



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ ile Ti-6Al-4V ELİ
ALAŞIMINDAN ÜRETİLEN FARKLI KAFES YAPILARIN
YAPISAL-MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL ve
TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

İlyas HACISALİHOĞLU

Danışman: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

Doktora Tezi

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2020**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE Ti-6Al-4V ELİ ALAŞIMINDAN
ÜRETİLEN FARKLI KAFES YAPILARIN YAPISAL-MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL ve TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

(An Experimental and Theoretical Investigation of The Structural-Mechanical Properties of
Different Lattice Structures Produced By Selective Laser Melting Method From
Ti-6Al-4V ELI Alloy)

DOKTORA TEZİ

İlyas HACISALİHOĞLU

Danışman: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

Erzurum
Temmuz, 2020

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ ile Ti-6Al-4V ELİ ALAŞIMINDAN ÜRETİLEN
FARKLI KAFES YAPILARIN YAPISAL-MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL ve
TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Prof. Dr. Ayhan ÇELİK danışmanlığında, İlyas HACISALİHOĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma, 10/07/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. İrfan KAYMAZ
Erzurum Teknik Üniversitesi

Danışman: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK
Atatürk Üniversitesi

Jüri Üyesi: Prof. Dr. Ali Fatih YETİM
Erzurum Teknik Üniversitesi

Jüri Üyesi: Prof. Dr. Fatih YILDIZ
Erzurum Teknik Üniversitesi

Jüri Üyesi: Prof. Dr. Yaşar TOTİK
Atatürk Üniversitesi

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Erzurum Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No:2017/01

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Prof. Dr. Ayhan ÇELİK* danışmanlığında sunulan “Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ile Ti-6Al-4V ELI Alaşımından Üretilen Farklı Kafes Yapıların Yapısal-Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	0	30
Materyal ve Yöntem	2	35
Bulgular ve Tartışma	0	20
Sonuç ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	2	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
İlyas HACISALİHOĞLU	Prof. Dr. Ayhan ÇELİK
28.7.2020	28.7.2020
İmza	İmza

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Danışmanlık ve çalışma disiplini ile yeri doldurulamayacak olan kıymetli hocam, değerli büyüğüm Sayın Prof. Dr. Ayhan ÇELİK'e içtenlikle saygılarımı sunar, teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmalarımda yapıcı eleştirileri, tavsiyeleri, cesaretlendirmesi ve araştırmamın her dönemindeki yakın işbirliği ile benden destek, fikir ve anlayışını esirgemeyen kıymetli hocam, saygıdeğer büyüğüm Sayın Prof. Dr. Fatih YILDIZ'a şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarım esnasında deneysel protokollerin tasarlanması ve uygulamasında mesleki görgü ve yeteneklerini her zaman yanımda bulduğum değerli meslektaşım Sayın Makine Yüksek Mühendisi Erkan ÖZYILMAZ'a minnettarlığımı belirtirim.

Teorik çalışmalarım esnasında bilgi ve desteğini esirgemeyen kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. İrfan KAYMAZ ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi. İsmail Hakkı KORKMAZ'a, deneysel altyapıda ihtiyaç duyduğum yüksek hızlı kamera sistemindeki desteklerinden ötürü Sayın Doç. Dr. Salih AKPINAR'a teşekkür ederim.

Mensubu olmaktan onur duyduğum Erzurum Teknik Üniversitesi yöneticilerine, idari ve akademik personeline, tez çalışmalarımın yürütülmesi sürecindeki alt yapı olanakları ve çalışma dönemimdeki anlayış ve desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Doktora öğrenimim sırasında BİDEB-2211 Yurtiçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında bursiyer olarak maddi destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkürlerimi sunarım.

İlyas HACISALİHOĞLU

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ ile Tİ-6Al-4V ELİ ALAŞIMINDAN ÜRETİLEN FARKLI KAFES YAPILARIN YAPISAL-MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL ve TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

İlyas HACISALİHOĞLU

Danışman: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

Amaç: Bu çalışmada, eklemeli imalat (EI) tekniklerinden seçici lazer ergitme (SLE) yöntemi ile Ti-6Al-4V ELİ alaşımı kullanılarak, havacılık ve medikal alanlarda ihtiyaç duyulan ağırlığı azaltılmış, kontrollü poroziteye sahip, periyodik tekrarlı kafes yapıların üretimi için gereken lazer parametrelerinin belirlenmesi ve farklı kafes yapıların planlanan porozite değerleri için elde edilecek mekanik özelliklerinin deneysel ve numerik olarak incelenmesi amaçlanmaktadır.

Yöntem: SLE yönteminde üretim parametrelerinin iç yapıdaki etkilerinin deneysel olarak belirlenmesi, optimum üretim parametreleri ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin geleneksel yöntemlerle üretilmiş numunelerle karşılaştırılması ve kafes yapılarına ait mekanik özelliklerin statik şartlar altında belirlenerek numerik sonuçlarla karşılaştırılması olmak üzere üç temel yöntem aşaması takip edilmiştir.

Bulgular: Çalışmada, eriyik havuzları arasında temasın engellenmesine sebep olan aşırı yana kayma değerlerinin yapı içerisinde ergimemiş bölgeler oluşturarak doluluk oranında ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerde düşüşe sebep olduğu belirlenmiştir. Numerik çözümlerden elde edilen sonuçların en fazla % 7,7 hata ile optimum üretim parametreleri kullanılarak üretimi gerçekleştirilen kafes yapılara ait deneysel mekanik özellik sonuçlarına yakınsadığı tespit edilmiştir.

Sonuç: Tez kapsamında yapılan çalışmalarla, SLE yöntemi kullanılarak toz formundaki Ti-6Al-4V ELİ alaşımı malzemeden elde edilecek kafes yapısına sahip nihai bir ürünün optimum üretim parametrelerinin belirlenebilmesi için deneysel ve numerik bir metodoloji oluşturulmuştur. Gözenekli kafes sistemlerinde numerik çözümler için model kurulumu gerçekleştirilmiş ve bu model deneysel olarak doğrulanmıştır. Deneysel sonuçlardan elde edilen malzeme özelliklerinin, numerik modellerde uygulanması ile gerçek test sonuçlarına oldukça yakın değerlerin elde edildiği tespit edilmiştir. Kafes sistemleri arasında ELMAS sistemin uygulanan yük altında tümü ile deformasyona katılarak kayma kırılması ile hasara uyradığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli Üretim, Seçici Lazer Ergitme, Porozite, Mekanik Özellikler, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ti-6Al-4V ELİ

Temmuz 2020, 103 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

AN EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION INTO THE STRUCTURAL-MECHANICAL PROPERTIES OF DIFFERENT LATTICE STRUCTURES PRODUCED BY SELECTIVE LASER MELTING METHOD FROM Ti-6Al-4V ELI Alloy

İlyas HACISALİHOĞLU

Supervisor: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

Objective: Reduced weight and periodic repetitive lattice structures with controlled porosity are required in the fields of aviation and medicine. In this study, it was aimed to determine the optimum parameters required for the production of such structures, when Ti-6Al-4V ELI alloy is the choice of powder material in selective Laser Melting (SLM), one of the additive manufacturing (AM) technology. Besides, it was aimed to investigate and compare the mechanical properties of various lattice structures to be obtained for the planned porosity values, both experimentally and numerically.

Method: Three basic steps were followed throughout the study. First, the effects of SLM production parameters on the internal structure were determined experimentally, and then the mechanical properties of the samples obtained with optimum SLM parameters were compared with the samples produced by conventional methods. Finally, the mechanical properties of the lattice structures were determined under static conditions and compared with the numerical results.

Results: It was observed that excessive hatch distance values between the melt pools caused inhibition of contact. It was determined that these regions did not melt in the structure and caused an increase in porosity rate and a significant decrease in mechanical properties accordingly. Numerical solutions converged with a maximum of 7,7% error with the experimental results obtained from the lattice structures produced using optimum parameters.

Conclusion: An experimental and numerical methodology was successfully created and the optimum production parameters for a final product with a lattice structure to be obtained from the Ti-6Al-4V ELI alloy powder by using the SLM method were determined. Furthermore, a model has been established for the numerical solutions of porous lattice structures and this model has been experimentally verified. Values extremely close to the real test results were achieved when the material properties obtained from the experimental results were applied in numerical models. Among the investigated lattice structures, it was determined that the diamond lattice was damaged by shear fracture failure incorporating whole structure into deformation under the applied load.

Keywords: Additive Manufacturing, Selective Laser Melting (SLM), Porosity, Mechanical Properties, Finite Element Analysis, Ti-6Al-4V ELI

July 2020, 103 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	18
Titanyum ve Alaşımları.....	18
Katmanlı İmalat.....	19
Stereolitografi.....	22
Erimiş malzeme şekillendirme (FDM)	22
Elektron demeti ile ergitme	23
Doğrudan metal biriktirme	24
Seçici lazer sinterleme.....	25
Seçici lazer ergitme	26
Poroz Yapılar	35
MATERYAL ve YÖNTEM	39
Kullanılan Alaşıma ait Kimyasal ve Morfolojik Özellikler	39
XRD ve İç Yapı Analizleri.....	39
Kafes Sistemlerine Ait Tasarım Çalışmaları.....	39
Eklemeli İmalat Süreci	42
Toz Sergi Yoğunluğunun Belirlenmesi.....	45
Metalografik İncelemeler ve Yoğunluk Hesaplamaları	46
Kafes Sisteminin Statik Basma Deneylerinin Gerçekleştirilmesi	46
Sonlu Elemanlar Analizi (SEA).....	47
Sınır Şartları	49
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	51

Toz Formundaki Ti-6Al-4V ELI Alaşımına Ait Özellikler	51
Toz Sergi Yoğunluğunun Belirlenmesi.....	54
Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi	54
Eriyik Havuzuna Ait İncelemeler.....	61
Doluluk oranının belirlenmesi	61
Mikro yapı analizleri	62
Mekanik özelliklerin belirlenmesi.....	65
Kırılma yüzeylerine ait irdellemeler	67
Kafes Sistemlerine Ait Porozite ve Gözenek Boyutunun Hesaplanması.....	69
Kafes Sistemlerine Ait Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi.....	70
Sonlu Elemanlar Analizi ile Kafes Sistemlerine Ait Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	80
SONUÇ ve ÖNERİLER	90
KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	103

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Kullanılan alaşıma ait kimyasal bileşim	39
Tablo 2. Her bir kafes sistemine ait tasarım parametreleri ve deney şartları.....	40
Tablo 3. Lazer gücü, tarama hızı ve yana kayma miktarları.....	44
Tablo 4. Toz tedarikçi firma tarafından beyan edilen kimyasal kompozisyon değerleri.....	53
Tablo 5. EDS analizi ile elde edilmiş kimyasal kompozisyon değerleri	53
Tablo 6. 95 W lazer gücü ve farklı tarama hızları ile elde edilen eriyik havuzuna ait boyutsal özellikler	57
Tablo 7. 100 W lazer gücü ve farklı tarama hızları ile elde edilen eriyik havuzuna ait boyutsal özellikler	58
Tablo 8. Kafes sistemlerine ait gözenek ve numune boyutları	70
Tablo 9. Numerik çözümler ile elde edilen reaksiyon kuvvetleri ve model özellikleri.....	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Seçici lazer ergitme prosesini etkileyen parametreler.....	5
Şekil 2. Metalik malzemelerin eklemeli imalat sınıflandırılması	21
Şekil 3. SLA yöntemine ait şematik bir gösterim	22
Şekil 4. Erimiş malzeme şekillendirme sistemi şematik gösterimi	23
Şekil 5. Elektron demeti ile ergitme sistemine ait şematik gösterimi	24
Şekil 6. Doğrudan metal biriktirme sistemine ait şematik gösterim	25
Şekil 7. Seçici lazer sinterleme yöntemine ait şematik gösterim.	26
Şekil 8. SLE yöntemine ait şematik diyagram	27
Şekil 9. Farklı yerleşim konumlarına göre üretim bölgesinden gerçekleşen ısı akışı ve küreselleşme etkisi	28
Şekil 10. Toz havuzunda (SLE, SLS) veya ışık duyarlı polimer (SLA) üretimi yapan lazer sistemlerine ait optik elamanların şematik gösterimi.....	32
Şekil 11. Kesit üzerindeki lazer hareket tanımlamaları.....	33
Şekil 12. Lazer tarama parametrelerinin gösterimi	34
Şekil 13. SLE yönteminde kullanılan tarama stratejileri.....	35
Şekil 14. Sert ve tamamen açık gözenekliliğe sahip süngerimsi kemik dokulara ait yapısal morfoloji.....	36
Şekil 15. Hücresel yapılara ait örnekler	37
Şekil 16. Hücresel kafes sistemi ile üretilmiş kalça protezi	38
Şekil 17. Tasarımı gerçekleştirilen kafes sistemleri.....	40
Şekil 18. Tasarımı gerçekleştirilen kafes sistemlerine ait gözenek yerleşimleri.....	41
Şekil 19. Eklemeli imalat cihazı.....	42
Şekil 20. Lazer gücü ve tarama izlerinin belirlenmesinde kullanılan yörünge	43
Şekil 21. Çekme numunesine ait boyutlar ve üretim tablası üzerindeki yerleşimi	44
Şekil 22. ELMAS ve FCC kafes sistemlerine ait üretim tablası yerleşimi	45
Şekil 23. Sergi yoğunluğunun belirlenmesine ait üretim hacmi	46
Şekil 24. Basma deneylerine ait deneysel kurgu	47
Şekil 25. Numerik analizlerde kullanılan malzeme özellikleri	48
Şekil 26. Simetri bölgesi (<i>Symmetry region</i>) ve mesh örgü yapısının gösterimi	49
Şekil 27. Basma plakalarına ait sınır şartları.....	50
Şekil 28. Toz formundaki Ti-6Al-4V alaşımına ait toz dağılım grafiği.....	51
Şekil 29. Toz formundaki Ti-6Al-4V ELI alaşımına ait SEM görüntüsü	52
Şekil 30. Toz formundaki Ti-6Al-4V ELI alaşımına ait XRD grafiği	53

Şekil 31. Ti-6Al-4V ELI alaşımına ait EDS analizi.....	53
Şekil 32. Sergi yoğunluğunun belirlenmesinde kullanılan hacim.....	54
Şekil 33. Eriyik havuzunun yüzeyden karakterizasyonu sonucu elde edilecek havuz özellikleri.	55
Şekil 34. Kase ve anahtar deliği biçimine sahip iki eriyik havuzuna ait optik görüntüler.....	56
Şekil 35. 100 W lazer gücü ile farklı tarama hızlarında (100 – 1400mm/s) elde edilen eriyik havuzu kesit görüntüleri.....	59
Şekil 36. Yana kayma miktarına ait şematik bir gösterim	60
Şekil 37. Yana kayma miktarına bağlı olarak elde edilen yüzde doluluk miktarı.....	61
Şekil 38. 100 W lazer gücü ve 400 mm/s ilerleme hızında farklı yana kayma değerleri ile elde edilen mikro yapı görüntüleri	62
Şekil 39. 100 W lazer gücü ve 1400 mm/s tarama hızı ile farklı yana kayma değerleri (22,5- 105 µm) ile elde edilen numunelere ait dağlama sonrası mikroyapı görüntüleri ...	64
Şekil 40. Yana kayma miktarına bağlı olarak Gerilme ve Yüzde uzama değerlerinin değişimi	66
Şekil 41. 100 W lazer gücü ve 1400 mm/s ilerleme hızında farklı yana kayma değerleri ile elde edilen çekme numunelerine ait mekanik özelliklerin değişimi grafiği	67
Şekil 42. Farklı yana kayma değerleri (22,5 – 105 µm) ile elde edilen kırılma yüzey görüntüleri	68
Şekil 43. Kafes sistemlerinde gözenek konumları	69
Şekil 44. % 60 poroziteye sahip kafes sistemlerinin basma test sonuçları.....	71
Şekil 45. % 60 doluluk oranına sahip kafes sistemlerinin basma deneyi öncesi ve deformasyon sonrasına ait gösterimler	72
Şekil 46. % 75 poroziteye sahip kafes sistemlerinin basma test sonuçları.....	73
Şekil 47. % 75 doluluk oranına sahip kafes sistemlerinin basma deneyi öncesi ve deformasyon sonrasına ait gösterimleri	74
Şekil 48. % 90 poroziteye sahip kafes sistemlerinin basma test sonuçları.....	75
Şekil 49. % 90 doluluk oranına sahip kafes sistemlerinin basma deneyi öncesi ve deformasyon sonrasına ait gösterimleri	76
Şekil 50. % 90 porozite ile üretilmiş BCC kafes sistemine ait hasar mekanizması	77
Şekil 51. % 90 porozite ile üretilmiş ELMAS kafes sistemine ait hasar mekanizması	77
Şekil 52. Kafes sistemlerine ait rijitlik değerini porozite ile değişimi	78
Şekil 53. Kafes sistemlerine ait basma dayanımı değerlerinin porozite ile değişimi.....	79
Şekil 54. Kafes sistemlerine ait kütle değerlerinin porozite ile değişimi	80
Şekil 55. BCC 60 kafes sistemine ait gerilme dağılımı.....	82

Şekil 56. BCC 75 kafes sistemine ait gerilme dağılımı.....	82
Şekil 57. BCC 90 kafes sistemine ait gerilme dağılımı.....	83
Şekil 58. BCCZ 60 kafes sistemine ait gerilme dağılımı	83
Şekil 59. BCCZ 75 kafes sistemine ait gerilme dağılımı	84
Şekil 60. BCCZ 90 kafes sistemine ait gerilme dağılımı	84
Şekil 61. ELMAS 60 kafes sistemine ait gerilme dağılımı	85
Şekil 62. ELMAS 75 kafes sistemine ait gerilme dağılımı	85
Şekil 63. ELMAS 90 kafes sistemine ait gerilme dağılımı	86
Şekil 64. FCC 60 kafes sistemine ait gerilme dağılımı	86
Şekil 65. FCC 75 kafes sistemine ait gerilme dağılımı	87
Şekil 66. FCC 90 kafes sistemine ait gerilme dağılımı	88
Şekil 67. FCCZ 60 kafes sistemine ait gerilme dağılımı.....	88
Şekil 68. FCCZ 75 kafes sistemine ait gerilme dağılımı.....	89
Şekil 69. FCCZ 90 kafes sistemine ait gerilme dağılımı.....	89

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
Al	: Alüminyum
ASTM	: Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
C	: Karbon
cm	: Santimetre
CoCr	: Kobalt Krom Alaşımı
CT	: Bilgisayarlı Tomografi
DMB	: Doğrudan Metal Biriktirme
EDE	: Elektron Demeti ile Ergitme
EDS	: Elementel Dağılım Spektroskopisi
Eİ	: Eklemeli İmalat
ELI	: Ekstra Düşük Arayer Atomu
Fe	: Demir
GPa	: Gigapaskal
gr	: Gram
H	: Hidrojen
HIP	: Sıcak İzostatik Presleme
ISO	: Uluslararası Standartlar Ofisi
J	: Joule
K	: Kelvin
kg	: Kilogram
KY	: Kısmi Yoğunluk
m	: Metre
mg	: Miligram
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
N	: Azot
nm	: Nanometre
O	: Oksijen
RVE	: Temsili Hacim Eleman
s	: Saniye
SLE	: Seçici Lazer Ergitme
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme

STL	: Standart Üçgen Dili
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
W	: Watt
XRD	: X Işını Difraksiyonu
µm	: Mikronmetre
%	: Yüzde
°	: Derece
α	: Alfa fazı
α'	: Martenzitik faz
β	: Beta fazı



GİRİŞ

Teknolojik ilerlemelerin oldukça hızlı yaşandığı günümüz dünyasında, insan hayatının ve sağlığının sahip olunan en önemli varlık olduğu gerçeği, bu teknolojik ilerlemelerin insan sağlığı için kullanılmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Bu ilerlemelere paralel olarak insanların azalan/yitirilen hareket fonksiyonlarını yeniden kazandırabilmek ve yaşam kalitesini iyileştirmek için implant adı verilen yapay elemanlar ortaya çıkmıştır. İmplantlar insan vücudunda kullanıldıklarında sürekli veya belirli aralıklarda biyolojik ortamlarla temas halinde olduklarından, bu ortamlardan etkilenmeyecek ve biyolojik düzeni bozmayacak malzemelerden imal edilmelidirler. Biyolojik sistemlerde kullanılabilecek malzemeler olarak bir adlandırma yapıldığında, karşımıza “Biyomalzeme” terimi çıkmaktadır. Farklı tanımları olmasına karşın genel bir tanım ile biyomalzemeler; canlılarda hasar gören organ ya da dokuların işlevlerini yerine getirmek veya desteklemek amacıyla kullanılan ve canlı dokularla temas ettiğinde olumsuz doku reaksiyonları ortaya çıkarmayan doğal ya da sentetik malzemeler olarak tanımlanırlar (Gümüşderelioğlu 2002). Canlı dokularda kullanıldığında ortaya çıkabilecek olumsuzlukların bir değerlendirilmesi olarak ise “Biyouyumluluk” terimi ortaya çıkmıştır.

Metaller ve alaşımları üstün ve kontrol edilebilir mekanik özelliklerinden dolayı diş ve ortopedik cerrahide implant malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ortopedide yaygın olarak kullanılan metalik biyomalzemeler; paslanmaz çelikler (316L gibi), titanyum ve alaşımları ile kobalt-krom alaşımlarıdır (Shackelford 1999). Yoğunluğuna göre yüksek mukavemete (yüksek özgül mukavemet), çok iyi korozyon direncine sahip ve biyouyumluluğunun iyi olması nedeniyle titanyum ve alaşımları birçok implant uygulaması için en uygun metalik biyomalzemelerdir. Kemikle bütünleşmesi (osseointegrasyonu) oldukça iyi ve temasta bulunduğu canlı doku tarafından kabul edilebilirliği yüksek olan titanyum ve alaşımları, implant olarak vücuda yerleştirildikten sonra vücudun bir parçası haline gelmektedir. Kemige göre daha yüksek elastisite modülüne sahip olmasına rağmen, diğer metalik biyomalzemeler ile karşılaştırıldığında en yaygın olarak kullanılan titanyum alaşımı Ti-6Al-4V alaşımıdır (Dallago *et al.* 2018).

Dünya nüfusunun yaklaşık % 10’u 65 yaşın üzerindedir ve yaşlı nüfus giderek artmaktadır (United Nations 2019). İlerleyen yaş ile birlikte özellikle kemik yoğunluğu ve dayanımının azalması, kemik hücrelerinin yeni kemik üretiminde ve kemikte oluşan mikro çatlakların kapanmasındaki üretkenliğinin düşüşü gibi nedenlerden ötürü insanlar gelecek hayatlarındaki yaşam kalitesini sürdürebilmek için ortopedik implantlara ihtiyaç

duymaktadırlar. Bunun yanı sıra, ulaşım araçlarının fazlalığı ve makineleşme nedeniyle kazaların meydana gelme ihtimalinin yükselmesi, toplumlar arasındaki sıcak çatışmalar ve spor yaralanmaları implant kullanımının gereksinimini arttırarak zarar gören dokuların ve eklemlerin tedavi edilmesine olanak sağlamaktadır.

Pratik uygulamalara bakıldığında geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmiş ve standart ölçülere sahip implantların kullanıldığı görülmektedir. Her ne kadar implant uygulamasını gerçekleştirecek hekim, ilgili hasta için uygun ölçüye sahip implantı belirlese dahi, implant tasarımı ve mekanik özelliklerinin, uygulama yapılan sert dokunun anatomisi ve mekanik özellikleri ile uyum problemleri kaçınılmaz olmaktadır. Ayrıca bazı durumlarda standart implantların haricinde, kafatası kemiğinin bir bölümünün onarılması gibi farklı ve karmaşık geometriye sahip implantlara ve hastanın kendi anatomik duruş ve zarar gören kısımlarına tümüyle uygun, tamamen hasta odaklı tasarlanmış implantlara da ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu tarz gereksinimlerin karşılanabilmesi amacıyla, günümüzde görüntüleme tekniklerinin gelişmesi ve üretim yöntemlerindeki ilerlemelere bağlı olarak kişiye özel implant tasarımlarının üretilmesi için gerekli çalışmalar başlatılmıştır (Harrysson and Cormier 2006; Heintz *et al.* 2007; Korkmaz 2016).

Kişiye özel ve karmaşık geometriye sahip implant tasarımlarının üretilmesi için en uygun ve hızlı yöntemlerden birisi, eklemeli/katmanlı üretim (Eİ) teknolojisidir. Lazer veya elektron demeti gibi enerji kaynakları ile malzemenin kontrollü olarak ergitilmesi ve kalıplama teknolojilerine ihtiyaç duymaksızın, metalin eriyik veya yarı eriyik formdan kontrollü katılaşması ile bilgisayar destekli tasarımı (CAD) yapılmış olan tüm parçaların/elamanların üretilmesi, tasarımdan doğrudan fiziksel modelin elde edilmesi, eklemeli/katmanlı imalat (additive manufacturing) olarak tanımlanmaktadır.

Titanyumun saflaştırma ve işleme maliyetinin yüksekliğinin yanı sıra, hammaddenin satın alınmasından kullanıma kadar geçen süreçte oldukça yüksek oranda atık malzeme çıkması ve kullanılacak son ürünün malzeme uzaklaştırılması prensibiyle çalışan geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile üretilmesindeki zorluklar, yüksek teknoloji içeren, atık miktarını ve üretim için gereken kalıp-takım ihtiyacını neredeyse ortadan kaldıran ve tasarımdan üretime giden süreci kısaltarak son ürünün doğrudan elde edilebileceği yöntemleri gerektirmektedir (Bilgin *et al.* 2017). Titanyum ve alaşımlarının üretiminde karşımıza çıkan, talaş olarak uzaklaştırılacak malzeme miktarının azaltılması ve işleme esnasındaki tutuşma gibi zorluklar, tasarlanan geometriyi elde etmek için uygulanacak son yüzey işlemlerinin minimize edilmesi ve kesici takım-kalıp gereksinimlerinin ortadan kalkması, maliyetleri azaltacağı öngörüsü ile toz metalürjisi gibi son formun elde edilebileceği yöntemlerin gelişmesine katkı sağlamıştır (Dutta

and Froes 2015). Eİ yöntemleri, atık malzeme miktarının oldukça az olması, talaşlı imalatı zor malzemelerin ve geleneksel talaş uzaklaştırma prensibine sahip yöntemler ile üretilmesi neredeyse imkânsız olan karmaşık geometrilerin elde edilmesini mümkün kılması ile oldukça ilgi çekmektedir (Wauthle *et al.* 2015). Tekil tasarımların son kullanıcıya doğruca sunuluyor olması, bu ürünlerin mekanik özelliklerinin sunduğu güvenilirlik, üretim maliyetlerinin rekabet edebilirliği ve tasarımdaki sınırsızlığın üretime yansması ile sağlanmıştır. Üretimde üçüncü nesil olarak adlandırılan devrim niteliğindeki Eİ teknolojileri giderek gelişmektedir (Beaman *et al.* 2014). Düşük sayıdaki üretimlerde ve karmaşık geometrilerin ön yatırımları dikkate alındığında, Eİ yöntemleri ön plana çıkmaktadır (Sames *et al.* 2016; Liu 2017).

