
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN KAFES YAPILARA HIP UYGULAMASININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Koray YAMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2026

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.

Koray YAMAN
20/01/2026

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN KAFES YAPILARA HIP UYGULAMASININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Koray YAMAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2026

ÖZET

Günümüzde metal eklemeli imalat havacılık, biyomedikal, savunma, otomotiv, enerji gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. SLE üretim yöntemi, metal eklemeli imalat alanında tasarım özgürlüğü ile karmaşık yapıların üretimine olanak sağlaması açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Karmaşık kafes yapılarının eklemeli imalat dışında konvansiyonel üretim yöntemleri ile üretimi oldukça güçtür. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen literatür çalışmaları neticesinde BCC ve flourite kafes yapısı üretimi üzerinde karar kılınmıştır. BCC ve flourite kafes yapıları Ti-6Al-4V malzeme seçilerek küp ve çekme çubuğu şeklinde toz yataklı seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen numunelere HIP ısıl işlemi uygulanmıştır. HIP ısıl işleminin etkisini gözlemek için Arşimet yoğunluk testi, optik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri, mikro sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Mekanik etkilerin gözlenmesi için statik basma testi, çekme testi ve split hopkinson basınç barı testi gerçekleştirilmiştir. HIP ısıl işlemi sonrası statik basma testinde BCC kafesin şekil değiştirme oranı %12,06'dan %34,4'e, flourite kafesin şekil değiştirme oranı %10,45'ten %20,35'e çıkarak yapı önemli oranda süneklik kazanmıştır. Benzer şekilde çekme testi sonuçlarına göre HIP ısıl işlemi sonrası BCC kafesin kopma uzaması %0,64'ten %5,33'e, flourite kafesin kopma uzaması ise %1,1'den %4,46'ya çıkarak önemli oranda süneklik kazanmıştır. Split Hopkinson basınç barı testi ile HIP ısıl işlemi öncesi kırılmanın ani ve gevrek olarak gerçekleştiği, ısıl işlem sonrası elde edilen sünek yapı sayesinde gerilmenin düğümler aracılığıyla daha kararlı iletildiği ve kırılmanın da daha kontrollü gerçekleştiği gözlenmiştir. Ayrıca çekme testi sonrası SEM cihazında kırılma yüzeyi incelemesi gerçekleştirilmiş, gevrek kırılma yüzeyinden sünek kırılma yüzeyine geçiş literatür ile uyumlu olarak değerlendirilmiştir.

Bilim Kodu	:	91448
Anahtar Kelimeler	:	Kafes, eklemeli imalat, şekil değiştirme kabiliyeti
Sayfa Adedi	:	81
Danışman	:	Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HIP APPLICATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF LATTICE STRUCTURES PRODUCED BY SELECTIVE LASER MELTING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Koray YAMAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2026

ABSTRACT

Today, metal additive manufacturing (AM) is widely used in many sectors such as aerospace, biomedical, defense, automotive, and energy. The selective laser melting (SLE) manufacturing method provides a significant advantage in the field of metal AM by enabling the production of complex structures with high design freedom. The fabrication of complex lattice structures using conventional manufacturing methods other than AM is extremely challenging. Within the scope of this study, based on the literature review conducted, the production of BCC and fluorite lattice structures was selected. BCC and fluorite lattice structures were manufactured from Ti–6Al–4V material in cubic and tensile bar geometries using the powder bed fusion selective laser melting method. The produced specimens were subjected to hot isostatic pressing (HIP) heat treatment. To investigate the effect of the HIP heat treatment, Archimedes density tests, optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) examinations, and microhardness measurements were performed. To evaluate the mechanical behavior, static compression tests, tensile tests, and Split Hopkinson pressure bar tests were conducted. After HIP heat treatment, the static compression test results showed that the strain of the BCC lattice increased from 12.06% to 34.4%, while the strain of the fluorite lattice increased from 10.45% to 20.35%, indicating a significant improvement in ductility. Similarly, according to the tensile test results, after HIP heat treatment, the elongation at fracture of the BCC lattice increased from 0.64% to 5.33%, and that of the fluorite lattice increased from 1.1% to 4.46%, demonstrating a substantial enhancement in ductility. Split Hopkinson pressure bar tests revealed that fracture occurred abruptly and in a brittle manner prior to HIP heat treatment, whereas after heat treatment, owing to the ductile structure obtained, stress was transmitted more stably through the nodes and fracture occurred in a more controlled manner. In addition, fractography analyses were carried out using SEM after the tensile tests, and the transition from a brittle fracture surface to a ductile fracture surface was evaluated to be consistent with the literature.

Science Code	:	91448
Key Words	:	Lattice, additive manufacturing, deformation capability
Page Number	:	81
Supervisor	:	Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

TEŞEKKÜR

Bu uzun ve zahmetli süreçte yüksek lisans tezimi tamamlamamda gösterdikleri sabır, anlayış ve katkılarla yanımda olan kıymetli danışmanım Sayın Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK hocama en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Tezimin her aşamasında fikirleriyle beni yönlendiren, bilgi ve deneyimlerini paylaşarak bu süreci en verimli şekilde yönetmeme olanak tanıyan hocalarıma; bilimsel düşünme yeteneğimi geliştirmem için beni teşvik ettikleri, her daim cesaretlendirdikleri ve sabırla destekledikleri için minnettarım. Tüm eğitim ve öğrenim hayatım boyunca bana her daim destek olan ve varlıklarıyla güç veren sevgili aileme en içten duygularımla ve tüm samimiyetimle teşekkürlerimi sunuyorum. Hayatım boyunca sağladığı katkı ve destekle her zaman yanımda olan, sabrı ve anlayışıyla bu süreçte bana güç veren değerli eşime gönülden teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

2.1. Kafes Yapılarının Çeşitleri 5

2.2. Kafes Yapılarının Kullanım Alanları 8

2.3. Kafes Yapıları Üzerine Yapılan Çalışmaların İncelenmesi 9

3. MALZEME VE YÖNTEM 15

3.1. Ti-6Al-4V Alaşımı ve Özellikleri 15

3.2. n-Topology ve Materialise Magics Programlarında Numune Tasarımı 17

3.3. SLE Yönteminde Kullanılan Toz Özellikleri 23

3.4. SLE Yöntemi ile Numunelerin Üretimi 25

3.5. Telli-Elektro Erozyon (TEEİ) Kesimi 28

3.6. Ultrasonik Temizlik İşlemi 29

3.7. Ağırlık Ölçümleri 30

3.8. HIP Prosesi Uygulaması 30

3.9. Optik ve SEM İncelemeleri 32

Sayfa

3.10. Arşimet Metodu ile Yoğunluk Ölçümü Uygulaması 32
3.11. Sertlik Testi Uygulaması 33
3.12. Statik Basma Testi Uygulaması 33
3.13. Çekme Testi Uygulaması 33
3.14. Split Hopkinson Basınç Barı Testi Uygulaması 34
4. TARTIŞMA VE BULGULAR 35
4.1. Ağırlık Ölçüm Sonuçları 35
4.2. HIP Isıl İşlemi Değerlendirilmesi 39
4.3. Mikroyapı İncelemeleri ve Değerlendirilmesi 39
4.4. Arşimet Metodu ile Yoğunluk Ölçümü Sonuçları 42
4.5. Sertlik Ölçümü Sonuçları 43
4.6. Basma Testi Sonuçları 45
4.7. Çekme Testi Sonuçları 52
4.8. Split Hopkinson Basınç Barı Testi Sonuçları 68
4.9. Çalışmanın Literatür ile Karşılaştırılması ve Katkıları 73
4.10. Çalışmanın Sınırlılıkları 73
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 75
KAYNAKLAR 77
ÖZGEÇMİŞ 81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Toz özellikleri 23

Çizelge 3.2. Ti-6Al-4V toz kimyasal kompozisyonu 24

Çizelge 3.3. Tane boyutu analiz sonuçları 25

Çizelge 3.4. Eİ üretim parametreleri 26

Çizelge 3.5. Deney planına göre teste alınacak numuneler 28

Çizelge 3.6. HIP proses parametreleri 31

Çizelge 4.1. Tasarım ve üretim sonrası numunelerin karşılaştırması 35

Çizelge 4.2. Arşimet yoğunluk ölçüm sonuçları 42

Çizelge 4.3. Sertlik ölçüm sonuçları 43

Çizelge 4.4. Basma testi sonuçları ortalaması 45

Çizelge 4.5. Birim ağırlık başına yük taşıma kapasitesi 48

Çizelge 4.6. Çekme testi literatür sonuçları 54

Çizelge 4.7. Çekme testi sonuçlarının tablosu 66

Çizelge 4.8. Eş darbe koşullarında numune bazlı ortalama gerinim hızı değerleri 69

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Kübik kristal yapılar ve birim hücre konfigürasyonları 6

Şekil 2.2. HIP ısıl işleminin Ti-6Al-4V malzemenin basma test sonuçlarına etkisi…… 10

Şekil 3.1. nTopology kutu (box) oluşturma 17

Şekil 3.2. nTopology kutu oluşturmak için değer girme işlemi 18

Şekil 3.3. nTopology birim hücre oluşturma 18

Şekil 3.4. a) BCC birim hücre b) Flourite birim hücre (2 x 2 x 2 mm^3) 19

Şekil 3.5. nTopology kafes yapı oluşturma 20

Şekil 3.6. a) BCC kafes yapısı b) Flourite kafes yapısı 21

Şekil 3.7. Tasarımda BCC kafes hacmi ve ağırlığı 21

Şekil 3.8. Tasarımda Flourite kafes hacmi ve ağırlığı 22

Şekil 3.9. Materialise Magics üretim tablası yerleşimi 22

Şekil 3.10. Ti-6Al-4V toz SEM incelemesi 24

Şekil 3.11. Ti-6Al-4V toz tane boyut analizi grafiği 25

Şekil 3.12. Nikon SLM 280 HL cihazı 26

Şekil 3.13. Üretim sonrası alt taş üzerinde numuneler 27

Şekil 3.14. TEEİ sonrası a) çekme numuneleri b) basma testi ve SHPBT numuneleri .. 29

Şekil 3.15. Dolu küp hassas terazi ölçümü 30

Şekil 3.16. HIP ısıl işlem fırını 31

Şekil 3.17. HIP ısıl işlemi sonrası a) çekme numuneleri b) basma numuneleri 32

Şekil 3.18. Split Hopkinson basınç barı test düzeneği 34

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.1. BCC kafes yapısı sinterlenmiş toz incelemesi 36

Şekil 4.2. Flourite kafes yapısı sinterlenmiş toz incelemesi 37

Şekil 4.3. BCC kafes topolojisi 38

Şekil 4.4. Flourite kafes topolojisi 38

Şekil 4.5. HIP'siz numunenin martenzit mikroyapısına ait optik mikroskop görüntüsü 40

Şekil 4.6. HIP'siz numunenin martenzit mikroyapısına ait SEM görüntüsü 41

Şekil 4.7. HIP'li numunenin α + β lameler mikroyapısına ait optik mikroskop görüntüsü 41

Şekil 4.8. HIP'li numunenin α + β lameler mikroyapısına ait SEM görüntüsü 42

Şekil 4.9. HIP'siz numune mikro sertlik ölçüm uygulaması 43

Şekil 4.10. HIP'li numune mikro sertlik ölçüm uygulaması 44

Şekil 4.11. HIP'siz basma testi grafikleri 46

Şekil 4.12. HIP'li basma testi grafikleri 46

Şekil 4.13. HIP'siz BCC kafes basma testi kırılma yüzeyi 50

Şekil 4.14. HIP'siz Flourite kafes basma testi kırılma yüzeyi 51

Şekil 4.15. HIP'li BCC kafes basma testi yüzeyi 51

Şekil 4.16. HIP'li Flourite kafes basma testi kırılma yüzeyi 52

Şekil 4.17. HIP'siz çekme testi uygulaması sonrası numuneler 52

Şekil 4.18. HIP'li çekme testi uygulaması sonrası numuneler 53

Şekil 4.19. HIP'siz dolu çekme testi grafikleri 53

Şekil 4.20. HIP'li dolu çekme testi grafikleri 54

Şekil 4.21. HIP'siz dolu çekme numunesi makro kırılma yüzeyi incelemesi 56

Şekil 4.22. HIP'siz dolu çekme numunesi mikro kırılma yüzeyi incelemesi 57

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.23. HIP'li dolu çekme numunesi makro kırılma yüzeyi incelemesi..... 59

Şekil 4.24. HIP'li dolu çekme numunesi mikro kırılma yüzeyi incelemesi 59

Şekil 4.25. HIP'siz BCC kafes çekme testi grafikleri..... 60

Şekil 4.26. HIP'li BCC kafes çekme testi grafikleri..... 61

Şekil 4.27. HIP'siz BCC kafes çekme numunesi makro kırılma yüzeyi incelemesi 62

Şekil 4.28. HIP'li BCC kafes çekme numunesi makro kırılma yüzeyi incelemesi 62

Şekil 4.29. HIP'siz Flourite kafes çekme testi grafikleri..... 63

Şekil 4.30. HIP'li Flourite kafes çekme testi grafikleri 63

Şekil 4.31. HIP'siz Flourite kafes çekme numunesi makro kırılma yüzeyi incelemesi . 64

Şekil 4.32. HIP'li Flourite kafes çekme numunesi makro kırılma yüzeyi incelemesi.... 65

Şekil 4.33. SHPBT gerinim hızı-zaman grafikleri..... 69

Şekil 4.34. SHPBT gerilme-zaman grafikleri..... 70

Şekil 4.35. SHPBT gerilme-gerinme grafikleri 71

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
°C	Santigrat derece
α	Alfa fazı (HCP)
α′	Martenzit alfa fazı
β	Beta fazı
D	50 Medyan tanecik boyutu
E	Elastisite (Young) modülü
ε	Gerinim
$\dot{\varepsilon}$	Gerinim hızı
g	Gram
HV	Vickers sertliği
J/mm³	Enerji yoğunluğu
kV	Kilovolt
kN	Kilonewton
m³	Metreküp
MJ/m³	Birim hacim başına enerji
mm	Milimetre
mm³	Milimetreküp
mm/dak	Milimetre/dakika
mm/s	Milimetre/saniye
MPa	Megapascal
µA	Mikroamper
µm	Mikrometre
ρ	Yoğunluk
σ	Gerilme
σ_y	Akma dayanımı
σ_u	Nihai (çekme) dayanımı
W	Watt
W_v	Birim hacim başına enerji sönümleme

Kısaltmalar	Açıklamalar
AB	As-built (ısıl işlemsiz üretim durumu)
AM	Additive Manufacturing (Eİ)
AMS	Aerospace Material Specification
ASTM	American Society for Testing and Materials
BCC	Body-Centered Cubic (Hacim Merkezli Kübik)
CAD	Computer-Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CT	Computed Tomography (Bilgisayarlı Tomografi)
DED	Directed Energy Deposition (Doğrudan Enerji Yığma)
EBM	Electron Beam Melting (Elektron Işını ile Ergitme)
W-EDM	Wire-Electrical Discharge Machining
FCC	Face-Centered Cubic (Yüzey Merkezli Kübik)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
HCP	Hexagonal Close-Packed (Hekzagonal Yoğun Paketli)
HIP	Hot Isostatic Pressing (Sıcak İzostatik Presleme)
ISO	International Organization for Standardization
MEMS	Mikro Elektro Mekanik Sistemler
OM	Optical Microscopy (Optik Mikroskop)
PBF	Powder Bed Fusion (Toz Yataklı Füzyon)
RD	Relative Density (Bağıl/Göreceli Yoğunluk)
SC	Simple Cubic (Basit Kübik)
SEM	Scanning Electron Microscopy
SHPBT	Split Hopkinson Basınç Bar Testi
SLE	Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ergitme)
Ti-6Al-4V	Titanyum Alaşımı (Ti-%6Al-%4V)
ULS	Uniform Lattice Structure (Tekdüze Kafes Yapı)
UTS	Ultimate Tensile Strength (Nihai Çekme Dayanımı)

1. GİRİŞ

Kafes yapılar günümüzde çeşitli mühendislik uygulama alanlarında artan şekilde araştırma konusu olmayı sürdürmektedir. Özellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranları sayesinde havacılık, uzay, savunma, otomotiv gibi birçok alanda potansiyel kullanım alanları yoğun şekilde araştırılmaktadır. Ağırlık azaltımının kritik olduğu bu ve benzeri sektörlerde malzeme değişimi yoluna gidilerek ağırlık azaltımı yapılabilmektedir. Ancak bazı uygulamalarda teknik isterler sebebi ile malzeme değişimi mümkün olmayabilir. Malzeme değişiminin mümkün olmadığı uygulamalarda ağırlık azaltımı kafes yapılarının kullanımı ile gerçekleştirilebilmektedir.

Kafes yapılarının geleneksel yöntemler ile üretimi karmaşık geometrileri nedeniyle oldukça zorlayıcı ve maliyetli olabilmektedir. Kafes yapılarının karmaşık geometriye sahip olması sebebiyle ortaya çıkan üretim zorlukları eklemeli imalat (Eİ) ile aşılabilmektedir. Zira Eİ ile karmaşık geometrili parçalar kolaylıkla üretilebilmektedir. Kafes yapılarının Eİ ile üretiminde Seçici Lazer Ergitme (selective laser melting, SLE) ve Elektron Işını ile Ergitme (electron beam melting, EBM) yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır.

Eİ tasarım özgürlüğü, hızlı prototipleme, minimum atık ve kişiselleştirilmiş tasarımları ile ön plana çıkmaktadır. Eİ ile karmaşık geometrili kafes yapılarının üretimi için CAD verileri kullanılmaktadır. Kafes yapıları ise n-Topology programında tasarlanmakta ve seçilen Eİ üretim metodu ile katman katman inşa edilmektedir. Eİ'ta katman katman yapılan üretimler sayesinde daha hafif daha dayanıklı yapıların üretimi için tasarımcılara tasarım özgürlüğü sağlanabilmektedir.

Problem durumu / Konunun tanımı

Havacılık, uzay, savunma ve otomotiv sanayi başta olmak üzere birçok sektörde ağırlık hafifletme büyük bir öneme sahiptir. Ağırlık azaltımının malzeme değişimi ile mümkün olmadığı durumlarda karmaşık geometriye sahip kafes yapılardan yararlanmak kaçınılmaz olmaktadır. Kafes yapıların geleneksel yöntemlerle üretimi noktasında büyük bir zorluk çekilmektedir. Bu karmaşık geometrilerin üretiminde Eİ yöntemi ön plana çıkmaktadır. Sektörel olarak bakıldığında havacılık, uzay, savunma ve otomotiv gibi sektörlerde ihtiyaç duyulan yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip karmaşık geometrili yapıların

üretimindeki zorluklar problemin temelini oluşturmaktadır. Bu probleme ek olarak bir toz yataklı sistem olan SLE yöntemiyle üretilen parçaların karakterizasyonunda da belirsizlikler söz konusudur. SLE yöntemi ile üretimlerde yüksek soğuma hızları nedeniyle yüksek kalıntı gerilmeler ve son derece gevrek davranış sergileyen yapılar elde edilmektedir. Bu belirsizlikler ve olumsuz özellikler önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır [29, 32]. Gerek üretilen parçaların karakterizasyonu gerek istenmeyen mekanik özelliklerin yeniden şekillendirilmesi için ilave ısıl işlem gibi proseslerin uygulanması önem arz etmektedir.

Bununla birlikte hafif kafes yapılarının yüksek çarpışma hızlarındaki performansı ve davranışı zırh uygulamalarında kullanım potansiyeli oluşturmaktadır. Bu noktada yüksek çarpışma hızlarında hasar davranışının analiz edilmesinde Split Hopkinson Basınç Barı Testi (SHPBT) düzeneği önemli bir uygulama alanı bulmaktadır. Bu test ile literatürde çok fazla çalışma olmaması da bu çalışma için önemli bir motivasyon oluşturmuştur.

Araştırmanın amacı

Bu çalışmanın amacı, Eİ yöntemiyle Ti-6Al-4V malzemeden üretilen desenli kafes yapılarının malzeme mikroyapısı ve mekanik özelliklerine Sıcak İzostatik Presleme (HIP, Hot Isostatic Pressing) ısıl işleminin etkisini ortaya koymaktır. HIP ısıl işleminin mekanik özelliklere etkisi, basma ve çekme testindeki şekil değiştirme oranı, SHPBT'de ise kafes yapının kırılma kararlılığı aracılığıyla araştırılmıştır. Bu kapsamda, kafes yapıların statik ve yüksek çarpışma hızındaki dinamik yükler altındaki enerji sönümleme kabiliyetleri ile çekme yükleri altındaki mekanik davranışları incelenmiş; elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapıların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır.

Çekme dayanımı testlerinden elde edilen sonuçlar, ağırlık azaltımına olanak sağlayan karmaşık geometrili yapıların ilgili sektörlerdeki kullanım potansiyeline katkı sağlamak amacıyla analiz edilmiştir.

Bu doğrultuda elde edilen bulguların, başta havacılık ve savunma sanayii olmak üzere ilgili sektörlere akademik ve uygulamaya yönelik girdi sağlaması hedeflenmektedir.

Araştırmanın önemi

Kafes yapılar, enerji sönümleme, yüksek mukavemet/ağırlık oranı açısından son yıllarda mühendislik alanlarında önemli ölçüde ilgi görmekle birlikte geniş bir uygulama alanına sahip yapılardır. Bu yapılar, yüksek enerji sönümleme kapasitesi ve hafiflik gibi üstün özellikleri sayesinde yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahiptirler. Bu nedenle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Havacılık, uzay, savunma, otomotiv ve biyomedikal gibi birçok alanda yenilikçi ve kişiye özgü ürünler ile çözümler sunmaktadır. Birim kütle başına yüksek enerji sönümleme kabiliyetine sahip olduklarından bu yapıların enerji sönümleme özellikleri üzerine yapılan araştırmaların artmıştır [2, 3].

Bu çalışma kapsamındaki kafes yapılarının seçiminde bazı sınırlayıcı etkenler ile karşılaşılmıştır. Bunlar; Ti-6Al-4V malzemenin toz yataklı sistemlerde Eİ prosesi sırasında destek yapısı kullanılmadan üretimine uygun kafes yapılarının seçim zorunluluğu, HIP prosesinde uygulanacak basınca dayanım kriteri, çekme çubuğu içerisine uyarlanabilecek kafes ölçüleri, SHPBT cihazının test kabiliyetleri olarak sıralanabilir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Kafes Yapılarının Çeşitleri

Kafes yapılar (lattice structures), düğüm noktaları ve bu noktaları birbirine bağlayan çubuk elemanlardan oluşan, rijit ve hafif taşıyıcı sistemlerdir. Yük taşıma performansı açısından oldukça avantajlı olan bu yapılar, özellikle yüksek dayanım/ağırlık oranı gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir.

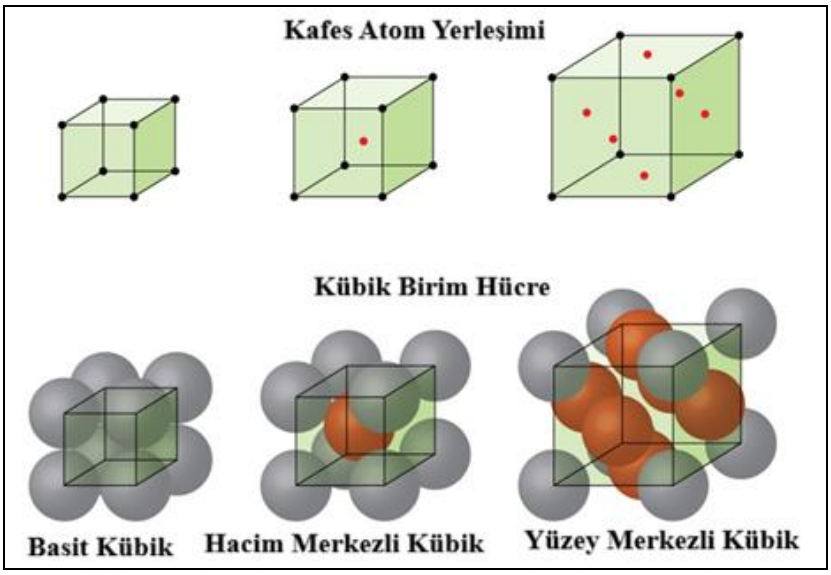
Kafes yapılar, malzeme bilimi, makine mühendisliği, biyomedikal mühendisliği ve mimarlık gibi birçok alanda farklı gereksinimleri karşılayabilmek için çeşitli biçimlerde tasarlanmakta ve sınıflandırılmaktadır. Literatürde kafes yapılar genellikle geometrik düzenleri, topolojik özellikleri, fonksiyonel kullanım alanları ve üretim yöntemlerine göre farklı türlerde ele alınmaktadır. Bu bölümde, kafes yapıların temel çeşitleri sistematik olarak sunulmaktadır.

Kafes sistemlerin mühendislik ve tasarım süreçlerinde yaygınlaşmasıyla birlikte, bu yapıların geometrik ve yapısal özelliklerine göre sınıflandırılması önemli hale gelmiştir. Kafes yapılar genel olarak düzenli, düzensiz, uyarlanabilir ve topolojik olarak optimize edilmiş olmak üzere dört ana başlık altında incelenebilir.

Düzenli (Periyodik) kafes yapılar

Düzenli kafes yapılar, belirli birim hücre geometrisinin üç boyutlu olarak uzayda tekrarlanarak oluşturduğu sistemlerdir. Bu yapılarda mekanik özellikler, hücre tipi ve tekrarlama biçimine göre değişir. Bu yapıların geometrik düzenliliği, mekanik davranışlarının önceden öngörülebilir olmasına olanak tanımaktadır. Başlıca düzenli kafes türleri şunlardır: kübik (SC), hacim merkezli kübik (BCC), yüzey merkezli kübik (FCC) ve oktahedral yapılar, tetragonal ve hekzagonal yapılar, çubuk tabanlı (strut based) yapılar yer alır [1].

Avantajları, analitik olarak modellenebilir, öngörülebilir mekanik davranışlar iken genellikle uygulama alanları uzay ekipmanları iskeleti, enerji emici sistemlerdir.



Şekil 2.1. Kübik kristal yapılar ve birim hücre konfigürasyonları [6]

Düzensiz (stokastik) kafes yapılar

Düzensiz kafes yapılar, belirli bir geometrik tekrar içermeyen; hücre büyüklüğü, yönelimi veya topolojisi bakımından rastgele bir dağılıma sahip yapılardır. Bu tür kafes yapılar genellikle biyomimetik tasarımlar çerçevesinde doğadaki modellerin, sistemlerin taklidi amacıyla kullanılır ve izotropik mekanik özellikler sergileyebilir. Bu kafes yapılarının izotropik davranış göstermesi ve biyolojik olarak uyumlulukları avantajları iken modelleme ve analizlerinin karmaşıklığı dezavantajları olarak göze çarpmaktadır. Bu yapılar enerji sönümleme, darbe dayanımı gibi uygulamalarda tercih edilmektedir. Gözenekli metaller ve biyomedikal implantlar bu gruba örnektir [4].

Yapısal kafes yapılar

Mekanik yük taşıma kapasitesi yüksek olan, rijitlik ve dayanım amacıyla kullanılan yapılardır. Genellikle havacılık, otomotiv ve inşaat sektöründe kullanılır. Bu tür kafesler yüksek dayanım/ağırlık oranı hedeflenerek tasarlanır.

Fonksiyonel kafes yapılar

Fonksiyonel amaçlı tasarlanan kafesler, ısı iletimi, enerji soğurma, akustik sönümleme veya sıvı/gaz geçişi gibi özel görevler için geliştirilir. Bu yapılar sadece mekanik değil, aynı

zamanda termal veya akustik davranış açısından da optimize edilir [5].

Elastik kafesler

Düşük deformasyon altında çalışan, yay etkisiyle yük taşıyan yapılardır. Bu kafesler genellikle mikro elektro-mekanik sistemlerde (MEMS) veya titreşim sönümleyicilerde kullanılır.

Plastik enerji sönümleyici kafesler

Büyük deformasyon altında enerjiyi sönümleyen yapılar, darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Otomotiv çarpışma testlerinde kullanılan yapılar bu gruptandır [1].

Eİ uyumlu kafesler

Son yıllarda kafes yapıların çoğu, Eİ teknolojileriyle üretilmektedir. Bu yöntem, karmaşık iç geometrilere sahip yapıların üretimini mümkün kılar. AM uyumlu kafesler, içi boş veya kademeli yoğunlukta üretilebilir [7].

Konvansiyonel üretime uygun kafesler

Kesme, kaynaklama veya kalıplama gibi geleneksel yöntemlerle üretilen, daha sade geometrilere sahip kafeslerdir. Genellikle mimarlık ve inşaat uygulamalarında tercih edilir.

Fonksiyonel kademeli kafes yapılar

Bu yapılarda kafes yoğunluğu veya hücre boyutu, yapı boyunca kademeli olarak değişir. Böylece mekanik veya termal özellikler bölgesel ihtiyaçlara göre uyarlanabilir. Biyomedikal implantlarda kemikle temas yüzeylerinde bu tip yapılar kullanılır [8].

Fraktal ve hiyerarşik kafesler

Karmaşık ve çok ölçekli geometriler içeren yapılar olup doğadan ilham alır. Fraktal

geometriler, çok seviyeli yük taşıma veya enerji sönümleme kapasitesi sağlar.

Uyarlanabilir kafes yapılar

Aktif malzemelerle entegre edilen bu yapılar, dış uyarılara (sıcaklık, manyetik alan, mekanik yük vb.) tepki vererek şekil değiştirme kabiliyetine sahiptir. Akıllı sistemlerde veya esnek robotik yapılarda kullanılmaktadır.

Uyarlanabilir kafes yapılar, çevresel etkilere veya dış yüklemelere tepki verebilecek şekilde tasarlanmış ve çoğu zaman akıllı malzemeler ya da aktüatörlerle entegre edilmiş sistemlerdir. Bu yapılar, yapının rijitliğini veya formunu aktif olarak değiştirebilme yeteneğine sahiptir. Özellikle havacılık ve mimarlıkta, yapıların çevresel koşullara göre kendini optimize edebilmesi adına önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

Son yıllarda özellikle sayısal tasarım ve optimizasyon algoritmalarının gelişmesiyle birlikte, topolojik olarak optimize edilmiş kafes yapılar ön plana çıkmaktadır. Bu yapılar, belirli yükleme koşulları altında en yüksek yapısal verimliliği sağlayacak şekilde, materyal dağılımının optimize edilmesiyle oluşturulmaktadır. Topoloji optimizasyonu sonucunda ortaya çıkan geometri, geleneksel düzenli yapılardan farklı ve daha kompleks bir kafes organizasyonu sunar. Bu tür yapılar, genellikle Eİ yöntemleriyle üretilebilmekte ve havacılık, otomotiv gibi ileri mühendislik alanlarında kullanılmaktadır.

2.2. Kafes Yapılarının Kullanım Alanları

Kafes yapılar, sundukları yüksek mekanik performans, hafiflik ve üretim esnekliği sayesinde birçok mühendislik disiplininde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle Eİ ile birlikte bu yapılar hem yapısal hem de fonksiyonel uygulamalarda tercih edilen çözümler haline gelmiştir. Bu bölümde, literatürde öne çıkan uygulama alanlarına odaklanılmaktadır.

Havacılık ve uzay endüstrisi, kafes yapıların en gelişmiş biçimde uygulandığı alanlardan biridir. Bu sektörlerde hedeflenen düşük yoğunluklu ancak yüksek dayanımlı yapı bileşenleri, topolojik olarak optimize edilmiş kafes sistemlerle karşılanmaktadır. Örneğin, iç kabuk yapılarında kullanılan BCC ve oktahedral geometriler hem aerodinamik yükleri taşıyabilmekte hem de yapısal verimliliği artırmaktadır [1, 4].

Biyomedikal uygulamalarda; kemik implantları ve ortopedik protezlerde, doğal kemik dokusuna benzer yapılar oluşturmak için biyomimetik kafesler tercih edilmektedir. Bu yapılar, kemik hücrelerinin içine nüfuz edebileceği poroz bir ortam sağlar. Ayrıca, kullanılan biyouyumlu metaller (örneğin titanyum alaşımları), kafes yapılar sayesinde hem rijitliği azaltmakta hem de osteointegrasyonu teşvik etmektedir [27, 28].

Otomotiv sektöründe çarpışma güvenliği açısından enerji sönümleyici yapılar önemlidir. Stokastik veya fraktal geometrilere sahip kafes sistemler, çarpışma anında deformasyonu kontrollü bir şekilde yayarak yolcu güvenliğini artırır. Aynı zamanda bu yapılar, geleneksel dolu yapılara göre daha hafif oldukları için yakıt verimliliğine katkıda bulunur [1].

Mimari yapılarda kafes sistemleri, büyük açıklıklı yapılarda ve kabuk sistemler için hem estetik hem de işlevsel çözümler sunar. Bu sistemler, yüksek rijitlik/denge ve düşük malzeme tüketimi sağlar. Parametrik tasarım yazılımları ile bütünleşmiş çalışan bu yapılar, mimaride özgün formların tasarımını da mümkün kılmaktadır [10].

