
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

HİBRİT HÜCRELERE SAHİP KAFES YAPILARIN EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Hüseyin KIRATLI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2024

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.

Hüseyin KIRATLI

05 / 01 / 2024

HİBRİT HÜCRELERE SAHİP KAFES YAPILARIN EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hüseyin KIRATLI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Eklemeli imalat (Eİ) günümüzde kafes yapıların üretiminde tercih edilen, tasarlanan modellerin katman katman üretimi esasına dayanan bir üretim yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında Ti6Al4V tozu kullanılarak Elektron Işını ile Ergitme (EIE) yöntemiyle HMK (Hacim Merkezli Kübik), YMK (Yüzey Merkezli Kübik) ve bu iki birim hücrenin iç içe geçmesiyle elde edilen HYMK (Hacim Yüzey Merkezli Kübik) hibrit hücresinden oluşan 3 tip kafes yapısına sahip numuneler üretilmiştir. Bu kafes yapıların hacimsel boşluk oranları Arşimet yöntemiyle ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda kolonlardaki kalınlaşmalardan ve yapılar içerisindeki ergimemiş sinterlenmiş tozlardan kaynaklı olarak hacimsel boşluk oranının tasarımdakine oranla düşük olduğu görülmüştür. Tasarımla gerçek numune arasındaki sapmalar sırasıyla büyükten küçüğe HYMK hibrit, YMK ve HMK hücrelerinde görülmüştür. Kafes yapılara 3 nokta eğme ve basma testleri uygulanmıştır. Basma testi sonucunda akma dayanımı değerleri sırasıyla büyükten küçüğe HYMK hibrit, YMK ve HMK hücrelerinde görülmüştür. Ayrıca YMK hücre yapısının gevrek, HMK ve HYMK hibrit hücre yapılarının ise sünek davranış gösterdiği görülmüştür. 3 nokta eğme testi sonucunda maksimum eğilme dayanımı değerleri sırasıyla büyükten küçüğe HYMK hibrit, YMK ve HMK hücrelerinde görülmüştür. Bu testlerden sonra numunelerin kırılma yüzeyleri ile kolonları taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. İncelemeler sonucunda tasarıma göre üretim sonrasında kolonlarda kalınlaşmaların oluştuğu, kırılmaların kolonların düğüm noktalarına yakın bölgelerde gerçekleştiği görülmüştür. Basma ve 3 nokta eğme testleri sonrasında numunelerin kırılma yüzeylerinde hem çukurcuklu yapı hem de düz (klivaj) alanlar gözlemlendiği için kafes yapı kırılma yüzeylerinin hem sünek hem de gevrek bir davranış sergilediği söylenebilir.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Eklemeli imalat, kafes yapıları, hibrit birim hücre, elektron ışını ile ergitme
Sayfa Adedi	:	87
Danışman	:	Doç. Dr. Elmas SALAMCI

INVESTIGATION OF MANUFACTURABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVE MANUFACTURING OF LATTICE STRUCTURE WITH HYBRID UNIT CELL

(M. Sc. Thesis)

Hüseyin KIRATLI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) emerges as a manufacturing method based on the layer-by-layer manufacturing of designed models, which is preferred in the manufacturing of lattice structures today. Within the scope of this study, 3 types of lattice samples consisting of BCC (Body Centered Cubic), FCC (Face Centered Cubic) and BFCC (Body Face Centered Cubic) hybrid unit cells obtained by composition of these two unit cells by Electron Beam Melting (EBM) method using Ti6Al4V powder were manufactured. The porosities of these lattice structures were measured by the Archimedes method. As a result of the measurement, it has been observed that the porosity is lower than that in the design, due to the thickening in the struts and the unmelted sintered powders in the structures. Deviations between design and the real sample method were seen in BFCC hybrid, FCC and BCC cells, from large to small, respectively. Three point bending and compression tests were applied to the lattice structures. As a result of the compression test, yield strength values were observed in BFCC hybrid, FCC and BCC cells, from large to small, respectively. In addition, it was observed that FCC cell structure behaved as brittle, while BCC and BFCC hybrid cell structures behaved as ductile. As a result of the 3 point bending test, the maximum bending strength values were observed in BFCC hybrid, FCC and BCC cells, from large to small, respectively. Also, the fracture surfaces of the samples and the struts were examined by scanning electron microscope. As a result of the examinations, it was observed that thickening occurred in the columns after the manufacturing in comparison with the designed models, and the fractures occurred in the regions close to the nodal areas of the columns. Since there were both dimpled and flat (cleavage) areas on the fracture surfaces of the samples after the compression and 3-point bending tests, it can be said that the fracture surfaces of the lattice structures exhibited both ductile and brittle behavior.

Science Code	:	91438
Key Words	:	Additive manufacturing, lattice structures, hybrid unit cell, electron beam melting
Page Number	:	87
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Elmas SALAMCI

TEŞEKKÜR

Tez süreci boyunca sunduğu değerli desteklerinden, anlayışından ve rehberliğinden dolayı danışman hocam Doç. Dr. Elmas SALAMCI'ya, tez savunma sürecindeki rehberliklerinden dolayı Prof. Dr. Yusuf USTA ve Doç. Dr. Reza AGHAZADEH hocalarıma, numune üretimi ve analizler konusundaki destekleri ve yol göstericiliğinden dolayı değerli hocam Prof. Dr. Metin Uymaz SALAMCI'ya, üretim konusundaki desteğinden dolayı Öğr. Gör. Barış Can Toprak'a, üretim sonrası işlemlerdeki desteklerinden dolayı Murat YILDIZ ve Nurettin AKIN'a, taramalı elektron mikroskobu (ing. Scanning electron microscope - SEM) görüntülemeleri konusundaki desteklerinden dolayı Öğr. Gör. Gözde ALTUNTAŞ'a, 3 nokta eğme ve basma testlerindeki desteklerinden dolayı Necmettin Erbakan Üniversitesi Bitam ve Ali Osman ALTIN'a, yüksek lisans tez projeleri kapsamındaki 7957 kodlu proje için vermiş oldukları desteklerden dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine ve Gazi Üniversitesi EKTAM'daki tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tüm tez süreci boyunca anlayışları ve desteklerinden dolayı çok değerli aileme ve arkadaşım Berivan GÜL'e 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 ARAŞTIRMASI 3

2.1. Eklemeli İmalat 3

2.1.1. Eklemeli imalat çeşitleri 4

2.1.2. Eklemeli imalatta kullanılan malzemeler 12

2.1.3 Metal eklemeli imalat 13

2.1.4. Eklemeli imalatın avantajları ve geliştirilmesi gereken yönleri 14

2.1.5. Eklemeli imalatın kullanım alanları 15

2.2. Kafes Yapılar 16

2.2.1 Dikme tabanlı kafes yapılar 17

2.3. Literatürdeki Benzer Çalışmalar 18

3. MALZEME VE YÖNTEM 29

3.1. Tasarım 29

3.1.1. Birim hücrelerin tasarımı 29

3.1.2. 3 nokta eğme numunelerinin tasarımı 30

3.1.3. Basma numunelerinin tasarımı 33

3.2. Üretim 36

3.2.1. Üretim ön hazırlığı 36

Sayfa

3.2.2. Numunelerin EIE yöntemiyle üretimi ……..……..... 37
3.2.3. Üretim sonrası işlemler ……..……..... 41
3.3. Hacimsel Boşluk Oranının Belirlenmesi ……..……. 44
3.4. Basma ve 3 Nokta Eğme Testleri ……..…… 46
3.4.1. Basma testi ……... 47
3.4.2. 3 nokta eğme testi ……..... 47
3.5. Görüntüleme Yöntemi …… 48
3.5.1. Taramalı Elektron mikroskop incelemesi …… 48
4. TARTIŞMA VE BULGULAR ……...……. 51
4.1. Toz Boyut ve Küresellik Bulguları ……..... 51
4.2. Hacimsel Boşluk Oranı Bulguları ……..... 52
4.3. Basma Testi Bulguları …… 56
4.4. 3 Nokta Eğme Testi Bulguları ……... 62
4.5. Taramalı Elektron Mikroskobu Bulguları …….. 65
4.5.1. Basma numunelerinin taramalı elektron mikroskobu bulguları …….. 65
4.5.2. 3 nokta eğme numunelerinin taramalı elektron mikroskobu bulguları ... 69
5. SONUÇ VE ÖNERİLER ……... 73
KAYNAKLAR ……..... 77
ÖZGEÇMİŞ ……... 87

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Hücre tiplerinin adlandırılması …….. 25

Çizelge 2.2. İki farklı birim hücrenin birleşmesiyle elde edilen hibrit kafes çekirdeğe sahip sandviç yapının düzenlenmesini ve numaralandırılmasını gösteren şematik diyagram ……. 26

Çizelge 2.3. Tipik kafes numunelerin deney ve sonlu elemanlar analiziyle elde edilen basma ve başlangıç tepe dayanımının kıyaslanması a) homojen olarak tek tip hücreden oluşan, b) yatay düzenlemeyle oluşturulan, c) dikey düzenleme ile oluşturulan ve d) dairesel düzenleme ile oluşturulan kafes yapılar …… 27

Çizelge 3.1. Ti6Al4V tozunun içeriği 37

Çizelge 3.2. EIE yöntemi üretim parametreleri 38

Çizelge 3.3. Üretilmiş numunelerin sayısı..... 40

Çizelge 3.4. Numunelerin adlandırılması ……. 44

Çizelge 4.1. Numunelerin Arşimet ve tasarıma göre hacimsel boşluk oranları ve aralarındaki sapmalar..... 54

Çizelge 4.2. Geometrilerin akma dayanımı ve akma dayanımının elde edildiği gerinim değerleri ...……. 60

Çizelge 4.3. Maksimum eğilme dayanımı ve dayanımın elde edildiği gerinim değerleri ……..... 64

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Eklemeli imalat çeşitleri 4

Şekil 2.2. Sistem çalışma prensibi 4

Şekil 2.3. Yönlendirilmiş enerjiyle biriktirme yöntemleri a) toz üflemeli ve b) ortak eksenli tel beslemeli 6

Şekil 2.4. Malzeme ekstrüzyon yöntemleri a) ergiyik filament fabrikasyonu ve b) kaynaşmış pelet ekstrüzyonu 7

Şekil 2.5. Malzeme püskürtme yöntemi 8

Şekil 2.6. Isı kaynağı olarak lazer kullanan toz yataklı eklemeli imalat yöntemleri a) seçici lazer ergitme ve b) seçici lazer sinterleme 9

Şekil 2.7. Ultrasonik eklemeli imalat prosesi 10

Şekil 2.8. Havuz fotopolimerizasyon çeşitleri a) stereolitografi, b) dijital ışık işleme, c) sürekli dijital ışık işleme ve d) doğrudan uv baskı 11

Şekil 2.9. Eklemeli imalatta kullanılan malzemeler 12

Şekil 2.10. Elektron ışını ile ergitme yöntemi 14

Şekil 2.11. Eklemeli imalatın kullanım alanları..... 16

Şekil 2.12. Kafes yapı a) 2 boyutlu ve b) 3 boyutlu 17

Şekil 2.13. Dikme tabanlı kafes yapılar a) HMK, b) dikey dikmeli hacim merkezli kübik, c) YMK, d) dikey dikmeli yüzey merkezli kübik, e) kübik, f) sekizli kafes, g) elmas 18

Şekil 2.14. Kafes yapılar a) HS1 yapısı ve b) HS2 yapısı 19

Şekil 2.15. Dört farklı yapının sonlu elemanlar modeli..... 20

Şekil 2.16. Dört farklı birim hücre türü a) Sekizli birim hücre, b) iç oktahedron (kırmızı) ve dış eğilme baskın tamamlayıcı yapının şematik gösterimi, c) HS1 hibrit birim hücresinin geometrik topolojisi, d) HS2 hibrit birim hücresinin geometrik topolojisi 21

Şekil 2.17. Yarı statik tek eksenli basma testlerinin gerilme-gerinim grafikleri a) yaygın dikme çapına göre (1.6 mm) ve b) yaygın bağıl yoğunluğa göre (~0.15)..... 21

Şekil 2.18. Farklı gerinimlerdeki değerlerindeki sonlu eleman simülasyonları 22

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.19. Farklı açılarda üretilmiş numunelerin çekme gerilme-gerinim grafiği..... 23

Şekil 2.20. Hibrit kafes yapının topolojik tasarımı 23

Şekil 2.21. Deneysel çalışma ve sonlu elemanlar analizi gerilme – gerinim grafiği 24

Şekil 2.22. Dört farklı birim hücre tipi 25

Şekil 2.23. Hibrit yapının düzenlenmesi a) yatay, b) dikey ve c) dairesel 25

Şekil 3.1. Birim hücre tasarımları a) HMK, b) YMK ve c) HYMK hücre yapısı 29

Şekil 3.2. Numune boyutlarının adlandırılması 30

Şekil 3.3. 3 nokta eğme numunelerinin boyut ölçülendirmesi..... 32

Şekil 3.4. 3 nokta eğme tasarımları a) HMK, b) YMK ve c) HYMK kafes yapısı 32

Şekil 3.5. Numune boyutları, W_0: Kesitin kenar uzunluğu, H_0: Kesitin yüksekliği..... 33

Şekil 3.6. Basma numunelerinin boyut ölçülendirmesi 34

Şekil 3.7. Kafes yapı tasarımları a) HMK, b) YMK ve c) HYMK yapısı ……. 35

Şekil 3.8. Materialise Magics programında numunelerin tablaya yerleştirilmiş hali 37

Şekil 4.1. Ortalama toz boyut ölçümü …...…..… 51

Şekil 4.2. Ti6Al4V tozunun küreselliği 51

Şekil 4.3. Hacimsel boşluk oranları ……... 54

Şekil 4.4. Gerilme-gerinim grafiği ……. 57

Şekil 4.5. Elastik bölgenin yakınlaştırıldığı basma gerilme-gerinim grafiği 57

Şekil 4.6. Kafes yapıların basma davranışları..... 59

Şekil 4.7. Gerilme değerlerinin grafiksel gösterimi ……... 60

Şekil 4.8. 3 nokta eğme numunelerinin gerilme-gerinim grafiği..... 62

Şekil 4.9. Elastik bölgenin yakınlaştırıldığı 3 nokta eğme gerilme-gerinim grafiği..... 63

Şekil 4.10. Gerilme değerlerinin grafiksel gösterimi ……. 64

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Microtrac MRB SYNC toz boyutu ve şekil analiz cihazı 38

Resim 3.2. Arcam A2X EIE cihazı..... 39

Resim 3.3. EIE yöntemiyle üretim görselleri a) üretim öncesi tablanın görüntüsü, b) üretim esnasındaki ergitme prosesi, c) üretim esnasında ön ısıtma prosesi ve d) üretimin tamamlanmasının ardından tabla ve numunelerin temizlenmeden önceki görüntüsü..... 40

Resim 3.4. Tablada bulunan sinterlenmiş tozlar temizlendikten sonraki görünümleri... 41

Resim 3.5. Numunelerin iç kısmında kalan sinterlenmiş tozların PRS cihazında temizlenmesi işlemi 41

Resim 3.6. Numunelerin destek yapılarından ayrılan yüzeylerinin eğelenmesi işlemi.. 42

Resim 3.7. 3 nokta eğme numunesi üretim sonrası boyutları 43

Resim 3.8. Basma numunesi üretim sonrası boyutları..... 43

Resim 3.9. Ultrasonik temizleme cihazında numunelerin temizlenmesi 44

Resim 3.10. Arşimet deney düzeneği 45

Resim 3.11. Numunenin havada ve suda tartılması..... 46

Resim 3.12. Shimadzu AGS-X 100 kN test cihazı..... 46

Resim 3.13. Basma test düzeneği..... 47

Resim 3.14. 3 nokta eğme test düzeneği..... 48

Resim 3.15. Jeol JSM-6060LV taramalı elektron mikroskopu..... 49

Resim 4.1. SEM'de birim hücre kolon kalınlıklarının ölçümü..... 55

Resim 4.2. Birim hücre kolonlarındaki ergimemiş tozların taramalı elektron mikroskop görüntüsü 55

Resim 4.3. Basma numunelerinin aşamalı test görüntüleri 58

Resim 4.4. 3 nokta eğme numunelerinin aşamalı test görüntüleri..... 63

Resim 4.5. Basma numunelerinin basma testi sonrası SEM görüntüleri 65

Resim 4.6. Basma numunelerinin SEM'de kolon kalınlık ölçümleri..... 66

Resim **Sayfa**

Resim 4.7. Dikme kırılmasının gerçekleştiği bölge 67

Resim 4.8. Kırılma yüzeyi SEM görüntüsü 68

Resim 4.9. Basma testi sonrası kırılma yüzeyi SEM görüntüsü 68

Resim 4.10. 3 nokta eğme numunelerinin basma testi sonrası SEM görüntüleri 69

Resim 4.11. Dikme kırılmasının gerçekleştiği bölge 69

Resim 4.12. 3 nokta eğme numunelerinin SEM üzerinden kolon kalınlık ölçümleri ... 70

Resim 4.13. 3 nokta eğme numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü..... 71

SİMGELER VE KISALTMALAR

Tez kapsamında kullanılan simgeler ve kısaltmalar ile açıklamaları aşağıdaki gibi sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
°	Açı
ε	Gerinim
%	Yüzde
Ø	Çap
µm	Mikrometre
°C	Derece santigrat
ρ	Numune yoğunluğu
ρ_l	Sıvı yoğunluğu
H_0	Numune yüksekliği
W_0	Numune kesitinin kenar uzunluğu
Al	Alüminyum
b	Kafes yapı genişliği
C	Karbon
cm	Santimetre
D_a	Ortalama toz boyutu
dk	Dakika
F	Kuvvet
Fe	Demir
gr	Gram
H	Hidrojen
kN	Kilonewton
kV	Kilovolt
L	Kafes yapı uzunluğu
L_0	Kafes yapının ilk uzunluğu
L(t)	Kafes yapının son uzunluğu
m	Geometrik sapma katsayısı

Simgeler	**Açıklamalar**
Ma	Miliamper
Mg	Magnezyum
MPa	Megapaskal
N	Azot
O	Oksijen
s	Saniye
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
W_a	Numunenin havadaki yoğunluğu
W_l	Numunenin sıvıdaki yoğunluğu
Y	İtriyum

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
3B	3 boyutlu
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
AM	Additive manufacturing
BCC	Body centered cubic
BFCC	Body face centered cubic
BK	Basit kübik
DEB	Doğrudan enerji biriktirme
DTKY	Dikme tabanlı kafes yapılar
EBM	Electron beam melting
EDO	Eşkenar dörtgen onikiyüzlü
EE	Enerji emilim
EFF	Ergiyik filament fabrikasyonu
EIE	Elektron ışını ile ergitme
Eİ	Eklemeli imalat
EKTAM	Eİ Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi
FCC	Face centered cubic

Kısaltmalar	Açıklamalar
HF	Havuz Fotopolimerizasyonu
HMK	Hacim merkezli kübik
HYMK	Hacim yüzey merkezli kübik
HYVK	Hacim yüzey merkezli verteks kübik
ing.	İngilizcesi
KPE	Kaynaşmış pelet ekstrüzyonu
KY	Kafes yapı
ME	Malzeme ekstrüzyonu
MEİ	Metal eklemeli imalat
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MP	Malzeme püskürtme
PLA	Polilaktik asit
PRS	Powder recovery system
PT	Plaka tabakalaştırma
S	Sekizli
SEA	Sonlu elemenlar analizi
SEM	Scanning Elektron Microscopy
SLE	Seçici lazer ergitme
SLS	Seçici lazer sinterleme
TPMS	Triply periodic minimal surfaces
TYB	Toz yataklı birleştirme
UV	Ultraviyole
YMK	Yüzey merkezli kübik

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat, üç boyutlu (3B) modellerin doğrudan üretilebilmesi yönüyle üretim sürecini daha kolay planlayabilmemize olanak sağlamaktadır. Bu teknoloji, bilgisayar destekli tasarım sisteminde tasarlanan modelin her bir katmanına malzeme eklenmesi prensibine göre çalışır. Eklemeli imalat, düşük üretim maliyetine sahip olması, daha az atık oluşturması ve karmaşık geometrilerin elde edilebilmesi yönleriyle dikkat çekmektedir. Kafes yapıların, kalıp endüstrisi için araçların, protez, tıbbi implantların vb. üretiminde sunduğu esneklikten dolayı tercih edilen bir üretim metodudur. Metal eklemeli imalat ise talebe uygun olarak üretim esnekliğine sahip olduğundan hızlı prototipleme ve hızlı imalata olanak sağlamaktadır. Bu teknoloji karmaşık geometrilere sahip, tamamen birbirinden bağımsız parçaların az sayıda üretimini yapan endüstriler için uygundur. Ayrıca ürünlerin geliştirme ve pazara sunulma sürelerinin azaltılmasını sağlamaktadır [1–4].

Literatürde YMK, HMK ve bu iki birim hücrenin iç içe geçmesiyle elde edilen HYMK hibrit hücre geometrilerinin Ti6Al4V tozu kullanılarak EIE metodu ile üretilmiş, basma, 3 nokta eğme karakteristiğini, hacimsel boşluk oranlarını ve mikroyapısını incelemeye yönelik çalışmalara rastlanmamıştır. Tez kapsamında belirlenen geometriler Ti6Al4V tozu kullanılarak EIE metodu ile üretilmiş ve bu numunelere 3 nokta eğme ve basma testleri uygulanmıştır. Böylece farklı bir toz yataklı eklemeli imalat metodu ve malzemenin kullanılmasının, belirlenen hücre yapılarındaki basma ve eğilme dayanımına etkisinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Tez kapsamında ilgili kafes yapıların Arşimet yöntemi ile hacimsel boşluk oranlarını belirlenmiş olup tasarımla üretim sonrası hacimsel boşluk oranları kıyaslanmıştır. Böylece üretim sonrası geometri ile tasarım arasındaki farklar ortaya konulmuştur. Ayrıca ilgili kafes yapıların dikmelerinin ve dikme kırılma yüzeylerinin SEM ile incelemesi yapılmıştır. Böylece kolonlardaki kalınlaşmalar, ergimemiş tozların varlığı gözlemlenmiş ve kolon kırılma yüzeyleri incelenerek malzemenin kırılma davranışlarının ortaya konulması amaçlanmıştır. Tez çalışması giriş, literatür araştırması, malzeme ve yöntem, tartışma ve bulgular, sonuç ve öneriler olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde araştırmanın amacına, önemine, kullanılan araştırma yöntemlerine ve tezin bölümlerine yer verilmiştir. Literatür araştırması bölümünde eklemeli imalat açıklanmış; eklemeli imalatta kullanılan malzemelerden bahsedilmiş; eklemeli imalatın türleri, avantajları ve geliştirilmesi gereken yönleri ile kullanım alanları açıklanmıştır. Ayrıca kafes

yapılar ve dikme tabanlı kafes yapılar açıklanmış, tez kapsamında yapılacak çalışmalar ile benzerlik ve farklılıklardan bahsedilmiştir. Malzeme ve yöntem bölümünde kafes yapıların tasarımlarının nasıl oluşturulduğundan, üretimde kullanılan tozun boyutunun ve küreselliğinin ölçümünden, üretim prosesi ve sonrasındaki işlemlerden, hacimsel boşluk oranının belirlenmesinden, basma ve 3 nokta eğme testlerinin yapılış sürecinden ve kullanılan görüntüleme yönteminden bahsedilmiştir. Tartışma ve bulgular bölümünde toz boyutu ve küreselliği, hacimsel boşluk oranı ölçümleri, basma ve 3 nokta eğme testleri ve görüntüleme yöntemi ile elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Son bölüm olan sonuç ve öneriler bölümünde ise araştırma problemi, yöntemi, yorumu, bulgulardan çıkarılan sonuçlara göre gelecekte yapılabilecek çalışmalar konusunda öneriler belirtilmiştir.

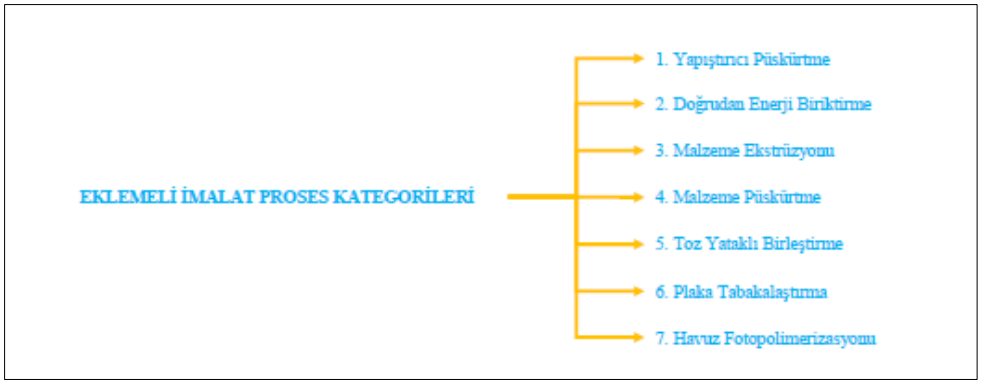
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Eklemeli İmalat

Günümüzde üretim bakış açısı sürekli değişmektedir. Sürdürülebilir tasarım ile metal ve alaşım gibi malzemelerin kullanımındaki rekabet artışından kaynaklı talebi mevcut yöntemlerle karşılamak zor hale gelmiştir. Bu rekabet artışı sosyal ve çevresel dönüşüm için gerekli potansiyele sahip olan Eİ teknolojisini ortaya çıkarmıştır [5]. Eİ 1990'lı yıllarda 3 boyutlu parçaların katmanlar halinde üretimini tarif etmek üzere kullanılmaya başlanmıştır. Talaşlı imalat gibi geleneksel imalat yöntemlerinin aksine Eİ daha az zaman ve malzeme kullanılarak 3B olarak tasarlanmış bir modelin katmanlar halinde üretimi esasına dayanmaktadır [6, 7]. Eİ ayrıca özel parçaların üretimine olanak sağlaması, atık malzemelerin maliyetlerinin ve işçi ücretlerinin azaltılması, parça ölçülerinin doğruluğu ve hassasiyeti yönleriyle geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla avantajlı hale gelmektedir [8]. Geleneksel imalat yöntemlerinde polimer, metal ve seramik parçalara istenilen şekli vermek için kalıplar kullanılmaktadır. Fakat Eİ'de imalatı zor gözüken parçalar rahatlıkla üretilebilmektedir [7]. Karmaşık geometrili bal peteği, kafes yapılar vb. geometrilerin üretimi için Eİ vazgeçilmezdir ve kafes yapılar parçanın yoğunluğunun azaltılması ile elde edilen düşük ağırlıkla parçaya tam dayanım sağlanmasında etkilidir. Ayrıca Eİ, üretilecek olan parçada istenilen mekanik özelliklerin ve içyapının elde edilmesi konusunda büyük bir esneklik tanımaktadır [9, 10]. Eİ özellikle otomotiv ve havacılık alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılıkta prototipler ile hava kanalları, duvar panelleri ve yapısal metal parçalar gibi hafif fonksiyonel parçaların üretiminde; otomotiv sektöründe ise tasarım ve topoloji optimizasyon araçları ile yedek parça üretimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [11]. Ayrıca Eİ kendisine medikal sektöründe de estetik ve fonksiyonel testler için yaygın olarak uygulama alanı bulmuştur. Eİ metotları genel olarak küçük ölçekli parçaların üretiminde kullanılmasına karşın Eİ'nin büyük ölçekli uygulamalarına da rastlanmaktadır [12]. Ayrıca Eİ işletmeyi yarı mamülllerin yoğun işçiliğinden kurtararak son ürünlerin hammaddeden tek bir tesiste üretilebilmesine olanak sağlamaktadır [10].

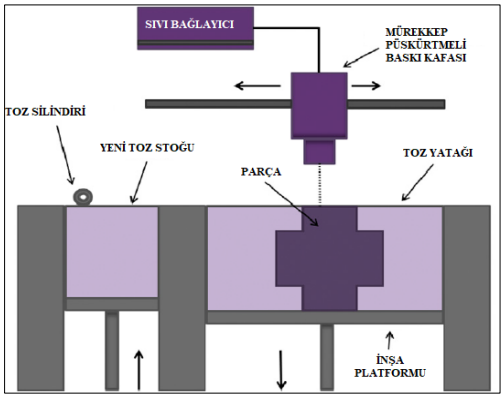
2.1.1. Eklemeli imalat çeşitleri

ASTM 52910 standardına göre eklemeli imalat 7 farklı kategoriye ayrılmış olup ilgili kategoriler Şekil 2.1'de gösterilmiştir [13].



Şekil 2.1. Eklemeli imalat çeşitleri [13, 14]

Yapıştırıcı püskürtme



Şekil 2.2. Sistem çalışma prensibi [8]

Yapıştırıcı püskürtme (ing. binder jetting) yöntemi 1993 yılında bulunmuştur. Bu yöntem diğer yüksek enerji kaynağı kullanan doğrudan basma tekniklerine göre daha basit olması yönüyle dikkat çekmektedir [15].

Yapıştırıcı püskürtme yöntemi yüksek derecede tasarım esnekliği sağlamaktadır. Destek yapılarının olmaması ve çok geniş malzeme yelpazesiyle uyumlu olması gibi avantajlara da sahiptir. Ayrıca diğer eklemeli imalat yöntemlerine kıyasla çok daha hızlı ve yüksek üretim

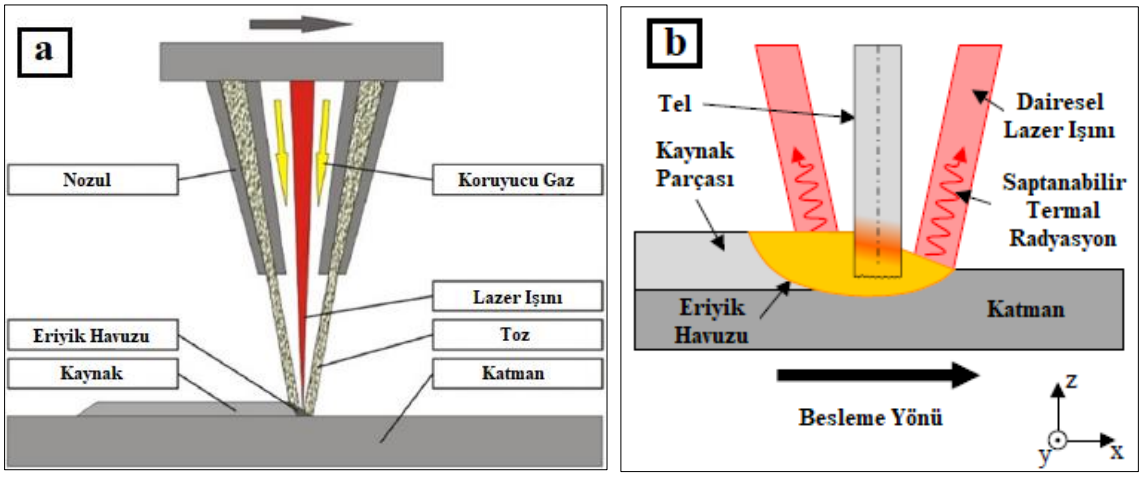
oranlarına sahip olması ile büyük ölçekli üretimlere olanak sağlaması yönüyle ön plana çıkmaktadır. Buna karşın yapıştırıcı püskürtme yöntemi, nihai parçanın düşük sinterlenme yoğunluğunun yanı sıra sınırlı katman kalınlığı ve iri taneli tozlardan kaynaklanan düşük yüzey kalitesine sahip olması yönleriyle de çeşitli dezavantajlara sahiptir [16].

Yapıştırıcı püskürtme yöntemi malzemenin erimesi gereken noktaya baskı kafasının bağlayıcıyı aktarması ile gerçekleşir. Bağlayıcı damlacıkları toz taneciklerini bir araya getirmek için toz yatağı üzerine uygulanır. Bağlayıcının nüfuzundan sonra bağlayıcının çeşidine bağlı olarak ısıtma veya ultraviyole ışık radyasyonu altında sertleşir. İşlem her katmandaki üretim tamamlandıktan sonra diğer katmanlarda da devam ettirilir [8, 17]. Yapıştırıcı püskürtme metodu seramik, metal, biyomalzeme ve polimerler vb. malzemelerle çalışılabilmesi yönüyle önemli bir avantaja sahiptir [17]. Ayrıca bu yöntem gıda teknolojisi, elektronik cihazlar, beton yapılar, elektro-kimyasal enerji depolaması vb. uygulamalarda da kullanılmaktadır [15].

