlarına etkisi tam olarak bilinememekle birlikte, bu durumun kafes blok ile bası levhaları arasındaki sürtünme ve kafes içindeki yapısal kusurların etkileri sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir’’. Bu literatür çalışması katı model

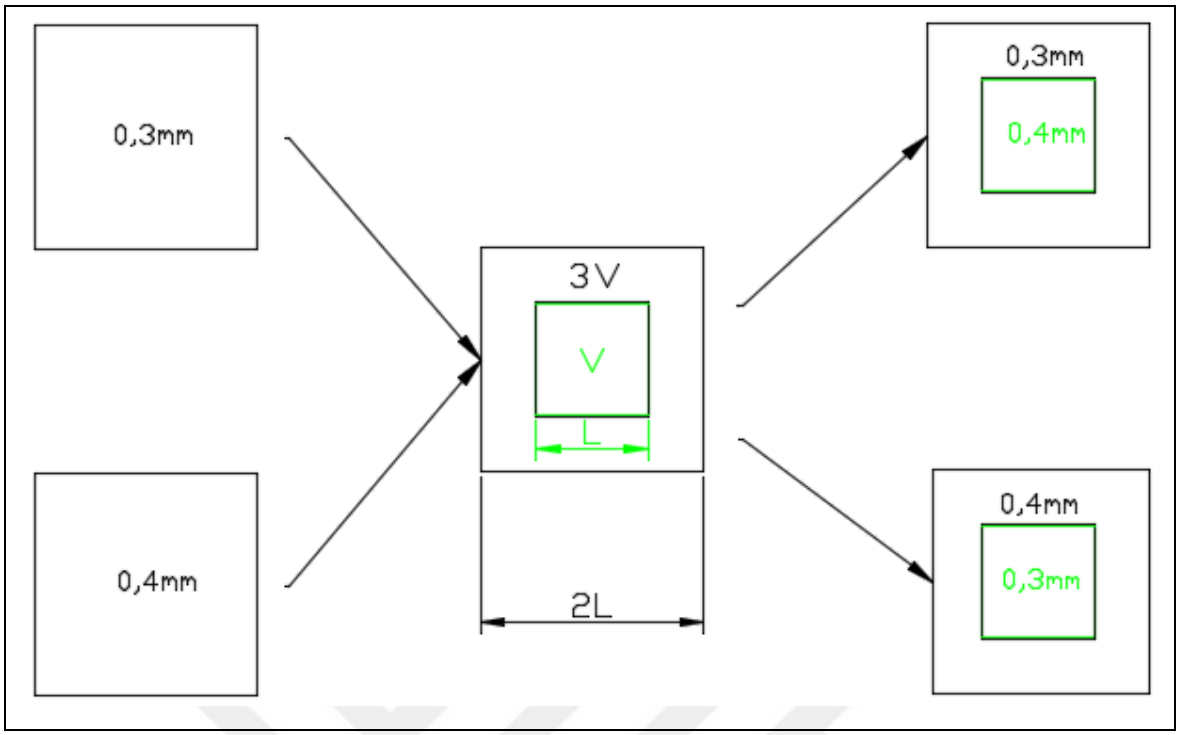
analizimizi ve yapacağımız konsept model çalışmasını doğrular niteliktedir. Topoloji optimizasyon mantığına göre Resim 3.4'te gösterildiği gibi iç kısımların dış kabuk kısmına göre daha yoğun olduğu bir konsept model geliştirildi. Bundan bir sonra ki çalışma sonlu elemanlar programından alınan sonuçlarla topoloji optimizasyon mantığına göre yapılan tasarımın üretiminin gerçekleştirilmesi ve deneysel olarak test edilip sonucun değerlendirilmesi ve burada ki alınan analiz sonuçları ile karşılaştırılması oldu.



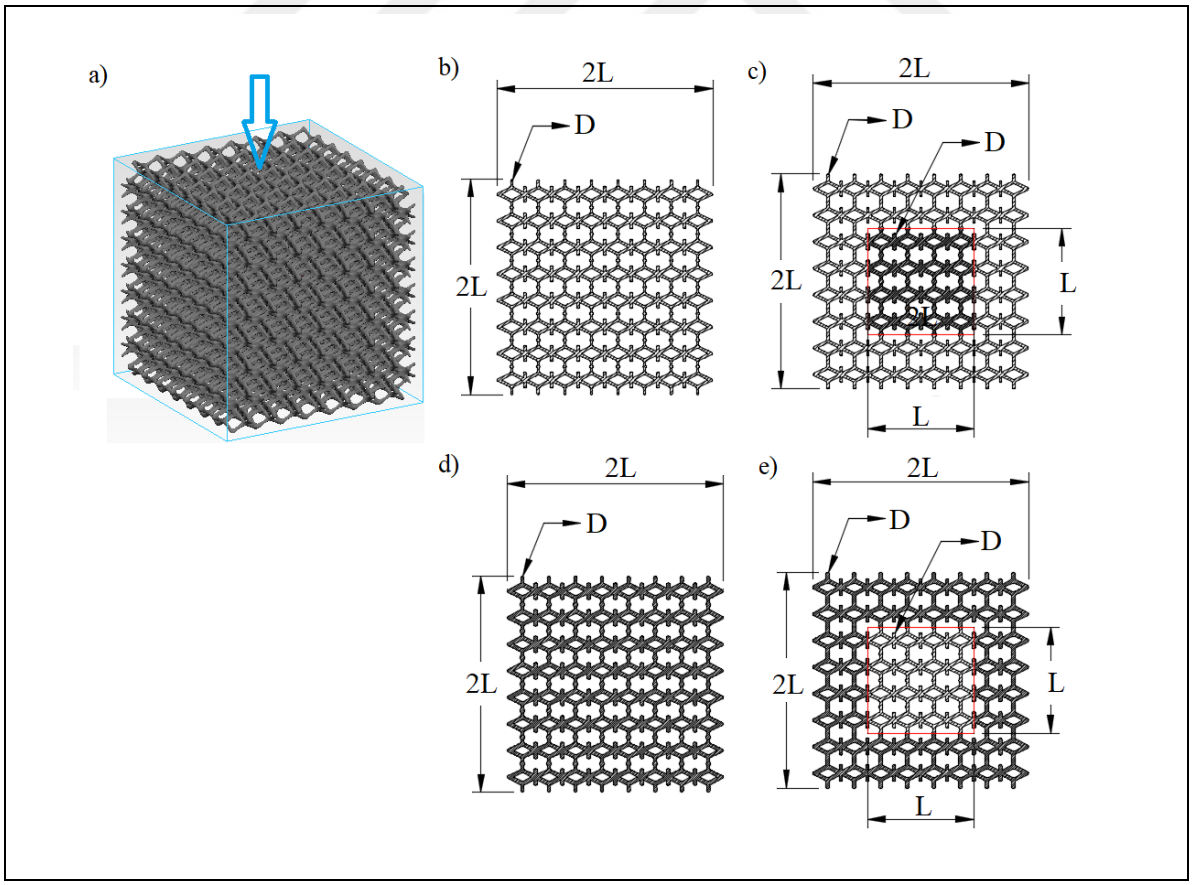
Resim 3.4. FEM analiz sonucunun geçişli gözenekli yapıya uyarlaması

3.2.2. Tasarım

Gözenekli yapılar için tek tip kafes eleman, rhombik dodechedron (Resim 3.7) kafes yapısı kullanılmıştır. Homojen yapıda tasarlanan gözenekli yapılara ek belirli hedefler gözetilerek gözeneklere kademeli olarak geçiş kazandırıldığı tasarımlar yapılmıştır. Yapılan tasarımların gözenek geçişi kademeli olarak strut çapının belirli hacimde değiştirilmesi ile verilmiştir ve birim hücre boyları sabit tutulmuştur. Strut çap değişiminin hacimsel dağılımı Resim 3.5'te gösterilmiştir. Tasarım A ve C sırasıyla 0.3 ve 0.4 mm sabit strut çapına sahipken Tasarım B ve Tasarım D sırasıyla içten dışa azalan ve içten dışa artan strut çapına ve buna bağlı değişken yoğunluk ve gözeneklilikte, geçişli (değişken) gözenekli yapıda hazırlandı. Gözeneklerde ki geçiş sadece X ve Y yönlerinde verilmiş Z yönünde geometrik özellikler sabit tutulmuştur.



Resim 3.5. Tasarımların strut çaplarına göre hacimsel modelleri

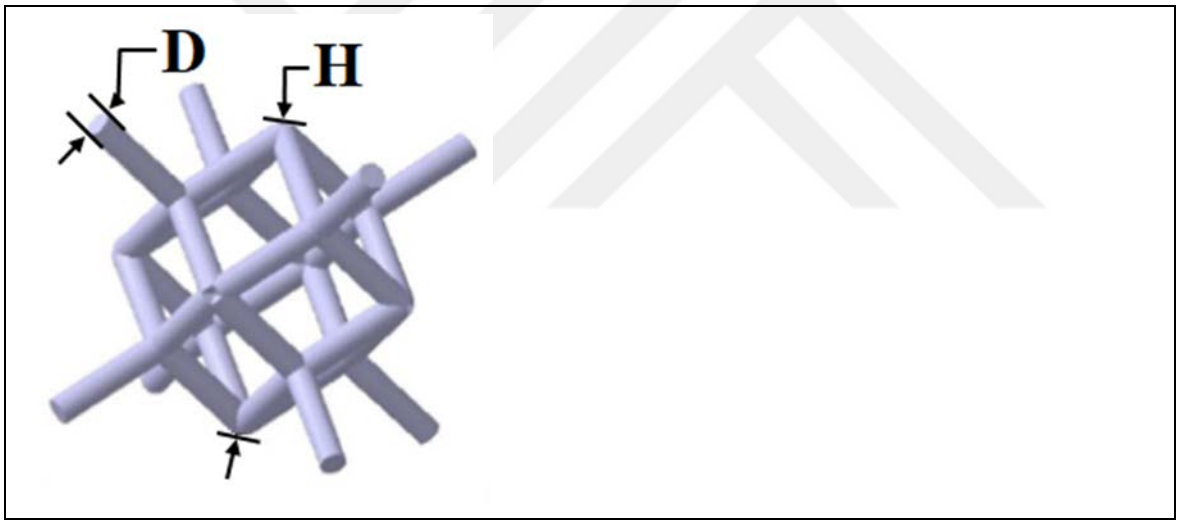


Resim 3.6. Tasarımların üstten görünüşünün iki boyutta CAD çizimleri

Çizelge 3.2. Gözenekli tasarımları oluşturan yapıların ölçüleri

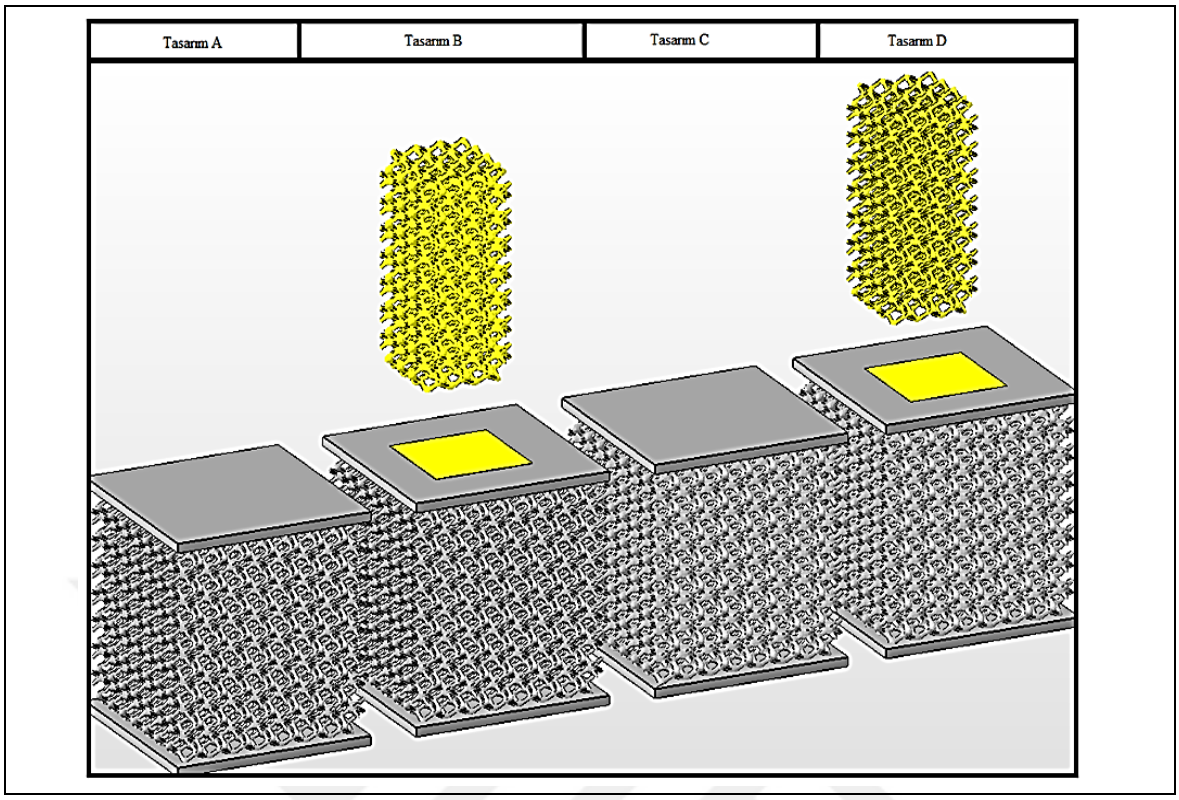
Tasarım	Kafes Boyu, H	Merkez Strut Çapı, D	Kabuk Strut Çapı, D	Numune Boyu, 2L
A	3 mm	0.3 mm	0.3 mm	24
B	3 mm	0.4 mm	0.3 mm	24
C	3 mm	0.4 mm	0.4 mm	24
D	3 mm	0.3 mm	0.4 mm	24

Gözenekli yapı içerisinde geçiş için kullanılan strut çapları dışta 12 mm ve içte 12 mm kalınlık içerisinde farklı olacak şekilde oluşturuldu. Tasarım B ve Tasarım D geçişli gözenekleri gözenekli yapılara verilen geçişin yönünü belirlemek ve mekanik özelliklerini incelemek ve deformasyon mekanizmasını belirlemek için hazırlandı. Yapılan tasarımların karşılaştırılması amacıyla 0.3 ve 0.4 uniform strut çapa sahip sırasıyla tasarım A ve tasarım C hazırlandı (Çizelge 3.2).

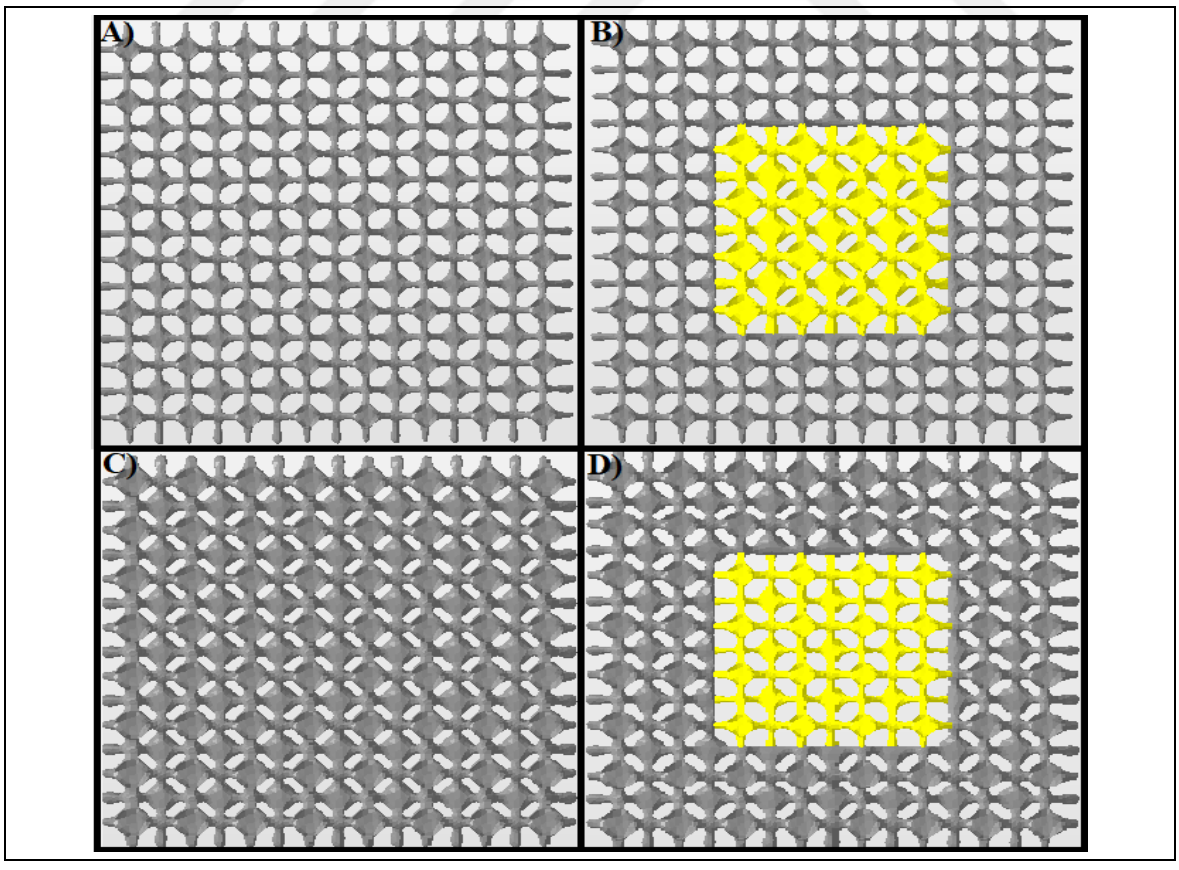


Resim 3.7. Rhombik dodekahedron kafes yapısı gösterimi

Tasarımlar Autodesk Netfabb® programı ile oluşturuldu. Numuneler kesit uzunluğu 24 mm olan küp şeklinde katı modelden kafesli yapıya çevrildi ve basma testi esnasında basma kafalarının numuneye homojen olarak yük bindirmesi için alt ve üst kısımlara 1 mm kalınlığında katı plaka yapı eklendi. Yapılan tasarımların daha iyi anlaşılabilmesi için tasarımlar Resim 3.8'de şematize edilmiştir. Ayrıca tasarım yapılırken gözeneklere verilen geçişi göstermek için CAD programından alınan kesit görüntüleri ile homojen ve içten dışa artan ve azalan şekilde oluşturulmuş geometrileri Resim 3.9'da verilmiştir.