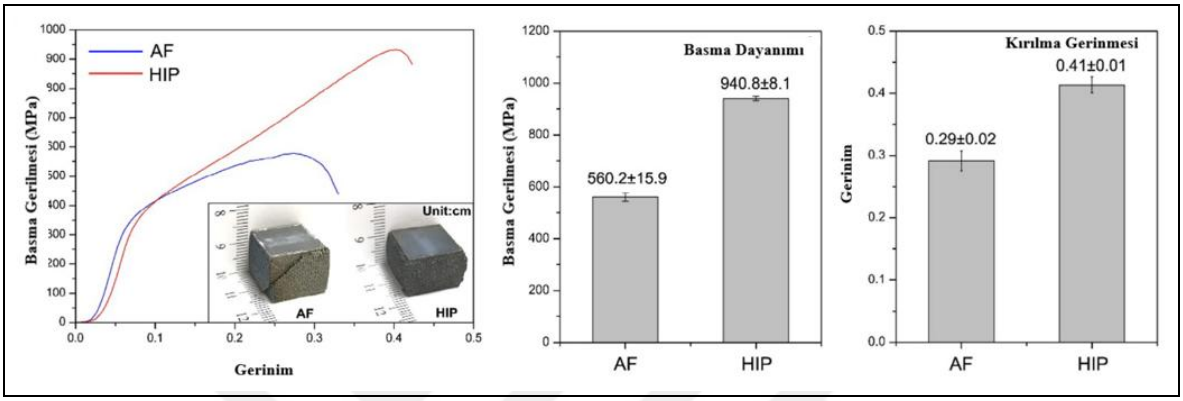
Enerji ve ısıl uygulamalarda; yüksek yüzey alanı ve gözeneklilik derecesi sayesinde, kafes yapılar ısı eşanjörleri, radyatörler ve soğutma sistemleri gibi uygulamalarda kullanılır. Termal iletkenlik kontrolü, gözenekli yapının düzenlenmesiyle sağlanır. Bu özellik, özellikle yüksek performanslı elektronik sistemlerde önemlidir [9].

Malzeme biliminde; mikro-ölçekli kafes yapılar, mekanik davranışların temel düzeyde incelenmesi için kullanılmaktadır. Örneğin, elastik modül, darbe dayanımı ve şekil hafızası gibi özelliklerin testinde, kafes hücre geometrileri mikro-malzeme davranışlarını modellemek için referans alınmaktadır [1, 4].

2.3. Kafes Yapıları Üzerine Yapılan Çalışmaların İncelenmesi

Yan ve diğerleri SLE yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V kafes yapılarının basma testi özelliklerine HIP ısıl işleminin etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada oktahedral kafes yapısı EOS M290 cihazında 15 x 15 x 15 mm^3 boyutlarda üretilmiştir. Üretilen kafes yapılarından bazıları 900 ℃ ve 120 MPa basınç altında argon gazı atmosferinde 2 saat HIP ısıl işlemine tabi tutulmuştur. HIP ısıl işlemi sonrası iç porozitelerin %5,9'dan %0,5 seviyelerine düştüğü gözlenmiştir. HIP uygulanan ve uygulanmayan numuneler Instron

8801 cihazında 3 mm/dk hız ile basma testine tabii tutulmuştur. HIP ısıl işlemi martenzit matrisin α ve β lameler matrise dönüşmesine sebep olmuştur ve bu durum malzemenin sünekliğinin artması ile sonuçlandığı görülmüştür. Basma testi sonucunda HIP uygulanan numunenin basma dayanımının %68 ve kırılma gerinmesinin %41 oranında arttığı gözlemlemişlerdir [11].



Şekil 2.2. HIP ısıl işleminin Ti-6Al-4V malzemenin basma test sonuçlarına etkisi [11]

Wang. ve diğerleri Ti-6Al-4V malzemeden farklı kafes yapılarının basma testi aracılığı ile mekanik ve kırılma davranışlarını analiz etmişlerdir. Eİ ile üretim prosesi BLT-300 cihazında gerçekleştirilmiştir. Kalıntı gerilmeleri almak için numunelerin tamamı 800 °C'de 4 saat tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Üretimi yapılan kafes yapıları FCCZ, BCCZ, FBCCZ, elmas (diamond) ve RD (eşkenar dörtgensel on iki yüzlü) olarak seçilmiştir. Her kafes yapısı için birim hücre boyutu 5 x 5 x 5 mm^3 olarak seçilmiştir. Kafes yapılarının numune boyutu ise 25 x 25 x 25 mm^3 olarak tasarlanmıştır. Numunelerin tamamı kafes yapıların etrafında kalan tozların giderilmesi için etil alkol solüsyonu içerisinde ultrasonik temizliğe tabi tutulmuştur. Her bir numune üç kez Arşimet yoğunluk testine tabi tutulmuştur. Numunelere DDL-300 cihazında ISO 13314 standardına uygun olarak 0.5 mm/dakika hız ile statik basma testi uygulanmıştır. Yapılan test sonucunda en yüksek dayanıma FBCCZ kafesin en düşük dayanıma ise elmas kafesin sahip olduğu görülmüştür [12].

Cardena ve diğerleri Ti-6Al-4V malzemeden SLE yöntemi ile üretilmiş BCC kafes yapılarının dinamik davranışına kiriş çapının ve ısıl işlemin etkisini incelemişlerdir. Üretimler Aconity Mini Eİ cihazında gerçekleştirilmiştir. Üretimlerde kullanılan lazer gücü 130 W, tarama hızı 900 mm/s, tarama boşluğu 0,08 mm ve katman kalınlığı ise 30 µm seçilmiştir. BCC kafesin kiriş çapları 0,5 mm ve 1,5 mm olarak seçilmiştir. Örnekler 18 x

18 mm^2 taban alanı üzerine 24 mm yükseklikte inşa edilmiştir. Isıl işlemin etkisini gözlemek için örneklerin yarısına vakum atmosferi altında 800 °C'de 4 saat tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Bu sayede ısıl işlemsiz inşa edildiği halde mevcut olan alfa martenzit iç yapı α+β lameler yapıya dönüştürmek amaçlanmıştır. Bu sayede 4 farklı test grubu elde edilmiştir. 0,5 mm kiriş çapa sahip ısıl işlemsiz inşa edildiği halde numune, 0,5 mm kiriş çapına sahip ısıl işlemli numune, 1,5 mm çapa sahip AB numune ve 1,5 mm çapa sahip ısıl işlemli numune olmak üzere 4 farklı test grubu oluşturulmuştur. Örneklerin yarısı 600 s^{-1} çarpışma hızında SHPBT uygulanmış ve dinamik davranışı analiz edilmiştir. Diğer yarısına ise 10^{-3} s^{-1} hızda yarı statik (quasi static) basma testi uygulanmıştır. Bu analiz gerilim giderme amacıyla uygulanan ısıl işlemin dinamik davranış üzerine önemli bir etkisi olmadığı ortaya koymuştur. Bununla birlikte ısıl işlem görmüş parçaların plastik davranışının daha düşük bir gerilmede başladığı gözlenmiştir. Geometri-1 (0,5 mm kiriş)'de kopma uzamasında bir değişiklik görülmez iken Geometri-2 (1,5 mm kiriş)'de ısıl işlem uygulanmış numunelerde bu değer daha yüksektir. Yarı statik davranış ile karşılaştırıldığında dinamik davranışta özellikle 1,5 mm kiriş çapına sahip Geometri-2'de kopma birim uzamasında ve toklukta önemli ölçüde artış gözlenmiştir [13].

Xu. ve diğerleri farklı yönlerde tasarlanmış aşamalı kafes yapılarına ve tekdüze (uniform) kafes yapılarına basma testi uygulanmıştır. Basma testi uygulanan kafes yapıları ULS (uniform kafes yapıları) ve G1 (aşamalı kafes yapısı-üretim yönüne dik) ve G2 (aşamalı kafes yapısı-üretim yönüne paralel) olarak tasarlanmıştır. Üretimler Nikon SLM 125 HL cihazında gerçekleştirilmiştir. Kafes yapıların birim hücreleri 2.5 x 2.5 x 2.5 mm^3 olarak seçilmiş olup kafes yapılarının nihai ölçüleri 20 x 20 x 20 mm^3 tasarlanmıştır. Kafes yapılarının altına 20 x 20 x 2 mm^3 ölçülerinde plaka eklenmiştir. Üretimler sırasında D_{50} boyutu 40 µm olan 15-53 µm dağılım aralığında gaz atomize toz kullanılmıştır. Üretim sırasında lazer gücü 280 W, tarama hızı 1250 mm/s, tarama boşluğu 0,12 mm, katman kalınlığı 30 µm, alt taş sıcaklığı 200 °C seçilmiştir. Üretim sonrası paralar 800 °C'de 4 saat koruyucu argon gazı atmosferinde gerilim giderme ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Isıl işlem sonrası telli elektro erozyon (wire edm) ile parçalar tabladan ayrılmıştır. Tüm numunelere kumlama işlemi uygulanmış ve artık tozların giderilmesi için etil alkol solüsyonu içerisinde ultrasonik temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Basma testi sonucunda beklendiği gibi tekdüze yapıların göreceli yoğunluk (kısaltma RD) değeri arttıkça enerji sönümleme kabiliyetinde neredeyse paralel bir artış gözlenmiştir. RD değeri 0,10'dan 0,25'e yükseldikçe enerji sönümleme değeri 0,07'den 0,39 MJ/m^3'e kadar yükselmiştir. Özellikle,

çoğu G tipi numune U tiplerine kıyasla daha yüksek enerji sönümleme kapasitesi göstermiştir; G1 (0,30–0,15) ve G1 (0,25–0,10) numuneleri için Wv sırasıyla 0,45 ve 0, 30 iken, G2 (0,30–0,15) ve G2 (0,25–0,10) numuneleri için Wv değerleri sırasıyla 0,98 ve 0,28 olmuştur. Bu durum, kademeli yapı tasarımı sayesinde G tipi yapılarda stres platosu evresinin uzaması ve yoğunlaşma evresinin başlangıcında daha yüksek gerinim değerlerinin görülmesiyle açıklanabilir. G1 tipi numunelerde, daha düşük RD'ye sahip hücresel yapılar, büyük gerinimle koruma sağlayarak U tipi numunelere göre daha yüksek enerji sönümleme kabiliyeti sunmaktadır. G2 tipi numunelerde ise, düşük RD'ye sahip katmanlar (üst katmanlar) kırıldıktan sonra kademeli olarak yoğunlaşırken, yüksek RD'ye sahip katmanlar (alt katmanlar) üst katmanlara destek sağlayarak enerji sönümleme kapasitesini artırmaktadır. Bu da kademeli yapı tasarımının yük taşıma ve darbe önleme uygulamalarında avantaj sağladığını kanıtlamaktadır [31].

Yang ve diğerleri %10, %20, %30 göreceli yoğunlukta sac yapı benzeri olan gyroid yapıyı SLE yöntemi ile üretmişlerdir. Burada amaç sac yapı benzeri gyroid yapının basma davranışına göreceli yoğunluğun etkisinin analiz edilmesidir. Üretim E-Plus-M150 SLE yazıcıda Ti-6Al-4V malzemeden yapılmıştır. Üretim sırasında lazer gücü 180 W, tarama hızı 1000 mm/s, tarama boşluğu 0,1 mm, lazer çapı 70 μm ve katman kalınlığı 20 μm seçilmiştir. Örnekler 24 mm çapta 21 mm yükseklikte üretilmiştir. Birim hücredeki göreceli yoğunluk %10, %20 ve %30 olarak tasarlanıp üretilmiştir. Üretilen numunelerin dinamik davranışı analiz edilmek için SHPBT'e tabii tutulmuştur. %30 göreceli yoğunluğa sahip numune sırası ile 149 s^{-1}, 260 s^{-1}, 360 s^{-1} frekansta teste tabii tutulmuş olup sonuçlar 228 MPa ve 237 MPa olarak alınmıştır. 149 s^{-1} frekanstaki ölçüm ihmal edilmiştir. %20 göreceli yoğunluğa sahip numune sırası ile 310 s^{-1}, 252 s^{-1}, 167 s^{-1} frekansta teste tabii tutulmuş olup sonuçlar 137 MPa ve 144 MPa olarak alınmıştır. 167 s^{-1} frekanstaki ölçüm ihmal edilmiştir. %10 göreceli yoğunluğa sahip numune sırası ile 148 s^{-1}, 193 s^{-1}, 270 s^{-1} frekansta teste tabii tutulmuş olup sonuçlar 89 MPa ve 91 MPa olarak alınmıştır. 148 s^{-1} frekanstaki ölçüm ihmal edilmiştir. Test parametreleri ve sonuçları kısaca özetlemek gerekir ise: Sonuçlar, bağıl yoğunluk arttıkça numunenin kırılma anındaki dayanımının ve şekil değiştirme hızının da arttığını göstermektedir. Ayrıca, %30 ve %20 bağıl yoğunluğa sahip numunelerin, %10 bağıl yoğunluğa sahip numuneye kıyasla şekil değiştirme hızına daha duyarlı olduğu görülmektedir. Sonuçlar ayrıca, %20 ve %30 bağıl yoğunluğa sahip numunelerin bağıl Young modülünün önemli ölçüde değiştiğini, ancak %10 bağıl yoğunluğa sahip numunenin bağıl Young modülünün büyük ölçüde sabit kaldığını ortaya koymuştur [14].

Ming-Wei Wu ve diğerleri Eİ ile üretilmiş Ti-6Al-4V kafes yapısına HIP ısıl işleminin yorulma performansına etkisini incelemişlerdir. Üretimler sırasında plazma atomizasyon ile üretilmiş D_{50} 34 µm boyutunda Ti-6Al-4V tozu kullanılmıştır. Üretimler Nikon SLM 250 HL cihazında argon koruyucu gaz atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen kafes numunesinin çapı 13 mm yüksekliği 15 mm olacak şekilde seçilmiştir. Kafes numunesi yorulma testinin uygulanabilmesi için altta ve üstte 5 mm kalınlıkta bir plaka eklenerek üretilmiştir. Üretim sırasında kullanılan lazer gücü 225 W, tarama hızı 658 mm/s, tarama boşluğu 120 µm ve katman kalınlığı 50 µm olarak seçilmiştir. Her katman bir önceki katmana göre 75° döndürülerek tarama stratejisi belirlenmiştir. Üretim sonrasında porozitenin mekanik performansa etkisi gözlenebilmesi için numunelerin bazıları 1000 ℃ ve 150 MPa basınç altında argon gazı atmosferinde HIP ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Üretilen numuneler porozite dağılımını karakterize edebilmek için 130 kV ve 100 µA şartlarında bilgisayarlı tomografi uygulanmıştır. Tomografi çözünürlüğü (voxel size) 21 µm olarak çekim gerçekleştirilmiştir. HIP ısıl işlemi öncesi ve sonrasında uygulanan tomografi sonucunda parçada kusurların önemli ölçüde azaldığını gözlemişlerdir. Numunelere gerekli numune hazırlama işlemleri uygulanıp mikroyapı incelemeleri yapılmış, sertlik ve çekme testleri uygulanmıştır. HIP ısıl işleminden sonra porozitelerin büyük ölçüde yapıdan uzaklaştığını gözlemişlerdir. HIP ısıl işlemini uygulamanın amacı mikroyapıdaki α′ martenzit yapının tamamen α + β lameler yapıya dönüştürmektir. α′ martenzit mikroyapı yüksek bir sertlik ve dayanım verirken düşük bir tokluk sergilemektedir. Sertlik sonuçları HIP öncesi 403 HV iken HIP sonrası 324 HV'e düşmüştür. Bu durum da mikroyapıdaki dönüşümün bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Akma dayanımı HIP uygulanmayan numunede 143 MPa iken HIP uygulanmış olan numunede 100 MPa seviyelerinde ölçülmüştür. SLE ve HIP numunelerinin yorulma dayanım oranlarını gösterebilmek amacıyla yorulma dayanımı/akma dayanımı oranlarının yorulma çevrim sayısına etkisini karşılaştırmışlardır. 10^6 çevrim sayısındaki dayanıklılık sınırları SLE numunesin 0,30 HIP numunesi için 0,55 olarak belirlenmiştir. 10^6 çevrim sayısındaki yorulma dayanımları sırasıyla 43 MPa ve 55 MPa' dır. Bu verilerden HIP ısıl işleminin sağladığı mikroyapı dönüşümü sayesinde sertlik %20, akma dayanımı %30 oranında azalır iken yorulma dayanımını önemli ölçüde arttırdığı sonucu çıkarılabilmektedir [29].

Dimitri ve diğerleri Ti-6Al-4V kafes yapıları üzerine basma ve çekme testleri uygulayarak mekanik özelliklerini ortaya koymaya çalışmışlardır. Bu doğrultuda kafes tasarımları, açık mimarili bir SLE sistemi (DART; University of Dayton Research Institute, Dayton, OH,

ABD) kullanılarak, IPG Photonics sürekli dalga 500 W lazer ile üretilmiştir. Üretim sırasında lazer gücü 150 W, tarama hızı 950 mm/s olarak ayarlanmış; 6 mm şerit genişliğine ve 0,08 mm tarama boşluğuna sahip çift yönlü şerit tarama (bidirectional strip hatch) stratejisi uygulanmıştır. Katman kalınlığı 40 μm'dir. Üretim süresince ortamda ölçülen oksijen oranı <%0,1 olarak tutulmuştur. Her bir üretim tamamlandıktan sonra, parçalar üretim tablası üzerinde, vakum ortamında ($1{,}3 \times 10^{-3}$ – $1{,}3 \times 10^{-5}$ mbar) 800 °C (±10 °C) sıcaklıkta 120 dakika (±30 dakika) süreyle ısıl işleme tabi tutulmuş ve ardından vakum altında soğutulmuştur. Kafes yapılar, üretim tablasından elektron deşarjlı işleme (EDM) yöntemiyle ayrılmıştır. Basma deney numuneleri 10 × 10 × 10 mm³ boyutlarında küpler şeklinde tasarlanmıştır. Çekme numuneleri ise daha önce Porter ve ark. tarafından Nylon 12 malzemesi üzerinde test edilmiş olan deneysel pim bağlantılı (pin-loaded) bir tasarımı içermektedir [43]. Çekme numunelerinin genel boyutları 20 × 20 × 60 mm^3 olup, ölçü boyu bölgesi 20 × 20 × 20 mm³ olarak tasarlanmıştır. Tüm çekme numuneleri dikey yönde (z-ekseni boyunca) üretilmiştir. Basma testleri sonucunda hasarlanmanın 45° kayma ekseninde oluştuğu, BCC kafes yapısının kübik kafes yapılarına göre basma yüklerine maruz kalan uygulamalarda daha uygun olduğunu gözlemişlerdir. Çekme deneylerinde, kopmanın genellikle çenelere yakın bölgelerden gerçekleştiği bu nedenle metalik kafes yapıların üretiminde alternatif geometriler ve parametreler üzerinde çalışılması gerektiği vurgulanmıştır. Bununla birlikte elde edilen değerlerin insan süngerimsi kemiği aralığı içerisinde kaldığı gözlemişlerdir [39].

X.Z. Zhang ve ark. yapmış oldukları çalışmada HIP ısıl işleminin ve β-tavlama ısıl işleminin tetrahedral ve kübik kafes yapıları üzerindeki etkisini kıyaslamışlardır. Tetrahedral kafes yapısının tüm test koşullarında kübik kafes yapısından daha düşük basma dayanımı ve süneklik gösterdiği gözlemişlerdir. HIP ısıl işleminin kübik kafes yapısı için basma dayanımını yaklaşık %9 oranında, tetrahedral kafes yapısı için ise %7 oranında arttırdığı gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda kübik kafes yapısında şekil değiştirme kabiliyetinin yaklaşık %50, tetrahedral kafes yapısında şekil değiştirme kabiliyetinin ise yaklaşık %180 oranında arttığını gözlemlemişlerdir. Ancak 1200 °C'de 2 saat boyunca yapılan β-tavlama ısıl işleminin basma testi sonuçlarına göre her iki kafes yapısı için HIP ısıl işlemi uygulanmış numunelere kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği, β-tavlama işleminin kafes yapısında basma davranışında daha etkili olduğu kanısına varmışlardır [30].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Ti-6Al-4V Alaşımı ve Özellikleri

Titanyum ve alaşımlarının metalürjisi son 50 yıldır yoğun şekilde araştırılmaktadır. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı, düşük yoğunluk, yüksek erime sıcaklığı, iyi korozyon direnci ve biyouyumluluk gibi özellikleri sayesinde, bu malzemeler çeşitli mühendislik ve ileri teknoloji uygulamalarında önemli rol oynamaktadır [15].

Titanyum, oda sıcaklığında Hekzagonal Yoğun Paketli (HCP) kristal yapıya sahip olup bu yapı alfa fazı olarak adlandırılır. 883 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise Merkezlenmiş Kübik (BCC) kristal yapıya geçerek beta fazı oluşur [16]. Alaşımlandırıcı elementler ile bu faz geçiş sıcaklığı ayarlanabilir. Örneğin, vanadyum beta fazını stabilize ederken, alüminyum alfa fazını destekler. Ti-6Al-4V alaşımı, %6 Al ve %4 V içerir ve 995 °C civarında tamamen beta fazına geçer [17].

Titanyumun olağanüstü özellikleri; kriyojenik cihazlar, denizcilik ekipmanları, kimyasal reaktörler ve özellikle uzay-havacılık sanayi gibi kritik alanlarda kullanımını yaygınlaştırmıştır [16]. Bununla birlikte, yüksek üretim maliyetleri ve zor işlenebilirliği, yaygın kullanımı sınırlayan başlıca etmenlerdir [18].

Ti-6Al-4V, günümüzde en yaygın kullanılan titanyum alaşımı olup, dünya çapında üretilen titanyum bileşenlerinin yaklaşık yarısını ve havacılık uygulamalarının %80-90'ını oluşturmaktadır [16, 18]. Bu alaşım, ilk olarak 1950'li yıllarda uçak gövdesi uygulamaları için geliştirilmiş ve günümüzde jet motoru parçaları, iniş takımları, motor kapakları, kanat ve kuyruk parçalarında başarıyla kullanılmaktadır [17, 18].

Havacılık sektörü dışında denizcilik, otomotiv, enerji ve biyomedikal alanlarda da geniş kullanım alanı bulmuştur. Yüksek korozyon direnci ve biyouyumluluğu sayesinde, özellikle implant ve köprü uygulamalarında tercih edilmektedir [16, 17].

Ti-6Al-4V'nin tercih edilme sebepleri arasında; yüksek sıcaklık dayanımı, iyi yorulma performansı ve korozyona karşı dayanıklılığı yer almaktadır. Ancak düşük ısı iletkenliği, kesici takımlarla kimyasal reaksiyona girme eğilimi ve düşük elastikiyet modülü gibi

dezavantajlar, bu alaşımın işlenmesini zorlaştırmaktadır [16, 18].

Ti-6Al-4V üretiminde dövme, döküm ve haddeleme gibi geleneksel yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerde işlenebilirliğin zorluğu, yüksek takım aşınması ve büyük miktarda malzeme kaybı önemli üretim zorlukları oluşturur [18, 19].

Özellikle büyük havacılık parçalarının üretiminde, net şekle yakın üretim yöntemlerinin uygulanması sınırlıdır. Büyük ham malzemelerden yüksek miktarda talaş kaldırılarak yapılan üretim, %50'nin üzerinde malzeme israfına neden olabilir. Ayrıca, büyük dökümlerde oluşan sıcaklık farklılığı, artık gerilme kaynaklı deformasyonlara yol açabilir [19, 20].

Ti-6Al-4V'nin karmaşık geometrilere sahip parçalar halinde verimli şekilde üretilebilmesi, Eİ teknolojilerinin önemini artırmıştır. Eİ, malzemenin katman katman eklenmesiyle doğrudan CAD modellerinden parça üretmeye olanak tanır ve bu sayede malzeme israfı minimuma iner [21, 22].

Eİ'ın "buy-to-fly" oranı, geleneksel yöntemlerdeki 12-25:1 seviyesinden 3-12:1'e düşerek üretimde önemli maliyet avantajı sağlamaktadır. Ayrıca, kullanılmayan toz malzemeler geri kazanılabilir, bu da süreci daha sürdürülebilir kılar [20, 21].

Toz yataklı füzyon (Powder-bed fusion) (SLE, EBM) ve doğrudan enerji yığma (directed energy deposition) (DED) gibi toz tabanlı Eİ teknikleri, Ti-6Al-4V üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [22, 23]. Bu yöntemlerde lazer veya elektron ışını ile oluşturulan lokalize eriyik havuzları, yüksek sıcaklık farklılığı ve hızlı katılaşma oranları ile kendine özgü mikro yapılar oluşturur. Bu mikro yapılar yüksek kalıntı gerilmeler, porozite ve diğer imalat kusurlarına neden olarak mekanik özellikleri etkileyebilir [24-26].

Eİ ile üretilen Ti-6Al-4V bileşenlerinin servis performansı, özellikle çekme, yorulma ve basma dayanımı açısından detaylı şekilde değerlendirilmelidir. Yük taşıma uygulamalarında bu mekanik özellikler, üretim teknolojisinin uygunluğunu belirler. Literatürde bu özellikler üzerine birçok çalışma bulunsa da DED, SLE ve EBM yöntemleriyle üretilmiş örneklerin doğrudan karşılaştırıldığı kapsamlı basma çalışmaları sınırlıdır.

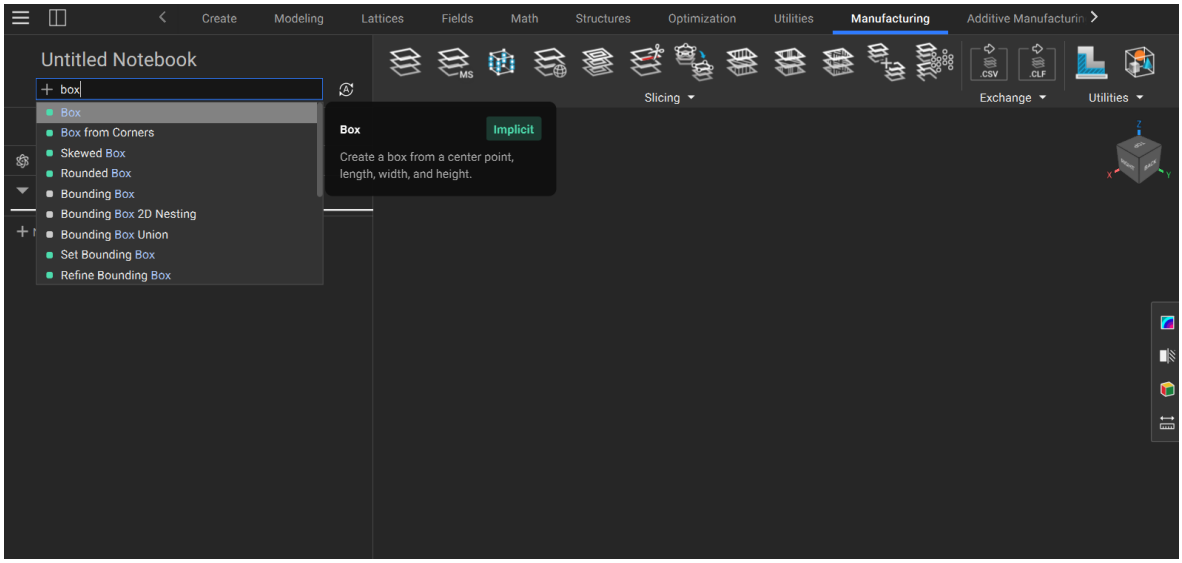
Eİ ile üretilen parçalarda, oluşan mikro yapı ve kusurlar performans üzerinde belirleyicidir. Bu nedenle, üretim–mikroyapı–özellik ilişkisi kurularak tasarım optimizasyonuna katkı sağlanmalıdır. Her ne kadar HIP ve ısıl işlemler ile bu kusurlar kısmen giderilebilse de karmaşık geometrilere sahip yapılar için bu yöntemler şekil doğruluğunu bozabilir ve maliyeti artırabilir [23, 24]. Bu nedenle araştırmalar, işlem görmemiş durumdaki Eİ ürünleri üzerine odaklanmaktadır.

Genel olarak değerlendirilecek olur ise titanyum ve özellikle Ti-6Al-4V alaşımı, yüksek performans gerektiren mühendislik uygulamaları için önemli bir malzemedir. Geleneksel üretim yöntemlerinin sınırlamaları, Eİ teknolojilerinin yaygınlaşmasını teşvik etmiştir. Ancak Eİ ürünlerinde mikro yapı kontrolü, kusur yönetimi ve mekanik dayanımın sağlanması hâlâ önemli araştırma alanlarıdır.

Bu bilgiler, Eİ süreçlerinin geliştirilmesi ve Ti-6Al-4V'nin yük taşıyan uygulamalarda daha etkin kullanılabilmesi için yol gösterici niteliktedir.

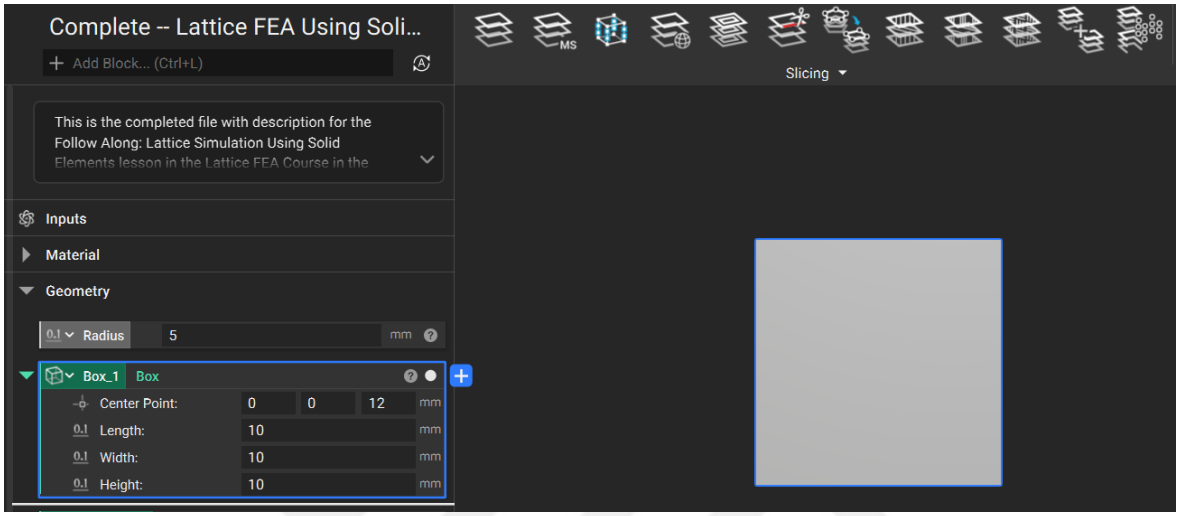
3.2. n-Topology ve Materialise Magics Programlarında Numune Tasarımı

Bu başlık altında nTopology (versiyon 5.37.3) programında kafes yapılarının nasıl tasarlandığı açıklanmıştır. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi nTopology içerisindeki arama kısmına Box yazılarak komut seçilir.



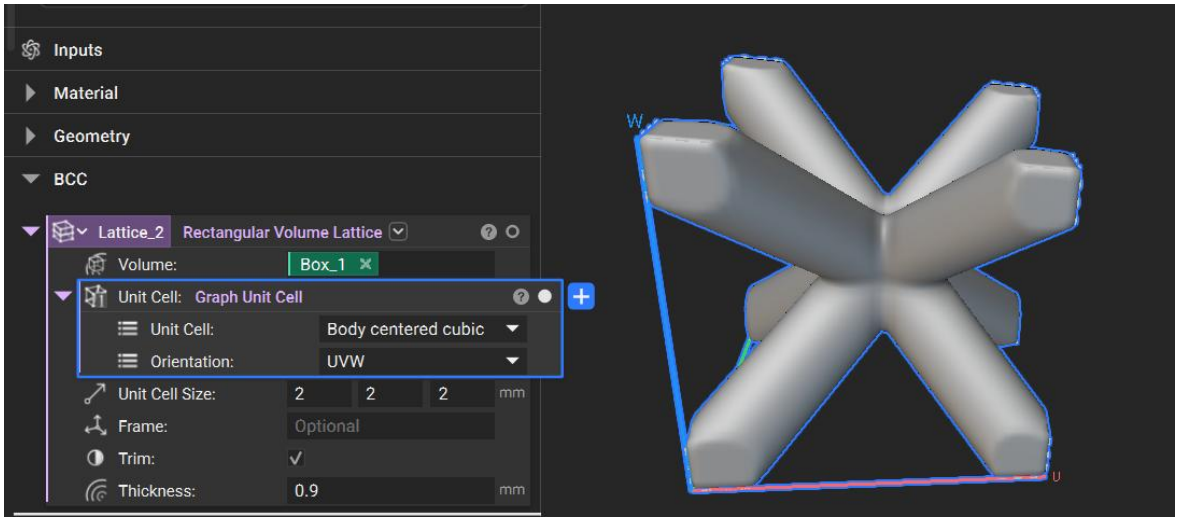
Şekil 3.1. nTopology kutu (box) oluşturma

Tez kapsamında kullanılmak üzere tasarlanacak kafes yapıları dış ölçüleri SHPBT düzeneğinin ölçü sınırlılıkları ve birim hücrenin düzgün tekrarı göz önüne alınarak 10 x 10 x 10 mm^3 seçilmiştir. Bu nedenle box komutu içerisine en, boy ve yükseklik değerleri Şekil 3.2'de görüleceği üzere 10 x 10 x 10 mm^3 olarak girişmiştir.