Yönlendirilmiş enerjiyle biriktirme

Yönlendirilmiş Enerjiyle Biriktirme (ing. directed energy deposition) yöntemi Şekil 2.3'te görüldüğü gibi 3 boyutlu parçaların üretilmesi amacıyla toz veya tel formundaki hammaddenin odaklanmış bir enerji kullanılarak eritilmesiyle gerçekleşen bir eklemeli imalat yöntemidir. Yönlendirilmiş Enerjiyle Biriktirme (YEB) yönteminde, lazerler yüksek uzaysal çözünürlüklerinden dolayı diğer enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında yaygın bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır[18]. YEB yöntemi ekipmana bağlı olarak lazer metal şekillendirme (ing. laser metal forming), 3 boyutlu lazer yığma (ing. 3D laser cladding), lazer mühendisliği net şekillendirme (ing. laser engineering net shaping) gibi çok sayıda teknolojiyi bünyesinde barındırmaktadır [19]. Lazer toz beslemeli yönlendirilmiş enerjiyle biriktirme yöntemi imalat sektöründe etkili bir şekilde ilerlemektedir. Sektörde etkili olmasında; metal parçaların hızlı prototiplenebilmesi, karmaşık geometrili ve özelleştirilmiş parçaların üretilebilmesi, kıymetli metal parçaların kaplanması veya onarılabilmesi ve ulaşımı zor olan yerlerde üretim veya onarım faaliyetlerinin yapılabilmesi etkilidir [20]. Lazer tel beslemeli yönlendirilmiş enerjiyle biriktirme yöntemi ise ilgili parçanın 3 boyutlu geometrisinin gerçek ölçülerine oldukça yakın şekilde üretilmesinde ve kaplama uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu yöntem, kullanılan telin neredeyse %100'e yakın bir oranının kullanımından dolayı temiz bir çalışma ortamını sağlaması, düşük maliyeti ve kolay

erişilebilirliğinin yanında malzeme tasarrufu da sağlamaktadır [21, 22].



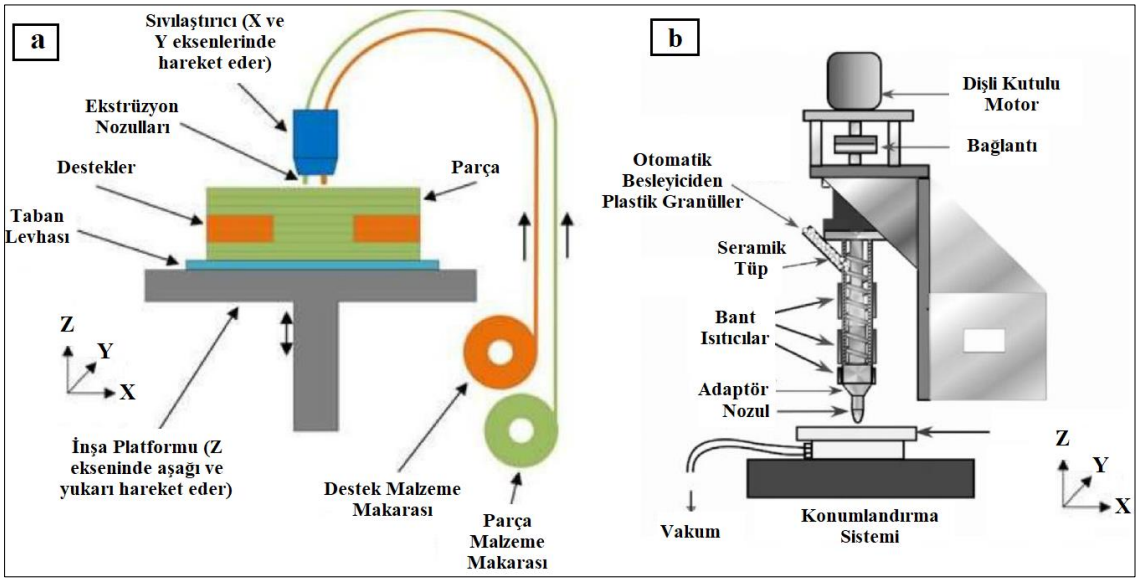
Şekil 2.3. Yönlendirilmiş enerjiyle biriktirme yöntemleri a) toz üflemeli [20] ve b) ortak eksenli tel beslemeli [22]

YEB yönteminin var olan çok sayıdaki avantajlarına karşın sürecin bozulmalara karşı yüksek hassasiyeti önemli bir zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Lazer tel beslemeli yönlendirilmiş enerjiyle biriktirme yönteminde tel ucu ile eriyik havuzu arasında sabit bir bağın devamlılığının sağlanması, lazer toz beslemeli yönlendirilmiş enerjiyle biriktirme yönteminde ise iyi bir katman kalitesinin elde edilmesi hassas bir şekilde ayarlanmış proses parametrelerine bağlıdır [22, 23].

Malzeme ekstrüzyonu

Malzeme ekstrüzyonu (ing. material extrusion) yönteminde kullanılacak malzeme nozul yoluyla serilir. [24]. Malzeme ekstrüzyonu (ME) tamamıyla yoğun veya yüksek en-boy oranına sahip duvarlara, kafes yapılara ve kapsayıcı unsurlara sahip olan karmaşık gözenekli katıların gerçek ölçülerine oldukça yakın şekilde ve uygun maliyetli olarak üretilebilmesi için kullanılmaktadır [25]. ME yönteminin avantajları düşük üretim maliyetine, daha kısa üretim süresine sahip olması ve kullanılan hammaddeye daha kolay erişilebilmesidir. Yöntemin gerçekleştirilmesinde PLA (polilaktik asit) ve ABS (akrilonitril bütadien stiren) gibi malzemelerden yararlanılmaktadır. Bu hammaddelerin yaygın formları filament ve pelet şeklindedir. Ergiyik filament fabrikasyonu (ing. fused filament fabrication) ve kaynaşmış pelet ekstrüzyonu (ing. fused pellet extrusion) yaygın olarak kullanılan malzeme

ekstrüzyonu yöntemleridir [26].



Şekil 2.4. Malzeme ekstrüzyon yöntemleri a) ergiyik filament fabrikasyonu ve b) kaynaşmış pelet ekstrüzyonu [26]

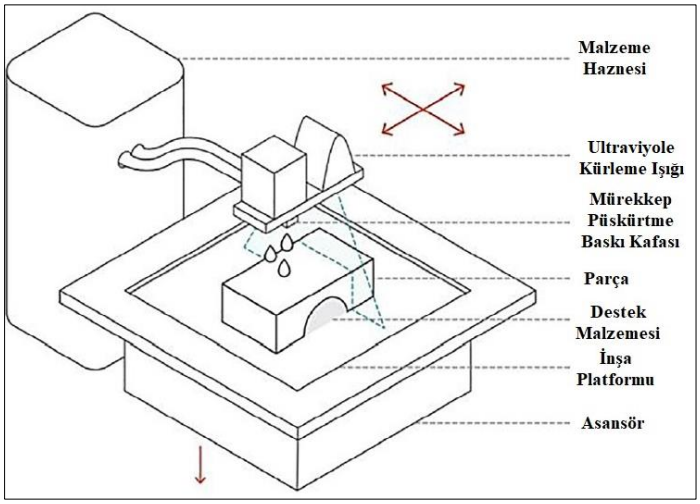
Ergiyik filament fabrikasyonu (EFF) polimer filament malzemeler kullanılarak 3B (3 boyutlu) parçaların üretilebildiği düşük maliyetli eklemeli imalat yöntemlerinden birisidir. Günümüzde EFF cihazlarında artık polimer-kompozit malzemeler de kullanılmaktadır. Bu yöntemde Şekil 2.4'te görüldüğü gibi makaradan ayrılan uygun boyutlardaki filament, sürücü tekerleklerin yardımıyla sıvılaştırıcı kafaya girer ve proses ilerler [27]. Kaynaşmış pelet ekstrüzyonu (KPE) yönteminde ise standart enjeksiyon kalıplamayla üretilmiş peletler, otomatik besleyici tarafından vida ekstrüdere aktarılır. Ardından peletler ektrüzyon işlemi için nozula iletilir ve proses ilerler [26, 28].

ME prosesinde parça basımı esnasında çeşitli kusurlar meydana gelebilmektedir. Bu kusurlara duvar kalınlıklarındaki farklılıklar, bölgesel delikler ve eksik duvarlar örnek olarak gösterilebilir. Bu tip kusurları azaltmak ve üretilmiş parçaların performansını artırmak için ve proses esnasında işleme parametrelerini düzenlemek için yazıcıya geri bildirim yapan gerçek zamanlı performans gösterimi yaklaşımları kullanılabilir [29].

Malzeme püskürtme

Malzeme püskürtme (ing. material jetting) yöntemi çok çeşitli renk ve malzeme kombinasyonlarının kullanımına olanak sağlayan bir yöntemdir. Malzeme püskürtme (MP) yönteminde Şekil 2.5'te görüldüğü gibi ışığa duyarlı polimer reçine, katman katman üretim tablasına püskürtülür ve malzeme ultraviyole ışını ile kürlenir. Silindir katman yüzeyinde hareket ettirilir. Mikroelektronik ve mikroakışkanlar, hafif ince duvarlı yapılar, sandviç kompozitler, sağlık ürünleri ve anatomik modeller gibi farklı ölçekteki çok sayıda fonksiyonel polimer parçanın üretimine bu teknoloji adapte edilmektedir [30].

MP yöntemi benzer üretim çözünürlüğündeki diğer yöntemlere göre daha büyük üretim yüzey alanı ve üretimin daha az kompleks olması yönleriyle daha fazla ürün çıktısı elde edilmesini sağlar [31]. Ayrıca MP yöntemi ile üretilen parçalar diğer yöntemlere kıyasla homojen mekanik özelliklere, yüksek boyutsal doğruluğa ve iyi yüzey kalitesine sahiptir. [32].



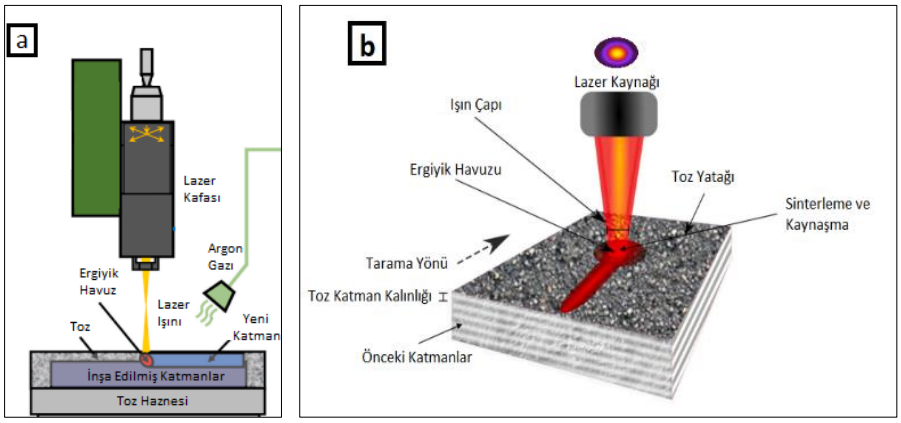
Şekil 2.5. Malzeme püskürtme yöntemi [32]

MP yönteminin var olan avantajlarının yanı sıra basılmış mürekkebin aşırı kürlenmesi, parçanın boyutsal doğruluğunu azaltma eğilimindedir. Ayrıca üründeki en iyi yüzey kalitesi için ürünlerin parlak yüzeyinin kaplamalı olması gerekmektedir. Ancak boyut kısıtlamaları nedeniyle bu her zaman mümkün olamamaktadır. Baskı yönüne karşılık inşa yönelimi, daha iyi yüzey kalitesinin elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca yüzey kalitesi baskı mürekkebinden de etkilenmektedir. Baskıdaki inşa yönelimlerinin uygun olarak

seçilmesi daha iyi mekanik özelliklerin elde edilmesine de katkı sağlamaktadır [32].

Toz yataklı birleştirme

Toz yataklı birleştirme (ing. powder bed fusion), bir toz yatağındaki tozların katman katman ergitilmesi için ısı kaynağı olarak lazer ya da elektron ışınının kullanıldığı eklemeli imalat türüdür. Toz yataklı birleştirme (TYB) metodu ile havacılık, sağlık ve otomotiv gibi hataların önüne geçilmesinin önemli olduğu birçok sektörde; polimer, seramik ve en yaygın olarak metal malzemelerden üretim gerçekleştirilebilir. TYB metodu seçici lazer ergitme (ing. selective laser melting), seçici lazer sinterleme (ing. selective laser sintering) ve EIE olmak üzere üçe ayrılabilir [33]. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi seçici lazer ergitme (SLE) yöntemi metal toz yatağında bulunan tozların katman katman olarak ergitilmesi için lazer ısı kaynağının kullanıldığı metottur [34]. Seçici lazer sinterleme (SLS) yöntemi ise karmaşık geometrili 3B parçaların üretimi için tozların katman katman takviye edildiği verimli, ekonomik, yüksek hassasiyetli ve hızlı bir prosestir [35].



Şekil 2.6. Isı kaynağı olarak lazer kullanan toz yataklı eklemeli imalat yöntemleri a) seçici lazer ergitme [36] ve b) seçici lazer sinterleme [37]

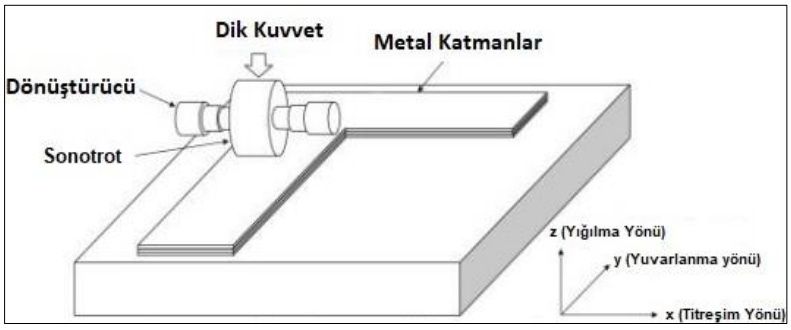
EIE prosesi ise bir vakum bölmesi içerisinde, oldukça yüksek tarama hızlarında çalışan ve yüksek güce sahip elektron ışınının istenilen kesiti taramasıyla gerçekleşen bir üretim yöntemidir [38].

TYB yöntemi destek yapıları gerektirmemesine ve özel üretimlere olanak sağlamasına rağmen proses parametrelerine ve üretim kısıtlamalarına karşı oldukça hassas bir yöntemdir.

Işın toza çarptığında emilir, yansıtılır ve saçılır. TYB yöntemi üretimde esnekliği ve özelleştirilmiş üretimleri mümkün kılsa da, aşırı ısınma bir kalite problemi olarak ortaya çıkmaktadır ve bu da daha az dayanıklı ve daha az emniyetli parçaların basılmasına neden olur [33].

Plaka tabakalaştırma

Plaka tabakalaştırma (ing. sheet lamination) yöntemi malzemenin, üretilecek parçanın kesitlerine uygun şekilde kesilmesiyle ve birbirlerine katman katman olacak şekilde yapıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Yapıştırma işlemleri; yapışkan, ergitilmiş ince polimer katmanlar, yüksek sıcaklık, basınçta sertleştirme veya ultrasonik kaynak kullanılarak gerçekleştirilebilir [13] Bu yöntemde çoğunlukla ultrasonik ve lazer enerji kaynakları kullanılmaktadır. Plaka tabakalaştırma (PT) yönteminin en yaygın olan türü ultrasonik eklemeli imalattır. Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi oda sıcaklığında metal tabakalar yığınına ultrasonik dalga ve mekanik basınç uygulanmasıyla metal tabaka yığınları erimeden ziyade yayılarak birbirine yapıştırılır [39]. PT yöntemi ilk kez uygulandığında kağıt kullanılmış olup sonraki süreçte kompozitler de dahil plastik, metal ve seramik katmanlar için başka araştırma ve ticari sistemler geliştirilmiştir [13]



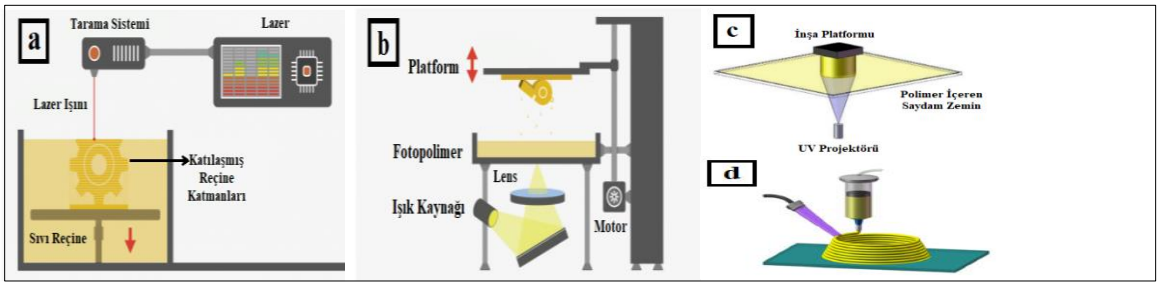
Şekil 2.7. Ultrasonik eklemeli imalat prosesi [39]

Özellikle içinde gömülü parçalar bulunduran katmanların istiflenip kesildiği PT gibi prosesler, fazla malzemenin çıkarılması için üretim sonrası işlemler gerektirmektedir [13]. Ayrıca PT prosesinde kalıntı gerilmelerin engellenmesi gereklidir. Bu yüzden her katmanın üretiminden sonra soğuma için kısa bir süre beklenmesi gerekmektedir [39]

Havuz fotopolimerizasyonu

Havuz fotopolimerizasyonu (ing. vat photopolymerization) yöntemi kuyumculuk, dişçilik, biyomedikal mühendisliği vb. çeşitli alanlarda geniş bir ilgiyi üzerine toplayan en popüler 3B yazıcı teknolojilerinden birisidir. Havuz fotopolimerizasyonu (HF) yöntemi, fotopolimer reçine havuzunun katman katman sertleştirilmesi esasına dayanmaktadır [40, 41]. HF prosesi son derece karmaşık ve özel olarak tasarlanmış tasarımların üretiminde kullanılması yönleriyle önemi giderek artan bir teknolojidir [42].

HF yöntemi Şekil 2.8.'de görüldüğü gibi stereolitografi, dijital ışık işleme, sürekli dijital ışık işleme ve doğrudan ultraviyole (UV) olmak üzere dörde ayrılabilir [43, 44]. Stereolitografi yöntemi her bir katmanı sertleştirmek için uygun kesitli desenin katman katman güneşlenmesi esasına göre çalışır [45]. Dijital Işık İşleme yöntemi sırasıyla, 3B modelin görüntüsünün sıvı polimer üzerinde görüntülenmesi, kalan sıvı polimerin sertleşmesi, yapı plakasının aşağı hareket etmesi ve sıvı polimerin tekrar ışığa maruz kalması şeklinde sıralanabilir. İşlem, 3B model tamamlanana ve havuzdaki sıvı boşaltılarak katılaşmış model ortaya çıkana kadar tekrarlanır [46] Sürekli dijital ışık işleme yöntemi ise UV projeksiyon altındaki mercekler ve sıvı reçine kullanılarak gerçekleştirilen bir diğer eklemeli imalat yöntemidir [44]. Doğrudan UV baskı yöntemi ise 3B modellerin katman katman üretimi için uygun basınçta nozuldan dışarı çıkarılan mürekkebin UV ışın etkisinde biriktirilmesiyle gerçekleştirilen bir metottur [47].



Şekil 2.8. Havuz fotopolimerizasyon çeşitleri a) stereolitografi [46], b) dijital ışık işleme [46] c) sürekli dijital ışık işleme [48] ve d) doğrudan uv baskı [47]

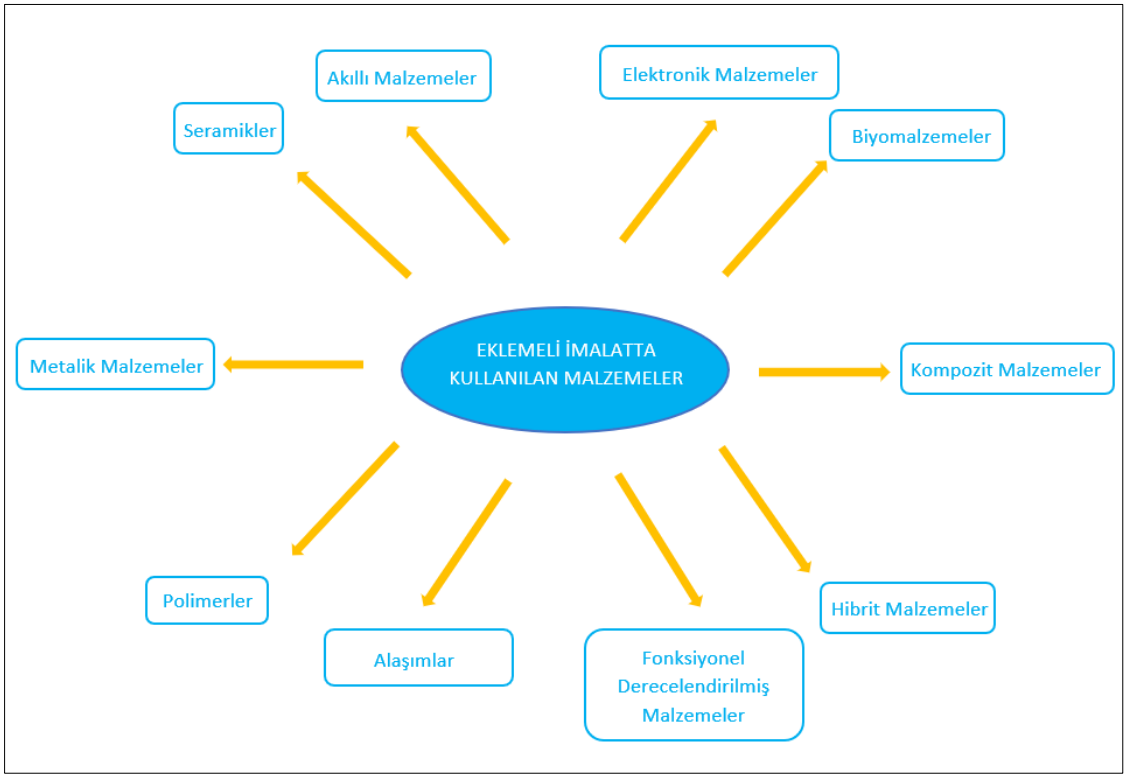
Fotopolimerlerin polimerizasyonu ortamdaki ışık zayıflaması nedeniyle ışık yolu boyunca genellikle dönüşüm gradyanları oluşturur. Bu metotta dönüşüm gradyanları, üretilmiş ürünlerde büzülmelere ortaya çıkmasına neden olabilir. Ayrıca çatlak ve delaminasyon gibi

büyük problemlere de neden olabilir. [42]

2.1.2. Eklemeli imalatta kullanılan malzemeler

Eİ'yi her yönüyle kavrayabilmek için Eİ yönteminde kullanılan malzemenin her yönüyle tanınması kritik öneme sahiptir. Çok sayıda malzeme türü hali hazırda eklemeli imalatta yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca belirli uygulamalara yönelik olarak yeni malzemelerin geliştirilmesi için önemli sayıda çalışma yürütülmektedir [49]

Bu çalışmaların katkısı ve Eİ teknolojisinin ilerlemesiyle beraber çok sayıda malzeme geliştirilmiştir. Bu malzemeler 3B yazıcılarla ve özel bir amaca ve malzemeye yönelik olarak tasarlanmış herhangi bir sistemde rahatça kullanılabilmektedir [50, 51] Eİ'de kullanılan malzemeler aşağıdaki şekildeki gibidir:



Şekil 2.9. Eklemeli imalatta kullanılan malzemeler [49]

Ti6Al4V alaşımının eklemeli imalatta kullanımı

Ti6Al4V yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, düşük ısıl genleşme katsayısı ve eklemeli imalatta yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarına göre daha yüksek çalışma sıcaklığına sahip olması gibi yönleriyle uzay aracı yapıları için hafif ve cezbedici olan bir alaşımdır. Titanyum alaşımlarından braketler, bağlantılar, tahrik boruları ve destek tüplerinin imalatında yararlanılmaktadır [52]. Ayrıca Ti6Al4V alaşımı sahip olduğu korozyon direncinden dolayı biyomedikal alanında implantların yapımında ve kimya sektöründe de yaygın olarak kullanılmaktadır. Var olan avantajlarının yanında bu alaşımın üretimi yüksek maliyetlidir. Bu yüzden bu alaşımın maliyetini azaltmaya ve kullanımını yaygınlaştırmaya yönelik çok sayıda çalışma devam etmektedir [53–55].

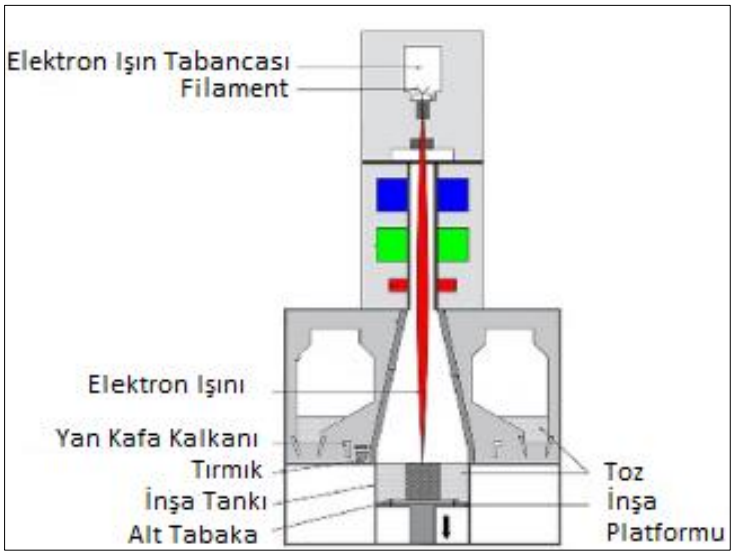
2.1.3. Metal eklemeli imalat

Metal eklemeli imalat (MEİ) toz, tel, plaka vb. formdaki metal malzemelerin kullanılarak 3B parçanın katman katman üretilmesi esasına dayalı olarak çalışmaktadır. Bu özel üretim yöntemi, karmaşık geometrik tasarımların, daha hafif parçaların, geliştirilmiş üretim kabiliyetinin, kısa besleme sürelerinin ve daha az malzeme kullanımının elde edilmesine olanak sağlamaktadır. MEİ'nin eşsiz özellikleri onun otomotiv, havacılık, medikal, yağ ve gaz vb. alanlarda geniş kullanım alanı bulmasını sağlamıştır. Metal parçaların çoğu, yükümlülüklerin ve kalite standartlarının gerektirdiği şartları sağlamak için, güçlü mekanik özelliklere sahip olmalıdır [56].

Elektron ışını ile ergitme yöntemi

Çok yüksek tarama hızlarında (ön ısıtma için tipik olarak 15-20 m/s) önceden belirlenmiş kesitin taranması için yüksek güçte elektron ışını kullanılan ve vakum odasında gerçekleşen bir prosestir. Azaltılmış kalıntı gerilme gibi avantajlarıyla öne çıkan bir metottur. EIE metodu 3 aşamada gerçekleşir. Birinci aşama toz serimidir. Bu aşamada önceden hazırlanmış bir katman tozun üzerine ya da tablanın üzerine toz serimi gerçekleştirilir. İkinci aşama toz ön ısıtmasıdır. Bu aşamada elektron ışını gevşek haldeki tozları kısmi sinterlenme gerçekleşene kadar tarar. Üçüncü aşama tozun ergitilmesidir. Bu aşamada ise belirlenen kesiti oluşturmak için tozlar elektron ışını tarafından seçici olarak ergitilir [38]. EIE yöntemi metal parçaların gerçek geometriye yakın olarak üretilmesi için kullanılmaktadır. EIE

yöntemiyle üretilen metal parçaların geleneksel yöntemlerle üretilenlerle kıyaslanabilecek hatta daha iyi sayılabilecek mekanik karakteristiğinden dolayı bu yöntem; ortopedi, havacılık, motor sporları gibi çok sayıda alandaki uygulamalarda kullanılmaktadır [57].



Şekil 2.10. Elektron ışını ile ergitme yöntemi [58]

2.1.4. Eklemeli imalatın avantajları ve geliştirilmesi gereken yönleri

Eklemeli imalatın avantajları

Katmanlı üretim; prototiplerin üretim maliyetini azaltmak, üretim hızını artırmak ve üretilen parçanın mekanik özelliklerini etkileyen proses parametrelerini doğrudan kontrol edebilmek için ortaya çıkarılmış bir üretim metodudur [59]. Bu teknoloji; çok karmaşık şekiller elde edilmesine izin vererek, çok malzemeli parçaların entegrasyonuna ve artan kitlesel özelleştirmelere olanak sağlayarak tasarım özgürlüğüne yeni fırsatlar getirmektedir [60]. Eİ teknolojileri yüksek derecede geometrik esneklik, düşük üretim süreleri, düşük malzeme kullanım oranına sahip olması ve geleneksel üretim yöntemleriyle kolayca üretilemeyen gerçek parça geometrisine yakın, karmaşık şekilli parçaların üretimini mümkün kılmaktadır. İş aktivitelerinin çevresel etkilerinden ekonomik ve sosyal değer yaratma potansiyelini elinde bulundurmaktadır [61, 62]. Ayrıca Eİ yönteminde plastik, reçine, kauçuk, seramik, cam, beton ve metal kullanılmakta olup malzeme çeşitliliği fazladır [63]. Ayrıca Eİ yöntemi hiçbir kalıp ve alet olmadan 3B bilgisayar destekli tasarım modellerinden doğrudan üretim imkanı sağladığından farklı tasarımlara geçişteki maliyetlerin önüne geçilebilmektedir.

Nihai ürünler düşük gözenekliliğe sahiptir. Siparişe göre ürün üretilmesi, satılmamış mamüllerin olmasının önüne geçerek stok maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır [62].

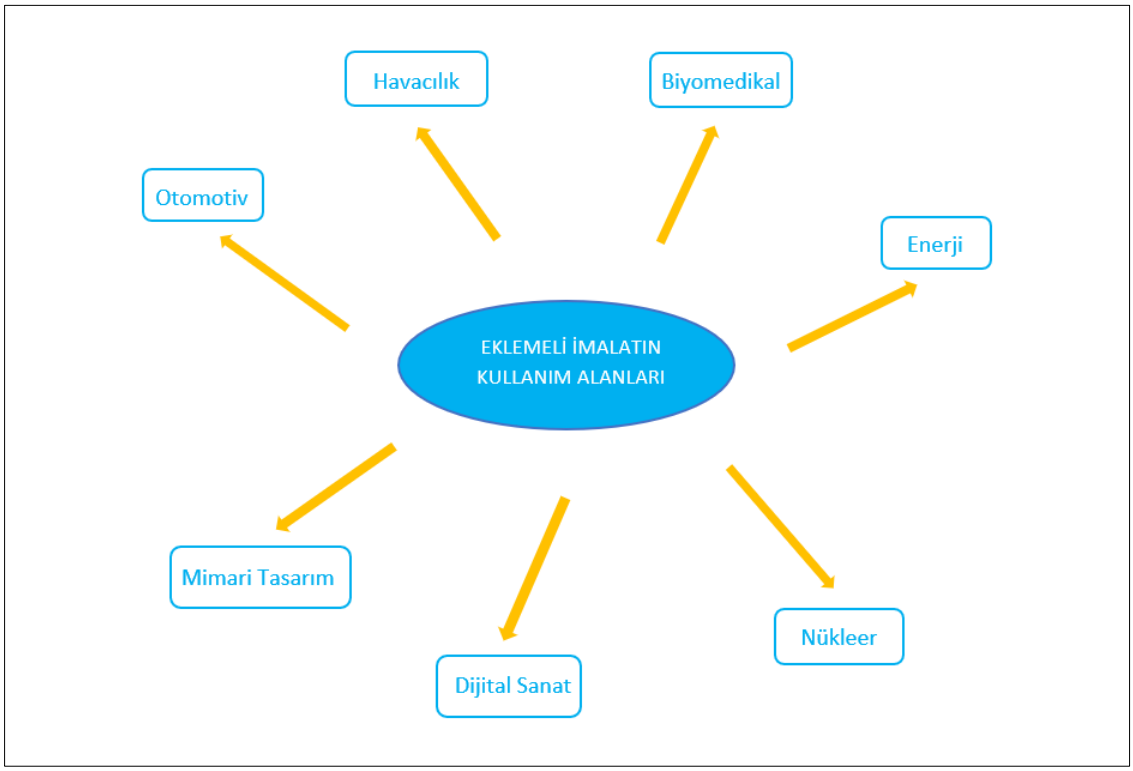
Eklemeli imalatın geliştirilmesi gereken yönleri

Düzgün işleyen bir eklemeli imalat için küresel şekilli tozlara olan ihtiyaç zaruridir. Bu nedenle gaz atomizasyonu ile üretilmiş tozlar eklemeli imalat için en uygun olanıdır [61]. Ek olarak, şu an da mevcut eklemeli imalat cihazlarının izin verdiği boyutlarda bir üretimin yapılabilmesi mümkündür. Daha büyük cihazlar mevcut olmasına rağmen bu cihazların üretim gerçekleştirmesine imkan sağlayacak büyüklükte alana ihtiyaç duyulmaktadır. Son ürünün üretimi için yeterli büyüklükte cihazın mevcut olmaması durumunda ise ürün parçalar halinde üretilmekte ve ürünün nihai halini alması için fazladan parça montaj süresine ihtiyaç duyulmaktadır [63]. Ayrıca Eİ yöntemi hızlı prototipleme için uygunken doğrudan parça ve ürün üretimine uygun olmadığı algısının ortadan kaldırılması gerekmektedir. Yeni malzemelerin geliştirilmesi ve standardizasyonu, birden fazla malzeme ve renk kullanan çoklu sistemlerin geliştirilmesi yönündeki çalışmalar devam etmektedir. Daha iyi bir otomasyon ve proses planlaması ile eklemeli imalat verimliliğinin artırılması mümkündür. Ayrıca destek yapı malzemeleri geri dönüştürülemediğinden iyi bir inşa yönlendirmesi sayesinde destek yapı kullanımının minimize edilmesi ile malzeme israfı azaltılabilmektedir [62].