Resim 3.8. Kafes elemanlardan oluşturulmuş gözenekli yapı tasarımları



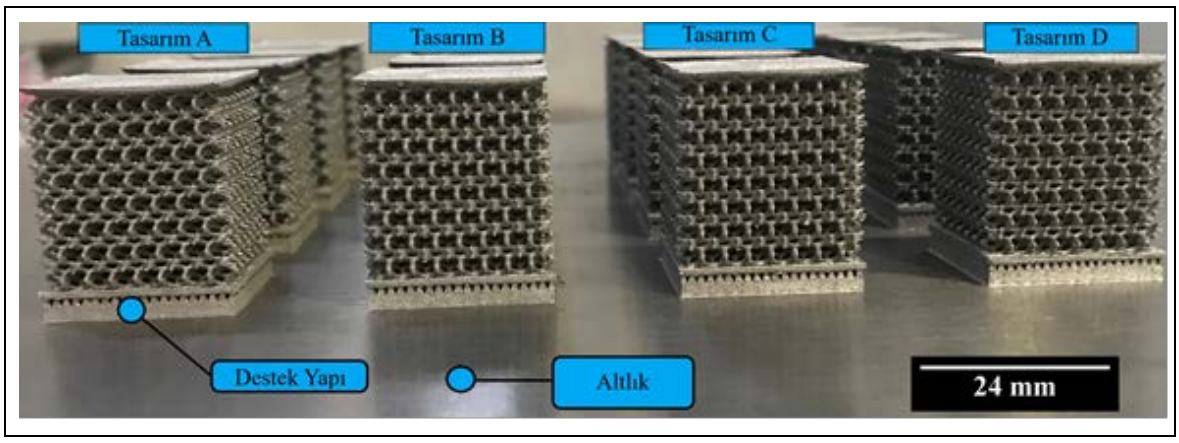
Resim 3.9. (A)Tasarım A, (B) Tasarım B, (C) Tasarım C, (D) Tasarım D için CAD programından alınan üretimde büyütme yönünde kesit görüntüleri

3.2.3. Üretim

Tasarımların Eİ ile üretilebilirliğinin testi ve üretilen numunelerin istenilen gözeneklilikte ve geçişte karakterize olup olmadığını kontrol etmek ayrıca standart ve geçişli gözenekli yapıların mekanik ve fiziksel özelliklerini deneysel olarak test etmek için üretim işlemi gerçekleştirildi. Tasarımı yapılan numuneler, üretim sistemine gönderilmek üzere Eİ makinesinin program ara yüzüne gönderildi ve bu aşamada parçaya özgü boyutlandırma, pozisyon verme ve destek yapısı oluşturma gibi modifikasyonların yapıldı. Tasarımlar görseli ve teknik özellikleri Ek-2'de verilen toz yataklı lazer ergitme prensibiyle çalışan ENAVISION (Ermaksan, Bursa, Türkiye) SLE cihazı ile üretildi. Üretim sırasında kullanılan işleme parametreleri kullanılan cihaz ve toza göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışma kapsamında üretimde kullanılan işleme parametreleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Üretim toplam 725 katmanda tamamlanmış olup üretim sırasında satranç tahtası tarama stratejisi ve ardışık katman geçişlerinde tarama yönünü 90°'lik açı ile çevirme stratejisi ile numune içerisinde izotropik mekanik özellikler sağlanması ve minimum ısıl çarpılma olması amaçlanmıştır. Üretilen numunelere herhangi bir ikincil işlem uygulanmadan üretim tezgâhında çıkarıldığı şekilde ki görüntüleri üretim tablası üzerinde Resim 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.3. İşleme Parametreleri

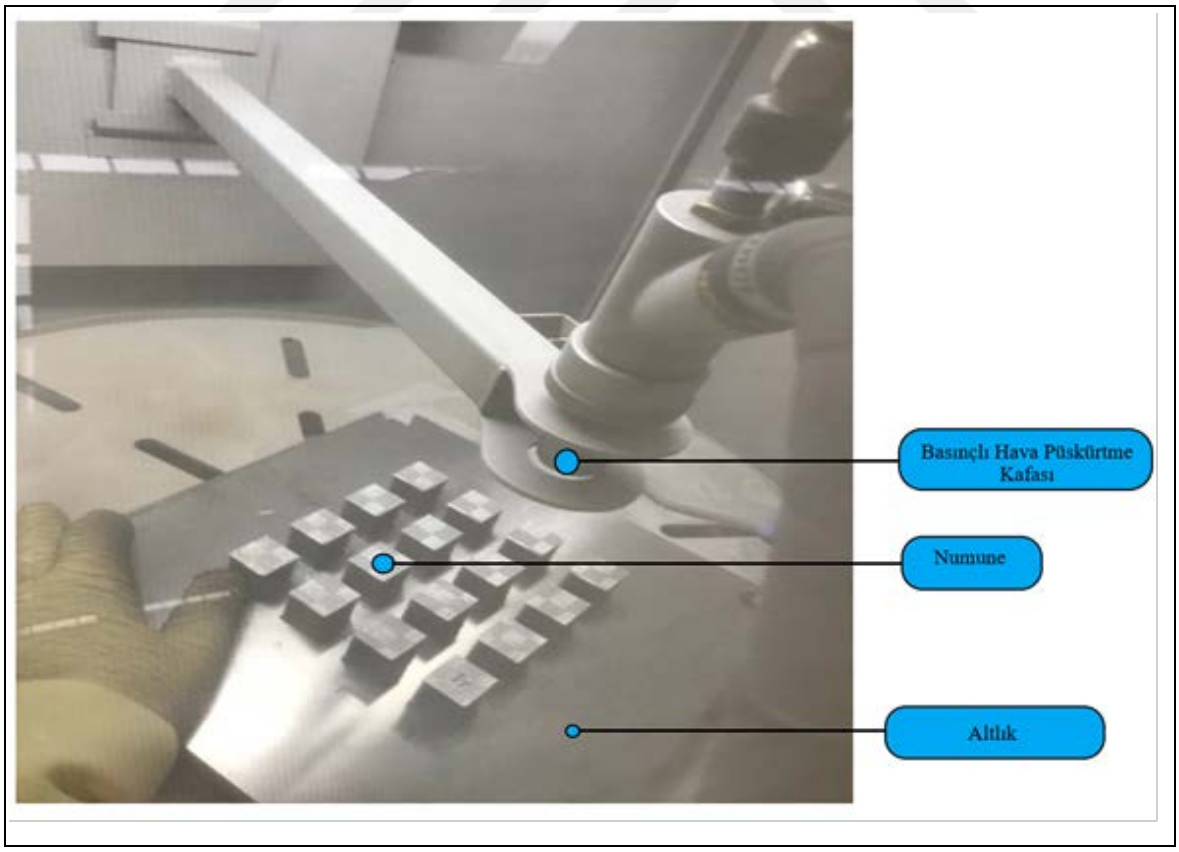
Lazer Gücü (W)	Lazer Işın Çapı (µm)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Mesafesi (µm)	Katman Kalınlığı (µm)
100	70	1500	50	40



Resim 3.10. Üretilen numunelerin tezgâhtan çıkarıldığı anda ki görüntüsü

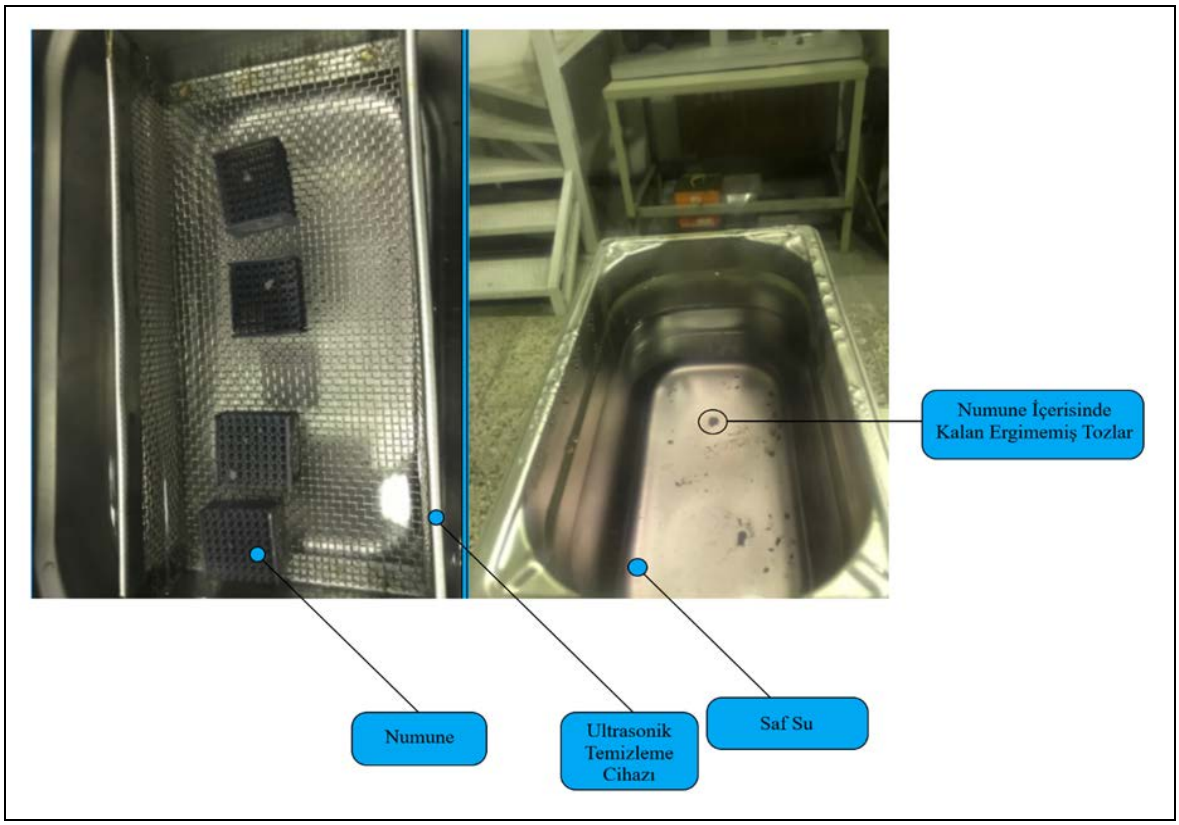
Üretim tamamlandıktan sonra numuneler tabladan manuel olarak: kargaburnu, ıspatula, çekiç yardımıyla çıkarıldı bu işlem esnasında numunelerde hasar oluşmaması için üretim sırasında numunelerin altına 5 mm yükseklikte destek yapıları inşa edildi. Numuneler ile tabla arasında kalan bu destek yapılar tasarımlara göre daha zayıf yapıda tasarlanıp numunenin tabladan kolay sökülmesini de sağlamaktadır. Tabladan sökülen numunelerin yüzeyinde kalan destek yapı kalıntılarını gidermek için temas yüzeyleri avuç içi taşlama ile taşlandı böylece basma test cihazında numuneler basma kafalarının arasına düz yerleşebildi.

Numuneler toz yatağı içerisinde büyütüldüğü için üretim sonrası numune içerisinde ham toz kalır ve milimetrik gözenekler içinde ki tozu sadece manuel sallama, titretme gibi yöntemlerle çıkarmak yetersiz kalır. Numuneler ikinci bir işlem olarak basınçlı hava ile Resim 3.11'de gösterildiği gibi içerisinde kalan tozlardan temizlendi ancak basınçlı hava numuneler içerisinde ki gözeneklere homojen olarak yayılamadığı ve numune içerisinde hala toz kalması ihtimaline karşın numune içerisine tamamen nüfuz edebilecek bir yönteme daha ihtiyaç duyuldu.



Resim 3.11. Numunelerin içerisinde kalan toz parçacıklarının basınçlı hava ile temizlenmesi

Yapılan literatür çalışmasında bu şekilde gözenekli numunelerin temizlenmesinde ultrasonik temizlemenin iyi sonuçlar verdiği görüldü. Alex Machine ultrasonik temizleme makinesinde saf su içerisinde 70°C 'de bir saat süreyle her tasarıma ait numuneler ayrı ayrı temizleme işlemine tabi tutuldu. Resim 3.12'de ultrasonik temizleme cihazında ki numuneler ve temizleme sonrası cihazın haznesinde kalan artık toz partikülleri görülmektedir.



Resim 3.12. Ultrasonik temizleme ünitesi ile gözenekli yapı içerisinde ki kalan tozların temizlenmesi

3.2.4. Mekanik testler

Mekanik özelliklerin deneysel olarak belirlenebilmesi için Instron 3369 basma test cihazında uniaksial basma testi uygulandı. Basma testleri ISO 13314:2011 standartlarında gerçekleştirildi. Bu standartlara göre %50 veya daha fazla gözenekliliğe sahip gözenekli veya hücresel metallerin basma testleri yarı statik gerilme hızı koşulları altında ve çevre sıcaklığında gerçekleştirilmesi prosedürü uygulanmaktadır. Mekanik özellikleri belirlemek amacıyla gerçekleştirilen test standarda göre 0.5 mm/dk yer değiştirme ve 10^{-3} s^{-1} gerinim oranında gerçekleştirildi. Ölçümler, numunelerin plakalar arasında ilk yerleşmesini sağlamak ve plakalar arasında kaymasını önlemek için 50-70 N'luk bir ön yüklemeden sonra

kaydedildi. Test cihazından sonuç basma yükü, Newton, karşılık numunede oluşan yer değiştirme, milimetre, olarak alındı. Her bir numunenin ilk kesit alanı ile basma test cihazının yük hücrelerinden gelen basma yükü verileri kullanılarak mühendislik basma gerilimi hesaplanmıştır. Mühendislik gerinimi, karşılıklı basma kafalarından yukarda ki hareketli kafanın yer değiştirme miktarıyla hesaplandı. Uygulanan yüke karşılık yer değiştirme bilgisinden numunelerin mekanik özelliklerini tayin eden gerilim-gerinim eğrisi hesaplandı.

Numunelerde oluşan gerinim miktarı:

$$\sigma=F/A \tag{3.1}$$

Burada, F:basma test cihazının uyguladığı kuvvet (N), A ise numuneye basma yönüne dik yöndeki kesit alanı (mm^2). Her tasarım için hesaplamada kullanılan alan ölçüsü CAD programından alındı. Basma testi her tasarım için üç farklı numuneye uygulandı.

Numunelerde oluşan gerilim miktarı:

$$\epsilon=\Delta L/L \tag{3.2}$$

eşitliğinden hesaplanır. L numunelerin testten önce kumpasla ölçülen ilk boyları (mm), ΔL ise numunelerde oluşan yer değiştirmeye denk gelen basma test cihazının hareketli kafasının yer değiştirme miktarı (mm).

3.2.5. Numunelerin fiziksel özelliklerin incelenmesi

Numuneleri fiziksel olarak karakterize etmek için makro boyutta ağırlık ölçümleri, gözeneklilik oranı hesaplaması ve mikro boyutta metalografik incelemeler yapıldı.

Numunelerin kuru ağırlıkları UWE NJW-150 hassas terazi kullanılarak ölçüldü. Gözeneklilik oranı için numunelerin yoğunlukları hesaplandı. Arşimend tekniği, kuru ağırlık ölçüm tekniği ve CAD geometrisinden alınan bilgiye göre numunelerin yoğunluğu üç farklı yöntemle hesaplandı. Her tasarım için üç numune test edildi ve ortalamaları alındı. Her iki deneysel ölçüm de normal atmosfer koşullarında, oda sıcaklığında gerçekleştirildi.

ρ_n= Numunenin yoğunluğu (g/cm^3)

$W_{n,h}$ = Numunenin havadaki ağırlığı (g)

$W_{n,s}$ = Numunenin sudaki ağırlığı (g)

$V_{n,d}$ = Numunenin dolu hacmi (cm^3)

M_{CAD} = Numunenin CAD geometrisinden alınan gözenekli hacmi (cm^3)

ρ_t = Ham tozun yoğunluğu (g/cm^3)

$\Phi_{k,t=}$ Kuru tartımla hesaplanan gözeneklilik oranı (%)

$\Phi_{CAD=}$ CAD bilgisi ile hesaplanan gözeneklilik oranı (%)

$\Phi_{arş=}$ Arşimend prensibine göre hesaplanan gözeneklilik oran (%)

Kuru tartım yapılarak hesaplanan yoğunluk hesabı:

$$\rho_n = \frac{W_{n,h}}{Vn,d} \tag{3.3}$$

CAD geometrisinden alınan bilgiye göre yoğunluk hesabı:

$$\rho_n = \frac{M_{CAD}}{\rho_t \left(4.42 \frac{g}{cm^3}\right)} \tag{3.4}$$

Hesaplanan numune yoğunlukları Ti-6Al-4V malzemenin katı yoğunluğuna bölünerek numunelerin izafi yoğunlukları hesaplandı.