Son ürün formunun tek adımda elde edildiği, atık miktarlarının neredeyse ortadan kaldırılarak toz veya tel formundaki hammaddenin kullanıldığı Eİ yöntemlerinin gelişiminin 1920'li yıllara kadar dayandığı görülmektedir. 1925 yılında yapılan bir patent çalışmasında, elektrik ark ve metal elektrot kullanılarak cidarlı ve dekoratif ürünlerin üretildiği bilinmektedir (Baker 1925). Eİ; metal, polimer, seramik ve kompozitlerin doğruca tasarım dosyasından prototip veya nihai ürün olarak elde edilmesi anlamına gelir (Bose *et al.* 2018). Bu yöntemlerde malzemeyi ergitecek olan ısı girdisinin elektron demeti veya lazer demeti ile sağlanması söz konusudur. Seçici lazer sintereleme (SLS) ile başlayan metal ürünlerin uzun dönem kullanılabilirliğinin araştırılması ile bu teknoloji, günümüzde kompleks metal geometrileri sadece model olarak değil son ürün olarak da kullanılabilir hale getirmiştir (Kruth and Laoui 2001). Eİ teknolojilerinin 2014 yılında bir önceki yıla göre % 66'lık bir gelişim göstererek yaklaşık 1,8 milyar dolarlık üretim katkısı sağlamış ve 2020 yılına kadar 21 milyar doları aşarak oldukça iyi bir pazar payına sahip olacağı öngörülmektedir (Thompson *et al.* 2016).

Eİ yöntemlerinden birisi olan Seçici Lazer Ergitme (SLE) metodu, toz formundaki malzemenin lazer ile tamamen eritilmesi ve kontrollü katılaşması prensibi ile çalışır (Kruth *et al.* 2010). Elde edilen ürünlerin sahip olacağı mekanik özelliklerin, geleneksel üretim yöntemleri ile elde edilen malzemeler ile karşılaştırılabilir olabilmesi için üretimin neredeyse tamamen dolu yapıya sahip olması gerekliliği ve ısıl işlemler gibi ikincil işlemlerin uygulanmasının azaltılması ile SLE yöntemi SLS yönteminin gelişmesine katkı sağlamıştır. Lazer ergitme içeren Eİ yöntemleri, çalışma şartlarında elektron demeti ile ergitme yapan sistemlerin ihtiyaç duyduğu vakum sistemlerine gereksinim duymaması, üretim platformunun koruyucu gaz altında olmasının yeterliliği, lazer demet çapının elektron demetinden daha düşük boyutlu, kontrol edilebilirliğinin nispeten basit olması ve elektron demetine göre daha düşük çaplı tozların ergitilebilmesi, daha düşük katman kalınlığı ile hassas boyutların üretimi,

çözünürlük ve yüzey kalitesinin daha üstün elde edilebilmesi nedenleri ile oldukça yaygın kullanıma sahiptir (Löber *et al.* 2011; Gibson *et al.* 2014; Gong *et al.* 2014).

SLE yöntemi, karmaşık geometriye sahip ürünlerin imal edilebildiği yeni nesil bir üretim teknolojisidir. Bu yöntem, toz formundaki malzemenin lazer etkileşimi ile ergitilerek aynı düzlemdeki katmanların oluşturulması ve tamamlanan katmanların üst üste getirilerek, üretim doğrultusunda birbirine bağlanması ve nihai ürünün oluşturulması esasına dayanmaktadır. Bilinen isminin yanı sıra “hızlı prototipleme, serbest şekil fabrikasyonu, katmanlı üretim” gibi isimlerin de atfedildiği proses, talaşlı imalattaki kesici takımlara, kalıp tasarımı ve üretimi gibi ilave süreçlere ihtiyaç duymaksızın, üretilmesi hedeflenen tasarımın bilgisayar destekli üç boyutlu modelinin oluşturulması ve son ürüne ulaştırılması işlemidir. SLE yönteminin başlıca avantajları şu şekilde sıralanabilir:

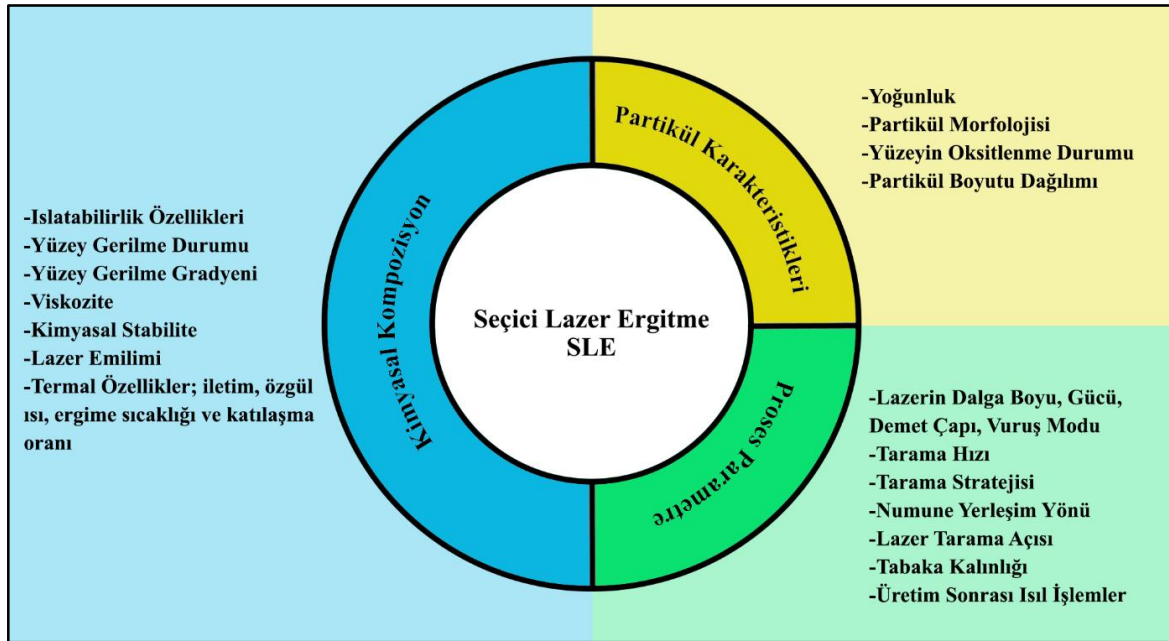
- Giderek hızlanan ürün geliştirmesinde ve farklı tasarımların hızlıca üretilmesinde ayrıcalık katan bir yöntemdir (El Maraghy *et al.* 2013; Ituarte *et al.* 2015; Piili, *et al.* 2015)
- Klasik yöntemlerle üretilmeyecek kadar karmaşık parçalar hızlıca üretilmektedir (Levy *et al.* 2003).
- Mühendislik, tıp ve diğer disiplinler arası çalışma alanlarına cevap verebilen bu teknoloji, implant üretiminde büyük bir avantaja sahiptir. Özellikle Manyetik Rezonans Görüntüleme ve Bilgisayarlı Tomografi (CT) datalarının kullanımı ile tasarlanan geometrilerin imal edilebilmesi, standart ölçülere sahip implantların kullanımındaki ileri dönem olumsuzluklarını gidererek hastaya özel implant tasarımlarının üretilmesi çok ciddi bir üstünlük sağlamaktadır.
- Mühendislik ve Ar-Ge faaliyetlerinde tasarlanan sistemlerin, mekanizmaların veya elemanların üretiminde kullanılabilmektedir.

SLE yöntemi, toz bileşiminin değiştirilebilmesi ile oldukça geniş alaşım oranlarına sahip, farklı özellikte malzemelerin üretilmesine olanak sağlamaktadır (Klingbeil *et al.* 2002). Yöntem, özgün tasarımların hayat bulmasında hız ve esneklik sunarken, üretim yönteminin doğasından kaynaklanan hızlı ergime ve katılaşma nedeni ile elde edilen üründe kalıntı gerilmeler oluşmakta ve üretimin katmanlı olması nedeni ile de anizotropik özellikler sergileyebildiği bilinmektedir (Thijs *et al.* 2010; Niendorf *et al.* 2014; Schnabel *et al.* 2017) Üretimde etkili olan parametrelerdeki uygun olmayan değerler/şartlar neticesinde ortaya çıkan iç yapı kusurları ise irdelenmesi ve çözüm bulunması gereken diğer önemli hususlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Son yıllarda fonksiyonelliği arttırılan karmaşık şekillerin üretimi ile pek çok endüstriyel

alanda kullanımı yaygınlaşmaya başlayan SLE yöntemi, medikal, otomotiv, savunma ve havacılık gibi pek çok alanda dikkat çekmektedir (Bártolo *et al.* 2008; LaMonica 2008; Murr *et al.* 2010; Yan *et al.* 2014; Thompson *et al.* 2015; Wauthle *et al.* 2015; Mower and Long. 2016; Sing *et al.* 2016; Guo *et al.* 2017). Son birkaç yıldır oldukça büyük ilerlemelerin kaydedildiği Eİ tekniklerinden elde edilen parçalar geleneksel üretim yöntemleri ile üretilen parçalar kadar iyi mekanik özellikler sergileyebilecek potansiyeldedir. General Electric, Boeing gibi öncü firmalar kurdukları Ar-Ge birimleri ve üniversiteler bu alandaki gelişmelerde söz sahibi olma ve yöntemin üretim performansını artırmaya çalışmaktadırlar (Lyons 2011).

SLE yöntemi, son ürüne yakın geometrilerin sağlanması ile üretim döngüsündeki zamanın azaltılmasının yanı sıra atık malzeme miktarındaki düşüş ile çevreci bir yaklaşımdır (Levy *et al.* 2003; Ahn 2011). Başlangıçta, tekil kullanım için fonksiyonel prototiplerin üretildiği SLE yöntemi, zamanla son kullanıcıya nihai ürünün teslim edildiği hızlı üretim tekniği şeklinde anılmaya başlamıştır. Bu sistemlerde genellikle ısı kaynağı olarak elektron demeti veya lazer gücünde neredeyse zamanla hiç dalgalanma olmayan sürekli karakterli lazer vuruşu ile çalışan fiber lazerler kullanılmaktadır (Rombouts 2006). SLE sisteminde lazerin radyasyonu ile sağlanan ısı girdisi toz tarafından emilir ve SLS yönteminden farklı olarak tamamen erime olayı gerçekleştirilerek katmanlar arası bütünlük sağlanır (Merceles and Kruth 2006). Çalışılan parçaya ait ilgili katman oluşturulduktan sonra, bir önceki katman ile birleştirilmesi ve bu tekrarın tüm parçayı oluşturma kadar devam etmesi sonucu parça üretimi gerçekleştirilir. Oluşturulan ürüne ait kimyasal, morfolojik ve mikro yapısal özelliklerin değişimine neden olan etkenler Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Seçici lazer ergitme prosesini etkileyen parametreler (Rombouts 2006)

SLE yönteminde, lazer ergitme katmanları ve bitişik eriyik havuzları arasındaki iç

dayanım kuvvetleri ile dayanımın artırılması gerekmektedir. Bu bütünlük üretim parametreleri olarak bilinen lazer gücü (P), katman kalınlığı (t), lazer tarama hızı (V), iki eriyik havuzu arasındaki yana kayma mesafesinin (h) değişimi ile kontrol edilen lazer enerji yoğunluğu (E) ve bu enerjinin eriyikten uzaklaştırılma hızı ile sağlanmaktadır. Tüm bu değişkenler, eriyik oluşturulması için gereken enerji yoğunluğuna etki etmekte olup, bu enerji üretilen geometrinin mekanik ve yüzey özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir (Thijs *et al.* 2010; Tsopanos *et al.* 2010; Kusuma *et al.* 2017). Enerji yoğunluğu sabit tutularak değiştirilecek alt parametreler ile gözeneklilik, mikro yapı, mekanik özellikler ve yüzey durumu değişebilmektedir (Li *et al.* 2012). Üretim esnasında uygun olmayan lazer gücü, tarama hızı, yana kayma miktarı ve tabaka kalınlığı gibi birincil parametreler, malzeme yüzeyinde ve/veya içerisinde küreselleşme veya gözeneklilikler oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca üretim platformunun maruz kaldığı yüksek oksijen konsantrasyonu gibi fiziksel şartlardaki uygunsuzluk ve kullanılan tozun morfolojisi gibi parametreler de bu durumu ortaya çıkarabilmektedir (Tolochko *et al.* 2004; Yadroitsev 2010; Gorny *et al.* 2011).

SLE yönteminde, uygun olmayan üretim parametreleri sebebiyle meydana gelen aşırı ısınma ve oksitlenme sonucu oluşan metal oksidi, katı metalden daha düşük yüzey serbest enerjisine sahiptir. Bu durum yüzey temas açısının artmasına, oluşan oksidin metal yüzeyini ıslatamaması sonucu topaklanma etkisi (*balling effect*) olarak bilinen yüzey kusuruna ve yüzey pürüzlülüğüne neden olmaktadır. Tabakalar arasında oluşan bu yüzey kusuru, katmanlar arasında kalarak içyapı kusurlarının oluşumu ile üretilen parçanın özellikle mekanik performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Leuders *et al.* 2013). Dolayısı ile istenilen mikroyapı ve mekanik özelliklerin elde edilmesi için söz konusu lazer üretim parametre/stratejilerinin optimize edilmesi son derece önemlidir. Meier and Haberland (2008) yaptıkları çalışmada üretim platformunda bulunan oksijen miktarının yüksek ve yana kayma değerinin düşük olması sebebi ile yapıya giren enerjinin artmasının tozun oksidasyonu ve topaklanma etkisini arttırdığını rapor etmektedir. Uygulanan parametrelerin, ürünün her bir katmanında etkili olduğu ve bu katman özelliklerinin nihai ürünün sertlik, porozite, süneklik ve dayanım gibi temel mekanik özelliklerini etkilediği belirlenmiştir (Yadroitsev *et al.* 2007).

Uygulanan lazer etkisi ile ilgili bölgede hızlı ergime ve katılma durumunun varlığı; parçanın termal geçiş etkisinde kalması, üründe kararsız fazların ve kalıntı gerilmelerin oluşması ile mekanik özelliklerin olumsuz yönde etkilenmesine sebep olmaktadır. Kullanılan tozun partikül boyutu, uygulanan enerji miktarı ve lazerin temas motiflerine göre üretilen parçanın yoğunluğu farklılıklar göstermektedir (Thijs *et al.* 2010). Katmanlı imalatla yüzey ve yakın yüzey altı bölgelerde oluşan çekme artık gerilmesi korozyon, yorulma çatlak başlangıcı

oluşumu, çarpılma ve dolayısı ile boyut toleransından uzaklaşma gibi olumsuzluklara neden olabilmektedir. Zhang *et al.* (2011) β -titanyum alaşımı üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, lazer tarama hızının azaltılması ile artan lazer enerji girişinin, malzemenin yoğunluğunu arttırdığını ve mekanik özelliklerin geleneksel yöntemler ile üretilen malzeme ile kıyaslanabilir seviyelerde olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca lazer ısı girdisinin artması ile istenmeyen topaklanma etkisine ve yüzeyin aşırı ısınmasına neden olduğu belirlenmiştir (Gong *et al.* 2014). Gu *et al.* (2012) yaptıkları çalışmada düşük tarama hızı ile artan enerji yoğunluğu miktarının ve sıvı fazın uzun süre kalması nedeni ile termal mikro çatlakların yapıda yer aldığını belirtmişlerdir.

Yüksek dayanım ve eğilme rijitliği gerektiren durumlarda doğadaki sistem veya yapıların poroz karakterde olduğu görülmektedir. Bu benzeşim (biyomimetik) ile günümüzde geleneksel tam dolu malzemelerin yerine, ihtiyaç duyulan rijit, hafif ve dayanıklı yapılar için rastgele veya periyodik hücresel kafes yapılarından oluşan sistemlerin kullanılmasına yönelik bir eğilim oluşmaktadır (Rehme 2010). Dünyada yeni nesil biyomedikal implantlarda, tamamen dolu, rijit ve elastisite modülü kemiğe oranla çok yüksek olan malzemelerin yerine, dayanım/ağırlık oranı kontrol edilebilen, gözenek boyutu ve biçimi arzu edilen şekilde üretilen kafes sistemlerinin kullanımı ile elastisite modülü 0,2 ile 30 GPa aralığında değişebilen kemiğe yakın topolojik tasarımlar kullanılmaktadır (Parthasarathy *et al.* 2010; Wauthle *et al.* 2015; Wang *et al.* 2016). Günümüzde kullanılan implant malzemelerin elastisite modüllerinin kemiğin elastisite modülünden daha fazla olması önemli bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum neticesinde implant tarafından komşu kemiğe transfer edilmesi gereken kuvvetler engellenmekte ve implantı çevreleyen kemik dokunun zayıflaması sonucu implantta gevşemeler (aseptic loosening) oluşmaktadır. Bu biyomekanik uyumsuzluk, gerilme kalkanı etkisi (stress shielding effect) olarak isimlendirilmekte ve kemik hücrelerinin ölümüne sebebiyet vermektedir (Huiskes *et al.* 1992; Gibson *et al.* 2010; Bandyopadhyay *et al.* 2010; Bahraminasab *et al.* 2011; Ikeo *et al.* 2014). Bu durumu ortadan kaldırmak için düşük elastisite modülüne sahip yeni biyomalzemelerin geliştirilmesi veya var olan biyomalzemelerde kafes örgü yapısı kullanılarak sistemin genel rijitliğinin azaltılması gerekmektedir (Gibson and Ashby 1999; Tan *et al.* 2017).

Kafes yapıları, birbiri ile bağlantılı birim hücrelerin bir ağ yapısı oluşturduğu özel poroz yapılardır. Bu poroz yapıların üretiminde Titanyum (Ti) ve alaşımları, Kobalt Krom (CoCr) alaşımları veya 316L paslanmaz çelik gibi biyouyumlu malzemeler kullanıldığında elde edilen nihai ürün “poroz metalik biyomalzeme” olarak adlandırılmaktadır (Hooreweder *et al.* 2017). Yük taşıyan ve kafes yapısı ile üretilen poroz biyomalzeme, hafif olmasının yanı sıra, implantın

rijitliğini azaltmak suretiyle gerilme kalkanı etkisini minimize ederek implantın birlikte çalıştığı kemiklerin zayıflamasını engellemiş olur (Ryan *et al.* 2006; Parthasarathy *et al.* 2008; Mullen *et al.* 2009; Murr *et al.* 2012; Yan *et al.* 2015). Ortopedik rejeneratif implant çalışmalarında kafes sistemini de içine alan tasarım diğer bir önemli husustur. Kullanım yerinde gereken mekanik özellik ve porozitenin elde edilebileceği poroz kafes sistemleri bu işlemler için gelecek vadeden ve üzerinde çalışılan bir yaklaşımdır. Böylesi poroz yapıların üretilmesi, açık hücrelerde kemik büyümesi, besin transferi ve canlı doku aktivitesine izin vermektedir. Porozite, kemik gelişimi oranı ve kalitesi için anahtar rol üstlenmektedir.

Zargarian *et al.* (2016) kafes sistemlerinin kullanımı ile gerilme kalkanı etkisinin azaltılabileceği ve bu sistemlerin vücut sıvılarının hareketi ile doku gelişimine olanak sağladığını belirtmişlerdir. Geleneksel yöntemlerle üretimi zor veya neredeyse imkânsız olan kontrollü gözenekli yapılar, eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen kafes sistemlerinde kullanılan kafes topolojisinin, çubuk çaplarının ve bunların bir sonucu olarak porozitenin kontrollü olarak oldukça planlı bir üretim süreci ile elde edilebilir olması, yöntemle büyük bir avantaj kazandırmaktadır. Planlanan mekanik özelliklerin elde edilmesinde tasarım sınırlarının modele olabildiğince yakın aktarılması, özellikle implant uygulaması gibi önem arzeden süreçlerde temel faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

SLE gibi eklemeli/katmanlı üretim yöntemlerinin varlığı, kafes örgü yapısına sahip poroz metalik yapıların üretilme potansiyelini artırmıştır (Murr *et al.* 2010; Pattanayak *et al.* 2011; Bose *et al.* 2013). Geleneksel imalat yöntemleri ile birbirleriyle bağlantılı açık gözenekli yapıların kontrollü olarak üretilmesi oldukça zordur. Katmanlı imalat yöntemleri, porozitesi, gözenek biçimi ve dağılımının kontrollü olarak üretileceği kafes sistemlerin üretimindeki en uygun yöntemdir (Taniguchi *et al.* 2016; Tan *et al.* 2017). Poroz metalik kafes sisteminin mekanik özellikleri, tasarlanan kafes sisteminin morfolojisi ve kullanılan ana toz metalin mekanik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Wieding *et al.* 2012). Metalik köpükler olarak adlandırılan açık ve kapalı hücre yapısına sahip köpük sistemlerde, tasarımın porozite miktarına bağlı olarak değişen mekanik özelliklerinin belirlenmesi için türetilen teorik ifadeler bulunmaktadır. Asbhy *et al.* (2000) tasarımın sahip olduğu morfolojik özellikler (çubukların çapı, üretimdeki yerleşimleri ve boyları gibi) ve kullanılan tozun özellikleri (yoğunluk, elastik özellikleri gibi) ile oluşturulan yapıların mekanik değerleri hakkında bir yaklaşım oluşturulabileceğini belirtmişlerdir.

Gibson (2000) yaptığı çalışmada, metalik kafes sistemlerine ait mekanik özelliklerin kafes sistemini oluşturan metalin özellikleri ile olan ilgisini incelemiş, elastisite modülleri ve dayanımları için kafes sisteminin yoğunluğunun, kullanılan metalin yoğunluğu ile orantılı

olduğunu belirterek aşağıda verilen denklemleri türetmiştir. Denklem 1 sistemin kısmi yoğunluğu ve ham maddeye ait elastisite modülünü kullanarak elde edilecek gözenekli sistemin elastisite modülü arasındaki ilişkiyi belirtmektedir. Denklem 2 ise yine sisteme ait kısmi yoğunluğu ve üretilen hammedeye ait akma dayanımını kullanarak üretilen sisteme ait plato bölgesi dayanımının elde edilmesini ifade etmektedir.

$$\frac{E^*}{E_k} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_k} \right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{yk}} = C_2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_k} \right)^{3/2} \quad (2)$$

Denklemlerde yer alan E^* , ρ^* ve σ_{pl}^* sırası ile hücresel sisteme ait elastisite modülü, yoğunluk ve basma testi ile elde edilebilecek plato bölgesine ait basma gerilmesi değerini, E_k , ρ_k ve σ_{yk} ise sırası ile hücresel sistemi oluşturan malzemeye ait elastisite modülü, yoğunluk ve bu malzemeye ait akma dayanımını ifade etmektedir. C_1 ve C_2 ise düzeltme katsayısı olarak tanımlanmaktadır.

Kafes sistemlerinin sahip oldukları çubuk ve düğüm noktalarının miktarına göre serbestlik derecesinin dikkate alarak, sistemin mekanizma ya da rijit bir sistem olduğu Maxwell denklemi ile belirlenebilmektedir (Deshpande *et al.* 2001). Üç boyutlu sistemler için geçerli olan Maxwell denklemi Denklem 3'te verilmiştir. Verilen denklemde, M Maxwell değerini, b çubuk sayılarını ve j ise düğüm noktası sayısını ifade etmektedir.

$$M = b - 3j + 6 \quad (3)$$

Bu denklemde belirlenen M değerinin aldığı sonucun sıfırdan büyük olması durumu rijit sistemleri temsil etmekte olup yapının eksenel yük altında çalışmaya zorlandığını, sıfıra eşit veya küçük olması durumu ise çubuk elemanların eğilme baskın yüklenme durumlarını ifade eder. Eksenel yük baskın kafes sistemleri, benzer poroziteye sahip eğilme baskın kafes sistemlerinden daha yüksek akma dayanımı ve rijitlik değerleri sunar ve yüksek dayanım/ağırlık oranı gerektiren uygulamalarda avantaj kazanırlar. M değerinin sıfırdan küçük olduğu eğilme baskın kafes sistemleri ise enerji sönümleme özelliklerinin gelişmiş olduğu, basma davranışında plato bölgesi davranışına sahip sistemlerde daha çekici hale gelmektedirler (Ashby 2006).

Katmanlı imalat yöntemleri ile üretilmiş ilk kişiye özgü tam alt çene implantı uygulaması 2012 yılında 83 yaşındaki bir hastaya uygulanmıştır (Anonymous 2019). Bu karmaşık yapıların SLE tekniği ile üretilebilirliğini arttırmak için son yıllarda, bir takım araştırmalar yapılmıştır (Wauthle *et al.* 2015; Hooreweder *et al.* 2017). Moiduddin *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada, zarar görmüş bir çene kemiğinin kafes sistemi kullanılarak tasarlanmış bir

modeline ait numerik çözüm ile elde edilen gerilme ve birim şekil değiştirme davranışı ile kafes sistemlerinin kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Geleneksel yöntemlerde hekimin el becerisi ile şekillendirdiği ve ameliyat esnasında durumu görebildiği süreçler yerine, bilgisayar destekli görüntü işleme ve tasarım becerileri ile ameliyat öncesi modellerin oluşturulması ve görselleştirilmesinin hekim açısından uygulama kolaylığı sağlayacağını belirtmişlerdir. Ayrıca ameliyat süresinin daha kısa olması ile hastanın iyileşme zamanında da kısalmaya vurgu yaparak, poroz yapıların yüksek başarılı bir uygulama olacağını belirtmişlerdir. Poroz yapıların kullanımı ile implant hasarlarında yorulma, aşınma ve gerilme kalkanı etkisi ile oluşacak etkilerin azalacağını, kemik gelişimin elde edileceği ve uzun dönem kullanımları için avantaj sağlayacağını öne sürmüşlerdir.