2.1.5. Eklemeli imalatın kullanım alanları

Geleneksel üretim yöntemleriyle mümkün olmayan benzersiz yapısal ve işlevsel özelliklere sahip bileşenler oluşturma yeteneği, hem laboratuvar ölçekli malzeme, yapısal inovasyon hem de büyük ölçekli parça üretimleri konusunda mühendis ve araştırmacılar arasında ilginin artmasına yol açmıştır. Uzun yıllardır araştırma toplulukları tarafından yeni eklemeli imalat yöntemleri geliştirilmektedir. Zaman geçtikçe endüstrinin itici gücüyle eklemeli imalat, prototip üretiminden hızlı işleme (ing. rapid tooling) ve hızlı prototiplemeye doğru dönüşmüştür. Takımların, kalıpların vb. üretiminde Eİ teknolojisinin doğrudan ya da dolaylı olarak kullanılmasıyla; malzemeler, prosesler, yazılım ve ekipmanlar, hızlı işleme uygulamaları alanlarında yoğun araştırma ve geliştirme faaliyetleri gerçekleştirilmiştir [64, 65]. Ayrıca oldukça karmaşık havacılık parçalarının az sayıdaki üretim ihtiyacı, Eİ

teknolojisini havacılık sektörü için de ideal hale getirmiştir. Havacılık sektörü bu teknolojinin potansiyelinin farkında olup güvenilirliği ve uygulanabilirliğini geliştirmek için araştırmalara yatırım yapmaktadır [62]. Eİ'nin kullanım alanları aşağıdaki şekildeki gibidir:

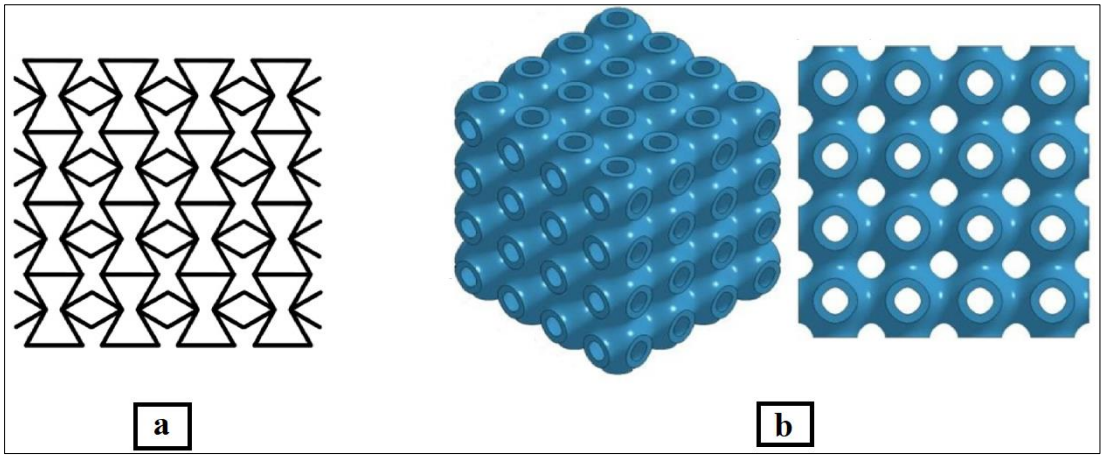


Şekil 2.11. Eklemeli imalatın kullanım alanları [62, 64, 65]

2.2. Kafes Yapılar

Kafes yapı (KY) belli bir düzende birim hücrelerin bir araya gelmesiyle ortaya çıkan boşluklu yapıdır. KY'ler dayanıklılık, enerji emilimi, ısı ve ses yalıtımı gereken alanlarda öne çıkmaktadır. Bu nedenle makine, inşaat, otomotiv, havacılık, uzay, ulusal savunma, tıbbi tedavi, spor ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [66]. KY'nin üstün dayanım/ağırlık oranı, termal ve akustik koruma gibi özelliklere sahip olması onun havacılık ve tıp endüstrisi gibi alanlarda yüksek karlılık elde edilmesi için kullanımını ideal hale getirmektedir [67]. Kafes yapı üretiminde metal ve alaşımları, polimer, seramik, kompozit gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bu yapıların 2 boyutlu (2B) ve 3B olarak imal edilmesi tercih edilebilmektedir. Ancak 1990'lı yılların sonlarında ve 2000'li yılların başlarında kafes yapıların eklemeli imalat ile üretimi konusunda çok sayıda araştırma yapılmaya başlanmıştır [66, 68]. Kafes yapı türlerinden ilki metal köpük yapılarıdır. İkinci tür, dikmelerden

meydana gelen ve metal köpüklerden daha yüksek bir özgül mukavemet ve özgül sertlik sergileyen dikme tabanlı kafes yapıdır. Üçüncü tür kafes yapı ise kabuk kafes yapıdır. Bu tür yapıda ise hücreleri düzgün kavisli kabuklar meydana getirmektedir. Üç yönlü periyodik minimal yüzeyler (ing. Triply Periodic Minimal Surfaces, TPMS), kabuk kafes yapıya örnek olarak verilebilir [69].

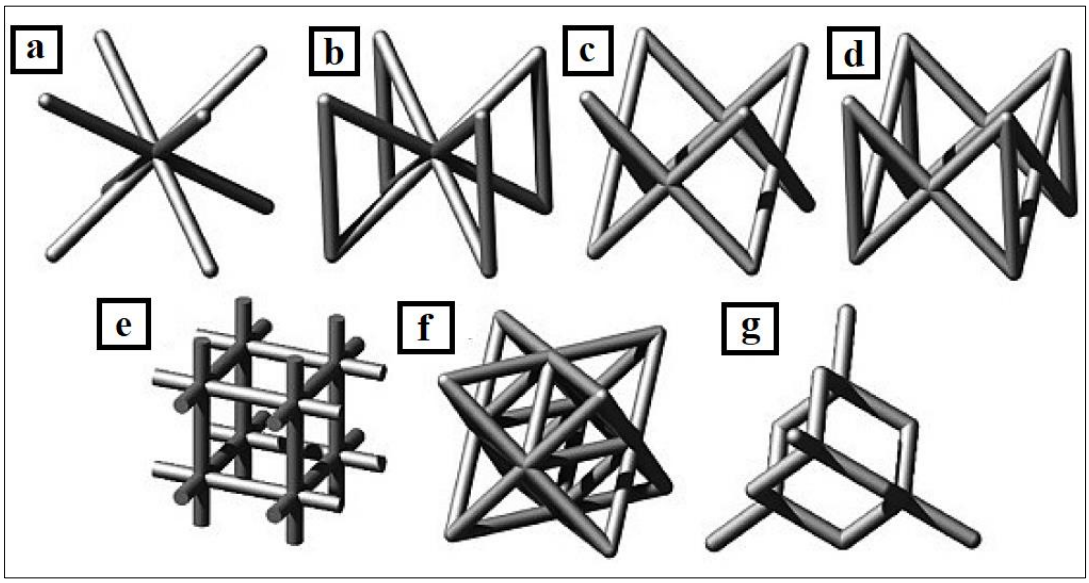


Şekil 2.12. Kafes yapı a) 2 boyutlu ve b) 3 boyutlu [66]

2.2.1. Dikme tabanlı kafes yapılar

Dikme tabanlı birim hücreler, düğüm noktalarından birbirine bağlı silindirik dikmelerin oluşturduğu bir ağdan oluşur [70]. Dikme tabanlı kafes yapılar (ing. strut-based lattice structures), hafif yapıları, yüksek enerji emilim kapasiteleri ve özgül dayanımları gibi özelliklerinden dolayı biyolojik implantlarda, otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde tercih edilmektedir [71]. Biyomalzeme uygulamaları için hafif gözenekli yapılara ihtiyaç duyulması dikme tabanlı kafes yapılara olan ilgiyi artırmıştır. Dikme tabanlı kafeslerin geometrisi değiştirilerek çok sayıda tasarım üzerinde çalışılmış ve geometri tasarımı ile gelişmiş mekanik performansın elde edilebileceğine işaret edilmiştir. Modellerin kolayca tasarlanabilmesi ve farklı yapılara adapte edilebilmesi, bu yapıları levha ve plaka kafeslere göre daha önemli tercih sebebi haline getirmektedir. HMK, YMK, sekizli kafes yapı (octet truss) ve bu yapıların farklı kombinasyonları ile Kagome gibi topolojisi optimize edilmiş dikme tabanlı kafes yapılar gibi klasik dikmeler hakkında çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ayrıca hem birim hücre ve kafes yapıların özelliklerinin geliştirilmesine hem de üretim tekniklerinin bu yapıların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini ve çeşitli uygulamaların

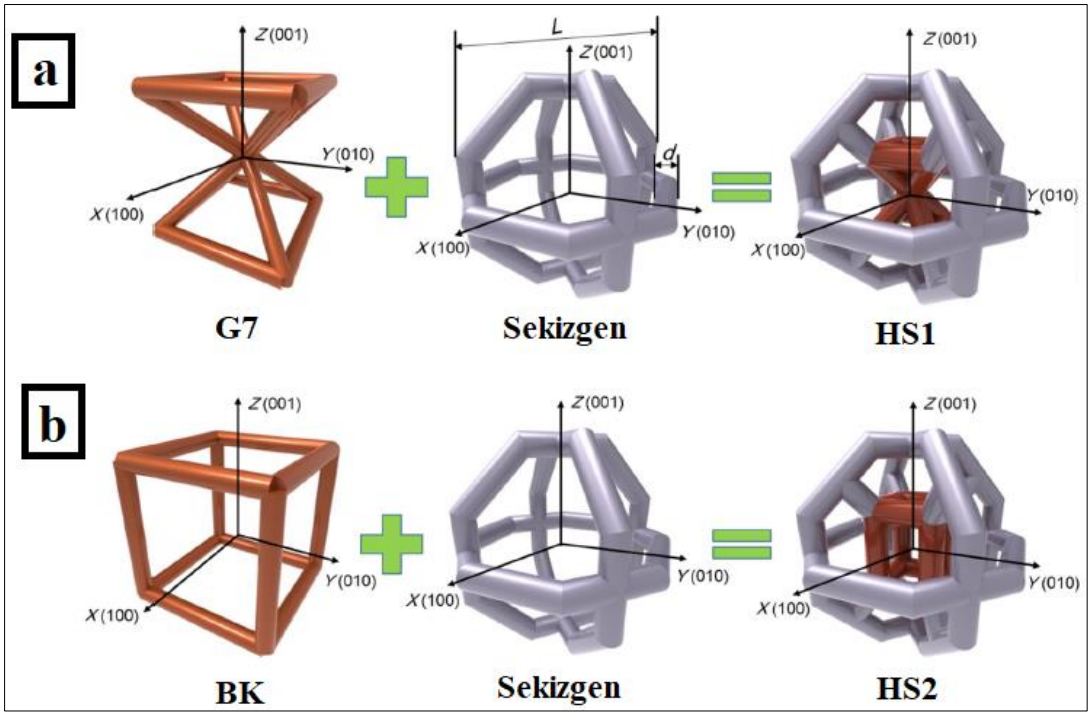
gereksinimlerine dayalı iyileştirmeleri belirlemeye yönelik olarak yapılmış çalışmalar mevcuttur [72].



Şekil 2.13. Dikme tabanlı kafes yapılar a) HMK, b) dikey dikmeli hacim merkezli kübik, c) YMK, d) dikey dikmeli yüzey merkezli kübik, e) kübik, f) sekizli kafes, g) elmas [68, 73]

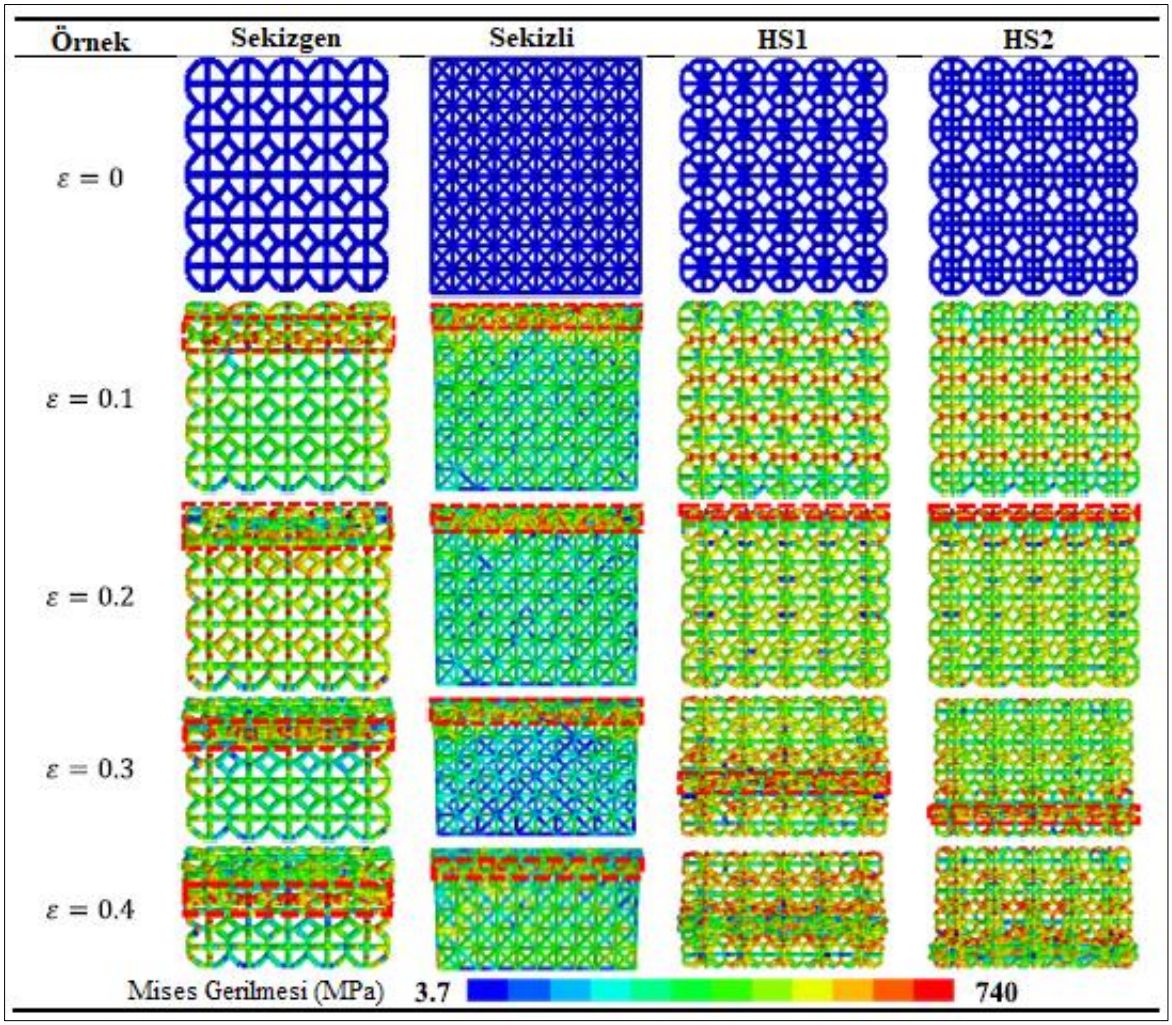
2.3. Literatürdeki Benzer Çalışmalar

Li, Yang, Li, Wu ve Wang tarafından yapılan çalışmada, iç içe geçmiş hücre topolojisine sahip yeni bir hibrit kafes yapı tasarımı önerilmiştir. İçte G7 ve dışta sekizgen hücre topolojisine sahip HS1 ve içte basit kübik (BK) ve dışta sekizgen hücre topolojisine sahip HS2 olmak üzere iki hibrit kafes yapı üzerinde çalışmalar yürütülmüştür [74].



Şekil 2.14. Kafes yapılar a) HS1 yapısı ve b) HS2 yapısı [74]

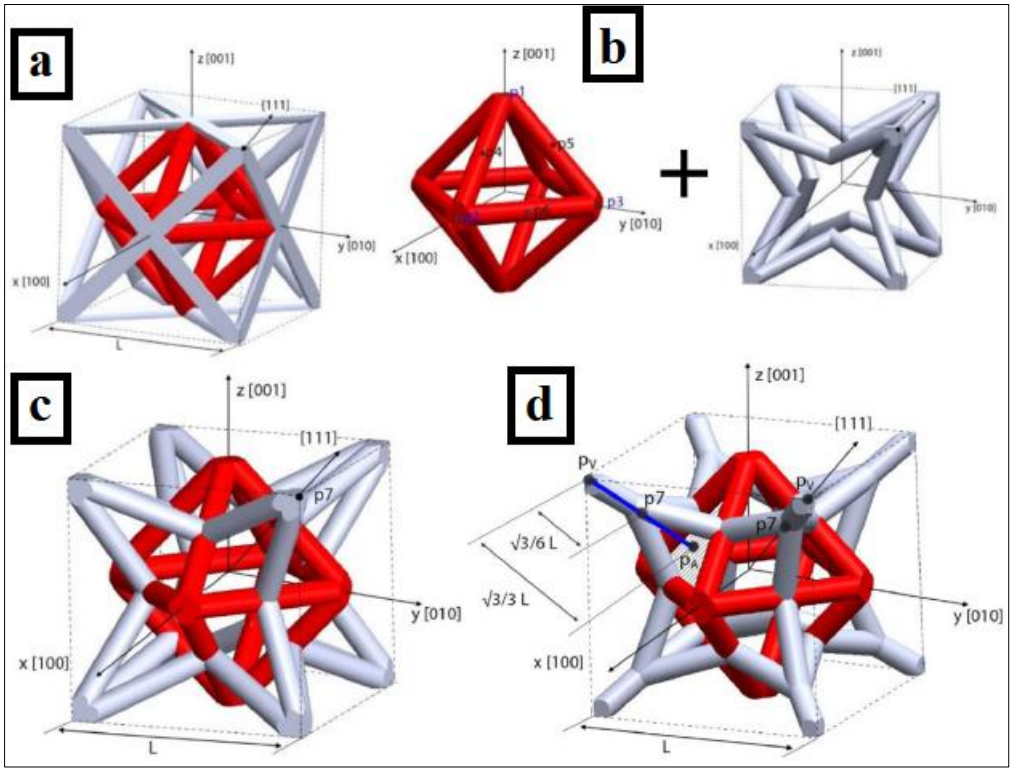
Li ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada HS1 ve HS2 kafeslerinin basma karakteristiklerini sekizli ve sekizgen kafeslerinkiyle karşılaştırmak için kapsamlı sonlu elemanlar analizi (ing. finite element analysis) yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi (SEA) sonuçları, enerji emilim teorisi ve literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Sonuçlara göre, HS2 yapısının enerji soğurma yeteneği konusunda en iyisi olduğu gösterilmiştir. Aynı bağıl yoğunluk koşulları altında, HS2 kafesinin enerji emilim (ing. energy absorption) kapasitesi geleneksel sekizgen ve sekizli (ing. octet) kafesleri sırasıyla %30 ve %42 oranında aştığı görülmüştür. Hibrit yapıların basma karakteristiğinde geliştirmeler yapılmıştır. Bu da katman katman çökme karakteristiği yerine eşzamanlı çökme karakteristiğine ve daha düzgün gerilim dağılımına atfedilmiştir [74].



Şekil 2.15. Dört farklı yapının sonlu elemanlar modeli [74]

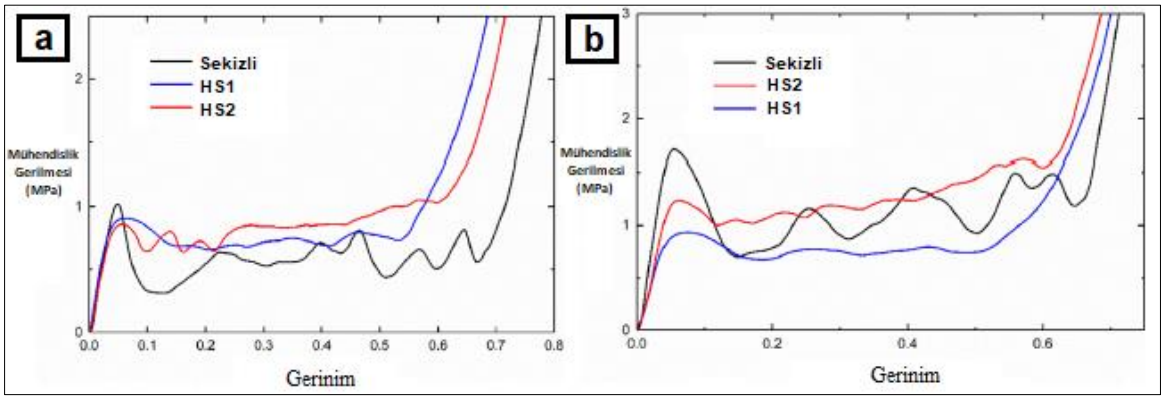
Li ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada ayrıca, hibrit kafeslerin geometrik sapma katsayısı m'nin ve yükleme yönünün etkileri de parametrik bir çalışma ile araştırılmıştır. HS2 yapısının 0,5 m değerinde maksimum enerji emilim (EE) değerini gördüğü ayrıca kuvvetlerde farklı açılardan uygulandığı durumda bozulma davranışı ve enerji emilim verimliliği bakımından anizotropik davranışlar gösterdiği görülmüştür [74].

Sun, Guo ve Shim tarafından yapılan çalışmada, sekizli ve eğilme baskın bir yapının avantajlarını birleştiren iki hibrit 3B kübik kafes tasarımı oluşturulmuş olup kafes yapılar (PLA) filamenti kullanılarak eriyik biriktirme yöntemi (ing. fused deposition method) ile üretilmiştir [75].



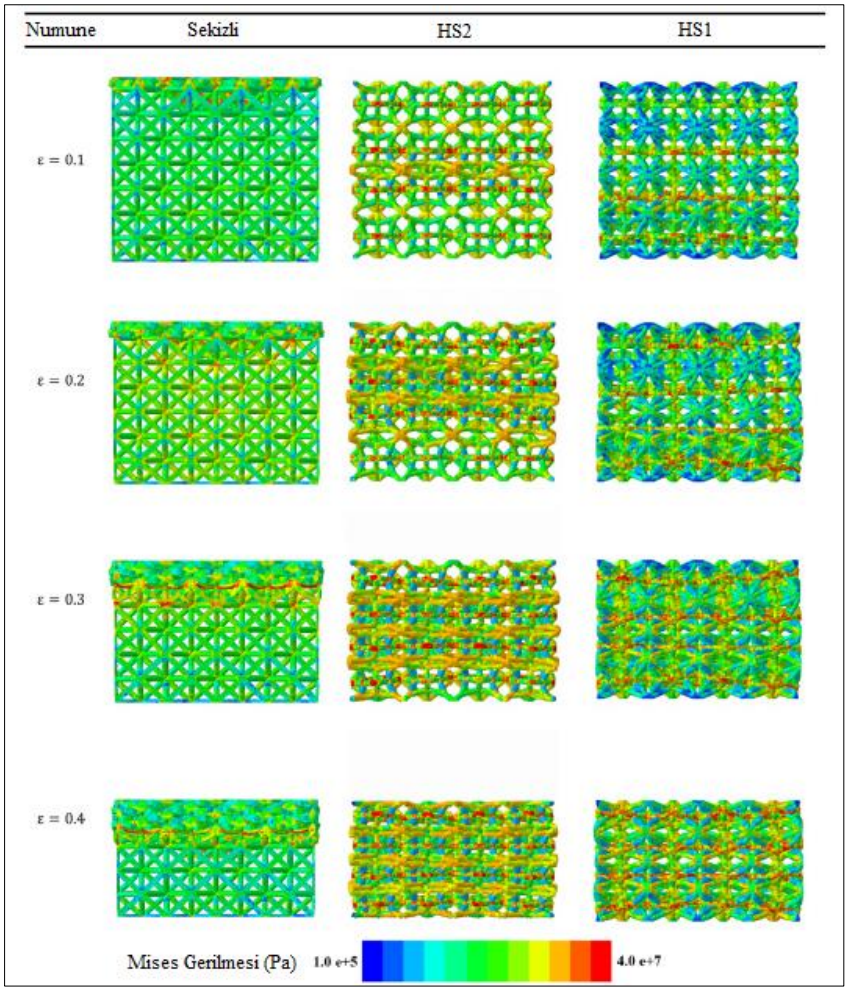
Şekil 2.16. Dört farklı birim hücre türü a) sekizli birim hücre, b) iç oktahedron (kırmızı) ve dış eğilme baskın tamamlayıcı yapının şematik gösterimi, c) HS1 hibrit birim hücresinin ve, d) HS2 hibrit birim hücresinin geometrik topolojisi [75]

Sun ve diğerleri tarafından bu yeni hibrit kafeslerin enerji emilim kapasitesinin doğrulanması için PLA'dan üretilen numuneler üzerinde yarı statik tek eksenli basma testleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, yeni hibrit kafes yapı tasarımları hem sekizli ve hem de eğilme baskın hücrelerin avantajlı yönlerini bir araya getirdiği görülmüştür [75].



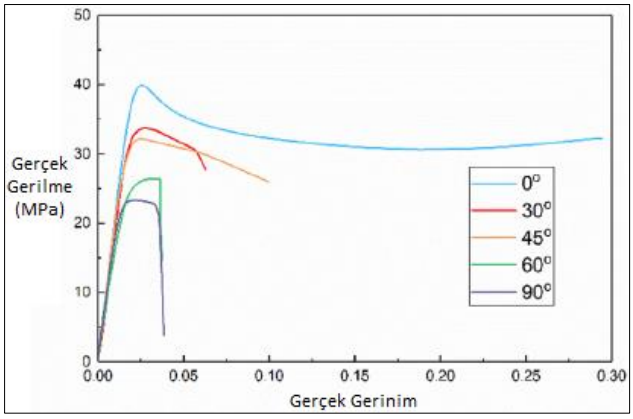
Şekil 2.17. Yarı statik tek eksenli basma testlerinin gerilme-gerinim grafikleri a) dikme çapına göre (1.6 mm) ve b) bağıl yoğunluğa göre (~0.15) [75]

Sun ve diğerleri tarafından deneylerde test edilen numunelerin deformasyon modlarının analizini kolaylaştırmak için sayısal simülasyonlar da gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, hibrit yapıların, sekizli yapıdaki kararsız dikme burkulmasıyla ilgili olarak katman katman çökmeye kıyasla daha düzgün ve kararlı deformasyon modelleri sergilediğini görülmüştür [75].



Şekil 2.18. Farklı gerinimlerdeki değerlerindeki sonlu eleman simülasyonları [75]

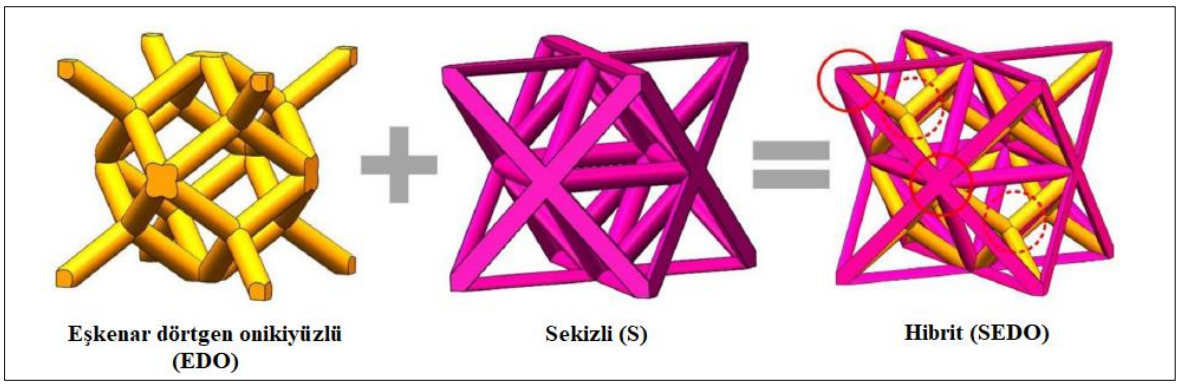
Sun ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada inşa tablasına göre çeşitli açılarda üretilen numuneler üzerinde yapılan çekme testleri, üretim açısına bağlı anizotropiyi ortaya koymuştur. Çekme testleri sonuçlarına göre üretim tablasına olan açı arttığında, akma gerilmesi ve akma sonrası gerilme seviyesi gibi mekanik özellikler önemli ölçüde azaldığı görülmüştür [75].



Şekil 2.19. Farklı açılarda üretilmiş numunelerin çekme gerilme-gerinim grafiği [75]

Sun ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, hücre dikme eğimine bağlı malzeme özellikleri simülasyonlara dahil edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile, yüksek sertliğe sahip ancak akma sonrası tepkisi dalgalı olan geleneksel bir sekizliyle karşılaştırıldığında, yeni tasarımların sertlik ve mukavemetten önemli ölçüde ödün vermeden nispeten istikrarlı bir akma sonrası gerilme platosu sergilediği gösterilmiştir. [75].

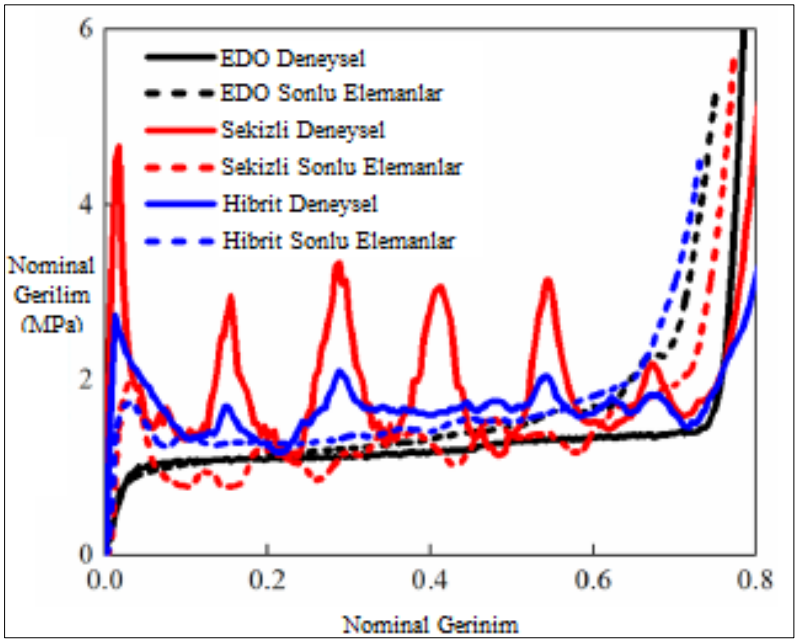
Xiao, Xu, Feng, Li, Song ve Jiang tarafından yapılan çalışmada bir sekizli hücre ve bir eşkenar dörtgen onikiyüzlü (ing. rhombic dodecahedron) hücreden oluşan hibrit bir kafes hücre düzenlemesi önerilmiş olup eğilme baskın ve uzama baskın yapıların avantajlarının birleştirilmesi amaçlanmıştır [76].



Şekil 2.20. Hibrit kafes yapının topolojik tasarımı [76]

Xiao ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada hibrit kafesin mekanik performansını ve enerji emilimini incelemek için 316 L paslanmaz çelikten SLE yöntemi ile üretilen

numuneler üzerinde yarı statik basma testleri yapılmıştır. Hibrit yapıların küresel deformasyonlarında oluşan farklılıklar kamera ile kayıt altına alınmıştır. Deneylerde test edilen numunelerin bölgesel deformasyon modlarını ortaya koymak için sonlu eleman modellerine dayalı olarak sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Hibrit yapıların mekanik özelliklerinin tüm alt hücrelerin toplam bağıl yoğunluğu ve hacim oranı tarafından nasıl etkilendiğini belirlemek için sonlu eleman sonuçlarına göre parametrik analiz gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlara göre, hibrit yapının sekizli kafese göre daha yumuşak akma sonrası tepkisinin olduğu, eşkenar dörtgen onikiyüzlü kafese göre daha yüksek başlangıç mukavemeti sergilediği ve bunun da üstün enerji emilim kapasitesine katkıda bulunduğu görülmüştür [76].



Şekil 2.21. Deneysel çalışma ve sonlu elemanlar analizi gerilme – gerinim grafiği [76]

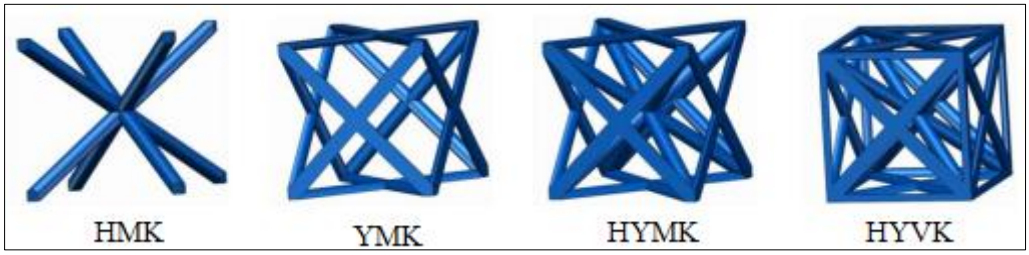
Xiao ve diğerleri tarafından yapılan bu çalışmada ayrıca deneysel sonuçlar ile kafes malzemenin proses kaynaklı geometrik kusurlara karşı direncinin artırılması için hibrit tasarımın kullanılabileceği gösterilmiştir [76].