Kuru tartıma göre numunelerin gözeneklilik oranı:

$$\Phi_{k,t=} = \frac{\rho_t - \rho_n}{\rho_t} \tag{3.5}$$

CAD bilgisine göre gözeneklilik hesabı:

$$\Phi_{CAD=} = \frac{\rho_t - \rho_n}{\rho_t} \tag{3.6}$$

Arşimend tekniği kullanarak gözeneklilik hesabı, numunenin havadaki ağırlığını ve sudaki ağırlığı kullanılarak hesaplandı.

$$\Phi_{arş=} = \frac{W_{n,h}}{W_{n,h} - W_{n,s}} \tag{3.7}$$

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

4.1. Giriş

Bu bölümde, bir önceki bölümde yapılan fiziksel ve mekanik testlerin sonuçları verilip literatürdeki bilgilerle karşılaştırılacaktır. Bu tez çalışmasında üretimi gerçekleştirilen numunelere istenen tasarım özellikleri kazandırılması ve sonucunda elde edilen fiziksel özelliklerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Fiziksel özelliklerin mekanik ve morfolojik etkileri incelenmiş ve tasarımlar bu yönleriyle karakterize edilerek sonra ki çalışmalara zemin hazırlamıştır.

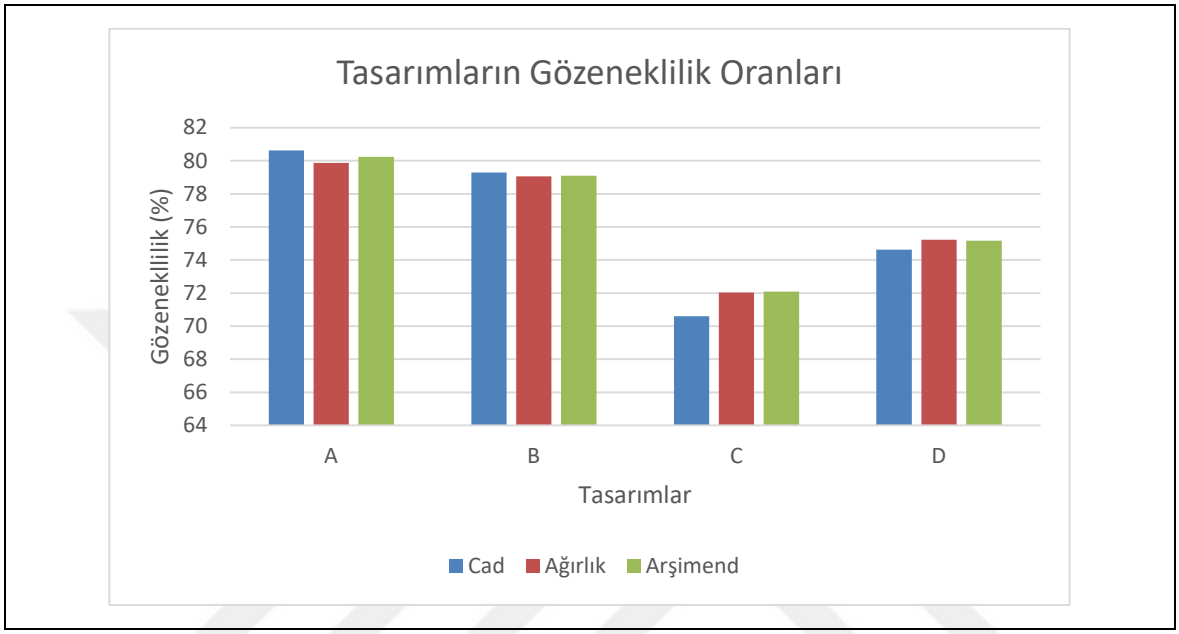
4.2. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

Fiziksel özellikleri belirlemek için yapılan işlemler iki temel kategoriye ayrılabilir; makro boyutta incelemeler ve mikro boyutta incelemeler. Makro incelemeler arasında kumpas ile boy, hassas terazi ile ağırlık ölçümleri ve mikro boyutta incelemeler mikroskop altında gerçekleştirilen incelemelerden oluşur. Fiziksel özellikleri belirlenen tasarımların gözeneklilik oranları ve yoğunluğu hesaplandı ve numunelerin yoğunluğuna bağlı mekanik özellikleri karşılaştırıldı.

SLE teknolojisi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerin kumpas ile x, y, z eksenlerinde boyları ölçüldü yapılan ölçümlerde her bir tasarım için üretilen üçer adet özdeş numunelerin kendi aralarında boyutlarının benzer olduğu ancak bütün numunelerde x, y, z eksenlerinin hepsinde orijinal CAD geometrisine göre daha büyük boyutlar ölçüldü. Yapılan tüm ölçüm sonuçları ve karşılaştırmalara göre bütün numunelerin boyutları orijinal CAD geometrisine göre % 2 den daha az sapma olduğu hesaplandı. Aynı durum hassas terazi ile gerçekleştirilen ağırlık ölçümlerinde de gözlendi. Ağırlık artışına en büyük sebebin numune içerisinde strut yüzeyine yapışan temizleme sonrasında hala içeride kalan kısmı eriyik halde tozların olabileceği düşünüldü.

Gözeneklilik ölçümleri tasarımların yoğunluğuna göre mekanik özelliklerini belirlemek için önemlidir. Tasarımların gözeneklilik oranlarını belirlemek için CAD görüntülerinden, kuru ağırlık ölçümünden ve Arşimend prensibinden yararlanılmıştır. Yapılan hesaplamalarda bütün tasarımlar için üç yöntemin de birbirine yakın değerler verdiği tespit edilmiştir.

Hesaplama kolaylığı ve sonuçların diğer iki yöntemden alınan sonuçların aralığına denk gelmesi nedeniyle gözeneklilik hesabı için en kullanışlı yöntem olarak kuru ağırlık yöntemi tespit edilmiştir. Resim 4.1'de kullanılan üç yöntemle elde edilen sonuçlar sütun grafiği üzerinde gösterilmiştir.



Resim 4.1. Farklı yöntemlerle ölçülmüş tasarım gözeneklilik oranları

CAD verisinden alınan bilgilerle yapılan hesaplamalarla tespit edilen amaç gözenekliliğin Tasarım A ve Tasarım B için kuru ağırlık yöntemine göre yapılan hesaplamalarla elde edilen gözeneklilik oranından yüksek olduğu fakat Tasarım C ve tasarım D için tam tersi durum olduğu gözlendi. Ancak dört tasarım modeli için yapılan bu hesaplamalarda genel farkın büyük olmaması nedeniyle herhangi bir sebep ya da çıkarıma gerek duyulmadı.

Çizelge 4.1. Tasarımların kuru ağırlık ölçümüne göre gözeneklilik oranları

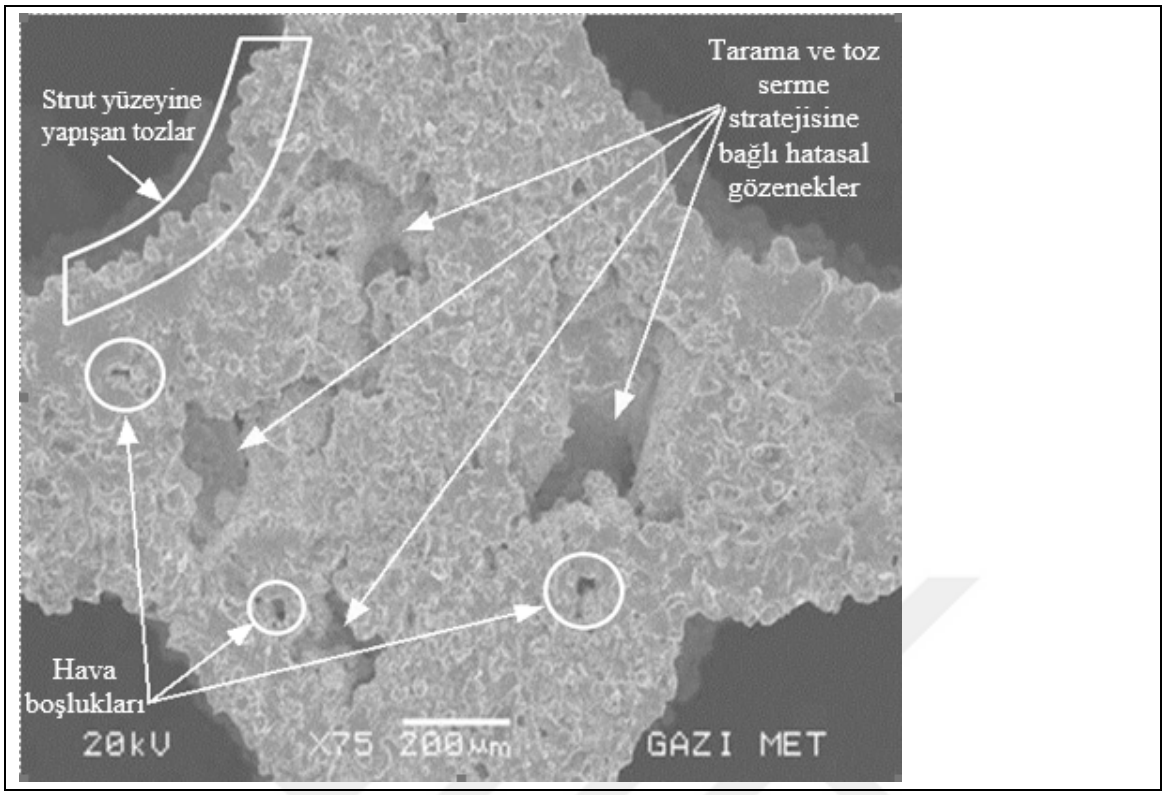
	Gözeneklilik Oranı (%)
Tasarım A	80.1
Tasarım B	79.1
Tasarım C	72.1
Tasarım D	75.2

Çizelge 4.1'de, verilen numunelerin kuru ağırlık ölçümüyle hesaplanan nihai gözeneklilik oranlarıdır ve hem amaçlanan yani tasarım kaynaklı hem de kusurları temsil eden gözenekliliği içermektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Tasarım ve hata kaynaklı gözenek çeşitleri ve ölçüm yöntemleri

Kusurlardan kaynaklı gözeneklerin düzensiz şekilde olduğu, bazılarının ergimemiş toz tanecikleri ile dolu olduğu gözlenmiştir. Bu gözenekler yetersiz erime ve ardışık tarama yapılan bölgede üst üste binen tarama bölgelerinde oluştuğu gözlenmiştir. Karşılaşılan hataların sebebi, optimum işleme parametreleri kullanılmaması ki daha önce birçok araştırma makalesinde belirtildiği gibi, bu parametrelerin işlevi, lazer ışını tarafından toz malzemeye verilen enerji miktarını ifade eden bir enerji yoğunluğudur oluşturulan yapının yoğunluğunu etkileyen en önemli etkendir. Buna ek olarak hatalara bağlı gözenek oluşumunun bir diğer sebebi toz katmanının homojen olmayan şekilde serilmesi olabilir.

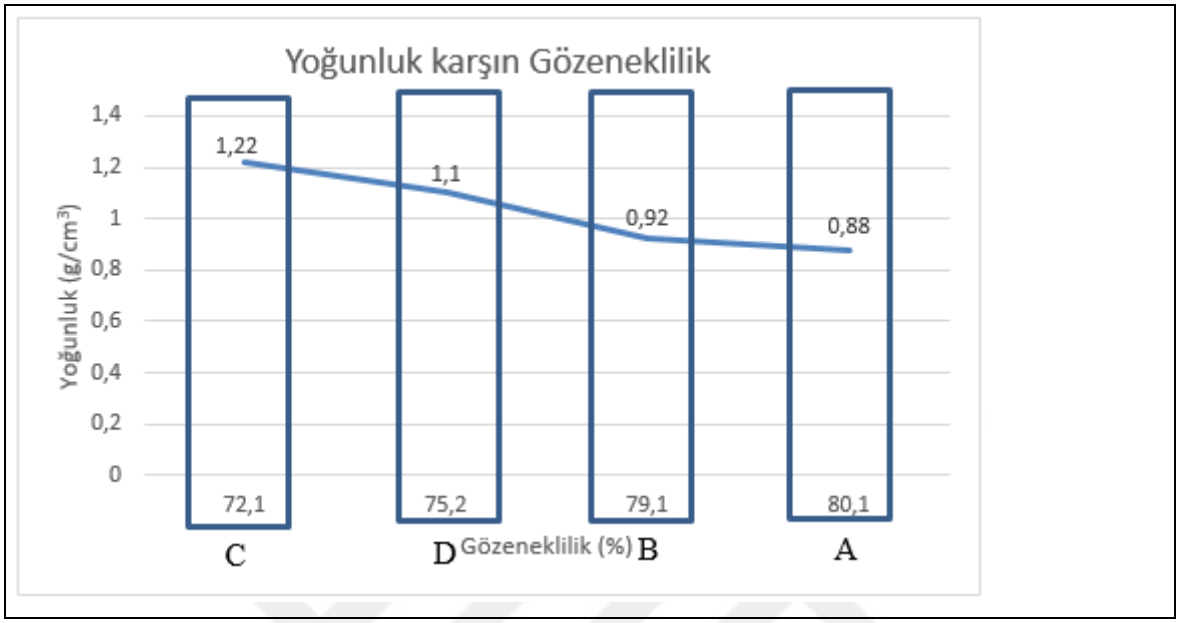


Resim 4.2. Düğüm noktasında üretimsel hatalara bağlı oluşan mikro kusur gözenekler

Burada düşünülmesi ve göz önünde bulundurulması gereken en önemli durumlardan bir tanesi hatalara bağlı gözeneklerin numunelerin gözeneklilik oranını arttırması beklenirken amaçlanan yani CAD verisinden hesaplanan gözeneklilik ile kuru ağrılık ölçümü yöntemiyle hesaplanan gözeneklilik oranının benzer sonuçlar vermesidir. Bu durumun olası sebepleri Resim 4.2'de verilen görselde strut yüzeyine yapışan tozların bulunması ve üretim sonrası yapılan temizleme işlemlerine rağmen hala numune içerisinde hapsolmuş tozların numunenin gözenekliliğini düşürmesi olarak düşünülmüştür. Hatalara bağlı gözeneklerin oluşturduğu gözeneklilik yine hatalara bağlı numune içerisinde yapışan/kalan tozların numunelerin gözenekliliğini düşürmesi ile dengelenmiştir.

Beklenildiği şekilde strut çapını arttırmak numunelerde gözeneklilik oranında azalmaya ağırlıkta ise artmaya neden olmuştur. Numunelerin yoğunluklarının hesaplanmasıyla numunelerin her birinin gözenekliliği hesaplandı, böylece numunelerin mekanik özellikleri gözeneklilik oranına göre kıyaslandı. Gözeneklilik oranında ki artış numunelerin yoğunluklarında azalmaya neden oldu. Gözeneklilik oranı %80 bandına yaklaşan Tasarım A ve B'nin yoğunlukları suyun yoğunluğunun (1 gr/cm3) altına düşmesi nedeniyle

Arşimend prensibiyle ölçüm yapılırken suda batmadığı gözlendi. Resim 4.2’ de gözeneklilik oranına karşın numunelerin yoğunluk oranları verilmiştir.