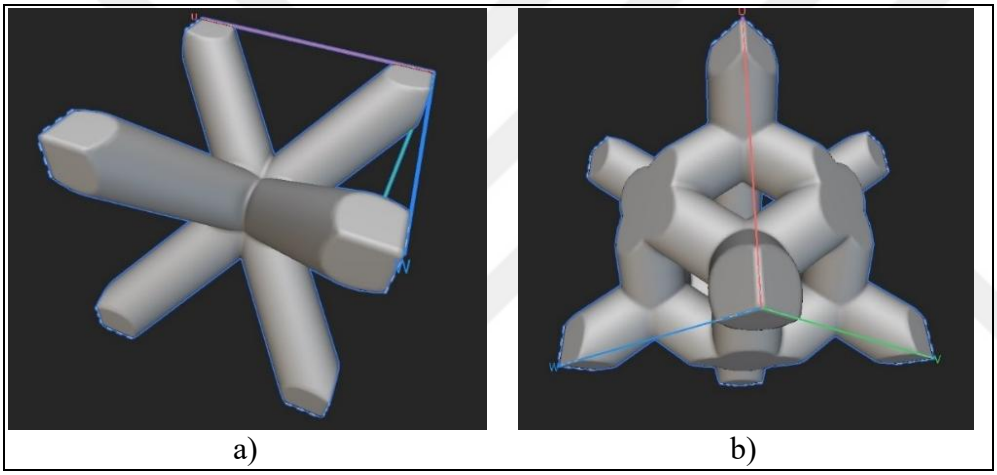
Şekil 3.2. nTopology kutu oluşturmak için değer girme işlemi

Kiriş elemanlı kafes yapı tasarımları üzerine çalışma gerçekleştirildiğinden birim hücreler N-Topology programında Graph Unit Cell ve Rectangular Volume Lattice araçları kullanılarak oluşturulmuştur. Graph Unit Cell komutu içerisine istenilen birim hücre yapısı örnek olarak Şekil 3.3'te görüleceği gibi seçilmiştir.



Şekil 3.3. nTopology birim hücre oluşturma

Bu çalışma kapsamında ısıl iletimi nispeten düşük olan Ti-6Al-4V malzeme ile çalışılmıştır. Bu durum üretimin doğası gereği oluşan artık gerilmelerin alt taşa iletilebilmesi için önemli bir zorluk oluşturmaktadır. Bu nedenle kafes yapılarının geometrilerinin seçimi yapılırken minimum artık gerilmeye ve en uygun üretilebilirliğe sahip geometrilerin seçimi ilk kriter olmuştur. HIP ısıl işlemi sırasında uygulanan basınç altında geometri stabilizasyonunun sağlanması kafes yapısı seçiminde dikkate alınan ikinci kriterdir. Çalışma sonuçlarının literatür ile kıyaslanabilirliği açısından sık çalışılan kafes yapıları seçimi ise dikkate alınan üçüncü kriterdir. Tüm bu etkenler dikkate alındığında bu çalışma kapsamında Flourite ve BCC kafes yapıları üzerinde çalışılmasına karar kılınmıştır. Bu doğrultuda oluşturulan birim hücreler Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



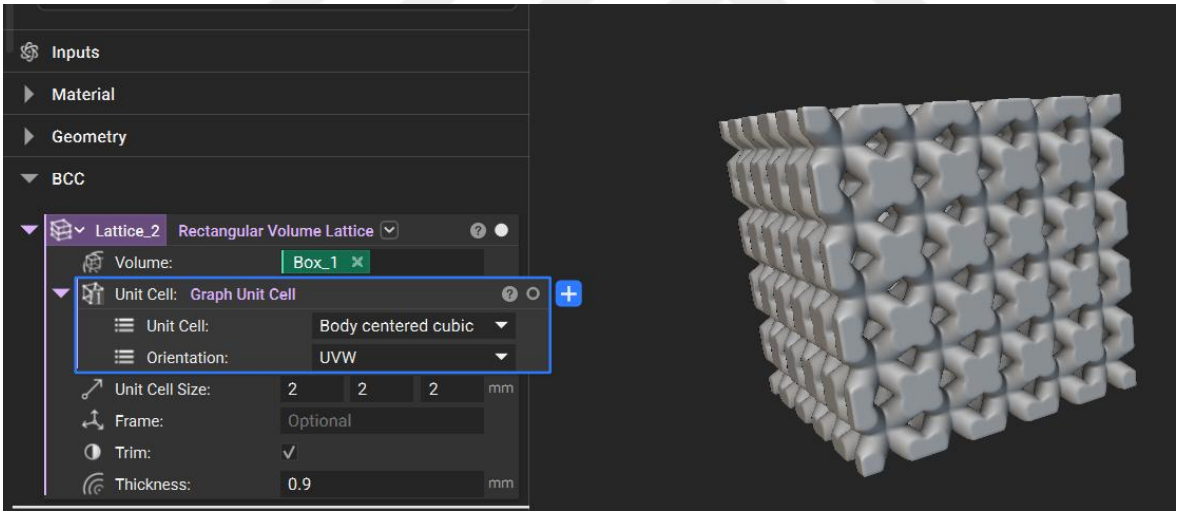
Şekil 3.4. a) BCC birim hücre b) Flourite birim hücre (2 x 2 x 2 mm^3)

Birim hücre ölçüleri seçiminde ise yapılacak analizler, test düzeneklerinin sınırlılıkları, testler sırasında öngörülen zorluklar dikkate alınmıştır. Bunlardan ilki uygulanacak SHPBT cihazının numune ölçü sınırlılığıdır. İkinci olarak standartlara uygun 6 mm kesit ve 4 mm et kalınlığındaki çekme testi numunelerinin içerisine yerleştirilecek kafes yapıların tekrar sayısı dikkate alınmıştır. Üçüncü olarak ise HIP ısıl işlemi sırasında uygulanacak yüksek basınç altında şekil değişimine müsaade etmeyecek rijit bir yapı elde edilmek istenmiştir.

Rectangular Volume Lattice, nTopology içinde bir hacim oluşturmak ve bu hacim içinde düzenli bir kafes yapısı tasarlamak için kullanılan bir araçtır. Bu özellik, dikdörtgen prizma şeklindeki yapıların içini birim hücre yapıları ile doldurmak için kullanılır. Kafes hücre tipinin seçimi, bu hücrelerin boyutları, kalınlıkları ve dağılımları bu komut içerisinde ayarlanmaktadır. Şekil 3.3'te görüleceği üzere Rectangular Volume Lattice içerisindeki

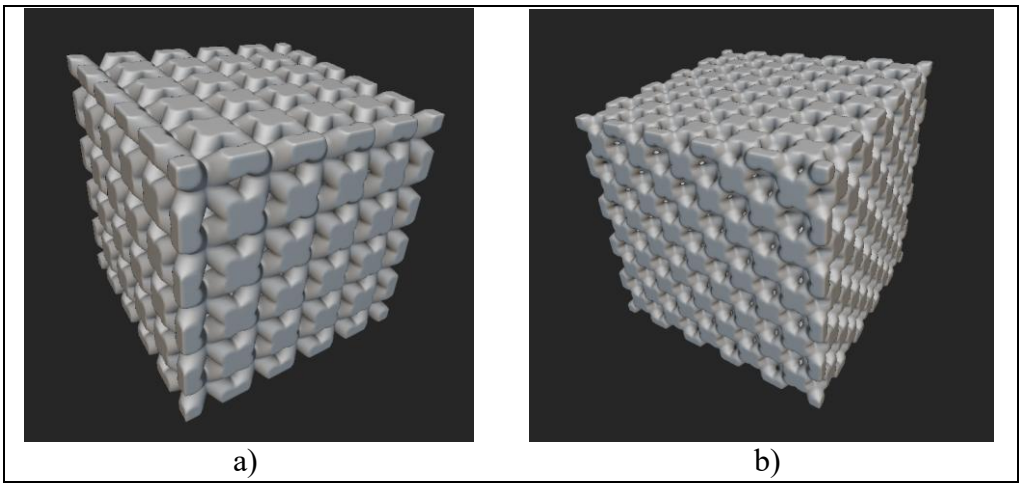
Volume içerisine daha önce oluşturduğumuz Box eklenir. Unit cell kısmına da daha önce oluşturduğumuz birim hücre yapısı eklenir. Birim hücre seçiminden sonra birim hücrenin X, Y ve Z boyutlarında ne kadar hacim kaplayacağını tanımlamak için Unit Cell Size içerisindeki X, Y ve Z değerleri girilir. Bu boyut, birim hücrelerin X, Y ve Z eksenlerinde ne kadar büyük olacağını tanımlar ve kafesin genel yoğunluğu ile yapısal özelliklerini etkiler. Tasarımcılar, belirli bir geometrik hacimde istedikleri kafes yapı yoğunluğunu ve hücre boyutlarını ayarlayarak optimize edebilirler. Bu, kafes yapının mekanik performansını ve malzeme kullanımını doğrudan etkileyen önemli bir parametredir.

Tüm bu seçim kriterleri ve tasarım detayları dikkate alınıp değerlendirildiğinde; nTopology kütüphanesindeki kafes yapıları kullanılarak homojen BCC ve Flourite kafes yapıları yukarıda anlatıldığı şekilde oluşturulmuştur. Şekil 3.4'te gösterilen 2 x 2 x 2 mm^3 ölçülerindeki BCC ve Flourite birim hücreler, dış ölçüleri Şekil 3.5'te görüleceği gibi 10 x 10 x 10 mm^3 olarak seçilen kafes yapılarına dönüştürülmüştür.



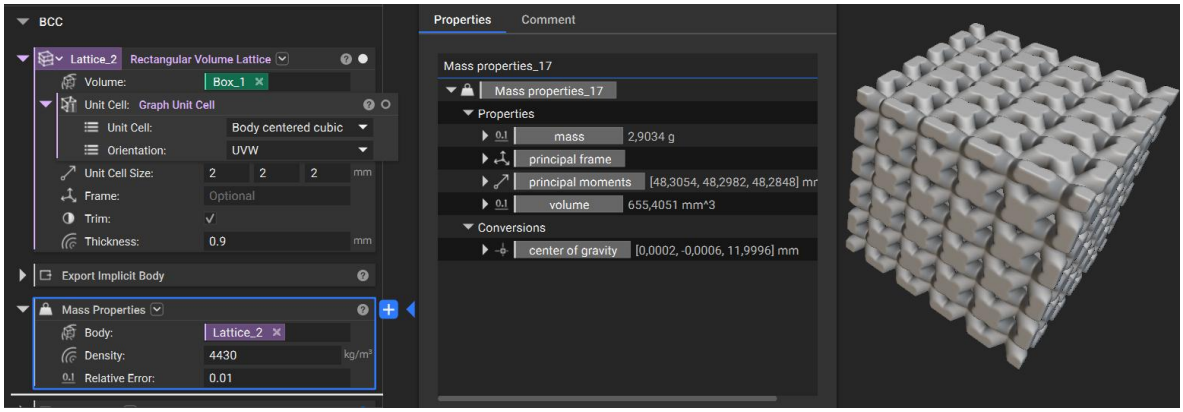
Şekil 3.5. nTopology kafes yapı oluşturma

Şekil 3.6'da bu doğrultuda oluşturulan her bir kafes yapısı x, y, z eksenlerinde beşer kez tekrar eden toplam 125 birim hücreden oluşturulmuştur.

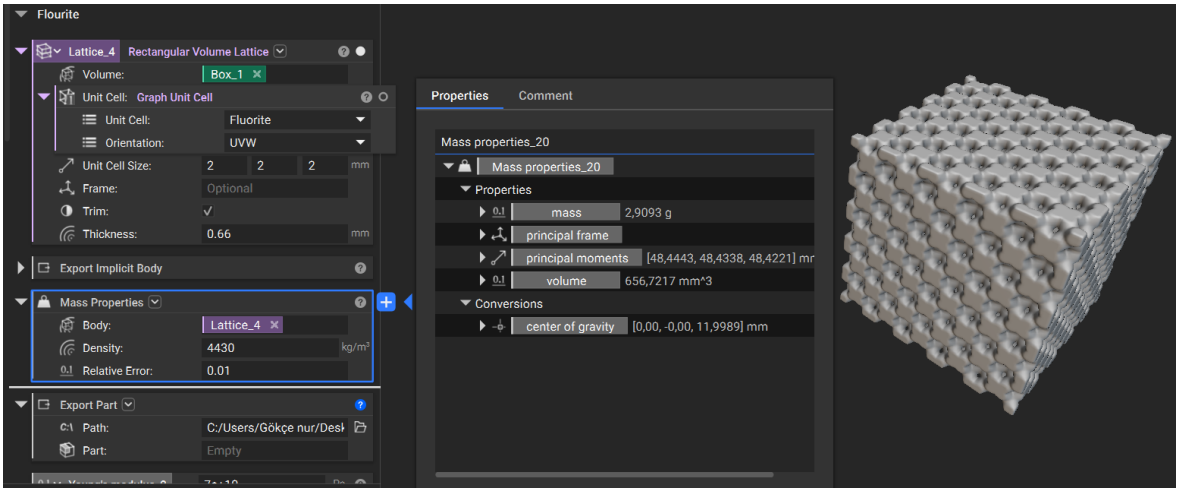


Şekil 3.6. a) BCC kafes yapısı b) Flourite kafes yapısı

BCC ve Flourite kafes yapılara ait test sonuçlarının değerlendirmesi normalize edilmesine gerek kalmadan yapılabilmesi için hacimleri aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle kafes yapıların bağıl yoğunları eşit olması planlanmıştır. Bu doğrultuda BCC ve Flourite kafes yapılarında kiriş (strut) çapları sırasıyla 0,90 ve 0,66 mm olarak seçilmiştir. Tasarım sonucu elde edilen hacimler sırasıyla yaklaşık 655 mm^3 ve 656 mm^3, ağırlıklar ise yaklaşık 2,90 ve 2,91 g olarak Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de görülmektedir. Üretim sonrası yapılan BCC ve Flourite ağırlık karşılaştırması ile konu 4.1. numaralı başlık altında bahsedilmiştir.

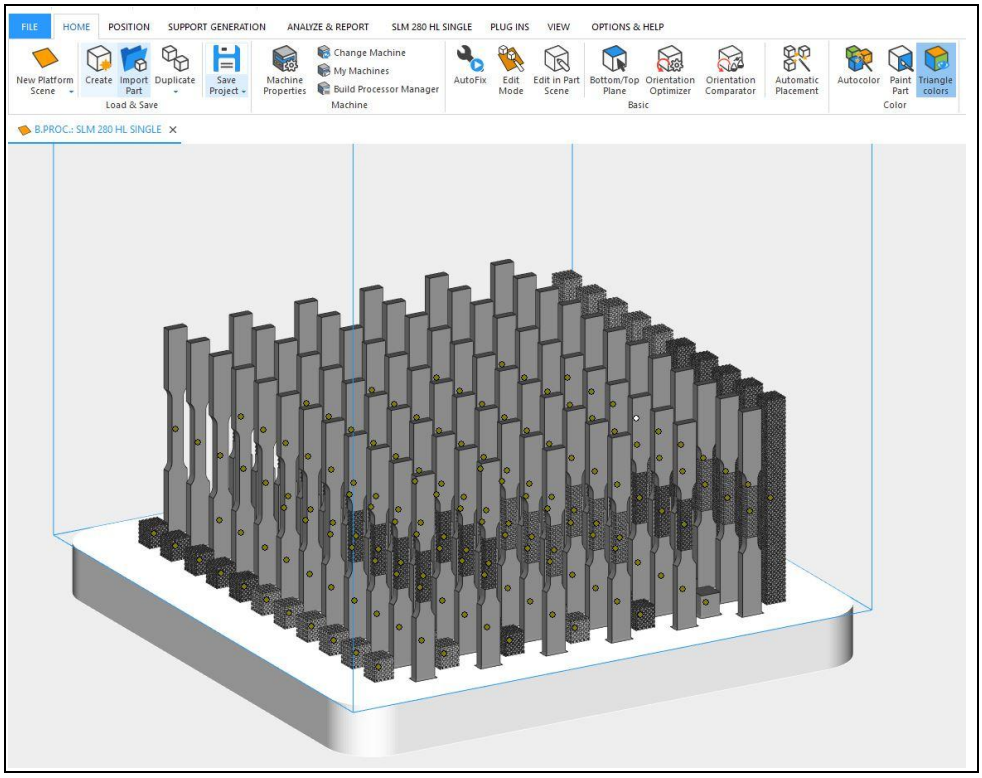


Şekil 3.7. Tasarımda BCC kafes hacmi ve ağırlığı



Şekil 3.8. Tasarımda Flourite kafes hacmi ve ağırlığı

Çekme çubuğu olarak üretilecek kafes yapıları 2 x 2 x 2 mm^3'lük birim hücreden oluşacak şekilde yukarıda tarif edildiği üzere 4 x 6 x 30 mm^3 ölçülerinde tasarlanmıştır. 4 x 6 x 30 mm^3 ölçülerinde oluşturulan BCC ve Flourite kafes yapıları Materialise Magics programında çekme çubuğu ölçü boyu (gauge) bölgesine yerleştirilmiştir. Tasarlanan tüm numunelere Materialise Magics programında 0,9 mm telli elektro erozyon kesim payı eklenerek Şekil 3.9'daki gibi tabla yerleşimi yapılmıştır.



Şekil 3.9. Materialise Magics üretim tablası yerleşimi

3.3. SLE Yönteminde Kullanılan Toz Özellikleri

SLE metodu ile yapılan metal Eİ üretimlerinde seçilen tozun özellikleri nihai ürüne ait mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle yöntemde kullanılacak tozların küreselliği, tozun uydulaşma oranı, tane boyutu dağılımı, akış özellikleri ve nem miktarı son derece önemlidir.

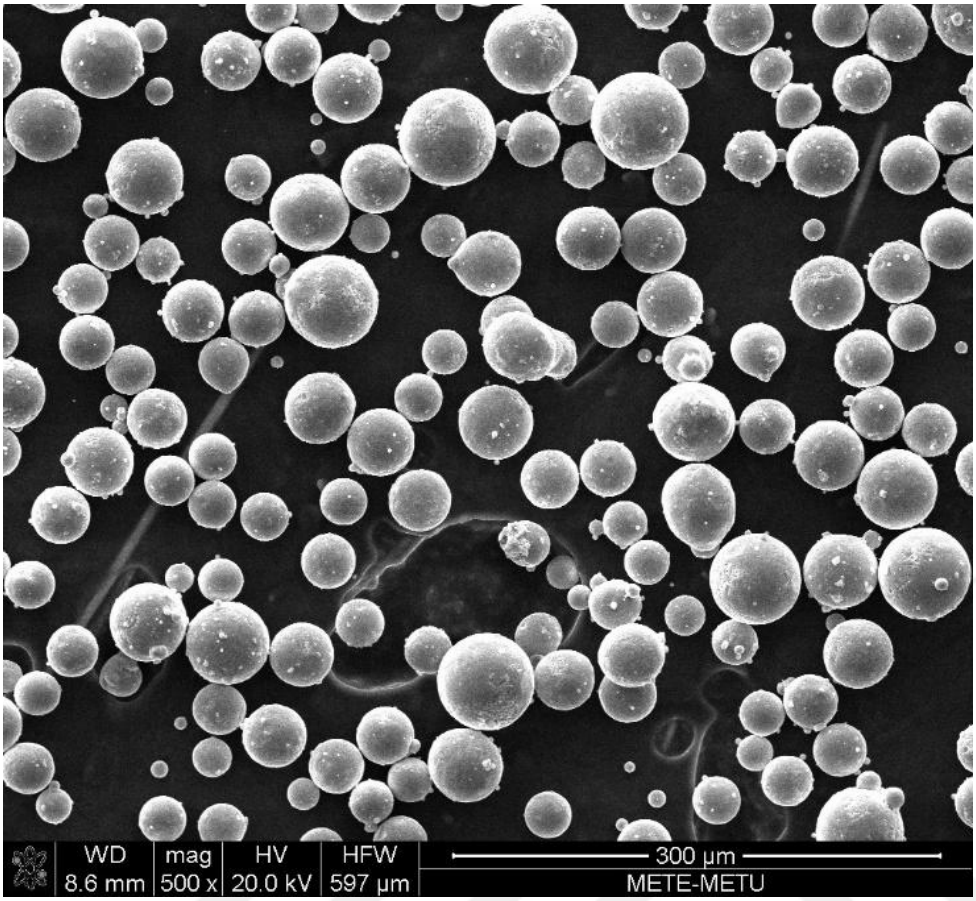
Bu özelliklere sahip toz üretimi için en uygun yöntem plazma atomizasyon ve gaz atomizasyon yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Plazma atomizasyon yöntemi ile elde edilen metal tozlarının gaz atomizasyon yöntemi ile elde edilen tozlara göre toz yataklı eklemeli imalat sistemlerine yüksek küresellik ve minimum uydulaşma açısından daha uygun olduğu söylenebilir. Ancak plazma atomizasyon yöntemi ile elde edilen tozların üretim maliyeti daha fazla olduğundan gaz atomizasyon yöntemi ile elde edilen tozlar da sektörde büyük oranda kullanım alanı bulabilmektedir. Bir diğer toz üretim metodu olan su atomizasyon yöntemi ise küresellik, uydulaşma miktarı, tane boyutu dağılımı ve akış özelliklerinin nispeten kötü olması nedeniyle toz yataklı metal eklemeli imalat sektöründe kendine yer bulmakta zorlanmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan metal tozu özellikleri aşağıdaki Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Toz özellikleri

Malzeme	Ti-6Al-4V
Üretim Yöntemi	Plazma Atomizasyon
Tane Boyut Dağılımı	20-63 μm
Akış Hızı	≤40 s/50g
Görünür Yoğunluk	≥2,3 g/cm^3
Sıkıştırılmış Yoğunluk	≥2,7 g/cm^3

Şekil 3.10'da kullanılan toza ait SEM görüntüsü paylaşılmıştır.



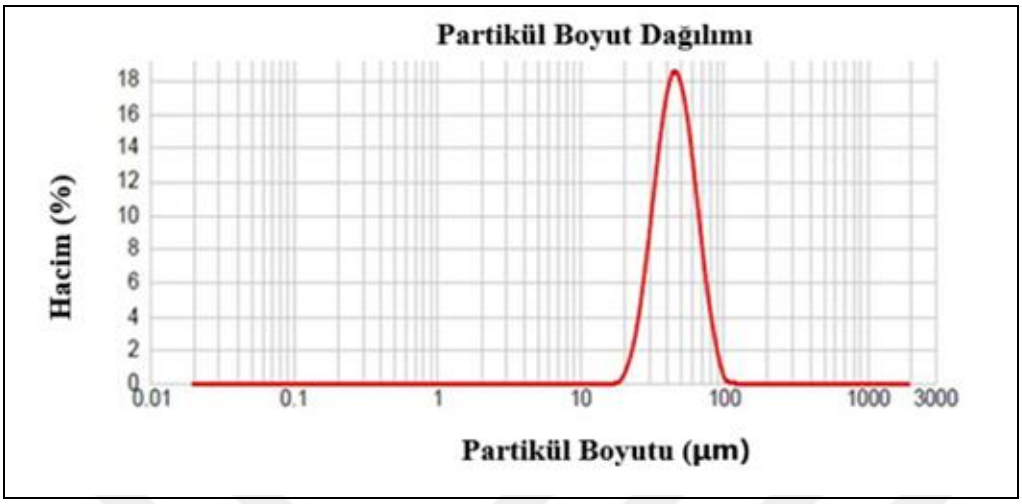
Şekil 3.10. Ti-6Al-4V toz SEM incelemesi

Çizelge 3.2'de tozun kimyasal kompozisyonu paylaşılmıştır.

Çizelge 3.2. Ti-6Al-4V toz kimyasal kompozisyonu

Element	Yüzde ağırlık (ağ. %)
Titanyum	Kalan
Alüminyum	5,5-6,5
Vanadyum	3,5-4,5
Demir	≤0,25
Oksijen	≤0,13
Azot	≤0,03
Hidrojen	≤0,012
Karbon	≤0,08
Yitrium	≤0,005
Diğer, toplam	≤0,40

Şekil 3.11'de tane boyut analizi sonucu elde edilen grafik paylaşılmıştır.



Şekil 3.11. Ti-6Al-4V toz tane boyut analizi grafiği

Yapılan analiz sonucu elde edilen tane boyutu dağılımı değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Tane boyutu analiz sonuçları

Boyut Dağılımı	Partikül Boyutu
d_{10}	30,1230 µm
d_{50}	45,4220 µm
d_{90}	68,0680 µm

3.4. SLE Yöntemi ile Numunelerin Üretimi

Eİ üretimleri Şekil 3.12'de görülen Nikon SLM 280 HL cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihaz 400 Watt güce sahip tek lazer ile donatılmıştır. Üretim tablası ölçüleri 280 x 280 mm^2 olup alt taş ile birlikte toplam 360 mm yüksekliğe kadar parça üretimine imkân tanıyan bir hacime sahiptir.

nTopology yardımı ile tasarlanan numunelerin Materialise Magics programında üretim tablası yerleşimi yapılarak ".stl" uzantılı üretim dosyası hazırlanmıştır. Bir sonraki aşama üretim dosyasının cihaza yüklenmesi ve üretim ortamının hazırlanmasıdır.

Üretimler argon soy gaz atmosferinde gerçekleştirilmekte üretim boyunca üretim haznesinin oksijen seviyesi 10 ppm'in altında tutulmaktadır. Üretimlerde kullanılan alt taş inşa edilen malzeme ile aynı olacak şekilde Ti-6Al-4V olarak seçilmekte, proses öncesinde 200 ℃'ye ısıtılmakta ve üretim boyunca sabit kalması sağlanmaktadır. Artık gerilmelerin minimuma indirilmesi için alt taşın homojen bir şekilde önceden ısıtılması ve üretim boyunca sıcaklığın sabit tutulması büyük bir önem arz etmektedir. Üretim öncesi toz ince homojen bir katman halinde alt taş üzerine serici vasıtasıyla serilmektedir. Tozun alt taş üzerinde homojen bir şekilde serilmiş olması alt taşın paralelliği ile doğrudan ilişkilidir.



Şekil 3.12. Nikon SLM 280 HL cihazı

Cihaz üreticisi firmalar, uygun ham madde kullanımı ve diğer tüm üretim koşullarının sağlanması durumunda önerilen onaylı parametreler kullanılır ise belirli özelliklerin elde edileceği garantisini vermektedir. Bu nedenle bu tez çalışması kapsamında yapılan üretimlerde cihaz üreticisi firmanın önerdiği Çizelge 3.4'te paylaşılan üretim verileri kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Eİ üretim parametreleri

Üretim Parametreleri	
Lazer Gücü	350 W
Tarama Hızı	1.100 mm/s
Tarama Boşluğu	0,12 mm
Katman Kalınlığı	0,06 mm
Tarama Stratejisi	Şerit (stripes)

Toz yataklı metal Eİ üretimlerinde ürün özelliklerini etkileyen birçok husus vardır. Ürün kalitesini ve başarılı bir üretimi etkileyecek ilk faktör üretim öncesi tasarım aşamasıdır. Üretim yapılacak malzemenin termal özellikleri, üretimde kullanılacak destek yapılarının seçimini, parça oryantasyonunu, proses parametrelerini (enerji yoğunluğu, gaz akış hızı vb.) üretim sonrası ardıl işlemleri doğrudan etkilemektedir.

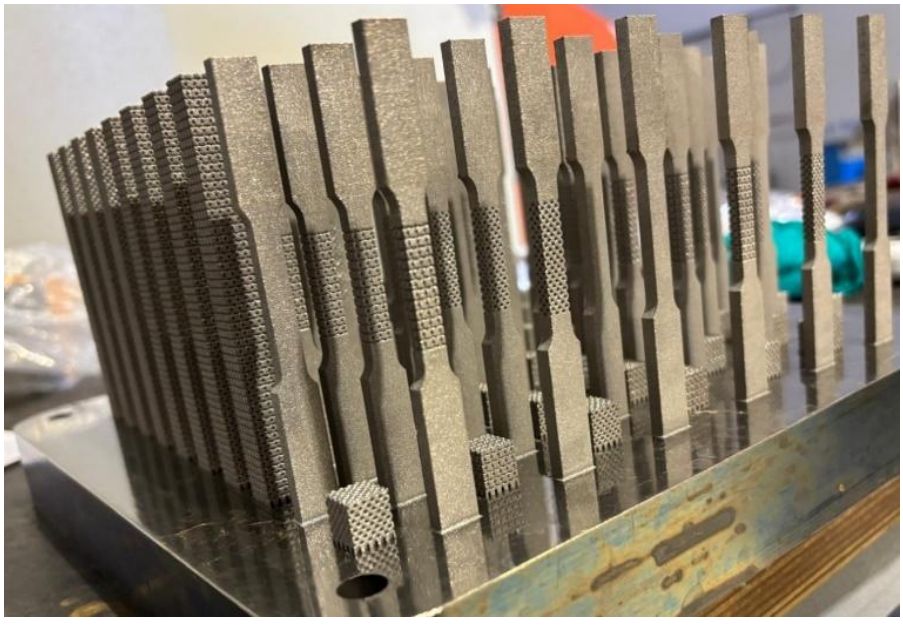
Eklemeli imalat üretimlerinde enerji yoğunluğu önemli parça kalitesi için önemli bir parametredir. Düşük enerji yoğunluğu katmanlar arası birleşme eksikliği hatasına sebep olurken yüksek enerji yoğunluğu anahtar deliği hatasını ortaya çıkarır. Her iki durum da mikro yapıda istenmeyen durumlara yol açarak mekanik özellikleri düşürmektedir. Bu nedenle uygun bir proses penceresinde çalışılması büyük bir önem arz etmektedir.

Çizelge 3.4'te verilen üretim parametreleri ile ürün özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olan enerji yoğunluğu aşağıdaki eşitlik 3.1 ile hesaplanabilmektedir.

$$\text{Enerji Yoğunluğu: } \frac{Lazer\ Gücü\ (Watt)}{Tarama\ Hızı\left(\frac{mm}{s}\right) x\ Tarama\ Boşluğu\ (mm) x\ Katman\ Kalınlığı\ (mm)} \tag{3.1}$$

$$\text{Enerji Yoğunluğu: } \frac{350\ Watt}{1100\frac{mm}{s} x\ 0.12\ mm\ x\ 0.06\ mm} \cong 44.19\ {}^{J}/_{mm^3}$$

Üretimi yapılan numunelere ait alt taştan ayrılmadan önce görsel Şekil 3.13'te paylaşılmıştır.