Lei, Li, Zhang, Wang, Zhou, Zhao, Fang tarafından yük taşıma kapasitesi ve deformasyon modu dikkate alınarak gerçekleştirilen çalışmada, hibritlemenin kafes yapıların basma dayanımlarına olan etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Geometrik morfolojiler ve mekanik özellikler açısından belirgin farklılıklar gösteren Çizelge 2.1'de de adlandırılması

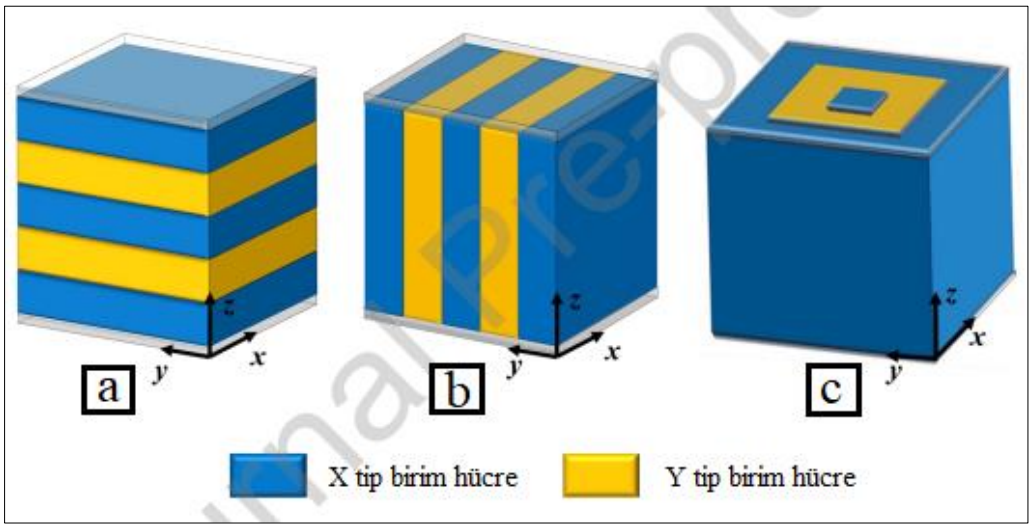
yapılmış olan HMK, YMK, HYMK ve Hacim yüzey verteks kübik (HYVK - ing. body centered vertex cube) birim hücreleri arasından seçilen herhangi iki hücre kullanılarak yatay, dikey ve dairesel şekilli üç hibrit düzenleme oluşturulmuştur [77]

Çizelge 2.1. Hücre tiplerinin adlandırılması [77]

SEMBOL	A	B	C	D
HÜCRE TİPİ	HMK	YMK	HYMK	HVYK

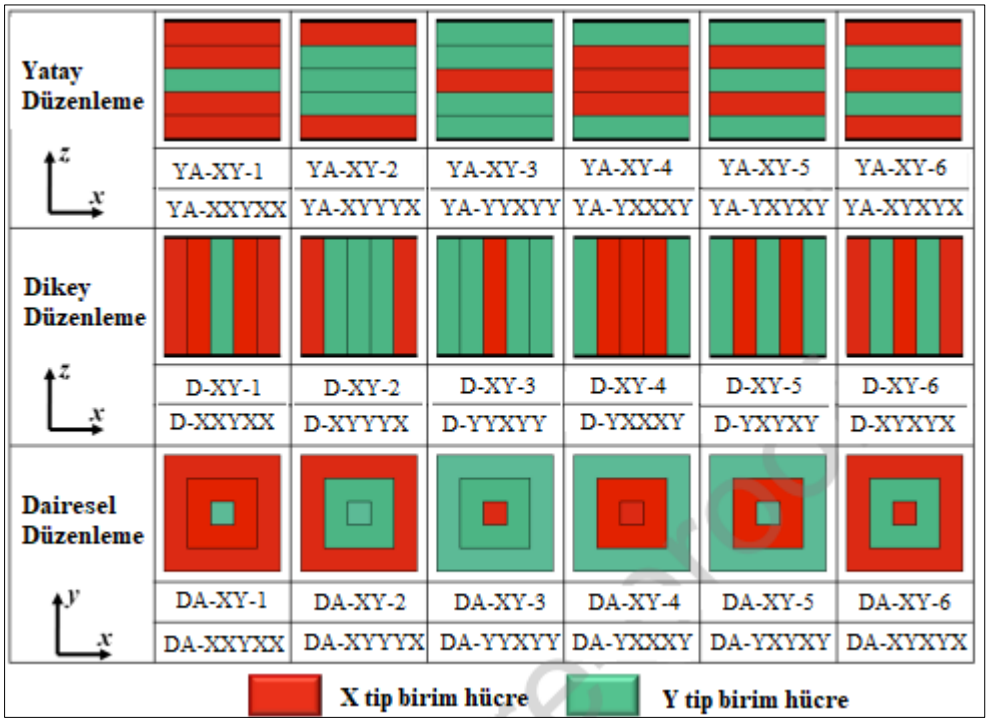


Şekil 2.22. Dört farklı birim hücre tipi [77]



Şekil 2.23. Hibrit yapının düzenlenmesi a) yatay, b) dikey ve c) dairesel [77]

Çizelge 2.2. İki farklı birim hücrenin birleşmesiyle elde edilen hibrit kafes çekirdeğe sahip sandviç yapının düzenlenmesini gösteren şematik diyagram [77]



Lei ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada birkaç çeşit kafes yapıdaki çekirdeğe sahip sandviç paneller AlSi10Mg alaşımı kullanılarak SLE yöntemiyle üretilmiştir. Maksimum mukavemet ve basma modülleri deney ve SEA ile değerlendirilmiştir. Geleneksel karışım kuralı göz önünde bulundurularak veriler teorik simülasyonlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre uzamsal düzenleme ve hücre performansının, mekanik performans ve maksimum mukavemete etkileri belirlenmiştir.

Çizelge 2.3. Tipik kafes numunelerin deney ve sonlu elemanlar analiziyle elde edilen basma ve başlangıç tepe dayanımının kıyaslanması a) homojen olarak tek tip hücreden oluşan, b) yatay düzenlemeyle oluşturulan, c) dikey düzenleme ile oluşturulan ve d) dairesel düzenleme ile oluşturulan kafes yapılar [77]

Tip	Basma Dayanımı (MPa)			Başlangıç Tepe Dayanımı (MPa)			
	Deneysel	SEA	Sapma	Deneysel	SEA	Sapma	
H-A	38.26	42.06	9.03%	0.79	0.74	-6.76%	a
H-B	359.83	346.09	-3.97%	3.53	3.227	-9.39%	
H-C	445.23	426.54	-4.38%	5.19	4.8	-8.13%	
H-D	838.71	865.05	3.04%	7.84	7.17	-9.34%	
YA-AB-4	85.36	92.69	7.91%	1.26	1.22	-3.28%	b
YA-AB-6	186.18	168.29	-10.63%	2.02	2.18	7.34%	
YA-AD-4	129.33	124.28	-4.06%	1.47	1.41	-4.26%	
YA-AD-6	271.95	243.72	-11.58%	3.11	3.07	-1.30%	
D-AB-4	162.66	171.27	5.03%	1.61	1.44	-11.81%	c
D-AB-6	188.72	174.24	-8.31%	1.26	1.34	5.97%	
D-AD-4	324.14	361.71	10.39%	3.32	2.935	-13.12%	
D-AD-6	363.69	362.17	-0.42%	2.79	2.549	-9.45%	
DA-AB-2	138.791	160.5	13.53%	1.34	1.274	-5.18%	d
DA-AB-4	158.47	149.71	-5.85%	1.32	1.159	-13.89%	
DA-AD-2	370.97	328.79	-12.83%	2.47	2.355	-4.88%	

Lei ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada ayrıca kesme bozulma (ing. shear failure) davranışı baskın bir rol oynamasına rağmen yatay hibrit paneller için katman katman bozulma (ing. failure) davranışı ana yöntem olarak belirlenmiştir. Zayıf katmanlarında bölgesel burkulmalara (ing. buckling) sahip olan dairesel ve dikey hibrit yapıların baskın modları kesme bozulma davranışları olduğu bilinmektedir. Aynı bağıl yoğunluk ve düzenleme modelleri altında, yatay yerleştirilmiş hibrit panellerin dikey olanlardan daha zayıf olduğu görülmüştür [77].

Bu bölümde literatürde yer alan dikme tabanlı hibrit hücreye sahip kafes yapılarla ilgili çalışmalar incelenmiştir. Lei ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada tez kapsamında çalışılan geometrilerin SLE yöntemiyle AlSi10Mg malzemesi kullanılarak üretilmiş basma numunelerinin testleri yapılmıştır [77]. Fakat aynı geometrilerin 3 nokta eğme testleri yapılmamıştır. Yapılan 3 nokta eğme testiyle dikme tabanlı hibrit hücreler ile kendilerini oluşturan hücrelerin eğilmeye karşı oluşturdukları mekanik dayanımın kıyaslanması ile literatürdeki boşluğun doldurulması amaçlanmıştır. Ayrıca numunelerin boyutsal ölçümleri yapılmış ve numuneler tartılmış fakat hacimsel boşluk oranları belirlenmemiştir. Testler

sonrasında kırılma yüzeyleri de incelenmemiştir. Tez kapsamında belirlenen geometriler Ti6Al4V tozu kullanılarak EIE metodu ile üretilmiştir. Böylece farklı bir toz yataklı eklemeli imalat metodu ve malzemenin kullanılmasının belirlenen hücre yapılarındaki basma dayanımına etkisinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca literatürde dikme tabanlı hibrit hücreye sahip kafes yapıların hacimsel boşluk oranlarını belirlemeye yönelik çalışmalara rastlanmamıştır. Tez kapsamında ilgili kafes yapıların Arşimet yöntemi ile hacimsel boşluk oranları belirlenmiş olup tasarımla üretim sonrası hacimsel boşluk oranları kıyaslanmıştır. Ayrıca dikme tabanlı hibrit hücreye sahip kafes yapıların kırılma yüzeylerinin SEM ile incelenmesiyle literatürdeki diğer bir boşluğun da doldurulması amaçlanmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

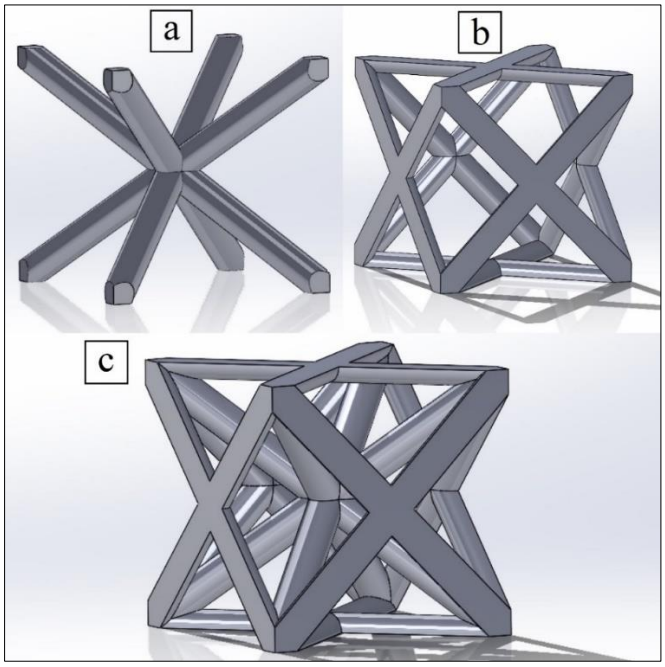
3.1. Tasarım

Orijinal homojen birim hücrelerden oluşan kafes yapılarla kıyaslandığında farklı birim hücrelerin daha etkili kullanıldığı ve performansın iyileştirildiği bir yapı elde etmek için aynı boyuttaki kafes yapıda farklı tip birim hücrelerin hibrit halleri kullanılmıştır [80].

3.1.1. Birim hücrelerin tasarımı

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde hücre tasarımında belirlenmesi gereken parametrelerin birim hücre yapısı, birim hücre boyutu, kolon kalınlığı, kafes yapıdaki hücre sayısı ve kafes yapılar üzerindeki plaka kalınlığının olduğu görülmüştür [81-85]. Tasarlanmış hücresel malzemelerde karakteristik hücre boyutu 0.1-10 mm arasındadır [86]. Ayrıca kafes yapılarda kullanılacak olan minimum kolon kalınlığının 0.3 mm olarak kabul edildiği görülmüştür [78]. Kafes yapıların dış kısımlarındaki kabuk kalınlığı ise 0.5-5 mm arasındadır [79–83]

Bu çalışmada birim hücre boyutu 3 mm ve kolon kalınlığı ise 0.4 mm olarak kabul edilmiştir. Birim hücrelerin modelleri Solidworks yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır.



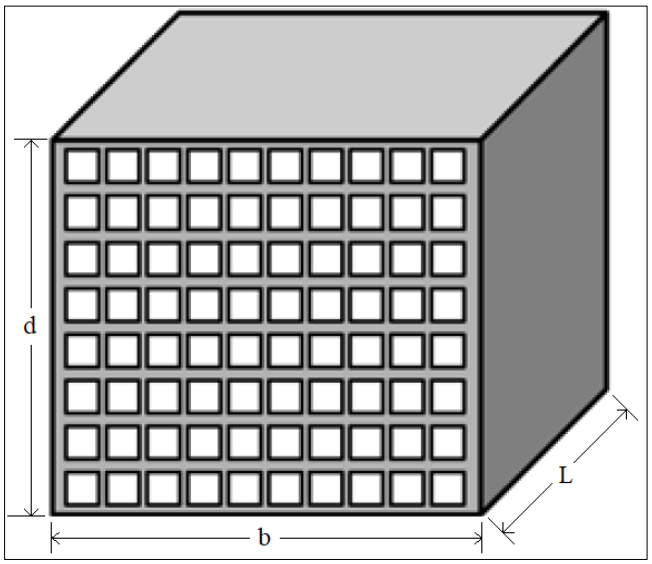
Şekil 3.1. Birim hücre tasarımları a) HMK, b) YMK ve c) HYMK hücre yapısı

3.1.2. 3 nokta eğme numunelerinin tasarımı

3 nokta eğme testi uygulanan kafes yapıların incelendiği makalelerde birim hücre boyutunun 0.8 – 9.7 mm arasında değişkenlik gösterdiği görülmüştür [79–89]. Birim hücre kolon kalınlığının ise 0.15 – 0.9 mm arasında değişkenlik gösterdiği görülmüştür [52, 57, 74–76, 78, 90–93]. Literatürde, üretimde meydana gelen problemler nedeniyle numunelerin sağ ve sol yanlarına da kabuk eklendiği çalışmalar mevcuttur [94] Literatürde yer alan bazı makalelerde kafes yapının sağ, sol, üst ve alt kısımlarında kabuklar oluşturulmuştur [82, 86, 87]. Bu yüzden eğme numunelerinin sağ, sol, alt ve üst kısımlarında kabuklar oluşturulmuştur [79–83, 86, 87]

Kafes yapı boyutları belirlenirken literatürdeki çalışmalardaki kullanılan aralıklar dikkate alınmış olup, kaynakların sınırlı olmasından dolayı bu aralıklardaki minimum değerlere yakın değerler seçilerek hesaplamalar yapılmıştır. Tez kapsamında 3 nokta eğme numunelerinin boyutları ASTM C1674 – 16 standardına göre hesaplanmıştır [95] Standart test hızı ise ASTM C393/C393M − 20 standardına göre belirlenmiştir [96]. Buna göre birim hücre boyutu 3 mm, kolon kalınlığı 0.4 mm, sağ, sol, alt ve üst yüzeylerdeki kabuk kalınlığı ise 1 mm olarak kabul edilmiştir. Ölçülerin belirlenmesinin ardından 3 nokta eğme testi 3B modelleri Solidworks yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır.

ASTM C1674 – 16 standardına göre [95]



Şekil 3.2. Numune boyutlarının adlandırılması

Şekil 3.2'de görülen *d* numune kalınlığını, *p* ortalama hücre boyutunu, *b* kafes yapı genişliğini, *L* dış açıklık değerini ve L_T ise numune uzunluğunu göstermektedir.

$$d \geq 5 \times p \tag{3.1}$$

$$d = 3 \times 5 = 15\ mm \tag{3.2}$$

Eşitlik 3.2'de ortalama hücre boyutu yerine yazıldığında numune kalınlığı 15 mm olarak bulunmuştur. Kalınlık değerine, 1 mm üst ve 1 mm alt kabuk kalınlıkları olmak üzere toplam 2 mm kabuk kalınlığı eklendiğinde numune kalınlığı 17 mm olarak bulunur.

$$\mathrm{b} \geq 1 \times d \tag{3.3}$$

Eşitlik 3.3'teki şartın sağlanması için numune genişliğinin minimum 17 mm olması gerektiğinden kafes yapı genişliği 17 mm olarak kabul edilmiştir.

$$L \geq 4 \times d \tag{3.4}$$

$$L = 17 \times 4 = 68\ mm \tag{3.5}$$

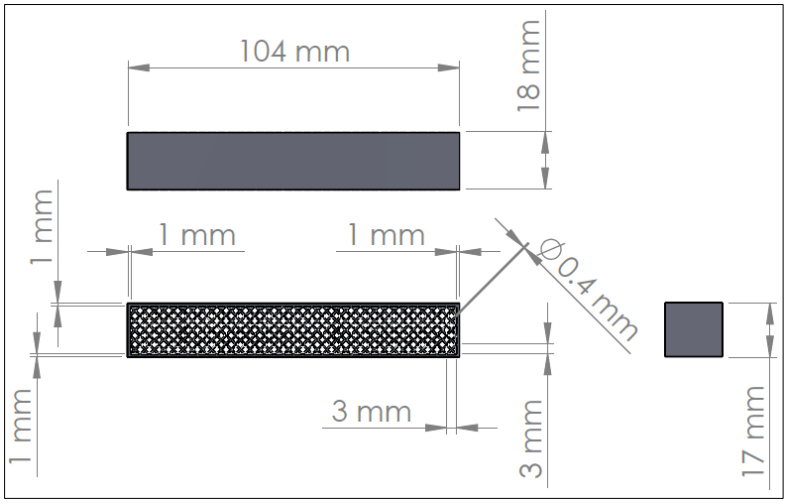
Eşitlik 3.5'de görüldüğü gibi dış açıklık değeri 68 mm olarak bulunmuştur.

$$L_T \geq L + 2 \times d \tag{3.6}$$

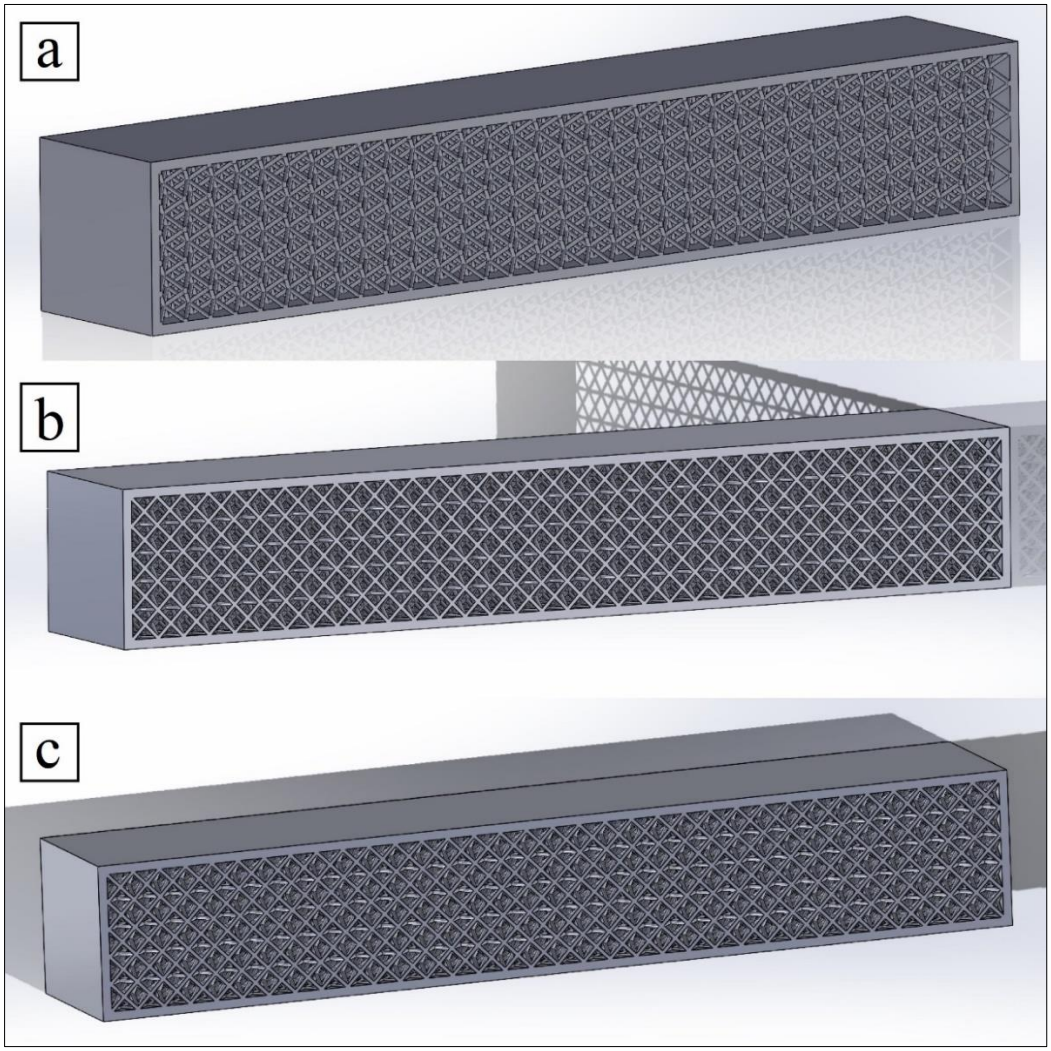
$$L_T = 68 + 2 \times 17 = 102\ mm \tag{3.7}$$

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi 1 mm sol ve 1 mm sağ kabuk kalınlıkları olmak üzere toplam 2 mm kabuk kalınlığı eklendiğinde kafes yapı uzunluğu 104 mm olarak bulunmuştur.

3 nokta eğme numunelerinin boyutları belirlendikten sonra tasarımlar Solidworks yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. 3 nokta eğme numunelerinin boyut ölçülendirmesi



Şekil 3.4. 3 nokta eğme tasarımları a) HMK, b) YMK ve c) HYMK kafes yapısı

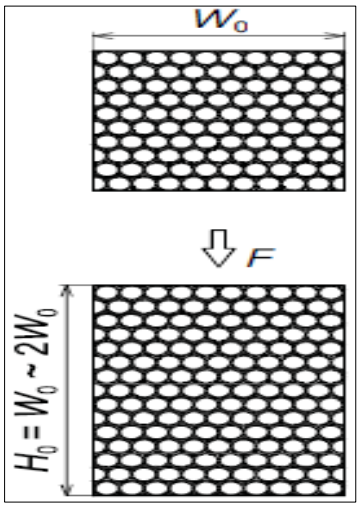
ASTM C393/C393M − 20 standardına göre önerilen standart test hızı ise 6 mm /dk'dır [96].

3.1.3. Basma numunelerinin tasarımı

Basma testi uygulanan kafes yapıların incelendiği makalelerde birim hücre boyutunun 0.8 – 10 mm arasında, kolon kalınlığının ise 0.15 – 1 mm arasında değişkenlik gösterdiği görülmüştür. İncelenen makalelerde basma numunelerinin alt ve üst kısımlarında kabuklar oluşturulduğu ve basma testi için ISO 13314:2011, ASTM E9-09, ASTM C365 standartlarının yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür, [77–80, 84, 97]. Tez kapsamında basma numunelerinin boyutlarının belirlenmesinde ISO 13314:2011 standardı kullanılmıştır.

Basma numunelerinin boyutları literatürdeki çalışmalarda kullanılan aralıklara uygun şekilde belirlenmiştir. Buna göre hücre boyutu 3 mm, kolon kalınlığı 0.4 mm, alt ve üst yüzeylerdeki kabuk kalınlığı ise 1 mm olarak kabul edilmiştir. Ölçülerin belirlenmesinin ardından basma testi 3B modelleri Solidworks yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır.

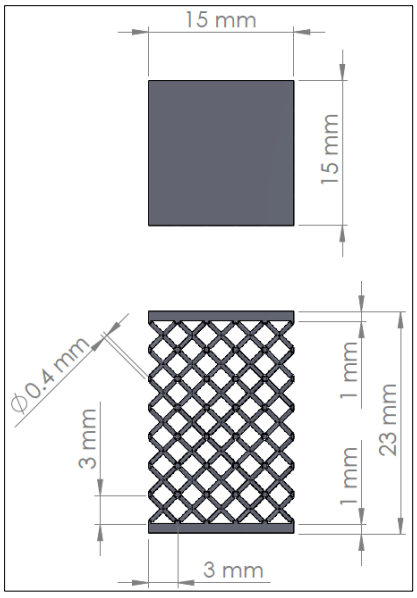
ISO 13314:2011 gözenekli ve hücresel metaller için basma test standardına göre basma testinde dairesel ve dikdörtgen kesitli numunelerin kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Tez kapsamında basma numuneleri dikdörtgen kesitli olarak tercih edilmiştir.



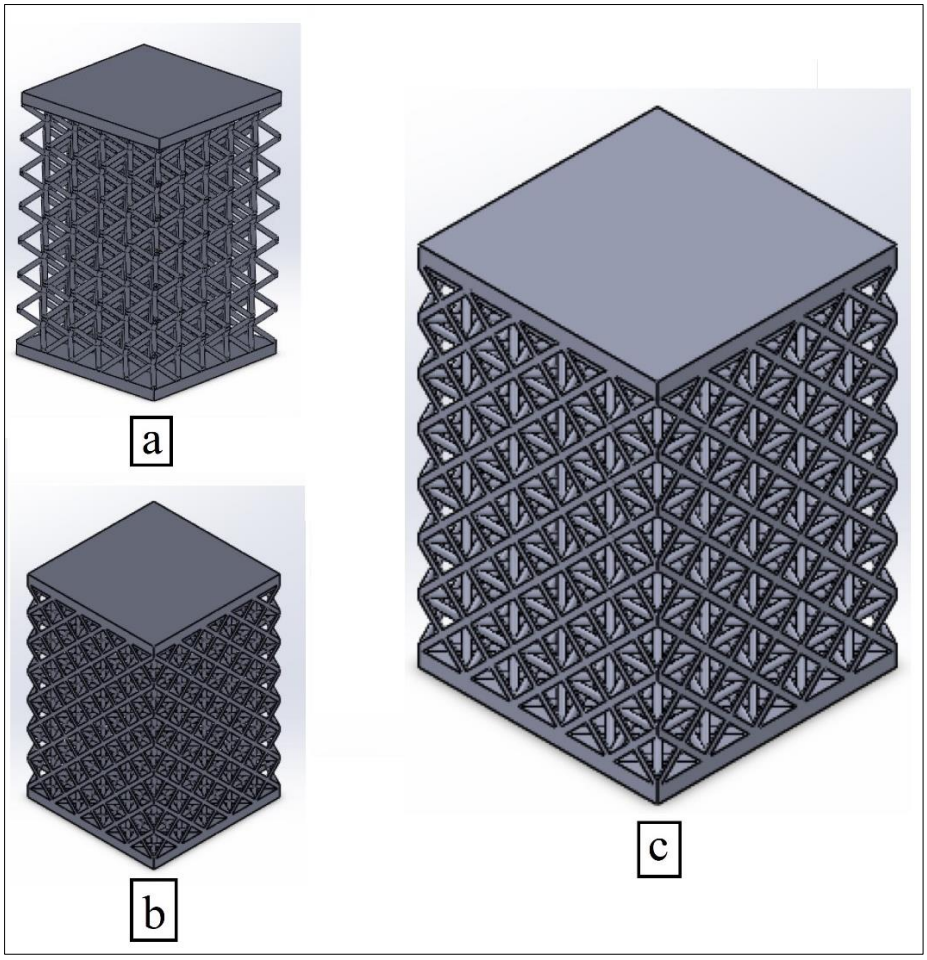
Şekil 3.5. Numune boyutları, W_0: Kesitin kenar uzunluğu, H_0: Kesitin yüksekliği

İlgili standarda göre, tüm boyutların 10 mm'den küçük olmaması gerektiği belirtilmiştir. Şekil 3.5'te de görüldüğü gibi numune yüksekliğinin kesitin kenar uzunluğunun 1 ile 2 arasındaki katlarındaki uzunluklarda olması gerektiği belirtilmiştir [98]. Numunelerin kesiti kare olarak belirlenmiş ve tüm boyutların 10 mm'den küçük olmaması göz önünde bulundurularak her bir kenara 5 hücre gelecek şekilde kenar uzunlukları 15 mm olarak belirlenmiştir. Numune yüksekliğinin kesitin kenar uzunluğunun 1 ile 2 arasındaki katlarındaki uzunluklarda olması gerektiğinden numune yüksekliği boyunca 7 hücre yerleştirilmiş ve uzunluğu 21 mm olarak belirlenmiştir. Basma test numuneleri tasarlanırken test esnasında yüzeylerin temasının sağlanması için kafes yapıların alt ve üst kısmına 1 mm kalınlığında plakalar eklenmiştir [99]. Alt ve üst kısımlarda yer alan 1 mm'lik kabukların uzunlukları da eklendiğinde numunenin toplam yüksekliği 23 mm olarak belirlenmiştir.

Basma numunelerinin boyutları belirlendikten sonra tasarımlar aynı şekilde Solidworks yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Basma numunelerinin boyut ölçülendirmesi



Şekil 3.7. Kafes yapı tasarımları a) HMK, b) YMK ve c) HYMK yapısı

Ayrıca ilgili standartta test numune sayısının 3'ten az olmaması gerektiği belirtilmiştir. Bu yüzden tez kapsamında HMK ve YMK hücrelerine sahip kafes yapıdaki geometrilerden 3'er adet ve üretimdeki aksaklıklara karşı önlem olarak hibrit hücrelere sahip kafes yapıdaki basma numunelerinden 4 adet olacak şekilde numuneler üretilmiştir.

Test standardında $10^{-3}s^{-1}$ ve $10^{-2}s^{-1}$ arasında bir başlangıç basma gerinim oranını elde etmek için çene ilerleme hızının hesaplanması gerektiği belirtilmiştir [98]

Basma gerinim oranını dk cinsinden yazarsak,

$$10^{-3} \times \frac{1}{s} \times \frac{60\ s}{1\ dk} = 0.06\ dk^{-1} \tag{3.8}$$

$$10^{-2} \times \frac{1}{s} \times \frac{60\ s}{1\ dk} = 0.6\ dk^{-1} \tag{3.9}$$

Gerinim oranı formülü aşağıdaki gibidir:

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{L(t)-L_0}{L_0}\right) = \frac{1}{L_0}\frac{dL(t)}{dt} = \frac{v(t)}{L_0} \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.8'de bulunan gerinim oranı değerini eşitlik 3.10'daki gerinim oranı formülü ile eşitlersek,

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{v(t)}{L_0} = \frac{v(t)}{23} = 0.06\ mm.dk^{-1} \quad (3.11)$$

$$v(t) = 1.38\ \frac{mm}{dk} \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.9'da bulunan gerinim oranı değerini eşitlik 3.10'daki gerinim formülü ile eşitlersek,

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{v(t)}{L_0} = \frac{v(t)}{23} = 0.6\ mm.dk^{-1} \quad (3.13)$$

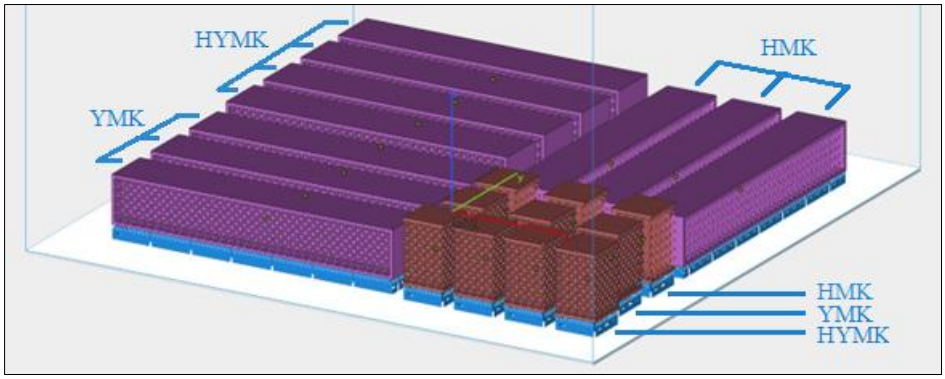
$$v(t) = 13.8\ \frac{mm}{dk} \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.12 ve 3.14'e göre test hızının 1.38 – 13.8 mm/dk aralığında olması gerektiğinden test hızı 2 mm/dk olarak belirlenmiştir [93, 98].

3.2. Üretim

3.2.1. Üretim ön hazırlığı

Üretim öncesinde Solidworks yazılımında modeller stl formatında kaydedilmiştir. Bu tasarımlar Materialise Magics programında açılmıştır. Ardından programda numuneler tabla üzerine yerleştirilmiş ve tasarımlar 50 µm kalınlığındaki katmanlar halinde dilimlenmiştir. Numunelerin tabladan kolay ayrılabilmesi için modellere destek yapıları eklenmiştir.