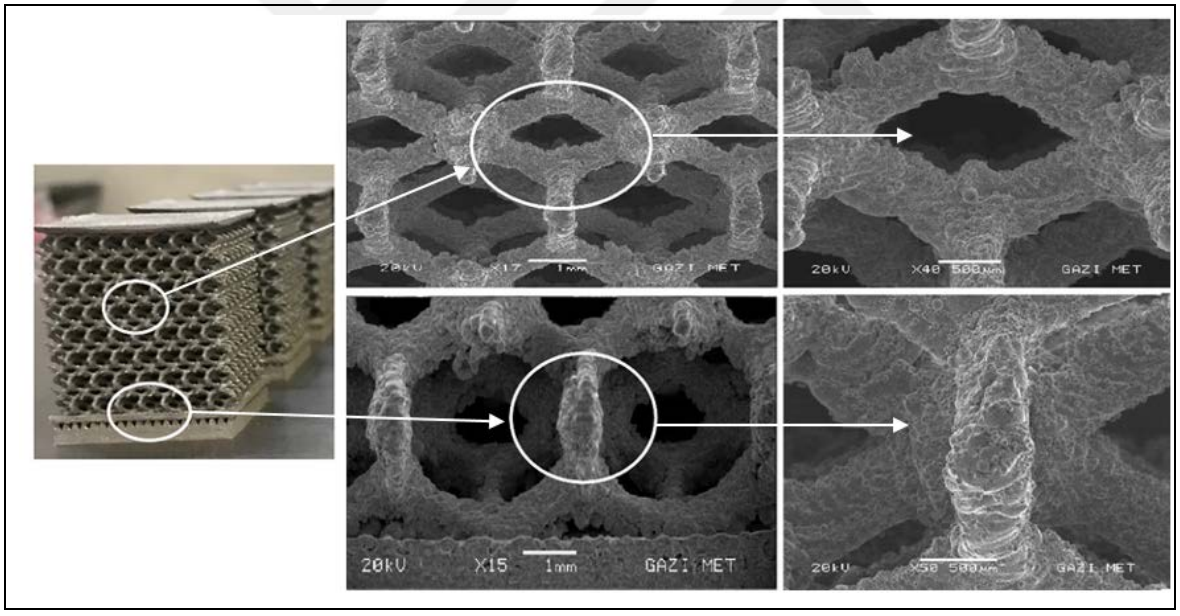


Şekil 4.2. Numunelerin yoğunluğuna karşın gözeneklilik oranları

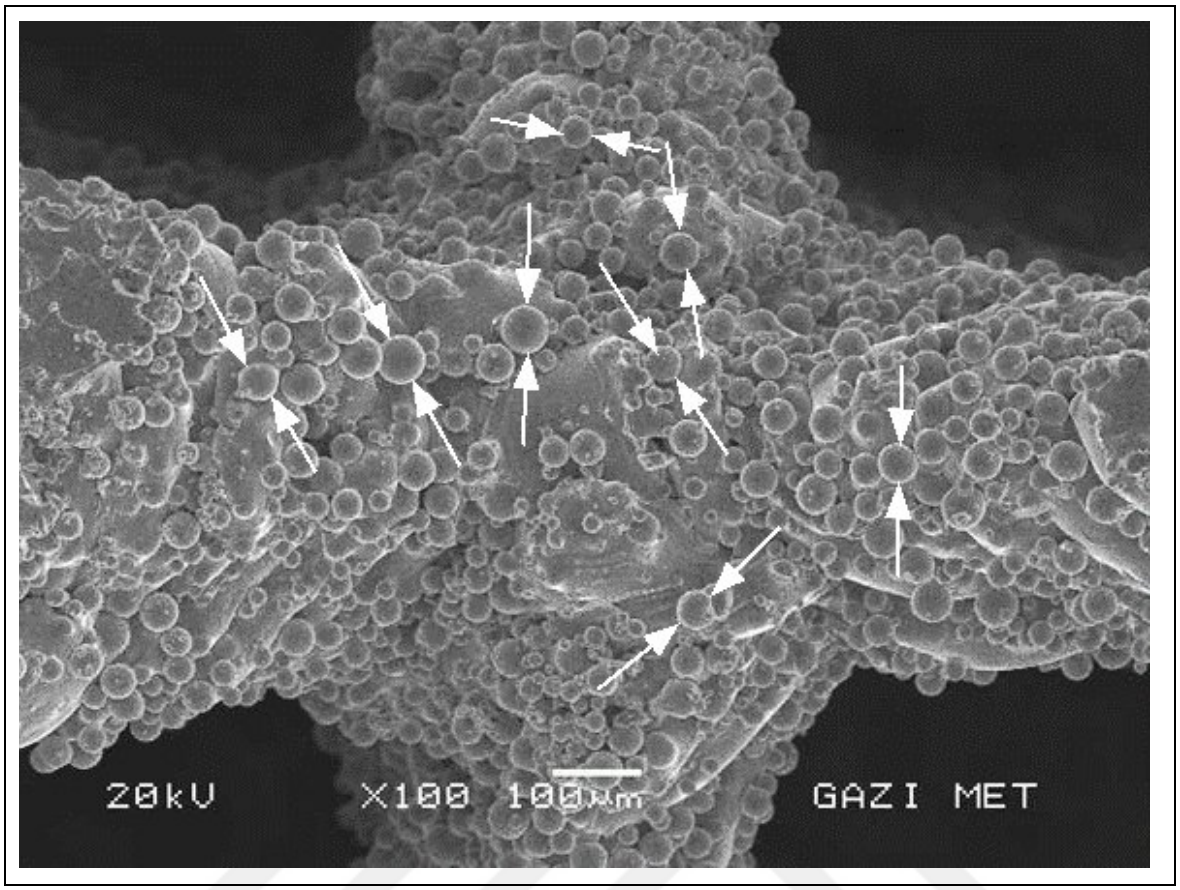
Şuana kadar yapılan çalışmalar tasarımların makro boyuttaki fiziksel özelliklerini tayin etmek içindi. Ancak tasarımları oluşturan geometrilerin mikro boyutta olması ve üretim için kullanılan Eİ teknolojisinin mikron kalınlığında katmanlarla üretim yapması nedeniyle numuneleri mikro boyutta da incelemenin gerekli olduğu düşünüldü. Ayrıca SLE teknolojisinin çalışma prensibi olan ham tozların yüksek sıcaklık girdisi ile büyütülmesi vasıtasıyla ürün oluşturulması ham tozdan nihai ürüne geçişte kimyasal özelliklerin ve Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşiminin nasıl etkilendiği de EDS analizleri ile incelendi.

SLE teknolojisiyle üretilen Ti-6Al-4V numunelerin mikro yapı ve kimyasal bileşimini incelemek için basma testi öncesi taramalı elektron mikroskopu altında analiz edildi. Resim 4.3 kafes yapıyı oluşturan gözenek ve strutları göstermektedir. Görselde görüldüğü üzere numune strut ve gözeneklerin şekli ve dağılımı olarak CAD tasarımını karakterize etmektedir. Üretim esnasında tamamen ergimeyen ve ya üretim haznesinde ki gevşek tozlarının ısıl etki nedeniyle numune yüzeyine yapışması ile oluşan kusurlar yine görselde gözükmektedir. Bu kusurlar tasarımın hem mekanik özelliklerini olumsuz etkilerken hem de yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu tip kusurların önlemek için doğru tarama stratejisinin belirlenmesi çok önemlidir. Üretim sonrası yapılacak ikincil işlemler ile kumlama, ısıl işlem ile bu kusurların azaltılması sağlanabilir.

Resim 4.4'de numuneyi oluşturan strut ve düğüm noktalarının etrafında birçok kısmi erişmiş ve numune yüzeyine yapışmış tozlar olduğu görülmektedir. Yapılan ölçümlerde yüzeydeki tozların 10-50 μm boyutlarında olması genellikle ham gevşek tozun yüzeye yapışması ile oluşan yüzey kusurlarını akla getirdi. Bu kusurlar üretilen numunelerin gözeneklilik oranlarını tasarım geometrilere göre düşürdüğü, ağırlığını ise arttırdığı belirlenmişti. Bunun başlıca sebebi numuneleri oluşturan strutların ve düğüm noktalarının etrafına yapışan erimemiş ya da kısmi erimiş tozların olabileceği düşünüldü. Bu tozlar ayrıca düzensiz bir strut çapı oluşmasına ve belirli bölgelerde gerinim konsantrasyonu oluşturarak beklenilmeyen deformasyon davranışlarına gözükmesine neden olarak basma testinde bu kısımlarda öncelikle deformasyon gözlemlenmesine neden olabilir. Taramalı elektron mikroskobu ile incelenen numunelerde ki strut yüzeylerinin hepsinde bu durum gözükmektedir. Bütün numunelerde görülen bu kusurların tasarımdan bağımsız sadece üretim stratejisi ile alakalı olabileceğini akla getirir.



Resim 4.3. Tasarımları oluşturan düğüm ve strutların taramalı elektron mikroskopu altında ki görüntüsü



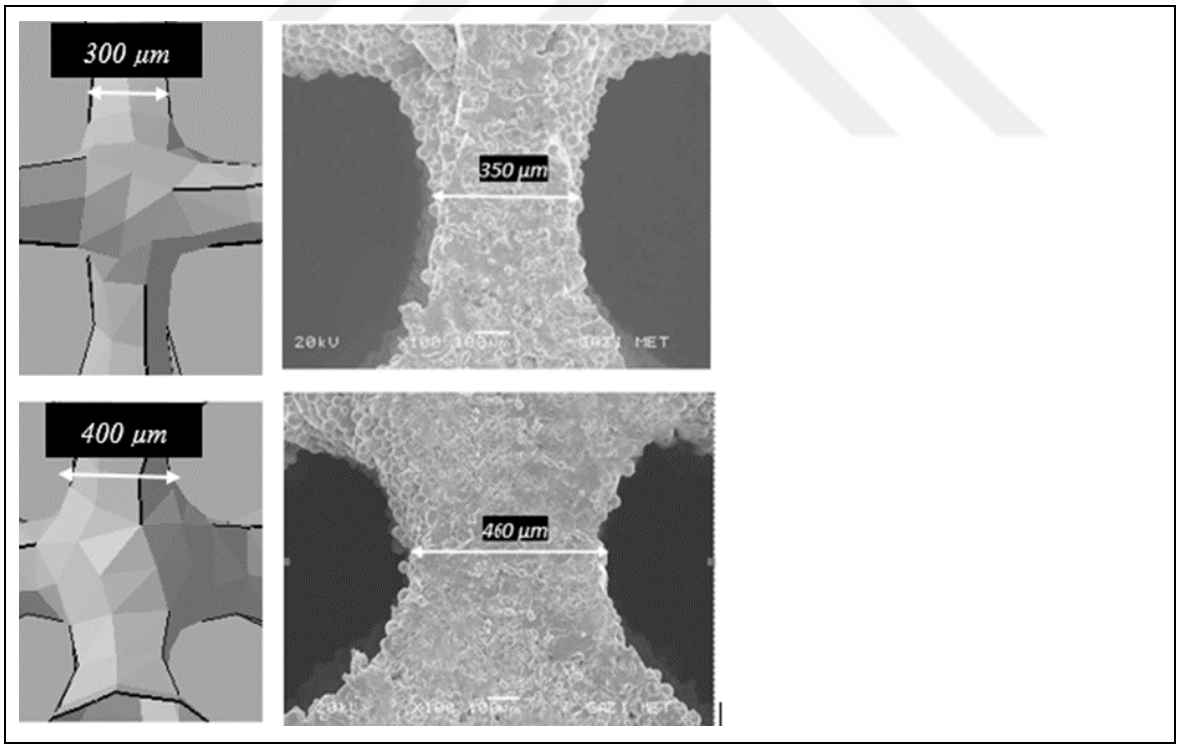
Resim 4.4. Düğüm noktasında numune yüzeyine yapışan ham tozların elektron mikroskopu altında ki görüntüsü

SLE ile üretilen Ti-6Al-4V hücresel kafes yapılarının strut çapları ve gözenek ebatları taramalı elektron mikroskop görüntüleri ile ölçülmüştür. Ayrıca tasarlanan strut çapları ve gözenek boyutları, CAD modellerinden tasarım programı içerisinde ölçülmüştür. Birim hücre büyüklüğünün sabit tutulduğu tasarımlarda homojen ve gözenek yoğunluğunun değiştiği geçişli gözenekli yapıda üretilen numunelerin tasarlanan ve deneysel strut çapları ve gözenek boyutları karşılaştırıldı ve Resim 4.5, Resim 4.6'da gösterilmiştir. Geometrik olarak tasarımlarda istenen strut çapları 300 ve 400 µm iken dört tasarım için de ortalama strut çapları gibi sırasıyla 350 ve 460 µm civarında ölçülmüştür. Tasarım geometrilerinde ki değerlerden sapan strut çapı ve gözenekliliğe rağmen geçişli yapıda tasarlanan numuneler gözeneklilikte ki istenen değişimi koruyarak geçişli yapıyı net şekilde karakterize etmiştir.

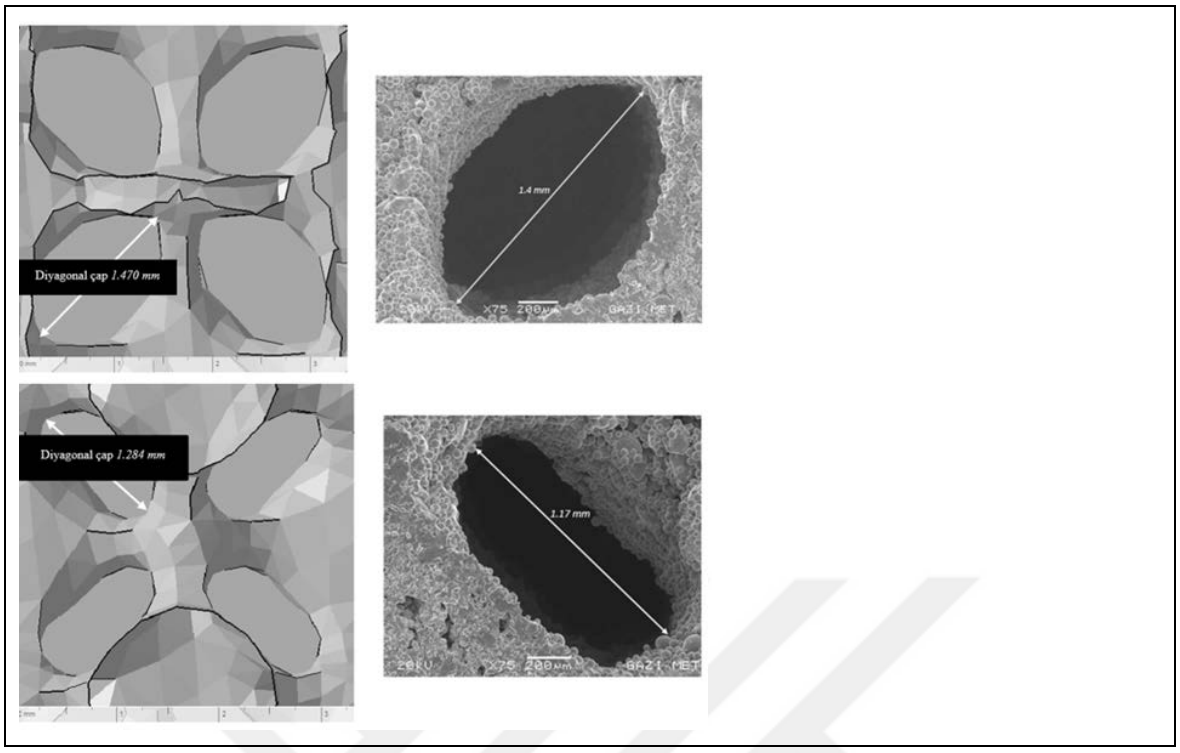
SLE teknolojisi için numunelerin strut çaplarının deneysel değerlerde tasarlanan değerlerden yüksek olduğu bunun sonucu olarak deneysel gözenek ölçülerinin, tasarlanan gözenek ölçülerine göre daha düşük olduğu tespit edildi. Strut çapında ki bu artış ve gözenek ölçüsündeki tasarlanan değerlere göre düşüş iki nedenden kaynaklanabilir. (1) Strut

yüzeyine bağlanmış ve kısmen eritilmiş metal partiküllerin strutların yüzeyine yapışması ve bu kısımlarda strut çapında artışa neden olması ve böylece gözenek boyutları azalır. (2) Lazer ışınının çapı eriyik havuzu boyutunu, ergiyik havuz boyutu da strut çapını belirler ancak uygulanan lazer çapından biraz fazlası tarama sınırlarında ki tozları da etkileyerek ergiyip strut çapının büyümesine neden olur.

Ayrıca daha önce amaçlanan gözenekliliğe ek olarak hatalardan kaynaklı gözeneklerinde oluşması nihai gözenekliliği arttıracağı düşünüldüğü ancak CAD verilerinden alınan amaçlanan gözeneklilik ile kuru ağırlık ölçümü ile hesaplanan nihai gözeneklilik oranlarının birbirine yakın olması farklı bir durumun olduğunu göstermişti. Burada ki durumu birbirine zıt çalışan iki olay açıklıyor birincisi hatalara bağlı gözeneklilik amaçlanan gözenekliliği arttırıyor ancak üretim teknolojisine bağlı strut yüzeyine yapışan tozların strut çapını arttırması ile amaçlanan gözenekliliğin azaldığı ve bu iki durumun birbirinin etkisini yok ettiği sonucuna varıldı.

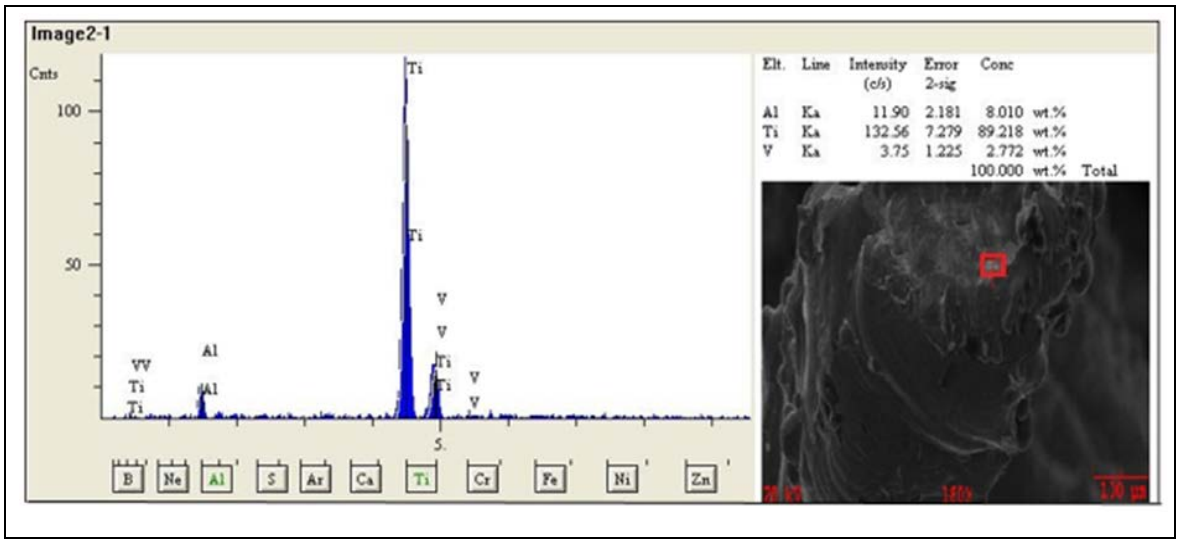


Resim 4.5. Sol üstte CAD programından alınan 300 µm'lik strut çapı, sağ üstte ise SLE ile üretilen strutın çapı, sol altta CAD programından alınan 400 µm'lik strut çapı ve sağ altta ise SLE ile üretilen strutın çapı gösterilmektedir



Resim 4.6. Sol üstte CAD programından alınan 1.47 mm'lik diyagonal gözenek çapı çapı, sağ üstte ise SLE ile üretilen gözeneğin diyagonal çapı, sol altta CAD programından alınan 1.284 mm'lik diyagonal gözenek çapı ve sağ altta ise SLE ile üretilen gözeneğin diyagonal çapı

Ayrıca SLE tezgâhı ile üretilen numunelerin kimyasal bileşimini incelemek için EDS analizi yapılmıştır, EDS, kimyasal bileşimin elde edilmesinde kesinliği olmayan yarı nicel bir yöntem olmasına rağmen, karşılaştırmalı amaç için oldukça iyidir [127]. Resim 4.7.'de verilen sonuçlara karşın her ne kadar Ti-6Al-4V dökme malzeme bileşiminde %4 Vanadyum içeriyor olsa da SLE teknolojisi ile üretilen numuneler incelendiğinde vanadyum konsantrasyonunda önemli ölçüde düşüş olduğu gözlenmiştir. Yapılan analizden elde edilen kimyasal bileşim literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmış ve benzer sonuçlara rastlanmıştır. Rafi ve ark. yaptıkları çalışmada da SLE teknolojisi ile Ti-6Al-4V ham tozdan ürettikleri numunelerde de 2.59 V, 7.74 Al, 89.93 % wt oranında malzeme bileşimi tespit etmişler [127]. Bu çalışmada da benzer şekilde 2.18 V, 8.01 Al, 89.218 % wt oranında alaşım elementleri tespit edilmiştir.