Yapılan çalışmalar, titanyum dışı farklı toz malzemelerin hammadde olduğu, SLE ve Elektron Demeti Ergitme (EDE) tekniğini kullanılarak makro poroz kafes yapılarının mekanik özellikleri incelenmektedir (Heinl *et al.* 2008). Özellikle Ti-6Al-4V alaşımından üretilmiş kafes yapılarının incelendiği sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır ve yapılan çalışmalar genellikle SLE tekniği ile üretilen farklı poroz metalik malzemelerin statik basma davranışı üzerine yoğunlaşmıştır (Niendorf *et al.* 2014; Ahmadi *et al.* 2015; Kadkhodapour *et al.* 2015). Söz konusu çalışmalarda, hacim ve yüzey merkezli kübik yapılar (cubic), elmas (diamond), kesik küp (truncated cube), rombik küboktahedron (rhombic cuboctahedron), rombik dodekahedron (rhombic dodecahedron), kesik küboktahedron (truncated cuboctahedron), gyroid gibi farklı türde birçok kafes örgü yapısı kullanılmış ve farklı bağıl yoğunlukta üretilen ürünlerin statik testleri gerçekleştirilmiştir.

Ahmadi *et al.* (2015) tarafından yapılan çalışmada, SLE tekniği ile 6 farklı kafes yapı türü ve 3 farklı doluluk oranı kullanılarak Ti-6Al-4V alaşımından üretilmiş numuneler üzerinde yapılan statik testlerde, tüm kafes türleri için doluluk oranının artışı ile beklenildiği gibi basma özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir. Elmas kafes yapısına sahip birim hücre, diğer kafes türlerine oranla daha düşük basma özellikleri sergilemiştir. Ayrıca rijitlik açısından yapılan değerlendirmede, en yüksek rijitlik kesik küp (truncated cube) birim elemanlarından elde edilirken, en düşük rijitliğe sahip yapı elmas birim hücre olarak belirlenmiştir.

Kadkhodapour *et al.* (2015) tarafından yapılan diğer bir çalışmada Ti-6Al-4V alaşımından, elmas ve kübik yapıdaki deney numuneleri, değişken çubuk çapı ile farklı bağıl yoğunluk oranlarında üretilerek basma testi sonrası deformasyon mekanizmaları deneysel ve numerik olarak karakterize edilmiştir. Yapılan bu çalışma sonrası mekanik özelliklerdeki değişimin temel kaynağının hücre yapısındaki geometri olduğu sonucuna varılmıştır. Yapıdaki çubukların çekme-basma gerilmesi veya eğilme gerilmesi baskın olma durumlarının sistemin

deformasyon davranışında etkili olduğunu belirterek, kübik ve elmas kafes yapısına sahip sistemlerin deformasyon davranışını irdilemişlerdir. Belirlenen yükleme şartları altında, yükleme yönündeki çubukların sistemin dayanımını arttırırken açılı konumlanan ve eğilme yüküne maruz çubuk elemanlar ile sistemin deformasyon kabiliyetinin artması ve sönümleme özelliklerinin gelişmesine fırsat oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Wauthle *et al.* (2015) tarafından yapılan çalışmada ise inşa yönü, ısıtma işlemi ve mikroyapının, eklemeli üretim tekniği kullanılarak Ti-6Al-4V alaşımından üretilmiş elmas örgü yapıları deney numunelerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sıcak izostatik presleme (HIP) ve gerilme giderme ısıtma işlemlerinin farklı üretim doğrultuları ile olan değişimini incelemişlerdir. Gerilme giderme işleminin üretim sonrası tüm uygulamalar için yapılması gerektiği ve HIP işleminin ise özellikle tekrarlı yükler altında ömür üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Gerilme giderme sonrası martenzitik fazın α fazına dönüştüğü, ancak tane yönelmesinin görülmediği, HIP sonrası ise yapının lamelli α ve β fazlarından oluştuğunu ve yapının üretim yönü ve kafes türünden bağımsız olarak neredeyse izotropik olduğunu belirtmişlerdir. İnşa yönü bakımından 45° ile üretilen kafes sisteminin basma dayanım ve rijitliği bakımından yatay ve dikey olarak üretilen numunelere göre yaklaşık % 35 daha düşük değerlere sahip olduklarını ve bu karakterin ısıtma işlemleri ile değişmediğini ifade etmişlerdir. Gerilme giderme sonrası kırılma uzaması % 20 - 40 arasında düşüş gösterirken HIP sonrası bu durum artma eğilimine geçmiş ve % 25 - 70 arasında artış göstermiştir. Üretim yönüne bakıldığında yatay ve dikey olarak yerleştirilen kafes sisteminde çubuk elemanların açılı olması neticesinde 45° ile yerleştirilen numunelere göre çubuk içi mikro boşluk konsantrasyonunun daha az olduğu, buna neden olan mekanizmanın ise 45° ile yerleştirilen numune içerisinde yatay olarak bulunan elemanların çokluğundan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Mekanik özelliklerde ciddi değişiklik görülmesinin, elmas kafes yapısının izotrop özellik sergilemesi ile ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Liu *et al.* (2018) tarafından yapılan çalışmada, elmas ve gyroid kafes yapısının izotropik davranış sergilemesi ve homojen gerilme dağılımı sağlaması ile kübik sistemlere göre daha etkili olduğu belirtilmiştir. Brenne *et al.* (2013) tarafından yapılan diğer bir çalışma ile elmas kafes sistemi de dâhil olmak üzere çubukların birleşim noktalarındaki keskin geçiş noktalarının kemik gelişimi için homojensizliklere neden olabileceğini ve yine böylesi keskin geometrik durumların gerilme yığılmalarına yol açarak özellikle yorulma davranışında olumsuzluklar getirdiğini belirtilmiştir. Elmas yapının kendi kendini destekleyerek üretim esnasında destek yapılarının kullanılmadan üretilmesi ile bu kafes sisteminin üretiminin katmanlı imalat yöntemleri için oldukça uygun olduğunu öne sürmüşlerdir. Çalışmalarında elmas kafes

sisteminin birim kafes büyüklüğünü sabit tutarak, çubuk çapı ve buna bağlı olarak düğüm noktalarında yumuşatılmış geçişlerin yarıçaplarını değiştirmişlerdir. Buna göre yumuşak geçiş çaplarındaki değişim porozite üzerinde ciddi bir etki göstermezken, çubuk çapının porozite değişimi üzerinde oldukça etkili olduğunu belirtmişlerdir. Kemik dokunun mekanik özellikleri; kemiğin vücuttaki konumu hastanın yaş ve cinsiyeti gibi faktörler etkisi altında oldukça geniş değer aralığında değişmektedir. Böylesi şartlar altında elmas kafes sisteminin de kemiğe benzer şekilde geniş değerler vermesinin, bu kafes sisteminin implant olarak kullanılabilirliğine olumlu katkı yaptığını öne sürmüşlerdir. Geçiş bölgelerindeki bu tasarımın porozite üzerinde ciddi değişimlere neden olmazken yapının dayanım ve rijitlik gibi mekanik özellikleri üzerinde ciddi gelişim göstermesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Geçiş bölgelerinin varlığının yapı içerisinde gerilme dağılımını değiştirerek düğüm noktalarındaki çekme gerilmelerini çubuk elemanların üzerine doğru taşıdığını ve kayma kırılması durumu oluşturarak basma eksenini ile 45° açı yaparak maksimum kayma ekseninde kırılmaların gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Yumuşatılmış düğüm noktalarındaki bu geçişin kırılma tipini değiştirmesinin yanısıra artan çubuk çapının da benzer etkiyi yaptığı, çubuk elemanların eğilme baskın davranış kazandığını, azalan porozitenin deformasyon davranışını değiştirdiğini ifade etmişlerdir.

Ghouse *et al.* (2017) üretim parametrelerinin yapıya aktarılması üzerine yaptıkları çalışmada, kontür ve nokta vuruşu stratejileri ve farklı lazer güçleri ile elde ettikleri yapıların mekanik özellikler üzerindeki değişimi incelemişlerdir. Düşük lazer gücü ile elde edilen rastgele kafes sistemine sahip yapıların akma gerilmesinin elastisite modüllerine oranını dikkate aldıklarında Ti-6Al-4V alaşımı için % 10 artış sağlandığını ancak paslanmaz çelik tozdan elde edilen numunede ise bu durumun tam tersi davranış sergilediğini belirtmişlerdir. Üretim parametrelerinin etkisi ile yapıya aktarılan ısı ve bu ısı girdisinin aktarım geçmişinin malzemenin mikro yapısına ve bunun bir sonucu olarak mekanik özellikler üzerinde ciddi bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır.

Heinl *et al.* (2008) EDE yöntemi ile ürettikleri elmas ve ızgara kafes yapısının mekanik özelliklerini ve numunelere uygulanan biyoaktif yüzeyin özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında kafes sistemlerinin oldukça geniş mekanik özellikler sergileyebilmeleri ile implant kullanımındaki üstünlüklerini vurgulamışlardır. Uygulanan kimyasal yüzey işlemi ve biyoaktif yüzey kaplamasının hücre gelişimine yardımcı olacağını belirterek mekanik özellikleri kemik dokuya oldukça yakın elde edilen bu kafes sistemlerinin, değiştirilecek porozite miktarı ile oldukça geniş mekanik özellikler sergileyebileceğini ve uygulanan biyoaktif yüzey işlemleri ile implantın uzun dönem stabilizasyonunun sağlanacağını öne sürmüşlerdir.

Yan *et al.* (2015) yaptıkları çalışmada gyroid ve elmas kafes sistemlerinin mekanik

özelliklerini, değişken porozite miktarları için irdelemişlerdir. SLE yöntemi ile ürettikleri Ti-6Al-4V alaşımında ortaya çıkan topaklanma kusurunun, tasarımdan gelen eğimli yüzeylerden kaynaklanan basamak etkisinden ve katılaşılan bölgeleri çevreleyen toz partikülleri arasındaki yüksek ısı farktan kaynaklanan difüzyon prosesi sonrası oluştuğunu ifade etmişlerdir. Basamak etkisi üretim için planlanan katman kalınlığının azaltılması ile giderilebilir ancak bu azalma, üretim zamanının artması anlamına gelmektedir. Trabeküler ve kortikal kemiğin özelliklerini temsil etmesi amacı ile üretim için planladıkları % 80-95 poroziteye sahip kafes sistemlerini inceleyerek, elde ettikleri mekanik özelliklerin Gibson-Ashby modelinden farklı davrandığını belirtmişlerdir. Bu farklılığın, modelin oluşumunda kullanılan rastgele sistem modeline göre geliştirilmesi, modelde kalıntı gerilme durumunun dikkate alınmaması ve teorik modelde çubuk kesit ekseninin teorik olarak eksende olduğu kabullerinden kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir. Mikro yapının incelenmesinde kullandıkları içyapı görüntüleri ve XRD analizlerine bakıldığında ise hızlı soğuma sonucu yapının martenzitik α' ve bir miktar β fazı içerdiğini belirtmişlerdir. Uygulanan ısı işlem ile yavaş soğuma sonucu yapıda α fazının geliştiğini ancak ısı işlem sıcaklığının β dönüşüm sıcaklığı altında olması nedeni ile birincil β yapısının devam ettiğini belirtmişlerdir.

Li *et al.* (2016) farklı gözenek (pore) boyutlarına sahip elmas kafes örgü sisteminin mekanik ve biyolojik özellikleri üzerine yaptıkları çalışmada, poroz yapıların kemik dokuyu simule ederek gerilme yığılması etkisini ve biyolojik hareketliliği sağlaması ile bu yapıların oldukça efektif sistemler olduğunu belirtmişlerdir. Gözenek boyutu açısından 300 ile 400 μm arasındaki gözenek boyutuna sahip sistemlerin kemik gelişimi ve homojenlik açısından en ideal sistem olduğunu belirtmişlerdir. Bu kemik gelişiminin, yüzey alanının artması ve yapı içerisindeki gözenek hacminin besin–oksijen taşınımı için yeterli olması ile ilintili olduğunu öne sürmüşlerdir.

Sing *et al.* (2016) yaptıkları çalışmada kare piramit (square pyramid) ve kesik küp (truncated cube) kafes topolojisine sahip titanyum malzemeden elde ettikleri sistemlerin statik basma testlerini gerçekleştirmişlerdir. Üretim parametresi olarak test ettikleri tarama hızı ve lazer gücü için, sabit lazer gücündeki artan tarama hızı ile toz malzemeye aktarılan enerjinin düştüğünü ve üretim sonrasında ortaya çıkan kısmi ergimiş topaklanma etkisinin azaldığını ifade etmişlerdir. Elde edilen sonuçların, Loh *et al.* (2015) tarafından yapılan çalışmanın sonuçları ile uyum içerisinde olduğu ifade edilmiş, lazer gücü ve tarama hızı parametrelerinin elde edilecek eriyik havuzu üzerinde oldukça etkili olduğu belirtilmiştir.

Faz yapısı ve morfolojik özellikleri titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri üzerinde oldukça ciddi öneme sahiptir (Al-Bermani *et al.* 2010). SLE tekniği ile üretilen ürünlerin üretim

felsefesi gereği ortaya çıkan hızlı ergime ve katılaşma prensibi ile hızlı soğuma sonucu, yarı kararlı fazlar, gaz boşlukları ve kalıntı gerilmeler ortaya çıkmaktadır (Vilaro *et al.* 2011). Titanyum ve alaşımlarında, hacim merkezli sıkı paket hegzagonal yapıya sahip α ve martenzitik yapıya sahip α' fazlarının varlığı ile bu durum süneklik değerlerini sınırlandırmaktadır. Kırılma tokluğu ve çatlak ilerlemesi üzerine yapılan bir çalışmada, hızlı soğuma sonucu ortaya çıkan martenzitik fazın, kırılma tokluğunu düşürdüğünü belirtilmiştir (Edwards and Ramulu 2015). Ti-6Al-4V alaşımının mikro yapısı eş eksenli ve β fazına sahip taneler arasına dağılmış ince α tanelerinin varlığı ile optimum uzama, dayanım ve kırılma tokluğunu sağlarken, lamelli mikro yapısı ise dayanımda yüksek değerleri sunmasına karşın süneklik bakımından ödün vermektedir (Facchini *et al.* 2010, Krakhmalev *et al.* 2016). Titanyum alaşımlarının üretimi esnasında kullanılan argon koruyucu atmosferine rağmen, oksijen ve azot gibi α dengeleyici elementlerin yapıya girmesi ile α fazı baskın hale gelir ve bu fazın sınırlı sünekliği ve martenzitik yapının varlığı ile deformasyon miktarı oldukça düşük kalmaktadır (Facchini *et al.* 2010, Yang *et al.* 2016). Gerilme ve uzama değerlerindeki bu değişim sadece üretim esnasında yapıya giren arayer atomlarının varlığından ciddi olarak etkilenmekte, yapıda ağırlıkça yaklaşık % 2 oranındaki oksijen, dayanımı arttırırken süneklik değerlerinde ciddi azalmaya sebep olmaktadır. Ayrıca azalan oksijen ve azot konsantrasyonu ile sünekliğin yanı sıra gerilmeli korozyon dayanımı, kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme direnci de artmaktadır (Krakhmalev *et al.* 2016). Uygulanan ısı işlemler ile yapıda mikroyapısal dönüşüm sağlanması, üretimden gelen kalıntı gerilmelerin ve içyapısal kusurların nispeten giderilmesi ile statik ve dinamik mekanik özellikler açısından bir değerlendirme yapıldığında, dayanımdan bir miktar ödün verilmesine rağmen süneklik ve ömür bakımından iyileşme görüldüğü belirtilmektedir (Gorny *et al.* 2011).

Aynı üretim parametreleri kullanılmasına rağmen tasarımların üretim tablasına konumlandırılmasındaki farklılıklar ile üretim yüksekliğinin değişimi neticesinde malzeme üzerine gelecek olan ısı etkiler değişkenlik göstererek, mikroyapının ve mekanik özelliklerin değişimine neden olmaktadır. Benzer durum aynı üretim tablasında tekil üretimin veya çoklu üretimin gerçekleştirilmesinde parça üzerine gelen ısı etkinin tekrarlanma sürelerinin farklılığı sebebi ile de oluşmaktadır. Artan bekleme süresi bir üst katmanın daha hızlı soğuması neticesinde ince taneli yapının oluşması ile dayanımın yüksek, deformasyon yeteneği daha sınırlı yapıların elde edilmesine neden olmaktadır. Deformasyon yeteneği ve deformasyon sertleşmesi sınırlı olan yapılarda gerilme konsantrasyonu etkisi nedeni ile daha hızlı çatlak başlangıcı ve hasar meydana geldiği bilinmektedir (Ahmadi *et al.* 2018). Uygulanan enerji yoğunluğu katmanların birbiri ile süreklilik oluşturması için yeterli olmaması durumunda, tabakalar arası ayrılmalar, boşluk konsantrasyonunun artması ve yarı eriyik parçacıkların

varlığı gibi kusurlara sebep olarak mekanik özelliklerin kötüleşmesine neden olmaktadır (Yadollahi and Shamsaei 2017).

Biyolojik dokuların taklit edilmesinde kafes sitemelerinin varlığı ile ciddi katkılar elde edilmekte olup, özellikle sert dokuların onarılması ve desteklenmesinde karşılaşılan gerilme kalkanı durumunun olumsuz etkilerini gidermede porozitenin uygunluğu en önemli özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Porozitenin kontrolü ile kafes siteminin rijitlik davranışı kemik dokuların rijitliği ile bağdaştırılabilir (Ryan *et al.* 2006). Kemik gelişimi için gereken gözenek boyutunu araştıran çalışmalar bu değerin farklı deney hayvanlarında kemik gelişimi için değişkenliği ortaya koymuştur. Kemik dokunun gelişimi için porozitenin en az 100 μm olması gerektiği ve bu değerin 200 μm ve üzerinde olan çalışmalarda kemik büyümesi, biyolojik sıvıların hareketliliği ve gerilme kalkanı etkisinin azaltılması gibi durumların kontrolü için oldukça değişkenlik sergilediği ifade edilmektedir (Karageorgiou and Kaplan 2005; Hollander *et al.* 2006; Vasconcellos *et al.* 2010; Wysocki *et al.* 2016). Mour *et al.* (2010) çalışmalarında kemik gelişimi için gözenek çapının 100 μm 'den büyük olması gerektiğini belirtmiş ve optimum pore büyüklüğünün 500 ile 1500 μm aralığında olması gerektiğini savunan çalışmalara istinaden, 900 μm 'lik pore çaplı dode kafes sistemini Ti-6Al-4V ELI alaşımı malzeme için modelleyerek numerik çözüm elde etmişlerdir. Çalışma sonucuna göre elde edilen kafes sistemi içerisinde maksimum gerilme değerlerinin elde edildiği bölge belirlenmiş, bu değerin kullanılan malzemenin akma değerinin altında olduğu, maksimum deformasyon miktarının da bu bölgede elde edildiği ve ilgili bölgenin kritik noktalar olan vida bağlantı noktalarından uzak olması ile sistemin yeterli performansı sağladığını ifade etmişlerdir. Ayrıca uygun tasarım ile kemiğe olan deformasyon aktarımının düşük olması sonucu implantın stabilizasyonunun yüksek olduğu belirtilmiştir.

Kasperovich and Hausmann (2015) yaptıkları çalışmada SLE şartları altında katılaşma sürecinde sıcaklık, yerçekimi ve kılcallık etkisinin olduğunu belirterek üretim sürecinde sıvı metal havuzunun kontrol edilmesinde herhangi bir dış etken olmadığını belirtmişlerdir. Uygun olmayan proses parametrelerinin eriyik havuzunun kararlılığını olumsuz etkilediğini ve bu durumda gaz boşluklarının, ergimemiş partiküllerin ve katmanlar arası yeterli birleşmenin olmaması ile iç yapıda kusurlara neden olacağını öne sürmüşlerdir.

Arabnejad *et al.* (2016) çeki bası gerilme durumunda çalışan iki farklı kafes sistemi ile oluşturdukları poroz kafes sistemi için kemik gelişimi ve mekanik özelliklerdeki değişimi irdelenmiştir. Düşük porozite seviyelerinde (% 50) oktet kafes sitemine sahip olan poroz yapının tetrahedron kafes sitemine göre daha rijit ve yüksek dayanıma sahip olduğunu, artan porozite miktarı ile bu durumun değişerek tetrahedron kafes sisteminin daha yüksek mekanik

özellikler sergilediğini belirtmişlerdir. Hücre büyümesi üzerine yaptıkları araştırmalarda ise oktet çubuk sistemine sahip kafes sisteminin tüm porozite seviyelerinde tetrahedron kafes sisteminden daha iyi büyüme davranışı sergilediğini rapor etmişlerdir.

Herhangi bir tasarımda kullanılacak bir parçanın veya elemanın mekanik davranışının deneysel olarak belirlenmesi yüksek maliyetli ve zaman alıcı bir işlemdir. Özellikle kafes sistemlerinin üretim ve karakterizasyonunun uğraşlı ve maliyetli bir süreç olması sebebi ile bu sistemlerin üretimden önce mekanik özelliklerinin yaklaşık olarak belirlenebilmesi oldukça büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu bağlamda sonlu elemanlar analizi gibi numerik bir yaklaşım kullanarak tasarımların mekanik olarak incelenmesi ve ürün özellikleri açısından bir optimizasyon yapılabilmesi çok önemli bir husustur. Literatürde, kafes örgü yapılı malzemelerin mekanik özelliklerinin sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi konusunda sınırlı bilgi bulunmaktadır.

Kafes sistemlerini oluşturan çubuk elamanlardaki boşluklar ve ergimemiş partiküller gibi yapısal kusurların getirdiği olumsuzlukların modele aktarılamaması numerik çalışmaları zorlaştırmaktadır. Malzemenin elastik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan çekme testi sonuçlarına rağmen kafes sistemlerinin basma yükü altındaki burkulma süreçlerinin varlığı elde edilen değerlerin farklılık göstermesine ve numerik çözümlerde sapmalara neden olabilmektedir. Ayrıca sınır şartlarında basma plakaları ile numune arasındaki sürtünme durumunun hesaba katılmaması da deney sonuçlarının ve numerik çözümlerin iraksamasına neden olmaktadır.

Yukarıda özetlenen konu ve literatür özeti kapsamında SLE yöntemi ile üretilen kafes yapıların statik mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalar dikkate alındığında, ağırlıklı olarak farklı kafes türlerinin ve doluluk oranlarının irdelendiği görülmektedir. Ancak Şekil 1’de gösterildiği gibi özellikle SLE yöntemindeki üretim parametre/stratejilerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin mikroyapı ile birlikte irdelenmemesi literatürdeki büyük bir eksiklik olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca literatürde statik özelliklerin incelendiği çalışmalar dikkate alındığında, kafes yapılarının SLE yöntemi ile üretilmesinde lazer gücü, tarama hızı, bindirme mesafesi ve katman kalınlığı değerlerinin sabit tutularak tek bir lazer enerji yoğunluğu (E) kullanıldığı ve bu parametrelerin mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin sistematik olarak değerlendirilmediği belirlenmiştir. Halbuki mekanik özellik değişimlerinde anlamlı bir değerlendirme yapılabilmesi için ana etkenler (kafes türü, doluluk oranları) ile yan etkenlerin (üretim parametreleri) bir arada ele alınması gerekir. Bu sebeple yapılan tez çalışması, SLE yöntemi ile üretimdeki birçok parametrenin eş zamanlı/kompakt olarak incelenmesi ve kafes yapıların üretilmesi esnasında kullanılacak parametrelerin belirlenmesi için uygulanabilir bir

metodoloji geliştirilmesini hedeflemiştir.

Bu tez çalışmasında, medikal, havacılık ve otomotiv gibi kalite ve güvenilirliğin üst seviyede arzu edildiği alanlarda giderek kullanımı yaygınlaşan SLE yöntemi ile değişken üretim parametreleri kullanılarak, farklı kafes yapıları ve doluluk oranlarında ile üretilmiş Ti-6Al-4V ELI alaşımının mikroyapısal ve mekanik özellikleri deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar kapsamında, poroz yapılı metalik biyomalzemeyi oluşturacak birim hücreler için elmas ve kübik kafes yapıların kullanım alanının geniş ve her iki kafes yapısının da izotropik karakterde olması ile elmas ve farklı formlardaki kübik kafes yapılar tercih edilmiştir. Deney numunelerin üretimi aşamasında; değişken inşa oryantasyonu ve farklı lazer üretim parametreleri (lazer gücü, tarama hızı ve bindirme mesafesi) kullanılarak bu parametrelerin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, üretimden kaynaklanan hataların ikincil işlemler yerine üretim parametrelerinin geliştirilmesi ile azaltılması öncelenmiştir. Ayrıca, toz üretimi ve katmanlı imalat sürecindeki yüksek maliyetler, kafes yapıların farklı tasarımları ve doluluk oranları için mekanik testlerin gerçekleştirilmesindeki zorluklar dikkate alındığında, bu sistemlerin mekanik özelliklerinin sonlu elemanlar analizi desteği ile numerik olarak incelenebilmesi adına modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Eklemeli imalat günümüzde ve gelecekte geleneksel üretim yöntemleri ile üretimi imkânsız veya zor olan tasarımların üretiminin önünü açan, oldukça hassas ve yeni bir üretim teknolojisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Eklemeli üretim yöntemleri takım ve kalıp gibi sistemlere ihtiyaç duymaksızın küçük hacimli tekil üretimlerin veya karmaşık geometrilerin üretiminde oldukça kullanışlı yöntemlerdir. Özellikle havacılık ve biyomedikal uygulamalardaki özel geometrilerin, ağırlığı azaltılmış kafes sitemlerinin ve kişiye özel implantların hızlı, yüksek verim ve iyi boyut toleransı ile üretilebilmesinde eklemeli üretim yöntemleri oldukça umut vericidir. Üretimden çıkan ürünlerin nihai kullanılacak geometrilerin, sadece ısı işlemler ve/veya yüzey işlemleri gibi ikincil işlemlerin uygulandığı ürünler olması, bu teknolojinin hızlı prototiplemeden hızlı üretime geçtiğini göstermektedir.

Havacılık ve medikal uygulamalarda, sahip olduğu üstün mekanik özellikleri, yüksek korozyon direnci, biyouyumluluğu ve yoğunluğuna göre yüksek olan mukavemeti ile titanyum ve alaşımları sıklıkla tercih edilmektedir. Eklemeli imalatın sunduğu karmaşık geometrilerin üretilebilirliği ile titanyum ve alaşımlarının üstün özelliklerinin bir araya getirilmesi, özellikle medikal alanda güvenilirliği ispatlanmış malzemeler üzerinde bilimsel çalışmalar yapılmasını gerekli kılmaktadır.