Şekil 3.8. Materialise magics programında numunelerin tablaya yerleştirilmiş hali

3.2.2. Numunelerin EIE yöntemiyle üretimi

Tasarımı tamamlanan numunelerin üretimi Gazi Üniversitesi Eklemeli İmalat Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi (EKTAM) bünyesinde yer alan ARCAM A2X cihazında EIE yöntemiyle helyum gazı atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin katman kalınlığı 50 µm olarak belirlenmiştir.

Üretimde AP&C firmasının 45-106 µm ölçülerindeki Ti6Al4V tozu kullanılmıştır. Ti6Al4V tozunun içeriği aşağıdaki Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Ti6Al4V tozunun içeriği

Element	Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H	Y	Diğerleri, her biri	Diğerleri, toplam
% Bileşimi	Geri kalanı	6.32	4.08	0.20	0.15	0.02	0.02	0.002	< 0.001	< 0.10	< 0.40

Ayrıca üretimde kullanılacak tozdan alınan bir miktar örneğin Gazi Üniversitesi EKTAM'da yer alan Microtrac marka ve MRB SYNC model cihazda lazer difraksiyon yöntemiyle toz boyutu ve şekil analizi gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.1. Microtrac MRB SYNC toz boyutu ve şekil analiz cihazı

Çizelge 3.2. EIE yöntemi üretim parametreleri

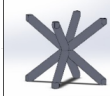
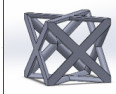
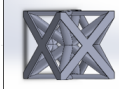
Parametre Türü		Parametre Değeri	Birimi
Ergitme Işını	Manuel Hız	4530	mm/s
	Manuel Akım	15	mA
	Odak Kayması (ing. Focus Offset)	25	mA
	Çizgi Kayması (ing. Line Offset)	0.2	mm
Destek Yapısı	Akım	5.5	mA
	Hız	1600	mm/s
	Odak Kayması	4	mA

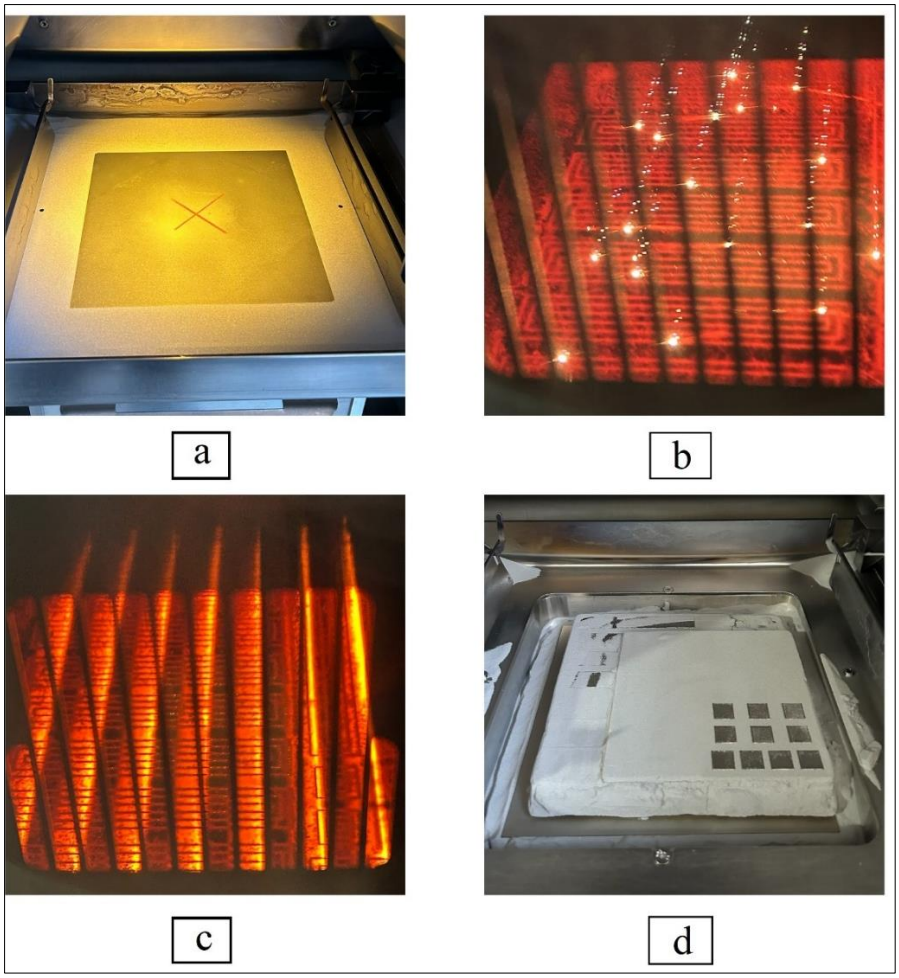


Resim 3.2. Arcam A2X EIE cihazı

HMK, YMK ve HYMK basma numunelerinde her geometri için 3 adet olmak üzere toplam 9 adet, 3 nokta eğme numunelerinde de aynı şekilde her geometri için 3 adet olmak üzere toplam 9 adet numune üretilmiştir. Ayrıca üretim sonrasında Gazi Üniversitesi EKTAM'da yer alan toz geri kazanım sistemi (ing. powder recovery system) cihazında HYMK hibrit yapısının temizlenmesinde zorluk yaşanacağı tahmin edildiğinden tedbir amaçlı olarak hem basma hem de eğme numunelerinden 1'er adet toplamda 2 adet emniyet numunesi üretilmiştir. Dolayısıyla üretilen toplam numune sayısı 20 adet olmuştur.

Çizelge 3.3. Üretilmiş numunelerin sayısı

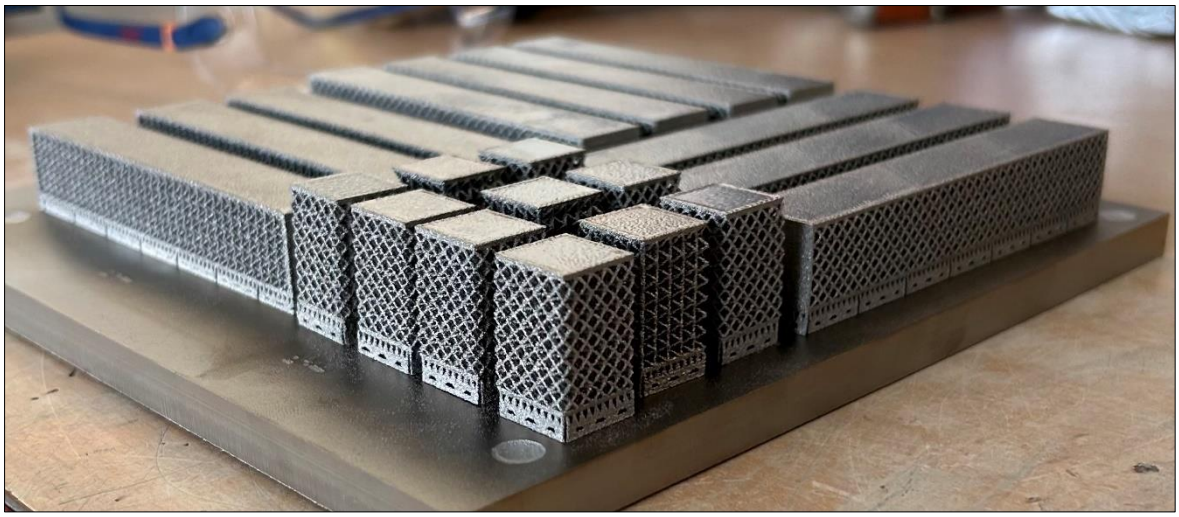
GEOMETRİ		UYGULANACAK TEST	NUMUNE SAYISI (ADET)	EMNİYET NUMUNELERİ (ADET)	TOPLAM NUMUNE SAYISI (ADET)
	HMK	BASMA	3		3
		EĞME	3		3
	YMK	BASMA	3		3
		EĞME	3		3
	HYMK	BASMA	3	1	4
		EĞME	3	1	4
				GENEL TOPLAM NUMUNE SAYISI	20



Resim 3.3. EIE yöntemiyle üretim görselleri a) üretim öncesi tablanın görüntüsü, b) üretim esnasındaki ergitme prosesi, c) üretim esnasında ön ısıtma prosesi ve d) üretimin tamamlanmasının ardından tabla ve numunelerin görüntüsü

3.2.3. Üretim sonrası işlemler

Üretilen numunelerin yer aldığı tablanın etrafındaki sinterlenmiş tozlar mekanik el aletleriyle temizlenmiştir. Numunelerin etrafına yapışmış halde olan tozların temizlenmesi için toz geri kazanım sistemi (PRS) cihazında numunelerin çevresine yüksek basınçlı hava ile Ti6Al4V tozu püskürtülerek numuneler fazla tozlardan arındırılmıştır.



Resim 3.4. Tablada bulunan sinterlenmiş tozlar temizlendikten sonraki görünümleri



Resim 3.5. Numunelerin iç kısmında kalan sinterlenmiş tozların PRS cihazında temizlenmesi işlemi

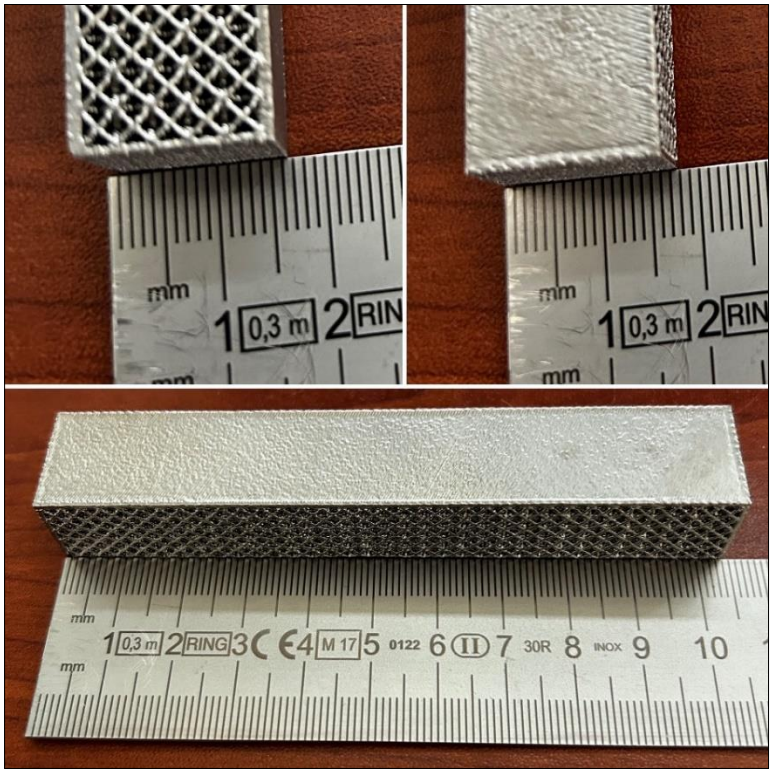
PRS cihazındaki temizleme işlemlerinin ardından tabladan ayrılan numunelerin destek yapıları karga burun ve pense gibi el aletleriyle numunelerden ayrılmıştır. Basma test standardına göre test esnasında test plakaları ile temas halindeki alanların paralel olması gerektiği belirtilmiştir. Bu yüzden 3 nokta eğme ve basma test düzeneği ile numunelerin

temas edecek yüzeylerinin paralelliğinin sağlanması için Gazi Üniversitesi EKTAM'da destek yapılarının ayrıldığı yüzeylerdeki kalıntı ve çapaklar yapılan eğeleme işlemi ile temizlenmiştir.

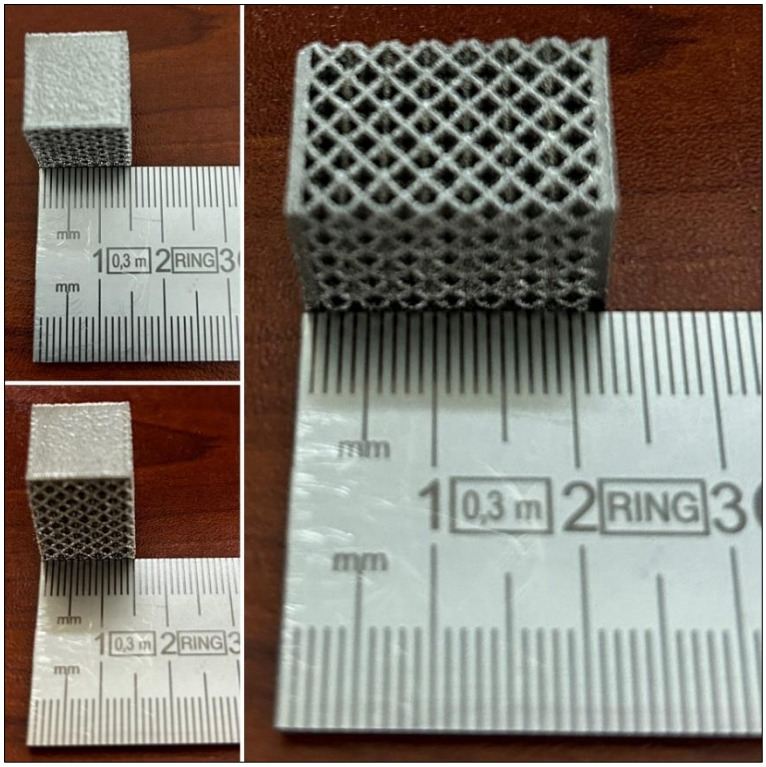


Resim 3.6. Numunelerin destek yapılarından ayrılan yüzeylerinin eğelenmesi işlemi

Ardından tekrar PRS cihazında her bir numunenin iç kısmında bulunan sinterlenmiş tozlar da ayrı ayrı temizlenmiştir. Böylece kafes yapıdaki boşluklu yapının tam olarak ortaya çıkması sağlanmıştır.



Resim 3.7. 3 nokta eğme numunesi üretim sonrası boyutları



Resim 3.8. Basma numunesi üretim sonrası boyutları

Ayrıca yine de numunelerin içerisinde fark edilmeyen tozların kalma ihtimaline karşı ise öncelikle numunelere basınçlı hava püskürtülmüştür. Ardından Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde bulunan Alex Machine markalı ultrasonik temizleme cihazında numuneler 70 ℃'deki saf su içinde 30 dk bekletilmiştir. Bu işlemin ardından numunelerin içerisindeki fazla su basınçlı hava ile çıkartılmış ve numunelerin kuruması beklenmiştir.



Resim 3.9. Ultrasonik temizleme cihazında numunelerin temizlenmesi

3.3. Hacimsel Boşluk Oranının Belirlenmesi

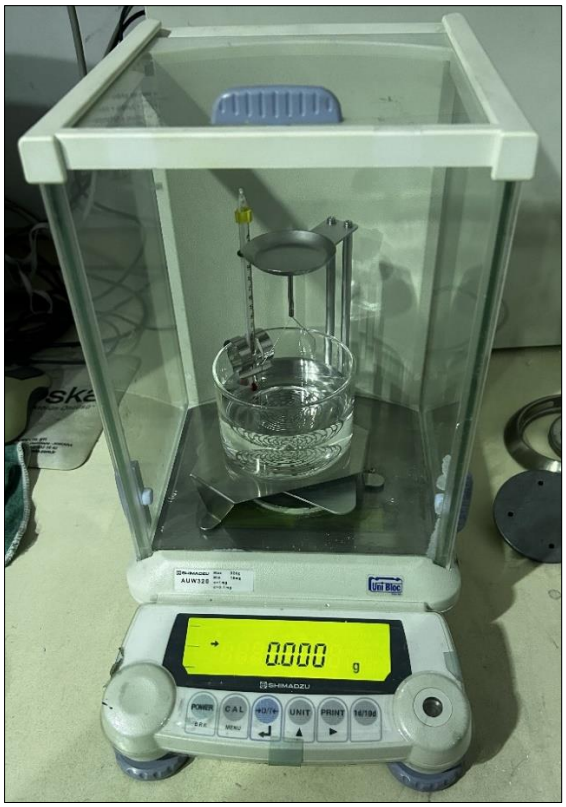
Çizelge 3.4. Numunelerin adlandırılması

GEOMETRİ	UYGULANACAK TEST	NUMUNE NUMARASI	NUMUNE ADLANDIRMASI
HMK	BASMA	1	HMK-B-1
		2	HMK-B-2
		3	HMK-B-3
	EĞME	1	HMK-E-1
		2	HMK-E-2
		3	HMK-E-3
YMK	BASMA	1	YMK-B-1
		2	YMK-B-2
		3	YMK-B-3
	EĞME	1	YMK-E-1
		2	YMK-E-2
		3	YMK-E-3
HYMK	BASMA	1	HYMK-B-1
		2	HYMK-B-2
		3	HYMK-B-3
	EĞME	1	HYMK-E-1
		2	HYMK-E-2
		3	HYMK-E-3

Bu çalışmada Arşimet prensibinden kafes yapının içindeki hacimsel boşluk oranını belirlemek için yapılan hesaplamalarda yararlanılmıştır. Bu yöntemde hava yanında saf su, aseton ve etanol gibi bir referans akışkanı seçilmesi gerekmektedir [100]. Tez kapsamında yapılan yoğunluk ölçümünde saf su kullanılmıştır.

Arşimet ölçümleri için Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Toz Metalurji laboratuvarında yer alan Shimadzu marka ve AUW320 model cihaz kullanılmıştır. Hacimsel boşluk oranları belirlenirken hem Arşimet yöntemi hem de tasarımdan elde edilen verilerden yararlanılmıştır. 3 nokta eğme numunelerinin boyutları deney düzeneğine göre büyük olduğundan, hücre boyutları ve tipleri basma numuneleriyle aynı olduğundan Arşimet yönteminde basma numuneleri kullanılmıştır.

Resim 3.10'da ölçümlerin gerçekleştirildiği Arşimet deney düzeneği, Resim 3.11'de ise numunelerin havada ve suda tartılması gösterilmiştir.



Resim 3.10. Arşimet deney düzeneği



Resim 3.11. Numunenin havada ve suda tartılması

3.4. Basma ve 3 Nokta Eğme Testleri

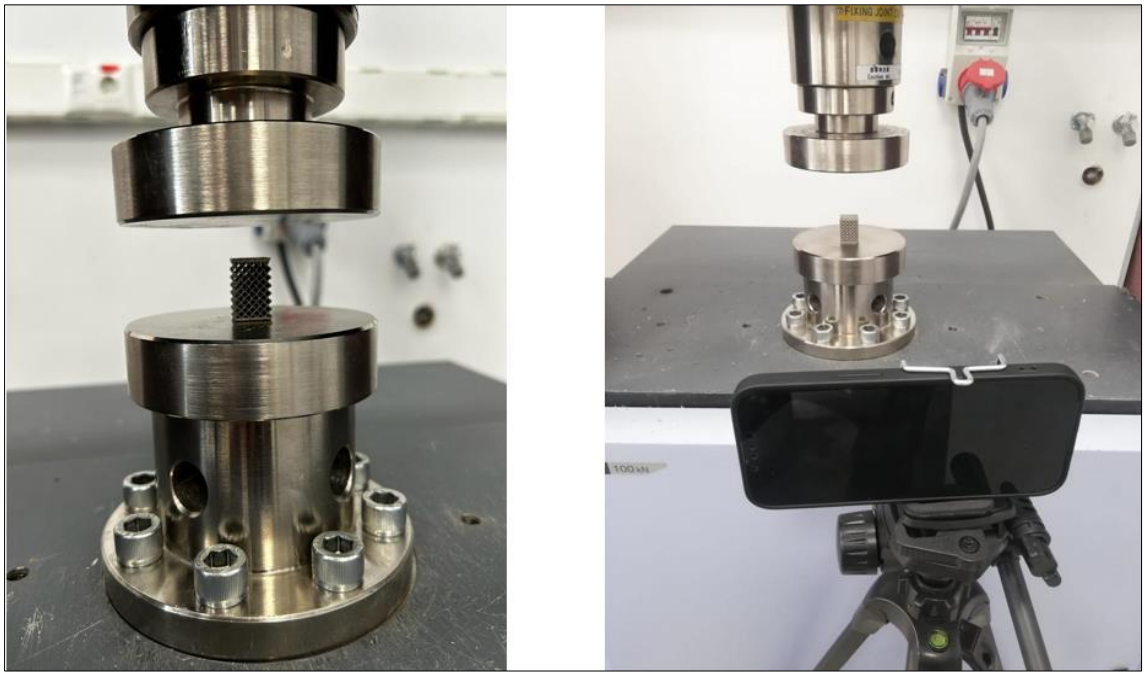


Resim 3.12. Shimadzu AGS-X 100 kN test cihazı

Basma ve 3 nokta eğme testleri Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (BİTAM) yer alan Shimadzu marka ve AGS-X model 100 kN test cihazında gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. Basma testi

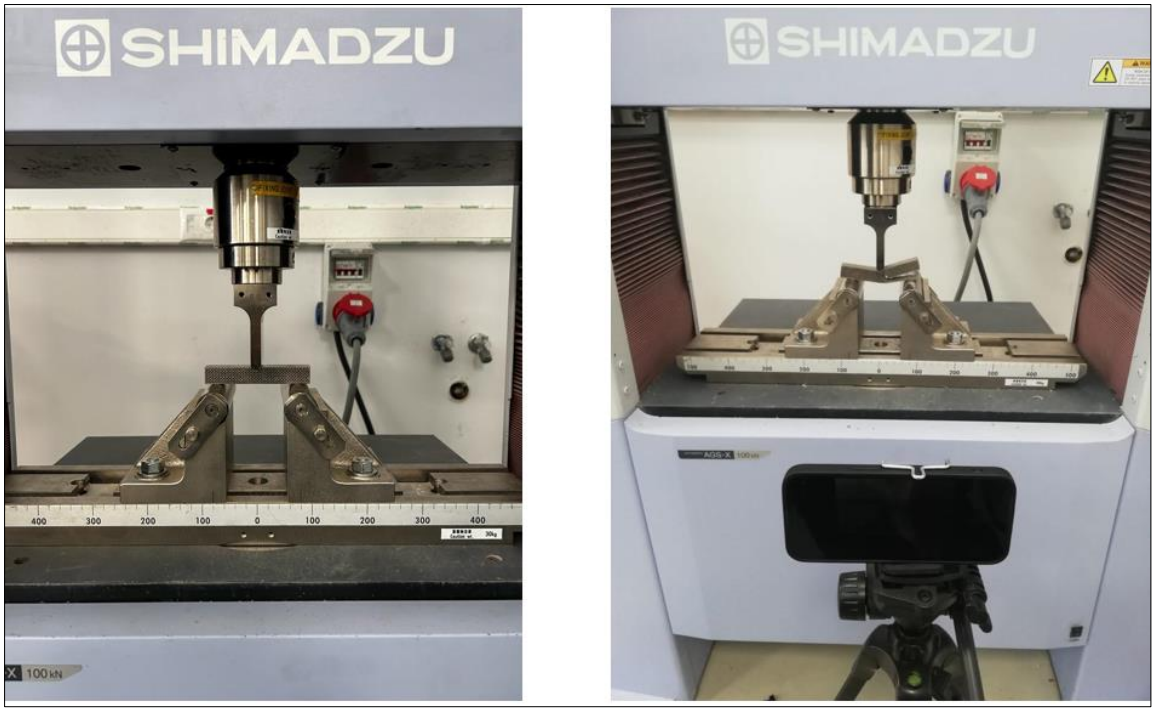
Tez kapsamında basma testleri ISO 13314:2011 standardına göre yapılmıştır. Basma test hızı 2 mm/dk olarak belirlenmiştir [93, 98]. Basma testleri ağır çekim video ile kayda alınmış ve fotoğraflanmıştır. Her geometriden 3 olmak üzere toplamda 9 adet basma numunesi teste tabi tutulmuştur. Her bir geometri için elde edilen verilerin ortalaması alınmıştır.



Resim 3.13. Basma test düzeneği

3.4.2. 3 nokta eğme testi

Tez kapsamında 3 nokta eğme testlerinde ASTM C1674 – 16 ve ASTM C393/C393M − 20 standartları kullanılmıştır. Testler ASTM C393/C393M − 20 standardına göre önerilen 6 mm /dk hızında gerçekleştirilmiştir [95, 96]. 3 nokta eğme testleri de ağır çekim video ile kayda alınmış ve fotoğraflanmıştır. Her geometriden 3 olmak üzere toplamda 9 adet 3 nokta eğme numunesi teste tabi tutulmuştur. Her bir geometri için elde edilen verilerin ortalaması alınmıştır.



Resim 3.14. 3 nokta eğme test düzeneği

3.5. Görüntüleme Yöntemi

3.5.1. Taramalı Elektron mikroskop incelemesi

Basma ve 3 nokta eğme numunelerinin taramalı elektron mikroskobu ile incelemesi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü SEM laboratuvarında yer alan Jeol marka ve JSM-6060LV model elektron mikroskobunda gerçekleştirilmiştir.

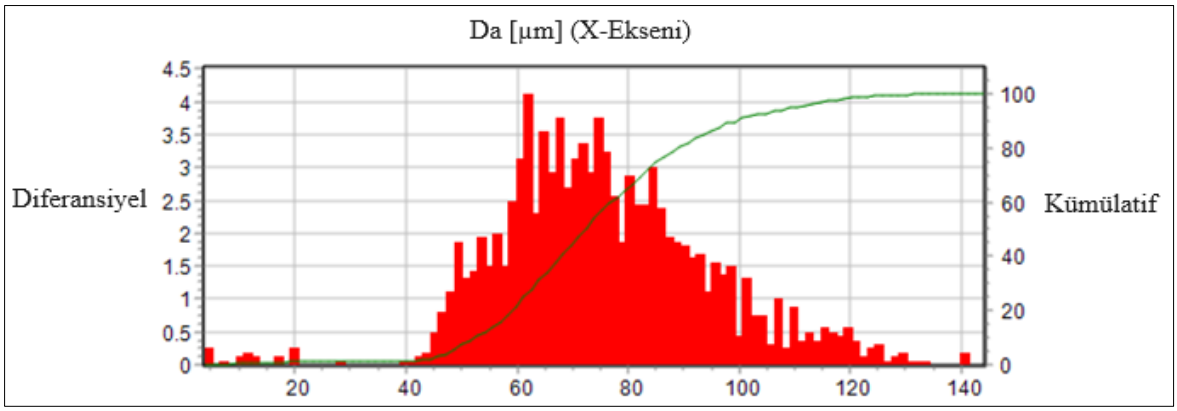


Resim 3.15. Jeol JSM-6060LV taramalı elektron mikroskopu

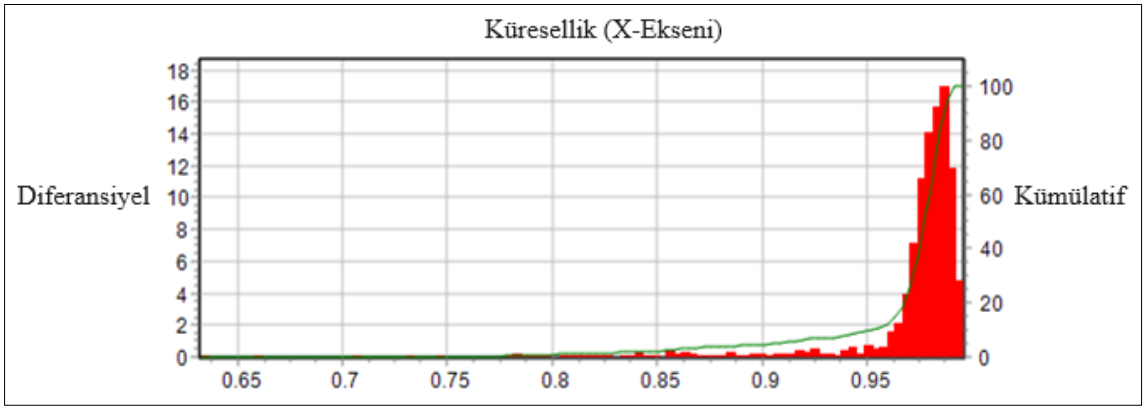
4. TARTIŞMA VE BULGULAR

4.1. Toz Boyut ve Küresellik Bulguları

Toz özellikleri ve toz yatağı kalitesi üretilen parçaların özellikleri açısından önemlidir. Bu nedenle, toz yatağı kalitesinin yeterli olduğunu anlamak açısından tozun nasıl serildiğinin ve toz katmanlarının nasıl oluştuğunun anlaşılması önemlidir. Serilen tozdan ince, yoğun ve düzgün toz tabakaları elde edilmesi önemlidir. Ayrıca, bir tozun iyi akma yeteneği, parçacıkların şekli, boyutu, boyut dağılımı, yüzey dokusu, gözenekliliği, kimyasal bileşimi, nem içeriği, yoğunluğu, elektrostatik yükü ve sertliğinden büyük ölçüde etkilenir [119]. Bu anlamda numunelerin üretiminde kullanılan Ti6Al4V tozunun ortalama parçacık boyutu olan D_a değerleri Şekil 4.1'de, küresellik değerleri ise Şekil 4.2'de, gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Ortalama toz boyut ölçümü



Şekil 4.2. Ti6Al4V tozunun küreselliği

4.2. Hacimsel Boşluk Oranı Bulguları

Hacimsel boşluk oranı ölçümleri yapılırken numunelerin gözeneklerine su girmemesi için numunelerin etrafı bant ile kapatılmıştır. Kapatılan numunelerin havadaki ve sudaki ağırlıkları ölçülüp kaydedilmiştir. Sonrasında numunelerden sökülen bantların havadaki ve sudaki ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin bantlı halinin havadaki ağırlığından bandın havadaki ağırlığı çıkarılarak numunelerin hava dahil net ağırlığı bulunmuştur. Aynı işlem sudaki ağırlıkların ölçülmesinde de uygulanmıştır. Hava ve sudaki ağırlık ölçümleri 3 kez tekrarlanmıştır [100]. Ardından hesaplamalarda bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır. Havada gerçekleştirilen tartımda eşitlik 4.1'deki W_{th} numunenin hava dahil ağırlığı ile bant ağırlığının toplamını ve $W_{bh}\ ise$ bantın kuru tartım ağırlığını göstermektedir. Suda gerçekleştirilen tartımda ise eşitlik 4.2'deki W_{ts} numunenin hava dahil ağırlığı ile bant ağırlığının toplamını ve W_{bs} bantın sudaki ağırlığını göstermektedir.

Hava dahil numune tartımı esnasında saf suyun sıcaklığı 20 ℃ olarak ölçülmüştür. Bu sıcaklıktaki yoğunluk değeri 0,99820405 $\frac{gr}{cm^3}$ olduğundan hesaplamalarda bu değer kullanılmıştır. Havada ve suda ölçülmüş net ağırlıklar ile saf suyun 20 ℃ deki yoğunluğu eşitlik 4.3'te yerine yazılarak numunenin hava dahil yoğunluğu hesaplanmıştır. Eşitlik 4.3'te görülen ρ numunelerin ve ρ_l suyun yoğunluğunu ifade ederken; W_a numunelerin havadaki, W_l ise sudaki ağırlığını ifade etmektedir.

$$W_a = W_{th} - W_{bh} \tag{4.1}$$

$$W_l = W_{ts} - W_{bs} \tag{4.2}$$

$$\rho = \frac{W_a}{W_a - W_l}\rho_l \tag{4.3}$$

Ardından Eşitlik 4.4'te numunelerin hava dahil hacimleri hesaplanmıştır. Eşitlik 4.5'te ise numunelerin hava hariç hacimleri hesaplanmıştır. Numunelerin hava dahil ve hava hariç hacimleri hesaplandıktan sonra aralarındaki fark bulunarak hacimsel boşluk oranları belirlenmiştir. V_t numunenin hava dahil toplam hacmini göstermektedir. Bu değer numunenin hava dahil ağırlığının, yoğunluğuna bölümü ile elde edilir. Eşitlik 4.5'te yer alan V_n üretilmiş numunenin hava hariç hacmini ve W_n ise numunenin kuru tartım ağırlığını

göstermektedir. V_n değeri eşitlikte, W_n değerinin Ti6Al4V alaşımının EIE yöntemiyle üretilen ve $\rho_{Ti6Al4V}$ olarak gösterilen numune yoğunluğuna bölünmesiyle elde edilmiştir. Ayrıca Ti6Al4V alaşımının teorik yoğunluğu 4.432 $\frac{gr}{cm^3}$ iken EIE yöntemiyle üretilen numunelerde yoğunluğunun 4.25-4.3 $\frac{gr}{cm^3}$ olduğu bilinmektedir [101].

$$V_t = \frac{W_a}{\rho} \tag{4.4}$$

$$V_n = \frac{W_n}{\rho_{Ti6Al4V}} \tag{4.5}$$

V_b ise numunenin hava dahil toplam hacminden, numune hacminin çıkarılmasıyla elde edilen boşluk hacmini göstermektedir. Hacimsel boşluk oranı olan HBO değeri ise numunenin içerisindeki boşluk hacmi olan V_b'nin numunenin hava dahil toplam hacmi V_t'ye bölünmesi ve 100 ile çarpılmasıyla elde edilir.

$$V_b = V_t - V_n \tag{4.6}$$

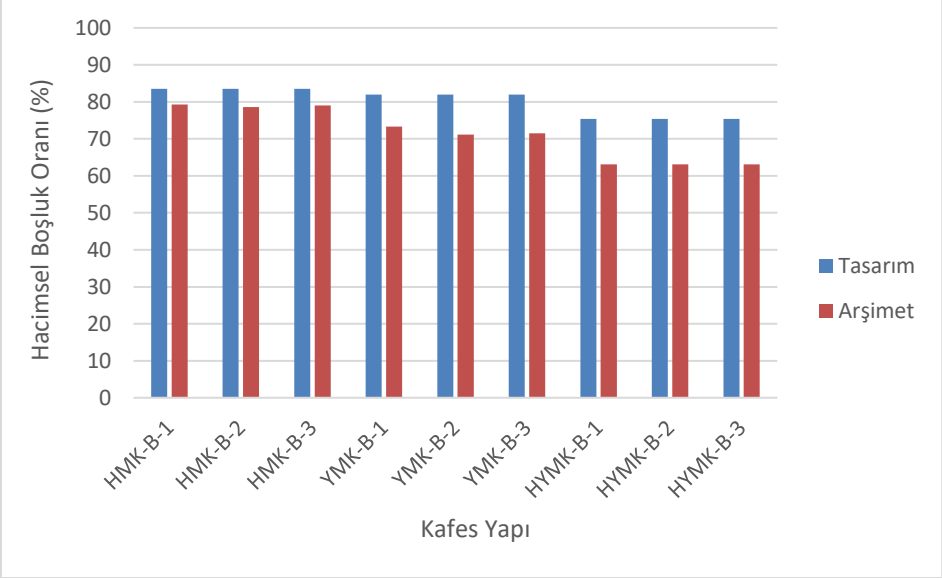
$$HBO = \frac{V_b}{V_t} \times 100 \tag{4.7}$$

Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi bulunan Arşimet yöntemi ile bulunan hacimsel boşluk oranları Materialise Magics yazılımından yararlanılarak bulunan tasarım hacimsel boşluk oranları ile kıyaslanmıştır.