Şekil 3.13. Üretim sonrası alt taş üzerinde numuneler

Deney planına göre teste alınacak numunelere ait detaylar Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Deney planına göre teste alınacak numuneler

Uygulanacak Test	Numune Tipi	Isıl İşlemli (HIP'li)	Isıl İşlemsiz (HIP'siz)
Basma	Dolu Küp	3	3
	Flourite Küp	3	3
	BCC Küp	3	3
Çekme	Dolu	3	3
	Flourite	3	3
	BCC	3	3
Split Hopkinson Basınç Barı Testi	Flourite Küp	3	3
	BCC Küp	3	3

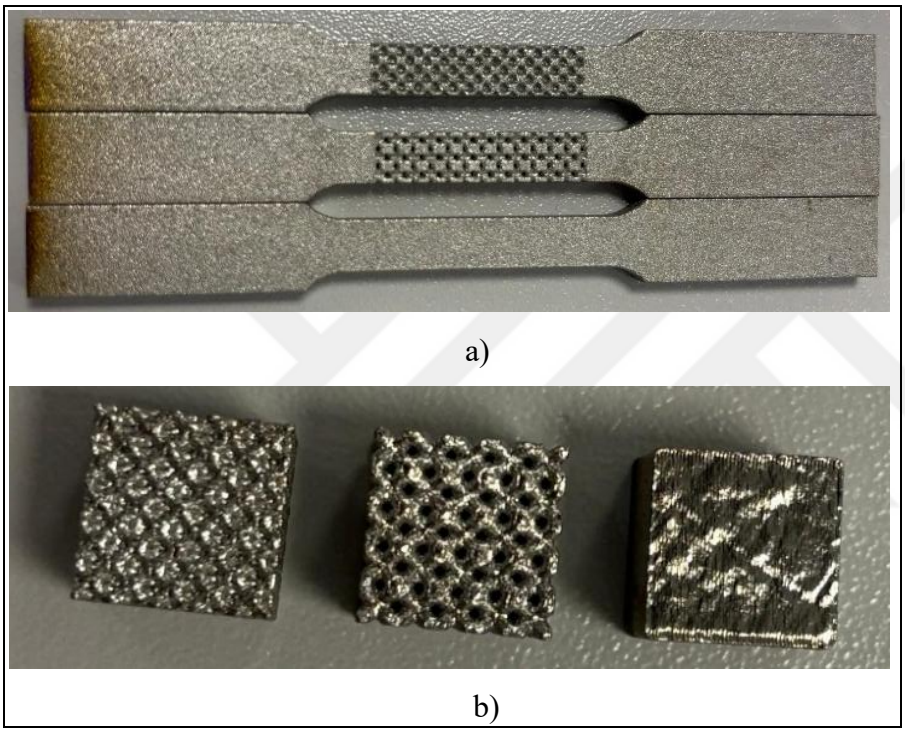
3.5. Telli-Elektro Erozyon (TEEİ) Kesimi

Genel uygulamada SLE ile yapılan üretimlerde, 10^4 – 10^5 K/s gibi yüksek soğuma hızları nedeniyle yüksek kalıntı gerilmeler oluşmaktadır [32]. Bu kalıntı gerilmenin giderilmesi çarpılmaya müsait geometriye sahip parçalar için önem arz etmektedir. Ti-6Al-4V alaşımı numunelerinin alt taştan ayrılmadan önce Eİ prosesinde meydana gelen kalıntı gerilmenin giderilmesi için ASTM F3001 standardının atıf yaptığı AMS 2801B standardına uygun olarak (593 ± 14°C'de 2 saat ± 15 dakika hava veya fırında soğutma) gerilim giderme ısıl işlemi yapılması üretici ve tedarikçi arasında gerekli görüldüğünde tavsiye edilmektedir. Ancak bu ısıl işlem esnasında kontrollü atmosfer altında, asal gaz ya da vakum kontrolü sağlanamadığı durumlarda titanyum alaşımları yüksek oksijen ilgisi sebebiyle kolaylıkla oksitlenebilmektedir. Bu durumda parça yüzeyinin mavi renk almasına sebep olan sert ve kırılgan titanyum oksit tabakası oluşumu meydana gelmektedir.

Büyük hacimli atmosfer kontrollü fırına ulaşım sağlanamadığı için bu çalışma kapsamında parçalar alt taştan gerilim giderme ısıl işlemi yapılmaksızın ayrılmıştır. ASTM F3001 standardının atıf yaptığı üzere gerilim giderme ısıl işlemi parça mekanik özelliklerine sınırlı oranda etki etmektedir [33]. Bu durum Ti-6Al-4V faz diyagramı incelendiğinde gerilim giderme ısıl işleminin gerçekleştirildiği 593 ± 14 °C 'de herhangi bir faz dönüşümünün

olmaması ile açıklanabilir. Bu doğrultuda atmosfer kontrolü olmadan yapılabilecek gerilim giderme ısıl işleminin numuneler üzerinde bırakacağı titanyum oksit tabakasının olumsuz etkileri göz önüne alınarak uygulanmamasına karar verilmiştir.

Üretim sonrası tabla üzerindeki numuneler tasarımda verilen 0,9 mm kesme payı dikkate alınarak telli elektro erozyon yöntemi ile tabladan ayrılmıştır. TEEİ ile kesim sonrası elde edilen numuneler Şekil 3.14'te görülebilir.



Şekil 3.14. TEEİ sonrası a) çekme numuneleri b) basma testi ve SHPBT numuneleri

3.6. Ultrasonik Temizlik İşlemi

SLE yöntemi ile üretilen parçalardan özellikle kanallı, desenli geometriye sahip parçalar içerisinde istenmeyen tozlar kalabilmektedir. Bu gibi geometriye sahip parçalardan kalıntı tozların uzaklaştırılması için çeşitli sıvılar içerisinde ultrasonik temizlik işlemi gerçekleştirmek gerekebilmektedir.

Bu çalışmada, yapılan literatür araştırması ve saha uygulamaları göz önüne alınarak kalıntı tozların ortamdan uzaklaştırılmasında daha etkili olan etil alkol sıvısı seçilmiştir [12]. Tüm numuneler etil alkol içerisinde Nükleon NUB-50 cihazı kullanılarak her çevrim sonrası sıvı

yenilenmek suretiyle birer saatlik üç çevrim ultrasonik temizlik aşamasına tabi tutulmuştur. Ultrasonik temizlik işlemi sırasında kalıntı tozların yapıdan uzaklaştırıldığı gözlenmiştir.

3.7. Ağırlık Ölçümleri

Bu tez çalışması kapsamında 3.2. numaralı başlık altında daha önce bahsedildiği üzere; BCC ve Flourite birim hücre tasarımlarına ait kiriş çapları eş değerlendirme yapılabilmesi için sırasıyla 0,9 ve 0,66 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu doğrultuda üretim sonrası numune ağırlık ölçümlerinin eşit olması beklenmiştir.

Üretim sonrası Shimadzu marka UW6200H model hassas terazi kullanılarak dolu küp numuneye yapılan örneklem tartım işlemine ait görsel Şekil 3.15'te paylaşılmıştır.



Şekil 3.15. Dolu küp hassas terazi ölçümü

10 x 10 x 10 mm^3 ölçülerindeki dolu, BCC ve Flourite kafes yapılar ile dolu, BCC ve Flourite kafes içeren çekme test numunelerine ait tasarım hacmi, tasarımda hafifletme oranı, üretim sonrası tartım işlemi sonuçları ortalaması ile üretimden sonraki hafifletme oranları 4.1. numaralı başlık altında verilmiştir.

3.8. HIP Prosesi Uygulaması

Bu çalışmada üretilen numunelerin bir kısmına ASTM F3001 standardına uygun olarak HIP ısıl işlemi uygulanmıştır. ASTM F3001 standardına göre soy gaz atmosferi altında en az 100 MPa basınçta 895-955 ℃'de 180 ± 60 dakika ısıl işleme tabi tutulup 425 ℃'nin altına kadar

soy gaz atmosferinde soğuma gerçekleştirilmelidir.

Bu çalışmada seçilen HIP ısıl işlemi parametreleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. HIP proses parametreleri

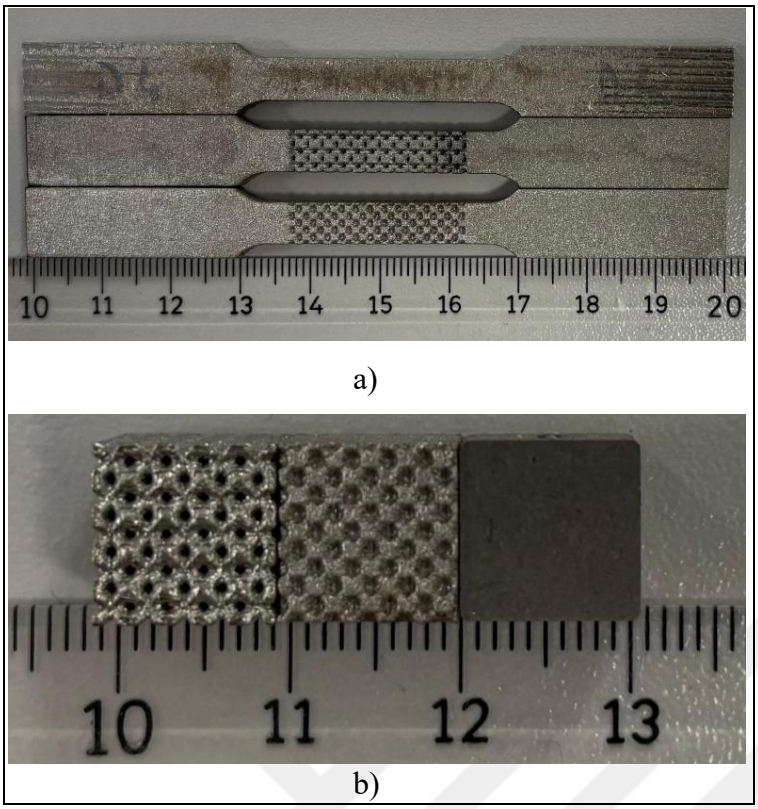
Basınç	102.2 MPa
Sıcaklık	925 ℃
Süre	150 dakika

HIP prosesi AIP (American Isostatic Pres) marka Şekil 3.16'da görseli paylaşılan cihazda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.16. HIP ısıl işlem fırını

HIP ısıl işleminde eş eksenli olarak her yönden basınç uygulandığından Şekil 3.17'de görülen numunelerin dış ölçülerinde herhangi bir çarpılma, boyut değişikliği, şekil bozukluğu gözlemlenmemiştir.



Şekil 3.17. HIP ısıl işlemi sonrası a) çekme numuneleri b) basma numuneleri

3.9. Optik ve SEM İncelemeleri

Uygulanacak çeşitli ısıl işlemler ile Ti-6Al-4V malzemenin SLE prosesi sonrası martenzit mikroyapısı α + β lameler sünek yapıya dönüştürülebilmektedir. Bu çalışma kapsamında SLE üretiminden çıktığı gibi ve HIP ısıl işlemi sonrası gerekli numune hazırlama işlemleri gerçekleştirilerek optik mikroskop ve SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir. HIP ısıl işlemi uygulanmamış ve uygulanmış numunelere ait optik ve SEM görüntüleri 4.3 numaralı başlık altında verilmiştir.

3.10. Arşimet Metodu ile Yoğunluk Ölçümü Uygulaması

Üretilen dolu küp yapılarından örneklem alınarak ASTM B311 standardına uygun olarak Arşimet yoğunluk ölçümü yapılmıştır. HIP ısıl işlemi yapıdaki gözeneklerin yüksek basınç altında yapıdan uzaklaştırılmasını sağladığı için numune yoğunluğunun artması beklenmektedir. Sonuçlar literatür ile uyumlu olarak alınmıştır. Test sonuçları 4.4. numaralı başlık altında verilmiştir.

3.11. Sertlik Testi Uygulaması

Bu çalışmada 10 x 10 x 10 mm^3 olarak üretilen numunelere HIP öncesi ve sonrası olmak üzere numuneyi temsil edecek şekilde alt ve üst yüzeylerin üçer noktasından ISO 6507 standardına uygun olarak sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik ölçümlerine ait uygulama görselleri ve ölçüm sonuçlarına 4.5. numaralı başlık altında verilmiştir.

3.12. Statik Basma Testi Uygulaması

Kafes yapıları genellikle basma yüküne maruz kalan uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu nedenle kafes yapıları üzerine literatürde yapılan çalışmaların büyük bir kısmı basma testi üzerine gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında SLE ile basma testi yapmak için üretilen dolu küp, BCC ve Flourite kafes yapıları 10 x 10 x 10 mm^3 boyutlarındadır. Tüm numuneler HIP ısıl işlemi uygulanan ve uygulanmayan olarak gruplanmıştır. ISO 13314 standardına uygun olarak 0,5 mm/dk ilerleme hızı ile her numune için üçer tekrar olacak şekilde statik basma testi uygulanmıştır. Basma testleri sırasında test cihazının maksimum yük sınırı olan 95 kN'da numuneler hasarlanmamış olsa da testler sonlandırılmıştır.

Basma test sonuçlarında ilk hasarın ve yük düşüşünün gerçekleştiği maksimum gerilme ve yüzde şekil değişimi değerleri dikkate alınmıştır. Üretilen yapılardan dolu küp referans alınarak BCC ve Flourite kafes yapıları üzerinden hafifletme oranı ile basma dayanımları kıyaslanmıştır. Bu doğrultuda çıkarılan basma test sonuçları 4.6. numaralı başlık altında Çizelge 4.4'te paylaşılmıştır.

3.13. Çekme Testi Uygulaması

ASTM E8M standardına uygun olarak küçük boyutlu çekme testi çubukları Çizelge 3.4'te paylaşılan parametreler ile üretilmiştir. Üretilen çekme çubukları Şekil 3.17'den görülebilir.

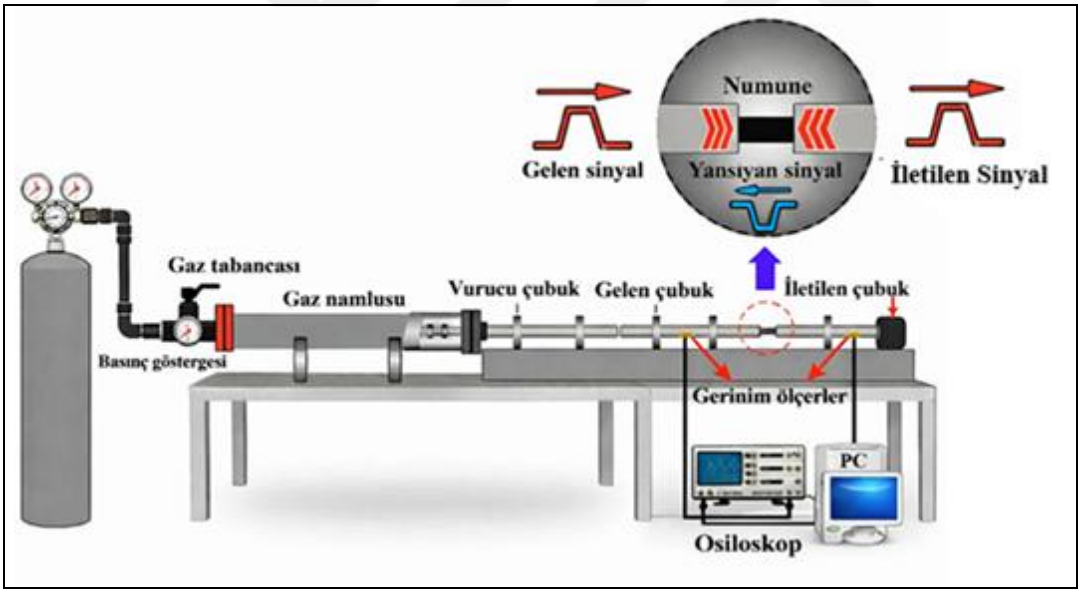
Çekme testleri HIP ısıl işlemi uygulanan ve uygulanmayan iki grup için dolu, ölçü boyu bölgesi BCC ve Flourite kafe yapısı ile doldurulmuş çekme çubukları için üçer test tekrarı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çekme testi Instron 8801 cihazında ISO 6892-1

standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına 4.7. numaralı başlık altında yer verilmiştir.

3.14. Split Hopkinson Basınç Barı Testi Uygulaması

SHPBT malzemelerin yüksek çarpışma hızlarındaki enerji sönümleme kabiliyetlerinin ölçümü ve maksimum dayanımın ölçülmesi için gerçekleştirilmektedir. Potansiyel balistik malzemelerinin araştırma geliştirme faaliyetleri için test çıktıları tasarım aşamasına önemli girdiler sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında üretilen BCC ve Flourite kafes yapılarının yüksek çarpışma hızındaki performansı SHPBT ile analiz edilmiştir. Test düzeneğinin çalışma prensibine ait şema Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Test sonuçlarına 4.8. numaralı başlık altında yer verilmiştir.



Şekil 3.18. Split Hopkinson basınç barı test düzeneği [38]

4. TARTIŞMA VE BULGULAR

Bu bölümde, SLE yöntemiyle ve Ti-6Al-4V malzemesi ile üretilen BCC ve Flourite kafes yapılarının; HIP ısıl işlemi sonrası elde edilen mekanik ve yapısal özellikleri literatür bulguları ile birlikte tartışılmaktadır. Çalışmanın temel hedefi, aynı yoğunluğa sahip farklı kafes topolojilerinin basma, çekme ve dinamik davranışlarının ortaya konması, HIP prosesinin bu davranışlar üzerindeki etkisinin değerlendirilmesidir.

4.1. Ağırlık Ölçüm Sonuçları

3.7. numaralı başlık altında uygulamasından bahsedilen ağırlık ölçümü sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Tasarım ve üretim sonrası numunelerin karşılaştırması

Numune Adı	Tasarım Hacim	Tasarım Hafifletme Oranı	Üretim Sonrası Ağırlık, g	Üretim Hafifletme Oranı
Dolu Küp	1000 mm^3	-	4,27	-
BCC Küp	655 mm^3	%34,4	3,08	%27,8
Flourite Küp	656 mm^3	%34,5	3,37	%21
Dolu Çekme	3403 mm^3	-	14,76	-
BCC Çekme	3188 mm^3	%36,5	13,97	%30
Flourite Çekme	3184 mm^3	%35,6	14,13	%24

Üretim sonrası hafifletme oranı, üretim sonrası tartım işleminde elde edilen numune ağırlıklarına göre oransal olarak aşağıdaki eşitlik 4.1 ile hesaplanmıştır.

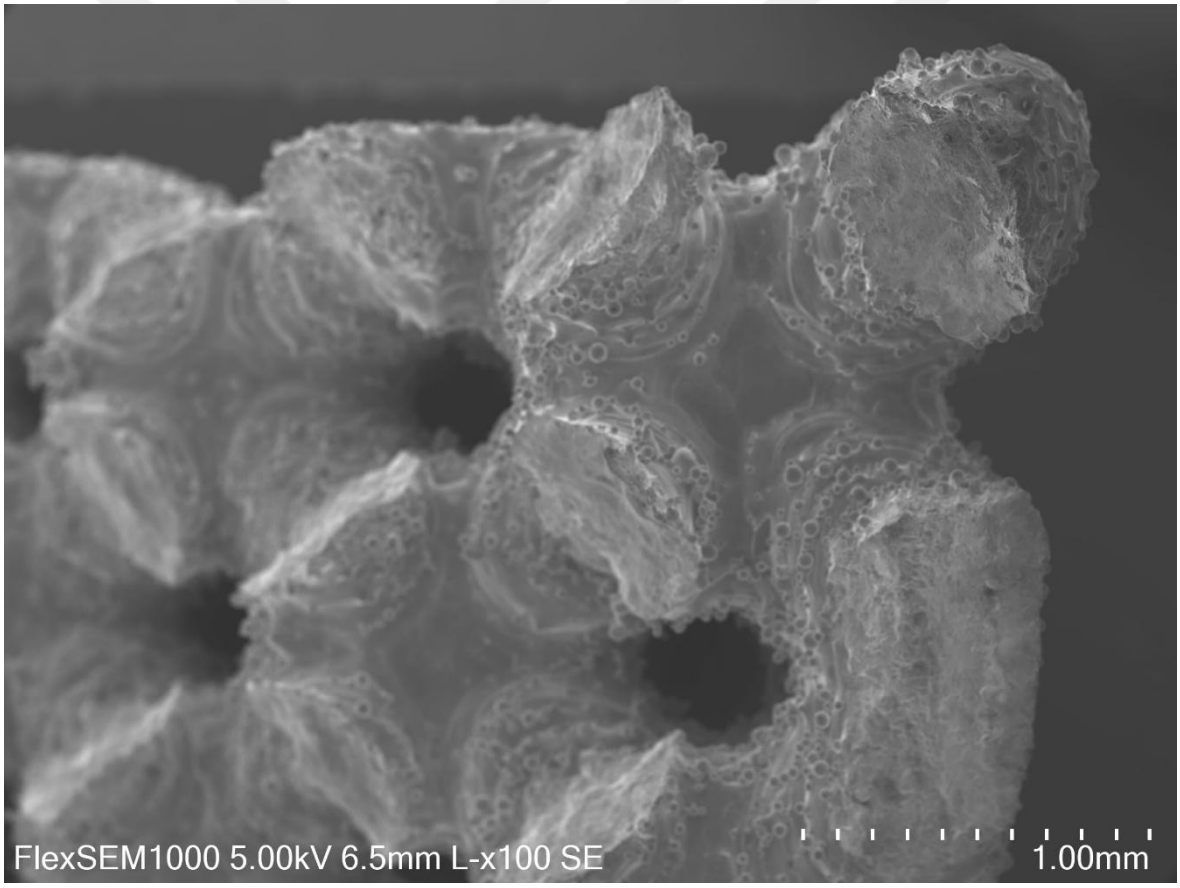
$$Gerçek\ Hafifletme\ Oranı = \frac{\text{Üretim sonrası dolu ağırlık} - \text{üretim sonrası kafes ağırlığı}}{\text{Üretim sonrası dolu ağırlık}} x100 \quad (4.1)$$

$$BCC\ Hafiletme\ oranı = \frac{4,27 - 3,08}{4,27} x100 = \%27,8$$

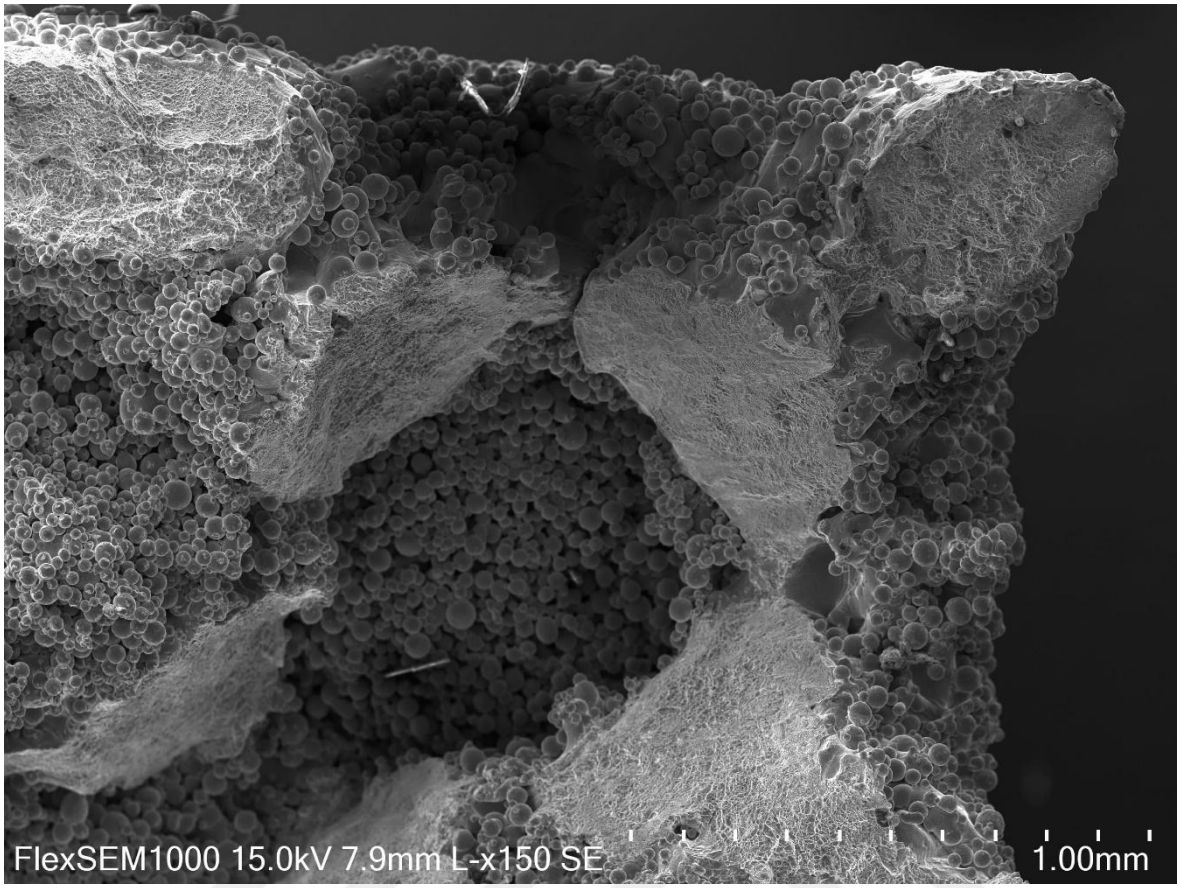
$$Flourite\ Hafifletme\ oranı = \frac{4,27 - 3.37}{4.27} x100 = \%21$$

Üretim öncesinde kiriş çapları dikkate alınarak yapılan tasarıma göre numunelerin aynı ağırlıkta olması beklenmiştir. Ancak kafes yapıları yaklaşık 2,91 g ağırlıkta tasarlanmasına rağmen Çizelge 4.1'den görüleceği üzere BCC ve Flourite yapılar sırasıyla 3,08 ve 3,37 g ağırlıkta üretildiği gözlenmiştir. Kafes yapılarının tasarımdaki ağırlıktan fazla üretilmesi kirişlerin çeperinde sinterlenerek kalan tozlardan kaynaklanmaktadır. Nitekim bu durum literatür ile uyumludur [39].

Kafes yapılarının ağırlıkları arası fark ise sinterlenen toz miktarının iki kafes yapısında farklı olduğunu işaret etmektedir. BCC ve Flourite kafes yapılarındaki sinterlenmiş toz miktarını gösteren görseller kırılma yüzeylerinden sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

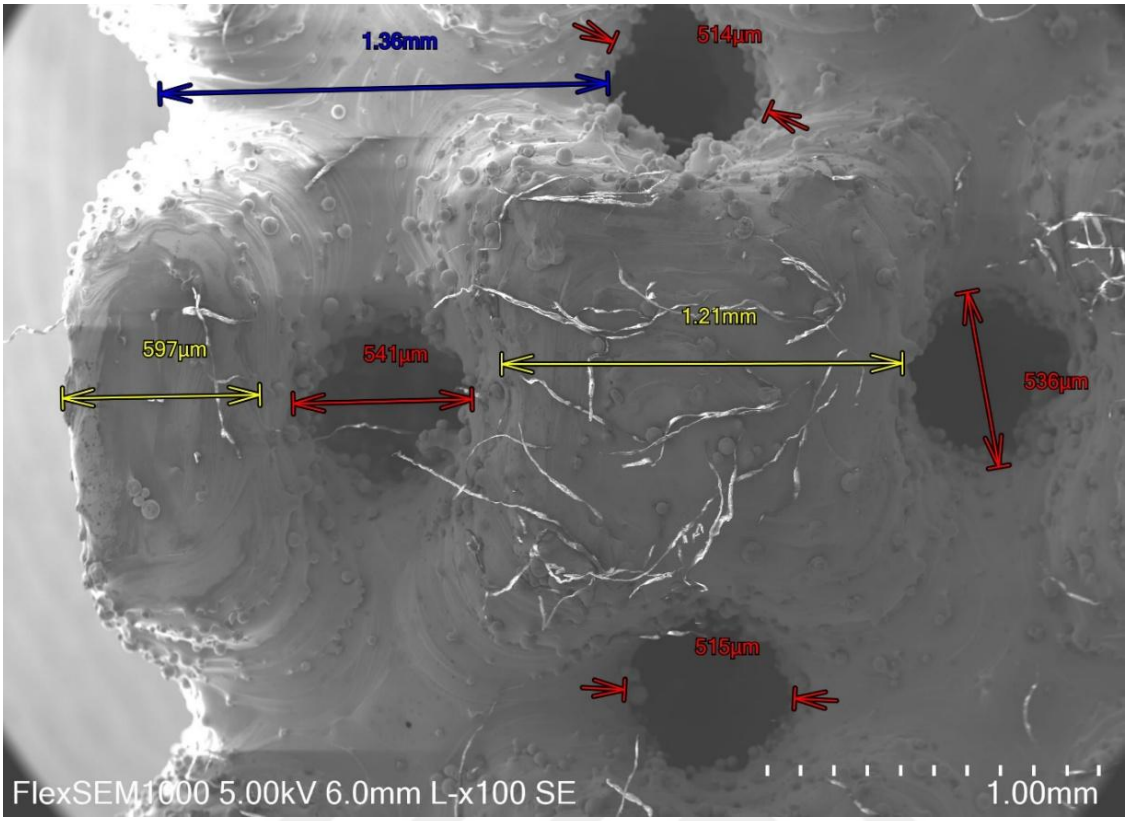


Şekil 4.1. BCC kafes yapısı sinterlenmiş toz incelemesi

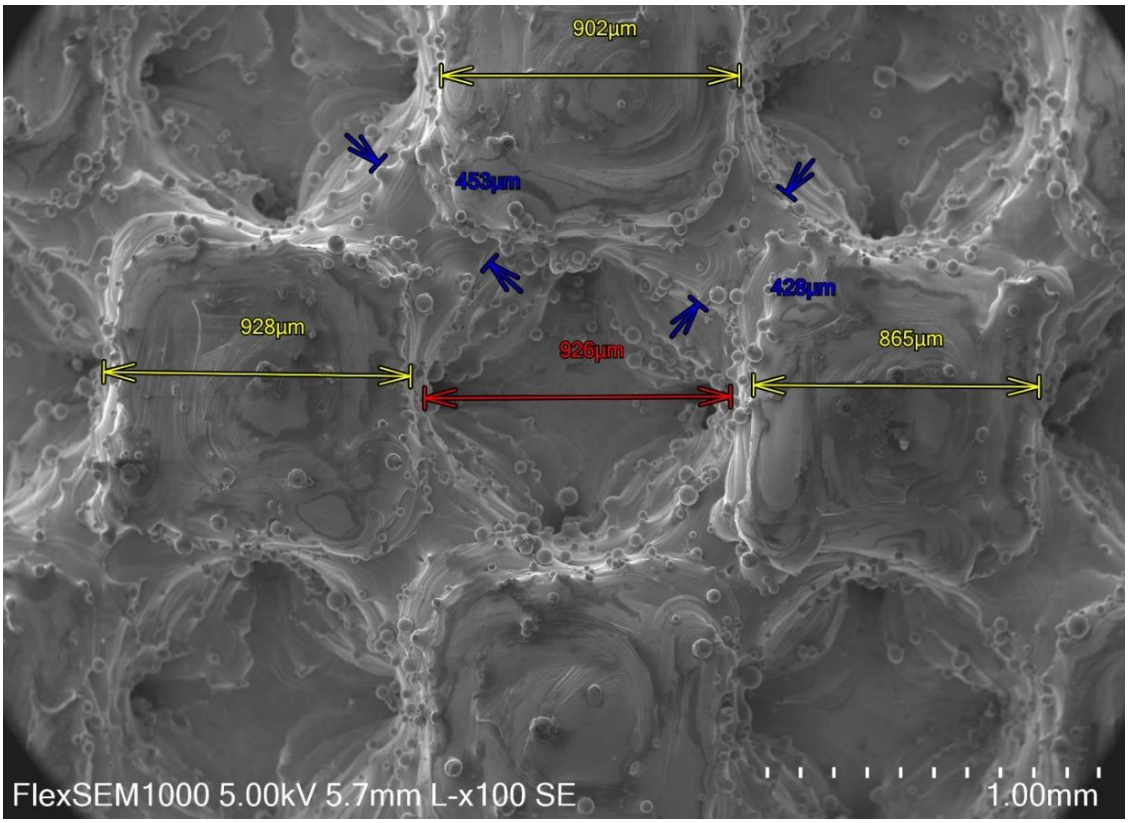


Şekil 4.2. Flourite kafes yapısı sinterlenmiş toz incelemesi

Yapının yüzeyindeki sinterlenmiş toz yoğunluklarının farklı olmasının birkaç sebebi olduğu literatür ile uyumlu olarak yorumlanmıştır. Birincisi kafes kiriş çaplarının birbirinden farklı olması iken ikincisi kafes yapıları arasındaki topoloji farkıdır. Bu iki neden birlikte değerlendirildiğinde; Flourite kafeste 0,66 mm kiriş çapı kullanılması ve bu kafes yapısının topolojisi gereği kirişler arası boşluk miktarının daha az olması sebebiyle sinterlenmenin BCC kafesten daha fazla olduğu değerlendirilmektedir. Üçüncü ve ana sebep BCC ve Flourite kafes yapılarının kiriş açılarının farklı olmasıdır. BCC kafes yapısının kiriş açısı ≈ 50° iken Flourite kafes yapısının kiriş açısı ≈ 35-40°'dir. Bu nedenle BCC kafes yapısı Flourite kafes yapısına göre eklemeli imalatta üretilebilirlik açısından daha güvenlidir. Flourite kafes yapısının desteksiz üretim açısı olan 45°'nin altında olması BCC yapıya göre daha düşük ısıl iletkenliğe ve yapının daha yavaş ısı uzaklaştırmasına sebep olmaktadır. Bu durum ergiyik havuzunun büyümesine yol açmakta ve dolayısıyla kiriş çapları tasarlanandan büyük olmakta ve ağırlık artmaktadır. Bu tez kapsamında karşılaşılan durum literatür ile uyumludur [39]. Bu durum Şekil 4.3 ve 4.4'te alınan ölçümlerden açıkça görülmektedir.