Titanyum ve Alaşımları

Titanyum, çelik ve nikel esaslı süper alaşımlara oranla düşük yoğunluğu, iyi korozyon direnci, paslanmaz çeliklere göre yüksek dayanımı ve düşük termal genleşme katsayısı ile havacılık ve medikal alanlarda oldukça geniş yer bulan, saflaştırılması, elde edilebilirliği ve işlenmesi özel önlemler/işlemler ve maliyet getiren ileri teknolojik uygulamaların merkezinde, oldukça geniş alaşımları bulunan bir metaldir. Titanyum ve alaşımları allotropik dönüşüm göstererek iki farklı kristalografik yapıya sahiptirler ve bu yapıların mikro yapıdaki oranlarına göre alfa (α), alfa + beta ($\alpha+\beta$) ve beta (β) olmak üzere üç temel gruba ayrılırken yakın alfa ve yarı kararlı beta olmak üzere alt kategorilerin kullanılması da söz konusudur. Titanyum alaşımlarında, içerdikleri alaşım elementlerine göre faz dönüşüm sıcaklığının değişimi ve α veya β bölgesinin genişlemesi söz konusudur. Örneğin alüminyum ve daha küçük atom çapına sahip olan arayer elementleri α bölgesinin genişlemesine neden olurlar (Leyens and Peters 2003). Titanyum ve alaşımlarının mekanik ve kimyasal özellikleri, sahip oldukları mikro yapıdaki bu iki fazın oranı ve faz özellikleri ile belirlenmektedir. Hacim merkezli sıkı paket hegzagonal (SPH) kafes yapılı α , hacim merkezli kübik (HMK) kafes yapılı β ile

karşılaştırıldığında düşük deforme edilebilirlik, kafes yapısı gereği anizotropik mekanik ve fiziksel özellikler ve daha iyi korozyon direnci sergilemektedir. Titanyum ve alaşımlarının oksijene karşı kimyasal ilgisi oldukça yüksek olup, yüzeylerinde oluşturdıkları yoğun ve ince TiO_2 tabakası ile oldukça yüksek korozyon direncine sahiptirler. Her iki kristal yapının üstün özelliklerini bir arada sunan $\alpha+\beta$ yapılu alaşımlar içerisinde Ti-6Al-4V en yaygın kullanılan titanyum alaşımıdır. Uygulanacak ısıtma işlemleri ve soğutma hızına bağlı olarak yapıdaki α ve β miktarları değişiklik göstererek küresel, martenzitik veya lamelli olması ile mikro yapısal farklılıklar görülmekte ve dolayısı ile değişen mekanik özellikler elde edilebilmektedir (Lütjering 1998).

Titanyum gibi elde edilmesi zor ve maliyetli metallere elde edilecek geometrilerde kullanılacak geleneksel üretim yöntemleri, malzeme uzaklaştırma prensibi ile çalıştılarından atık miktarları üretim maliyetlerini artırmalarının yanı sıra, tutuşma tehlikesinden dolayı talaşlı imalatla özel önlem ve sistemlere ihtiyaç duymaktadır. Toz metalürjisi gibi yöntemler ise bu atık miktarının olabildiğince azaltıldığı ve neredeyse son ürüne yakın geometrilerin elde edildiği ve böylelikle maliyetin azaltıldığı süreçler olup, üretilecek parça geometrisi ve büyüklüğü açısından bazı kısıtlamalara sahiptir. Özgün kompleks tasarımların üretimini daha verimli ve kolay hale getiren katmanlı imalat yöntemleri oldukça avantajlı bir üretim yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır (Bremen *et al.* 2012).

Katmanlı İmalat

ASTM F2792-12a standardında ifade edildiği şekli ile katmanlı imalat; talaş uzaklaştırma yöntemlerinden farklı olarak, genellikle malzemelerin üst üste eklenmesi ile objelerin üç boyutlu dijital model tasarımından doğrudan elde edilmesi olarak tanımlanmaktadır. Eklemeli üretim, eklemeli prosesler, eklemeli teknikler, eklemeli katmanlı üretim, katmanlı üretim ve serbest şekil üretimi gibi farklı isimler ile anılabilir de, hızlı prototiplemeden farklı olarak bu yöntemler son ürün olarak gereken biçim ve beklenen mekanik özellikleri sağlayabilmektedir. Katmanlı üretim, üç boyutlu geometrilerin iki boyutlu kesitlerinin birleştirilmesi ile elde edilmesi, her bir kesit geometrisinde üretilen ham maddenin tam veya kısmi olarak ergimesi ile bir önceki kesit tabakasında işlem gören katmanlar ile birleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Geleneksel yöntemlerde pek çok üretim adımı ve farklı üretim teknikleri ile malzeme uzaklaştırma esasları ile elde edilebilecek olan mekanizmalara ait tüm parçalar, katmanlı üretimde tek bir adımda üretilmektedir (Gibson *et al.* 2015).

Gelişen bilgisayar-kontrol teknolojileri ve lazer sistemleri ile 1980'li yıllarda farklı laboratuvarlarda elde edilen *Stereolithography* yöntemi ile patentler alınmış ve giderek gelişim göstermiştir. Başlangıçta ultraviyole ışınlar ile sertleşen ışığa duyarlı polimer malzemelerin

üretimi gerçekleştirilmiş, lazer, elektron demeti ve plazma gibi odaklı enerji kaynaklarının uygulanması ile katmanlı imalat teknolojileri, metaller, seramikler ve farklı kompozit türlerinin de kullanıldığı bir üretim sistemi halini almış olup, havacılık ve sağlık gibi güvenilirliğin ön planda olduğu alanlarda son ürünlerin kullanıldığı süreçlere gelinmiştir.

Katmanlı imalat teknikleri, günümüz ve gelecekte tasarımın sonsuzluğuna hayat verebilecek yetenekliliği ve takım/kalıp gibi sistemlere ihtiyaç duymaksızın tekil/küçük hacimli veya karmaşık geometrilerin üretilmesinde oldukça kullanışlı yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Katmanlı imalat yöntemleri;

- Geleneksel üretimdeki kısıtlamalar nedeni ile kısıtlanan tasarımların sınırlarını genişletmek,
- Hafif, gözenekli yapıların üretimindeki zorlukları ortadan kaldırmak,
- Karmaşık iç soğutma kanallarına sahip sistemlerin üretilmesine olanak sağlamak,
- Üretimin neredeyse son geometriyi vermesi ile atık miktarını azaltmak ve talaşlı imalatı zor alaşımların üretim zorluklarının üstesinden gelmek,
- Son işlemlere ihtiyaç duymayarak mekanizmaların dahil tek seferde üretimini sağlayabilmek,

gibi birçok avantajlara,

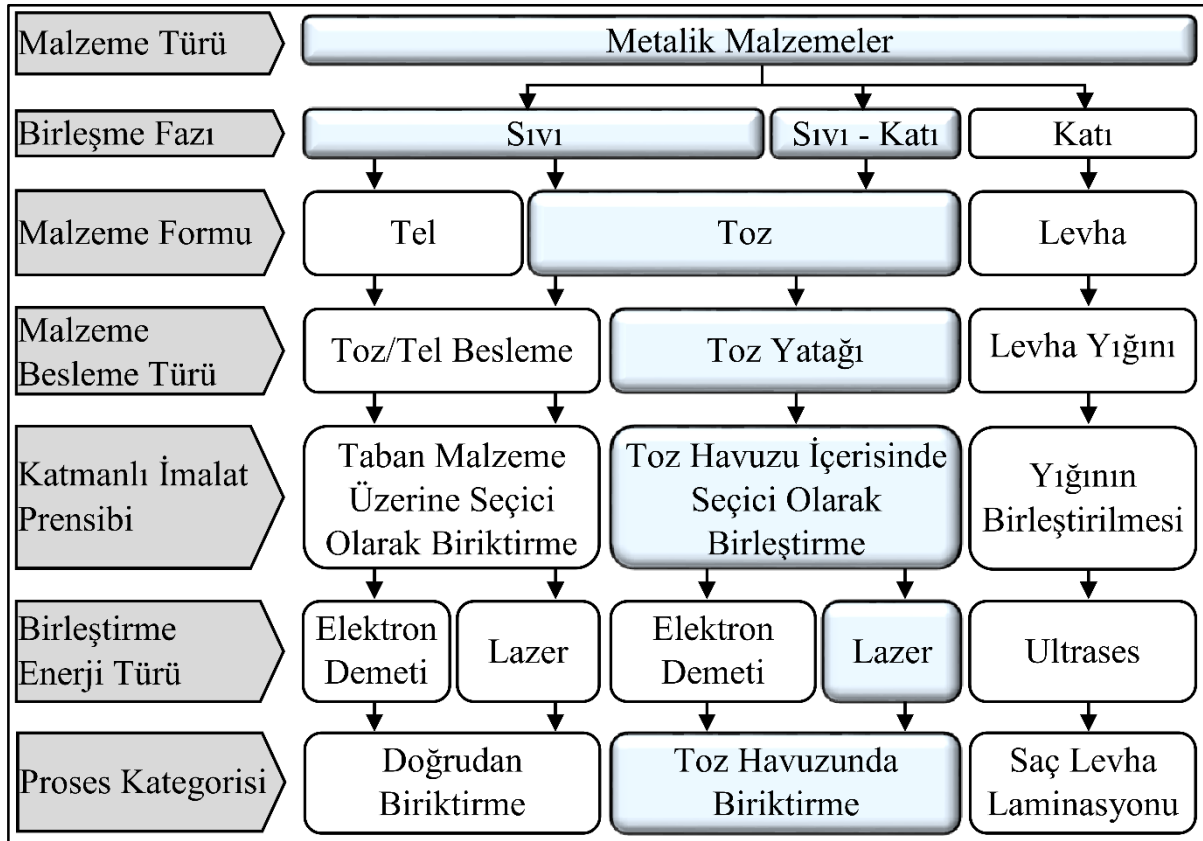
- Üretim boyutlarının sınırlı olması veya toz beslemeli sistemler ile üretilmesinde büyük hacimleri için üretim süresinin uzaması,
- Üretim sayılarının düşük olduğu parçalarda verimli, artan miktarlarda maliyetli olması,
- Üretimde parça yerleşimine göre destek yapılarına ihtiyaç duyması ve bu kısımlara yüzey işlemleri gerekliliği,
- Üretimden gelen anizotropi ve % 99,9 üretim yoğunluğuna sahip olmasına rağmen yapıda var olabilen boşluk miktarı ile mekanik özelliklerin farklılığı,

gibi dezavantajlara sahip olup, eklemeli imalat yöntemlerinin geliştirilmeye açık yönleri karşımıza sıklıkla çıkmaktadır.

Özellikle havacılık ve biyomedikal uygulamalardaki özel geometrilerin, ağırlığı azaltılmış kafes sistemlerinin ve kişiye özel implantların yüksek verim, hız ve iyi boyut toleransları ile elde edilebilirliği, bu yöntemlerin üretim başarısını göstermektedir. Her bir katman kalınlığının planlanan değerler ile elde edilmesi sayesinde tasarım ile üretime ait boyut toleransı birbirine yaklaşmaktadır. Azaltılan katman kalınlığı ile üretim zamanının artması ve boyut toleransının giderek iyileşmesi söz konusudur. Ancak azalan katman kalınlığı nedeni ile

üretimde yapıya giren ısı girdisi artmakta ve bu değişiklikler ürünün mekanik özellikleri üzerinde ciddi etkilere neden olmaktadır.

ISO/ASTM 52900:2015 standardı, metalik malzemelerin eklemeli imalat yöntemleri ile üretiminde kullanılan sistemleri rapor etmiştir. Metalik malzemeler sıvı, katı veya katı ve sıvı fazın aynı anda oluşabildiği fazlarda birleştirildiği, birleştirilecek olan metalik malzemenin tel, toz veya levha olarak ilgili üretim kısmına beslendiği görülmektedir. Toz formunda besleme sistemlerine sahip sistemlerde bir toz havuzu içerisinde veya enerji kaynağının odağına sürekli toz akışının sağlanması ile üretim yapılabilir. Toz havuzu içerisinde ilgili kesitin uygulanan enerji türü altında birleştirilmesi ile eklemeli imalat yöntemi alt ismini almaktadır. Buna göre kullanılan sistem Şekil 2’de vurgulanan kısmı ile Seçici Lazer Ergitme veya Sinterleme yöntemi olarak adlandırılmaktadır.



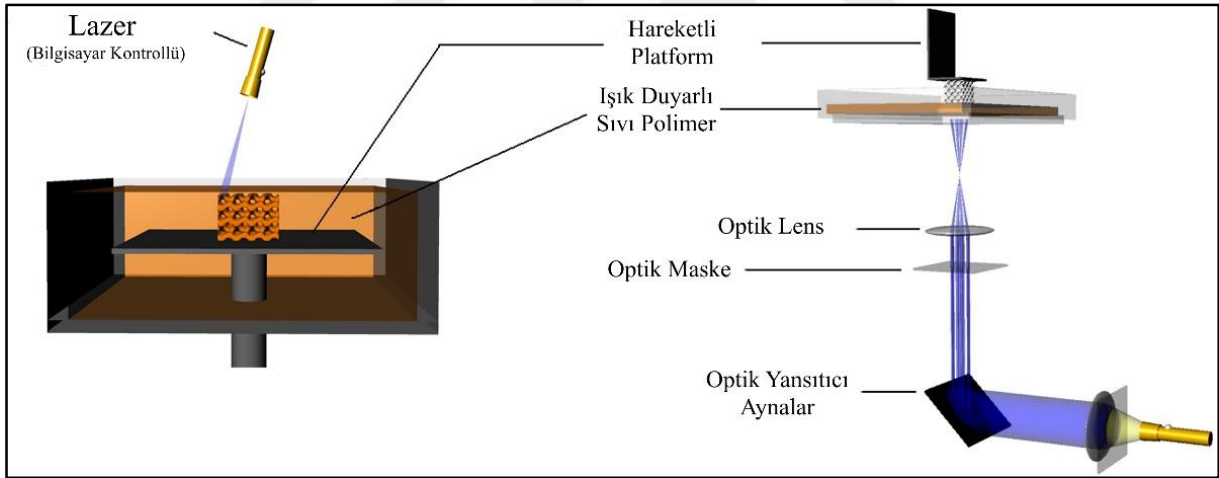
Şekil 2. Metalik malzemelerin eklemeli imalat sınıflandırılması

Her yeni malzeme grubu için optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi yüksek maliyet ve hata oranları ile elde edilmesi ve bu süreçlerin sınırlı malzemeler için sınırlı alt yapıya sahip olması dolayısı ile bu proses parametrelerinin nihai ürün üzerindeki etkilerinin bilinmesi ve araştırılması oldukça önemli olmaktadır. Uygulanan enerjinin malzeme ile etkileşim süreçleri, bu enerjinin toz, tel ve ergime havuzu tarafından emilimi, sıvı havuzunun yeniden katılaşması, toz partiküllerinin sıvı tarafından ıslatılması, iletim ve ısıyım yolu ile tozdaki ısı transferi, iletim ve taşınım mekanizmaları ile sıvı havuzdaki ısı transferi, kapiler etki

ve yer çekimi ile sıvı havuzun hareketi gibi etkenler bu sistemin kontrolünde oldukça karmaşık bağlantılar oluşturmaktadır. Sıvı havuzun bu dinamik yapısı nedeni ile oluşan kararsız durumlar üretim hataları ile sonuçlanmakta ve malzemenin özellikleri üzerinde etkili olmaktadır.

Stereolitografi

Stereolitografi (SLA) ışığa duyarlı polimerik sıvının ışık kaynağı ile kontrollü olarak katılaştırılması veya kürleşmesi ile üç boyutlu modellerin elde edildiği, katmanlı imalat yöntemlerinin ilk kullanılan modeli olarak karşımıza çıkmaktadır. Üretimi gerçekleşen katman sonrası üretim tablasının katman kalınlığı kadar hareket ettirilmesi ile model tamamlanır. Bu sistemde üretimin sıvı havuzu içerisinde gerçekleşmesi ile destek yapılarına ihtiyaç duyulmaması ve iyi yüzey özellikleri ile üstünlük sağlamaktadır (Bartolo 2011). SLA yönteminin sunduğu üretim hassasiyeti, sistemin sahip olduğu optik elamanların ve kullanılan ışığa duyarlı polimerin özellikleri ile doğrudan ilgilidir (Awad *et al.* 2018). Üretim sonrası yüzey işlemi ve olası aktif malzemelerin ikincil kürleşme işlemleri ile mekanik özellikler iyileşmekte ve kullanım ömrü artmaktadır. Şekil 3'te SLA yöntemine ait şematik bir sistem verilmiştir.

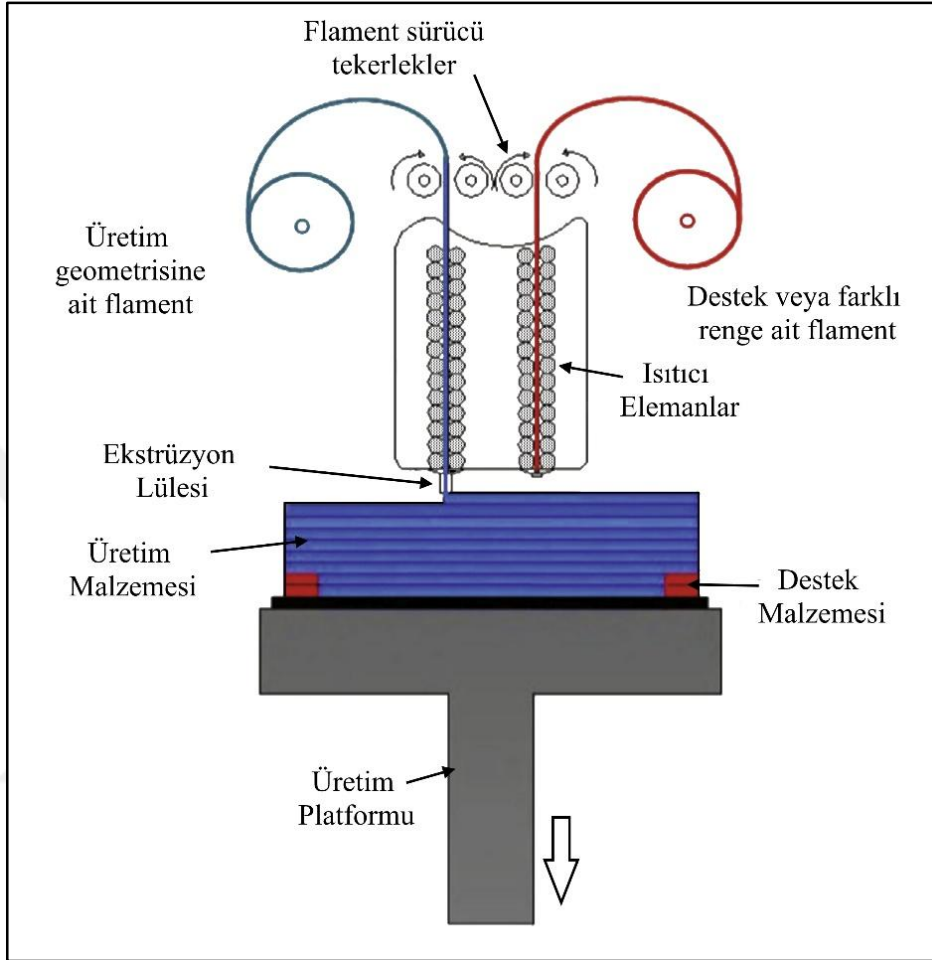


Şekil 3. SLA yöntemine ait şematik bir gösterim (Melchels *et al.* 2010)

Erimiş malzeme şekillendirme (FDM)

Günümüzde bireysel kullanımda oldukça yaygın olan bu yöntemde önceden tel formuna getirilmiş polimer filamentlerin kullanımı söz konusudur. Isıl etki ile akıcılık kazanan polimerin açık kesidinden akışa zorlanarak ekstrüzyon ile lüle formundaki başlığın kontrollü hareketi sonrası tasarımın ilgili kesidinin taranması ile modelin oluşturulması sağlanır. Katı haldeki polimer filamentlerin sürekli beslenmesi ile akıcılık kazanan sıvı haldeki polimer malzemenin akışa zorlanması ile sistem süreklilik kazanmaktadır. Filament oluşturma işlemi esnasında farklı içeriklerin ilavesi ile ahşap, metal gibi bileşenlerin polimer matris içerisinde eritilmesi veya farklı renklere sahip filamentlerin kullanımı söz konusudur. Oluşturulacak modelin destek

yapılarına ihtiyacı söz konusu olup, bu kısımların farklı renkler ve değiştirilen üretim parametreleri ile üretilmesi mümkündür. Katılma işlemi atmosfer şartları altında sistemin sahip olduğu fanlar ile sağlanmaktadır. Şekil 4'te FDM sistemine ait bir şematik gösterim yer almaktadır.



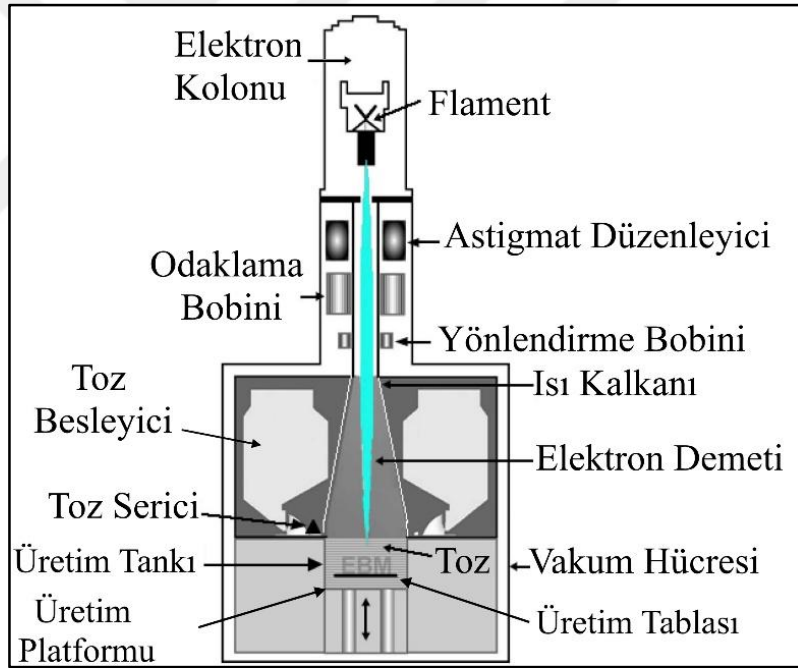
Şekil 4. Erimiş malzeme şekillendirme sistemi şematik gösterimi (Mohamed *et al.* 2015)

Yöntem ile elde edilen ürünün, yüzey işlemleri uygulanarak yüzey profili geliştirilebilmekte, farklı lüle çapları ve katman kalınlıkları ile boyut ve yüzey toleransları iyileştirilebilmektedir. Ancak üretim süresi bu iyileşmelere paralel olarak artma eğilimi göstermektedir. Sistemde atık malzeme olarak destek yapıları ve ciddi bir miktarı kapsamayan başlangıç platform konturları dikkat çekmektedir.

Elektron demeti ile ergitme

Elektron demeti ile ergitme (EDE), katmanlı imalat türleri arasında elektron demeti kullanımı ile toz formundaki malzemenin ergimesinin sağlandığı, tabaka kalınlığının diğer yöntemlere göre daha büyük değerler aldığı, üretimdeki ısı girdisinin daha yüksek olması ile elde edilen parçanın gerilme giderme ısı işlemi uygulanmışçasına gerilme dengeli ürünlerin elde edildiği sistemlerdir. EDE yönteminde toz malzemeye olan enerji aktarımının elektron

aracılığı ile olması bu sistemde elektriksel iletken tozların kullanımını ve elektron hareketinin varlığı nedeni ile sistemin vakum altında olmasını gerektirmektedir. Vakum elemanlarının varlığı ve uygulamanın sadece elektrik iletken malzemelerde uygulanması nedeni ile diğer katmanlı imalat yöntemlerine karşı dezavantajlı olduğu düşünülse de, daha yoğun enerji girdisi ve üretim hızının diğer yöntemlere göre yüksek olması ve ergime şartlarında atmosferin olumsuzluklarının nispeten engellenmesi önemli avantajlar sunmaktadır. Elektron demetinin manyetik lensler ile odaklanması ve kontrol edilmesi lazerlerin hareket ve odaklanmasına kıyaslandığında daha hassas pozisyonlama ve yüksek tarama hızları sunmakta ve üretim hızının artmasını beraberinde getirmektedir (Gibson *et al.* 2010). Ayrıca bu yöntem, düşük akım ile elde edilen elektron demetinin nispeten yüksek tarama hızları ile ergime oluşturmayacak ön tarama metodolojisiyle, kullanılan tozların ön ısıtma işlemini de gerçekleştirebilmektedir. Ancak yöntemdeki temel problem, toz malzemeye sağlanan yüksek ısı girdisi sebebiyle elde edilen ürünün boyut toleranslarının, ergitme aracı olarak lazer kullanan sistemlere nazaran yüzey kalitesinin nispeten düşük olmasıdır. Sistemin şematik resmi Şekil 5'te verilmiştir.