Çizelge 4.1. Numunelerin Arşimet ve tasarıma göre hacimsel boşluk oranları ve aralarındaki sapmalar

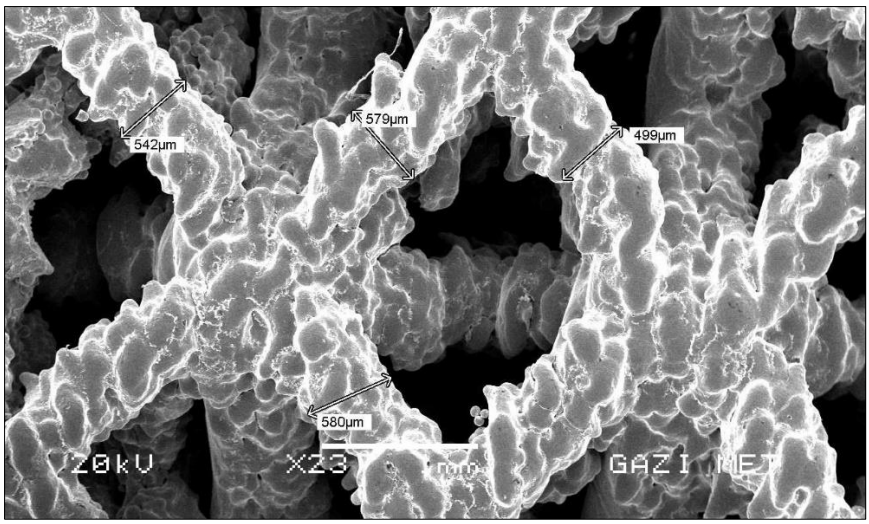
Numune Adı	Hacimsel Boşluk Oranları(%)		Tasarım - Arşimet Sapma (%)
	Tasarım	Arşimet	
HMK-B-1	83,554087	79,249667395	-5,15
HMK-B-2	83,554087	78,559623767	-5,98
HMK-B-3	83,554087	79,011098939	-5,44
YMK-B-1	81,992502	73,328973422	-10,57
YMK-B-2	81,992502	71,150544839	-13,22
YMK-B-3	81,992502	71,476335739	-12,83
HYMK-B-1	75,353043	63,083490393	-16,28
HYMK-B-2	75,353043	63,077898997	-16,29
HYMK-B-3	75,353043	63,138347898	-16,21

Çizelge 4.3. incelendiğinde hem tasarım hem de Arşimet basma numuneleri arasında en fazla hacimsel boşluk oranına sahip geometrinin HMK, en az hacimsel boşluk oranına sahip geometrinin ise HYMK olduğu görülmektedir. YMK geometrisine sahip kafes yapıdaki hacimsel boşluk oranının ise HMK ve HYMK geometrilerinin sahip olduğu değerlerin arasında ve HMK geometrisinin değerlerine ise daha yakın olduğu görülmektedir. Dolayısıyla hibrit hücrelerin kendisini oluşturan hücrelere göre daha fazla kolon bulundurduğundan hacimsel boşluk oranının daha az olduğu sonucuna varılabilir.

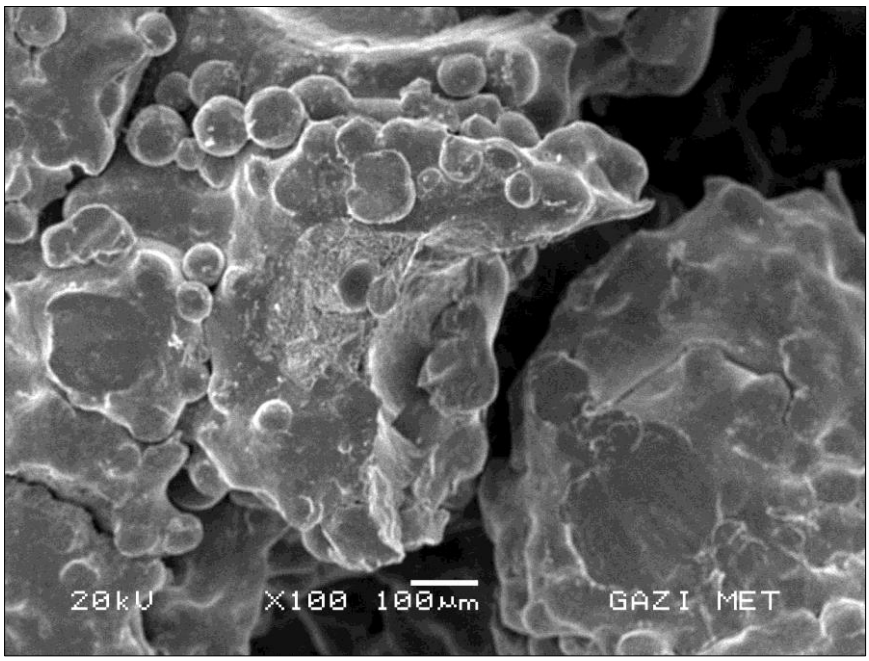


Şekil 4.3. Hacimsel boşluk oranları

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.3'te görüldüğü üzere geometriler açısından tasarım ve Arşimet yöntemi sonuçlarının birbirleriyle tutarlı olduğu görülmektedir. Yani hem tasarım hem de Arşimet yöntemi sonuçlarına göre boşluk oranının en fazla olduğu hücre yapısının HMK, en az olanın ise HYMK olduğu belirlenmiştir.



Resim 4.1. SEM'de birim hücre kolon kalınlıklarının ölçümü



Resim 4.2. Birim hücre kolonlarındaki ergimemiş tozların taramalı elektron mikroskop görüntüsü

Resim 4.1'de görüldüğü gibi tez kapsamındaki numunelerin üretimi esnasında kolonlarda meydana gelen kalınlaşmalar ve Resim 4.2'de görülen kafes yapılar içerisindeki ergimemiş olan tozlardan dolayı, Arşimet ile elde edilen verilerde tasarımdakine oranla daha az hacimsel boşluk oranları elde edilmiştir [102, 103]. Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi HMK hücre yapısına sahip kafes yapılarda tasarımla Arşimet verileri arasındaki sapmaların %5,15 ile %5,98 arasında, YMK hücre yapısına sahip kafes yapılarda %10,57 ile %13,22 arasında ve HYMK hibrit hücre yapısına sahip kafes yapılarda ise %16,21 ile %16,29 arasında olduğu görülmektedir. Dolayısıyla tasarım ile Arşimet değerleri arasındaki sapmaların HYMK hibrit birim hücre yapısında en fazla HMK birim hücre yapısında ise en az olduğu görülmektedir. SLE ve EIE gibi toz yataklı eklemeli imalat metotları ile üretilen ince yapılarda geometrik kusurlara sıklıkla rastlanmaktadır. Yatayla düşük açıya sahip olan dikmelerin üretimindeki geometrik kusurların daha fazla olduğu bilinmektedir. YMK birim hücre yapısının HMK birim hücre yapısından farklı olarak yatay ve daha fazla açılı kolon içermesinden kaynaklı olarak daha fazla geometrik kusura sahiptir. HYMK hibrit hücre yapısı ise YMK birim hücre yapısından daha fazla açılı kolona sahip olmasından kaynaklı olarak en fazla geometrik kusura sahip hücre yapısı olarak karşımıza çıkmaktadır [104].

4.3. Basma Testi Bulguları

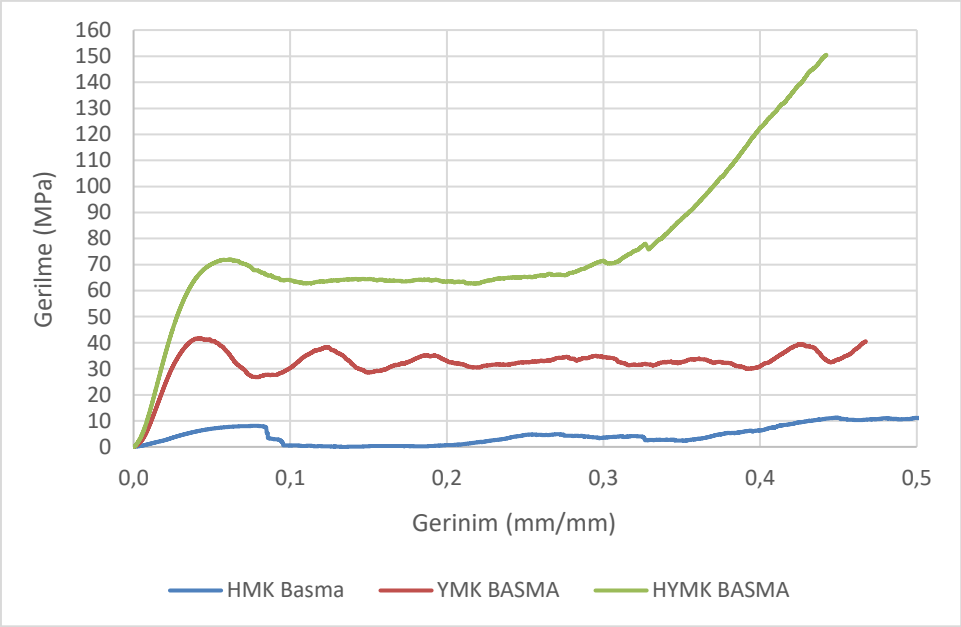
Basma testinden elde edilen veriler ve aşağıdaki formüllerden yararlanılarak Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'deki gerilme-gerinim grafikleri oluşturulmuştur.

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0} \tag{4.8}$$

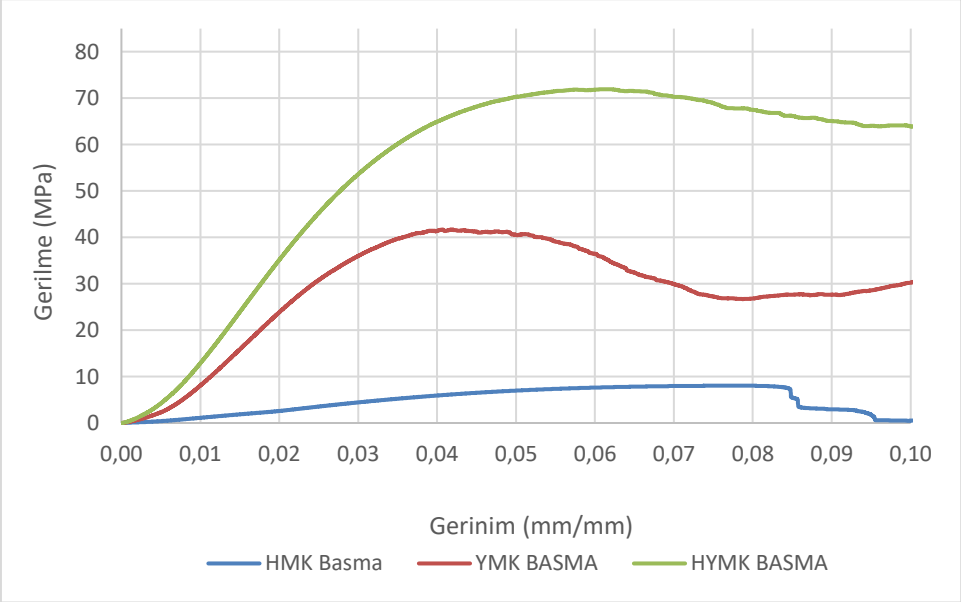
Eşitlik 4.8 mühendislik basma gerilmesi σ_e [MPa] değerinin nasıl hesaplandığını göstermektedir. Buna göre F değeri uygulanan yükü [N] ve A_0 ise alanı [mm²] göstermektedir.

$$\varepsilon_e = \frac{l - l_0}{l_0} \tag{4.9}$$

Eşitlik 4.9 mühendislik basma gerinimi ε_e [mm/mm] nasıl hesaplandığını göstermektedir. Buna göre l değeri numunenin ölçüm anındaki uzunluğunu [mm] ve l_0 ise orijinal numune uzunluğunu [mm] göstermektedir [105].



Şekil 4.4. Gerilme-gerinim grafiği



Şekil 4.5. Elastik bölgenin yakınlaştırıldığı basma gerilme-gerinim grafiği

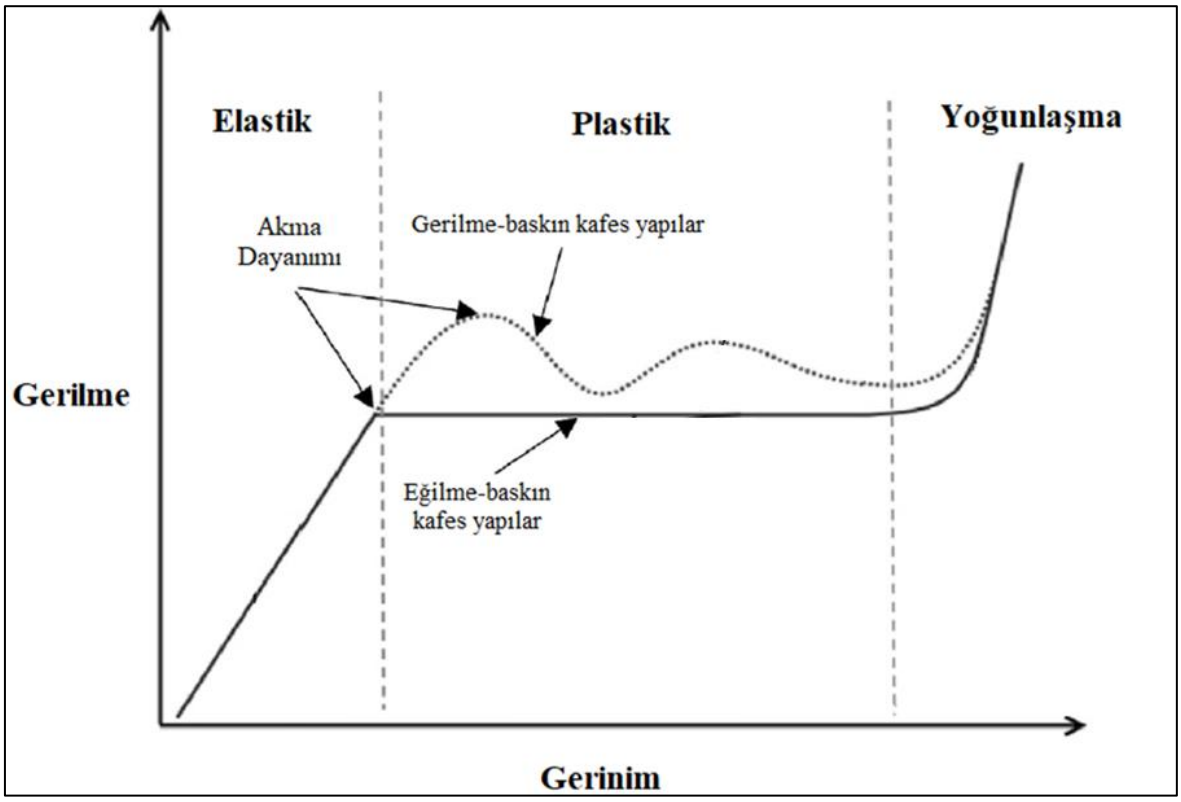
Basma test numunelerinin gerilme-gerinim test grafikleri Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir. Ayrıca basma testi esnasında numunelerin aşamalı olarak fotoğraflandığı görüntüler ise Resim 4.3'te gösterilmiştir. Şekil 4.4'teki grafikte numunelerde gözenekli yapıların genelinde gözlenen lineer olmayan bir hasar alma karakteristiği görülmüştür.



Resim 4.3. Basma numunelerinin aşamalı test görüntüleri

Şekil 4.6'de görüldüğü gibi genellikle gerilme-gerinim grafikleri çökme öncesi elastik, plastik (plato) ve yoğunlaşma bölgesi olmak üzere 3 farklı rejime ayrılabilir. Şekil 4.5'deki gerilme-gerinim grafiği incelendiğinde numunelerin aldığı ilk hasarın ardından gerilmelerde önemli oranda düşüşler olduğu görülmektedir. Bu değişimlerin en fazla HMK birim hücresinde, en az ise HYMK hibrit hücresinde gerçekleştiği belirlenmiştir. Dolayısıyla, HYMK ve YMK hücre yapılarının akma sonrası davranışları HMK hücre yapısından daha iyiyken en iyi akma sonrası davranış HYMK hibrit hücre yapısında görülmektedir. Alınan ilk hasarın ardından elastik ve yoğunlaşma bölgeleri arasında yer alan plato bölgesinde ise gerilmelerin artış ve azalışından kaynaklı dalgalanmalar gözlenmiştir. Bu dalgalanmaların temel nedeni hücreler içerisindeki dikmelere uygulanan yükün artmasıyla gerilmenin yükselmesi ve dikmelerin kırılmasının ardından azalan yükten dolayı gerilmenin azalmasıdır. Basma testinde numunelerin boşluk oranlarının önemli oranda azalarak içi dolu yapılar gibi davranış gösterdikleri yoğunlaşma evresi de görülmektedir. HMK hücre yapısında gerilme artışlarının zamana yayılarak gerçekleştiği ve sert dalgalanmaların olmadığı görülmektedir. YMK hücre yapısında plato bölgesi geçildikten sonra gerilmelerdeki dalgalanmaların bir süre daha devam ettiği ve ardından yoğunlaşma evresine geçtiği görülmektedir. HYMK hibrit hücre yapısının ise akma sonrası stabil bir davranış

gösterdiği görülmektedir. HYMK hibrit hücre yapısında plato bölgesinin sonundan itibaren yoğunlaşma evresine hızlı bir şekilde geçildiği ve daha ani artışların gerçekleştiği görülmüştür. Çizelge 4.1'deki değerler incelendiğinde HMK hücre yapısının ortalama %78,9401, YMK hücre yapısı %71,9853 ve HYMK hücre yapısının ise %63,0999 hacimsel boşluk oranına sahip olduğundan yoğunlaşmalardaki bu farklılıkların YMK hücre yapısının HMK hücre yapısına göre, HYMK hibrit hücre yapısının ise YMK hücre yapısına göre daha az hacimsel boşluk oranı içermesinden kaynaklandığı sonucuna varılabilir. Dolayısıyla daha az hacimsel boşluk oranına sahip hücresel yapıların yoğunlaşma evresine daha hızlı geçtiği söylenebilir. Resim 4.3'te basma testlerinin ne kadar devam ettirildiğinin de numunelerin yoğunlaşma evreleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca numunelerden kopan dikme parçalarının oluşturduğu boşluk ve numunelerin yüzey alanının genişlemesinden kaynaklı fıçılaşma etkisi yoğunlaşma evresinde gecikmelere neden olmaktadır. Yoğunlaşma evresinin daha uzun devam etmesi dikmelerde aşırı bozulmalara ve numunelerin test sonrası görüntülemelerinde alınacak sonuçlara etki edeceğinden testler, yoğunlaşma evresi görüldükten sonra durdurulmuştur [74–77, 94].

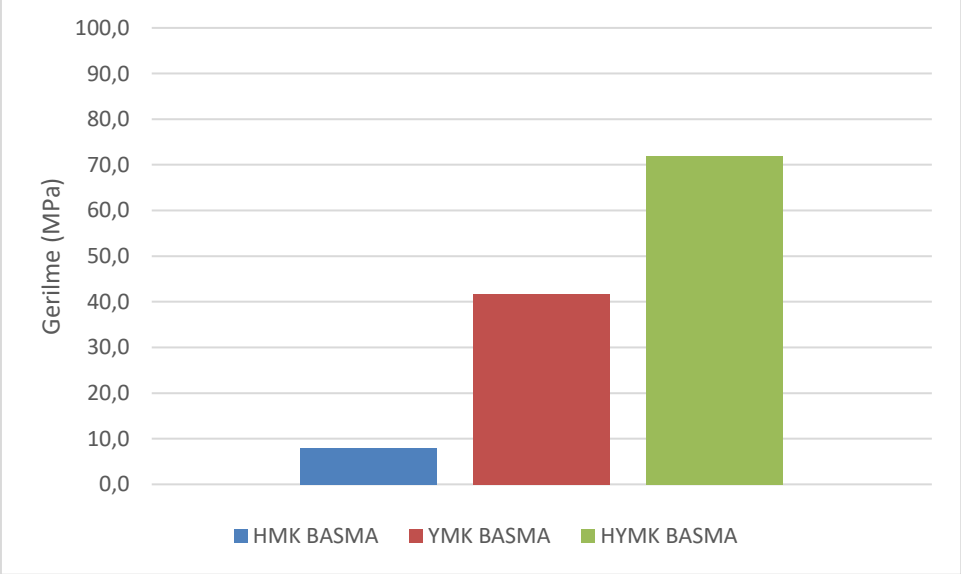


Şekil 4.6. Kafes yapıların basma davranışları [68, 94, 106]

Ayrıca Resim 4.3'te görüldüğü gibi HMK hücre yapısında kırılmanın açılı olarak gerçekleştiği görülmektedir. YMK ve HYMK hibrit hücre yapısında ise HMK hücre yapısından farklı olarak çökmelerin katman katman olduğu görülmektedir. Şekil 4.4'teki gerilme-gerinim grafiği incelendiğinde HYMK hibrit hücre yapısının yaklaşık olarak 71.95 MPa akma dayanımı değerine sahipken, YMK birim hücre yapısının 41.71 MPa ve HMK birim hücre yapısının ise 8.04 MPa değer sahip olduğu Çizelge 4.2 ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Geometrilerin akma dayanımı ve akma dayanımının elde edildiği gerinim değerleri

Hücre Türü	Akma Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımının Elde Edildiği Gerinim Değeri (mm/mm)
HMK	8,04	0,0777
YMK	41,71	0,0419
HYMK	71,95	0,0621



Şekil 4.7. Gerilme değerlerinin grafiksel gösterimi

Dolayısıyla birim hücre türüne göre akma dayanımı değerleri de değişiklik göstermektedir. Hücrelerin hibrit yapılmasının kafes yapıların basma dayanımlarını önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. HYMK hibrit hücre yapısının akma dayanımı değerinin kendisini oluşturan HMK birim hücresinin yaklaşık 8.94 katı ve YMK birim hücresinin ise yaklaşık 1.73 katı

olduğu görülmüştür. Ayrıca HMK birim hücre yapısında akma dayanımı yaklaşık olarak 0.0777 mm/mm, YMK birim hücre yapısında 0,0419 mm/mm ve HYMK hibrit hücre yapısında ise 0,0621 mm/mm gerinim değerinde elde edilmiştir. HYMK hibrit hücre yapısının plato gerilme değerlerinin hem HMK hem de YMK hücre yapısına göre yüksek olduğu görülmektedir. Mikro boşluk, kalıntı gerilmeleri gibi üretim hatalarının, yapıların alacağı hasarın bölgeselleşmesi üzerindeki etkileri genellikle sınırlı olup hücrelerin dikmeleri üzerinde etkilidir. Hasardaki bölgeselleşme daha çok hücre geometrisiyle ilgilidir. Gerilme-baskın yapılarda basma testi esnasında çekme (ing. tension) kuvveti taşıyan dikmeler ilk olarak deforme olurken eğilme baskın yapılarda ise deformasyon eğilme (ing. bending) veya burulma (ing. buckling) yoluyla gerçekleşmektedir [107]. Eğilme-baskın kafes yapılarda elastik bölgeden plastik (plato) bölgesine yumuşak bir geçiş gözlenirken plato bölgesinde stabil bir davranış gözlemlenir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'e göre HMK ve HYMK birim hücre yapıları büyük dalgalanmalar göstermediğinden ve nispeten düz bir akma sonrası davranış gösterdiğinden eğilme-baskın bir hasar karakteristiği görülmektedir. Gerilme-baskın kafes yapılarda belirli bir katmandaki dikmelerin burkulmasından kaynaklı olarak akma sonrası gerilme hızlı bir şekilde düşerken plato bölgesindeki gerilmelerde ise dalgalı bir davranış gözlemlenir. YMK birim hücre yapısında akma sonrası gerilmenin hızlı bir şekilde düşmüş olmasından ve plato bölgesindeki gerilmelerde yaşanan dalgalanmalardan dolayı gerilme-baskın hasar karakteristiği görülmektedir [68, 74–77]

Ti6Al4V malzemesinin sünek özelliğe sahip olmasına rağmen bu malzemeden üretilen gözenekli yapıların içerisinde bulundurdukları dikmelerin gevrek yapıda olmasından kaynaklı olarak farklı kırılma davranışı gösterdiği bilinmektedir, [94, 108]. Ek olarak plato bölgesindeki gerilmelerde yaşanan dalgalanmalar kafes yapının gevrek özelliğe sahip olduğunu göstermektedir [108, 109]. Şekil 4.4'e bakıldığında YMK hücre yapısının plato bölgesindeki dalgalanmalardan hücre yapısının gevrek bir yapıya sahip olduğu söylenebilir [110]. HMK hücre yapısına sahip EIE metoduyla ve Ti6Al4V tozu kullanılarak üretilen kafes yapının sünek özelliğe sahip olduğu literatürde yer almaktadır [111]. Ayrıca gerilmelerin ciddi dalgalanmalar göstermediği, sert artış ve azalışların olmadığı kafes yapıların ise sünek özellik gösterdiği bilinmektedir [112, 113]. Bu anlamda Şekil 4.4'e bakıldığında HMK ve HYMK birim hücre yapıları büyük dalgalanmalar göstermediğinden ve nispeten düz bir akma sonrası davranış gösterdiğinden, yapıların sünek davranış gösterdiği sonucuna varılabilir.

4.4. 3 Nokta Eğme Testi Bulguları

3 nokta eğme testinden elde edilen veriler ve aşağıdaki formüllerden yararlanılarak Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'daki gerilme-gerinim grafikleri oluşturulmuştur.

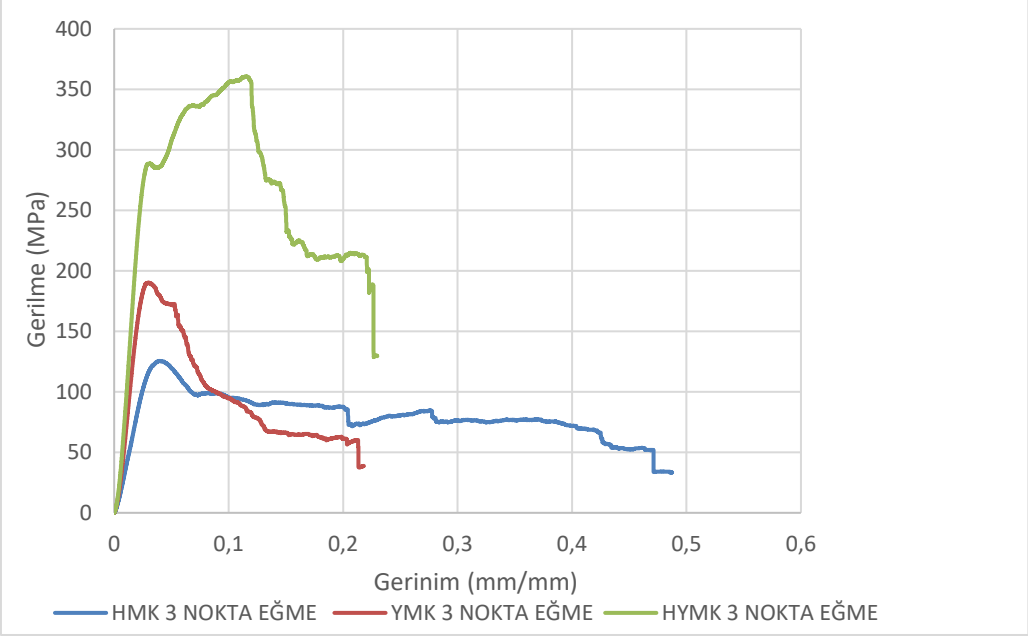
$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2} \tag{4.10}$$

Eşitlik 4.10 mühendislik eğilme gerilmesi σ_f [MPa] nasıl hesaplandığını göstermektedir.

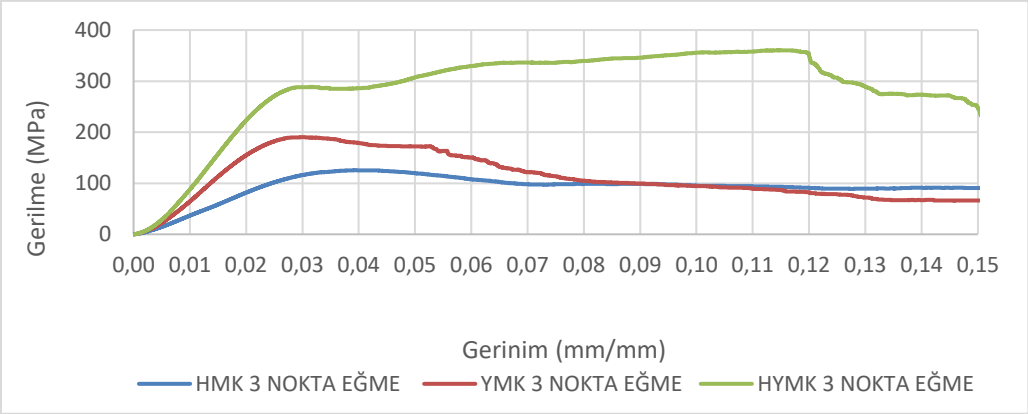
$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \tag{4.11}$$

Eşitlik 4.11 mühendislik eğilme gerinimi [mm/mm] nasıl hesaplandığını göstermektedir.

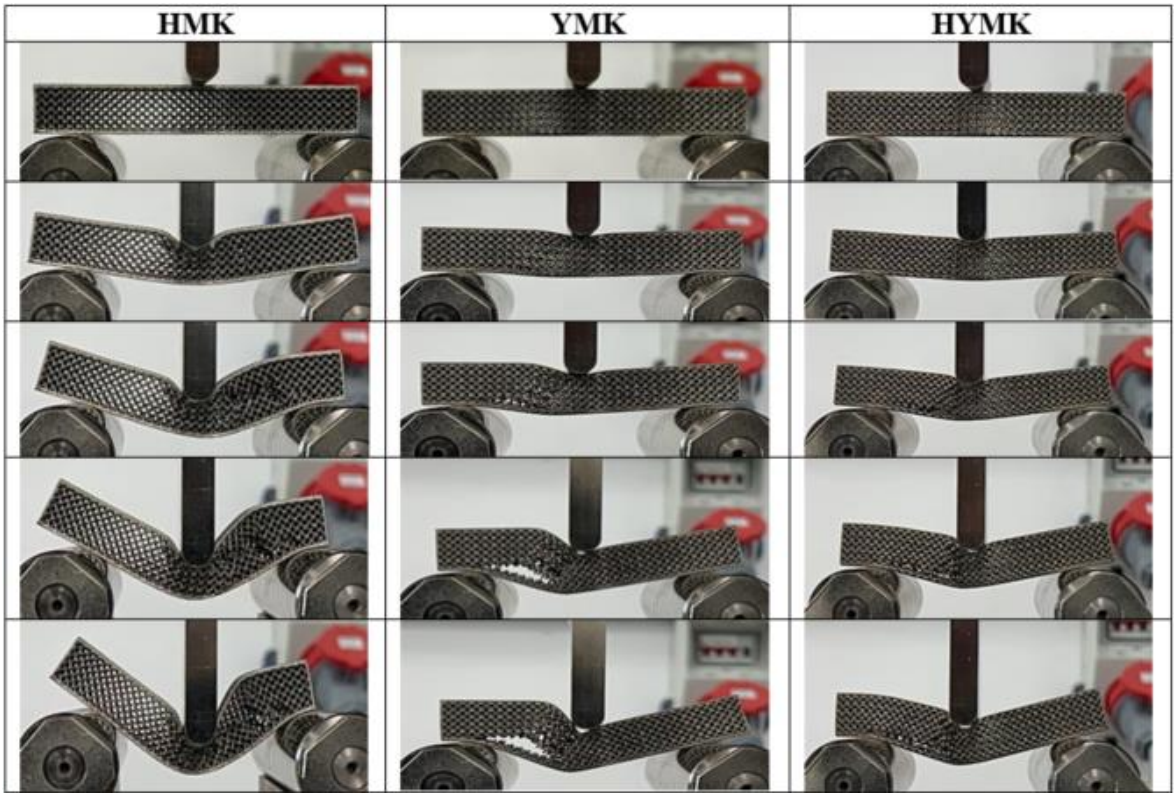
Yukarıdaki eşitliklerde yer alan F uygulanan kuvveti [N], L iki destek arası mesafeyi [mm], b numune genişliğini [mm], d numune kalınlığını [mm], D ise numunenin merkezindeki maksimum sehimi [mm] göstermektedir [114].