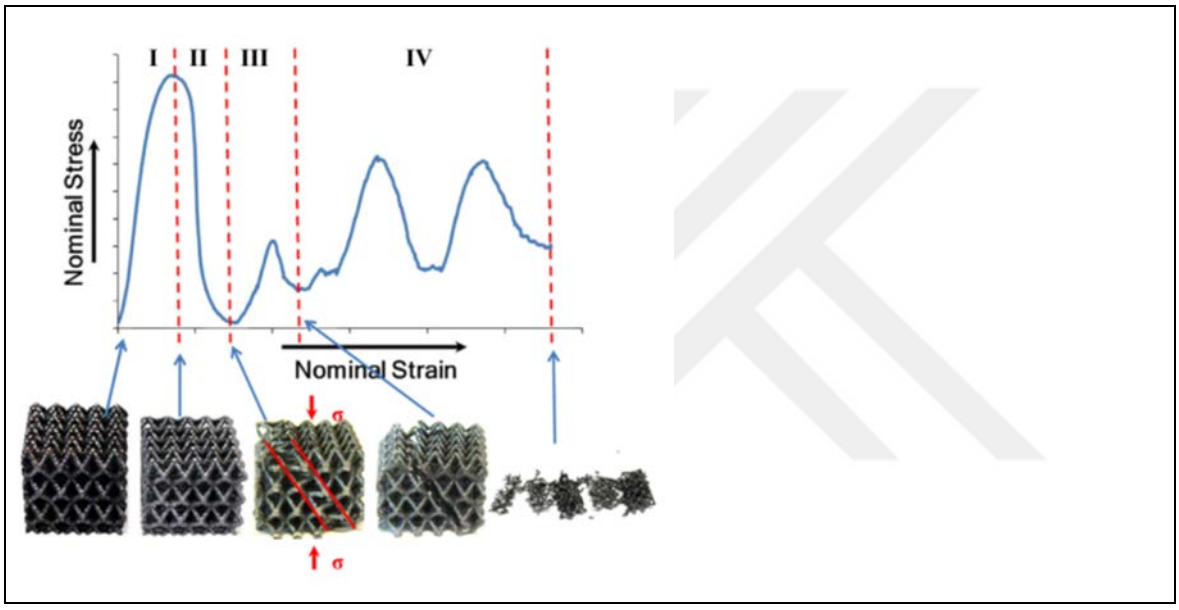
Resim 4.7. SLE teknolojisiyle üretilen Ti-6Al-4V numunenin strut kesitinde yapılan EDS analizi

4.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Ti-6Al-4V alaşımından üretilen gözenekli yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için birçok test ve çalışma yapılabilir. Bu çalışmada mekanik özelliklerin bası yükleri altında gözenek yoğunluğuna ve yapı içerisindeki dağılımına göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Çalışma için uniform 0.3 mm strut çaplı; dış kısmı 0.3 mm, merkez kısmı 0.4 mm strut çaplı; uniform 0.4 mm strut çaplı ve son olarak dış kısmı 0.4, iç kısmı 0.3 mm strut çaplı tasarımlar hazırlanmış ve üretilmiştir. Her tasarımın farklı gözeneklilik oranına bağlı izafi yoğunluğunun mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Gözenekli yapıları üretmek için SLE teknolojisi kullanılmıştır. Ti-6Al-4V tozundan ve rhombik dodekahedron kafes yapısından oluşan farklı tasarımlara sahip gözenekli yapılar çekme-basma test cihazı ile bası yükü altında test edilmiş ve test sonuçlarından alınan verilerle gerilim-gerimim eğrileri Şekil 4.5'te oluşturulmuştur. Sonuçlar sabit yapıda ve geçişli yapıda tasarlanan gözenekli numunelerin benzer gerilim-gerinim eğrisini oluşturduğu gösteriyor: lineer gerilim-gerinim eğrisinin olduğu elastik bölge, plastik akmanın başlaması, plastik sertleşme ve kopma gerilmesi.

Gözenekli yapılar için gerilim-gerinim eğrisi genel olarak dört bölümden oluşmuştur, ilk bölüm maksimum yük taşıma kapasitesini belirten gerilimin en yüksek olduğu bölge olup, bu bölgeyi daha sonra gerilimde ciddi bir düşüşün olduğu ve deformasyonun başladığı ikinci kısım gerçekleşir. Basma testini parçanın tamamen parçalanma ile karakterize olduğu

dördüncü kısma kadar yer değiştirmeye karşın gerilimin dalgalı bir şekilde artıp azaldığı üçüncü ve dördüncü bölgeler izler. Literatürdeki çalışmalarda basma testi ilk deformasyonun oluşmasından sonrası içinde devam ettirilmiştir yani yoğunlaşma bölgesi boyunca da basma testi sürdürülerek numuneler tam olarak deforme olup parçalana dek inceleme yapılmıştır. Böylece ilk deformasyon sonrası deforme olmamış sağlam strutların sağladığı dayanım özellikleri incelenmiştir. Şekil 4.3'te gösterilen gerilim-gerinim eğrisinde Chunlei Qiu ve ark. yaptıkları basma testinde numuneler tamamen parçalana dek sürdürülmüş ve şekildeki gerilim-gerinim eğrisini oluşturmuşlardır [128].

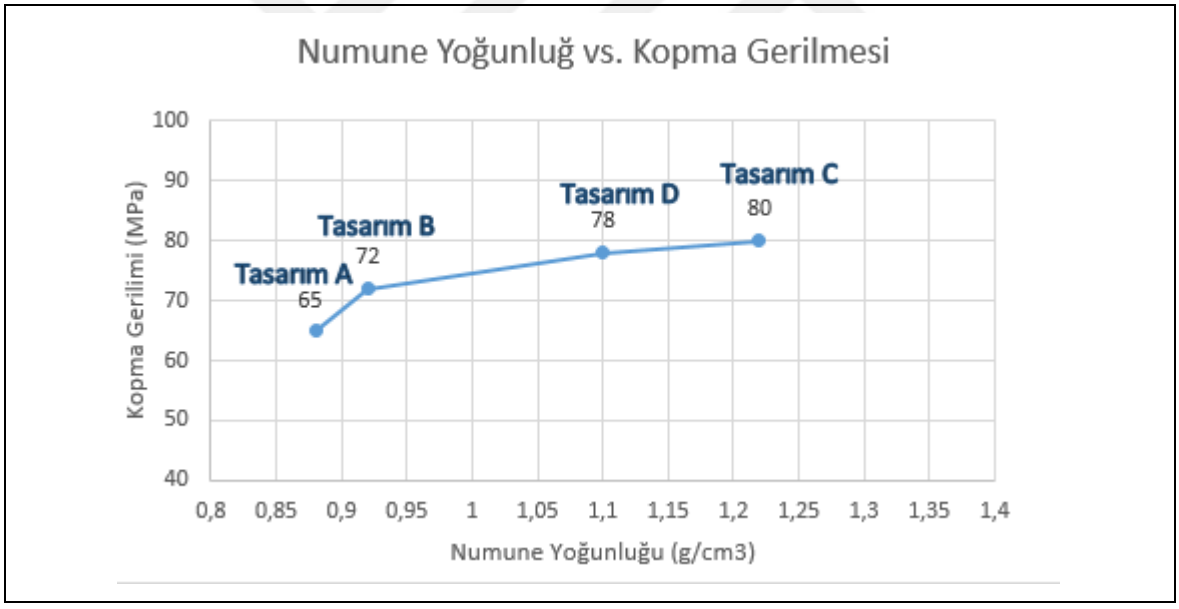


Şekil 4.3. AlSi10Mg alaşımdan SLE ile kafes yapılardan üretilen gözenekli numunenin gerilim-gerinim eğrisi [128]

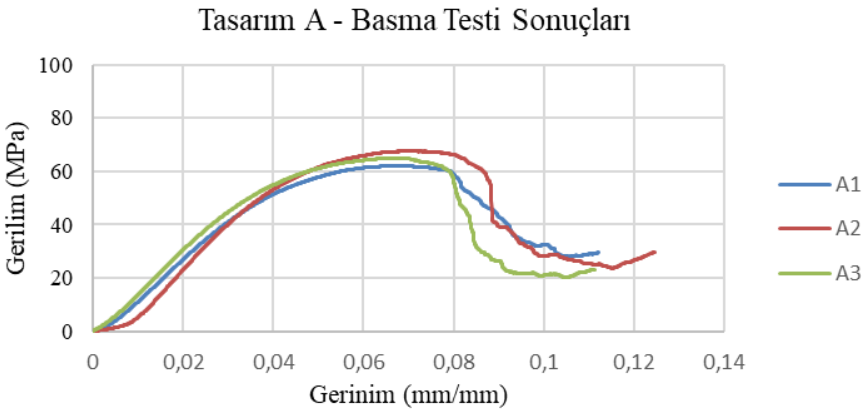
Bu çalışma kapsamında sadece ilk deformasyonun oluşmasına kadarki bölge incelenmiştir çünkü ilk kopma gerilmesinden sonra stutlarda gerçekleşen kopmalara bağlı gerilim de büyük oranda düşme gerçekleşir (ortalama % 80 ile %90 aralığında) ve yük taşıma kapasitesi düşer. Beklenildiği gibi strut çapının artması tasarımlarım basma yükü altında dayanımları da önemli ölçüde arttırdığı gözlendi. Şekil 4.5'teki grafiklerden görüleceği üzere standart çapa 0.4 mm strut çaplı Tasarım C maksimum gerilme mukavemetine sahipken 0.3 mm strut çapına sahip Tasarım A minimum gerilme mukavemetine sahiptir. Geçişli gözenekli yapıda ki Tasarım B ve Tasarım D'den hacimsel olarak daha fazla 0.4 strut çapına sahip D Tasarımının daha dayanıklı olduğu görülmüştür.

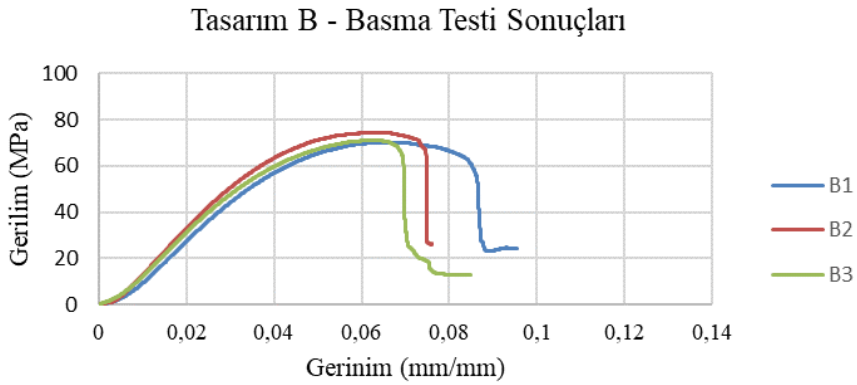
Ancak ne strut çapının ne de numune yoğunluğun artıp azalması numunelerin mekanik özelliklerinde tek başına etkili değildir. Bunlara ek olarak iki etken daha göz önünde bulundurulmalıdır, (1) üretim teknolojisinde kullanılan tarama parametreleri, üretim şartları ve bunlara etkiyen çevre koşulları ve (2) numunenin mikro yapısı. Bu iki nedenden dolayı aynı tasarımlar arasında gerilim-gerinim eğrilerinde ufak sapmalar görülmektedir. Aynı tasarıma sahip ama diğer örneklerden daha zayıf mekanik özellik gösteren numuneler incelenmiş ve genelde bu numunelerde strutların daha düzensiz forma sahip olduğu görülmüştür.

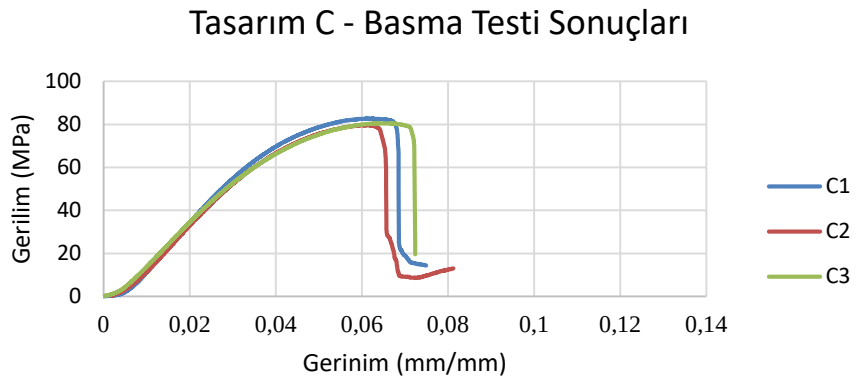
Tasarımların yoğunluğuna bağlı sahip oldukları gözeneklilik oranları numunelerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli parametredir. Numune yoğunluğu artıkça numunelerin basma yük altında daha iyi mekanik özellik gösterdiği Şekil 4.4'te verilen eğri ile gösterilmiştir.

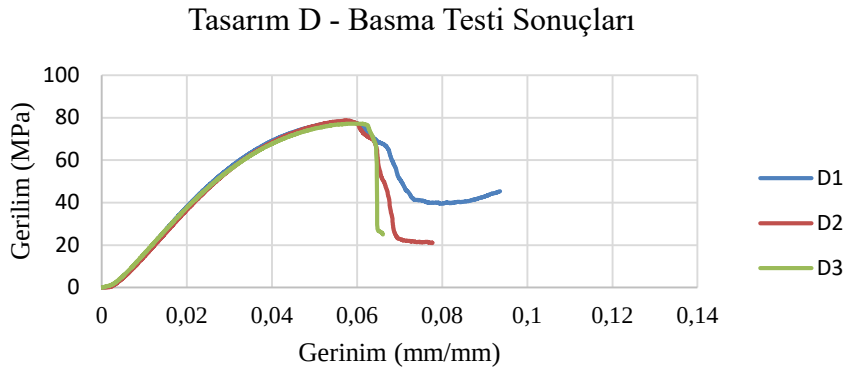


Şekil 4.4. Numunelerin yoğunluğuna karşın kopma gerilmelerinin değişimi









Şekil 4.5. Tasarım A, B, C, D gerilim-gerinim eğrisi Ti-6Al-4V

Geçişli gözenekli ve homojen strut çapındaki üretilen numunelerin basma test sonuçlarından ve matematiksel formülasyondan elde edilen değerler **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'da gösterildi. σ*, matematiksel kopma gerilimi denklem 4.1'le hesaplanır. Geçişli gözenekli tasarımda, 0.3 mm ve 0.4 mm strut çaplı numunelerden kaç birim hacim içerdiği $V_{0.3}$ ve $V_{0.4}$ ile ve sırasıyla homojen gözenekli 0.3 mm ve 0.4 mm strut çapına sahip numunelerin birim kopma gerilmeleri $\sigma'_{0,3}$ ve $\sigma'_{0,4}$ ile verildi.

$$\sigma^* = \sigma'_{0,3} * V_{0,3} + \sigma'_{0,4} * V_{0,4} \quad (4.1)$$

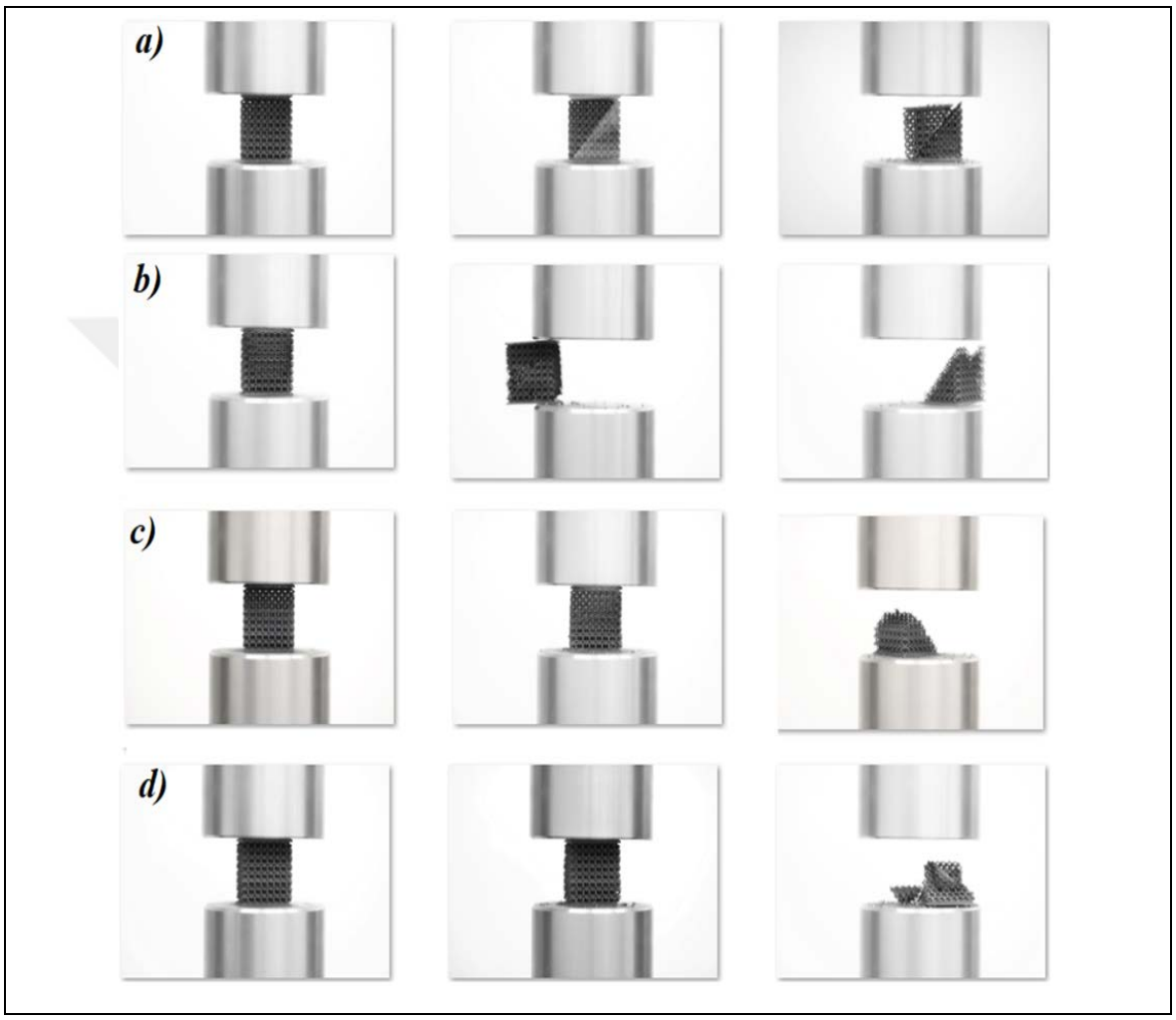
Çizelge 4.2. Ti-6Al-4V gözenekli numunelerin kopma ve izafi kopma gerilmeleri