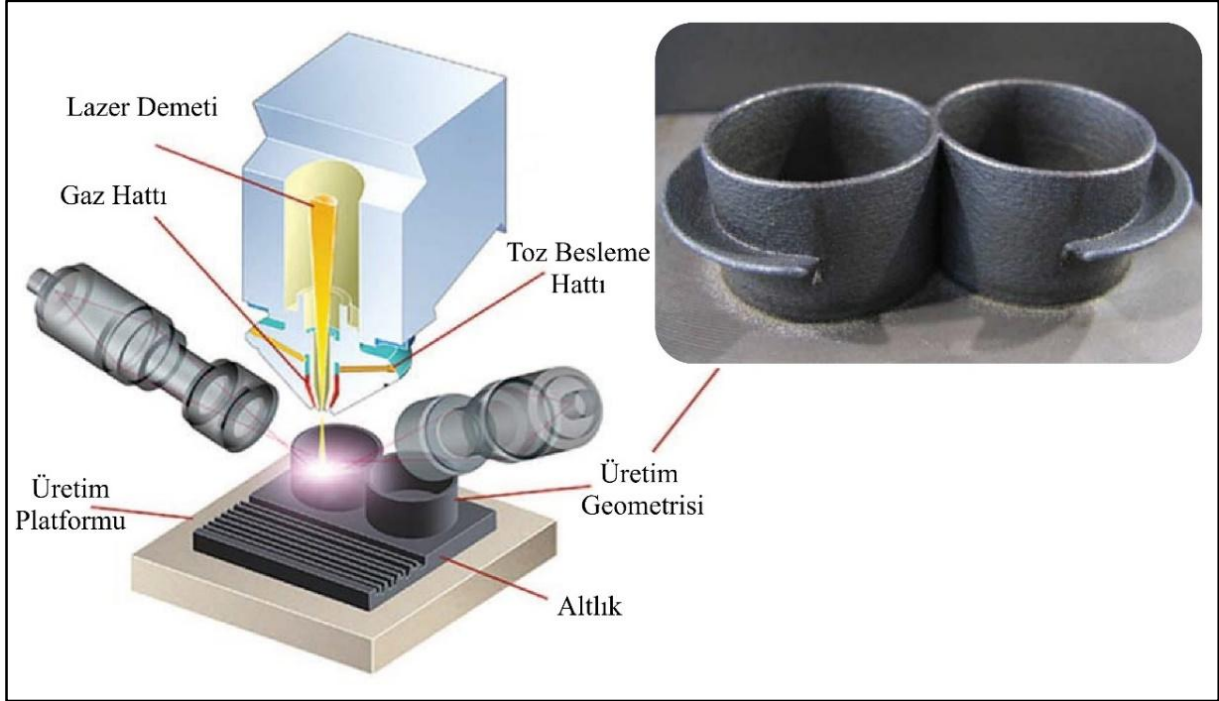


Şekil 5. Elektron demeti ile ergitme sistemine ait şematik gösterimi (Sidambe 2014)

Doğrudan metal biriktirme

Doğrudan metal biriktirme (DMB), katmanlı imalat teknikleri içerisinde toz veya tel formundaki hammaddenin ergitmeyi sağlayan enerji kaynağına beslenmesi ile gerçekleşmekte ve bu yönü ile toz havuzunda biriktirme tekniklerinden farklılık göstermektedir. Bu teknik ile sadece ürünlerin ilk üretimleri değil ayrıca tamir ve bakım süreçleri de desteklenmektedir. Sistem sahip olduğu ölçüm mekanizmaları ile ergitme ve katılaşma bölgesini inceleyerek ilerleme miktarını kontrol etmekte ve geri bildirim yaparak üretim parametreleri olan toz/tel

besleme mekanizması ve lazer gücü gibi parametreleri değiştirebilmektedir. Bu sistemlerde toz besleme sürecinin kontrolü ile hedeflenen kesitlerde veya bölgelerde farklı kimyasal kompozisyona sahip tozların kullanılması söz konusu olabilmektedir (Levy *et al.* 2003). Şekil 6’ da DMB sistemine ait şematik bir gösterime yer verilmiştir.

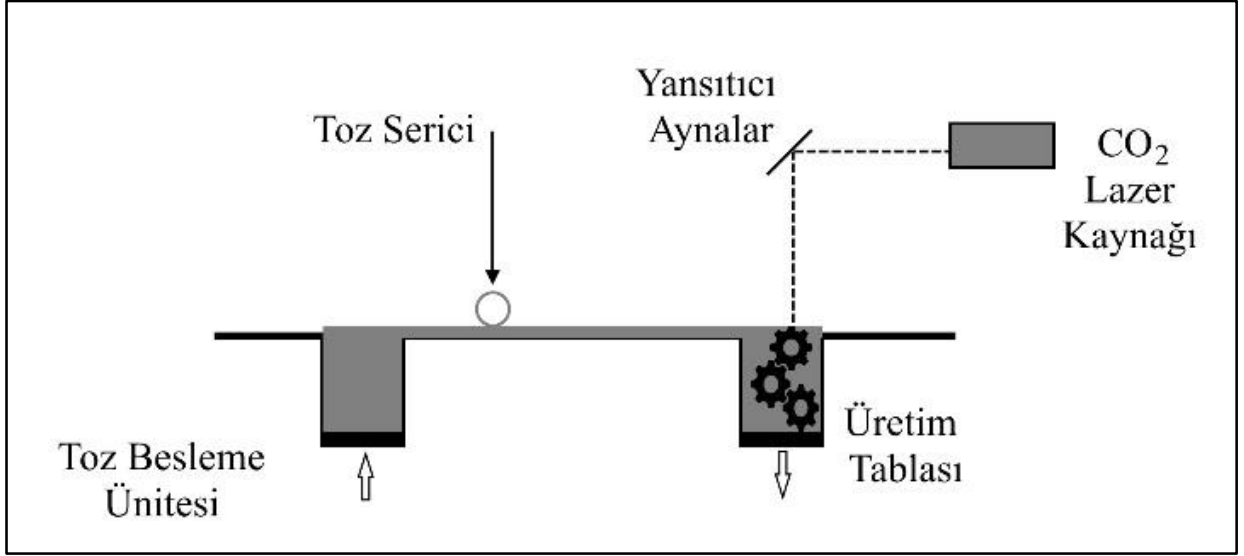


Şekil 6. Doğrudan metal biriktirme sistemine ait şematik gösterim (Dutta *et al.* 2011)

Seçici lazer sinterleme

Seçici lazer sinterleme (SLS) polimer ve metal tozlarının kullanıldığı, özellikle polimer kullanımı ile stereolitografiye ciddi bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. SLS yöntemi toz formundaki malzemenin bir toz havuzu içerisinde uygulanan ısı kaynağı ile birleştirilmesi esası dikkate alındığında toz havuzunda biriktirme (Powder Bed Fusion) prosesi olarak kabul edilmektedir. Katılaşma veya kürleşmesi için ışık duyarlılığına ihtiyaç duymayan naylon, polikarbonat krilonitril bütadien stiren (ABS), polistiren (polystyrene) gibi toz formundaki polimer malzemelerin katmanlı olarak üretilmesinde SLS yöntemi oldukça üstün boyut ve yüzey hassasiyeti sağlamaktadır. Bu yöntemde kullanılan tozlar 100 μm altı boyuta sahip ve üretime ait katman kalınlığı ise 75 ile 250 μm aralığında değişim göstermektedir. Lazer kaynağı olarak karbondioksit (CO_2) lazerlerin kullanımı ve üretimde ihtiyaç duyulan destek yapısının ise toz havuzundan sağlanması söz konusu olmaktadır. Bu sistemde kullanılan polimerlerin ısı kaynağı ile ergimesi ve katılaşması prosesini içerdiğinden SLS yöntemi, termoset polimerlerin katmanlı imalat ile üretiminde uygun olmamaktadır. Kullanılan makine, toz, optik elemanlar ve kullanılan lazere göre SLS yönteminde boyut hassasiyeti kontrol edilebilir ve genellikle 50 ile 100 μm aralığındaki değerlere erişilebilmektedir (Shirazi *et al.* 2015). Şekil 7’de SLS sistemine

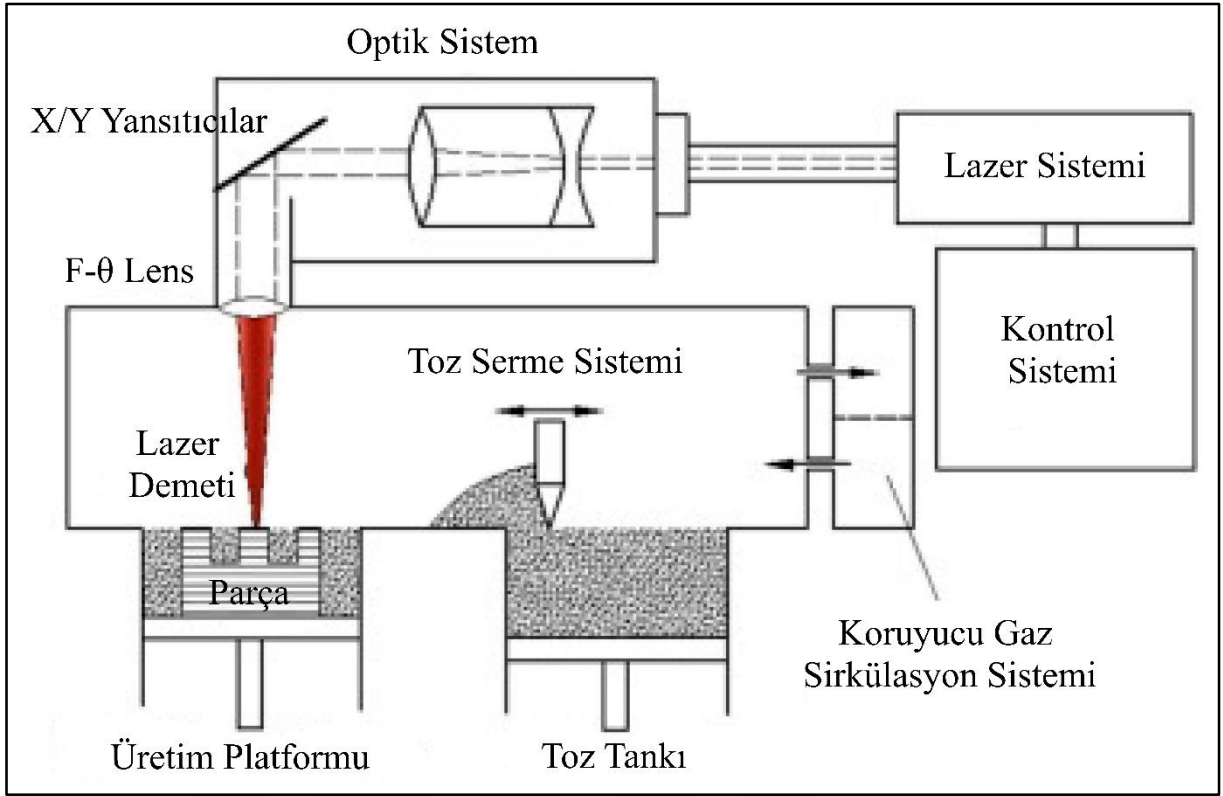
ait şematik bir resim verilmiştir.



Şekil 7. Seçici lazer sinterleme yöntemine ait şematik gösterim.

Seçici lazer ergitme

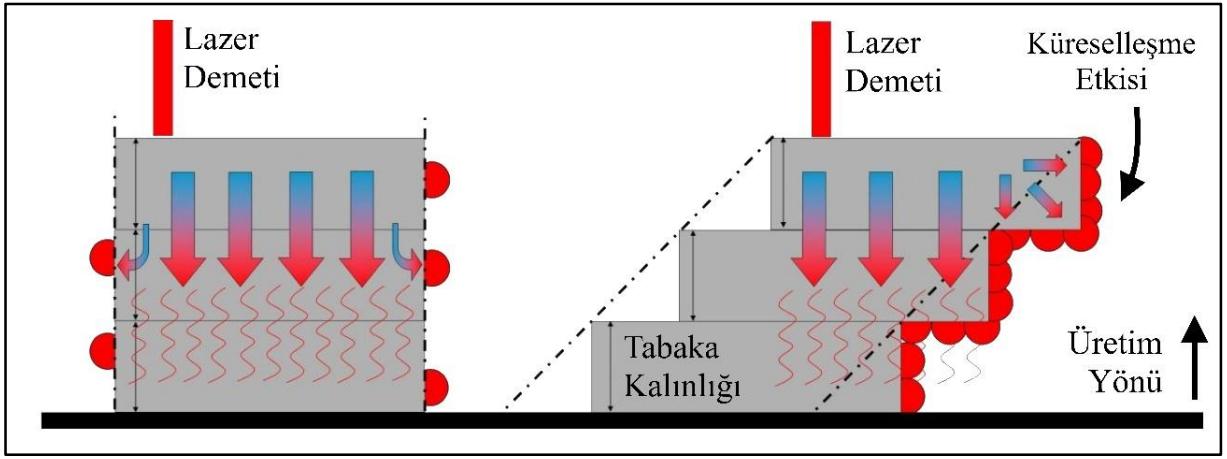
Seçici lazer ergitme (SLE) toz havuzunda biriktirme yöntemi olup katılaşma öncesi tam ergimenin olması ile SLS yönteminden ayrılmaktadır. Özellikle titanyum ve alaşımları gibi yüksek oksijen ilgisine sahip alaşımlar ile üretim yapılırken üretim platformu koruyucu gaz olarak argon atmosferi ile korunmaktadır. SLE yöntemi ergitme için gereken enerji kaynağı olarak lazerlerden faydalanmakta olup bu sistem metaller, seramikler ve polimerler gibi lazerin sahip olduğu dalga boylarında lazer enerjisini absorbe edebilen diğer malzemelere de uygulanması ile EDE yöntemine göre üstünlük sağlamaktadır (Heinl *et al.* 2007; Gibson *et al.* 2010). SLE yönteminde üretim sürecinin vakum şartlarında olması gerekmezken ergime bölgesinin koruyucu gaz altında olması, üretim atmosferinin olumsuz etkilerinden korunmak için yeterli olmaktadır (Ferrar *et al.* 2012). Tamamen ergime olması ile bu sistemlerde bir önceki tamamlanan katmanların da yeniden ergimesi söz konusu olabilmekte ve bu sayede katmanlar arası birleşme sağlanmaktadır. Sonuç olarak mühendislik uygulamaları için iyi bir birleşme sağlanmış olup, boşluk konsantrasyonu azaltılmış malzemeler elde edilebilmektedir. Tek bir süreç ile elde edilecek boşluk konsantrasyonunun olabildiğince az olduğu parçaların üretimi amacı ile uygulanan yoğun ısı girdisi, üretimde termal geçmişin varlığı ile kalıntı gerilmelere neden olmakta ve bu durum ısıl çekme ile üretimin deformasyonu, küreselleşme etkisi (balling), boşluk konsantrasyonu ve sıvı metalin buharlaşması ile kimyasal farklılıklara neden olmaktadır (Kruth *et al.* 2005; Pinkerton 2016). SLE sistemine ait bir şematik gösterim Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. SLE yöntemine ait şematik diyagram (Liu *et al.* 2015)

Küreselleşme etkisi uygulanan parametrelere bağlı olarak oluşan havuzun kararsızlığı sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu durum bir yüzey özelliği olarak kalmayıp katmanlar arası oluşum ile iç yapısal boşlukların oluşmasına neden olabilmektedir. Katmanlı üretim sebebi ile katman kalınlığı malzemenin yüzey durumu üzerinde etkili bir parametre olmaktadır. Azalan katman kalınlığı ile yüzey durumu iyileştirilebilse de üretim zamanının artışı söz konusu olmaktadır. Üretim tablasına dik olarak yerleştirilemeyen her bir bileşen yüzeyi Şekil 9’da görüldüğü gibi basamak etkisine maruz kalmaktadır. Ayrıca katı geometriyi çevreleyen ve eriyik havuzunun temasta bulunduğu toz partiküllerinin de yüzeye tutunması ile ortaya çıkan küreselleşme etkisi, yüzey durumu üzerinde olumsuz bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır.

Üretim tablasına yerleşimde modelin yatay eksen ile yaptığı açı miktarı azaldıkça destek yapılarının eklenmesi ve ısı akışının toz tabakasına doğru yönelmesi ile tasarım gerçek boyutlarından uzaklaşır ve küreselleşme etkisi ile yüzey özellikleri olumsuz etkilenir (Emmelmann *et al.* 2011). Van Bael *et al.* (2011) çalışmalarında, kesit alanına eklenen bu küresel geometrilerin yapının dayanımı üzerinde bir miktar olumlu katkıların olabildiğini belirtirken, bozulan yüzey durumu ve kesit kalınlığının homejen olmaması sonucu mekanik özelliklerde bir miktar kayıplar yaşanabileceğini vurgulamışlardır. Uygulanan yüzey işlemleri ile yüzey durumunun iyileşmesi ve daha homojen kesit kalınlıklarının ortaya çıkması ile hafif yapıli yüksek dayanıma sahip sistemler elde edilebilmektedir (Pyka *et al.* 2012).



Şekil 9. Farklı yerleşim konumlarına göre üretim bölgesinden gerçekleşen ısı akışı ve küreselleşme etkisi (Pyka *et al.* 2013)

SLE yönteminde kullanılan üretim parametreleri

Katmanlı imalattaki esneklikleri ile uygulama ve kontrol kolaylığı sunan SLE yönteminde yeni bir malzeme için optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi, oldukça yüksek maliyet ve hata oranları içeren süreçlerdir. Lazer gücü, tarama hızı ve stratejisi, katman kalınlığı ve oluşan eriyik havuzlarının bindirme miktarları gibi üretim parametrelerinin belirlenmesi ile her bir tarama izi ve bunların birleşimi ile ortaya çıkan katmanlar ve bunların birleşimi ile elde edilen hacim düşünüldüğünde, bu üretim parametrelerinden doğrusal çıkarımların yapılamacağı sonucu ortaya çıkmaktadır. Üretim hızının artırılması amacı ile daha yüksek lazer gücü ve tarama hızlarının kullanımı, katman kalınlığının artırılması düşünülse de, daha iyi ergime ve bağlanmanın sağlanması için katman kalınlığının düşük tutulması, boyut hassasiyeti ve yeterli ergimenin elde edilmesi için daha küçük odaklara sahip yüksek kaliteli lazer radyasyonları kullanılmalıdır (Yadroitsev *et al.* 2012). Kullanılan tozun boyut ve morfolojisi, toz tabakasının serilmesi ve bu serilen hacimdeki doluluk oranını etkilemektedir. Küçük toz boyutu ile gözeneklerin dolması ve yeni serilen toz katmanının daha yoğun serildiği, bu katman içerisinde yüzey alanı ve toz hacmi oranı yüksek bir tabaka ile lazer enerji emiliminin artması mümkün olmaktadır. Böylece, toz partiküllerinin ısı miktarının artması sonucu daha yüksek ergime ve sinterleme kinetikleri gerçekleşmektedir (Manthiram *et al.* 1993; Simchi 2004; Yadroitsev *et al.* 2012). Küresellikten uzaklaşmış toz parçacıkları hem tozun katmanlaması esnasında akış zorlukları hem de geometrik düzensizlikleri nedeni ile toz katmanının istiflenmesi esnasında düşük yoğunluklu toz sergisine sebep olabilmektedir. Bu durum, ergime havuzuna katılan toz miktarlarının tabaka içerisinde farklılıklarını beraberinde getirmekte ve nihai olarak katılma esnasında eriyik havuzunun davranışında farklılıkların ortaya çıkması ve anizotropik davranışlara neden olmaktadır. Ayrıca oluşan eriyik havuzunun yeterli ısıya sahip olamaması ve tabaka kalınlığındaki artış nedeni ile önceden ergimiş ve

katılaşımlı alt katmandaki katı kütlenin yeniden ergiyememesi nedeni ile katmanlar arası birleşme sağlanamamakta ve küreselleşme etkisi ile oluşan havuzun saçılımı söz konusu olmaktadır (Yadroitsev 2009).

Üretimde kullanılan lazer gücü, dalga boyu, optik sistemin odak çapı, lazerin tarama hızı, kullanılan toza ait morfolojik ile ısı özellikler ve bu tozun üretim platformundaki katmanlama kalınlığı, SLE yöntemindeki temel parametrelerdir (Rombouts 2006). Üretim için toz formundaki malzemeye verilmesi gereken enerji Denklem 4’te verildiği üzere bu değişkenlere bağlı olarak hesaplanmaktadır. Burada E birim hacim başına verilmesi gereken enerjiyi göstermekte olup, J/mm^3 birimindedir. Lazer gücü P ile ifade edilmekte olup Watt biriminde, V tarama hızını göstermekte olup mm/s biriminde, h yana kayma miktarını mm birimi ile ve t tabaka kalınlığını mm biriminde ifade etmektedir. Söz konusu üretim parametrelerinin, üretilecek parçadan beklenen özelliklerin sağlanabilmesi için optimize edilmesi büyük önem arz etmektedir.

$$E = \frac{P}{Vht} \quad (4)$$

Hatalı üretim parametreleri, eriyik havuzunun kararsızlığına neden olup, bu durum yüzey ve iç yapıda gözenekliliğin ortaya çıkması, yetersiz ergime bölgeleri veya iç yapıda gözenekler oluşumu ve nihai üründe kırılma hasarına neden olabilmektedir.

Lazer türü ve gücü

Lazer kelime olarak, “*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation (laser)*” şeklindeki ifadenin baş harflerinden oluşmakta ve “uyarılma sonucu elde edilen radyasyondan kaynaklanan ışığın kuvvetlendirilmesi” şeklinde dilimize çevrilebilmektedir. Işık, elektrik deşarjı veya radyo dalgası gibi bir enerji kaynağı ile uyarılan katı, sıvı veya gaz ortamlardaki atomların, düşük enerji seviyelerindeki elektronlarının bir üst enerji seviyesine çıkması ve bu kararsızlıklarını kaybederek tekrar alt enerji seviyesine dönerken foton denilen bir ışık salınımı gerçekleşir. Fotonun ortamdaki diğer atomlardaki elektronları uyarması foton salınımında artışa neden olarak aynı faz ve frekanstaki fotonların oluşumu sonucu lazer ışığının güçlenmesini sağlar. Foton kaynağı olarak kullanılan malzemenin yörüngeleri arasındaki enerji farkı, oluşan lazer ışığının dalga boyu üzerinde etkilidir ve yaygın olarak kullanılan katı lazer türlerinden Nd:YAG (Neodimyum ilave edilmiş itriyum alüminyum garnet) lazerlerin dalga boyu 1064 nm’dir.

Lazerler temas ettikleri malzemenin kürleşmesi veya bu enerjinin emilimi sonucu malzemenin sinterlenmesi ya da eriyik hale gelmesi, uzun mesafelerdeki enerji saçılımlarının oldukça düşük olması, odaklanarak yoğun enerji demetleri oluşturmaları ve nispeten kolay

kontrol edilebilme avantajları nedeni ile katmanlı imalat için oldukça kullanışlı enerji kaynaklarıdır (Lee *et al.* 2017). Aynı güce sahip lazerler kıyaslandığında düşük dalga boyuna sahip lazerler daha küçük demet çapları ile daha yüksek enerji yoğunluğuna ulaşmaları sayesinde, üretim hızı ve ürün özelliklerinin dengelenmesinde üstünlük sağlamaktadırlar. Özellikle seramikler gibi yüksek ergime derecesine sahip, toz malzemede veya termal iletkenlikleri ve yansıtıcılıkları yüksek olan alüminyum gibi metal tozlarında kullanıldığı üretim süreçlerinde sıcaklık artış hızının yüksek olması gerekliliği ile yüksek enerji yoğunluğuna sahip lazer demetlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Metal tozları gibi düşük dalga boylarında yüksek emilim değeri gösteren malzemeler için Nd:YAG lazerler, karbondioksit (CO₂) lazerlere tercih edilmektedir. Ergime ve sinterleme için gerekli olan eşik değerin üzerindeki enerji yoğunlukları ile üretim hızı artar ancak, elde edilen malzemenin özelliklerinin artan üretim hızından etkilenmesi nedeni ile bu iki faktör birlikte değerlendirilmelidir (Agarwala *et al.* 1995).

CO₂ lazerler yaygın olarak kullanılan gaz lazerlerdir. Diğer gaz lazerlere göre CO₂ lazerler daha yüksek verim (yaklaşık % 20) ve düşük sistem maliyetinin yanısıra basit ve güvenilirliği nedenleri ile üretimde oldukça yaygın kullanılmaktadır. Uzun süreli kullanımlarda sistem elemanları üzerindeki ısı etkileri nedeni ile çıkış gücünde bir miktar düzensizlikler olması ve CO₂ lazerlerin bakım-kontrol gereksinimlerine ihtiyaç duyması nedeniyle, diğer lazer türlerine olan gereklilik ortaya çıkmaktadır (Lee *et al.* 2017). Kullanılan lazerin gücünün haricinde, sürekli veya darbeli olarak kullanımı, lazerin dalga boyu, lazer demetindeki enerji dağılımı, bu demetin geometrik formu ve odak çapı gibi bileşenleri de önemli olan diğer faktörlerdir. Üretim proseslerinde farklı gereksinimlerin olması ile örneğin polimerlerin emilim spektrumunun gerekli dalga boyu ile sağlanması amacı ile fiber lazerlere göre daha zayıf lazer demeti özelliklerine sahip olmasına rağmen, diyot lazerlerin kullanımı söz konusu olabilmektedir (Pinkerton 2016).

Katmanlı imalat teknolojileri başlangıçta polimer bazlı malzemelerin sinterlenmesi şeklinde gelişim göstermiştir. Bu dönemlerde CO₂ lazerlerin kullanımı söz konusu iken, gelişen malzeme üretim beklentileri ile daha yüksek enerjiye sahip lazerlerin kullanımı ile çelik ve titanyum alaşımlarının üretimi sağlanmıştır. Bu amaçla Neodimyum katkılı Yitrium Alüminyum Garnet (Nd:YAG) lazerlerin kullanıldığı sistemler geliştirilmiştir. Polimerik malzemelerde CO₂ lazerlerin emilim değeri daha yüksek iken, metalik malzemelerde dalga boyu küçük olan Nd:YAG lazerlerin emilim değeri yüksek olmakta ve enerji yoğunluğunun küçük odak çapı ile elde edilebilmesi ile metalik malzemeler için Nd:YAG lazerlerin kullanımı daha uygun hale gelmektedir (Born and Wolf 2013). Nd:YAG lazerler sahip oldukları 1.064

μm dalga boyu ile bu dalga boyunda lazer emilim değeri yüksek olan alaşımların üretimini sağlanmaktadır. Bu dalga boyunda lazerin fiber optik elemanlar ile taşınabilmesi nedeni ile Nd:YAG lazerler CO₂ lazerlere göre sistem ve lazerin taşınması anlamında üstünlük kurmaktadır (Lee *et al.* 2017).

Kullanılan lazerler sürekli ve darbeli olarak çalışabilmektedir. Sürekli lazer vuruşlarında aktarılan enerjinin büyük bir kısmı lazer ile etkileşimde olan demet bölgesinden malzemeye doğru bir ısı akışına maruz kalır ve bu sistemlerde ergime veya sinterleme için aktarılması gereken eşik değerdeki enerjiye ulaşmak darbeli sistemlere göre lazerin uygulanması bakımından uzundur. Darbeli şartlarda çalışan lazer sistemlerinde ise nanosaniyeler mertebesinde etkiyen lazer demeti oldukça yüksek güçlere çıkmakta ve temas süresinin düşük olmasıyla malzemede lazer demeti ile temas eden kısımdan, çevreleyen malzemeye ısı akışı oldukça sınırlı olmaktadır. Dolayısı ile ergime ya da sinterleme için gereken eşik miktardaki enerjinin çok daha kısa sürede sağlanması söz konusudur (Majumdar and Manna 2003).