Şekil 4.8. 3 nokta eğme numunelerinin gerilme-gerinim grafiği



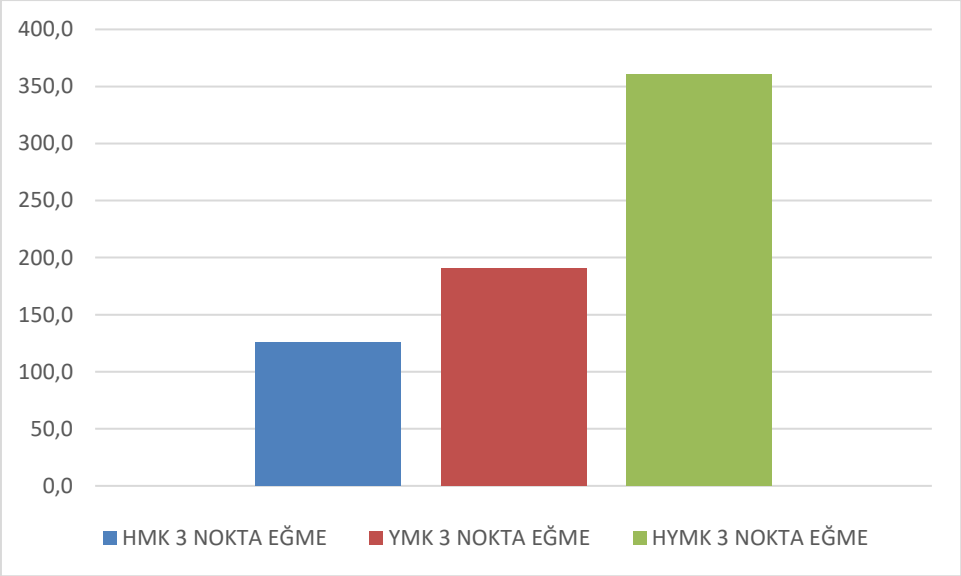
Şekil 4.9. Elastik bölgenin yakınlaştırıldığı 3 nokta eğme gerilme-gerinim grafiği



Resim 4.4. 3 nokta eğme numunelerinin aşamalı test görüntüleri

Çizelge 4.3 Maksimum eğilme dayanımı ve dayanımın elde edildiği gerinim değerleri

Hücre Türü	Maksimum Eğilme Dayanımı (MPa)	Maksimum Eğilme Dayanımının Elde Edildiği Gerinim Değeri (mm/mm)
HMK	125,62	0,0395
YMK	190,45	0,0299
HYMK	360,79	0,1149



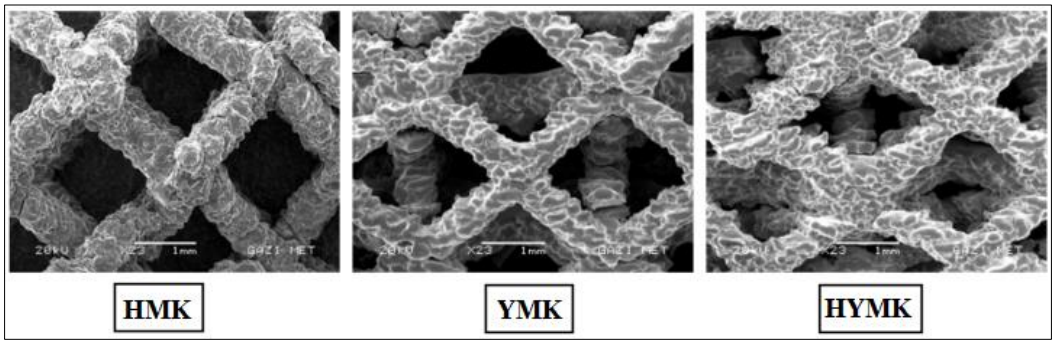
Şekil 4.10. Gerilme değerlerinin grafiksel gösterimi

3 nokta eğme test numunelerinin gerilme-gerinim test grafikleri Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir. Ayrıca 3 nokta eğme testi esnasında numunelerin aşamalı olarak fotoğraflandığı görüntüler ise Resim 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.8'deki gerilme-gerinim grafiği incelendiğinde HYMK hibrit hücre yapısının yaklaşık olarak 360.79 MPa maksimum eğilme dayanım değerine sahipken, YMK birim hücre yapısının 190.45 MPa ve HMK birim hücre yapısının ise 125.62 MPa değer sahip olduğu görülmüştür. En fazla eğilme dayanımı HYMK hibrit hücre yapısında elde edilmişken sonrasında YMK hücre yapısında ve en az ise HMK hücre yapısında elde edilmiştir. Dolayısıyla birim hücre türüne göre maksimum eğilme dayanımı değerleri de değişiklik göstermektedir. Hibrit hücrelerin kendilerini oluşturan hücrelere göre daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. HYMK hibrit hücre yapısının maksimum eğilme dayanım değerinin kendisini oluşturan HMK birim hücresinin yaklaşık 2.87 katı ve YMK birim hücresinin ise yaklaşık 1.89 katı olduğu görülmüştür. Ayrıca HMK birim hücre yapısında maksimum eğilme dayanımı 0.0395

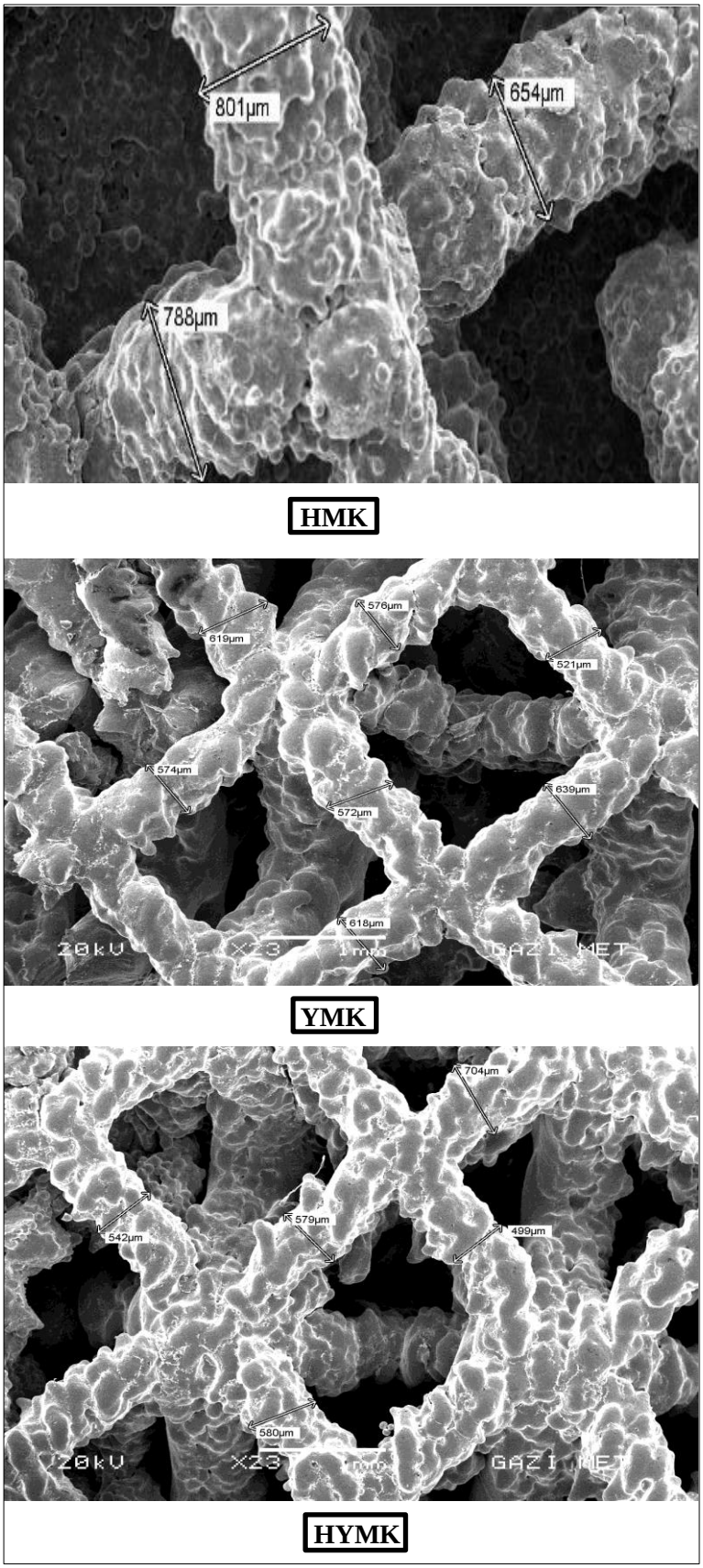
mm/mm, YMK birim hücre yapısında 0,02988 mm/mm ve HYMK hibrit hücre yapısında ise 0,1149 mm/mm gerinim değerinde elde edilmiştir. Şekil 4.8'deki grafik incelendiğinde HYMK hibrit hücre yapısında ilk hasar HMK ve YMK hücre yapılarına göre daha geç meydana gelmiştir. HMK hücre yapısında ilk hasar sonrası gerilmede nispeten daha yumuşak düşüş gerçekleşmiştir. YMK ve HYMK hücre yapısında ise ilk hasar sonrası gerilmelerdeki düşüşler daha sert gerçekleşmiştir. HMK hücre yapısında kırılmalar numune içerisinde dikey ve yatay doğrultularda meydana gelmiştir. Üst kabuğun ortasından uygulanan kuvvetin etkisiyle kuvvet doğrultusundaki ve çevresindeki bölgenin üst kısmında çökmeler meydana gelmiş, numunenin yatay doğrultusundaki orta kısmında yer alan kolonlar boyunca çökmeler oluşmuş ve numunenin düşey doğrultusundaki dikmelerde kopmalara neden olmuştur. Numunelerin genelinde test sırasında üst kabuk yüzeyinde kırılmalar meydana gelmişken numunelerin genel bütünlüğü korunmuştur. YMK hücre yapısında alt kabuğa yakın dikmelerden yatay boyunca ayrılmalar gerçekleşirken üst kabuğun kuvvet doğrultusundaki yüzeyinde kırılma meydana gelmiştir. Ayrıca HMK hücre yapısından farklı olarak kuvvet doğrultusundaki çökmelerin nispeten daha az olduğu gözlenmiştir. HYMK hibrit hücre yapısında ise düzeneğin temas ettiği üst kabuk yüzeyinde kırılma meydana gelmiş olup alt kabuğa yakın dikmelerden yatay boyunca ayrılma gerçekleşmiştir. Numunelerin bir kısmında ise alt kabuğun sol köşesinden kopma meydana gelmiştir. Uygulanan kuvvet doğrultusundaki dikmelerde çökmelerin HMK hücre yapısından farklı olarak nispeten daha az olduğu ve HYMK hibrit hücre yapısının kırılma davranışı yönüyle YMK hücre yapısına benzer bir karakteristik sergilediği söylenebilir.

4.5. Taramalı Elektron Mikroskobu Bulguları

4.5.1. Basma numunelerinin taramalı elektron mikroskobu bulguları

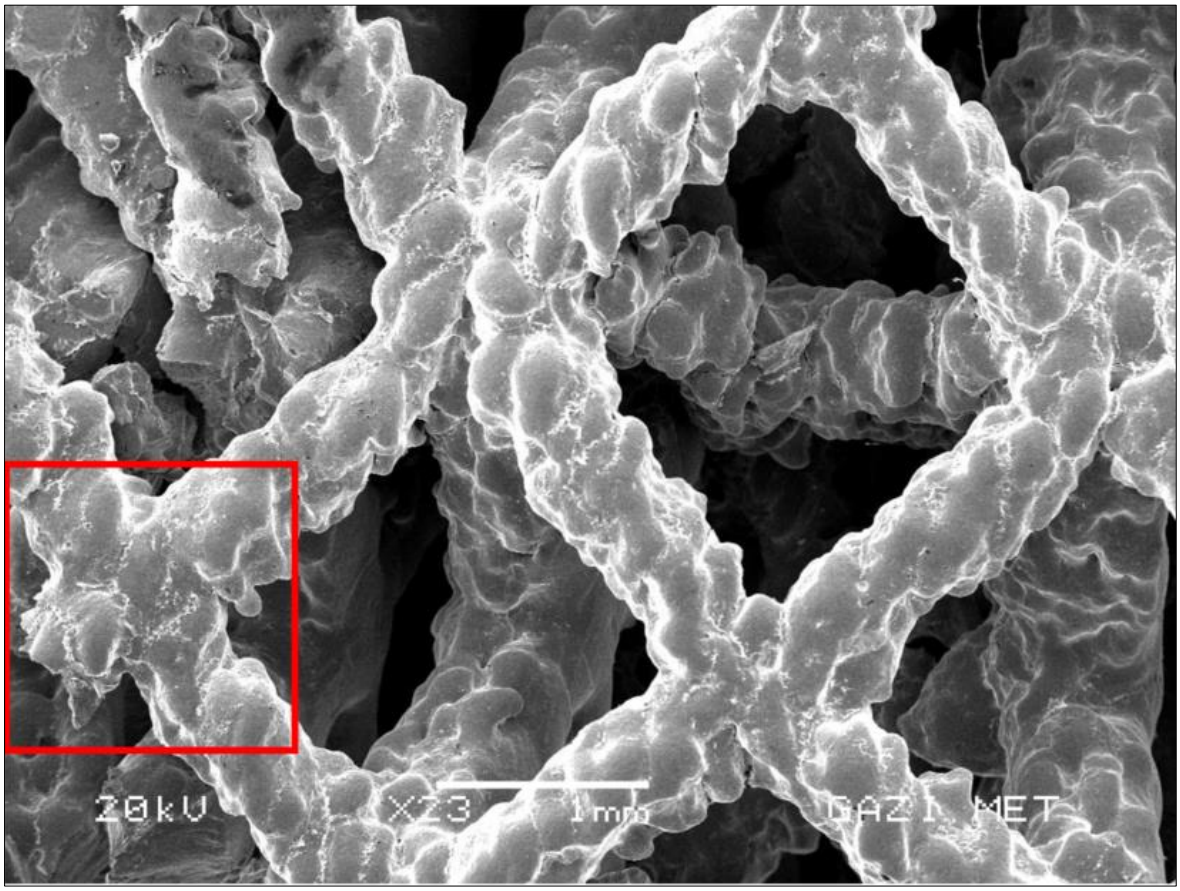


Resim 4.5. Basma numunelerinin basma testi sonrası SEM görüntüleri



Resim 4.6. Basma numunelerinin SEM'de kolon kalınlık ölçümleri

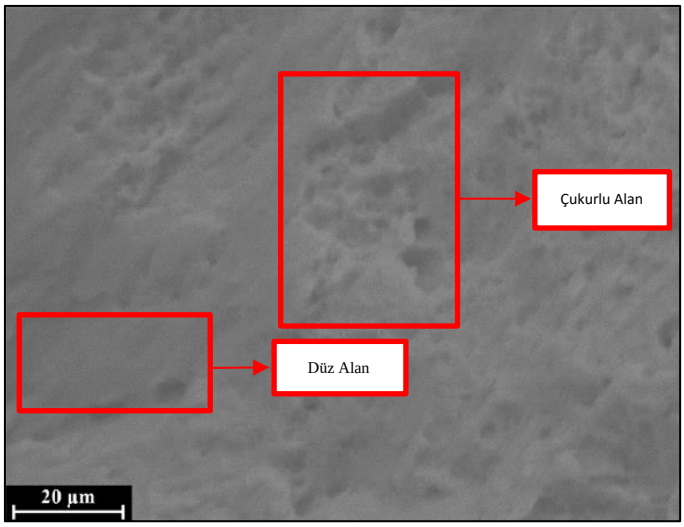
Resim 4.6’da SEM ölçümü esnasından numunelerin dikme çaplarının ölçümleri görülmektedir. Tasarımda 400 µm çapa sahip olan dikmelerde, meydana gelen ergime ve EIE prosesinin üretim toleranslarından kaynaklı olarak kalınlaşmalar meydana gelmiştir [110]. Numunelerin dikmelerindeki kalınlık artışı kimi kolonda 99 µm ile sınırlı kalırken kimi kolonda ise 401 µm’ye kadar ulaşabildiği görülmüştür.



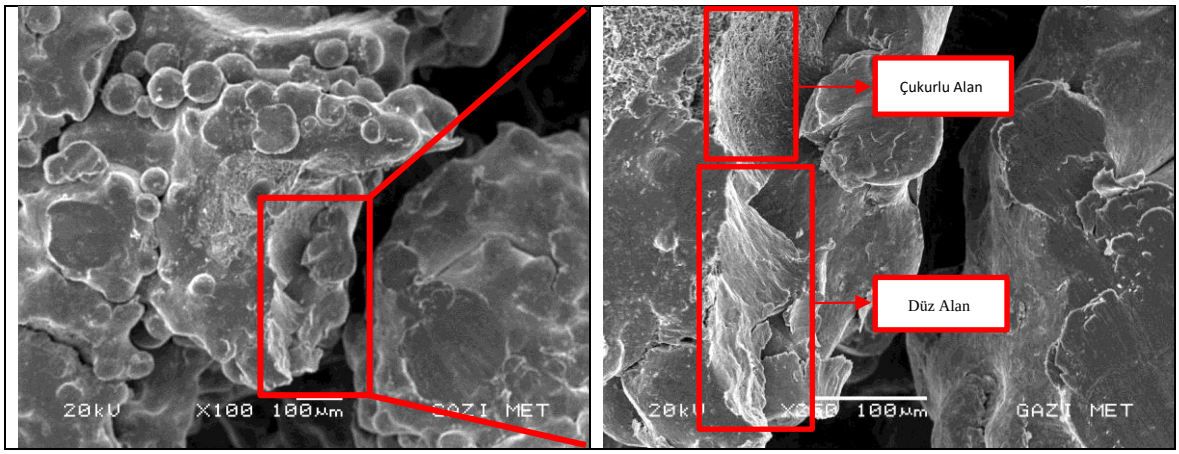
Resim 4.7. Dikme kırılmasının gerçekleştiği bölge

Resim 4.7 incelendiğinde basma testi esnasında dikme kırılmasının gerçekleştiği bölge görülmektedir. Kafes yapılarda kırılmalar çoğunlukla dikmelerin birleştiği düğüm noktalarında gerçekleştiğine dair çalışmalara literatürde rastlanmaktadır. Tez çalışması kapsamında yapılan basma testi esnasında alınan görüntüde de görüldüğü üzere kırılma düğüm noktasına yakın bir bölgede gerçekleşmiştir. Elektron ışını ile ergitme metodu ile üretilen kafes yapılarda katı yüzeyin altında malzemenin kısmi olarak ergimesinden dolayı tam dolu dikmelerin elde edilmesi zorlaşmaktadır. Bu durum termal gerilme veya yük altında dikmelerde kolayca çatlakların oluşmasına ve ilerlemesine sebep olmaktadır. Ayrıca üretimdeki her bir katmanın yüzey bölgesi katmanın dış çizgisini takip eden kontur geçişi

(ing. contour pass) ve iç bölgeleri oluşturan tarama deseninde (ing. hatching pattern) ergitme ile oluşturulmaktadır. Isı girişindeki farklılıklar ve ergiyik havuzundaki şekil farklılıkları ile tam ergimemiş tozların etkileri birleştiğinde ortaya daha iyi bir tanecik yapısına karşın yüzeyde daha zayıf bir desen ortaya çıkmaktadır [87, 115].



Resim 4.8. Kırılma yüzeyi SEM görüntüsü [116]

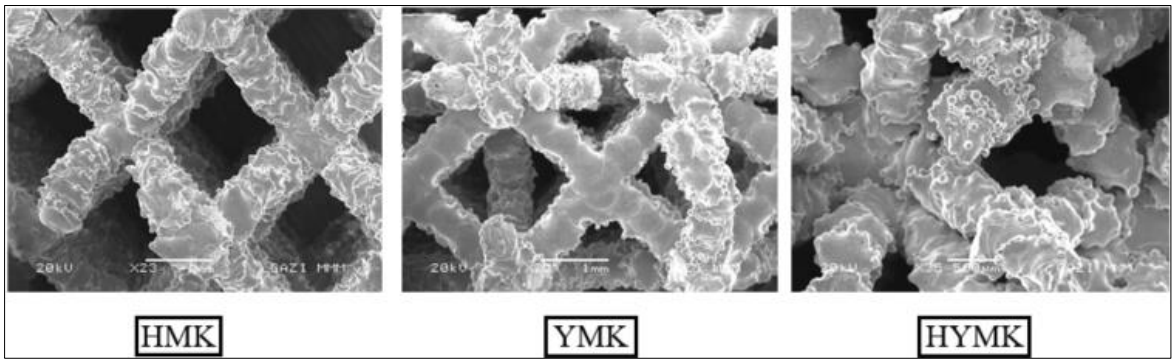


Resim 4.9. Basma numunesinin test sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

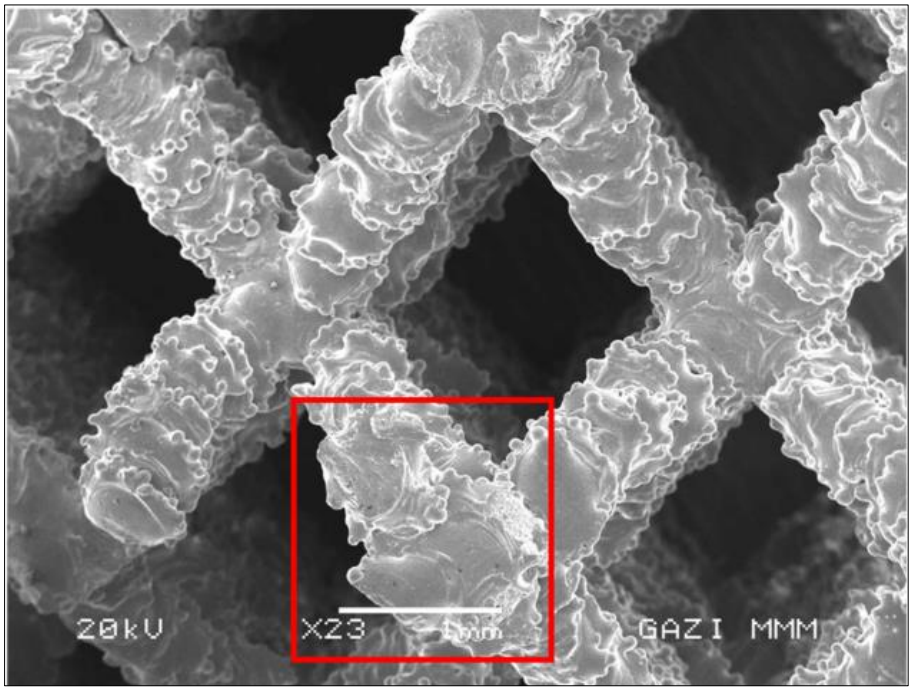
Literatürde kırılma yüzeyinde çukurların yer almasının kırılmanın sünek; kırılma yüzeyinin düz bir yüzey görünümüne sahip olmasının ise gevrek bir karakteristiğe sahip olduğu gösterilmiştir [116–118]. Ayrıca EBM metodu ve Ti6Al4V malzemesi kullanılarak üretilen kafes yapıların kırılma yüzey görüntüsünün yer aldığı Resim 4.8'de de görüldüğü gibi bazı bölgelerin çukurlu olmasına rağmen bazı bölgelerin ise düz olmasından kaynaklı olarak kırılma yüzeyinin hem sünek hem de gevrek kırılma karakteristiği gösterdiği belirtilmiştir [116].

Yapılan SEM incelemeleri sonucunda literatürde yer alan bilgilere benzer şekilde numune kırılma yüzeyinde hem çukurlu hem de düz alanların yer aldığı Resim 4.9'da görülmektedir. Görüntüler ışığında kırılmanın gerçekleştiği yüzeyin hem sünek hem de gevrek kırılma davranışı sergilediği belirlenmiştir.

4.5.2. 3 nokta eğme numunelerinin taramalı elektron mikroskobu bulguları



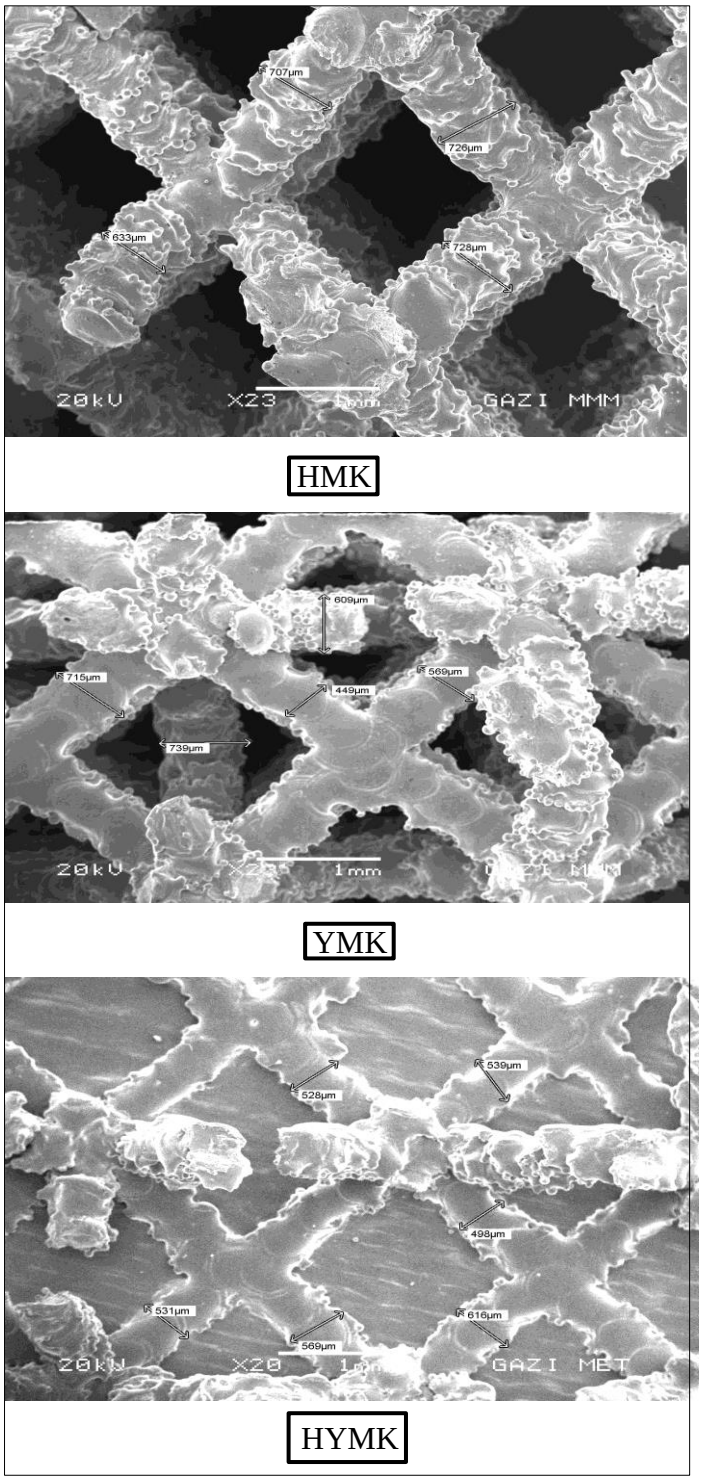
Resim 4.10. 3 nokta eğme numunelerinin basma testi sonrası SEM görüntüleri



Resim 4.11. Dikme kırılmasının gerçekleştiği bölge

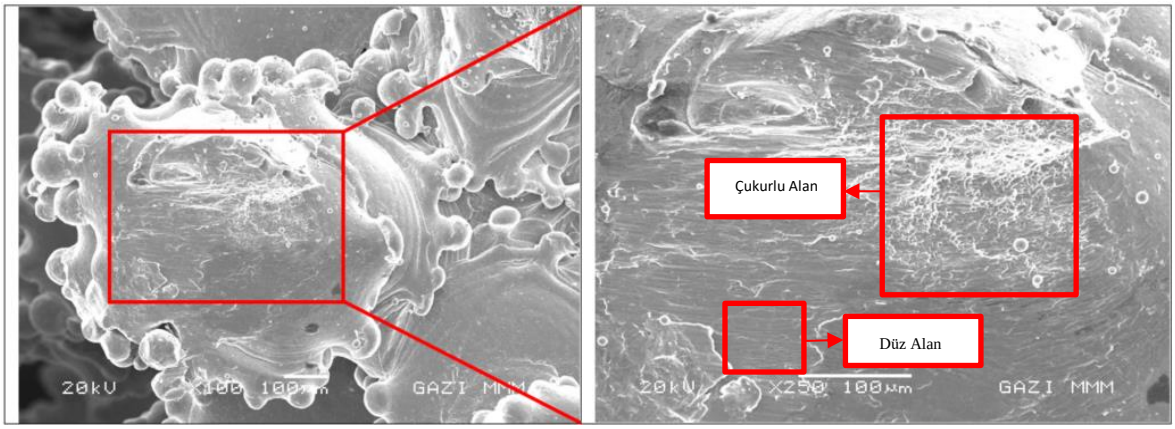
Resim 4.11 incelendiğinde 3 nokta eğme testi esnasında dikme kırılmasının gerçekleştiği bölge görülmektedir. 3 nokta eğme testi esnasında alınan görüntüde de görüldüğü gibi kırılmanın düğüm noktasına yakın bir bölgede gerçekleştiği görülmektedir. SEM

görüntülerinde olduğu gibi literatürde de numunelerin maksimum kayma gerilmesi açısında düğüm noktalarından kırıldığından bahsedilmiştir [87, 115].



Resim 4.12. 3 nokta eğme numunelerinin SEM üzerinden kolon kalınlık ölçümleri

Resim 4.12'de SEM ölçümü esnasından numunelerin dikme çaplarının ölçümleri görülmektedir. Basma numunelerinde de olduğu gibi tasarımda 400 µm çapa sahip olan dikmelerde, meydana gelen ergime ve EIE prosesinin üretim toleranslarından kaynaklı olarak kalınlaşmalar meydana gelmiştir [110]. Numunelerin dikmelerindeki kalınlık artışı kimi kolonda 49 µm ile sınırlı kalırken kimi kolonda ise 339 µm'ye ulaştığı görülmüştür.



Resim 4.13. 3 nokta eğme numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

Literatürde kırılma yüzeyinde çukurların yer almasının kırılmanın sünek; kırılma yüzeyinin düz bir yüzey görünümüne sahip olmasının ise gevrek bir karakteristiğe sahip olduğu gösterilmiştir [116–118]. Ayrıca EBM metodu ve Ti6Al4V malzemesi kullanılarak üretilen kafes yapıların kırılma yüzey görüntüsünün yer aldığı Resim 4.8'de de görüldüğü gibi bazı bölgelerin çukurlu olmasına rağmen bazı bölgelerin ise düz olmasından kaynaklı olarak kırılma yüzeyinin hem sünek hem de gevrek kırılma karakteristiği gösterdiği belirtilmiştir [116]. Yapılan SEM incelemeleri sonucunda literatürdeki bilgilere benzer şekilde numune kırılma yüzeyinde hem çukurlu hem de düz alanların yer aldığı Resim 4.13'te görülmektedir. Görüntüler ışığında kırılmanın gerçekleştiği yüzeyin hem sünek hem de gevrek kırılma davranışı sergilediği belirlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında HMK ve YMK hücre yapısı ile bu iki hücrenin birleşiminden elde edilen HYMK hibrit hücrenin oluşturduğu kafes yapının EIE eklemeli imalat yöntemi ve Ti6Al4V tozu ile üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretim sonrasında kafes yapıların tasarımlarındaki ile üretim sonrasındaki hacimsel boşluk oranlarının belirlenmesi, kolonlardaki kalınlaşmaların gözlemlenmesi ve kolon kırılma yüzeylerinin incelenmesi amacıyla çeşitli ölçüm ve görüntüleme yöntemleri kullanılmıştır. Kafes yapıların basma ve 3 nokta eğme testleri sırasındaki mekanik davranışları incelenmiştir.