	Kopma Gerilimi, $\boldsymbol{\sigma}$ (MPa)	Matematiksel Kopma Gerilimi, $\boldsymbol{\sigma^*}$ (MPa)
Tasarım A	64.6667	64.6667
Tasarım B	72.0325	69
Tasarım C	80.9283	80.9283
Tasarım D	78.0062	77

Daha önce yapılan incelemelerde en yüksek strut çaplı numunenin en iyi mekanik özellikleri gösterdiği ve tam tersi içinde durumun geçerli olduğu söylenmişti. Geçişli gözenekli yapılarda ise geçiş yönünün mekanik özelliklere etkisini direk mekanik testlerden alınan sonuçlarla değerlendirmek doğru olmayacağı düşünüldü. Çünkü dış ve iç kısımlarda eşit hacimde yapı bulunmamakta dış kısım, iç kısmın 3 katı kadar hacme sahip olması nedeniyle mekanik özellikleri etkilemektedir. Sadece hacimsel değişimin etkisini görebilmek ve geçiş yönünün etkisini ona göre değerlendirmek için tasarımlar Çizelge 4.2'de verildiği gibi tasarımların matematiksel kopma gerilmeleri hesaplanmış ve test sonuçlarından alınan değerler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirmede geçişli gözenekli yapı kullanmanın her iki yönde de mekanik özellikleri iyileştirdiği ancak Tasarım B'nin yani dıştan içe artan strut çapına sahip tasarımın mekanik özellikleri Tasarım D'ye göre 3.5 kat daha fazla arttırdığı görülmüştür. Daha önce ön tasarım kısmında katı malzemeye uygulanan sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlarda en yüksek gerilim değerlerinin malzemenin orta kısmında oluştuğu ve buna bağlı tasarımın iç kısımlarının daha kalın strut çapına sahip olması öngörülmekteydi. Buradan çıkarılacak sonuç olarak basma yükü altındaki parçada hafifletme yapılmak istenirse içerisinden iç kısımlarının dış kısımlara göre daha yoğun kalacak şekilde çıkarma yapılması doğru bir yaklaşım olabileceğidir.

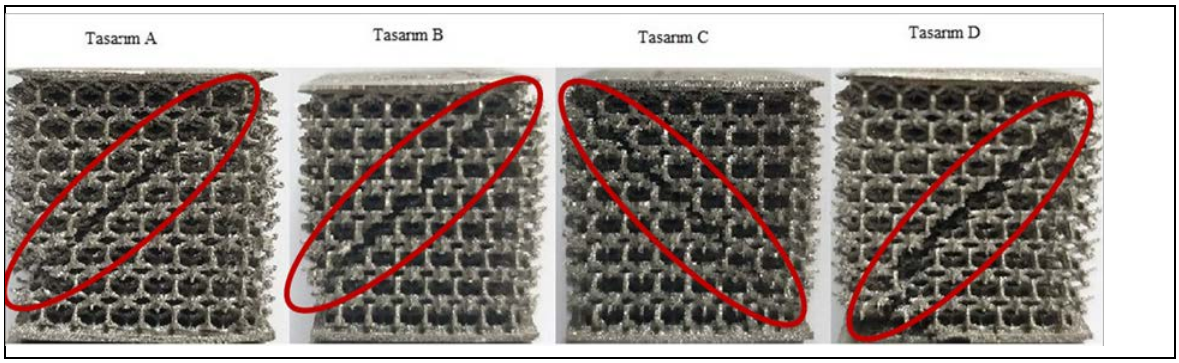
4.3.1. Deformasyon mekanizmaları

Basma testi sırasında numunelerin gösterdikleri deformasyon halleri Resim 4.8'de gösterilmiştir. Hasar analizleri ile numunelerin çökme mekanizmaları karakterize edildi.



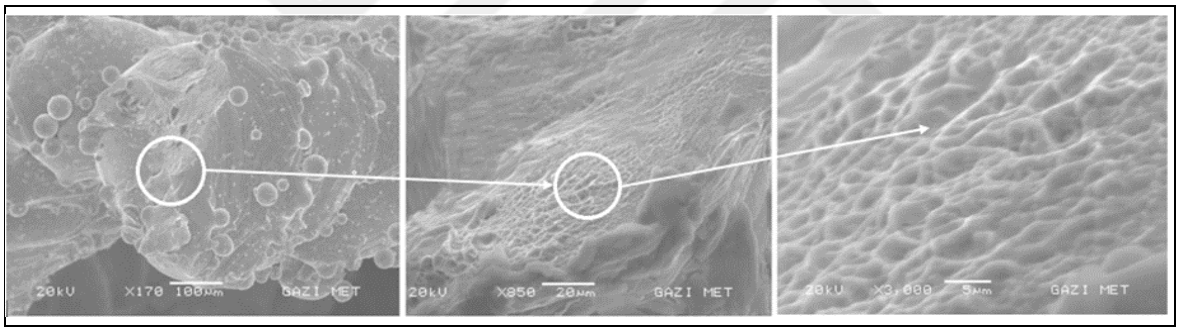
Resim 4.8. Gözenekli Ti-6Al-4V numunelerin a)Tasarım A, b)Tasarım B c)Tasarım C, d)Tasarım D, basma kafaları arasında gösterdiği deformasyon davranışları

Görsellerden de anlaşılacağı üzere her numune benzer şekilde çökme mekanizması göstermiştir. Çalışmada test edilen numuneler sünek malzeme özellikleri karakterize ederek basma yükü altında Resim 4.9'da gösterildiği gibi 45°'lik açıda maksimum kesme geriliminin oluştuğu kesme bandında deformasyona uğramaya başlar. Kesme bandı sünek özellik gösteren malzemelerin bası kuvvetleri altında bir süre homojen şeklini koruduktan sonra gerinimin lokalize olduğu 45°'lik açıda deformasyon çizgisi oluşturması olarak tanımlanır.



Resim 4.9. Ti-6Al-4V tasarımların soldan sağa sırasıyla Tasarım A'dan D'ye deformasyon mekanizmaları

SLE teknolojiyle üretilen numunelerin deformasyon davranışını sadece makroskobik düzeyde incelemenin yetersiz olabileceği makro boyutta sergilediği deformasyon özelliğinin mikro boyutta ki incelemelerde de aynı sonuç verip vermediğini gözlemlemek için basma testi sonucu kopan strut yüzeyleri taramalı elektron mikroskopu altında incelendi.



Resim 4.10. Basma testi sırasında kopan strutların farklı büyütme oranlarında taramalı elektron mikroskopu görüntüleri

Resim 4.10 gözenekli yapıları oluşturan strutların basma yükleri altında gösterdikleri genel deformasyon şeklidir. Soldan sağa doğru büyütülerek alınan görüntülerin ilkinde aynı makro boyutta olduğu gibi strutın kendisinin de kesme kuvveti etkisiyle 45° ye yakın açıda deforme olduğu görülmektedir. En sağda ki görüntüde deforme olan strutın ayın yüzeyine benzer kraterler oluşturduğu keskin, düz yani kırılganlığı gösteren bölgelerin oluşmaması, sünek malzeme özelliği ile karakterize edilmiştir. Kopmalar genellikle gerilimin en yüksek olduğu strutların kesişim noktası olan düğüm noktalarında olduğu meydana gelmiştir. Ayrıca strut yüzeyine yapışan veya strutların içinde kalan ergimemiş tozlardan kaynaklı gerilim konsantrasyonun yüksek olduğu yerlerde genel karektarizasyon uymayan deformasyonlar gözlenmiştir.

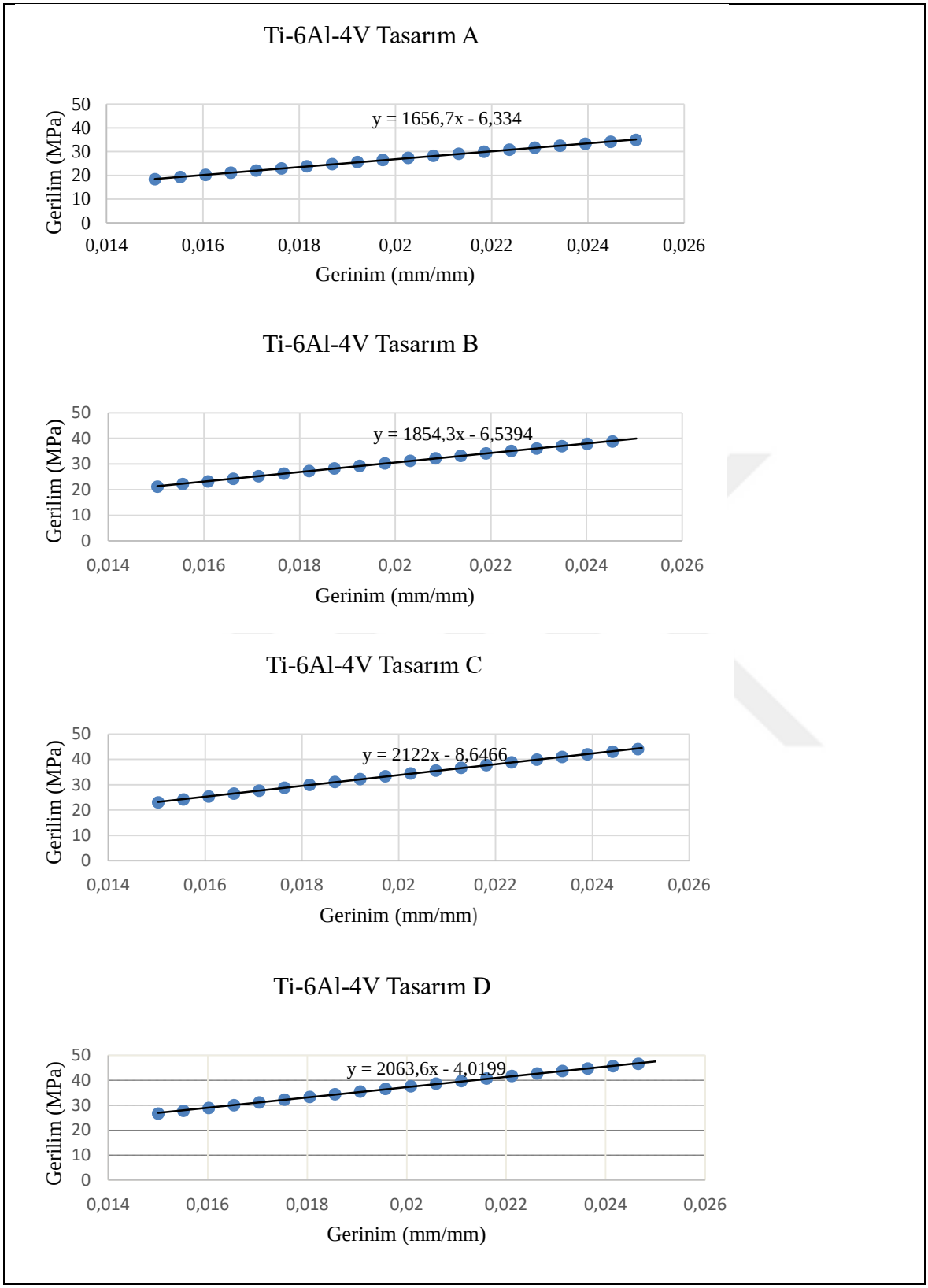
4.3.2. Elastik modül – gözeneklilik ilişkisi

Tasarımların mekanik özelliklerini daha iyi bir şekilde karakterize edip karşılaştırmak ve yorumlamak için her bir numunenin gerilim-gerinim eğrileri analiz edildi ve basma testinden alınan verilerle malzemelerin mekanik özelliklerini iyi bir şekilde ifade eden elastik modülleri ISO Standardı 13314: 2011 yönergelerine göre hesaplandı. ISO Standardı, 20 ve 70 MPa arasındaki gerilimler arasındaki elastik gradyenin belirlenmesini önerir; ancak, bazı örnekler için 70 MPa'nın % 0.2 ofset akma gerilmesi noktasından daha yüksek olması nedeniyle her tasarım için daha önce çizilen gerilim-gerinim eğrilerinin lineer bölgesinde 0.01 gerinim aralığı sabit tutularak çizilen eğrilerin eğimleri ile elastik modülleri hesaplandı. Ti-6Al-4V alaşımından SLE teknolojisiyle üretilen tasarımlara uygulanan basma testinden alınan veriler sonucu oluşturulan gerilim-gerinim eğrisinin lineer bölgesine ait eğriler Şekil 4.6'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Ti-6Al-4V Tasarımların Elastik Modülleri

	Elastik Modülü (MPa)
Tasarım A	1656,7
Tasarım B	1854,3
Tasarım C	2122,0
Tasarım D	2063,6

Tasarımların elastik modülleri bu grafiklerden elde edilen eğimlerle hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir, tabloda verilen değerlerden anlaşılacağı üzere gözeneklilik oranında artışa bağlı tasarım yoğunluklarının azalmasıyla tasarımların elastik modül değerleri azalmıştır.



Şekil 4.6. Ti-6Al-4V Tasarım A, B, C, D elastik bölge eğrileri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında gözenekli yapılara geçiş kazandırarak tasarım yapma ve tasarımların SLE teknolojisi ile üretilebilirliği, üretilen numunelerin hedeflenen tasarımlarla uyumluluğu, mekanik ve fiziksel karakterizasyonu belirlemek gibi deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada geliştirilen yenilikçi ve özgün gözenekli yapı tasarımları gelecekteki akademik ve ticari çalışmalar için altyapı oluşturması hedeflenmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar özet halinde aşağıda sunulmuştur.

- SLE teknolojisinin istenilen tasarımları arzu edilen kafes şekli, gözenek boyut ve oranında imal edilmesine olanak sağlayan bir üretim tekniği olduğu görülmüştür. Bunun sonucu olarak gözenekli yapılar kullanarak kişiselleştirilmiş yapılar gözenek şekli, boyutu ve dağılımı SLE teknolojisi kullanılarak kontrollü olarak imal edilebilmektedir.
- Tasarımların gözeneklilik oranları üç farklı yöntemle ölçülmüş; CAD tabanlı, kuru ağırlık ve Arşimend prensibi, hem pratiklik hem de diğer yöntemlerin ortalama sonucunu vermesi nedeniyle kuru ağırlık ölçüm yönteminin kullanılmasının en ideal olacağı sonucuna varılmıştır.
- Bütün numunelerde ortalama strut çapında tasarıma göre 50-60 µm'lik artış gözlenirken gözenek ölçülerinde diyagonal çapta 70-110 µm'lik düşüş görülmüştür.
- Numunelerin büyütülme yönüne dik eksende alınan kesitinde yapılan SEM incelemesinde strutların içerisinde hava boşlukları ve lazerle taranmamış kusurlara bağlı gözeneklerin çokluğu dikkat çekmiştir.
- Numunelerin strut çapları ve gözenek boyutunda ki değişiklik ve numunelerin kesit ekseni boyunca yapılan SEM görüntülerinde görülen hatalara bağlı gözenekliliğin azaltılması için tarama parametrelerinin ve stratejisinin güncelleştirilmesi gerektiği düşünülmüştür.
- Homojen ve geçişli gözenekli yapıların mekanik davranışını incelemek için, SLE teknolojisi ile Ti-6Al-4V'den dört farklı tasarım gerçekleştirilmiştir. Basma testleri sonucunda, genel olarak tasarımların gerilim-gerinim eğrilerinin sünek malzeme özelliği gösterdiği görülmüştür.
- En iyi mekanik özelliği basma mukavemeti açısından en yüksek strut çapına sahip Tasarım C gösterirken en zayıf mekanik özelliği en düşük strut çapına sahip Tasarım A numunesine ait olduğu görülmüştür. Ayrıca geçişli gözenekli formda olan Tasarım B ve Tasarım D, homojen formda oluşturulan tasarımların ortasında mekanik özellikler

göstermiş ve hacimsel olarak daha fazla, yüksek strut çapına sahip Tasarım D'nin mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu görülmüştür.