Lazer gücünün yeterli seviyede uygulanması ile toz havuzunun ergimesi sağlanmakta ve tam ergiyen yapıların uygun yana kayma ve tarama hızı değerleri ile nihai ürünün iç yapısal boşluk konsantrasyonu azalmaktadır. Artan lazer gücü ile ergime sağlanmakta ancak bu kez oluşan eriyik havuzunun buharlaşması sonucu bu buhar fazının eriyik havuzunu terketmesi için yeterli zamanı bulamaması ile eriyik havuzlarında boşluk hatası (anahtar deliği (*keyhole effect*) hatası) görülebilmekte ve bu hata sonucu yoğunluk düşerek mekanik özellikler kötüleşmektedir. Yetersiz lazer gücü ve yüksek ilerleme hızları etkisi ile azalan enerji girdisi alt katmanların yeterli enerji akışı almamaları ve toz tabakasının kendi içerisinde ergime sağlaması ile artan yüzey gerilimi sonucu küreselleşme etkisi görülerek yüzey pürüzlülüğünde artış gözlemlenebilmektedir (Dilip *et al.* 2017).

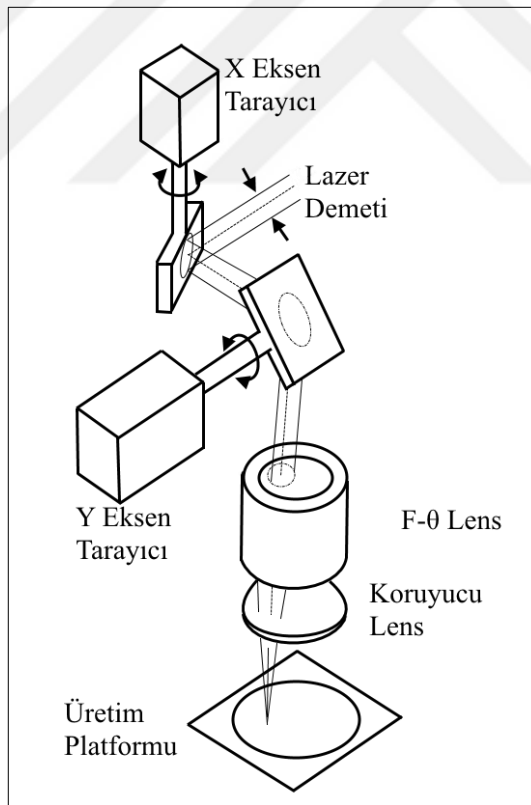
Tarama hızı

Tarama hızı mm/s cinsinden ifade edilmekte olup lazer demetinin toz katmanı üzerindeki hızını göstermektedir. Üretim hızının artırılması hedeflenerek tarama hızının yükseltilmesi öngörülse de artan tarama hızları ile uygulanan enerji yoğunluğu azalmakta ve elde edilen eriyik havuzunun boyutsal özellikleri değişmektedir. Farklılaşan eriyik havuzuna ait boyutsal yetersizlikler, katmanlar ve lazer izleri arasındaki bütünlüğün yeterli olmaması ile mekanik özelliklerde oldukça etkili olan katmanlar ve lazer izleri arasındaki adezyon yeterince sağlanamamaktadır. Düşük tarama hızları ile gerçekleştirilen işlemlerde uygulanan yetersiz lazer gücüne bağlı olarak yetersiz ergime ve sonucunda boşluk miktarındaki artış veya yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızları ile buharlaşma ve sonucunda oluşan anahtar deliği hatası ile küresel boşlukların oluşumu söz konusu olabilmektedir. Ayrıca uygulanan yüksek tarama hızı

ve yüksek lazer gücü ile küreselleşme durumunun ortaya çıkması, toz havuzu içerisinde üretim yapan sistemler için toz seriminin zorlaşması ve homojen toz dağılımının engellenmesi söz konusu olabilmektedir (Dilip *et al.* 2016). Enerji aktarımında sadece lazer tarama hızı ve lazer gücü göz önüne alındığında Denklem 5’te verilen, lineer enerji yoğunluğu ifadesi türetilmiş olup bu ifadede yer almayan katman kalınlığı ve bindirme mesafesi nedeni ile lineer enerji yoğunluğu ergime için verilmesi gereken eşik enerji değerini tam anlamı ile ifade edememektedir. Artan lazer hızı ve üretim platformlarındaki kararsız güç aktarımı nedeni ile parça kalitesinden ödün vermeyi beraberinde getirmektedir (Lou *et al.* 2017).

$$E = \frac{P}{v} \quad (5)$$

Tarama hızı kontrolü için SLE cihazı sisteminde yer alan galvano aynalardan destek alınmakta, X ve Y doğrultusunda lazer yönlendirilmektedir. Her bir eksen hareketi için bu aynalardan biri sorumludur ve oldukça yüksek hassasiyetleri ve hareket kabiliyetleri ile 7 m/s hıza kadar lazer demetini yönlendirebilmektedirler. Şekil 10’da lazer sisteminin sahip olduğu optik elemanlara ait bir gösterim yer almaktadır.

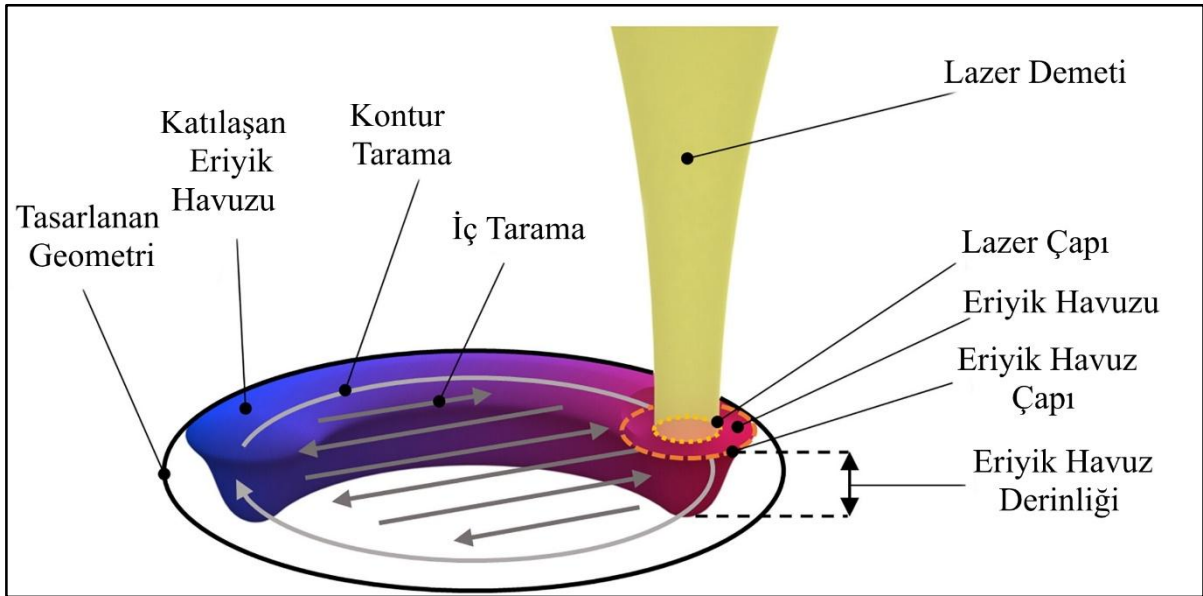


Şekil 10. Toz havuzunda (SLE, SLS) veya ışık duyarlı polimer (SLA) üretimi yapan lazer sistemlerine ait optik elemanların şematik gösterimi

Yana kayma ve katman kalınlığı

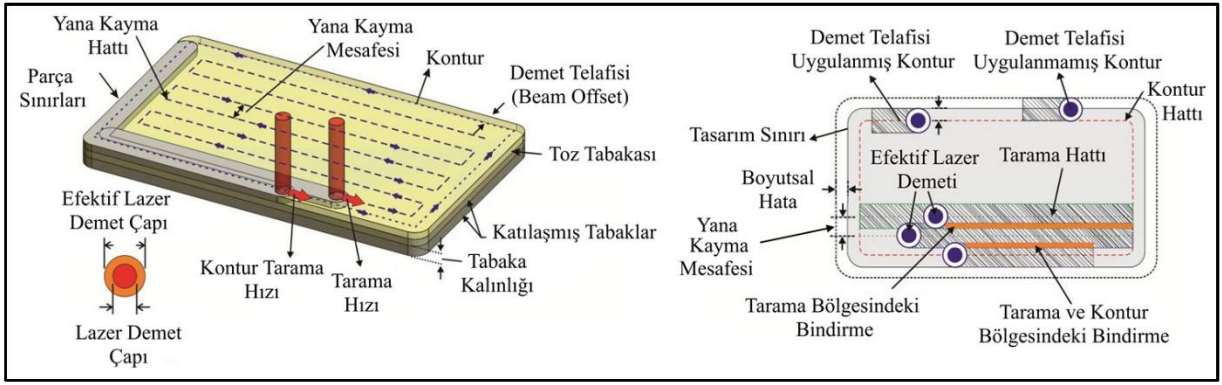
Lazer demeti tarafından temas edilen her bir tarama izi için farklı doğrusal yörüngeler takip edilir. Lazer bu farklı yörüngelerde yarı ergime-ergimeyi sağlayarak tüm katmanın

birleşmesini sağlamaktadır. Oluşan lazer izleri arasına bir yana kayma miktarı uygulanarak, bu katmanda modelin dolu kesitlerinin tümü eriyik-yarı eriyik halden katı hale dönüştürülür. Lazerin yaptığı bu yana kayma mesafesi *hatch spacing* (h) olarak adlandırılır ve oluşan iki komşu lazer izine ait eriyik havuzlarının merkezleri arasındaki mesafe olarak tanımlanabilir. Lazer tarafından geometriye ait kesitin oluşturulması esnasında, geometrik sınırların lazer ile taranması “kontür taraması” olarak ifade edilmektedir. Bu kontür, farklı lazer güçleri ile veya çoklu lazer tekrarları ile birden çok yapılabilir. Planlanan bindirme değerleri yanal ve lazer ilerleme doğrultusunda yapılarak iç taramaların kontür tarama ile olan bindirme miktarları kontrol edilebilmektedir. Lazer demeti sahip olduğu odak çapı ile toz malzemeye temas ederken ayarlanan güç ve ilerleme değeri ile bu odak çapından farklı bir eriyik havuzu oluşturmaktadır. Bu kesit üzerindeki lazer hareketleri ve lazer odağına ait görsel Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. Kesit üzerindeki lazer hareket tanımlamaları (Ghouse *et al.* 2017)

Tarama hızı ve lazer gücü parametreleri, oluşacak eriyik havuzunun boyutları üzerinde etkili olmakta ve yana kayma miktarı, komşu iki lazer izinin örtüşmesine ve katmanlar arası bütünlüğün sağlanarak yüksek yoğunluk ve dayanıma sahip parçaların üretimine olanak sağlamaktadır. Şekil 12’de yana kayma ifadesinin fiziksel karşılığını göstermekte olup, üretilecek parçanın sınırları ve iç tarama bölgelerindeki yana kayma mesafesi hakkında bilgi verilmektedir. Oluşan eriyik havuzu nedeni ile parça sınırlarından içeriye doğru bir yana kayma değeri (*beam offset*) verilerek tasarım ve üretim geometrisinin boyut toleransı kontrol edilebilmektedir (Bineli *et al.* 2011).



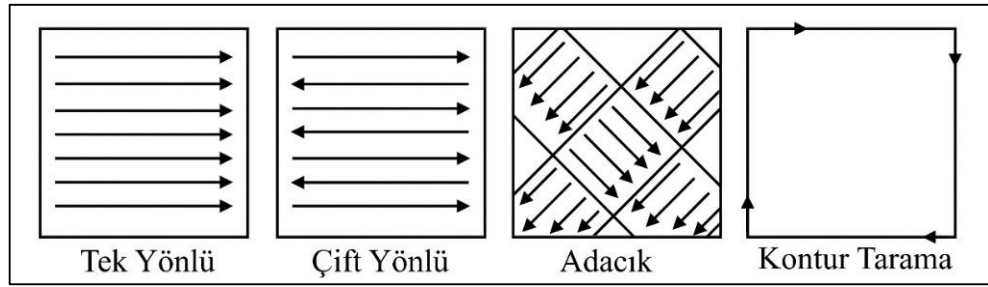
Şekil 12. Lazer tarama parametrelerinin gösterimi (Bineli *et al.* 2011)

SLE ile üretimde, kontür ve tarama işlemleri için farklı hız ve lazer gücü değerleri seçilebilir. Ayrıca, üretilecek parçaların yüzey kalitesinin artırılması, tam ergime sağlanmamış hatalı bölgelerde yeniden lazer teması sağlanarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, kalıntı gerilmelerin giderilmesi ve tribolojik özelliklerin geliştirilmesi sağlanabilmektedir (Yasa and Kruth 2011).

Tarama stratejisi

Üretilen geometrinin her bir katmanı içerisinde lazerin takip ettiği yörünge hareketini, tarama stratejisi ile tanımlamak mümkündür. Lazerin tüm kesit boyunca her iki yöndeki taraması esnasında toz malzemeye temasındaki stratejisi çift yönlü, sadece tek bir yönde temas edip geri dönüş esnasında kapalı hareket etmesi ise tek yönlü vuruş stratejisi olarak tanımlanmaktadır. Lazer sistemlerinde tek yönlü tarama yapılması ve geri dönüşlerde lazer vuruşunun kapanması süreci oldukça küçük zaman aralıklarında gerçekleştiği için ve lazer kaynağında kesikli işlemlerin oluşması sebebiyle kararlı lazer gücü oluşumu olumsuz yönde etkilenmekte ve üretim zamanı bakımından ise artışa neden olmaktadır (Yoo *et al.* 2016). Bu iki tarama stratejisinin yanı sıra üretimdeki ısı dengelinin sağlanarak kalıntı gerilme durumunun azaltılması amacı ile adacık tarama stratejisi geliştirilmiştir. Bu stratejide, planlanan kenar boyutu ile katmanı daha küçük alanlara bölmek ve bu alanların farklı sıralamalar ile lazer tarafından ertirilerek tabakanın daha homojen ısı alarak ısı gradyenin azaltılması ve nihai olarak kalıntı gerilme durumunun azaltılması hedeflenmektedir (Sames *et al.* 2016). Her bir katman içerisindeki adacıklarda bu tarama stratejisi tek yönlü tarama gerçekleştirirken, bir üst katmana geçilmesinde bu adacık ve tarama yönlerinin üst üste gelmesi neticesinde ortaya çıkabilecek boşluk miktarının azaltılması amacı ile adacıkların her iki tabla doğrultusunda planlanan miktarlar kadar kaydırılması söz konusu olmaktadır (Carter *et al.* 2012). Şekil 13 tarama stratejilerine ait şematik bir gösterimi içermektedir. Katman sınırlarını oluşturan en dış kontör hattı sürekli lazer vuruşu ile tamamlanarak yüzey bütünlüğü sağlanır. Kontür, destek yapıları ve tarama parametreleri için farklı lazer gücü, tarama hızı ve bindirme miktarları

uygulanabilmektedir. Her bir katmanda farklı tarama açılarının uygulanması ile olası kusurların üst üste gelerek tüm kesitte birleşmiş bir hat oluşması engellenmektedir. Bu amaçla her bir katmanda lazer tarama açısının değişimi uygulanmaktadır.



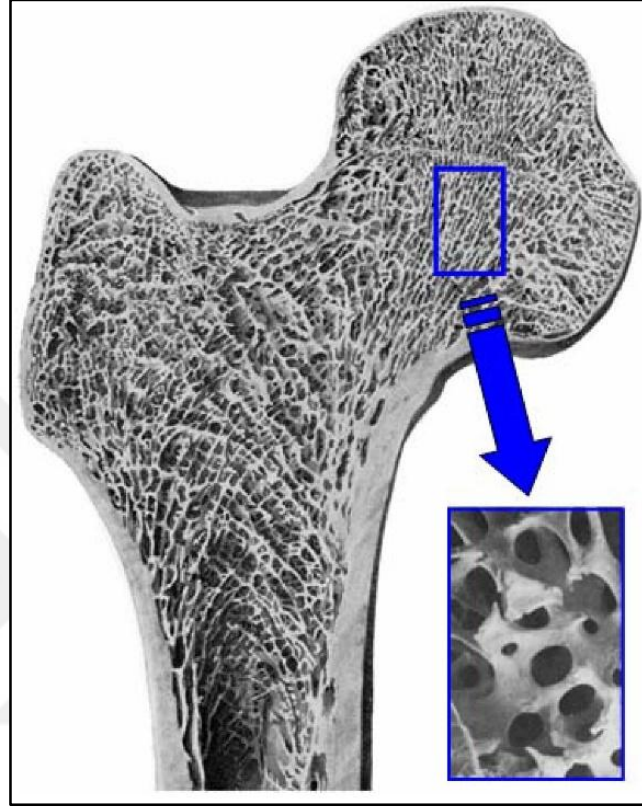
Şekil 13. SLE yönteminde kullanılan tarama stratejileri

Poroz Yapılar

Hafif ve yüksek dayanıklılık göstererek yapılarda, bitkilerde ve canlılarda var olan gözenekli poroz yapılar ya da köpükler doğada oldukça geniş ve farklı alanlarda karşımıza çıkmaktadır. Dayanım ve yoğunluk oranları, özgül yüzey alanı ve hacim oranlarının oldukça yüksek olması bu yapılara olan ilgiyi artırmış ve mühendislik uygulamalarında kullanım yeri edinmelerini sağlamıştır. Doğada organik olarak bulunan bu yapıların yapısal davranışlarının metallere kazandırılması ile sundukları yüksek mukavemet, kontrol edilebilen ısıl özellikler, akustik ve darbe davranışları, söz konusu yapıların günümüzde özellikle havacılık ve biyomedikal alanda taklit edilmelerini sağlamıştır. Metalik köpükler olarak adlandırılmaya başlayan bu sistemler planlanan hacimlerin kontrollü veya rastgele olarak hedeflenen porozitede doldurulması ile elde edilebilmektedir. Porozite, geometrideki boş kesitlere ait hacimler toplamının, tüm dış geometri hacmine oranı olarak tanımlanabilir ve bu değer yapının mekanik, akustik, darbe ve yalıtım özellikleri üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Yüksek dayanımın yanında düşük ağırlıkların hedeflendiği havacılık alanında, benzer şekilde yüksek yüzey alanı ile iyi ısı transferi beklenen termal sistemlerde, kemiğe yakın rijitlik ve yüksek biyolojik bütünleşmenin hedeflendiği artırılmış yüzey alanı ve yeterli mekanik özelliklere sahip hafif implant uygulamalarında bu yapılar tercih edilmektedir. Ayrıca dedektör ve filtreler gibi gözeneğe ihtiyaç duyulan sistemlerde yine bu poroz sistemlerin kullanımı söz konusu olmaktadır.

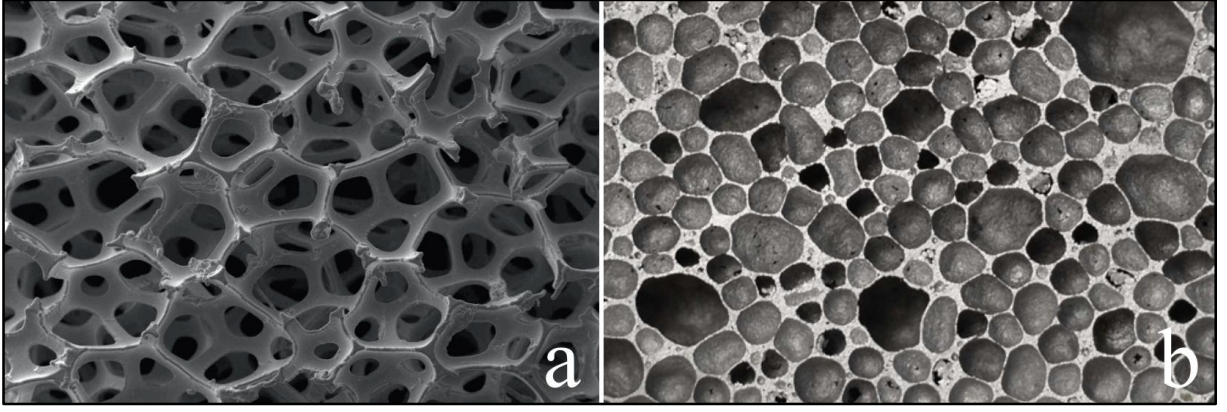
Doğadaki yapılar incelendiğinde bu poroz yapıların rastgele bir dizilim ve geçişli yapısal morfoloji ile bulundukları hacimleri doldurdıkları bilinmektedir. Buna en iyi örnek olarak kemik içerisindeki süngerimsi doku ve bu kemik dokuyu çevreleyen sert kemik yapı verilebilir. Şekil 14'te kemik dokuya ait verilen görüntü incelendiğinde, sert kemik dokudan kemik merkezine doğru gidildiğinde süngerimsi kemik dokuya olan geçişin, belirgin bir ayırım

yüzeyine ve açıkça tanımlanabilir bir yapısal morfolojiye sahip olmadığı görülmektedir. Kemik doku üstlendiği göreve göre zamanla şekil almakta, üzerine gelen yükler, dış etkenler ve zamanla biyolojik süreç işleyerek, kullanım süresi boyunca değişen dış koşullara karşı iç yapısındaki düzenlemeler ile karşı koymaya çalışan bir gelişim izlemekte ve bu davranış Wolff yasası olarak tanımlanmaktadır (Frost 1994).



Şekil 14. Sert ve tamamen açık gözenekliliğe sahip süngerimsi kemik dokulara ait yapısal morfoloji (Ishikava 2010)

Poroz yapılar günümüz mühendislik uygulamalarında, metal ve seramiklerin de içerisine girdiği yüksek teknolojik uygulamalarda kullanılabilir. Mühendislik uygulamalarında hücresel yapılar olarak tanımlanan bu sistemler, çubuk elemanların veya hücre duvarlarının ortak kullanımı ile bir ağ sistemi oluştururlar. Her bir hücre diğer hücre duvarı ile tamamen ayrılıyorsa ya da diğer bir ifade ile bu hücreler gaz boşlukları şeklinde diğer hücreler ile bir geçirgenlik kuramıyor ise bu yapı, “kapalı hücresel yapı” olarak isimlendirilir. Tam olarak hücre duvarı ile örtülü değil ve hücreler çubuk elemanlardan oluşuyor ise bu sistemler “açık hücresel yapılar” olarak adlandırılmaktadır (Gibson and Ashby 1999). Şekil 15 kapalı ve açık hücresel yapıların morfolojik örneklerini içermektedir.



Şekil 15. Hücresel yapılara ait örnekler; a) açık hücre yapısı, b) kapalı hücre yapısı (Kim and Lee 2014, Banhart 2018)

Açık hücresel yapıya sahip sistemlerin kontrollü olarak oluşturulması birim hücre modelinin tekrarlı olarak çoğaltılması ile sağlanmakta ve hedeflenen mekanik özellikler, yüzey alanı, hücresel geçirgenlik değerleri kısmi yoğunluk değerine bağlı olarak değişmektedir. Kısmi yoğunluk (KY), hücresel yapıli sistemin içerdığı malzeme miktarının bir göstergesi olup, kendisini oluşturan malzemenin yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır ve

$$KY = \frac{\rho^*}{\rho_k} \quad (6)$$

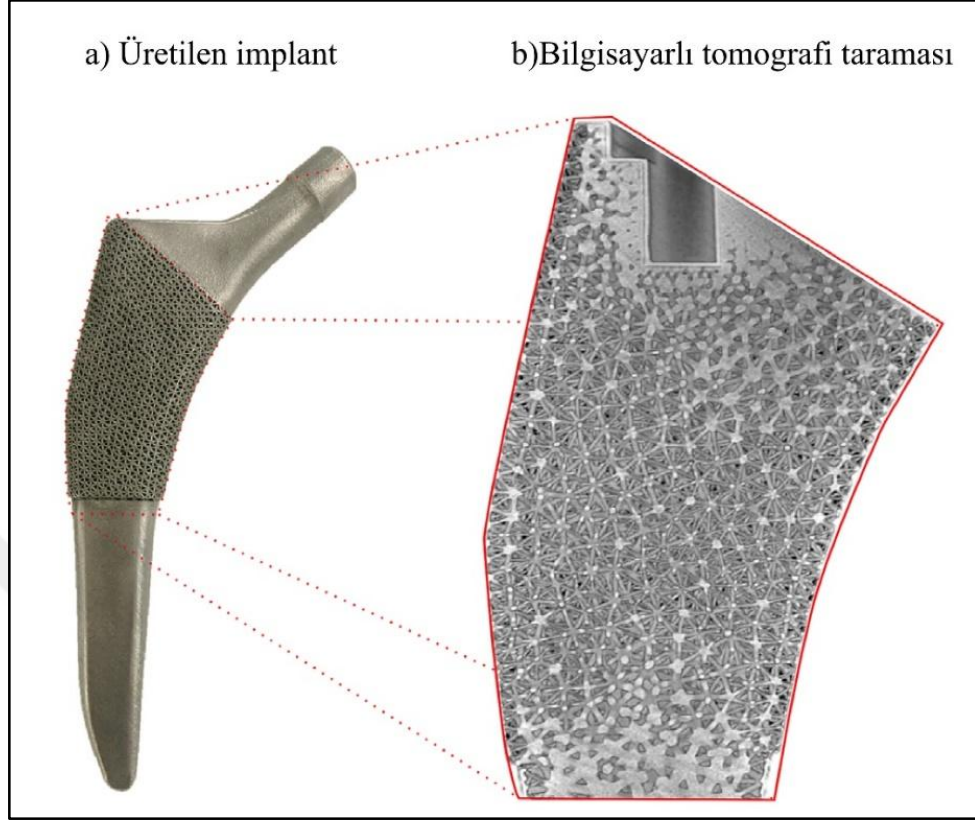
şeklinde ifade edilir. Burada ρ^* hücresel yapı sistemine ait yoğunluk, ρ_k ise üretimde kullanılan malzemeye ait yoğunluğu ifade etmektedir. Porozite miktarı (P_{or}) ise kısmi yoğunluğun tam dolu değerden farkı olarak tanımlar ve

$$P_{or} = 1 - KY, \quad 1 - \left(\frac{\rho^*}{\rho_k}\right) \quad (7)$$

şeklinde ifade edilir. Hücrelerin tasarım, biçim ve boyutları, hücresel yapıya ait özellikler üzerindeki etkileri doğrudan ifade edilememekle birlikte, hücresel sistemin genel özelliklerinde etkili olan diğer faktörlerdir. Kullanılan malzemeye ait elastisite modülü ve akma dayanımı gibi mekanik özellikler ile, elde edilen kafes sisteminin rijitlik ve dayanımı, sistem ve kullanılan metalin yoğunluğuna bağlı olarak belirlenebilmektedir (Gibson 2000).