Şekil 4.3. BCC kafes topolojisi



Şekil 4.4. Flourite kafes topolojisi

4.2. HIP Isıl İşlemi Değerlendirilmesi

Ti-6Al-4V alaşımının SLE yöntemi ile üretimi sonrasında herhangi bir ısıl işlem yapılmadığı durumda martenzit mikroyapısına sahiptir. Bu mikroyapıdan dolayı malzemenin akma ve çekme mukavemeti yüksektir. Bu mikroyapı yüksek mukavemete sahip bir malzeme sunar iken kırılgan bir yapı oluşturduğu için sünekliğin düşmesine sebep olur. Martenzit mikroyapıya sahip malzemeler çok düşük uzama ile gevrek bir kırılma davranışı sergiler [34, 35].

Birçok mühendislik uygulamasında kopma uzaması önemli bir malzeme seçim kriteridir. Malzemelerin yüksek mukavemetin yanı sıra hasara uğramadan önce belirli miktarda uzama göstermesi istenir. Bu nedenle gevrek kırılma gösteren martenzit mikroyapıya sahip malzemelere çeşitli ısıl işlemler uygulanarak nispeten sünek kopma davranışı gösteren α + β lameler fazlı içyapıya dönüştürülmeye çalışılır. Bu noktada HIP ısıl işlemi önemli bir seçenektir. HIP ısıl işlemi aynı zamanda malzemenin içerisinde bulunan gözeneklerin ve süreksizliklerin yüksek sıcaklık ve basınç altında elimine edilmesi sayesinde yoğunluk artışı da sağlamaktadır.

Literatürde ASTM F3001 standardına uygun olarak gerçekleştirilen HIP ısıl işlemi kırılgan ve sert martenzit mikroyapının faz dönüşümü sayesinde sünek α + β lameler mikroyapıya dönüştürdüğü raporlanmıştır [36].

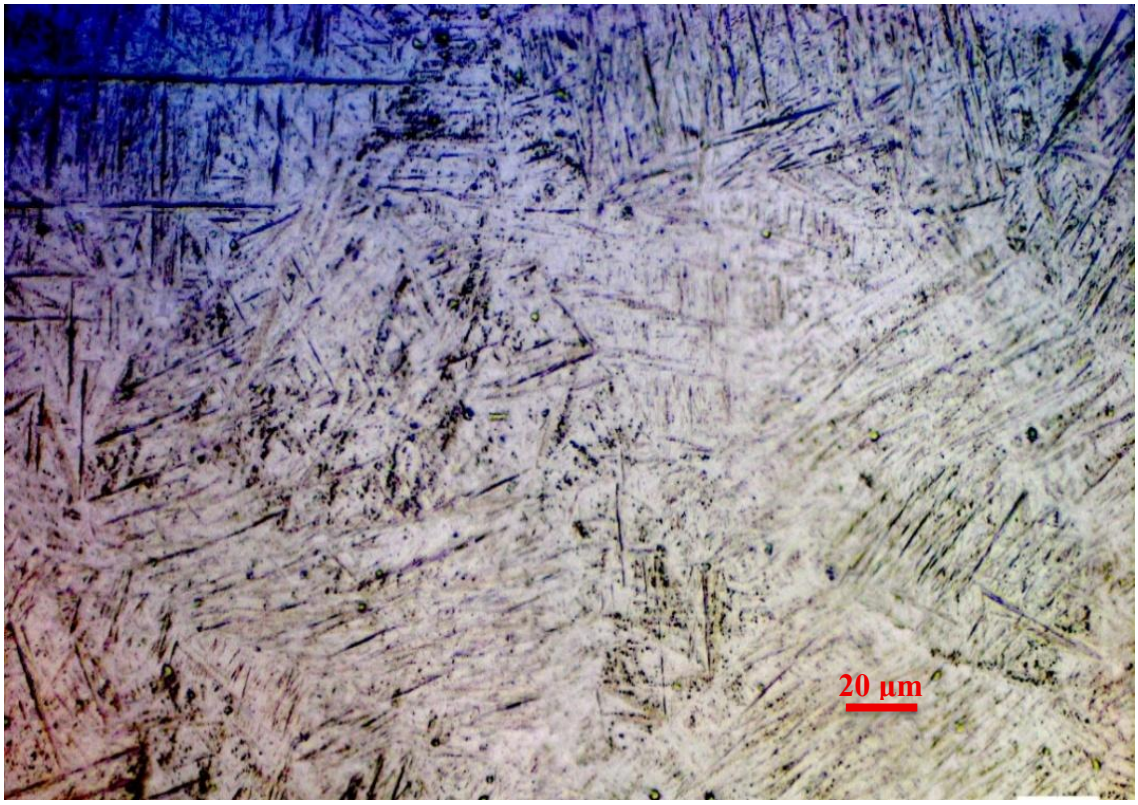
4.3. Mikroyapı İncelemeleri ve Değerlendirilmesi

SLE ile üretilen Ti-6Al-4V kafes yapılarında, yüksek soğuma hızları ve katman katman üretim karakteri nedeniyle mikroyapıda martenzitik α′ fazının baskın olduğu, bunun da yüksek dayanım fakat nispeten düşük tokluk ve yorulma performansı ile sonuçlandığı literatürde ifade edilmektedir [4, 9].

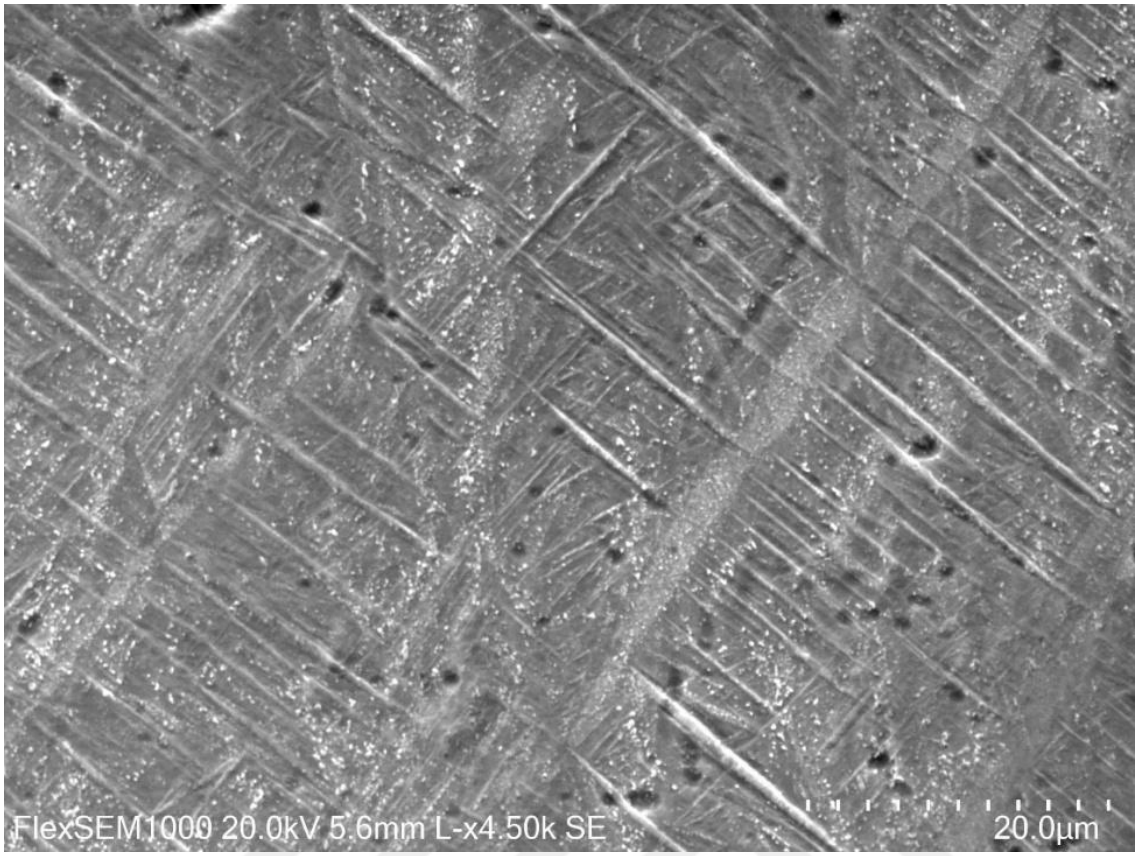
Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri, yüksek oranda çeşitli ısıl işlemler ile şekillendirilebilen mikro yapılarına bağlıdır. Ancak kafes geometrilerine yapılan ısıl işleminin ana malzemenin mekanik özelliklere etkisi yeterince araştırılmamıştır. SLE prosesindeki 10^4 – 10^5 K/s seviyelerindeki yüksek soğuma hızından dolayı α′ martenzit mikro yapı meydana gelir. Bu mikro yapı 1100-1300 MPa seviyelerinde çok yüksek

mekanik mukavemet sağlar iken aynı zamanda arzu edilmeyecek şekilde %10'dan düşük bir sünekliğe sebep olur [34, 35, 37]. Bu tez kapsamında üretilen BCC ve Flourite kafes yapıları da inşa edildiği haliyle benzer şekilde martenzitik bir mikroyapı sergilemiştir.

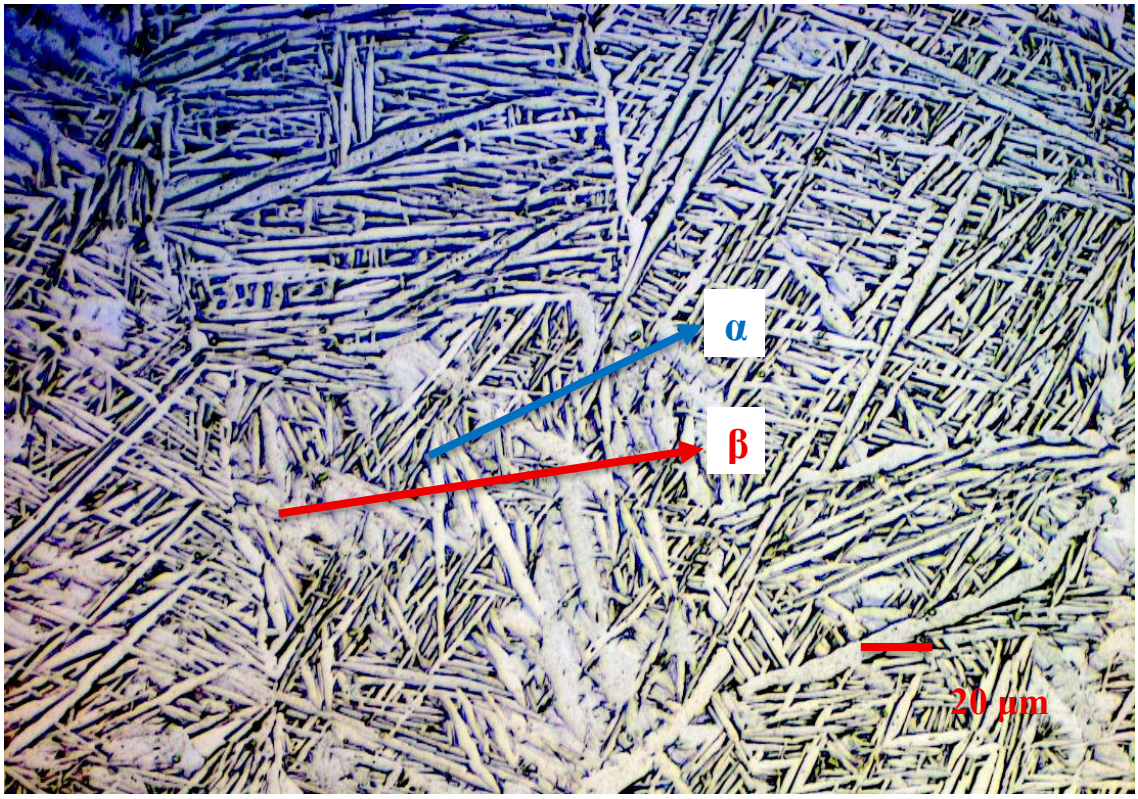
HIP'siz numunenin optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.5'te, SEM görüntüsü Şekil 4.6'da; HIP'li numunenin optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.7'de, SEM görüntüsü Şekil 4.8'de paylaşılmıştır.



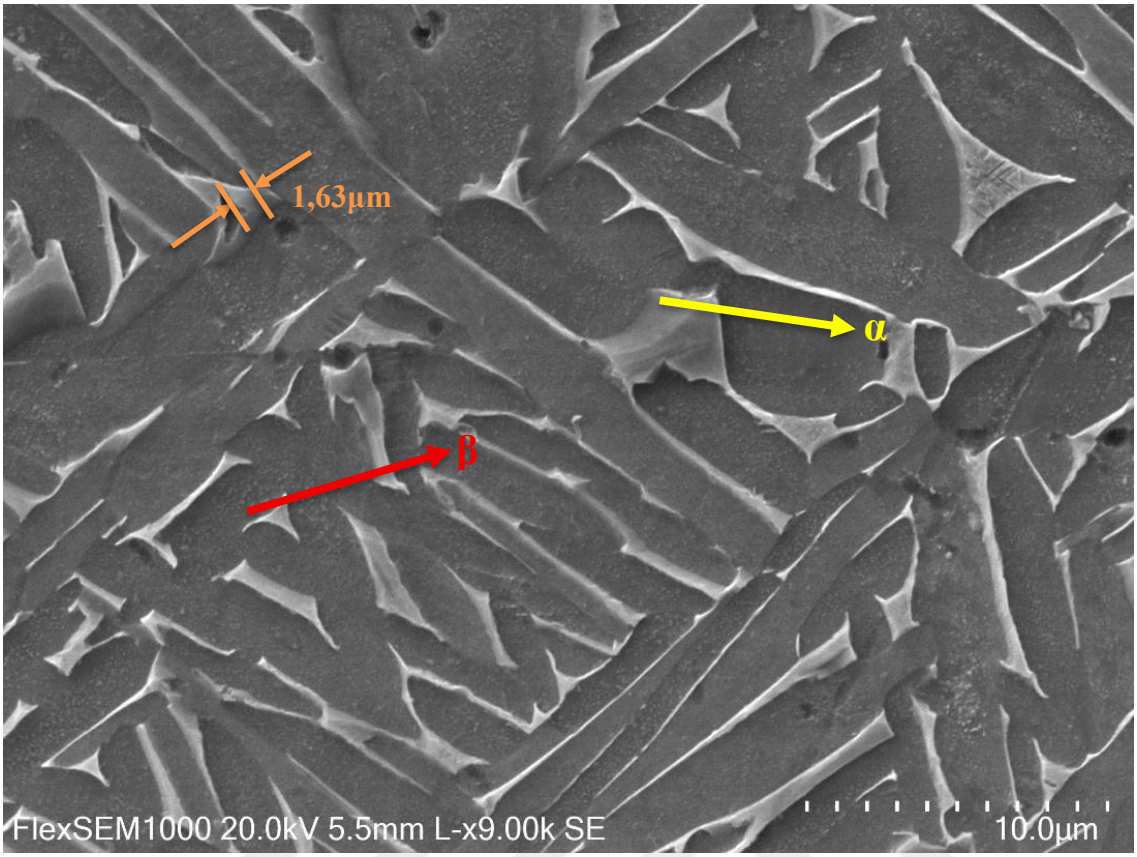
Şekil 4.5. HIP'siz numunenin martenzit mikroyapısına ait optik mikroskop görüntüsü



Şekil 4.6. HIP'siz numunenin martenzit mikroyapısına ait SEM görüntüsü



Şekil 4.7. HIP'li numunenin α + β lameler mikroyapısına ait optik mikroskop görüntüsü



Şekil 4.8. HIP'li numunenin α + β lameler mikroyapısına ait SEM görüntüsü

Optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelendiğinde HIP ısıl işleminin başarılı olduğu ve martenzit mikro yapının α + β lameler yapıya dönüştüğü açıkça görülmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen mikro yapıların tamamı literatür ile uyumludur [37].

4.4. Arşimet Metodu ile Yoğunluk Ölçümü Sonuçları

3.10. numaralı başlık altında uygulama şekli anlatılan yoğunluk ölçümü sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.2'de verilmiştir. Arşimet yoğunluk ölçüm sonuçları literatür ile uyumludur [40].

Çizelge 4.2. Arşimet yoğunluk ölçüm sonuçları

Numune	Dolu Küp
Teorik Yoğunluk	4,43 g/cm^3
HIP Öncesi	4,398 g/cm^3 (%99,3)
HIP Sonrası	4,421 g/cm^3 (%99,8)

4.5. Sertlik Ölçümü Sonuçları

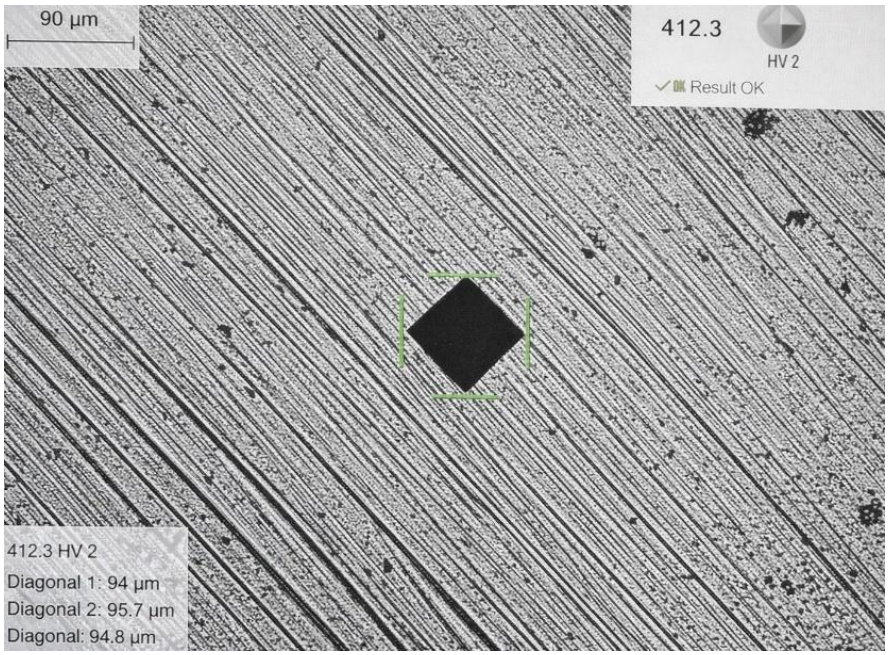
SLE üretimleri sonrası elde edilen sert martenzit mikroyapı HIP ısıl işlemi sayesinde yerini daha sünek olan α + β lameler mikroyapıya bırakır. Bu da aynı zamanda sertlik değerlerinde önemli ölçüde düşüşe sebep olur [36].

3.11. numaralı başlık altında anlatıldığı şekilde uygulanan sertlik test sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.3'te özetlenmiştir. Literatürdeki ölçüm sonuçları bu çalışma kapsamında yapılan ölçümler ile uyumludur [29].

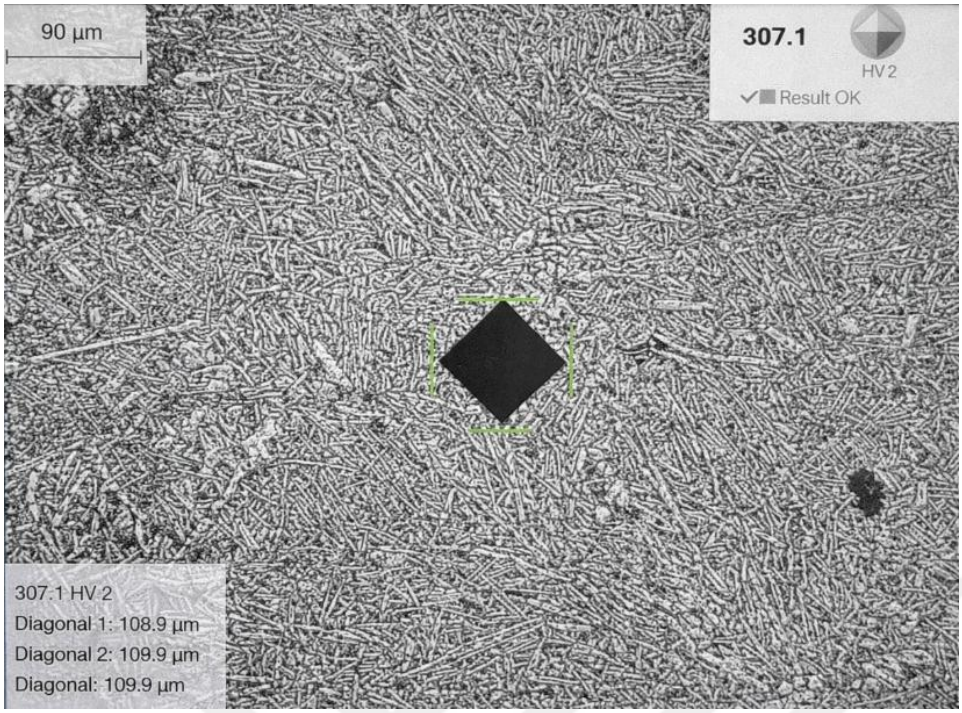
Çizelge 4.3. Sertlik ölçüm sonuçları

Ölçüm Adedi	HIP Öncesi	HIP Sonrası	% azalma
Ölçüm-1	412 HV	313 HV	%24
Ölçüm-2	390 HV	307 HV	%21
Ölçüm-3	431 HV	312 HV	%27
Ortalama	411 HV	310 HV	%24

Alınan sertlik ölçümlerine ait ölçüm uygulaması görselleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.9. HIP'siz numune mikro sertlik ölçüm uygulaması



Şekil 4.10. HIP'li numune mikro sertlik ölçüm uygulaması

Arşimet yoğunluk ölçümleri, mikro yapı görüntüleri ve sertlik değerleri birlikte değerlendirildiğinde:

- HIP öncesi numunelerde alınan %99,3'lük yoğunluk HIP sonrası %99,8'e çıkması SLE prosesinden kaynaklanan gözenek ve birleşme kusurlarının önemli bir ölçüde ortadan kaldırıldığını göstermiştir.

- HIP sonrası numunelerde ise gözenek sayısı ve gözenek hacminde belirgin bir azalma, yoğunluk değerlerinde ise teorik yoğunluğa yaklaşma eğilimi gözlenmiştir. Bu bulgu, SLE ile üretilmiş Ti-6Al-4V kafes yapılarında rapor edilen porozite azalması ile uyumludur [11, 29].

- HIP sonrası mikroyapıdaki gözeneklerin en büyüğünün 1-2 µm mertebesinde olduğu Şekil 4.8'teki SEM mikroyapı görüntülerinde görülmüştür. Ayrıca Şekil 4.6'daki HIP'siz SEM mikroyapı görüntüsü incelendiğinde gözenek miktarının HIP sonrası önemli ölçüde azaldığı gözlenmiştir.

- HIP ısıl işleminde uygulanan basınç tüm eksenlerden eşit olarak uygulandığı için parçalarda herhangi bir çarpılma boyut değişikliği gözlenmemiştir.

- Bununla birlikte, literatürde de vurgulandığı üzere, HIP işlemi mikroyapıda α′ martenzit yapıdan α + β lamelli yapıya dönüşüm gerçekleştirerek sertlik ve akma dayanımında bir miktar azalmaya, ancak tokluk ve yorulma dayanımında artışa yol açabilmektedir. Bu tez kapsamında da HIP sonrası sertlikteki azalma ve daha sünek kırılma davranışı, söz konusu mikro yapısal dönüşüm ile uyumludur [29].

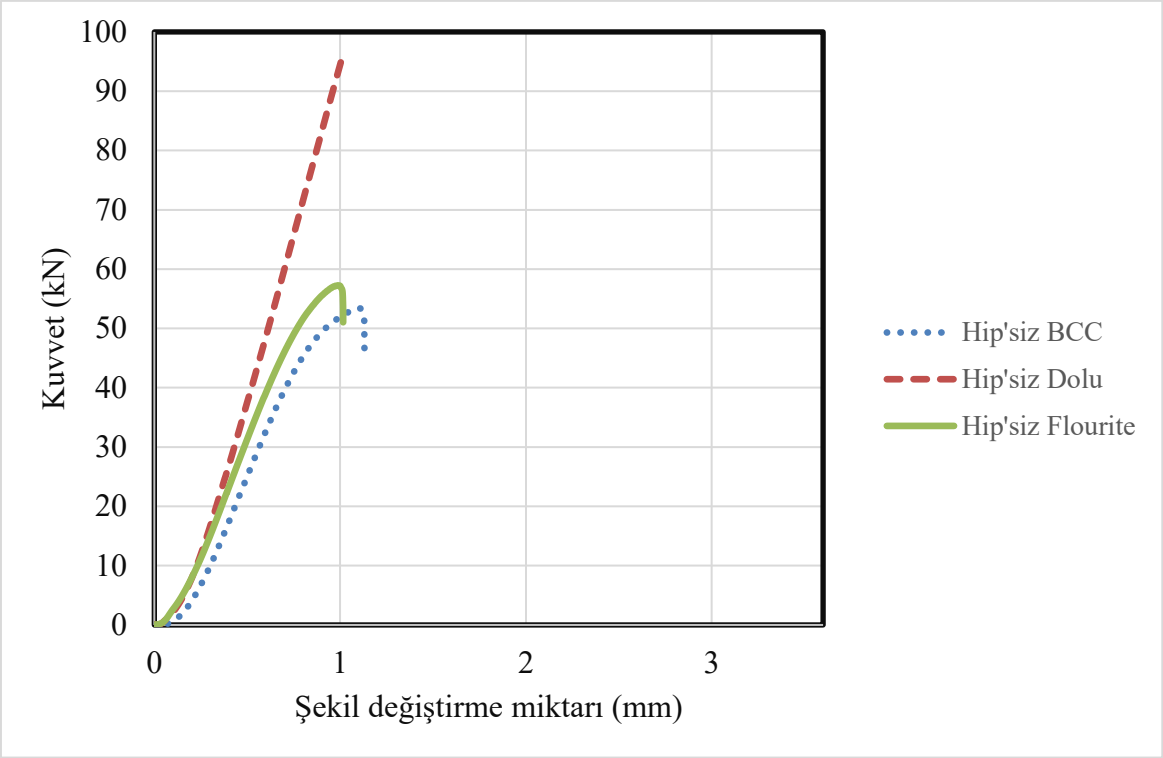
4.6. Basma Testi Sonuçları

Bu tez kapsamında, BCC ve Flourite kafes yapıların birim hücre boyutları 2 × 2 × 2 mm^3 olarak seçilmiş kiriş çapları ise eşit hacim ve bağıl yoğunluk sağlayacak şekilde BCC için 0,9 mm, Flourite için 0,66 mm olarak tasarlanmıştır. Böylece topoloji etkisini, bağıl yoğunluk farkından bağımsız olarak incelemek mümkün olmuştur. Basma testi sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

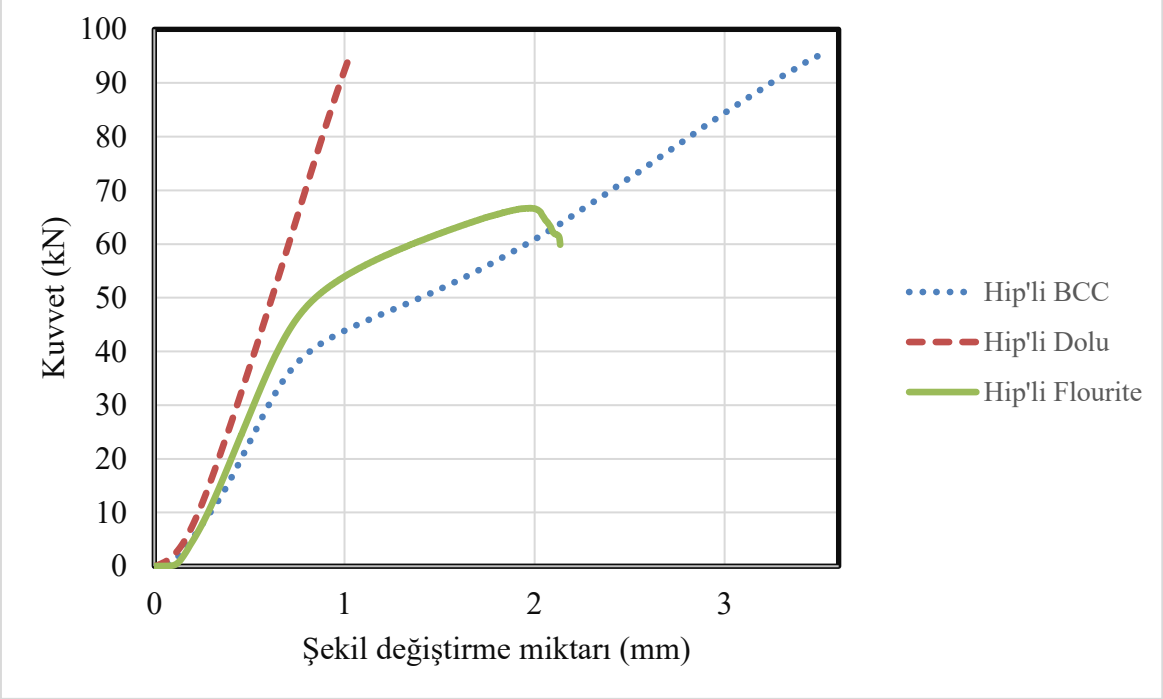
Çizelge 4.4. Basma testi sonuçları ortalaması

Numune Adı	HIP Öncesi		HIP Sonrası	
	Maksimum Kuvvet	Uzama, %	Maksimum Kuvvet	Uzama, %
Dolu Küp	94,985 kN	%10,02	94,986 kN	%10,3
BCC	52,461 kN	%12,06	94,999 kN	%34,4
Flourite	61,687 kN	%10,45	68,492 kN	%20,35

HIP'siz basma test sonuçları Şekil 4.11'de HIP'li basma test sonuçları Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.11. HIP'siz basma testi grafikleri



Şekil 4.12. HIP'li basma testi grafikleri

Basma test sonuçları maksimum yük taşıma kapasitesi açısından değerlendirilecek olur ise:

- Dolu küp yapısı HIP ısıl işlemi uygulanmadan 94,985 kN'da, HIP ısıl işlemi uygulandığında 94,986 kN'da hasarlanmadan testi tamamlamıştır.

- BCC kafes yapısı HIP ısıl işlemi uygulanmadan 52,461 kN'da hasarlanır iken HIP ısıl işlemi uygulandığında aynı kafes yapısının 94,999 kN'da hasarlanmadan testi tamamlamıştır.

- Flourite kafes yapısı HIP ısıl işlemi uygulanmadan 61,687 kN'da hasarlanır iken HIP ısıl işlemi uygulandığında aynı kafes yapısının 68,492 kN'da hasarlanarak testi tamamlamıştır.

Basma test sonuçları şekil değiştirme kabiliyeti açısından değerlendirilecek olur ise:

- Dolu küp yapının %10,02 olan şekil değiştirme oranı, ısıl işlem sonrası %10,3 seviyelerine çıktığı ancak hasarlanmadığı görülmüştür.

- Tasarımda yaklaşık %35, üretimden sonra %27,8 hafifletmeye sahip BCC kafes yapısının şekil değiştirme oranı HIP ısıl işlemi sonrasında %12,06'dan %34,4 seviyelerine çıktığı ancak hasarlanmadığı görülmüştür.

- Tasarımda yaklaşık %35, üretimden sonra %21 hafifletmeye sahip Flourite kafes yapısının şekil değiştirme oranı HIP ısıl işlemi sonrasında %10,45'ten %20,35 seviyelerine çıktığı ve hasarlandığı görülmüştür.

Basma testi sonuçları ve grafikleri incelendiğinde HIP ısıl işlemi uygulamasının hem maksimum gerilme değerini hem de şekil değiştirme kabiliyetini ciddi oranda arttırdığı gözlenmiştir. Test sonuçları; HIP ısıl işlemi ile mikro yapı karakterizasyonu sağlanarak hafif kafes yapılarının basma yüküne maruz kalan uygulamalarda kullanılabileceğini göstermiştir.

HIP ısıl işleminin kafes yapısının basma davranışına olan etkisine ait sonuçlar bu tez kapsamındaki sonuçlar ile uyumludur [30].

Farklı kafes topolojilerinin aynı bağıl yoğunlukta dahi farklı yük taşıma mekanizmaları ve enerji sönümleme profilleri sunabildiğini ortaya koymakta topolojiye bağlı mekanik

davranış farklarıyla uyumluluk göstermektedir [1, 7].

Ti-6Al-4V oktahedral kafes yapılarında rapor ettiği üzere, HIP ile porozitenin düşmesi ve mikroyapının α + β fazına dönüşmesi, basma dayanımını ve kırılma gerinimini anlamlı şekilde artırabilmektedir [11].

Üretim sonrası tasarımdan farklı çıkan kafes yapılarının ağırlıkları dikkate alınarak birim ağırlık başına yük taşıma kabiliyeti analiz edilmiş ve Çizelge 4.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.5. Birim ağırlık başına yük taşıma kapasitesi

Numune Adı	Üretim Ağırlık, g	HIP'siz Maksimum Kuvvet, kN	HIP'li Maksimum Kuvvet, kN	HIP'siz Birim Ağırlık Başına Kuvvet, kN	HIP'li Birim Ağırlık Başına Kuvvet, kN
Dolu	4,27	94,985	94,986	22,245	22,245
BCC	3,08	52,461	94,999	17,033	30,844
Flourite	3,37	61,687	68,492	18,305	20,324

Çizelge 4.5'teki birim ağırlık başına yük taşıma kapasiteleri HIP'li ve HIP'siz olarak ayrı değerlendirilmiştir. HIP'siz durumda Flourite kafesin dayanım/ağırlık oranı daha yüksek iken HIP'li durumda BCC kafes kayda değer miktarda mukavemet artışı sağlayarak daha iyi performans göstermiştir.