- İzafi yoğunluğun mekanik davranışları etkileyen en önemli parametre olduğu, basma testleri ile belirli mekanik özelliklerin izafi yoğunluk (gözeneklilik miktarı) ile ilişkilendirilmesi hedeflenmiş ve izafi yoğunluk arttıkça numunelerin basma yükü altında daha iyi özellik gösterdiği görülmüştür.
- İzafi yoğunlukta 0.34 g/cm^3'lik artış, basma mukavemetinde %23'lük artış sağlamıştır.
- Gözenekli yapılarda geçiş kullanımını her iki geçiş yönünde de, Tasarım B ve Tasarım D sırasıyla % 4.4 ve % 1.3 mekanik özellikleri iyileştirdiği görüşmüştür.
- Geçişli gözenekli yapı tasarımları olan Tasarım B'nin mekanik özellikleri Tasarım D'ye göre 3.5 kat daha fazla iyileştirdiği bunun sonucunda mekanik özellik açısından, gözenekli yapılara geçiş verme yönünün dıştan içe artan strut kalınlığında olmasının daha iyi sonuç vereceği görülmüştür. Ancak bu sonucun, farklı yoğunlukta ki başka tasarımlarla tekrarlanarak, doğruluğunun kanıtlanması gerektiği düşünülmüştür.
- Tasarımların deformasyon mekanizmasında, gözenekliliğin homojen ya da geçişli olmasının pek fark yaratmadığı bütün tasarımların yaklaşık 45°lik açıda lokalleşen kesme gerilmesine bağlı diyagonal bir deformasyon davranışı gösterdiği görülmüştür.

5.1. Öneriler

Sonraki çalışmalarda eşit hacimde kademesel geçiş kazandırılan tasarımlar yapılarak mekanik ve fiziksel özelliklere sadece tasarımın etkisi açısından incelenebilir. Tasarımların sadece kafes yapısı değiştirilerek tekrardan üretilip deneysel testler uygulanabilir. Böylece sonuçların tasarıma özgü karakterize olup olmadığına bakılabilir. Tasarımların dinamik yükler altında nasıl davranış sergileyeceği ve dinamik yüklerin etkileri incelenerek geçişli gözenekliliğin statik ve dinamik yüklere aynı cevabı verip vermeyeceği değerlendirilebilir. Ayrıca tasarımlara deneysel testlerden önce ısıl işlem uygulayarak şuan ki çalışma sonuçları iler karşılaştırılması yapılabilir. Eİ özgü analiz yapan programlar kullanılarak önce üretim parametreleri ile üretim simüle edilerek sonra sınır koşulları ile mekanik özelliklerin test edildiği nümerik analizlerle iteratif denemeler yapılarak sonuçların önceden tahmini ve ona göre üretim stratejisinin geliştirilip sonuçların iyileştirilmesi için çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Ruys, A., D, Sun. Functionally Graded Materials (FGM) and Their Production Methods. www.azom.com. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.azom.com%2Farticle.aspx%3FArticleID%3D1592&date=2019-05-01. Son Erişim Tarihi: 01.03.2019

2. Choy, S.Y., Sun, C. N., Leong, K. F., Wei, J. (2017). Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials ve Design*, 13, 112-120.

3. Technologies, A.C.F.o.A.M. and A.C.F.o.A.M.T.S.F.o. (2012). T*erminology, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.

4. Negi, S., S. Dhiman., and Sharma, R.K. (2013). Basics, applications and future of additive manufacturing technologies, *A review, Journal of Manufacturing Technology Research*, 5(1/2), 75.

5. Campbell, I., Bourell, D., and Gibson, I. (2012). Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. *Rapid Prototyping Journal*, 18(4), 255-258.

6. Gibson I., Rosen D., Stucker B. (2015). *3D Printing, Rapid Prototyping, Direct Digital Manufacturing*. (2nd edition). New York Heidelberg Dordrecht London: Springer, 4-6.

7. Wong, K.V. and Hernandez A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 4, 1-10.

8. Doubrovski, Z., Verlinden J.C., and Geraedts J.M. (2011). *Optimal design for additive manufacturing: opportunities and challenges*. Paper presented at ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Washington, DC.

9. Zhang, B.Q., Pei, X., Zhou, C. C., Fan, Y. J., Jiang, Q., Ronca, A., D'Amora, U., Chen, Y., Li, H. Y., Sun, Y., Zhang, X. D. (2018). The biomimetic design and 3D printing of customized mechanical properties porous Ti6Al4V scaffold for load-bearing bone reconstruction. *Materials ve Design*, 152, 30-39.

10. 17296-2, I.-D. (2015). *Additive Manufacturing – General Principles – Part 2 Overview of Process Categories and Feedstock.*

11. Gonzalez, J.A., Mireles, J., Lin, Y., Wicker, R. B. (2016). Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramics International*, 42(9), 10559-10564.

12. Park, J.S., Lee, M. G., Cho, Y. J., Sung, J. H., Jeong, M. S., Lee, S. K., Choi, Y. J., Kim, D. H. (2016). Effect of Heat Treatment on the Characteristics of Tool Steel Deposited by the Directed Energy Deposition Process. *Metals and Materials International*, 22(1), 143-147.

13. Kim, C., Espalin, D., Cuaron, A., Perez, M. A., MacDonald, E., Wicker, R. B. (2018). Unobtrusive In Situ Diagnostics of Filament-Fed Material Extrusion Additive Manufacturing. *Ieee Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, 8(8), 1469-1476.

14. Sireesha, M., Jeremy L., Kiran A., Babu V. J., Kee, B. B, Ramakrishna, S., (2018). A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry. *RSC Advances*, 8(40), 22460-22468.

15. Çelik İ., Karakoç F., Çakır M. C., Duysak A. (2013). Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*,31, 53-70.

16. Çelik, K. and A. Özkan,. (2017). Eklemeli İmalat Yöntemleri İle Üretim ve Onarım Uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 5(1), 107-121.

17. Ponche, R., Jean-Yves H., Olivier K., Pascal M. (2012). A new global approach to design for additive manufacturing: A method to obtain a design that meets specifications while optimizing a given additive manufacturing process is presented in this paper. *Virtual and Physical Prototyping*, 7(2), 93-105.

18. Boothroyd, G., P. Dewhurst, and W. Knight. (2002). Product design for manufacture and assembly. *Marcel Dekker, New York*, 2(1),2011.

19. Brackett, D., Ashcroft I., and Hague R. (2011). *Topology optimization for additive manufacturing*. Paper presented at Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX. S.

20. Platform, A. and F. Feenstra. (2014). Additive manufacturing: SASAM standardisation roadmap. *SASAM, Support Action for Standardisation in Additive Manufacturing, AM-Platform*.

21. Thompson, M.K., et al. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP annals*, 65(2), 737-760.

22. Bın Maıdın, Campbell S., R.I. and PEI, E. (2012). Development of a design feature database to support design for additive manufacturing. *Assembly Automation*, 32 (3), 235 - 244.

23. Rezaie, R., Badrossamay, M., Ghaie, A., Moosavi, H. (2013). Topology optimization for fused deposition modeling process. *Procedia CIRP*, 6, 521-526.

24. Gibson, L.J. (2005). Biomechanics of cellular solids. *Journal of biomechanics*, 38(3), 377-399.

25. Meyers, M.A. et al. (2008). Biological materials: structure and mechanical properties. *Progress in Materials Science*, 53(1), 1-206.

26. Nikolaev, V. (1980). Effect of porosity on the size of surface microirregularities in the finish lathe-turning and smoothing of sintered materials. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 19(9), 655-659.

27. Zhu, H., Fuh, J., and Lu L. (2007) The influence of powder apparent density on the density in direct laser-sintered metallic parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(2), 294-298.

28. Simchi, A., Petzoldt F, and Pohl H. (2003). On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling. *Journal of materials processing technology*, 141(3), 319-328.

29. Nakajima, H. (2007). Fabrication, properties and application of porous metals with directional pores. *Progress in Materials Science*, 52(7), 1091-1173.

30. Mahmoud L. and Elbestawi M. (2017). Lattice Structures and Functionally Graded Materials Applications in Additive Manufacturing of Orthopedic Implants: *A Review. Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 1(2), 1-13.

31. Reinhart, G., Teufelhart, S., Ott, M., Schilp, J. (2010). *Potentials of generative manufactured components for gaining resource efficiency of production facilities in sustainable production for resource efficiency and ecomobility*. Paper presented at International Chemnitz Manufacturing Colloquium, New York, USA.

32. Liverani, E., Lutey, A. H. A., Fortunato, A., Ascari, A. (2017). *Characterization of Lattice Structures for Additive Manufacturing of Lightweight Mechanical Components*. Paper presented at Proceedings of the Asme 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference, Los Angeles, USA.

33. Butscher, A., Bohner, M., Hofmann, S., Gauckler, L., Müller, R. (2011). Structural and material approaches to bone tissue engineering in powder-based three-dimensional printing. *Acta Biomaterialia*, 7(3), 907-920.

34. Tsinoglou, D., Eggenschwiler P., Dimopoulos T., Hofer, P. (2009). A simplified model for natural-gas vehicle catalysts with honeycomb and foam substrates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 223(6): p. 819-834.

35. Heikkinen, M.S. and Harley, N.H. (2000). Experimental investigation of sintered porous metal filters. *Journal of Aerosol Science*, 31(6), 721-738.

36. Ashby, M. (2013). Designing architectured materials. *Scripta Materialia*, 68(1), 4-7.

37. Brooks, W., Sutcliffe, Cantwell, W., Fox, P., Todd, J., Mines, R. (2005). *Rapid Design and Manufacture of Ultralight Cellular Materials*. Paper presented at Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX.

38. Queheillalt D.T., Hass, D., Sypeck, D. J., Wadley, H. NG. (2001). Synthesis of open-cell metal foams by templated directed vapor deposition. *Journal of Materials Research*, 16(4), 1028-1036.

39. Simoneau, C., Brailovski, V., and Terriault, P. (2016). Design, manufacture and tensile properties of stochastic porous metallic structures. *Mechanics of materials*, 94, 26-37.

40. Queheillalt, D.T., Katsumura, Y., and Wadley H.N.G. (2004). Synthesis of stochastic open cell Ni-based foams. *Scripta Materialia*, 50(3), 313-317.

41. Cansizoglu, O., Harrysson, O., Cormier, D., West, H., Mahale, T. (2008). Properties of Ti–6Al–4V non-stochastic lattice structures fabricated via electron beam melting. *Materials Science and Engineering*: A, 492(1-2), 468-474.

42. Parthasarathy, J., Starly, B., Raman, S., Christensen A. (2010). Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM). *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 3(3), 249-259.

43. Luxner, M.H., Woes, A., Stampfl, J., Fratzl, P., Pettermann, H. E. (2009). A finite element study on the effects of disorder in cellular structures. *Acta Biomaterialia*, 5(1), 381-390.

44. Gibson, L.J. and Ashby, M.F. (1999). *Cellular Solids: Structure and Properties*. (2end edition). Cambridge university press,43-47.

45. Campoli, G., Borleffs, M. S., Yavari, S. A., Wauthle, R., Weinans, H., Zadpoor, A. A. (2013). Mechanical properties of open-cell metallic biomaterials manufactured using additive manufacturing. *Materials ve Design*, 49, 957-965.

46. Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M., Zadpoor, A. A. (2016). Mechanical properties of regular porous biomaterials made from truncated cube repeating unit cells: Analytical solutions and computational models. *Materials Science and Engineering*: C, 60, 163-183.

47. Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M., Zadpoor, A. A. (2016). Mechanics of additively manufactured porous biomaterials based on the rhombicuboctahedron unit cell. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 53, 272-294.

48. Shulmeister, V., Van der Burg, M.W.D., Van der, Giessen E., Marissen, R. (1998). A numerical study of large deformations of low-density elastomeric open-cell foams. *Mechanics of Materials*, 30(2), 125-140.

49. Borleffs, M. (2012). Finite element modeling to predict bulk mechanical properties of 3D printed metal foams. *TUDelft*,1-63.

50. Babaee, S., Jahromi, B. H., Ajdari, A., Nayeb-Hashemi, H., Vaziri, A. (2012). Mechanical properties of open-cell rhombic dodecahedron cellular structures. *Acta Materialia*, 60(6-7), 2873-2885.

51. Zheng, X., Lee, H., Weisgraber, T. D., Shusteff, M., DeOtte, J., Duoss, E. B., Kuntz, J. D., Biener, M. M., Ge, Q., Jackson J. A. (2014). Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials. *Science*, 344(6190), 1373-1377.

52. Warren, W. and Kraynik, A. (1997). Linear elastic behavior of a low-density Kelvin foam with open cells. *Journal of Applied Mechanics*, 64(4), 787-794.

53. Kraynik, A.M. and Reinelt, D.A. (1996). Linear elastic behavior of dry soap foams. *Journal of Colloid and Interface Science*, 181(2), 511-520.

54. Daxner, T., Bitsche, R.D., and Böhm, H.J.. (2006). Space-filling polyhedra as mechanical models for solidified dry foams. *Materials transactions*, 47(9), 2213-2218.

55. Buffel, B., Desplentere, F., Bracke, K., Verpoest, I. (2014). Modelling open cell-foams based on the Weaire–Phelan unit cell with a minimal surface energy approach. *International Journal of Solids and Structures*, 51(19-20), 3461-3470.

56. Ahmadi, S., Campoli, G., Yavari, S. A., Sajadi, B., Wauthlé, R., Schrooten, J., Weinans, H., Zadpoor, A.A. (2014). Mechanical behavior of regular open-cell porous biomaterials made of diamond lattice unit cells. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 34, 106-115.

57. Smith, M., Guan, Z., and Cantwell, W. (2013). Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *International Journal of Mechanical Sciences*, 67, 28-41.

58. Niendorf, T., Brenne, F., and Schaper, M. (2014). Lattice structures manufactured by SLM: On the effect of geometrical dimensions on microstructure evolution during processing. *Metallurgical and Materials Transactions*, B, 45(4), 1181-1185.

59. Labeas, G. and Sunaric, M. (2014). Investigation on the static response and failure process of metallic open lattice cellular structures. *Strain*, 46(2), 195-204.

60. Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M., Zadpoor, A.A. (2017). Analytical relationships for the mechanical properties of additively manufactured porous biomaterials based on octahedral unit cells. *Applied Mathematical Modelling*, 46, 408-422.

61. Ptochos, E. and Labeas, G. (2012). Elastic modulus and Poisson's ratio determination of micro-lattice cellular structures by analytical, numerical and homogenisation methods. *Journal of Sandwich Structures ve Materials*, 14(5), 597-626.

62. Deshpande, V., Ashby, M. and Fleck, N. (2001). Foam topology: bending versus stretching dominated architectures. *Acta Materialia*, 49(6), 1035-1040.

63. Kohnen, P., Haase, C., Bultmann, J., Ziegler, S., Schleifenbaum, J. H., Bleck, W. (2008). Mechanical properties and deformation behavior of additively manufactured lattice structures of stainless steel. *Materials ve Design*, 145, 205-217.

64. Cansizoglu, O., Cormier, D., Harrysson, O., West, H. and Mahale, T. (2006). *An Evaluation of Non-stochastic Lattice Structures Fabricated via Electron Beam Melting*. Paper presented at Proceedings of the 17th Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, USA.

65. Hollister, S.J., Lev, R. A., Chu, T., Halloran, J. W., Feinberg, S. E. (2000). An image-based approach for designing and manufacturing craniofacial scaffolds. *International Journal of Oral ve Maxillofacial Surgery*, 29(1), 67-71.

66. Giannitelli, S., Accoto, D., Trombetta, M., Rainer, A. (2014). Current trends in the design of scaffolds for computer-aided tissue engineering. *Acta Biomaterialia*, 10(2), 580-594.

67. Huang, X., Radman, A. and Xie, Y. (2011). Topological design of microstructures of cellular materials for maximum bulk or shear modulus. *Computational Materials Science*, 50(6), 1861-1870.

68. Li, S., Xu, QS., Wang, Z., Hou, WT., Hao, YL., Yang, R., Murr, LE. (2014). Influence of cell shape on mechanical properties of Ti–6Al–4V meshes fabricated by electron beam melting method. *Acta Biomaterialia*, 10(10), 4537-4547.

69. Bobbert, F., Lietaert, K., Eftekhari, A. A., Pouran, B., Ahmadi, SM., Weinans, H., Zadpoor, A.A., (2017). Additively manufactured metallic porous biomaterials based on minimal surfaces: A unique combination of topological, mechanical, and mass transport properties. *Acta Biomaterialia*, 53, 572-584.

70. Hao, L., Raymon,t D. Yan, C., Hussei, A., Young, P. (2011). *Design and Additive Manufacturing of Cellular Lattice Structures*. Paper presented at the International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (VRAP). Taylor ve Francis Group, Leiria.

71. Ryan, G., Pandit, A., and Apatsidis, D.P. (2006). Fabrication methods of porous metals for use in orthopaedic applications. *Biomaterials*, 27(13), 2651-2670.

72. Chen, Y., Frith, J. E., Dehghan-Manshadi, A., Attar H., Kent, D., Soro, N. D. M., Bermingham, M. J., Dargusch, M. S. (2017). Mechanical properties and biocompatibility of porous titanium scaffolds for bone tissue engineering. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 75, 169-174.

73. Bram M., Stiller, C., Buchkremer, H. P., Stöver, D., Baur, H. (2000). High-porosity titanium, stainless steel, and superalloy parts. *Advanced Engineering Materials*, 2(4), 196-199.

74. Stephani G., Böhm, HD., Sorg, Ch., Hofenauer, A. (2010). *Sinterpaper–A New Type of Highly Porous Material*. Paper presented at Proc Int Conf Cellular, Hong Kong, China

75. Deng, X., Wang, Y., Yan, J., Liu, T., Wang, S. (2016). Topology optimization of total femur structure: application of parameterized level set method under geometric constraints. *Journal of Mechanical Design*, 138(1), 11402.

76. Rashed, M., Ashraf, M., Mines, R., Hazell, P. J. (2016). Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications. *Materials ve Design*, 95, 518-533.

77. Das, M., Balla, V. K., Kumar, T. S., Manna, I. (2013). Fabrication of biomedical implants using laser engineered net shaping (LENS™). *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 72(3), 169-174.