Çubuk elemanlar ile tekrarlı olarak oluşturulan açık hücresel yapılar kafes sistemleri olarak tanımlanır. Bu sistemlere ait özellikler, düzensiz sistemlere kıyasla, planlanan doğrultulardaki çubuk elemanlara ait geometrik ölçülerin değişimi ile kontrol edilerek geçişli kafes sistemleri ve dış kabuk içeren sistemler üretilebilmektedir. Böylelikle kemik dokuya benzer şekilde süngerimsi kemikten sert dokuya doğru değişen porozitede metalik kafes yapıları ve bunu çevreleyen kabuk sisteminin üretimi mümkün olabilmektedir. Arabnejad *et al* (2016) yaptıkları çalışmada, eklemeli üretim tekniklerinden SLE ile ürettikleri geçişli kafes sistemine sahip hücresel yapı ile % 70 porozite ve 500 μm çapta gözenek büyüklüğüne sahip kalça protezinin mekanik özelliklerini deneysel ve numerik olarak belirlemiş, ayrıca *in vitro* ortamda biyolojik testlerini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, gözenekli yapıya sahip

implantların kemik kaybı sürecini azaltarak gerilme yığılmasının önüne geçilebildiği göstermiştir. Şekil 16 bu çalışma kapsamında üretilen modele ait görselleri içermektedir.



Şekil 16. Hücresel kafes sistemi ile üretilmiş kalça protezi (Arabnejad *et al.* 2017)

Planlanan doğrultularda kontrollü ve değişken kesitlerde üretilebilirlikleri, periyodik olarak çoğaltılarak tasarlanan hacimleri doldurabilmeleri, tasarımlarındaki ilaveler ile yeni özelliklerin kazandırılabilmesi ve özellikle biyolojik sistemler için ihtiyaç duyulan gözenekliliğin elde edilebilirliğinde, çubuk kafes sistemleri oldukça yaygın kullanım alanı bulmakta ve üretim kolaylığı sunmaktadırlar (Panesar *et al.* 2018). Bu gözenekli yapıları sayesinde eklemeli imalat yöntemlerinden toz havuzu içerisinde üretilmelerinde kendi kendilerine destek yapısı sağlamaları ve kullanılmayan tozun bu boşluklar sayesinde iç hacimlerden uzaklaştırılması kafes sistemlerinin üretim kolaylığını desteklemektedir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Kullanılan Alaşıma ait Kimyasal ve Morfolojik Özellikler

Yapılan bu tez çalışmasında biyomalzeme olarak sıklıkla tercih edilen titanyum alaşımlarından Ti-6Al-4V ELI'ya ait toz formundaki malzeme kullanılmıştır. Concept Lazer firmasının sunduğu ve ticari adı CL 41Ti ELI olan bu toz malzemeye ait kimyasal bileşim Tablo1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan alaşıma ait kimyasal bileşim (% ağırlık) Anonymous (2020)

	Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
Ti-6Al-4V ELI	5,5 6,5	3,5 4,5	0,25 (maks.)	0,08 (maks.)	0,13 (maks.)	0,05 (maks.)	0,012 (maks.)	Kalan

Kullanılan alaşıma ait toz boyutu ve dağılım özellikleri, toza ait elektron mikroskobu görüntülerinin elde edilmesi ve bu görüntülerin işlenmesi sonucu sağlanmıştır. Elektron mikroskobu ile 150 ilâ 1000 büyütme oranlarında görüntüler alınmış ve görüntülerde yer alan tozlara ait çap değerleri belirlenmiştir. Elde edilen büyüklüklerin frekans dağılımları oluşturulmuştur.

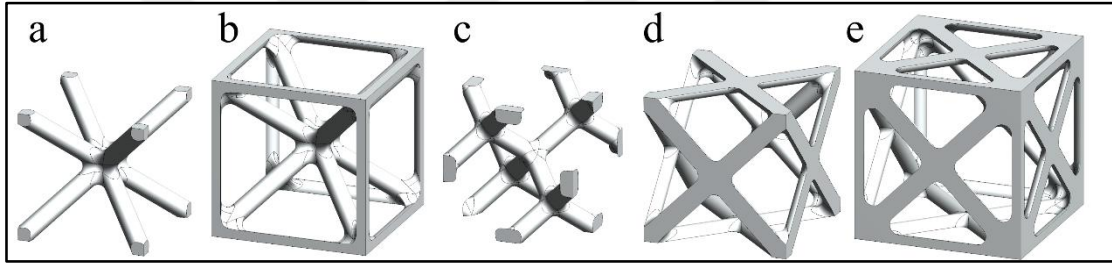
XRD ve İç Yapı Analizleri

Kullanılan alaşıma ait XRD ölçümleri GNR Explorer X-Ray Diffraction cihazı ile 1,5405 Å dalga boyuna sahip Cu-K α anot X ışını kaynağı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler toz ve üretim sonrası katı formdaki malzeme üzerinden gerçekleştirilmiş olup elde edilen veriler JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*) kartları ile analiz edilerek faz içerikleri belirlenmiştir. Toz partikülleri analizleri FEI Quanta FEG 250 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Üretim parametrelerinden eriyik havuz incelemeleri ve mikro yapı analizleri 91 ml H₂O, 6 ml HNO₃, 3 ml HF solüsyonu ile dağlanmış yüzeylerden Zeiss Axio A1 optik mikroskop ile gerçekleştirilmiş olup görüntüler ZEN yazılımı ile değerlendirilmiştir.

Kafes Sistemlerine Ait Tasarım Çalışmaları

Beş farklı kafes sisteminin oluşturulması ve eklemeli üretim yönteminde kullanılacak model datalarının *stereolithography* (.STL) formatında elde edilmesi amacı ile SolidWorks (SolidWorks, v2016; Dassault Systems, Concord, MA, USA) bilgisayar destekli tasarım programı kullanılmıştır. Kullanılan program ile hacim merkezli kafes sistemi (BCC), BCC

kafes sistemlerine X, Y ve Z doğrultularında ilave çubuklar içeren (BCCZ), elmas kafes sistemi (ELMAS), yüzey merkezli kafes sistemi (FCC) ve FCC kafes sistemlerine X, Y ve Z doğrultularında ilave çubuklar içeren (FCCZ) kafes sistemleri oluşturulmuştur. Üretim esnasında destek oluşturmaları ve üretim sonrası kafes sistemlerinin özellikle düğüm noktalarındaki birleşme kabiliyetlerini arttırarak rijitliğe katkı sunmaları ve numerik çözümler için sonlu elemanların oluşturulmasında geometrik kolaylığı sağlaması sebebiyle düğüm noktalarına, her bir kafes sistemi için çubuk elemanların yarı çapı değerinde küresel pah işlemi uygulanmıştır. Her bir kafes sistemi için birim kafeslere ait görseller Şekil 17’de verilmiştir. Her bir kafes sistemi için % 60, % 75 ve % 90 porozite değerlerinde 3 farklı tasarım gerçekleştirilmiştir. Farklı porozitelerin elde edilmesi amacı ile çubuk çapları değiştirilmeksizin sadece birim kafese ait kenar ayırıt uzunlukları değiştirilmiştir. Çubuk çapı olarak 500 µm ve pah işlemi için çubuk yarıçapı olan 250 µm değeri seçilmiştir. Bu değer SLE cihazına ait üretim parametreleri olarak seçilen değerlere ait ön çalışmalar ile elde edilmiş ve kesit içi doluluk ve üretim açılarındaki performansa dayalı olarak belirlenmiştir.



Şekil 17. Tasarımı gerçekleştirilen kafes sistemleri; a) BCC, b) BCCZ, c)ELMAS, d) FCC, e) FCCZ

Tablo 2 tasarım aşamasında kafes sistemleri için planlanan porozite sonucu oluşan gözenek boyutu, kafes kenar uzunlukları, ISO 13314 standardı uyarınca tanımlanan kafes sistemi boyutları ve 10^{-3} deformasyon oranı ile basma deneylerinin gerçekleştirilmesi için uygulanacak deformasyon hızlarını içermektedir. Deformasyon hızları belirtilen standartta deformasyon oranı sağlanacak şekilde, kafes sistemine ait boyutlar dikkate alınarak belirlenmiş ve Tablo 2’de verilmiştir.

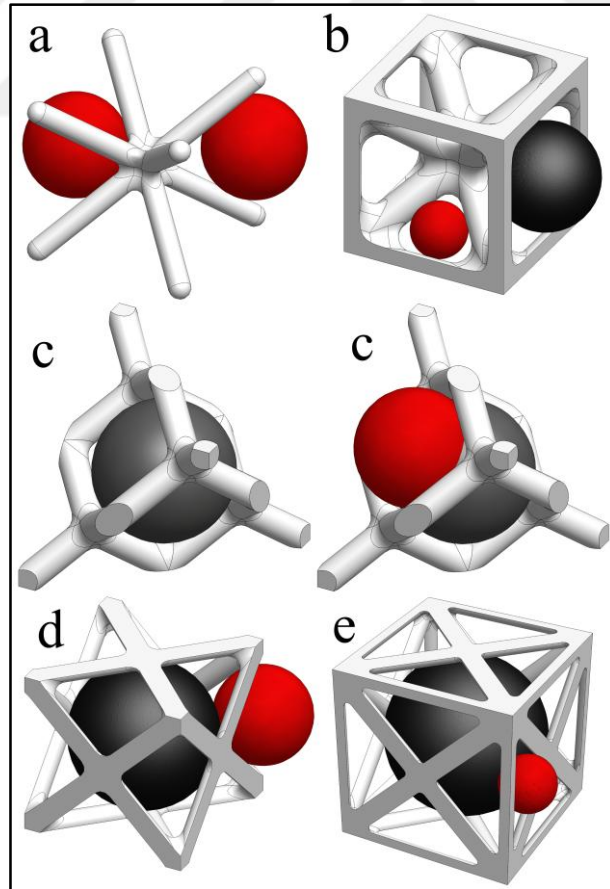
Tablo 2. Her bir kafes sistemine ait tasarım parametreleri ve deney şartları

	Porozite	Ortalama Gözenek Boyutu	Birim Hücre Kenar Uzunluğu	Kesitteki Birim Kafes Sayısı	Basma Numunesi Kesit Alanı	Deformasyon Hızı
	(%)	(mm)	(mm)	(Adet)	(mm ²)	(mm/s)
BCC	60	0,82	1,61	7	138,5	0,01177
	75	1,22	2,11	6	173,2	0,01316
	90	2,32	3,45	7	607,7	0,02465

Tablo 2. (Devamı)

BCCZ	60	0,84	2	5	110,3	0,01050
	75	1,23	2,6	5	182,3	0,01350
	90	2,31	4,22	6	666,7	0,02582
ELMAS	60	0,73	1,61	7	138,5	0,01177
	75	1,19	2,22	5,5	161,5	0,01271
	90	2,21	3,56	6,5	558,9	0,02364
FCC	60	1,08	1,85	6	134,6	0,01160
	75	1,55	2,4	7	299,3	0,01730
	90	2,83	3,9	8	1004,9	0,03170
FCCZ	60	0,60	2,11	5	122,1	0,01105
	75	1,51	2,83	6	305,6	0,01748
	90	2,72	4,55	6	772,8	0,02789

Kafes sistemlerine ait gözenek boyutları SolidWorks programı ile oluşturulan modellerden hesaplanmıştır. Gözenek boyutlarının hesaplanması ve her bir kafes sisteminde gözeneklerin kafes sistemlerindeki yerleşimleri Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18. Tasarımı gerçekleştirilen kafes sistemlerine ait gözenek yerleşimleri; a) BCC, b) BCCZ, c)ELMAS, d) FCC, e) FCCZ

BCC kafes sistemleri topolojileri gereği tek gözenek boyutuna sahipken diğer kafes sistemlerinin ikili gözenek boyutuna sahip oldukları görülmüştür. Kırmızı renk küçük gözeneklere ait konumu gösterirken koyu renkli gösterim kafes sisteminde konumlanabilecek en büyük gözenek boyutunu ifade etmektedir.

Ekleme İmalat Süreci

Ekleme imalat süreci Şekil 19’da verilen Concept Laser MLab R cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz üzerinde 100W Neodyum emdirilmiş İttriyum Alüminyum Garnet (Nd:YAG) lazer sistemi bulunmakta olup cihaz, 80x80x90 mm boyutlu bir hacimde üretim yapabilmektedir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm üretim işlemleri, üretimde kullanılan malzemenin oksijen ilgisi ve oksijenin üretimde yapıya girmesinin neden olacağı olumsuzlukları azaltmak amacı ile Argon (Ar) gazı atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Üretimde sürekli lazer vuruş modu kullanılmıştır.

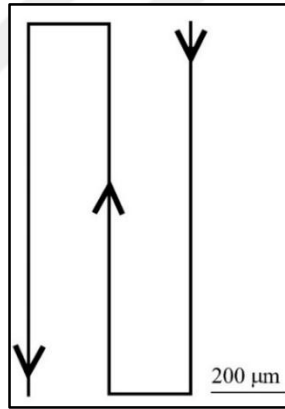


Şekil 19. Ekleme imalat cihazı (Concept Laser MLab R)

Üretim sürecinde üretim platformundaki oksijen miktarı % 0,3 değerinin altında kalacak şekilde gaz akışı sağlanarak, oksijen miktarının belirlenen % 0,2 eşik değeri geçmemesi kontrol edilmiştir. Üretim esnasında oksijen miktarında artışlar gözlemlenebilmesi nedeni ile artan oksijen miktarında öncelikle lazer vuruşunun engellenmesi ve önüne geçilemeyen değerlere ulaşması durumunda ise üretimin tamamen durdurulması şeklinde ikili önlemler alınmış ve bu değerler sırası ile % 0,6 ve % 0,8 olarak tanımlanmıştır. Olası gaz salınımları nedeni ile üretimin engellenmesinin önüne geçmek amacı ile bu değerler seçilmiş olup üretim aşamasında oksijen miktarı bu değerlere erişemediği görülmüştür.

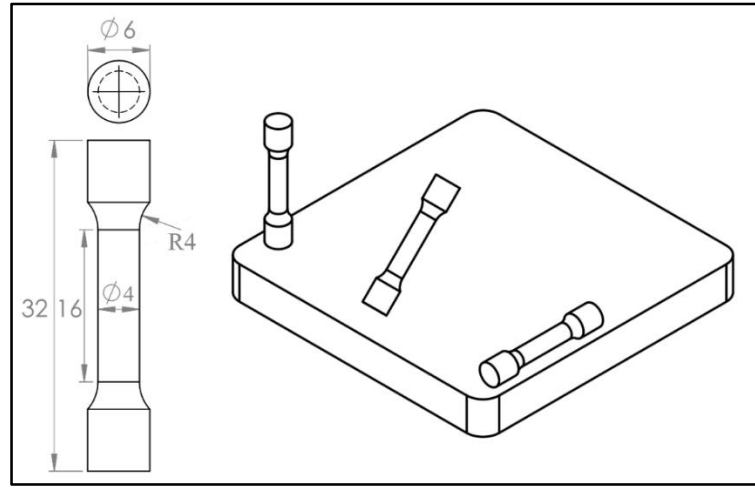
Ekleme imalat cihazları, kullandıkları ürün/model datası olarak başlangıçta STL dosyasının ön programlar ile işlenerek üretim için gereken destek yapılarının planlanması ve

cihazın üretimde kullanacağı katman bilgilerinin oluşturulmasına ihtiyaç duymaktadır. Bu kapsamda SolidWorks programından sağlanan STL dosyaları AutoFab programı ile SLE cihazı için hazırlanmıştır. Oluşturulan STL dosyalarından elde edilen geometride olası yüzey kusurlarının giderilmesi amacı ile bu kusurların tanımlanması ve düzeltilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Lazer gücü ve tarama hızı parametrelerinin değişiminin neden olacağı efektif lazer çapı ve oluşan eriyik havuzun davranışının irdelenmesi amacı ile 25 μm tek katman toz kalınlığı ile Ti-6Al-4V plaka üzerine lazer vuruşları sağlanmıştır. Bu amaçla oluşturulan lazer iz yörüngesi Şekil 20’de verilmiştir. Elde edilen havuz genişliği ve derinliği optik mikroskop görüntüleri ile incelenmiş, uygulanan parametreler sonucu havuz derinliği ve yüzey altı durumun incelenmesi amacı ile kesit irdemeleri gerçekleştirilmiştir. Kesit incelemeleri amacı ile Ti-6Al-4V plakalar soğuk bakalite alınmış, elmas kesme diski kullanılarak hassas kesim sağlanmış, sırası ile 220, 400, 800 ve 1200 su zımparaları kullanılarak kaba parlatma ve sonrasında da 0,6 ve 0,3 mikron elmas süspansiyonlar ile ince parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kesit incelemeleri ZEIS Axio A1 optik mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Kesit incelemelerinden elde edilen havuz genişliği, derinliği ve yüzey durumu analizleri sonucu kafes sistemlerinin üretiminde kullanılacak lazer gücü ve tarama hızı belirlenmiştir.



Şekil 20. Lazer gücü ve tarama izlerinin belirlenmesinde kullanılan yörünge

Belirlenen lazer gücü ve tarama hızı değerlerindeki yana kayma miktarlarının mekanik özellikler üzerindeki etkileri, iç yapıdaki boşluk miktarının belirlenmesi ve mikro yapı analizleri için üretilen çekme numunelerinin teknik resmi ve tabla yerleşimleri Şekil 21’de verilmiştir. İnşa oryantasyonunun yapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisinin belirlenmesi için numuneler, üretim tablası ile 0°, 45° ve 90° açı yapacak şekilde modellenmiştir. Sonrasında AutoFab programı ile gerekli destek yapıları sağlanarak Concept Lazer MLab R cihazının üretim formatı olan Concept Lazer Slice (.CLS) dosyaları elde edilmiştir. Çekme numunesi ASTM E8 ile boyutları belirlenmiş ve test bölgesi çapı 4 mm olarak planlanan silindirik numuneler üzerinde çekme testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 21. Çekme numunesine ait boyutlar ve üretim tablası üzerindeki yerleşimi

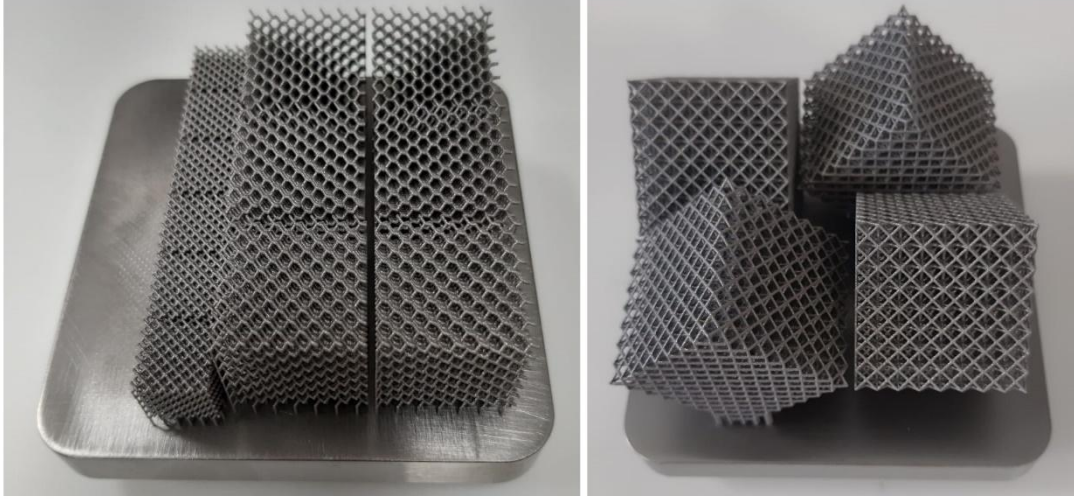
Bir modelde destek yapıları da oluşturulmuşsa AutoFab yazılımı aynı dosya isminde bir dosya daha oluşturmakta ve bu dosya ismine s_ ön eki ekleyerek destek yapılarına ait üretim dosyasını da türetmektedir. Destek yapılarının üretiminde kullanılacak lazer gücü kontur tarama sayısı ve bu destek yapılarının içerisindeki tarama parametrelerinin ayrıca belirlenmesi amacı ile bu dosyanın varlığı kolaylık sağlamaktadır.

Üretim parametrelerinin belirlenmesinde SLE cihazına ait lazer gücü ve tarama hızlarının oluşturduğu eriyik havuzları incelenmiştir. Bu amaç ile 20 W lazer gücünden 100 W lazer gücüne kadar 10 W artım ile lazer güçleri ve 10 mm/s tarama hızından 1400 mm/s tarama hızlarına kadar lazer izleri oluşturulmuş ve kesit incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Üretim hızı, katmanlar arası yeterli ergime derinliği, eriyik havuzu genişlik ve derinlik oranı dikkate alınarak 25 μm katman kalınlığı, kullanılan toz ve üretilcek geometriler dikkate alınarak SLE üretim parametreleri belirlenmiştir. Çekme numunelerinin üretiminde uygulanan lazer gücü, tarama hızı ve yana kayma miktarları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Lazer gücü, tarama hızı ve yana kayma miktarları

Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Yana Kayma (μm)
100	1400	22,5
		30
		37,5
		45
		52,5
		60
		67,5
		75
		82,5
		90
		97,5
		105

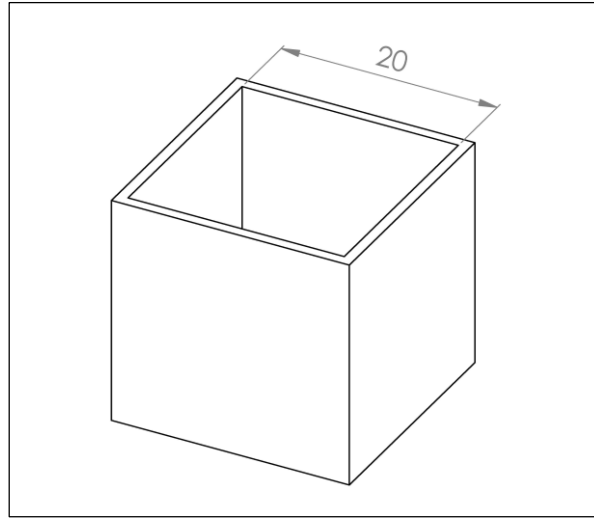
Kafes sistemleri tasarımları gereği üretimde gereken destek yapılarına ihtiyaç duymamaktadır. Bu amaçla üretim yönüne dik açı yapan bileşenlerin oluşmaması ve eğer kaçınılmaz olacaksa bu yatay elemanların olabildiğince düşük köprü açıklığı ile yerleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda BCC ve ELMAS kafes sistemleri tasarımları gereği yatay eleman içermemeleri dolayısı ile Şekil 18’de görüldüğü gibi, diğer kafes sistemleri ise üretim tablası ile 45° açı yapacak şekilde üretim planlanması yapılmıştır. Şekil 22 kafes numunelerinin tabla üzerinde konumlandırılmasına ait üretim sonrası görüntülerini içermektedir.



Şekil 22. ELMAS ve FCC kafes sistemlerine ait üretim tablası yerleşimi

Toz Sergi Yoğunluğunun Belirlenmesi

Toz yatağında üretim yöntemlerinde serili tozun üretim hacmine taşınması sürecinde ortaya çıkan sergi yoğunluğu, üretimin doluluk oranına etki ederek üretim performansı üzerinde etkili bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Sergi yoğunluğunun belirlenmesi amacı ile Şekil 23’te şematik olarak verilen 8 cm³ iç hacmine sahip küp formundaki geometri biçim üretilmiştir. Toz taşınması işleminde standart üretim protokolü işletilmiş ve iç hacmi dolduran toz ağırlığı AXIS AGN 220 cihazı ile 0,0001gr hassasiyetinde ölçülmüştür. Toz ağırlığının belirlenmesinde hacim içerisindeki toz tartılmış ve boşaltılan toz sonrası iç hacim saf su ile doldurularak gerçek iç hacim doğrulaması sağlanmıştır. Sergi yoğunluğu hesaplamasında yoğunluklar Ti-6Al-4V ve saf su için sırası ile 4,43 ve 1 gr/cm³ olarak kullanılmıştır.