Statik basma testleri sonucunda genel olarak şu eğilimler gözlenmiştir:

- Test sonuçları incelendiğinde kafes topolojisi özelinde yorumlamanın HIP'li ve HIP'siz sonuçlara bakılarak ayrı ayrı yapılması gerektiği ortaya çıkmıştır.

- Dolu küp yapısı yaklaşık 95 kN yük altında %10,3 şekil değiştirir iken BCC kafes yapısının aynı yük altında yaklaşık %34 şekil değiştirmesi enerjiyi sönümlemesi açısından üstün olduğunu açıkça göstermektedir. Bu durum BCC kafes yapısının HIP ısıl işlemi sonrası kirişler aracılığıyla yükü homojen bir şekilde iletebildiğini ve dolu küpe göre %27 boşluklu yapısı sayesinde şekil değiştirme kabiliyetinin üstün olduğunu göstermektedir.

- HIP ısıl işlemi uygulama imkânı olmadığında Flourite kafes yapısının daha yüksek gerilmelere maruz kalacak uygulamalarda kullanılabileceğini ancak şekil değiştirme kabiliyetinin önemli olduğu uygulamalarda BCC kafesin tercih edilebileceğini ortaya koymuştur.

- HIP'siz durumda BCC kafes yapısı Flourite kafes yapısına göre daha düşük gerilmede hasarlanırken şekil değiştirme kabiliyetinin daha yüksek olduğu (Şekil 4.11 ve 4.12) görülmüştür. Bu durumun sebebi olarak HIP'siz durumda daha kalın kiriş çapına sahip olan BCC kafesin her bir kiriş alanında daha fazla üretim hatasının var olması gösterilebilir. BCC kafesin her bir kirişinde üretim kaynaklı daha fazla kusurun var olması gerilme yığılmasını arttırmakta ve daha düşük maksimum yükte hasarlanmayı beraberinde getirmektedir.

- HIP ısıl işleminin BCC kafes topolojisi üzerinde hem yük taşıma kapasitesi hem şekil değiştirme kabiliyetini ciddi oranda arttırdığı ve bu nedenle kullanım alanına ve beklenen yapısal özelliklere göre HIP ısıl işleminin gerçekleştirilmesinin kritik olduğu gözlenmiştir.

- HIP'li durumda ise Flourite kafes yapısının daha düşük maksimum gerilmelerde hasarlandığı aynı zamanda daha düşük enerji emilimi gösterdiği gözlenmiştir.

- HIP ısıl işleminin BCC kafes yapısında daha etkili olmasının sebebi olarak ise yine kiriş çapının daha kalın olması gösterilebilir. Daha kalın kiriş çapına sahip olmak BCC kafes yapısındaki her bir kiriş içerisinde daha fazla üretim hatası getirmiştir. HIP ısıl işlemi sonrası ortadan kaldırılan hata miktarı BCC kafeste daha fazla olması ve daha kalın kiriş çapına sahip olması daha yüksek maksimum yük taşıma kabiliyetini beraberinde getirmiş ve dolayısıyla maksimum yükteki artış flourite kafesten daha yüksek olarak gerçekleşmiştir. BCC kafesin sayesinde daha kalın kirişlere sahip olması da göz önünde bulundurulursa flourite kafese göre daha fazla yük taşıması olağan bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.

- Hem yüksek gerilme altında çalışacak hem de şekil değiştirme kabiliyetinin önemli olduğu yapısal parçalarda HIP ısıl işleminin uygulanması halinde BCC kafes yapısı öne plana çıkmaktadır.

Bu tezde de benzer şekilde; gözeneklerin kaybolmasıyla gerilme yığılma bölgeleri azalmış, mikro ölçekte daha sünek bir deformasyon mekanizması devreye girmiş, böylece kafes yapılar yüksek gerinimlere kadar bütünlüğünü koruyarak enerji sönümleyebilir hale gelmiştir.

Özellikle BCC kafeslerde HIP sonrası plato bölgesinin daha stabil ve uzun hale gelmesi, bu topolojinin enerji sönümleyici eleman olarak kullanım potansiyelini artırmaktadır.

Basma testi sonucu kafes yapıları literatüre uyumlu olarak 45° kayma ekseninden hasarlanmıştır [39]. Bu çalışma kapsamında elde edilen basma test sonucundaki HIP'siz numunelere ait makro görüntüler Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te; HIP'li numunelere ait makro görüntüler Şekil 4.15. ve Şekil 4.16'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.13. HIP'siz BCC kafes basma testi kırılma yüzeyi



Şekil 4.14. HIP’siz Flourite kafes basma testi kırılma yüzeyi



Şekil 4.15. HIP’li BCC kafes basma testi yüzeyi



Şekil 4.16. HIP'li Flourite kafes basma testi kırılma yüzeyi

4.7. Çekme Testi Sonuçları

SLE ile üretimlerde meydana gelen yüksek soğuma hızı nedeniyle oluşan martenzit iç yapı düşük süneklik yüksek kırılganlığı beraberinde getirir. HIP ısıl işlemi sayesinde sünekliğin arttırılması sağlanmıştır. Bu çalışma kapsamında yapılan çekme testlerinde de literatüre paralel sonuçlar elde edilmiştir. Çekme testi sonrası numunelere ait görüntüler Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir.

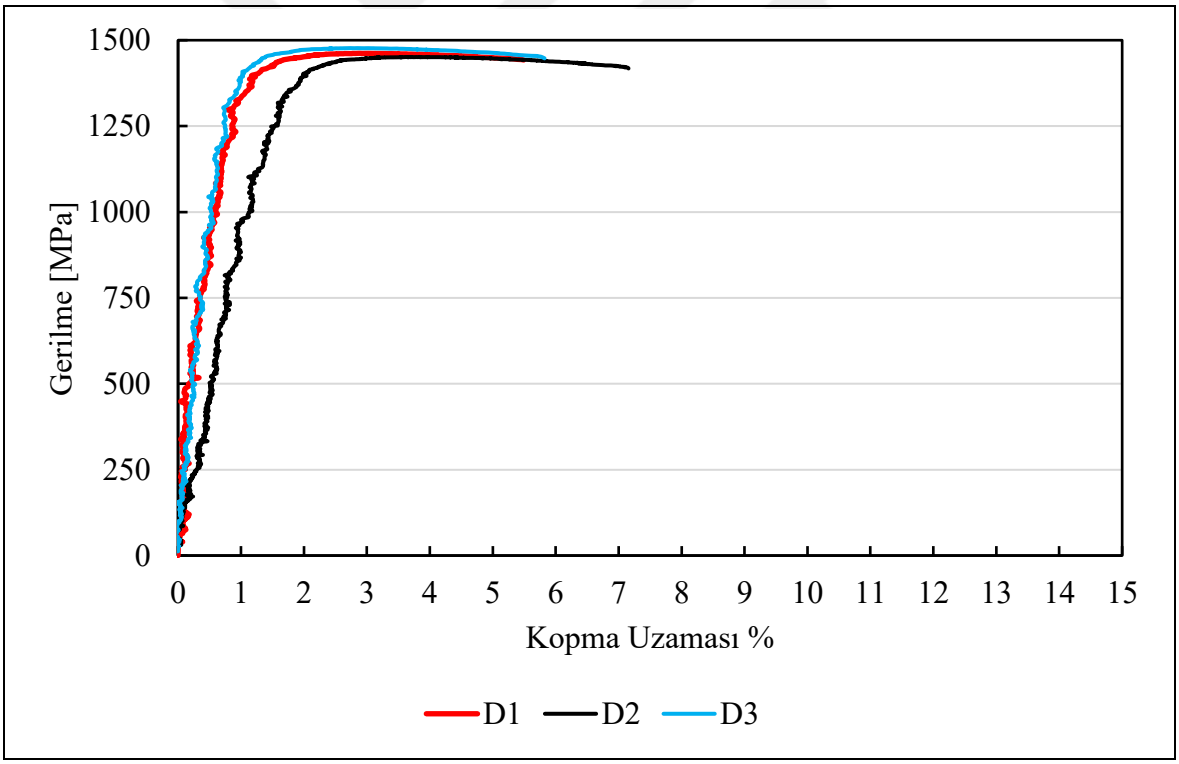


Şekil 4.17. HIP'siz çekme testi uygulaması sonrası numuneler

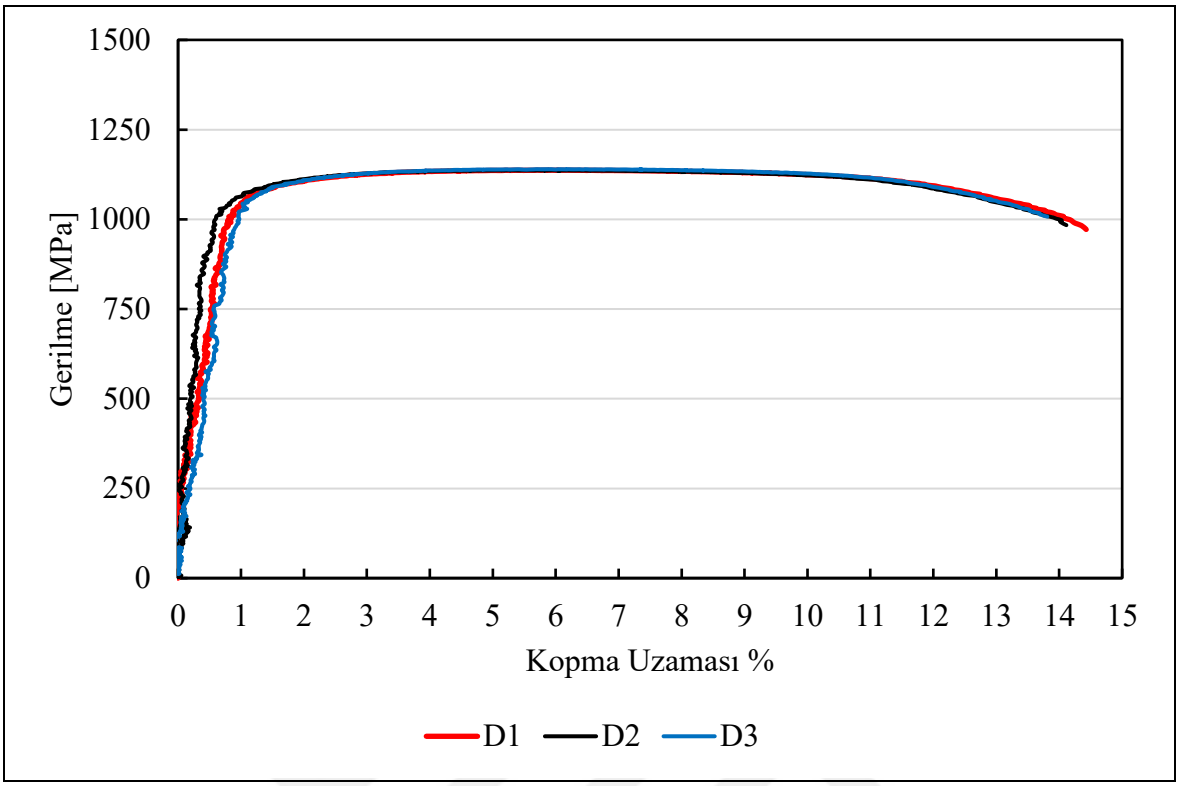


Şekil 4.18. HIP'li çekme testi uygulaması sonrası numuneler

HIP'siz dolu çekme test grafikleri Şekil 4.19'da HIP'li dolu çekme test grafikleri Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.19. HIP'siz dolu çekme testi grafikleri



Şekil 4.20. HIP'li dolu çekme testi grafikleri

Literatürde elde edilen akma, çekme mukavemetleri ve kopma uzaması değerleri bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ile uyumludur. Kısaca literatür sonuçları ve bu tez çalışması kapsamında elde edilen değerler aşağıdaki Çizelge 4.6'da özetlemiştir.

Çizelge 4.6. Çekme testi literatür sonuçları

Numune	Akma Mukavemeti, MPa	Çekme Mukavemeti, MPa	Kopma Uzaması, %	Kaynak
HIP'siz	1143	1219	4,89	[41]
HIP'siz	1150	1246	1,4	[42]
HIP'siz	967	1117	8,9	[33]
HIP'siz	1290	1462	6,15	Bu çalışma
HIP'li	888	974	18,5	[36]
HIP'li	912	1005	8,3	[25]
HIP'li	865	950	13	[37]
HIP'li	1050	1138	14,12	Bu çalışma

HIP'siz dolu numuneler için elde edilen gerilme–şekil değiştirme eğrileri, yüksek başlangıç eğimi ve daha yüksek maksimum çekme gerilmesi sergilemektedir. Ancak plastik deformasyon bölgesi nispeten sınırlı olup kopma daha düşük şekil değiştirme değerlerinde

gerçekleşmektedir. Numuneler arasında (D1–D3) eğriler arası saçılma, HIP'siz durumda mikroyapısal heterojenliğin ve artık gerilmelerin etkisini işaret etmektedir.

SLE yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V alaşımında kırılma yüzeyi morfolojisi, uygulanan HIP ısıl işleminin varlığına bağlı olarak belirgin şekilde farklılık göstermektedir.

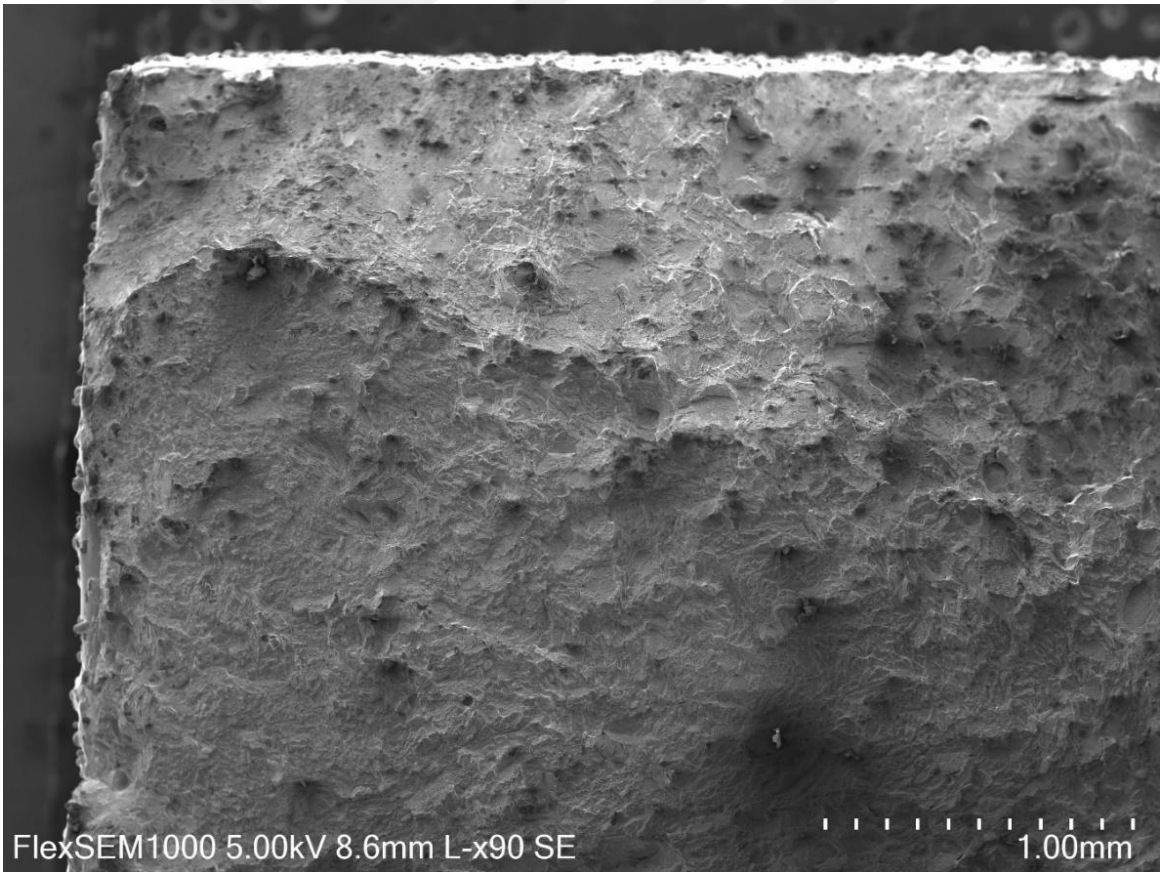
HIP'siz SLE Ti-6Al-4V numunelerde, kırılma yüzeyi çoğunlukla teraslı (terrace-like) ve fasetli bir morfoloji sergilemekte olup, bu yapı önceki β tanelerinin sütun benzeri geometrisi ve α′ martenzitik mikroyapının heterojenliği ile doğrudan ilişkilidir [25, 43]. Bu teraslı yapı, çatlak ilerlemesinin büyük ölçüde α tane sınırları ve önceki β tane sınırları boyunca, sınırlı plastik deformasyon eşliğinde gerçekleştiğini göstermekte ve makro ölçekte gevrek benzeri bir kırılma davranışı izlenimine yol açmaktadır [44, 45]. Kırılma yüzeyinde yer yer çukurcuklar gözlense de erken şekil değiştirme yerelleşmesi ve mikro boşlukların sınırlı bölgelerde hızla birleşmesi nedeniyle, çatlak ilerlemesi düzlemsel ve enerji tüketimi düşük bir karakter sergilemektedir; bu durum literatürde psödo-gevrek kırılma olarak tanımlanmaktadır [25, 47].

SLE yöntemiyle üretilmiş üretildiği gibi Ti-6Al-4V alaşımında çekme altında kırılma mekanizması, hızlı katılaşma sonucu oluşan heterojen α′ martenzit mikro yapı, iri sütun benzeri önceki β taneleri ve bu taneler içerisindeki kristalografik yönelim farklılıklarının bir sonucu olarak gelişmektedir [25, 43]. Yüksek soğuma hızları nedeniyle β fazından dönüşen metastabil α′ martenzit, yüksek dislokasyon yoğunluğu ve sınırlı kayma sistemleri nedeniyle yüksek dayanım ancak düşük süneklik sergilemektedir [16, 47]. Plastik deformasyon esas olarak prizmatik kayma sistemleri üzerinden gerçekleşmekte olup, yükleme ekseniyle yaklaşık 45° yönelimli ve yüksek Schmid faktörüne sahip α′ lamellerinde şekil değiştirme erken aşamalarda yerelleşmektedir [45, 48]. Bu yerelleşme, özellikle yüksek en-boy oranına sahip birincil α′ lamelleri ve aynı kristalografik varyanta sahip α′ kolonileri içerisinde yoğunlaşmakta ve deformasyonun tüm kesite homojen olarak yayılmasını engellemektedir [25, 44]. Yerel dislokasyon yığılmaları ve kayma uyumsuzluğu sonucunda, önceden var olmayan mikro boşluklar deformasyon sırasında maksimum kayma gerilmesi düzlemleri boyunca (yaklaşık 45°) çekirdeklenmekte ve birleşmektedir [46]. Mikro boşluk birleşmesiyle oluşan çatlaklar, baskın olarak α tane sınırları ve devamında önceki β tane sınırları boyunca ilerleyerek taneler arası kırılma karakteri göstermektedir [25, 45]. Kırılma yüzeylerinde gözlenen teras benzeri morfoloji, α lamellerine kıyasla boyut olarak daha

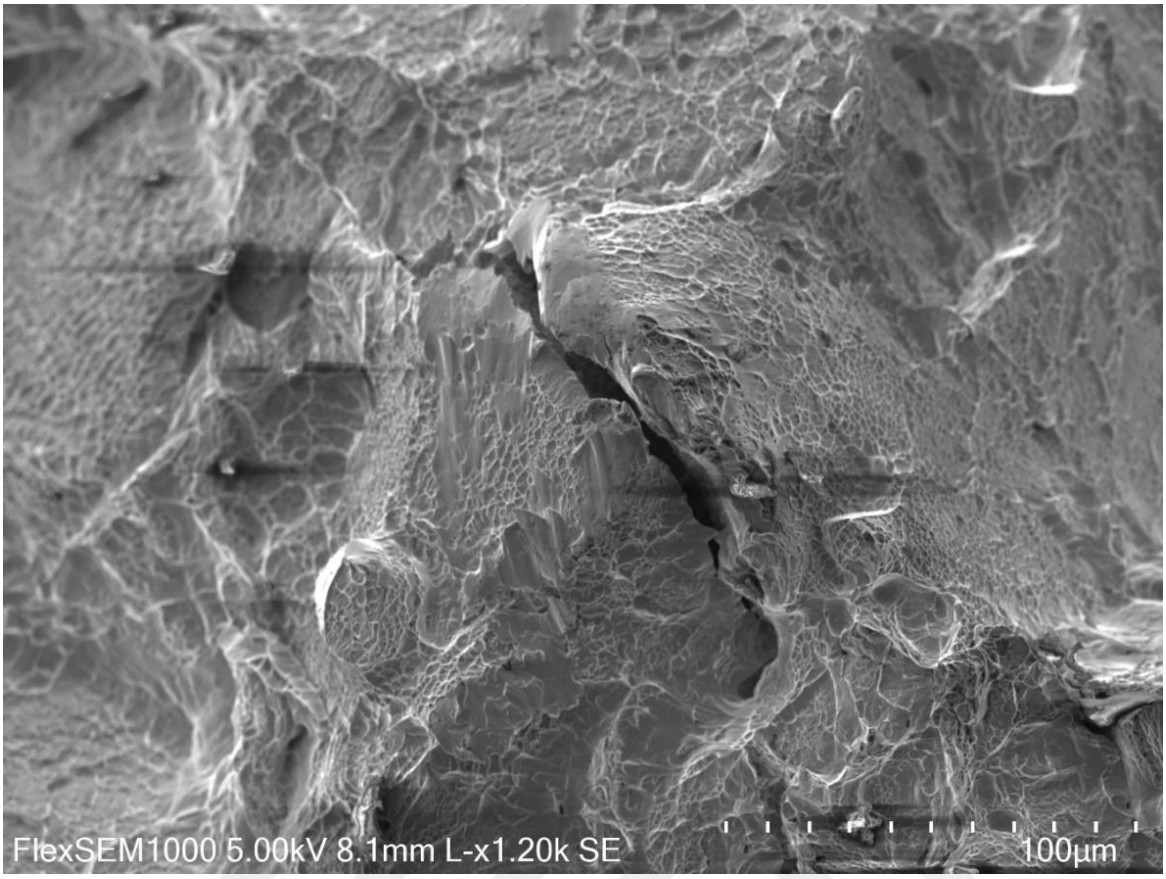
büyük olan önceki β taneleriyle uyumlu olup, gevrek kopmadan ziyade yerel plastik deformasyon içeren bir çatlak ilerleme mekanizmasına işaret etmektedir [43, 44].

Sonuç olarak, SLE Ti-6Al-4V alaşımında mikro ölçekte boşluk oluşumu ve birleşmesi gerçekleşmesine rağmen, erken şekil değiştirme yerelleşmesi nedeniyle makroskobik ölçekte düşük toplam uzama ve ani kopma ile karakterize edilen psödo-gevrek bir kırılma davranışı ortaya çıkmaktadır [25, 46]. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen HIP'siz numunelerdeki makro ve mikro gevrek kırılma yüzeylerinin literatür ile bire bir uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Şekil 4.21'de HIP'siz dolu numune için kırılma yüzeyi incelemesi literatür ile uyumlu olarak [33] berligin şekilde gevrek kırılma davranışı sergilemiştir.



Şekil 4.21. HIP'siz dolu çekme numunesi makro kırılma yüzeyi incelemesi



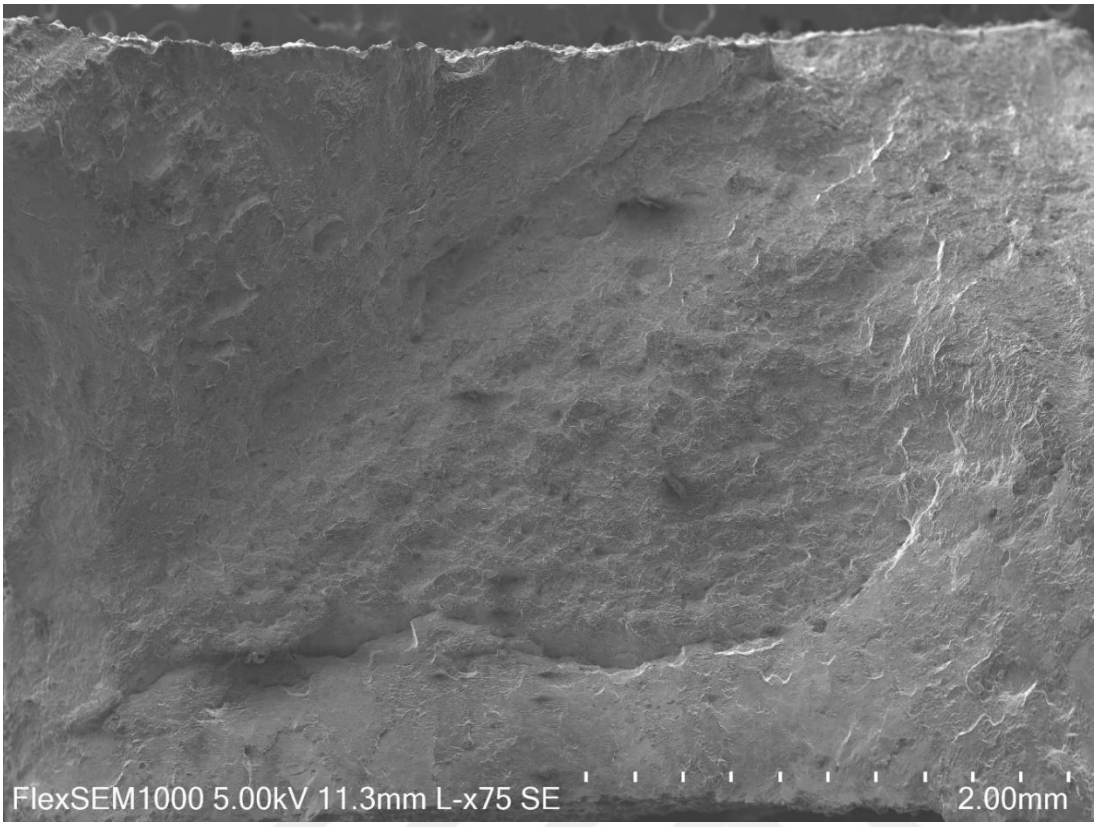
Şekil 4.22. HIP'siz dolu çekme numunesi mikro kırılma yüzeyi incelemesi

HIP'li SLE yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V numunelerde, kırılma yüzeyi morfolojisi tipik olarak cup-and-cone karakteri göstermekte ve bu durum sünek kırılmanın baskın hâle geldiğini ortaya koymaktadır [43, 47]. HIP işlemi sırasında yüksek sıcaklık ve izostatik basınç etkisiyle α′ martenzitik yapı, daha dengeli α + β lamelli mikro yapıya dönüşmekte, iç gözenekler büyük ölçüde kapanmakta ve artık gerilmeler giderilmektedir [16, 48]. Bu mikro yapısal iyileşme sayesinde plastik deformasyon daha homojen dağılmakta, çekme sırasında belirgin boyun verme, merkezde lifsi (fiber) bölge ve çevrede eğimli kayma dudakları (shear lips) içeren klasik cup-and-cone kırılma geometrisi oluşmaktadır [45]. Kırılma yüzeyinde gözlenen yoğun ve derin çukurcuklar, mikro boşluk çekirdeklenmesi ve birleşmesiyle kontrol edilen yüksek sünek kırılma mekanizmasına işaret etmektedir [44].

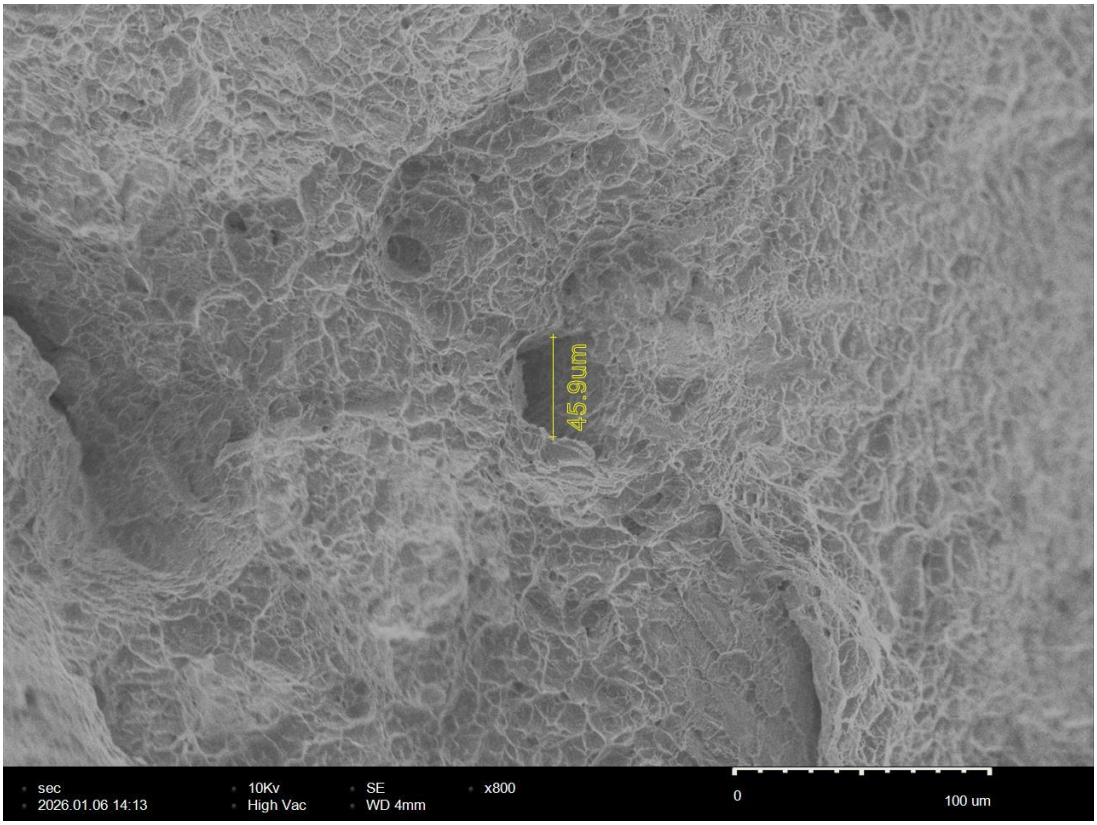
SLE yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V alaşımına uygulanan HIP işlemi sonrasında kırılma davranışı, inşa edildiği duruma kıyasla belirgin şekilde değişmekte olup, bu değişim esas olarak mikro yapısal dönüşüm, gözeneklerin kapanması ve dislokasyon hareketinin yeniden düzenlenmesi ile ilişkilidir [25, 46]. HIP işlemi sırasında uygulanan yüksek sıcaklık ve

izostatik basınç etkisiyle, inşadan çıktığı durumda baskın olan metastabil α′ martenzit, daha dengeli α + β lamelli mikro yapıya dönüşmekte ve artık gerilmeler büyük ölçüde giderilmektedir [43, 48]. Bu mikro yapısal dönüşüm, dislokasyon yoğunluğunu azaltarak plastik deformasyonun daha homojen bir şekilde dağılmasını sağlamakta ve erken şekil değiştirme yerelleşmesini sınırlandırmaktadır [16]. HIP sonrası mikroyapıda, artan β fazı oranı ve kalınlaşan α lamelleri, kayma sistemlerinin daha etkin aktive olmasına olanak tanımakta; plastik deformasyon hem prizmatik hem de bazal kayma sistemleri üzerinden daha dengeli biçimde gerçekleşmektedir [45]. Bununla birlikte, HIP işlemiyle birlikte α lamel kalınlığının artması, etkin kayma uzunluğunu artırarak yerel gerilme yığılmalarını sınırlamakta, ancak aynı zamanda akma ve çekme dayanımında kısmi bir düşüşe neden olmaktadır [47]. Çekme yüklemesi sırasında hasar, inşadan çıktığı durumda olduğu gibi erken aşamada α′ lamelleri içerisinde yoğunlaşmak yerine, daha ileri deformasyon seviyelerinde mikro boşluk çekirdeklenmesi ve birleşmesi yoluyla gelişmekte; bu mikro boşluklar çoğunlukla α/β faz ara yüzeylerinde ve tane sınırlarında oluşmaktadır [25, 46]. HIP uygulanmış numunelerin kırılma yüzeyleri, genellikle yoğun ve derin çukurcuklarla karakterize sünek kırılma morfolojisi sergilemekte olup, bu durum plastik deformasyon kapasitesinin arttığını göstermektedir [43, 44]. Önceki β tane sınırları boyunca çatlak ilerlemesi hâlen gözlenebilse de HIP sonrası bu sınırlar çatlaklar için baskın ve keskin ilerleme yolları olmaktan çıkmakta, çatlak ilerleme yolu daha zikzaklı ve enerji tüketici bir karakter kazanmaktadır [45].