78. Ahmadi, S.M., Yavari, S. A., Wauthle, R., Pouran, B., Schrooten, J., Weinans, H., Zadpoor, A. A. (2015). Additively manufactured open-cell porous biomaterials made from six different space-filling unit cells: The mechanical and morphological properties. *Materials*, 8(4), 1871-1896.

79. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., Raymont, D. (2014). Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. *Materials ve Design*, 55, 533-541.

80. Maskery, I., Hussey, A., Panesar, A., Aremu, A., Tuck, C., Ashcroft, I., Hague, R. (2017). An investigation into reinforced and functionally graded lattice structures. *Journal of Cellular Plastics*, 53(2), 151-165.

81. Yan, C.Z., Hao, L., Hussein, A., Bubb, S. L., Young, P., Raymont, D. (2014). Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(4), 856-864.

82. Maskery, I., Aremu, A. O., Simonelli, M., Tuck, C., Wildman, R. D., Ashcroft, I. A., Hague, R. J. M. (2015). Mechanical properties of Ti-6Al-4V selectively laser melted parts with body-centred-cubic lattices of varying cell size. *Experimental Mechanics*, 55(7), 1261-1272.

83. Attar, H., Calin, M., Zhang, L.C. Scudino, Sergio., Eckert, Jürgen. (2014). Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium. *Materials Science and Engineering*, A, 593, 170-177.

84. Murr, L., Gaytan, SM., Medina, F., Martinez, E., Martinez, JL., Hernandez, DH., Machado, BI., Ramirez, DA., Wicker, RB. (2010). Characterization of Ti–6Al–4V open cellular foams fabricated by additive manufacturing using electron beam melting. *Materials Science and Engineering*, A, 527(7-8), 1861-1868.

85. Algardh, J.K., Horn, T., West, H., Aman, R., Snis, A., Engqvist, H., Lausmaa, J., Harrysson, O. (2016). Thickness dependency of mechanical properties for thin-walled titanium parts manufactured by Electron Beam Melting (EBM)®. *Additive Manufacturing*, 12, 45-50.

86. Cheng, X., Li, SJ., Murr, LE., Zhang, ZB., Hao, YL., Yang, R., Medina, F., Wicker, RB (2012). Compression deformation behavior of Ti–6Al–4V alloy with cellular structures fabricated by electron beam melting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical materials*, 16, 153-162.

87. Ashby, M. (2006). The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 15-30.

88. Yánez, A., Herrera, A., Martel, O., Monopoli, D., Afonso, H. (2016). Compressive behaviour of gyroid lattice structures for human cancellous bone implant applications. *Materials Science and Engineering*: C, 68, 445-448.

89. Xiao, L., Song, W., Wang, C., Liu, H., Tang, H., Wang, J. (2015). Mechanical behavior of open-cell rhombic dodecahedron Ti–6Al–4V lattice structure. *Materials Science and Engineering*, A, 640, 375-384.

90. Tancogne-Dejean, T., A.B. Spierings, and D. Mohr. (2016). Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading. *Acta Materialia*, 116, 14-28.

91. Fousova, M., Vojtech, D., Kubasek, J., Jablonska, E., Fojt, J. (2017). Promising characteristics of gradient porosity Ti-6Al-4V alloy prepared by SLM process. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 69, 368-376.

92. Mahamood, R.M. and Akinlabi, E.T. (2017). *Functionally Graded Materials* (1st edition). Springer.

93. Pei, E., Loh, G. H., Harrison, David., Almeida, H. de A., Monzon., Verona, M. D., Paz, R. (2017). A study of 4D printing and functionally graded additive manufacturing. *Assembly Automation*, 37(2), 147-153.

94. Boccaccio, A., Uva, A. E., Fiorentino, M., Mori, G., Monno, G. (2016). Geometry design optimization of functionally graded scaffolds for bone tissue engineering: A mechanobiological approach. *PloS one*, 11(1), e0146935.

95. Popovich, V., Borisov, E. V., Popovich, A. A., Sufiiarov, V. S., Masaylo, D. V., Alzina, L. (2017). Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties. *Materials ve Design*, 114, 441-449.

96. Popoola, P., Farotade, G., Fatoba, O., Popoola, O. (2016). *Laser Engineering Net Shaping Method in the Area of Development of Functionally Graded Materials (FGMs) for Aero Engine Applications-A Review*. Paper presented at the Fiber Laser, InTech.

97. Gabbrielli, R., I. Turner, and C.R. Bowen. (2008). Development of modelling methods for materials to be used as bone substitutes. *Key Engineering Materials*, 361-363, 903-906.

98. Zheng, J., Q. Qin, and T. Wang. (2016). Impact plastic crushing and design of density-graded cellular materials. *Mechanics of Materials*, 94, 66-78.

99. Zeng, H., Pattofatto S., Zhao H., Girar Y., Fascio V. (2010). Impact behaviour of hollow sphere agglomerates with density gradient. *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(5), 680-688.

100. Brothers, A.H. and D.C. Dunand. (2008). Mechanical properties of a density-graded replicated aluminum foam. *Materials Science and Engineering*, A, 489(1-2), 439-443.

101. Ajdari, A., Canavan, P., Nayeb-Hashemi, H., Warner, G. (2009). Mechanical properties of functionally graded 2-D cellular structures: A finite element simulation. *Materials Science and Engineering*, A, 499(1-2), 434-439.

102. Xiao, L.J. and W.D. Song. (2018). Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: *Experiments. International Journal of Impact Engineering*, 111, 255-272.

103. Papka, S.D. and S. Kyriakides. (1994). In-plane compressive response and crushing of honeycomb. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 42(10), 1499-1532.

104. Fang, Q., Zhang, J., Zhang, Y., Liu, J., Gong, Z. (2015). Mesoscopic investigation of closed-cell aluminum foams on energy absorption capability under impact. *Composite Structures*, 124, 409-420.

105. Zhang, L., Hebert, R., Wright, J. T., Shukla, A., Kim, J. (2014). Dynamic response of corrugated sandwich steel plates with graded cores. *International Journal of Impact Engineering*, 65, 185-194.

106. Pollien, A., Conde, Y., Pambaguian, L., Mortensen, A. (2005). Graded open-cell aluminium foam core sandwich beams. *Materials Science and Engineering*, A, 404(1-2), 9-18.

107. Conde, Y., Pollien A., and Mortensen A. (2006). Functional grading of metal foam cores for yield-limited lightweight sandwich beams. *Scripta Materialia*, 54(4), 539-543.

108. Onal, E., Frith, J. E., Jurg, M., Wu, X. H., Molotnikov, A. (2018). Mechanical Properties and In Vitro Behavior of Additively Manufactured and Functionally Graded Ti6Al4V Porous Scaffolds. *Metals*, 8(4).

109. Li, X., Wang, C., Zhang, W., Li, Y. (2010). Fabrication and compressive properties of Ti6Al4V implant with honeycomb-like structure for biomedical applications. *Rapid Prototyping Journal*, 16(1), 44-49.

110. Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., Ashcroft, I. A., Wildman, R. D., Hague, R. J. M. (2016). A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering*, A, 670, 264-274.

111. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P. (2015). Ti–6Al–4V triply periodic minimal surface structures for bone implants fabricated via selective laser melting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 51, 61-73.

112. Wang, Y., Shen, Y., Wang, Z., Yang, J., Liu, N., Huang, W. (2010). Development of highly porous titanium scaffolds by selective laser melting. *Materials Letters*, 64(6), 674-676.

113. Bandyopadhyay, A., Espana, F., Balla, V. K., Bose, S., Ohgami, Y., Davies, N. M. (2010). Influence of porosity on mechanical properties and in vivo response of Ti6Al4V implants. *Acta Biomaterialia*, 6(4), 1640-1648.

114. Krishna, B.V., S. Bose, and A. Bandyopadhyay. (2007). Low stiffness porous Ti structures for load-bearing implants. *Acta Biomaterialia*, 3(6), 997-1006.

115. Choy, S., Sun, C. N., Leong, K. F., Tan, K. E., Wei, J. (2016). Functionally graded material by additive manufacturing. *Proceedings of the 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-Am 2016)*, 206-211.

116. Han, C., Yan, C., Wen, S., Xu, T., Li, S., Liu, Jie., Wei, Q., Shi, Y. (2017). Effects of the unit cell topology on the compression properties of porous Co-Cr scaffolds fabricated via selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), 16-27.

117. van Grunsven, W., Hernandez-Nava, E., Reilly, G. C., Goodall, R. (2014). Fabrication and mechanical characterisation of titanium lattices with graded porosity. *Metals*, 4(3), 401-409.

118. Li, S., Zhao, S., Hou, W., Teng, C., Hao, Y., Li, Y., Yang, R., Misra, RDK. (2016). Functionally graded Ti-6Al-4V meshes with high strength and energy absorption. *Advanced Engineering Materials*, 18(1), 34-38.

119. Nune, K., Kumar, A., Misra, RDK., Li, SJ., Hao, YL., Yang, R. (2016). Osteoblast functions in functionally graded Ti-6Al-4 V mesh structures. *Journal of Biomaterials Applications*, 30(8), 1182-1204.

120. Zadpoor, A.A. and Hedayati R. (2016). Analytical relationships for prediction of the mechanical properties of additively manufactured porous biomaterials. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 104(12), 3164-3174.

121. Yavari, S.A., Ahmadi, S. M., Wauthle, R., Pouran, B., Schrooten, J., Weinans, H., Zadpoor, A. A. (2015). Relationship between unit cell type and porosity and the fatigue behavior of selective laser melted meta-biomaterials. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 43, 91-100.

122. Kayacan, M.C., Delikanlı, Y. Emre., Duman, B., Özsoy, K. (2018). Ti6Al4V toz alaşımı kullanılarak sls ile üretilen geçişli (değişken) gözenekli numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1).

123. Han, C.J., Li, Y., Wang, Q., Wen, S. F., Wei, Q. S., Yan, C. Z., Hao, L., Liu, J., Shi, Y. S. (2018). Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 80, 119-127.

124. Cao, X.F., Duan, S. Y., Liang, J., Wen, W. B., Fang, D. N. (2018). Mechanical properties of an improved 3D-printed rhombic dodecahedron stainless steel lattice structure of variable cross section. *International Journal of Mechanical Sciences*, 145, 53-63.

125. Zhang, X.Y., Fang, G., Xing, L. L., Liu, W., Zhou, J. (2018). Effect of porosity variation strategy on the performance of functionally graded Ti-6Al-4V scaffolds for bone tissue engineering. *Materials ve Design*, 157, 523-538.

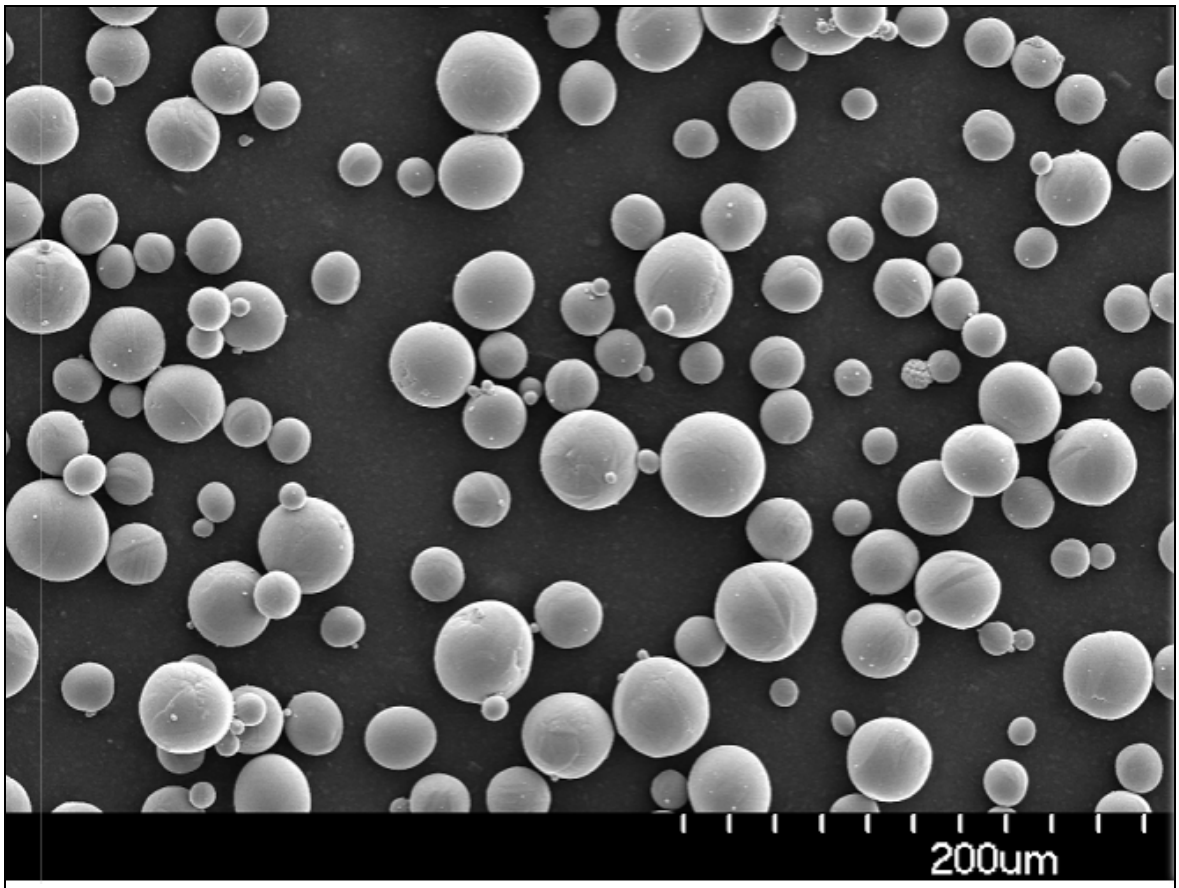
126. Vaithilingam, J., Kilsby, S., Goodridge, R. D., Christie, S. DR., Edmondson, S., Hague, R. JM. (2014). Immobilisation of an antibacterial drug to Ti6Al4V components fabricated using selective laser melting. *Applied Surface Science*, 314, 642-654.

127. Rafi, H., Karthik, NV., Gong, H., Starr, T. L., Stucker, B. E. (2013). Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(12), 3872-3883.

128. Qiu, C., Yue, S., Adkins, N. JE., Ward, M., Hassanin, H., Lee, P. D., Withers, P. J., Attallah, M. M. (2015). Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering*, A, 628, 188-197.

EKLER

EK-1. Üretimde kullanılan Ti-6Al-4V grade 5 alaşım tozu



TEKNİK ÖZELLİKLER:

- APveC Ti-6Al-4V tozu sahip olduğu yüksek küresellik ve çok düşük uydular nedeniyle, partikül büyüklüğü dağılımı oldukça düzgündür.
- D10, D50 ve D90, partikül boyutu dağılımı kaliteli ve güvenilir üretim imkanı sunar.
- APA™ Plazma Atomizasyon teknolojisi kullanılarak üretilen tozlar eklemeli imalatın gerektirdiği tüm özelliklere sahiptir.
- Parçacık büyüklüğü dağılımı, ASTM B822'ye göre lazer kırınımı ile ölçülür.
- Toz kimyasal bileşimi ASTM B348, ASTM F136, ASTM F1580, ASTM F2924, ASTM F3001, AMS 1498 standartlarına uygun olarak ölçülür.

EK-2. Üretimde kullanılan seçici lazer ergitme cihazı Ermaksan EnaVision



TEKNİK ÖZELLİKLER:

- Tarama hızı: 7 m/s.
- Tarama sistemi: 3D dinamik odaklı tarama sistemi.
- Z eksen pozisyonlama: +- 6 mm.
- Soğutma sistemi: su, hava.
- Maksimum tarama açısı: 0.38 objektif olmadan, 0.22 rad objektifle.
- Üretim hacmi (mm^3): 250x250x300.
- Ayarlanabilir katman yüksekliği: 100-20 µm.
- Tarama hızı: 7m/s kadar.
- Tarayıcı sistem: 3D ayarlanabilir optik sistem, değişken lazer çapı ile.
- Yardımcı gaz: Argon, Nitrojen.
- Yardımcı gaz tüketim: <3,5 L/dk
- İşletim sistemi:Windows 7

EK-3. Jeol JSM 6060 taramalı elektron mikroskopu



TEKNİK ÖZELLİKLER:

- Taramalı elektron mikroskobu (SEM) bilgisayar bağlantısı ile dijital olarak kontrol edilmektedir.
- Elektron kaynağı olarak, K- tipi tungsten filament kullanılmaktadır.
- 5 eksen Kartezyen sistem kontrolü (X=20mm, Y=10mm, Z=40mm, Eğilme= -10˚ ve +90˚, Dönme=360˚) ile çalışmaktadır.
- 30 kV hızlandırma voltajı ve 8 mm çalışma aralık koşullarında 3,5 nm çözünürlük elde edilebilmektedir.
- SEM'de 0,5 kV-30 kV hızlandırma voltaj aralığında çalışma yapılabilmektedir.
- 8x–300.000x arası büyütme kapasitesi ile çalışmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı : KAŞ, Mustafa
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 11.03.1993, Mersin
Medeni hali : Bekâr
Telefon : 0 (507) 5095915
e-mail : mustafakas@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / MAKİNA Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gaziantep Üniversitesi / MAKİNA Mühendisliği	2011
Lise	Silifke Göksu Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2017-2018	Gazi Üniversitesi BAP Projesi	Makina Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Kıtay, Ö., Taşcıoğlu, E., Kaş, M., Nesli, Ş., Kaynak, Y., Yılmaz, O. (2018). Seçici lazerle ergitme yöntemi ile üretilen IN625 alaşımlı parçada yüzey bütünlüğünün incelenmesi, *18. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi,* Eskişehir, Türkiye. ss 143.

Hobiler

-



GAZİ GELECEKTİR..