Kafes yapıların tasarımları ile üretim sonrası hacimsel boşluk oranlarının kıyaslanması amacıyla Arşimet yöntemiyle hacimsel boşluk oranları ölçülmüştür. Numunelerin üretimi esnasında kolonlarda meydana gelen kalınlaşmalar ve kafes yapılar içerisindeki ergimemiş olan tozlardan kaynaklı olarak, Arşimet ile elde edilen verilerde tasarımdakine oranla daha az hacimsel boşluk oranları elde edilmiştir. Tasarım ve Arşimet yöntemi ile ölçüm değerleri arasındaki sapmaların HYMK hibrit birim hücre yapısında en fazla HMK birim hücre yapısında ise en az olduğu görülmektedir. Bu durumun temel sebeplerinin; HYMK hibrit birim hücre yapısının diğer hücre yapılarına göre toplam kolon sayısının fazla olması, yatay kolon bulundurması ve daha fazla açılı kolon içermesinin sonucu olarak daha fazla geometrik kusur bulundurması olduğu sonucuna varılmaktadır.

Yapılan basma testi sonuçlarına göre numunelerin aldığı ilk hasar sonrası gerilmelerde en az düşüş HYMK hibrit hücre yapısındaki kafes yapıda görülürken en fazla YMK hücre yapısına sahip kafes yapısında görülmüştür. Dolayısıyla en iyi akma sonrası davranış HYMK hibrit hücre yapısında görülürken en zayıf akma sonrası davranış ise HMK hücre yapısında görülmektedir. HYMK hibrit hücre yapısının diğer hücre yapılarına göre daha az hacimsel boşluk oranına sahip olduğundan yoğunlaşma evresine daha hızlı geçiş yaptığı görülmüştür. Dolayısıyla hücre yapılarında hacimsel boşluk oranı azaldıkça yapıların yoğunlaşma evresinde ilerlemelerinin daha hızlı olduğu sonucuna varılabilir. Test esnasındaki fıçılaşma etkisi yoğunlaşma evresinde gecikmelere neden olmaktadır. HMK hücre yapısında kırılmanın açılı olarak gerçekleştiği görülmektedir. YMK ve HYMK hibrit hücre yapısında ise HMK hücre yapısından farklı olarak çökmelerin katman katman olduğu görülmüştür. Hücrelerin hibrit yapılmasının kafes yapıların basma dayanımlarını önemli ölçüde artırdığı

görülmüştür. HYMK hibrit hücre yapısının akma mukavemeti değerinin YMK hücre yapısından, YMK hücre yapısının değerinin ise HMK hücre yapısına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. HYMK hibrit hücre yapısının plato gerilme değerlerinin hem HMK hem de YMK hücre yapısına göre yüksek olduğu görülmüştür. HMK ve HYMK birim hücre yapıları büyük dalgalanmalar göstermediğinden ve nispeten düz bir akma sonrası davranış gösterdiğinden eğilme-baskın bir hasar karakteristiği görülmektedir. YMK birim hücre yapısı plato bölgesindeki gerilmelerde yaşanan dalgalanmalardan gerilme-baskın hasar karakteristiği görülmektedir. Gerilmelerin ciddi dalgalanmalar göstermediği ve sert artış ve azalışların olmadığı kafes yapılar ise sünek özellik göstermektedir. HMK ve HYMK birim hücre yapıları büyük dalgalanmalar göstermediğinden ve nispeten düz bir akma sonrası davranış gösterdiğinden sünek davranış göstermektedir. YMK hücre yapısının plato bölgesindeki dalgalanmalardan dolayı gevrek bir yapıya sahip olduğu söylenebilir.

3 nokta eğme testi sonuçlarına göre ise test sırasındaki en yüksek maksimum eğilme dayanımı HYMK hibrit hücre yapısında elde edilirken en düşük ise HMK hücre yapısında elde edilmiştir. Dolayısıyla hücrelerin hibrit yapılmasının kafes yapıların eğilme dayanımlarını önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. HYMK hibrit hücre yapısında gerilmedeki belirgin düşüş HMK ve YMK hücre yapılarına göre daha geç meydana gelmiştir. HMK hücre yapısında ilk hasar sonrası gerilmede nispeten daha yumuşak düşüş gerçekleşmiştir. YMK ve HYMK hücre yapısında ise ilk hasar sonrası gerilmelerdeki düşüşler daha sert gerçekleşmiştir.

Yapılan SEM incelemelerinde ise üretimde meydana gelen ergime ve EIE prosesinin üretim karakteristiğinden kaynaklı olarak basma numunelerinin, tasarımda 400 μm çapına sahip olan dikmelerinin kalınlıklarındaki artışın 99-401 μm'ye ulaştığı görülürken 3 nokta eğme numunelerinde ise bu değerin 49-339 μm'ye ulaştığı görülmüştür.

Kafes yapılara uygulanan basma ve 3 nokta eğme testi sonucunda numunelerdeki kırılmaların düğüm noktasına yakın bir bölgede gerçekleştiği görülmüştür.

Basma ve 3 nokta eğme testleri sonrasında yapılan SEM incelemeleri sonucunda literatürde yer alan bilgilere benzer şekilde numune kırılma yüzeyinde hem çukurlu hem de düz alanların yer aldığı görülmüştür. Bu yüzden kırılma yüzeyinin hem sünek hem de gevrek kırılma karakteristiği gösterdiği sonucuna varılabilir.

Literatürde tez kapsamında çalışılan geometrilerin SLE yöntemi ve AlSi10Mg malzemesi kullanılarak üretilen basma numunelerinin testleri ve simülasyonları yapılmıştır. Fakat aynı geometrilerin farklı metot ve malzeme ile üretimini, 3 nokta eğme karakteristiğini, hacimsel boşluk oranlarını ve mikro yapısını belirlemeye yönelik çalışmalara rastlanmamıştır. Tez kapsamında belirlenen geometriler Ti6Al4V tozu kullanılarak EIE metodu ile üretilmiştir. Böylece farklı bir toz yataklı eklemeli imalat metodu ve malzemenin kullanılmasının, belirlenen hücre yapılarındaki basma ve eğilme dayanımına etkisinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Tez kapsamında ilgili kafes yapıların Arşimet yöntemi ile hacimsel boşluk oranlarını belirlenmiş olup tasarımla üretim sonrası hacimsel boşluk oranlarının kıyaslanmıştır. Böylece üretim sonrası geometri ile tasarım arasındaki farklar ortaya konulmuştur. Ayrıca ilgili kafes yapıların kırılma yüzeylerinin SEM ile incelenmesiyle de kolonlardaki kalınlaşmalar, ergimemiş tozların varlığı gözlemlenmiş ve kolon kırılma yüzeyleri incelenerek kafes yapının ve kolonların kırılma davranışları değerlendirilerek literatüre katkı sağlanmıştır. Gelecekteki araştırmalarda bu alanda yapılabilecek çalışmalar aşağıda sıralanmıştır:

- Tez kapsamında yararlanılan 3 farklı geometri yine EIE yöntemi ile fakat farklı malzeme kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu sayede daha iyi hacimsel boşluk oranı değerleri elde edilirken tasarıma daha yakın üretim sonrası geometriye ulaşılabilir.
- Kullanılan geometrilerin mekanik özellikleri simülasyonlarla incelenebilir.
- Farklı hibrit kafes yapı türleri denenerek daha iyi mekanik özelliklere, farklı kırılma karakteristiğine ve iyileştirilmiş hacimsel boşluk oranına sahip yapılar elde edilebilir.
- Aynı geometriler daha düşük kolon çapı ve daha büyük hücre boyutu ile üretilip daha iyi hacimsel boşluk oranları elde edilebilir.
- Aynı geometriler yapısal parçalara entegre edilerek yapısal parçalarla uyumluluğu değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Dong, G., Tang, Y., Zhao, Y.F. (2017). *Simulation of Elastic Properties of Solid-lattice Hybrid Structures Fabricated by Additive Manufacturing*. Procedia Manufacturing, 10, 760–770.

2. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B Engineering*, 143, 172-196.

3. Vranić, A., Bogojević, N., Ćirić-Kostić, S., Croccolo, D., Olmi, G. (2017). Advantages and drawbacks of additive manufacturing. *IMK-14 - Istrazivanje i razvoj*, 23, 57–62.

4. Köhnen, P., Haase, C., Bültmann, J., Ziegler, S., Schleifenbaum, J.H., Bleck, W. (2018). Mechanical properties and deformation behavior of additively manufactured lattice structures of stainless steel. *Materials and Design*, 145, 205–217.

5. Rouf, S., Malik, A., Singh, N., Raina, A., Naveed, N., Siddiqui, M.I.H., Haq, M.I.U. (2022). Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 258–274.

6. Piedra-Cascón, W., Krishnamurthy, V.R., Att, W., Revilla-León, M. (2021). 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review. *Journal of Dentistry*, 109, 103630.

7. Rane, K., Strano, M. (2019). A comprehensive review of extrusion-based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts. *Additive Manufacturing*, 7, 115-173.

8. Al Rashid, A., Khan, S.A., G. Al-Ghamdi, S., Koç, M. (2020). Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment. *Automation in Construction*, 118,103268.

9. Cooke, S., Ahmadi, K., Willerth, S., Herring, R. (2020). Metal additive manufacturing: Technology, metallurgy and modelling. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 978-1003.

10. Savolainen, J., Collan, M. (2020). How Additive Manufacturing Technology Changes Business Models? – Review of Literature. *Additive Manufacturing*, 32, 101070.

11. Bacciaglia, A., Ceruti, A., Liverani, A. (2022). *Towards Large Parts Manufacturing in Additive Technologies for Aerospace and Automotive applications*. Procedia Computer Science, 200, 1113-1124.

12. Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T., Austin, S.A., Gibb, A.G.F., Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21, 262–268.

13. ISO/ASTM International (2018). 52910 – Additive Manufacturing – Design – Requirements, Guidelines and Recommendations. 1.

14. Özer, G. (2020). Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme. Ömer *Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606-621.

15. Marczyk, J., Ostrowska, K., Hebda, M. (2022). Influence of binder jet 3D printing process parameters from irregular feedstock powder on final properties of Al parts. *Advanced Powder Technology*, 33, 103768.

16. Chen, Q., Juste, E., Lasgorceix, M., Petit, F., Leriche, A. (2022). Binder jetting process with ceramic powders: Influence of powder properties and printing parameters. *Open Ceramics*, 9, 100218.

17. Deng, H., Huang, Y., Wu, S., Yang, Y. (2022). Binder jetting additive manufacturing: Three-dimensional simulation of micro-meter droplet impact and penetration into powder bed. *Journal of Manufacturing Processes*, 74, 365-373.

18. Pandiyan, V., Cui, D., Le-Quang, T., Deshpande, P., Wasmer, K., Shevchik, S. (2022). In situ quality monitoring in direct energy deposition process using co-axial process zone imaging and deep contrastive learning. *Journal of Manufacturing Processes*, 81, 1064-1075.

19. Isquierdo, D. V., Siqueira, R.H.M., Carvalho, S.M., Lima, M.S.F. (2022). Effect of the initial substrate temperature on heat transfer and related phenomena in austenitic stainless steel parts fabricated by additive manufacturing using direct energy deposition. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 5267-5279.

20. Chen, C., Wong, S.J.L., Raghavan, S., Li, H. (2022). Design of experiments informed deep learning for modeling of directed energy deposition process with a small-size experimental dataset. *Materials & Design*, 222, 111098.

21. Schwarz, N., Lammers, M., Hermsdorf, J., Kaierle, S., Ahlers, H., Lachmayer, R. (2022). *Direction dependency in coaxial laser double wire Direct Energy Deposition.* Procedia CIRP, 111, 196–200.

22. Bernauer, C.J., Zapata, A., Kick, L., Weiss, T., Sigl, M.E., Zaeh, M.F. (2022). *Pyrometry-based closed-loop control of the melt pool temperature in Laser Metal Deposition with coaxial wire feeding*. Procedia CIRP, 111, 296–301.

23. Yazar, K.U., Pawar, S., Park, K.S., Choi, S.H. (2022). Effect of process parameters on the clad morphology, microstructure, microtexture, and hardness of single layer 316 L stainless steel during direct energy deposition. *Materials Characterization*, 191, 112148.

24. Schuller, T., Fanzio, P., Galindo-Rosales, F.J. (2022). Analysis of the importance of shear-induced elastic stresses in material extrusion. *Additive Manufacturing*, 57, 102952.

25. Jang, S., Boddorff, A., Jang, D.J., Lloyd, J., Wagner, K., Thadhani, N., Brettmann, B. (2021). Effect of material extrusion process parameters on filament geometry and inter-filament voids in as-fabricated high solids loaded polymer composites. *Additive Manufacturing*, 47, 102313.

26. Gupta, A.K., Krishnanand, Taufik, M. (2021). *The effect of process parameters in material extrusion processes on the part surface quality: A review*. Materials Today: Proceedings, 50, 1234–1242.

27. Kumar, N., Jain, P.K., Tandon, P., Pandey, P.M. (2018). Investigation on the effects of process parameters in CNC assisted pellet based fused layer modeling process. *Journal of Manufacturing Processes,* 35, 428-436.

28. Romeijn, T., Behrens, M., Paul, G., Wei, D. (2022). Instantaneous and long-term mechanical properties of Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) additively manufactured by pellet-based material extrusion. *Additive Manufacturing,* 59, 103146.

29. Liu, X., Kan, C., Ye, Z. (2022). Real-time multiscale prediction of structural performance in material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing,* 49, 102503.

30. Tee, Y.L., Tran, P., Leary, M., Pille, P., Brandt, M. (2020). 3D Printing of polymer composites with material jetting: Mechanical and fractographic analysis. *Additive Manufacturing,* 36, 101558.

31. Dilag, J., Chen, T., Li, S., Bateman, S.A. (2019). Design and direct additive manufacturing of three-dimensional surface micro-structures using material jetting technologies. *Additive Manufacturing,* 27, 167-174.

32. Tyagi, S., Yadav, A., Deshmukh, S. (2021). *Review on mechanical characterization of 3D printed parts created using material jetting process.* Materials Today: Proceedings, 51, 1012–1016.

33. Gawade, V., Galkin, G., Guo, Y., Guo, W. (2022). Quantifying and modeling overheating using 3D pyrometry map in powder bed fusion. *Manufacturing Letters,* 33, 880-892.

34. Yue, T. Yang, Zhang, S., Wang, C. Yue, Xu, W., Xu, Y. Di, Shı, Y. Sheng, Zang, Y. (2020). Effects of selective laser melting parameters on surface quality and densification behaviours of pure nickel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition),* 32, 2634–2647.

35. Gómez-Rodríguez, C., García-Quiñonez, L. V., Verdeja, L.F., Castillo-Rodríguez, G.A., Aguilar-Martínez, J.A., Mariño-Gámez, A.E., Fernández-González, D. (2022). Selective laser sintering of alumina-molybdenum nanocomposites. *Ceramics International,* 48, 29540-29545.

36. Li, S., Liu, D., Mi, H., Deng, Z., Liu, J., Chen, T. (2022). Numerical simulation on evolution process of molten pool and solidification characteristics of melt track in selective laser melting of ceramic powder. *Ceramics International,* 48, 18302 – 18315.

37. Thakre, U., Mote, R.G. (2022). Uncertainty quantification and statistical modeling of selective laser sintering process using polynomial chaos based response surface method. *Journal of Manufacturing Processes,* 81, 893-906.

38. Lin, Z., Dabakhsh, S., Rashid, A. (2022). Developing processing windows for powder pre-heating in electron beam melting. *Journal of Manufacturing Processes*, 83, 180–191.

39. Zhang, Y., Jarosinski, W., Jung, Y. G., Zang, J. (2018). Additive Manufacturing Processes and Equipment. *Additive Manufacturing*, 39-51.

40. Zhang, F., Zhu, L., Li, Z., Wang, S., Shi, J., Tang, W., Li, N., Yang, J. (2021). The Recent Development of Vat Photopolymerization: A review. *Additive Manufacturing*, 48, 102423.

41. Ng, C.S., Subramanian, A.S., Su, P.C. (2022). Zinc oxide nanoparticles as additives for improved dimensional accuracy in vat photopolymerization. *Additive Manufacturing*, 59, 103118.

42. Tu, J., Kashcooli, Y., Alvarez, N.J., Palmese, G.R. (2022). A practical framework for predicting conversion profiles in vat photopolymerizations. *Additive Manufacturing*, 59, 103102.

43. Andjela, L., Abdurahmanovich, V.M., Vladimirovna, S.N., Mikhailovna, G.I., Yurievich, D.D., Alekseevna, M.Y. (2022). A Review on Vat Photopolymerization 3D-Printing Processes for Dental Application. *Science Direct*, 38, 284-296.

44. Sürmen, H.K. (2019). Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi,* 24, 373–392.

45. Vallet, D., Pateloup, V., Michaud, P., Chartier, T. (2022). Development of a 3D model to predict curing dimensions and conversion rates of curable ceramic systems during stereolithography 3D printing process. *Journal of the European Ceramic Society*, 42, 5851-5863.

46. İnternet: AMTECH. 3D Printing Techniques. Web: https://amtech3d.com/3d-printing-techniques/, Son Erişim Tarihi: 12.09.2023.

47. Wu, T., Jiang, P., Zhang, X., Guo, Y., Ji, Z., Jia, X., Wang, X., Zhou, F., Liu, W. (2019). Additively manufacturing high-performance bismaleimide architectures with ultraviolet-assisted direct ink writing. *Materials and Design*, 180, 107947.

48. Dean, D., Wallace, J., Siblani, A., Wang, M.O., Kim, K., Mikos, A.G., Fisher, J.P. (2012). Continuous Digital Light Processing (cDLP): Highly Accurate Additive Manufacturing Of Tissue Engineered Bone Scaffolds: This Paper Highlights The Main Issues Regarding the Application of Continuous Digital Light Processing (cDLP) for the Production of Highly Accurate PPF Scaffolds with Layers as Thin as 60 Mm for Bone Tissue Engineering. *Virtual and Physical Prototyping*. 7(1), 13-24.

49. Srivastava, M., Rathee, S., Patel, V., Kumar, A., Koppad, P.G. (2022). A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 2612-2641.

50. Bhatia, A., Sehgal, A.K. (2021). *Additive manufacturing materials, methods and applications: A review*. Materials Today: Proceedings, 81, 1060–1067.

51. Panchal, M., Khare, S., Khamkar, P., Suresh Bhole, K. (2022). *Dental implants: A review of types, design analysis, materials, additive manufacturing methods, and future scope.* Materials Today Proceedings, 68, 1860–1867.

52. Rawal, S., Brantley, J., Karabudak, N. (2013, June). *Additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy components for spacecraft applications.* Paper presented at the 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 5–11.

53. González-Estrada, O.A., Pertuz Comas, A.D., Ospina, R. (2022). Characterization of hydroxyapatite coatings produced by pulsed-laser deposition on additive manufacturing Ti6Al4V ELI. *Thin Solid Films,* 763,139592.

54. Karpenko, O., Oterkus, S., Oterkus, E. (2022). Peridynamic analysis to investigate the influence of microstructure and porosity on fatigue crack propagation in additively manufactured Ti6Al4V. *Engineering Fracture Mechanics*, 261, 108212.

55. Ding, X., Ma, H., Zhang, Q., Yang, J., Li, D., Fan, S. (2022). Effect of annealing heat treatment on microstructure and corrosion behavior of Ti6Al4V alloy fabricated by multi-laser beam wire-feed additive manufacturing in vacuum environment. *Journal of Alloys and Compounds*, 914, 165363.

56. Dababneh, F., Taheri, H. (2022). Investigation of the influence of process interruption on mechanical properties of metal additive manufacturing parts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 38, 706-716.

57. Xiu, M., Tan, Y.T., Raghavan, S., Goh, M.H., Nai, M.L.S. (2022). The effect of heat treatment on microstructure, microhardness, and pitting corrosion of Ti6Al4V produced by electron beam melting additive manufacturing process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 120, 1281–1293.

58. Huang, X., Ding, S., Yue, W. (2022). Cryogenic treatment on Ti6Al4V alloy fabricated by electron beam melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 3323–3332.

59. Ferro, C., Grassi, R., Seclì, C., Maggiore, P. (2016). *Additive Manufacturing Offers New Opportunities in UAV Research*. Procedia CIRP, 41, 1004–1010.

60. Rosso, S., Uriati, F., Grigolato, L., Meneghello, R., Concheri, G., Savio, G. (2021). An optimization workflow in design for additive manufacturing. *Applied Sciences*, 11, 2572.

61. Attar, H., Ehtemam-Haghighi, S., Soro, N., Kent, D., Dargusch, M.S. (2020). Additive manufacturing of low-cost porous titanium-based composites for biomedical applications: Advantages, challenges and opinion for future development. *Journal of Alloys and Compounds*, 827,154263.

62. Ford, S., Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587.

63. Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 60, 677-688.

64. Guo, N., Leu, M.C. (2013). Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineers*, 8, 215-243.

65. Bandyopadhyay, A., Traxel, K.D., Lang, M., Juhasz, M., Eliaz, N., Bose, S. (2022). Alloy design via additive manufacturing: Advantages, challenges, applications and perspectives. *Materials Today*, 52, 207-224.

66. Yin, H., Zhang, W., Zhu, L., Meng, F., Liu, J., Wen, G. (2023). Review on lattice structures for energy absorption properties. *Composite Structures*, 304, 116397.

67. Korkmaz, M.E., Gupta, M.K., Robak, G., Moj, K., Krolczyk, G.M., Kuntoğlu, M. (2022). Development of lattice structure with selective laser melting process: A state of the art on properties, future trends and challenges. *Journal of Manufacturing Processes*, 81, 1040-1063.

68. Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., Brandt, M. (2019). SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials and Design*, 183, 108137.

69. Liu, Y. (2021). Mechanical properties of a new type of plate–lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 192, 106141.

70. Echeta, I., Dutton, B., Leach, R.K., Piano, S. (2021). Finite element modelling of defects in additively manufactured strut-based lattice structures. *Additive Manufacturing*, 47, 102301.

71. Liu, H., Gu, D., Yang, J., Shi, K., Yuan, L. (2022). Laser powder bed fusion of node-reinforced hybrid lattice structure inspired by crystal microstructure: Structural feature sensitivity and mechanical performance. *Materials Science and Engineering: A*, 858, 144048.

72. Viswanath, A., Khan, K.A., Barsoum, I. (2022). Design of novel isosurface strut-based lattice structures: Effective stiffness, strength, anisotropy and fatigue properties. *Materials & Design*, 224, 111293.

73. Li, P.Y., Ma, Y.E., Sun, W.B., Qian, X., Zhang, W., Wang, Z.H. (2022). Mechanical behaviors and failure modes of additive manufactured Ti6Al4V lattice structures under compressive load. *Thin-Walled Structures*. 180, 109778.

74. Li, L., Yang, F., Li, P., Wu, W., Wang, L. (2022). A novel hybrid lattice design of nested cell topology with enhanced energy absorption capability. *Aerospace Science and Technology*, 128, 107776.

75. Sun, Z.P., Guo, Y.B., Shim, V.P.W. (2021). Characterisation and modeling of additively-manufactured polymeric hybrid lattice structures for energy absorption. *International Journal of Mechanical Science*, 191, 106101.

76. Xiao, L., Xu, X., Feng, G., Li, S., Song, W., Jiang, Z. (2022). Compressive performance and energy absorption of additively manufactured metallic hybrid lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 219, 107093.

77. Lei, H., Li, C., Zhang, X., Wang, P., Zhou, H., Zhao, Z., Fang, D. (2021). Deformation behavior of heterogeneous multi-morphology lattice core hybrid structures. *Additive Manufacturing*, 37,101674.

78. Mazur, M., Leary, M., McMillan, M., Sun, S., Shidid, D. and Brandt, M. (2017). Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM), M. Brandt (Ed.), *Laser Additive Manufacturing, Woodhead Publishing*, 119-161.

79. Wei, K., Yang, Q., Yang, X., Tao, Y., Xie, H., Qu, Z., Fang, D. (2020). Mechanical analysis and modeling of metallic lattice sandwich additively fabricated by selective laser melting. *Thin-Walled Structures.* 146, 106189.

80. Wei, K., Yang, Q., Ling, B., Xie, H., Qu, Z., Fang, D. (2018). Mechanical responses of titanium 3D kagome lattice structure manufactured by selective laser melting. *Extreme Mechanics Letters*, 23, 41–48.

81. Yazdani Sarvestani, H., Akbarzadeh, A.H., Mirbolghasemi, A., Hermenean, K. (2018). 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability. *Materials & Design*, 160, 179–193.

82. Daynes, S., Feih, S., Lu, W.F., Wei, J. (2017). Optimisation of functionally graded lattice structures using isostatic lines. *Materials & Design*, 127, 215–223.

83. Kang, D., Park, S., Son, Y., Yeon, S., Kim, S.H., Kim, I. (2019). Multi-lattice inner structures for high-strength and light-weight in metal selective laser melting process. *Materials & Design*, 175, 107786.

84. Suresh, S., Sun, C.N., Tekumalla, S., Rosa, V., Ling Nai, S.M., Wong, R.C.W. (2021). Mechanical properties and in vitro cytocompatibility of dense and porous Ti–6Al–4V ELI manufactured by selective laser melting technology for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 123, 104712.

85. Limmahakhun, S., Oloyede, A., Sitthiseripratip, K., Xiao, Y., Yan, C. (2017). 3D-printed cellular structures for bone biomimetic implants. *Additive Manufacturing*, 15, 93–101.

86. Rashid, R., Masood, S.H., Ruan, D., Palanisamy, S., Huang, X., Rashid, R.A.R. (2018). *Topology Optimisation of Additively Manufactured Lattice beams for three-point bending test.* Paper presented at the Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference, Austin, Texas, USA.

87. Rashid, R.A.R., Mallavarapu, J., Palanisamy, S., Masood, S.H. (2017). *A comparative study of flexural properties of additively manufactured aluminium lattice structures.* Materials Today: Proceedings, 4(8), 8597–8604.

88. Alsalla, H., Hao, L., Smith, C. (2016). Fracture toughness and tensile strength of 316L stainless steel cellular lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *Materials Science and Engineering: A.* 669, 1–6.

89. Korshunova, N., Alaimo, G., Hosseini, S.B., Carraturo, M., Reali, A., Niiranen, J., Auricchio, F., Rank, E. and Kollmannsberger, S. (2021). Bending behavior of octet-truss lattice structures: Modelling options, numerical characterization and experimental validation. *Materials & Design*, 205, 109693.

90. Liu, C., Mai, Z., Yan, D., Jiang, M., Dai, Y., Wang, P., Chen, Z., Lao, C. (2020). Effect of Hot Isostatic Pressing on Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Fabricated by Electron Beam Melting. *Metals*, 10(5), 593.

91. Polley, C., Radlof, W., Hauschulz, F., Benz, C., Sander, M., Seitz, H. (2022). Morphological and mechanical characterisation of three-dimensional gyroid structures fabricated by electron beam melting for the use as a porous biomaterial. *Journal of the Mechanical Behaviour of Biomedical Materials*, 125, 104882.

92. Rosen, D.W. (2007). Computer-Aided design for additive manufacturing of cellular structures. *Computer-Aided Design and Applications*, 4(5), 585–594.

93. İnternet: Wikipedia. Strain Rate. Web: https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_rate, Son Erişim Tarihi: 13.09.2023.

94. Tüzemen, M. Ç. (2021). Seçici Lazer Ergitme Yöntemiyle Üretilen Geçişli Gözenekli Yapılarda Tasarım Değişkenlerinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 36-39.

95. ASTM (2016). Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics with Engineered Porosity (Honeycomb Cellular Channels) at Ambient Temperatures. ASTM Standards, 1-11.

96. ASTM (2020). Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. ASTM Standards, 5-6.

97. Li, C., Lei, H., Liu, Y., Zhang, X., Xiong, J., Zhou, H., Fang, D. (2018). Crushing behavior of multi-layer metal lattice panel fabricated by selective laser melting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 145, 389–399.

98. ISO (2011). Mechanical testing of metals - Ductility testing - Compression test for porous and cellular metals. International Standard, ISO 13314(1).

99. Lozanovski, B., Leary, M., Tran, P., Shidid, D., Qian, M., Choong, P., Brandt, M. (2019). Computational modelling of strut defects in SLM manufactured lattice structures. *Materials and Design*. 171, 107671.

100. Arvieu, C., Galy, C., Le Guen, E., Lacoste, E. (2020). Relative Density of SLM-Produced Aluminum Alloy Parts: Interpretation of Results. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4, 83.

101. Pasang, T., Tavlovich, B., Yannay, O., Jakson, B., Fry, M., Tao, Y., Turangi, C., Wang, J.C., Jiang, C.P., Sato, Y., Tsukamoto, M., Misiolek, W. (2021). Directionally-dependent mechanical properties of Ti6Al4V manufactured by electron beam melting (EBM) and selective laser melting (SLM). *Materials (Basel, Switzerland)*, 14(13), 3603.

102. Liu, L., Kamm, P., García-Moreno, F., Banhart, J., Pasini, D. (2017). Elastic and failure response of imperfect three-dimensional metallic lattices: the role of geometric defects induced by Selective Laser Melting. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 107, 160–184.

103. Gupta, A., Bennett, C.J., Sun, W. (2021). The role of defects and characterisation of tensile behaviour of EBM Additive manufactured Ti-6Al-4V: An experimental study at elevated temperature. *Engineering Failure Analysis*, 120, 105115.

104. Řehounek, L., Hájková, P., Vakrčka, P., Jíra, A. (2018). *Geometry And Mechanical Properties Of A 3d-Printed Titanium Microstructure*. Acta Polytechnica CTU Proceedings, 15, 104–108.

105. İnternet: Wikipedia. Compressive Strength. Web: https://en.wikipedia.org/wiki/Compressive_strength, Son Erişim Tarihi: 07.11.2023.

106. Gülcan, O. (2021). Eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri. *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 2, 19, 64-81.

107. Zhang, X.Z., Leary, M., Tang, H.P., Song, T., Qian, M. (2018). Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges. *Current Opinion in Solid State & Materials Science*. 22, 75-99.

108. Kadkhodapour, J., Montazerian, H., Darabi, A.C., Zargarian, A., Schmauder, S. (2017). The relationships between deformation mechanisms and mechanical properties of additively manufactured porous biomaterials. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 70, 28-42.

109. Choy, S.Y., Sun, C.N., Leong, K.F., Wei, J. (2017). Compressive properties of Ti-6Al-4V lattice structures fabricated by selective laser melting: Design, orientation and density. *Additive Manufacturing*, 16, 213–224.

110. Tüzemen, M.Ç., Salamcı, E., Ünal, R. (2022). Additive manufacturing design approach to strut-based functionally graded porous structures for personalized implants. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, 1526–1540.

111. Güden, M., Riaz, A. Bin, Toksoy, A.K., Yıldıztekin, M., Erten, H.İ., Çimen, G., Hızlı, B., Çellek, B. S., Güleç, E., Taşdemirci, A., Yavaş, H., Altınok, S. (2023). Investigation and validation of the flow stress equation and damage model parameters of an electron beam melted Ti6Al4V alloy with a martensitic phase. *Materials Science and Engineering: A.* 885, 145590.

112. Galati, M., Saboori, A., Biamino, S., Calignano, F., Lombardi, M., Marchiandi, G., Minetola, P., Fino, P., Iuliano, L. (2020). *Ti-6Al-4V lattice structures produced by EBM: Heat treatment and mechanical properties.* Procedia CIRP, 88, 411–416.

113. Tan, X.P., Tan, Y.J., Chow, C.S.L., Tor, S.B., Yeong, W.Y. (2017). Metallic powder-bed based 3D printing of cellular scaffolds for orthopaedic implants: A state-of-the-art review on manufacturing, topological design, mechanical properties and biocompatibility. *Materials Science and Engineering C*, 76, 1328-1343.

114. İnternet: Wikipedia. Three-point flexural test. Web: https://en.wikipedia.org/wiki/Three-point_flexural_test, Son Erişim Tarihi: 07.11.2023.

115. Goodall, R., Hernandez-Nava, E., Jenkins, S.N.M., Sinclair, L., Tyrwhitt-Jones, E., Khodadadi, M.A., Ip, D.H., Ghadbeigi, H. (2019). The effects of defects and damage in the mechanical behavior of Ti6Al4V lattices. *Frontiers in Materials*, 6, 117.

116. Bellini, C., Borrelli, R., Di Cocco, V., Franchitti, S., Iacoviello, F., Sorrentino, L. (2022). Titanium lattice structures manufactured by EBM process: Effect of skin material on bending characteristics. *Engineering Fracture Mechanics,* 260, 108180.

117. Yuan, Y., Zhang, Y., Qiao, Y., Xie, J., Xu, Q., Qi, Y., Zhang, W., Chen, P. (2023). Effect of build orientation on dynamic compressive behaviour of Ti-6Al-4V alloy fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 862, 144440.

118. Khrapov, D., Koptyug, A., Manabaev, K., Léonard, F., Mishurova, T., Bruno, G., Cheneler, D., Loza, K., Epple, M., Surmenev, R., Surmeneva, M. (2020). The impact of post manufacturing treatment of functionally graded Ti6Al4V scaffolds on their surface morphology and mechanical strength. *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 1866–1881.

119. Musatto, A., Groarke, R., O'Neill, A., Obeidi, M. A., Delaure, Y., Brabazon, D. (2021). Influences of powder morphology and spreading parameters on the powder bed topography uniformity in powder bed fusion metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing.* 38, 101807.



Gazili olmak ayrıcalıktır