Sonuç olarak, HIP uygulanmamış SLE Ti-6Al-4V numunelerde kırılma, önceki β tanelerine bağlı teraslı ve taneler arası çatlak ilerlemesi ile karakterize edilen, makro olarak gevrek görünümlü bir mekanizma sergilerken; HIP uygulanmış numunelerde mikro yapısal homojenleşme ve gözeneklerin kapanması sayesinde cup-and-cone tipi sünek kırılma baskın hâle gelmektedir. Bu durum, HIP işleminin yalnızca sünekliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda kırılma modunu kökten değiştirerek çatlak ilerlemesini daha kararsız ve enerji tüketici bir yapıya dönüştürdüğünü açıkça ortaya koymaktadır [25, 46]. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen HIP'siz numunelerdeki makro ve mikro gevrek kırılma yüzeylerinin literatür ile bire bir uyumlu olduğu gözlenmiştir.



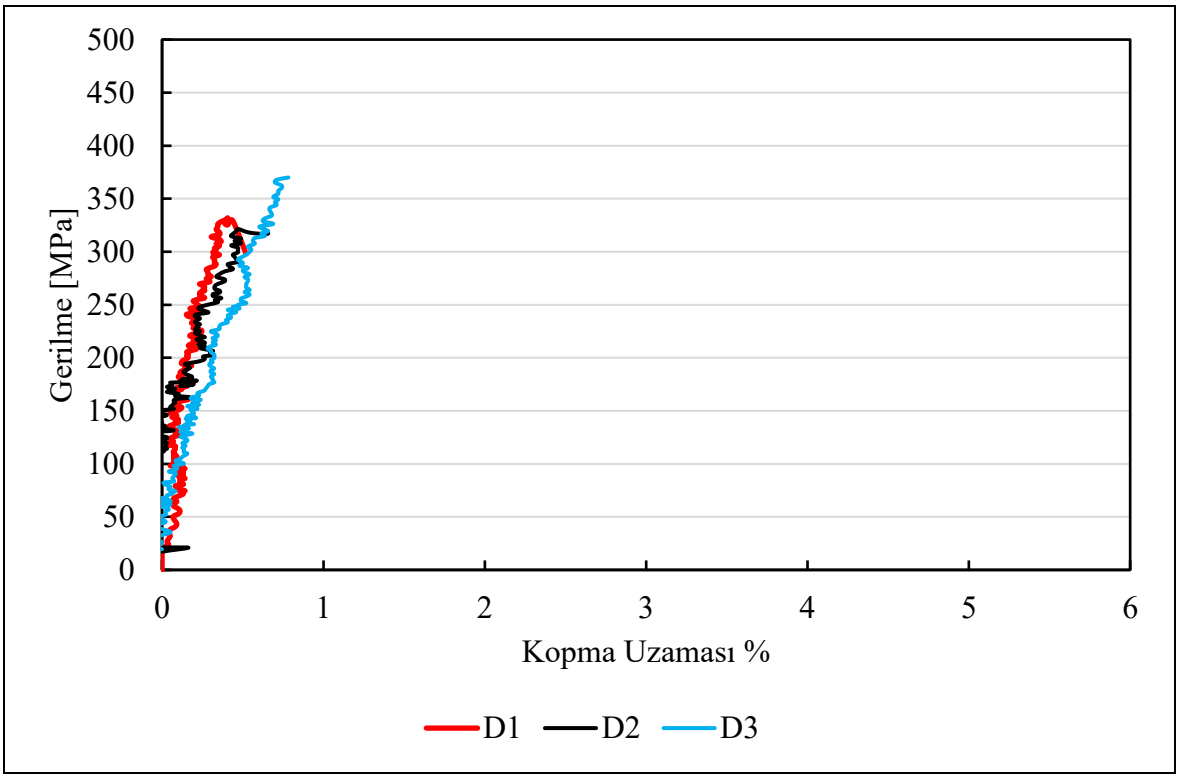
Şekil 4.23. HIP'li dolu çekme numunesi makro kırılma yüzeyi incelemesi



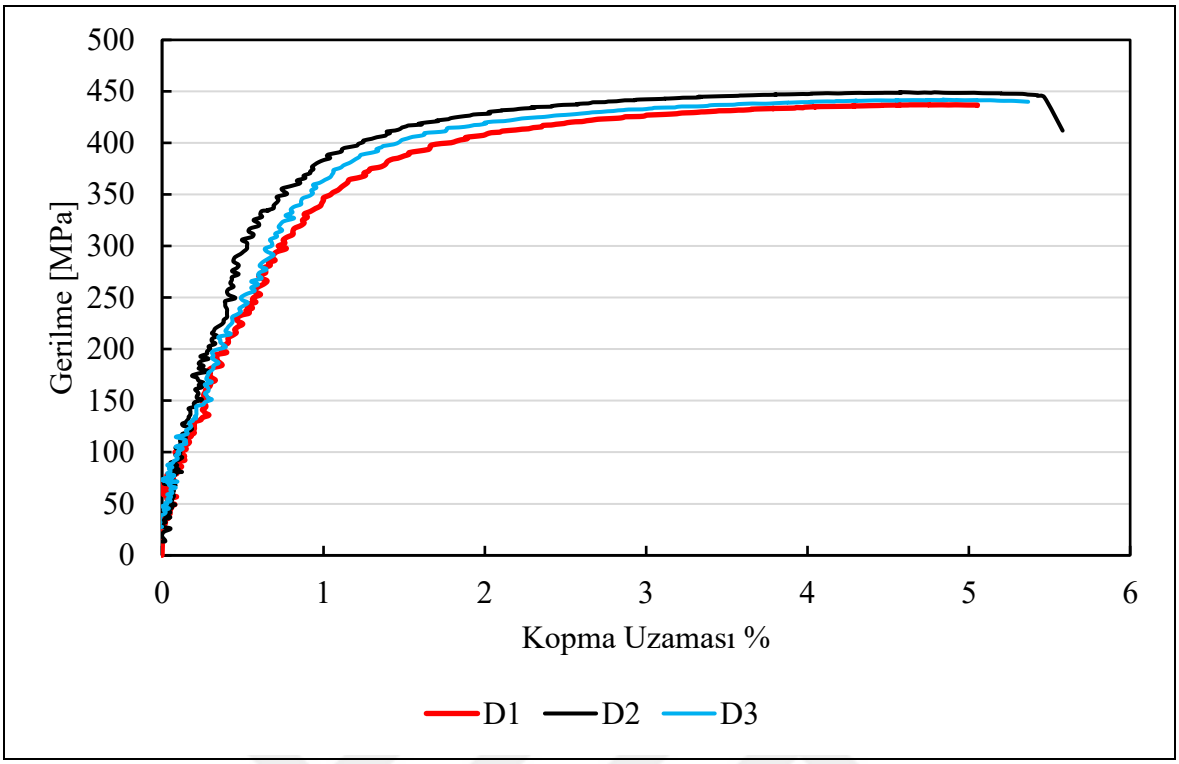
Şekil 4.24. HIP'li dolu çekme numunesi mikro kırılma yüzeyi incelemesi

HIP'li dolu numune için kırılma yüzeyi kırılma yüzeyi incelemesi literatür ile uyumlu olarak berligin şekilde sünek kırılma davranışı sergilemiştir [37].

HIP uygulanmış dolu numunelerde maksimum çekme gerilmesi bir miktar düşmesine rağmen, plastik deformasyon bölgesinin belirgin şekilde uzadığı ve kopma uzamasının arttığı gözlenmiştir. Eğrilerin birbirine oldukça yakın seyretmesi, HIP işlemi sonrası mekanik davranışın daha tekrarlanabilir ve homojen hale geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.25. HIP'siz BCC kafes çekme testi grafikleri

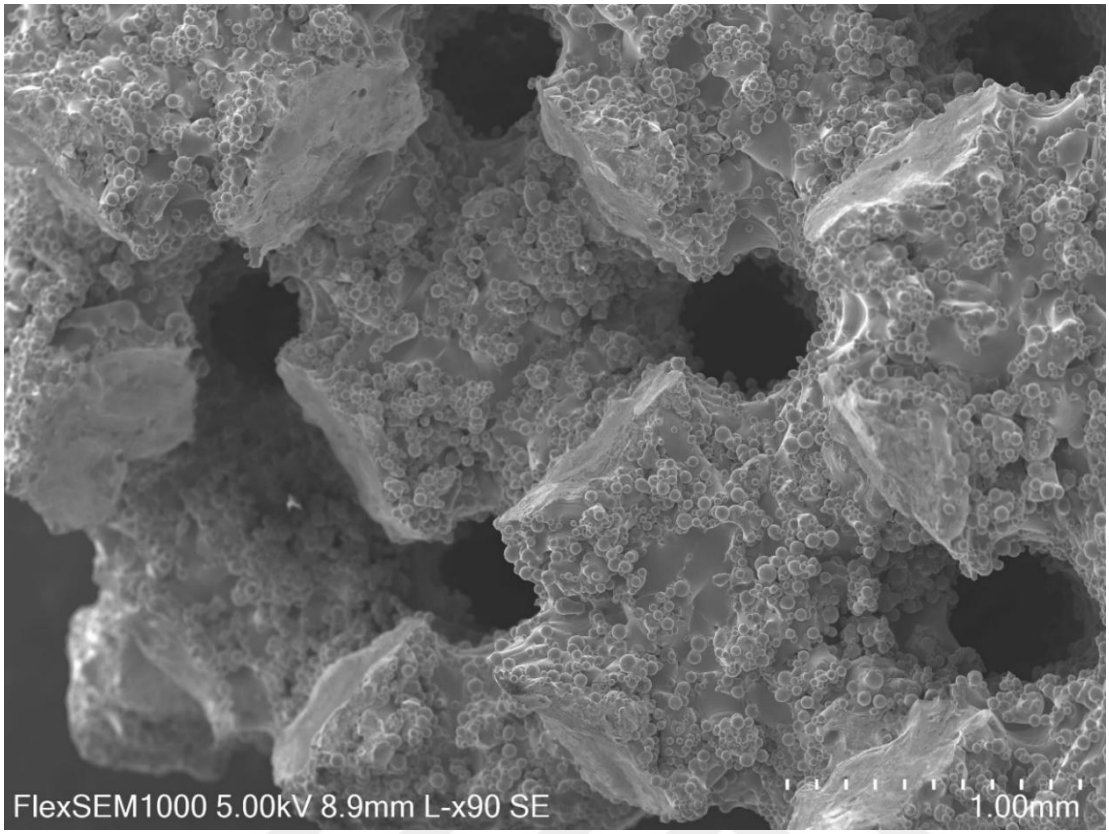


Şekil 4.26. HIP'li BCC kafes çekme testi grafikleri

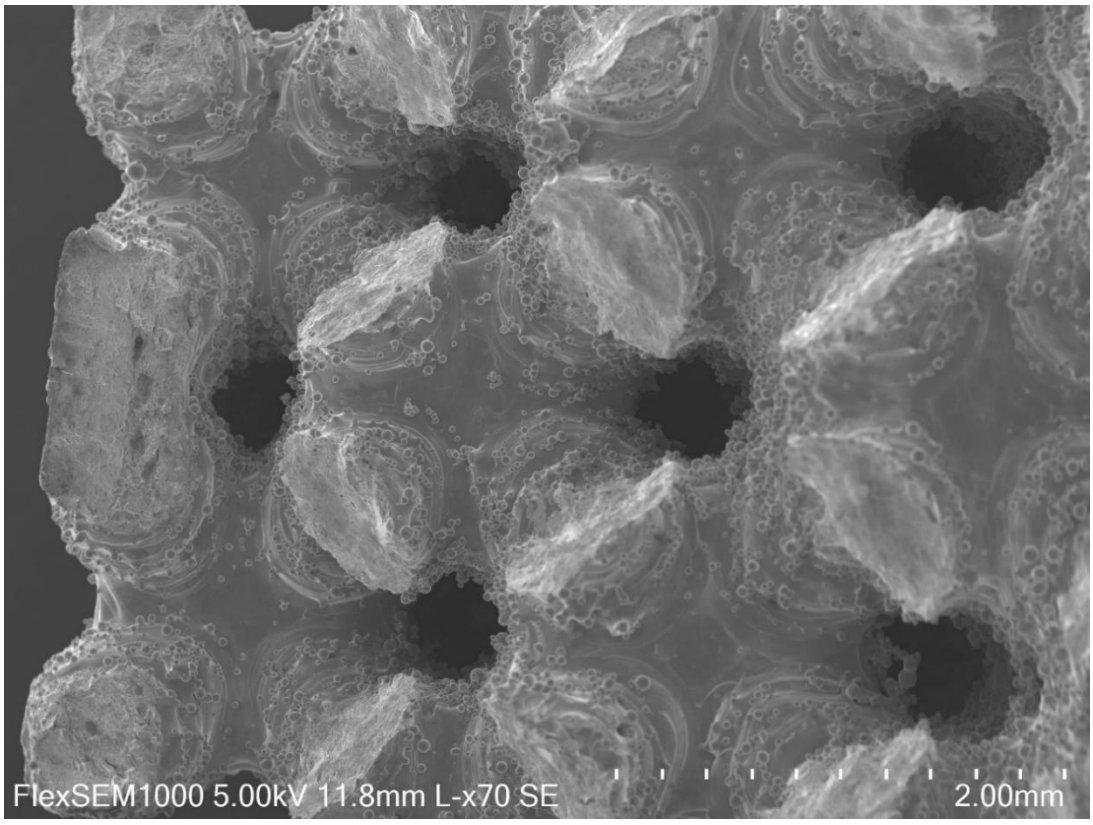
Şekil 4.25'te HIP'siz BCC numunelerde, çekme sırasında gerilme artışı düzensiz ve dalgalı bir karakter sergilediği görülmektedir. Düşük maksimum gerilme seviyeleri ve sınırlı şekil değiştirme kapasitesi, erken kiriş kırılmaları ve kusur kaynaklı lokal hasar mekanizmalarına işaret etmektedir. Numuneler arasında belirgin saçılma gözlenmesi, kusur dağılımının çekme davranışı üzerinde baskın olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.26'da HIP'li BCC numunelerde ise gerilme–şekil değiştirme eğrileri daha düzgün ve kararlı bir artış sergilediği görülmektedir. Maksimum çekme gerilmesi belirgin şekilde artmış, plastik deformasyon bölgesi genişlemiş ve kopma daha yüksek şekil değiştirme değerlerinde meydana gelmiştir. Eğriler arasındaki farkların azalması, HIP işleminin BCC kafes yapılarda mekanik kararlılığı önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

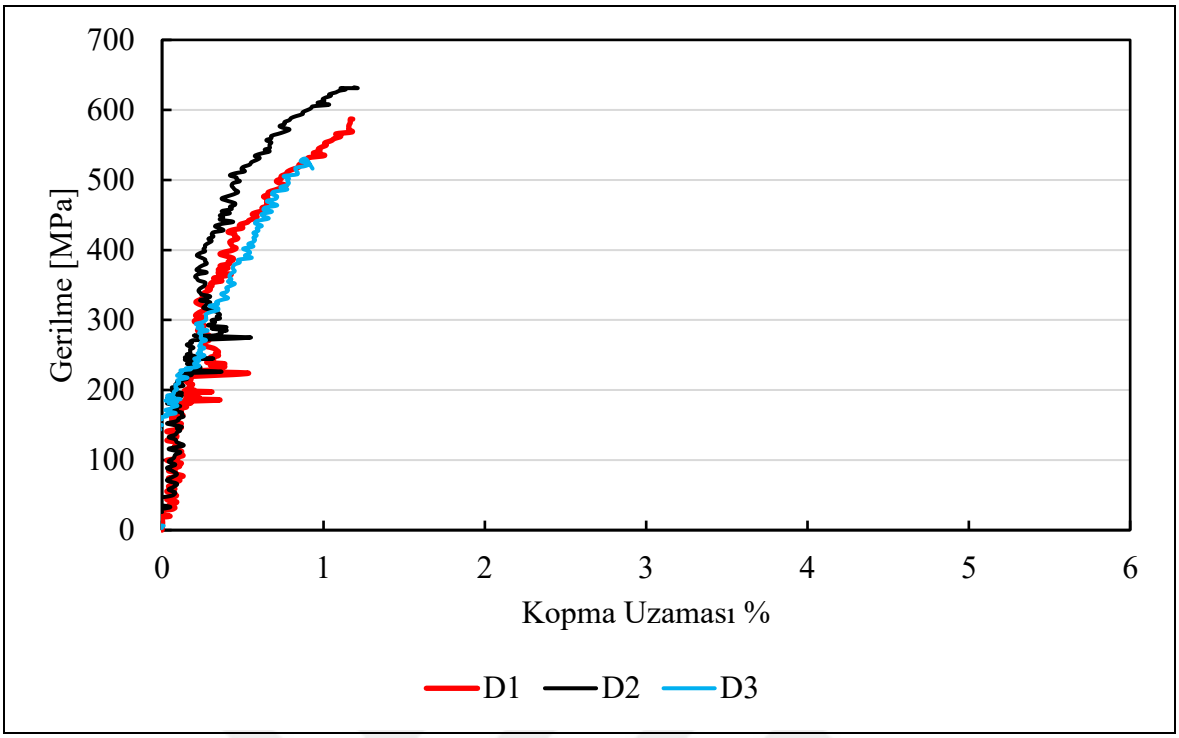
BCC topolojisi için HIP işlemi, çekme yükü altında hem dayanımı hem de deformasyon kararlılığını artırarak bu yapıyı güvenilir taşıyıcı kafes yapılar için daha uygun hale getirmiştir.



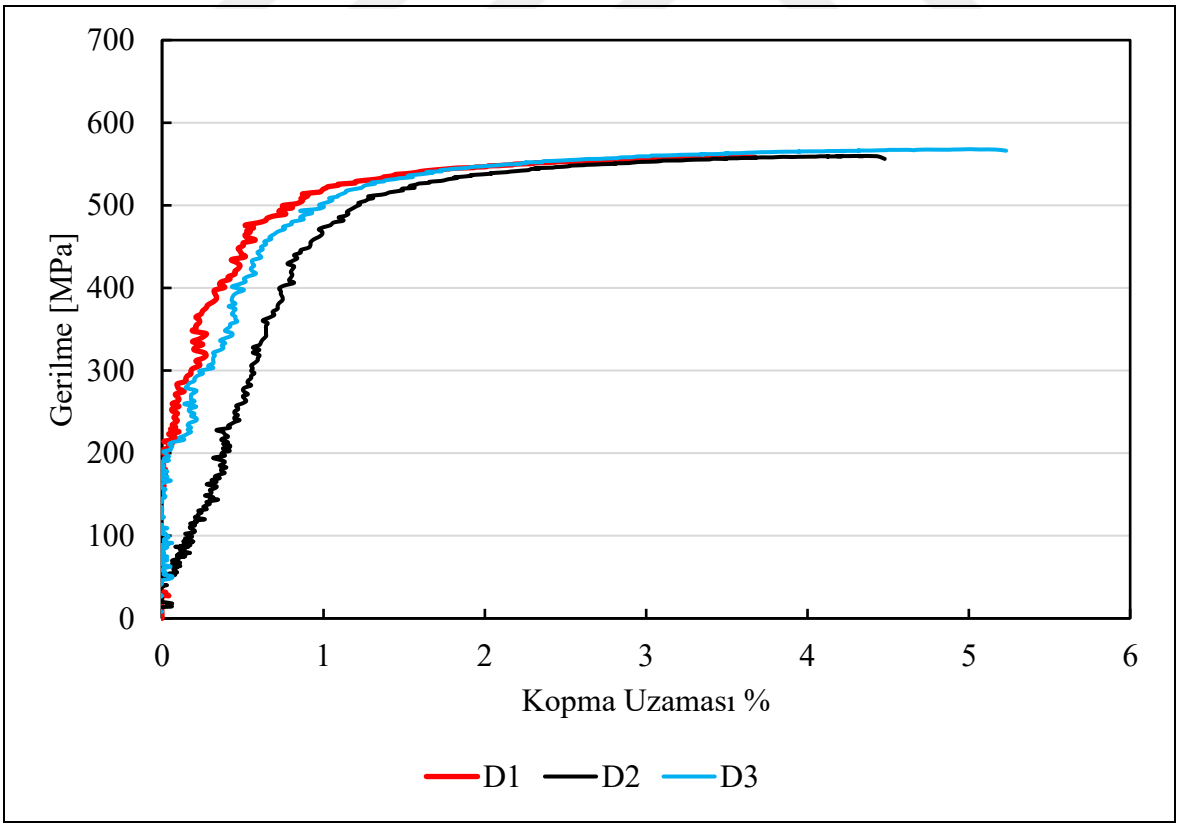
Şekil 4.27. HIP’siz BCC kafes çekme numunesi makro kırılma yüzeyi incelemesi



Şekil 4.28. HIP’li BCC kafes çekme numunesi makro kırılma yüzeyi incelemesi

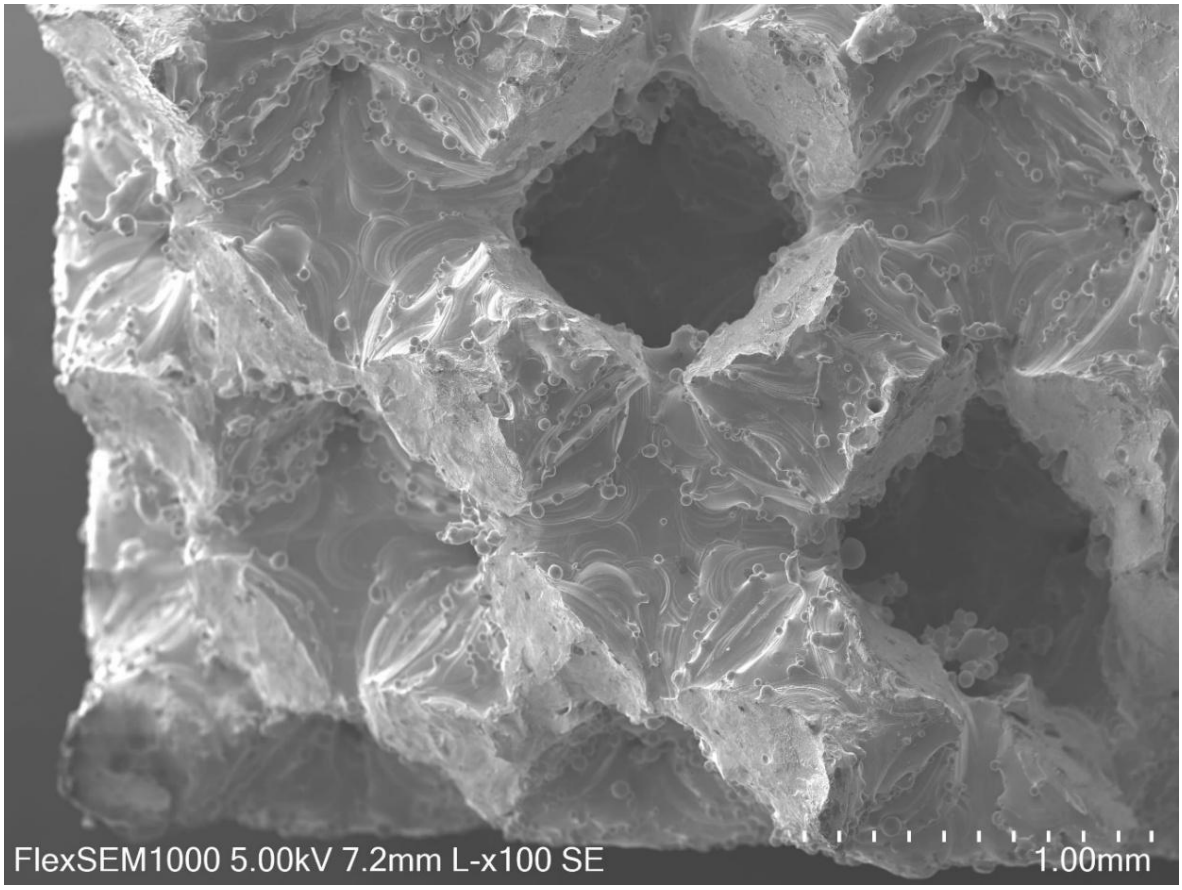


Şekil 4.29. HIP'siz Flourite kafes çekme testi grafikleri

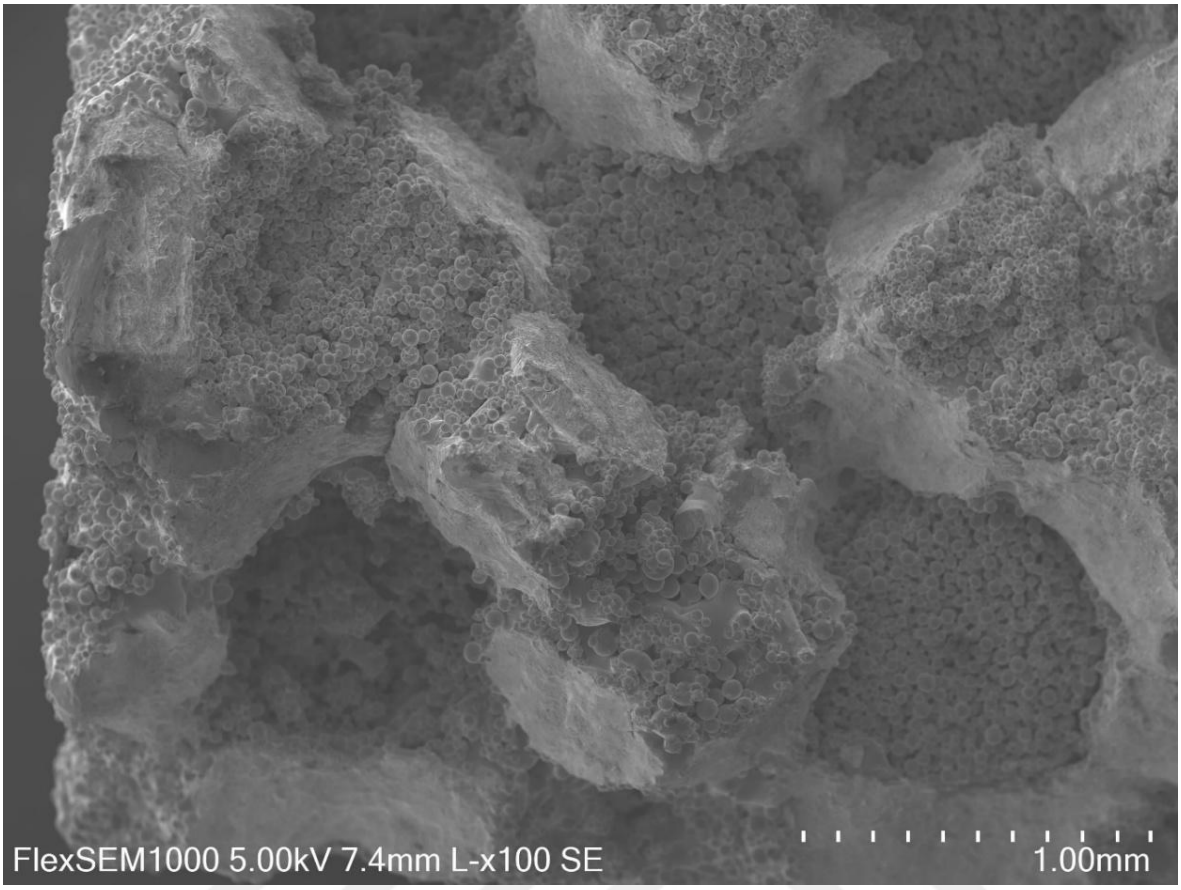


Şekil 4.30. HIP'li Flourite kafes çekme testi grafikleri

HIP’siz flourite numunelerin, BCC yapılarla kıyaslandığında daha yüksek çekme gerilmelerine ulaşmakla birlikte, plastik deformasyon kapasitesi sınırlı olduğu görülmektedir. Gerilme–şekil değiştirme eğrilerinde daha keskin bir kopma davranışı görülmekte, bu durum flourite topolojisinin HIP’siz durumda daha gevrek bir karakter sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.31. HIP’siz Flourite kafes çekme numunesi makro kırılma yüzeyi incelemesi



Şekil 4.32. HIP'li Flourite kafes çekme numunesi makro kırılma yüzeyi incelemesi

HIP'li flourite numunelerde ise hem maksimum çekme gerilmesi korunmakta hem de plastik deformasyon bölgesi belirgin şekilde genişlemektedir. Kopma uzamasındaki artış, flourite topolojisinin HIP işlemi sonrası daha dengeli bir dayanım–süneklik kombinasyonu sunduğunu göstermektedir. Eğrilerin yüksek uyumu, mikroyapısal sürekliliğin sağlandığını desteklemektedir.

HIP işlemi, flourite kafes yapıların çekme altındaki gevrek karakterini azaltarak daha sünek ve hasar toleranslı bir davranış kazandırmıştır.

Çekme testi grafikleri, HIP ısıl işleminin Ti-6Al-4V numunelerde dayanım–süneklik dengesini süneklik lehine yeniden düzenlediğini göstermektedir. Özellikle kafes yapılarda HIP işlemi, kusur kaynaklı erken hasarı bastırarak daha kararlı ve homojen bir çekme davranışı sağlamıştır. Flourite topolojisi yüksek dayanım sunarken, BCC topolojisi daha kontrollü deformasyon sergilemiş; HIP işlemi her iki yapının mekanik güvenilirliğini belirgin şekilde artırmıştır.

Çizelge 4.7'de HIP ısıl işlemi uygulanan ve uygulanmayan test numunelerin çekme test sonuçlarının ortalama değerleri özetlenerek verilmiştir.

Çizelge 4.7. Çekme testi sonuçlarının tablosu

Numune	HIP Isıl İşlemsiz			HIP Isıl İşlemli		
	Akma Mukavemeti, Mpa	Kopma Mukavemeti, Mpa	Uzama %	Akma Mukavemeti, Mpa	Kopma Mukavemeti Mpa	Uzama %
Dolu	1290	1462	6,15	1050	1138	14,12
BCC	335	341	0,64	370	436	5,33
Flourite	520	583	1,1	490	560	4,46

Test sonuçları özeti verilen Çizelge 4.7. analiz edilecek olur ise dolu çekme çubuğunda beklenildiği şekilde kopma uzamasındaki belirgin artış ile akma ve çekme mukavemetlerinde bir düşüş gözlenmiştir. Ancak Flourite ve BCC kafes yapılarında kopma uzamasında meydana gelen kayda değer artışa rağmen akma ve çekme mukavemetleri çok yüksek bir düşüş göstermemiştir. Bu durum süneklikteki artış ile mukavemetten verilen tavizi kafes yapılarında görmediğimiz anlamına gelmektedir. Bu sonuçlara bakarak kafes yapılardaki ağırlık düşüşü nedeniyle meydana gelen mukavemet düşüşüne ek olarak yapıya süneklik kazandıran HIP ısıl işleminin BCC kafes için ekstra bir mukavemet kaybına sebebiyet vermediği görülmektedir. HIP ısıl işlemi sonrası dolu numunenin mukavemet değerleri yaklaşık %18-22 azalma gösterirken Flourite kafes yapısında yaklaşık %3-5 arasında bir azalma sergilemiştir. BCC kafes yapısında HIP ısıl işleminde mukavemet değerleri düşüşün aksine artış ile sonuçlanmıştır.

Bu sonuçlar, geleneksel olarak basma yüklemesi altında daha çok kendine yer bulan kafes yapılarının çekme yüküne maruz kalacağı uygulamalarda da kullanılabileceği yönünde umut vermektedir. Test edilecek farklı kafes yapıları, aşamalı kafes yapıları, kiriş çaplarında çapılacak değişiklikler ile umut vaat eden daha iyi mukavemet değerlerine ulaşılabileceği öngörülmektedir.

Kafes yapıları geleneksel olarak basma yüklerine maruz kalacağı alanlarda kendine yer bulabilmektedir. Bu tez kapsamında çekme yüklemesine karşı kafes yapılardaki hafifletmenin mekanik özelliklerde nasıl bir etki yarattığı analiz edilmek istenmiştir.

Ti-6Al-4V dolu çekme çubukları ile BCC ve Flourite kafes içeren çekme çubuklarının karşılaştırılması, kafes yapılarının geleneksel çekme davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymak açısından anlamlıdır.

Bu kapsamda tasarlanan çekme numuneleri üzerinden yapılan çekme testlerinde kafes yapılarından Flourite kafes içeren çekme çubuklarının akma ve çekme dayanımı, dolu çubuğa kıyasla düşmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur; zira taşıyıcı kesit alanının bir kısmı boşluklara ayrılmakta ve yük, kafes kirişler üzerinden iletilmektedir. BCC kafes yapısı içeren çekme çubuklarında ise akma ve çekme mukavemeti değerleri beklenenin aksine artış göstermiştir. Bu durum gelecek çalışmalarda BCC kafes yapısının farklı birim hücre boyutlarında test edilecektir.

Testlerden elde edilen ve daha önce kapsamlı bir şekilde verilen sonuçlar analiz edilecek olur ise:

- HIP'li BCC numunedeki dolu numuneye göre %30 hafifletmenin UTS'i %61 oranında düşürdüğü,

- HIP'li BCC numunedeki dolu numuneye göre %30 hafifletmenin yüzde uzamayı %62 oranında düşürdüğü,

- HIP'li Flourite numunedeki dolu numuneye göre %24 hafifletmenin UTS'i %50,8 oranında düşürdüğü,

- HIP'li Flourite numunedeki dolu numuneye göre %24 hafifletmenin yüzde uzamayı %68 oranında düşürdüğü,

- HIP ısıl işlemi BCC numunede kopma uzamasını HIP'siz BCC numuneye göre 8 katına çıkardığı,

- HIP ısıl işlemi Flourite numunede kopma uzamasını HIP'siz Flourite numuneye göre 4 katına çıkardığı gözlenmiştir.

Tüm bu sonuçlara göre çekme yüklerine karşın %24-30 arası hafifletmenin mekanik özellikleri dayanım açısından ciddi oranda düşürdüğü gözlenmiştir. Bu nedenle hafifletmenin kritik olduğu ancak mukavemet isterlerinin yüksek olduğu uygulamalarda potansiyel kafes yapılarının kullanımı için alternatif kafes yapıları ve tasarımları üzerinde çalışılması gerektiği açıktır.

HIP ısıl işleminin geleneksel olarak dolu malzemelerde kopma uzamasını arttırdığı aynı zamanda akma ve kopma mukavemetlerini düşürdüğü bilinmektedir. Bu tez kapsamında test edilen BCC ve Flourite kafes yapılarında bu duruma ters olarak kopma uzaması yüksek oranda artarken kopma mukavemetinde bir düşüş gözlenmemiştir. Bu durum farklı kafes yapılarında test edilecektir.

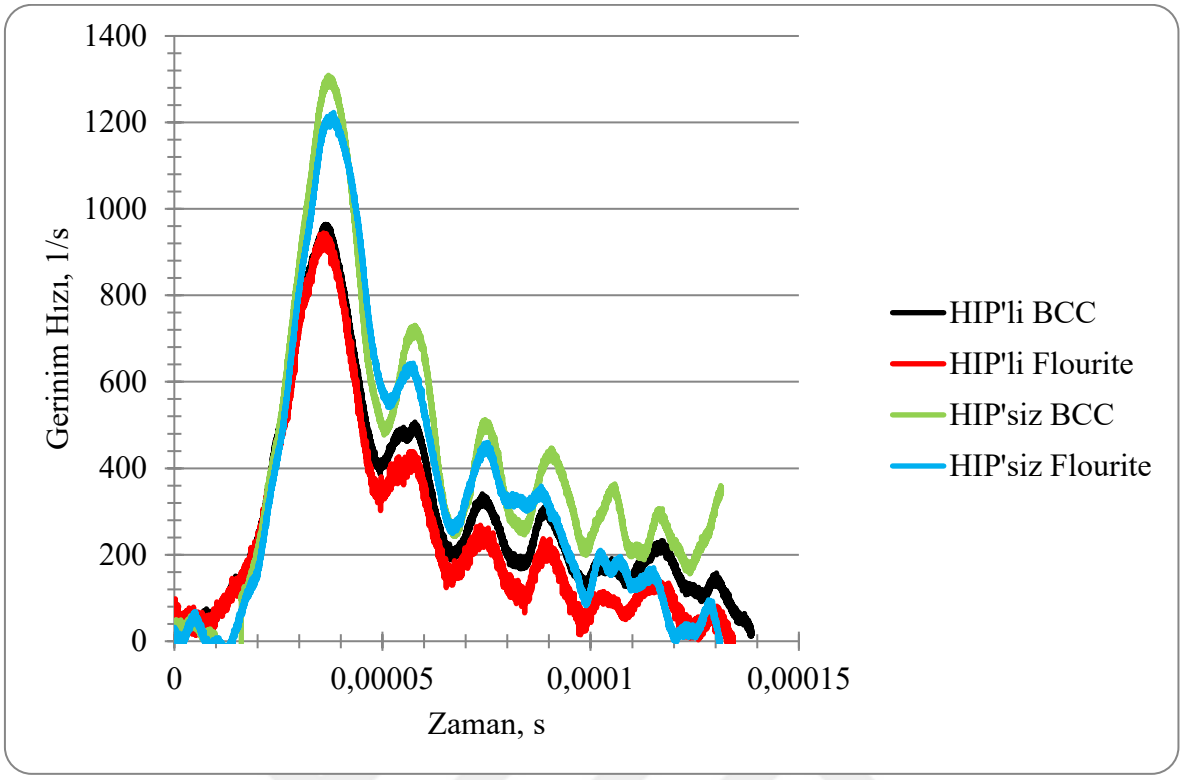
4.8. Split Hopkinson Basınç Barı Testi Sonuçları

Bu çalışma kapsamında HIP'siz Flourite ve BCC kafes yapıları aynı nominal darbe koşullarında gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, ortalama gerinim hızı değerleri numune durumuna bağlı olarak farklılık göstermektedir. HIP uygulanmış numuneler, daha düşük ve kararlı ortalama gerinim hız değerleri sergilemiştir. HIP'siz numunelerde daha yüksek ortalama gerinim hızı, daha dalgalı deformasyon süreci gözlenmiştir. Bu durum, HIP işleminin deformasyon sırasında daha kontrollü bir plastik akış sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.

SHPB testlerinde nominal darbe koşulları aynı olsa da numunenin efektif rijitliği, hasar ilerleme biçimi ve enerji sönümleme kapasitesi farklı olduğu için ölçülen ortalama gerinim hızı değerleri değişmektedir.

Gerinim hızı, sadece darbe hızına değil numunenin tepkisine bağlıdır. SHPBT'de ölçülen şekil değiştirme hızı, gelen dalganın tamamının numune tarafından ne ölçüde plastik deformasyona dönüştürüldüğüne bağlıdır. Bu nedenle yukarıdaki grafik analiz edilerek çıkarılan aşağıdaki tabloda verildiği üzere gerinim hızları numune özelinde farklılık göstermektedir.

Şekil 4.33'te SHPBT'de tüm numuneler için elde edilen gerinim hızı-zaman grafikleri verilmiştir.



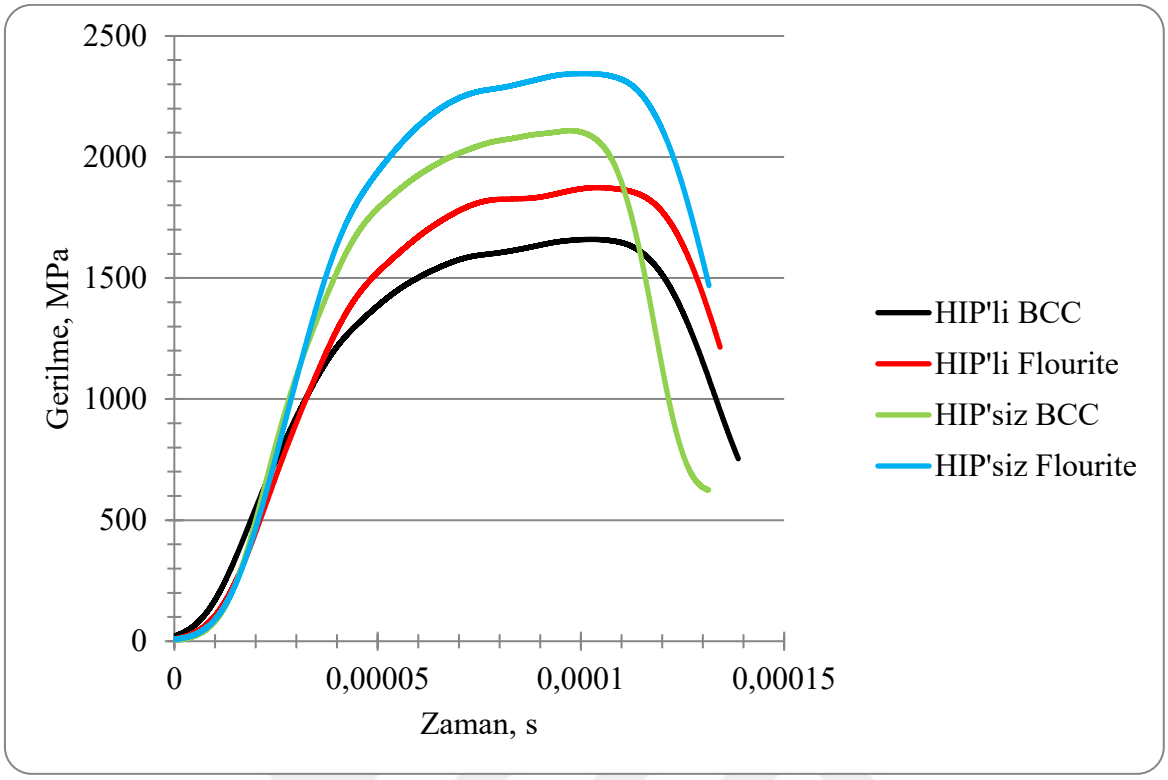
Şekil 4.33. SHPBT gerinim hızı-zaman grafikleri

SHPB testlerinden elde edilen ham verilerden hesaplanan ortalama şekil değiştirme hızları, HIP uygulanmış numunelerde yaklaşık 240–260 s^{-1} aralığında iken HIP'siz numunelerde ise 340–430 s^{-1} aralığında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, HIP ısıl işleminin dinamik yükleme altında deformasyon kararlılığını artırdığını göstermektedir. Çizelge 4.8'de teste ait ham verilerden hesaplanan yaklaşık ortalama gerinim hızı değerleri tüm numuneler için verilmiştir.

Çizelge 4.8. Eş darbe koşullarında numune bazlı ortalama gerinim hızı değerleri

Numune	Ortalama Gerinim Hızı (s^{-1})
HIP'li BCC	≈240
HIP'li Flourite	≈260
HIP'siz BCC	≈430
HIP'siz Flourite	≈340

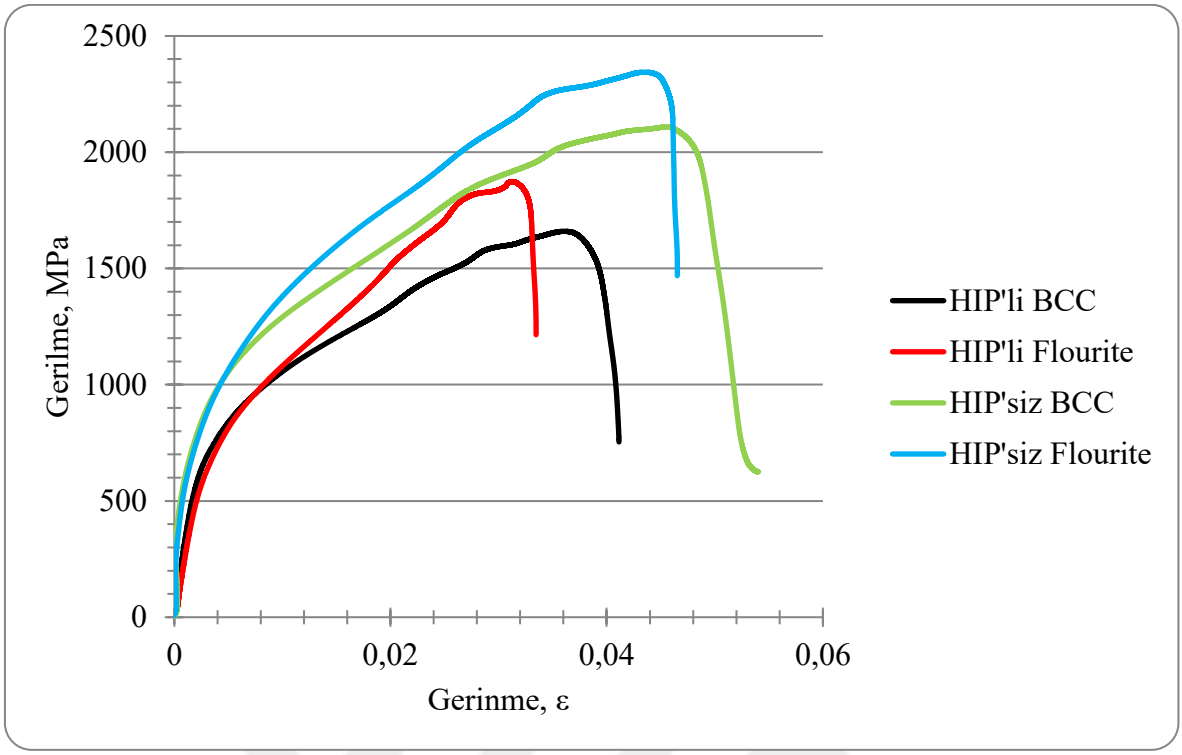
Şekil 4.34'te tüm numuneler için gerilme-zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.34. SHPBT gerilme-zaman grafikleri

Şekil 4.34'ten görülebileceği üzere HIP'li BCC ve Fluorite kafes yapılarında gerilme daha düşük bir eğimle artmaktadır. Maksimum gerilmeden sonra daha kademeli, zamana yayılmış bir düşüş sergilemektedir. Bu durum daha kontrollü hasar ilerlemesi anlamına geldiği şeklinde yorumlanabilir.

Bir başka deyişle, HIP uygulanmış kafes yapılar maksimum gerilme seviyesine daha kararlı bir şekilde ulaşmakta ve hasar süreci zamana yayılmış olarak ilerlemektedir. Buna karşılık HIP'siz numunelerde maksimum gerilme sonrası ani stres düşüşleri gözlenmekte olup, bu durum kararsız hasar oluşumuna işaret etmektedir.



Şekil 4.35. SHPBT gerilme-gerinme grafikleri

Gerilme-gerinme grafiğine göre tüm numunelerin, başlangıçta hızlı bir elastik–elastik-plastik geçiş bölgesi sergilemekte, ardından belirgin bir plastik deformasyon evresi ve nihayet ani bir gerilme düşüşü ile karakterize edilen göçme davranışı gösterdiği yorumu yapılabilmektedir. Gerilme düşüşünün ani olması, yüksek şekil değiştirme hızlarında hasarın çoğunlukla kayma kontrollü ve yerel biçimde geliştiğine işaret etmektedir.

HIP'siz numuneler, özellikle BCC ve Flourite topolojilerinde, başlangıç plastik deformasyon bölgesinde daha yüksek gerilme seviyelerine ulaşmaktadır. HIP'li numunelerde akma gerilmesi görece daha düşüktür; bu durum HIP sonrası mikro yapının daha sünek hale gelmesiyle ilişkilendirilebilir. HIP işlemi, akma dayanımını sınırlı ölçüde düşürmesine karşın, plastik deformasyon kabiliyetini artırarak daha kararlı bir deformasyon davranışı sağlamaktadır.

Grafikten yaklaşık olarak elde edilen maksimum gerilme değerleri şu eğilimi göstermektedir. HIP'siz flourite numuneleri, ~2300–2400 MPa seviyelerine ulaşarak en yüksek tepe dayanımını sergilemektedir. HIP'siz BCC numuneleri, bunlara yakın ~2100 ancak bir miktar daha düşük tepe gerilmeleri göstermektedir. HIP'li BCC ve flourite

numuneleri ise maksimumda yaklaşık 1300–1500 MPa aralığında kalmaktadır. HIP'siz numunelerdeki daha yüksek tepe gerilmeleri, iç kusurların neden olduğu lokal gerilme yığılmaları sonucu daha ani fakat daha yüksek tepe değerlerine ulaşılmasıyla ilişkilendirilebilir.

HIP'li numuneler, hasara kadar daha düşük gerilme seviyelerinde fakat daha kontrollü ve kararlı bir plastik deformasyon sergilemektedir. HIP'siz numunelerde, daha yüksek gerilme seviyelerine ulaşılsa da hasar daha ani ve daha gevrek karakterlidir. HIP işlemi, sünekliği artırarak hasarın daha kontrollü gelişmesini sağlamakta; ancak tepe dayanımını düşürmektedir.

Enerji sönümleme kapasitesi, gerilme–şekil değiştirme eğrisi altındaki alanla ilişkilidir. HIP'siz flourite numuneleri, yüksek tepe gerilmeleri nedeniyle yüksek enerji sönümleme potansiyeli göstermektedir. HIP'li numuneler, daha düşük tepe gerilmesine rağmen daha düzgün eğriler sergileyerek stabil enerji sönümleme davranışı göstermektedir.

SHPBT ile BCC ve Flourite kafes yapılarının yüksek çarpışma hızındaki mekanik özellikleri üzerine HIP ısıl işleminin etkisi araştırılmıştır.

Test sonuçlarından aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- SHBPT'de aynı yükleme koşulları olsa da numunenin rijitliği, hasar ilerleme biçimi ve enerji sönümleme kapasitesi farklı olduğundan ortalama gerinim hızı değerleri değiştiği,

- HIP'siz numunelerin başlangıç plastik deformasyon bölgesinde daha yüksek gerilme seviyelerine ulaştığı,

- HIP'siz numunelerin yüksek gerilmeye ulaşsa da ani ve kararsız bir kırılma davranışı sergilediği

- HIP'li numunelerde akma gerilmesi görece daha düşük olduğu, bu durumun HIP sonrası mikroyapının daha sünek hale gelmesiyle ilişkilendirilebileceği,

- HIP işlemi, akma dayanımını sınırlı ölçüde düşürmesine karşın, plastik deformasyon kabiliyetini artırarak daha kararlı bir deformasyon davranışı sağladığı gözlenmiştir.

Tüm bu durumlar göz önüne alındığında HIP ısıl işlemi ile karakterize edilen mikroyapı sayesinde hasar davranışının daha kararlı olduğu bu nedenle mühendislik uygulamaları için HIP ısıl işleminin önemi test sonuçlarından çıkarılabilmektedir.

4.9. Çalışmanın Literatür ile Karşılaştırılması ve Katkıları

Bu tez çalışmasının literatüre başlıca katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Ti-6Al-4V malzemesinden SLE ile üretilmiş BCC ve Flourite kafes yapılar, aynı bağıl yoğunlukta olacak şekilde karşılaştırılmış; böylece topolojik etkinin göreli yoğunluk etkisinden ayrıştırılması hedeflenmiştir.

- HIP ısıl işleminin, Ti-6Al-4V kafeslerin basma dayanımı, sünekliği ve enerji sönümleme davranışı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiş; sonuçlar Yan vd. ve Chiang vd. çalışmalarındaki bulgularla tutarlı bir eğilim ortaya koymuştur.

- Kafes içeren çekme çubukları ile dolu Ti-6Al-4V çekme çubuklarının karşılaştırılmasıyla, ağırlık azaltımı ile mekanik performans arasındaki dengeye dair tasarımcıya doğrudan girdi sağlayan sonuçlar üretilmiştir.

Bu yönleriyle tez çalışması, hem tasarım (n-Topology tabanlı kafes modelleme) hem de proses mikroyapı özellik ilişkisi bakımından, Ti-6Al-4V kafes temelli hafif yapı tasarımına katkı sunmaktadır.

4.10. Çalışmanın Sınırlılıkları

- Kafes yapıların dinamik davranışı sadece SHPBT üzerinden deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Dinamik davranışlara ek olarak titreşim sönümleme, yorulma davranışı analiz edilmemiştir.

- İki kafes topolojisi (BCC ve Flourite) incelenmiş, gyroid, oktahedral, RD vb. diğer kafes türleri kapsam dışı bırakılmıştır.

- Kafes yapılarının tek doluluk oranı üzerinden üretimi yapılmıştır.

- SLE proses parametreleri değiştirilmemiştir. Bu nedenle proses parametrelerinin numunelerin mekanik performansına etkisi incelenmemiştir.

- Mikroyapıyı karakterize etmek için gerçekleştirilen ısıl işlem olarak HIP prosesi seçilmiştir. HIP prosesinde standart aralığında kalan tek bir proses parametresi üzerinden ısıl işlem gerçekleştirilmiştir.

- HIP ısıl işlemine alternatif olan ısıl işlemler üzerinde deneysel çalışma gerçekleştirilmemiştir.

- Basma testinde numunelerin şekil değiştirme kapasitesi cihaz sınır değerine kadar test edilebilmiştir.

- SHPBT parametreleri belirli sabit değerler etrafında yürütülmüş; parametrik bir optimizasyon çalışması yapılmamıştır.

Bu sınırlılıklar, tez çalışmasının yorumlanması sırasında göz önünde bulundurulmalı; aynı zamanda ileride yapılacak çalışmalar için bir yol haritası olarak değerlendirilmelidir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde, SLE yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V BCC ve Flourite kafes yapılarının HIP ısıl işlemi sonrası incelenen mekanik özelliklerinden elde edilen temel sonuçlar sunulmaktadır.

- Ti-6Al-4V BCC ve Flourite kafesler, n-Topology ve SLE ile, destek yapısına ihtiyaç duymadan ve yakın bağıl yoğunlukta başarılı şekilde üretilebilmiştir.

- Uygulanan HIP ısıl işlemi, SLE kaynaklı gözenekleri önemli ölçüde azaltmış, mikroyapıyı α′ martenzitten α+β lamelli yapıya dönüştürmüştür. Bunun sonucu olarak sertlik ve akma dayanımı biraz düşmüş, buna karşılık süneklik ve enerji sönümleme artmıştır.

  Aynı bağıl yoğunlukta:

- HIP'li BCC kafes, daha yüksek rijitlik ve dayanım sunarken yük taşıyan, rijitlik odaklı parçalar için daha uygundur.

- HIP'siz Flourite kafes, özellikle yüksek çarpışma hızlarında daha uzun ve stabil plato bölgesi sunarken, enerji sönümleme ve darbe dayanımı gereken yerler için avantajlıdır. Ancak kararlı bir kırılma davranışı için HIP ısıl işlemi kritiktir.

- Kafes içeren basma testi sonuçlarına göre kütleye oranlandığında özgül dayanım/rijitlik açısından rekabetçi sonuçlar ve ani kırılma yerine kademeli, uyarı veren hasar gözlenmiştir.

Genel olarak çalışma, topoloji seçimi, HIP kombinasyonunun, Ti-6Al-4V tabanlı hafif ve enerji sönümleyebilen yapılar tasarlamada güçlü bir araç olduğunu göstermiş, tasarım–proses–mikroyapı–özellik ilişkisine dair mühendislik için somut tasarım girdileri sunmuştur.

Bu tez çalışmasında, Ti-6Al-4V kafes yapıların çekme, statik basma ve yüksek şekil değiştirme hızlı dinamik yükleme altındaki mekanik davranışları ile HIP ısıl işleminin bu

davranışlar üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, konunun farklı yönlerinin daha derinlemesine araştırılmasına olanak tanımaktadır. Bu doğrultuda, ileride gerçekleştirilebilecek çalışmalar aşağıda önerilmektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda, Ti-6Al-4V kafes yapıların mekanik davranışının daha kapsamlı biçimde anlaşılabilmesi için gelecek çalışmalarda farklı kafes topolojilerinin, özellikle eğrisel ve hibrit geometrilerin incelenmesi; HIP ısıl işleminin sıcaklık, basınç ve bekletme süresi gibi parametrelerinin mekanik performans üzerindeki etkilerinin ve alternatif ısıl işlemlerin değerlendirilmesi; tek eksenli yükleme koşullarının ötesine geçilerek çok eksenli, yorulma, darbe ve dinamik yükleme senaryolarının ele alınması önem arz etmektedir. Ayrıca deneysel sonuçların hız-bağımlı malzeme modelleri ve hasar kriterleri içeren sonlu elemanlar analizleri ile desteklenmesi, deformasyon ve hasar mekanizmalarının daha ayrıntılı ortaya konulmasına katkı sağlayacaktır. Son olarak, elde edilen sonuçların biyomedikal implantlar, enerji sönümleyici sistemler ve darbe dayanımı gerektiren yapısal uygulamalar gibi mühendislik alanlarına yönelik performans kriterleri ile ilişkilendirilmesi, Ti-6Al-4V kafes yapıların endüstriyel ve uygulama odaklı kullanım potansiyelini artıracaktır.

KAYNAKLAR

1. Deshpande, V. S., Fleck, N. A., & Ashby, M. F. (2001). Effective properties of the octet-truss lattice material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49(8), 1747–1769.

2. 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 Sciences*, 191(37), 106101.

3. Park, K. M., Min, K. S., & Roh, Y. S. (2022). Design optimization of lattice structures under compression: Study of unit cell types and cell arrangements. *Materials*, 15(1), 97.

4. Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular solids: Structure and properties.* (Second Edition). Cambridge: Cambridge University Press, 1-14.

5. Wang, Y., & McDowell, D. L. (2004). Inhomogeneity effects on elastic properties of periodic microstructures. *Computational Materials Science*, 29(3), 419–446.

6. İnternet: Lattice Structures in Crystalline Solids, *Lumen Learning,* Web: https://courses.lumenlearning.com/sunychemistryformajorsxmaster/chapter/lattice-structures-in-crystalline-solids-2, Son Erişim Tarihi: 06.08.2025

7. Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., & Ashcroft, I. A. (2017). A mechanical property evaluation of graded density Al–Si10–Mg lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 670, 264–274.

8. Choy, S. Y., Sun, C. N., Leong, K. F., Wei, J., & Yeong, W. Y. (2017). Functional 3D printing of biomimetic structures with tunable mechanical properties. *Rapid Prototyping Journal*, 23(5), 897–905.

9. Ashby, M. F. (2006). The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 364(1838), 15–30.

10. Kolarevic, B. (2005). *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*. (First Edition). New York: Spon Press, 15-45.

11. Yan, X., Yue, S., Ge, J., Chen, C., Lupoi, R., & Yin, S. (2022). Microstructural and mechanical optimization of selective laser melted Ti-6Al-4V lattices: Effect of hot isostatic pressing. *Journal of Manufacturing Processes*, 77(1), 151–162.

12. Li, P., Ma, Y. E., Sun, W., Qian, X., Zhang, W., & Wang, Z. (2022). Mechanical behaviors and failure modes of additive manufactured Ti-6Al-4V lattice structures under compressive load. *Thin-Walled Structures*, 180(17), 109778.

13. Cardeña, A., Sancho, R., Barba, D., & Gálvez, F. (2024). Dynamic behaviour of additively manufactured Ti-6Al-4V BCC lattice-based structures. *Materials Letters*, 354(13), 135286.

14. Li, Z.-H., Yang, Z., Liu, B., Li, J.-X., Kuai, Z.-Z., Li, H.-D., & Chen, Y.-L. (2021). Dynamic mechanical properties of selective-laser-melting-processed Ti-6Al-4V. *Research Square*.

15. Salihu, S. A., Suleiman, Y. I., & Eyinavia, A. I. (2019). Classification, properties and applications of titanium and its alloys used in automotive industry – A review. *American Journal of Engineering Research*, 8(8), 92–98.

16. Lütjering, G., & Williams, J. C. (2007). *Titanium.* (Second Edition). Berlin–Heidelberg: Springer, 21-78.

17. Leyens, C., & Peters, M. (2003). *Structure and properties of titanium and titanium alloys*. (First Edition). Weinheim: Wiley-VCH, 11-36.

18. Donachie, M. J. (2000). *Titanium: A technical guide.* (Second Edition). Materials Park: ASM International, 5-11.

19. Froes, F. H. (2015). *Titanium: Physical metallurgy, processing, and applications*. (First Edition). Materials Park: ASM International, 51-74.

20. Frazier, W. E. (2014). Additive manufacturing technologies and applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917–1928.

21. Ahmad, B., van der Veen, S. O., Fitzpatrick, M. E., & Guo, H. (2022). Influence of deposition strategies on residual stress in additively manufactured metal components. *Metals*, 12(2), 253.

22. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117(3), 371–392.

23. DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92(5), 112–224.

24. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J. (2012). Heat treatment of Ti-6Al-4V produced by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 541, 177–185.

25. Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A., & Maier, H. J. (2013). On the mechanical behaviour of titanium alloy Ti-6Al-4V manufactured by selective laser melting. *International Journal of Fatigue*, 48, 300–307.

26. Wolff, S., Lee, T., Faierson, E. J., Ehmann, K. F., & Cao, J. (2016). Anisotropic properties of directed energy deposition (DED)-processed Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes,* 24, 397-405.

27. Hollister, S. J. (2005). Porous scaffold design for tissue engineering. *Nature Materials*, 4(7), 518–524.

28. Ryan, G., Pandit, A., & Apatsidis, D. P. (2006). Porous titanium scaffolds fabricated using a rapid prototyping and powder metallurgy technique. *Biomaterials*, 27(13), 2651–2670.

29. Wu, M.-W., Chen, J. K., Lin, B. H., & Chiang, P. H. (2017). Improved fatigue endurance ratio of additive manufactured Ti-6Al-4V lattice by hot isostatic pressing. *Materials & Design*, 134, 163–170.

30. Zhang, X. Z., Wang, J., Jia, L., Tang, H. P., & Qian, M. (2021). The effect of post-processing on the ductility and strength of Ti-6Al-4V lattice materials. *JOM*, 73(11), 4119–4129.

31. Xu, Y., Huang, G., Li, T., Tan, Y., & Bao, T. (2022). Compressive properties of Ti-6Al-4V functionally graded lattice structures. *Materials Science and Engineering: A*, 860(21), 144265.

32. Bai, H., Deng, H., Chen, L., Liu, X., Qin, X., Zhang, D., Liu, T., & Cui, X. (2021). Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser-melted Ti64 and Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe. *Metals,* 11(4), 534.

33. Simonelli, M., Tse, Y. Y., & Tuck, C. (2014). Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 616, 1–11.

34. Umair, M. A., Fatimi, M., & Sufian, S. (2018). A review of the as-built SLM Ti-6Al-4V mechanical properties. *Metals*, 8(1), 75.

35. Chen, C., Shen, Y., Zeng, X., Yang, Y., & Zhang, D. (2019). The martensitic transformation and mechanical properties of Ti-6Al-4V. *Materials*, 12(2), 321.

36. Kasperovich, G., & Hausmann, J. (2015). Improvement of fatigue resistance and ductility of Ti-6Al-4V processed by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 220, 202–214.

37. Pan, T., Zhong, J., Li, H., Hu, Q., Gong, S., & Xu, Q. (2019). Microstructure, mechanical properties, and constitutive models for Ti-6Al-4V alloy fabricated by SLM. *Metals*, 9(4), 447.

38. Azimi, A., Owolabi, G. M., Fallahdoost, H., Kumar, N., & Warner, G. (2019). High strain rate behavior of ultrafine grained AA2519. *Metals*, 9(2), 115.

39. Papazoglou, D. P., Neidhard-Doll, A. T., Pinnell, M. F., Erdahl, D. S., & Osborn, T. H. (2024). Compression and tensile testing of L-PBF Ti-6Al-4V lattice structures. *Metals*, 14(2), 232.

40. Lv, Z., Chen, S., & Li, X. (2023). Effect of hot isostatic pressing on GH4169 manufactured by SLM. *Journal of Physics: Conference Series*, 2639(1), 012014.

41. Rafi, H. K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T. L., & Stucker, B. E. (2013). Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective

laser melting and electron beam melting. *Journal of Materials Engineering and Performance,* 22(12), 3872–3883.

42. Wysocki, B., Maj, P., Sitek, R., Buhagiar, J. P., Kurzydłowski, K. J., & Święszkowski, W. (2017). Additive manufacturing of titanium bone implants. *Applied Sciences*, 7(7), 657.

43. Facchini, L., Magalini, E., Robotti, P., Molinari, A., Höges, S., & Wissenbach, K. (2010). Ductility of Ti-6Al-4V produced by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 16(6), 450–459.

44. Günther, J., Leuders, S., Koppa, P., & Tröster, T. (2017). Fatigue life of additively manufactured Ti-6Al-4V. *International Journal of Fatigue*, 94, 236–245.

45. Galarraga, H., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M., & Nandwana, P. (2016). Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). *Additive Manufacturing*, 10, 47–57.

46. Tammas-Williams, S., Withers, P. J., Todd, I., & Prangnell, P. B. (2017). The influence of porosity on fatigue crack initiation in additively manufactured titanium components. *Scientific Reports,* 7(1), 7308.

47. Murr, L. E., et al. (2009). Next-generation biomedical implants using additive manufacturing. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 368(1917), 1999–2032.

48. Kobryn, P. A., & Semiatin, S. L. (2003). Microstructure and mechanical properties of laser-deposited Ti-6Al-4V. *Scripta Materialia*, 48(10), 1341–1347.



Gazili olmak ayrıcalıktır