Şekil 23. Sergi yoğunluğunun belirlenmesine ait üretim hacmi

Metalografik İncelemeler ve Yoğunluk Hesaplamaları

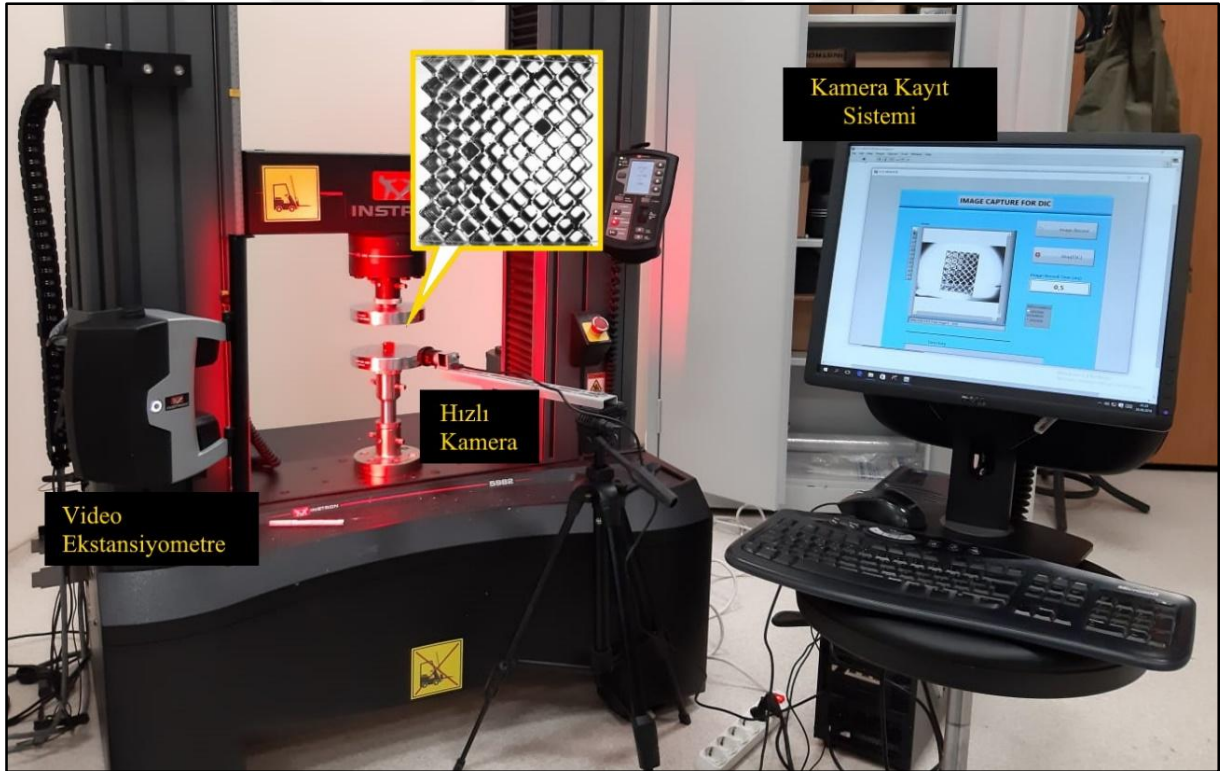
Elde edilen numunelere ait iç yapı, boşluk miktarı ve üretim kusurlarının incelenmesi amacı ile 220, 400, 800 ve 1200 numaralı su zımparaları sırası kullanılarak kaba parlatma ve sonrasında 0,6 ve 0,3 mikron elmas süspansiyonlar ile ince parlatma işlemleri tamamlanmıştır. Üretim sonrası yoğunluk ölçümleri, her bir yana kayma değerinde elde edilen iki farklı numunenin en az 5 farklı kesitinde ve farklı düzlemlerinden sağlanan optik görüntülerinin ZEN yazılımı ile işlenmesi ile sağlanmıştır. Yoğunluk ve boşluk hesaplamaları parlatılmış yüzeylerde, mikro yapı analizleri ise 91 ml saf su + 3 ml hidroflorik asit (HF) + 6 ml nitrik asit (HNO_3) karışımı ile 60 s süre ile dağlanmış yüzeylerde gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen havuz genişliği ve derinliği optik mikroskop görüntüleri ile incelenmiş, uygulanan parametreler sonucu havuz derinliği ve yüzey altı durumun incelenmesi amacı ile kesit irdelemeleri gerçekleştirilmiştir. Kesit incelemeleri amacı ile Ti-6Al-4V plakalar soğuk bakalite alınmış, elmas kesme diski kullanılarak hassas kesim sağlanmış, metalografik analizler için kullanılan numune hazırlama protokolü bu kısımda da uygulanarak kaba ve ince parlatma adımları gerçekleştirilmiştir. Kesit incelemeleri ZEIS AXIO A1 optik mikroskobu, yüzey durumu ve pürüzlülük incelemeleri ise Bruker Contour GT üç boyutlu optik profilometre cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesit incelemelerinden elde edilen havuz genişliği, derinliği ve yüzey durumu analizleri sonucu kafes sisteminin üretiminde kullanılacak lazer gücü ve tarama hızı belirlenmiştir.

Kafes Sisteminin Statik Basma Deneylerinin Gerçekleştirilmesi

Elde edilen kafes sistemlerine ait mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla, küp biçimi ile üretilen gözenekli kafes sistemlerinin statik basma deneyleri, INSTRON 5982 marka statik test cihazında, International Organization for Standardization (ISO) tarafından önerilen ISO

13314:2011 standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Basma deneylerinde kullanılacak malzeme boyutlandırılmasında belirtilen standart dikkate alınmış ve kafes sisteminin sahip olduğu gözenek boyutunun en az on katı büyüklüğünde kenar uzunluğu değerine sahip numuneler ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen standart ile belirtildiği üzere deneyler, ortam sıcaklığında ve 10^{-3} s^{-1} deformasyon oranında en az üçer numune kullanılarak tamamlanmıştır. Basma deney sistemine ait görsel Şekil 24’te verilmiştir. Deney esnasında basma uzaması, video ekstansiyometre ile kaydedilmiş ayrıca kafes sisteminin deformasyon mekanizmasının belirlenmesi amacı ile haricen kurulan hızlı kamera sistemi ile saniyede 2 görüntü alınmak üzere görüntü kaydı gerçekleştirilmiştir. Kafes sistemlerinin periyodik yapısının neden olacağı tekrarlı motiflerin, görüntü analizinde oluşturacağı benzerliklerin önüne geçilmesi amacı ile kafes sistemlerin üzerinde spreyci boyama tekniği ile rastgele noktalar oluşturulmuştur. Hızlı kamera sistemi ile görüntü alımında, Basler acA4600-10uc kamera ve Labview yazılımı kullanılmıştır.

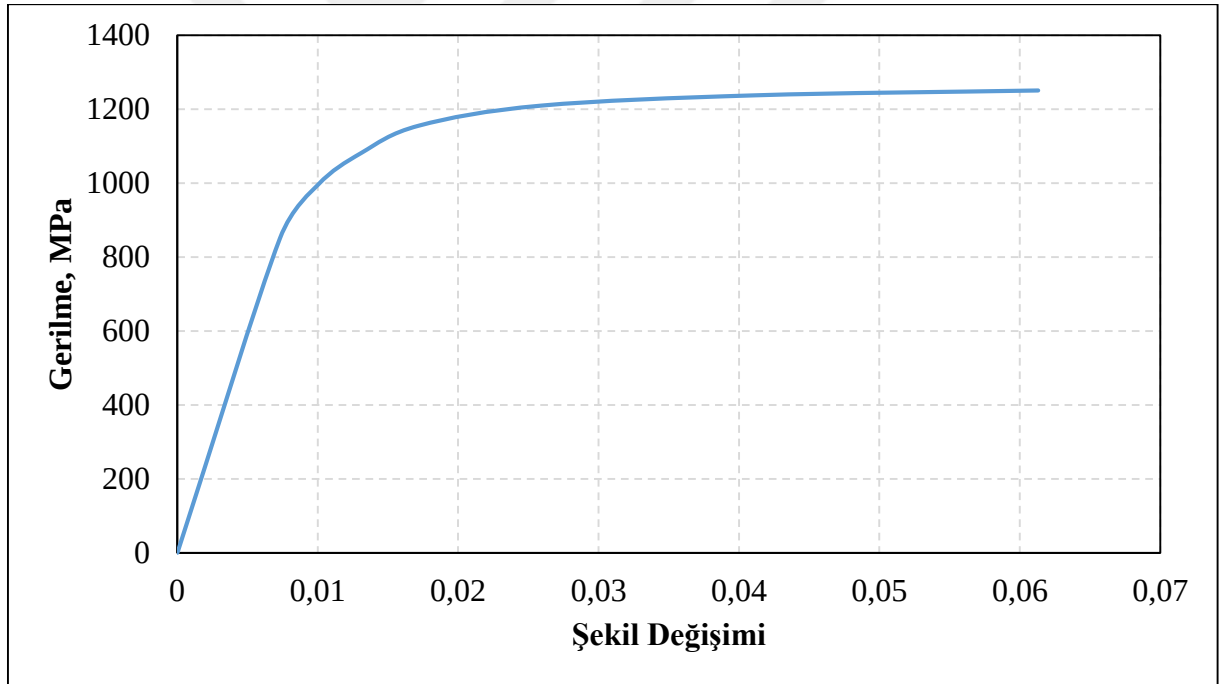


Şekil 24. Basma deneylerine ait deneysel kurgu

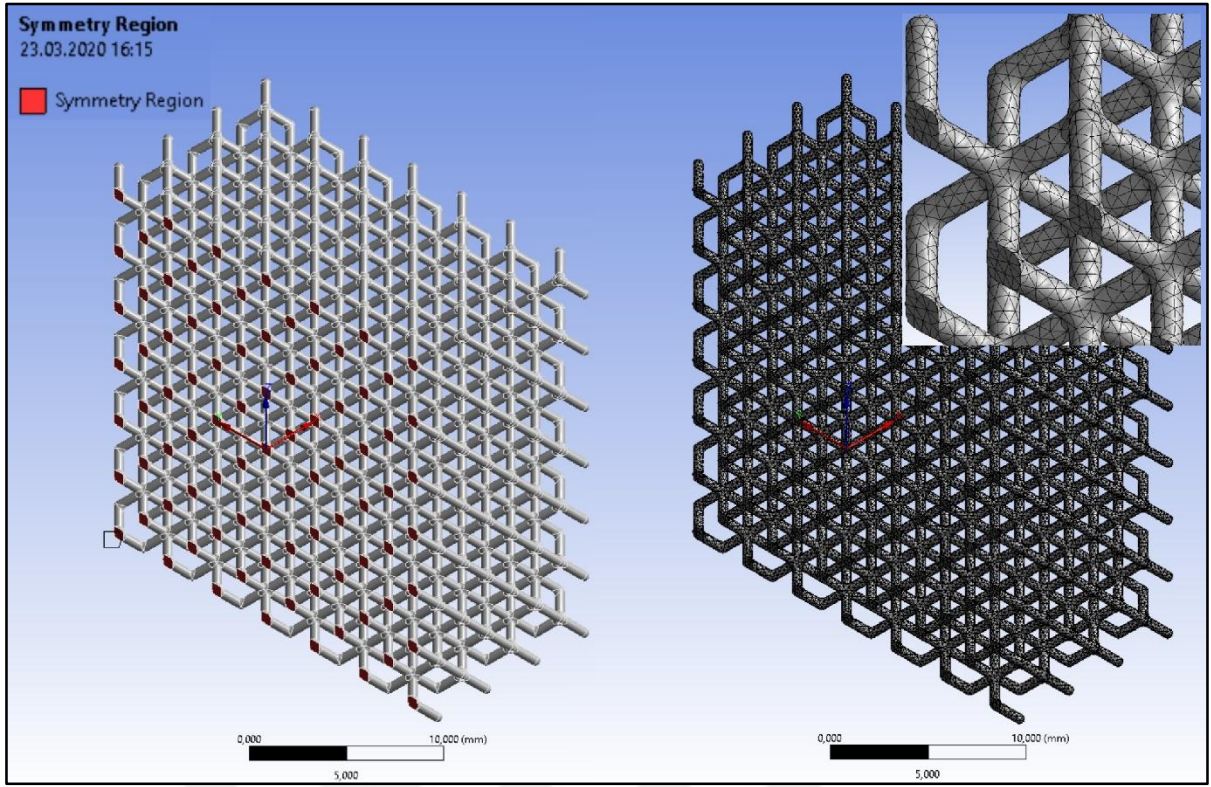
Sonlu Elemanlar Analizi (SEA)

Sonlu elemanlar analizleri ANSYS Workbench 19.0 (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA) programı üzerinde gerçekleştirilmiştir. SLE ile üretim aşamasında kullanılan tasarımlara ait STL dosyaları sonlu elemanlar analizleri için model datası olarak kullanılmıştır. Analizler için deneysel çalışma ile benzer şekilde statik yükleme durumu dikkate alındığından Ansys yazılımının Static Structural analiz sistemi kullanılmıştır. Bu sistemde ilk olarak .STL

formatındaki geometri dosyaları eklenmiştir. Modelde kullanılacak malzeme özellikleri ise deneysel olarak belirlenen en yüksek yüzde uzama değerinin elde edildiği üretim parametreleri (lazer gücü, tarama hızı ve yana kayma değeri) ile üretilmiş numunelerin çekme testi sonuçlarına göre tanımlanmıştır. Kafes sistemine ait malzeme özelliği, Şekil 25'te verilen değerler ile aynı özellikte olması için multilineer izotropik pekleşme (*multilinear isotropic hardening*) dataları girilerek tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar analizindeki sonlu sayıdaki hacim elmanların elde edilmesi için meshleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Meshleme aşamasında doğrusal olmayan şekil değişim fonksiyonu kullanarak daha doğru yaklaşım sergileyen 10 düğüm noktasına sahip tetrahedral eleman kullanılmıştır. Meshleme kalitesinin kontrolü için skewness değerinin 0,30'un altında kalması sağlanmış ve aynı zamanda sahip olunan bilgisayar gücü ile çözüm elde edilebilecek en büyük mesh boyutu seçilmiştir. Bu aşamada metodoloji olarak seçilen çubuk çapı ile sahip olunan çevre uzunluğuna orantılı olacak şekilde uniform mesh seçeneği kullanılmıştır. Şekil 26, meshleme işlemi uygulanmış ELMAS kafes sistemine ait bir gösterim içermektedir.



Şekil 25. Numerik analizlerde kullanılan malzeme özellikleri

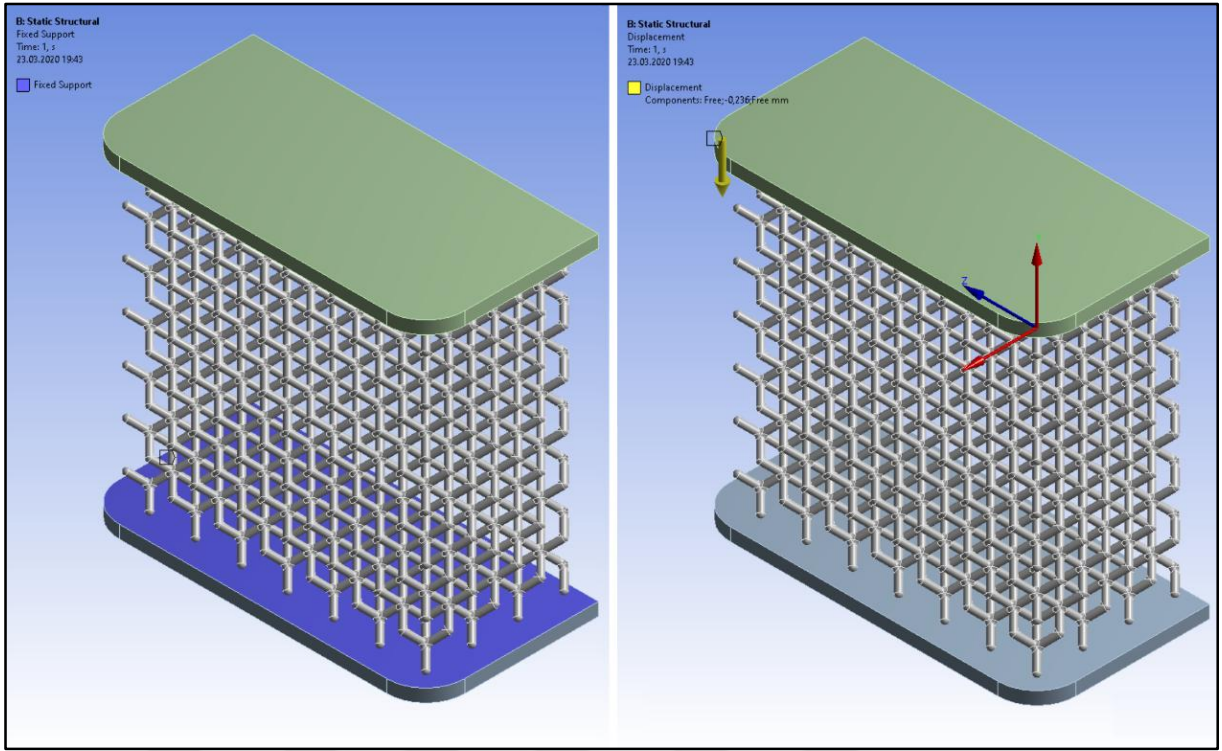


Şekil 26. Simetri bölgesi (*Symmetry region*) ve mesh örgü yapısının gösterimi

Sınır Şartları

Çözümlemelerde bilgisayar gücü dikkate alınarak, çözüm süresini kısaltmak amacıyla modellerin geometrik özelliklerinden faydalanılmış ve simetri bölgesi yaklaşımı ile Şekil 27’de verilen yarım model çözümü uygulanmıştır. Elde edilen reaksiyon kuvvetleri bu amaç ile tam modele evrilmiş, yani iki katı hesaplanmıştır. Bu yaklaşımın kontrolü amacı ile basit küp ve yarım modeli üzerindeki hesaplamala gerçekleştirilmiştir. Simetri bölgesi yaklaşımından elde edilen reaksiyon kuvvetlerinin tam modelin yarısı olduğu sonucu doğrulanmıştır.

Sonlu elmanlar analizlerinde kafes sistemleri basma ekseninde üst ve alt kısımdan plakalar ile temas halinde modellenmiştir. Kontak durumu için paslanmaz çelik plakalar ve titanyum kafes sistemi arasında, sürtünmeli kontak tipi seçilmiş ve sürtünme katsayısı 0,6 olarak uygulanmıştır (Kaya *et al.* 2019). Şekil 27 ayrıca basma plakalarına ait sınır şartlarını göstermektedir. Deneysel çalışma ile elde edilen kuvvet ve basma uzaması değerlerinin karşılaştırılması amacı ile reaksiyon kuvvetinin basma doğrultusundaki bileşeni dikkate alınmıştır.



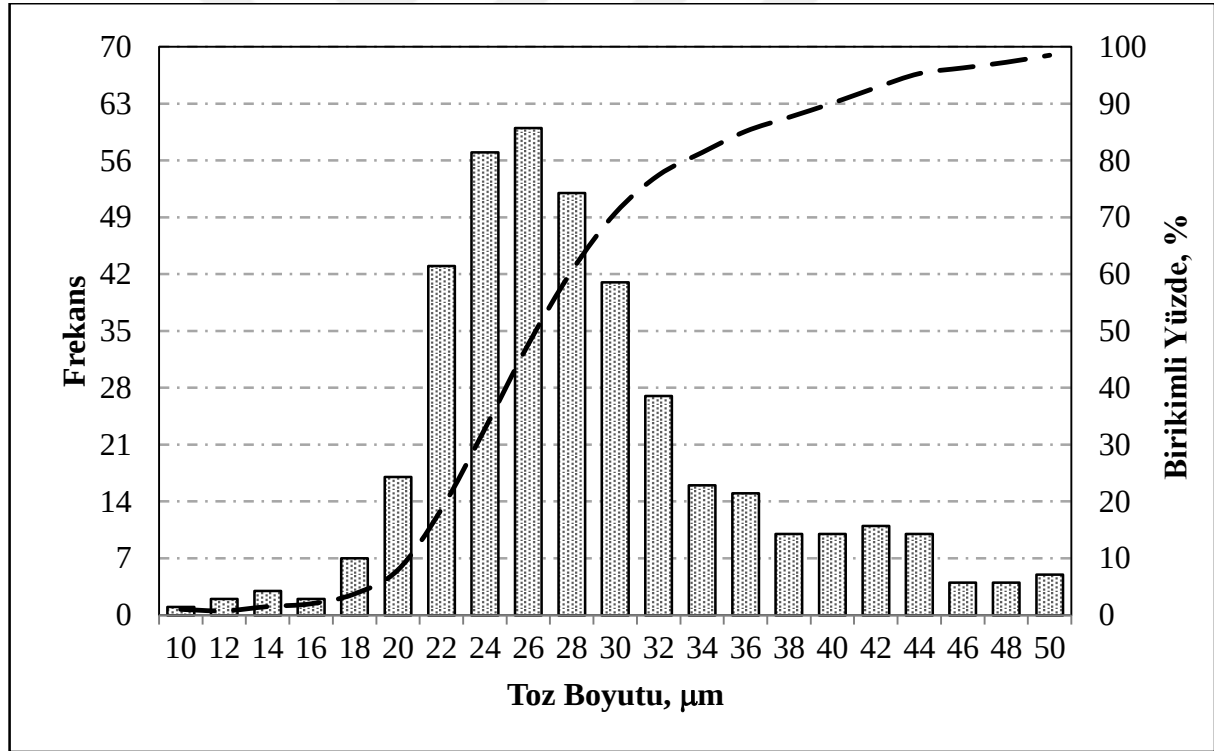
Şekil 27. Basma plakalarına ait sınır şartları

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Ti-6Al-4V ELI alaşımı kullanılarak, Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile gözenekli kafes sistemlerinin üretilmesi ve biyomalzeme olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmaya ait bulgular, kullanılan tozun karakterizasyonu, mikroyapı, üretim parametrelerinin belirlenmesi ve bu parametrelere göre mekanik özelliklerin incelenmesi, kafes sistemlerinin mekanik özelliklerinin test edilmesi ve sonlu elemanlar analizlerinin gerçekleştirilmesi alt bölümleri ile aşağıda verilmiştir.

Toz Formundaki Ti-6Al-4V ELI Alaşımına Ait Özellikler

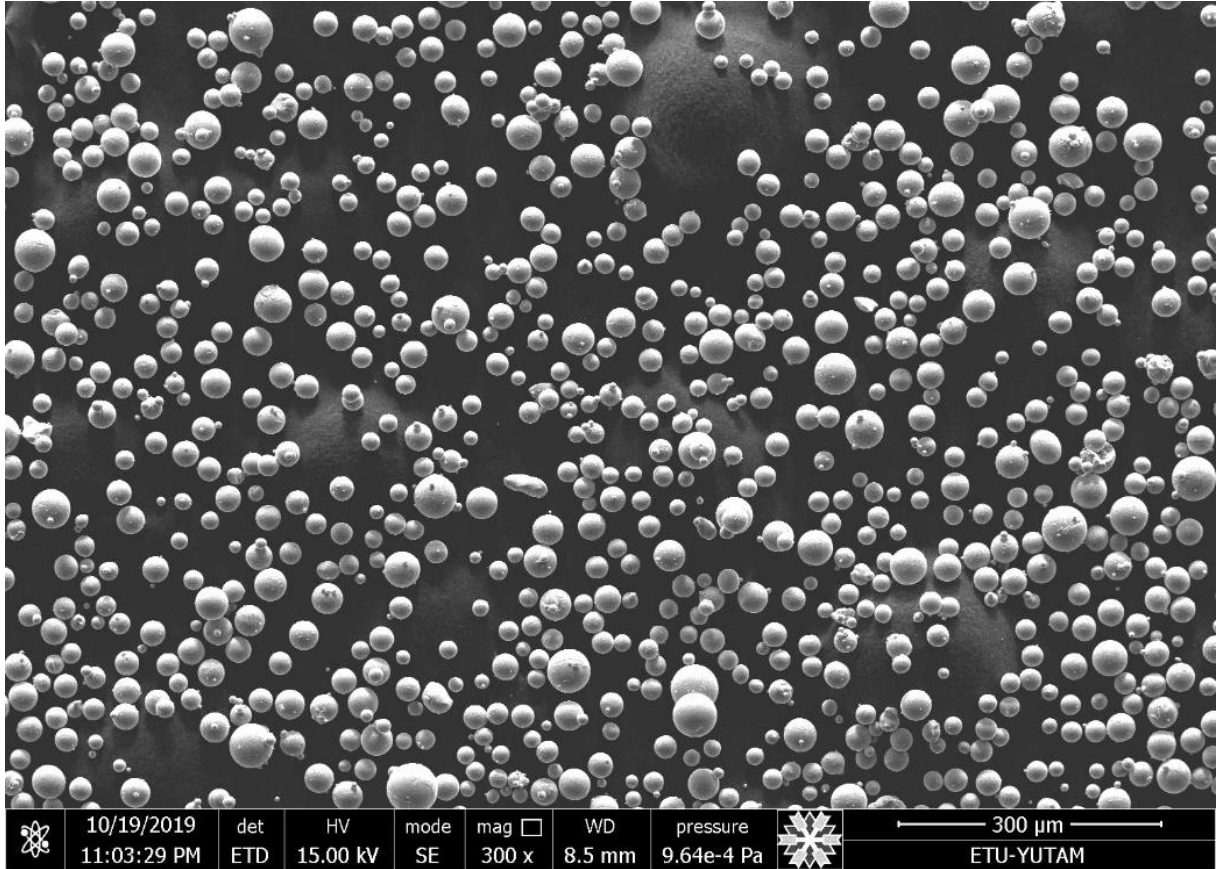
Eklemeli imalatta kullanılan toz formundaki Ti-6Al-4V ELI alaşımının morfolojik incelemelerine ait sonuçlar Şekil 28’de verilmiştir. Toza ait boyutsal ve biçimsel değerlendirmeler, SEM vasıtası ile elde edilen görüntülerin incelenmesi sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 28. Toz formundaki Ti-6Al-4V alaşımına ait toz dağılım grafiği

Toz dağılım grafiği incelendiğinde toz partiküllerinin 20 (D_{10}) ile 40 (D_{90}) µm değerleri aralığında ve ortalama toz boyutu değerinin 29 ± 9 µm olduğu görülmektedir. Şekil 29’ da verilen SEM görüntüsünden elde edildiği üzere, toz partiküllerinin oldukça iyi küresellikte olduğu, topaklanma benzeri kümelenmelerin gözlemlenmediği ve ortalama toz boyutu değeri altındaki nispeten küçük toz boyutuna sahip parçacıkların varlığı ile dağılımın iyi olduğu

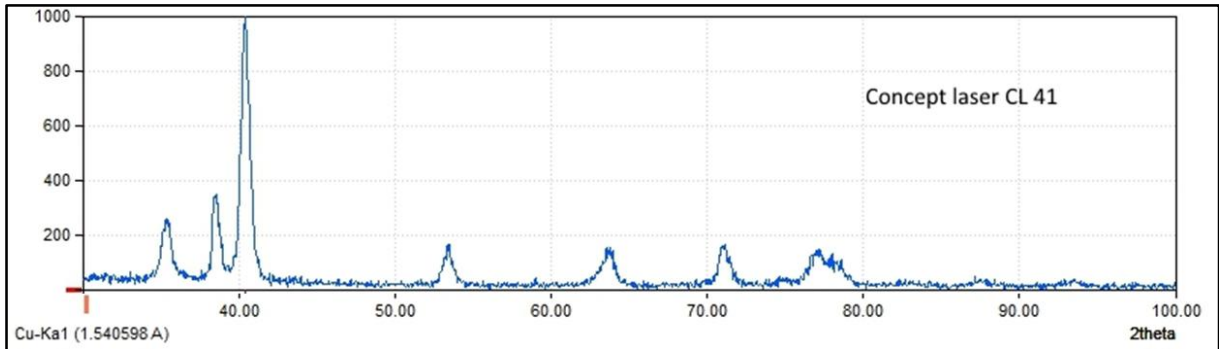
görülmektedir. Toz havuzunda üretim aşamasında, serili tozun yoğunluğu üzerinde oldukça etkili olan düşük boyutlu toz parçacıkları ile sergi yoğunluğu artmakta ve ergime havuzunun daha yüksek doluluk ile oluşması sağlanmaktadır. Bu etki, üretimde oluşan eriyik havuzlarının komşu lazer izleri arasını doldurması ve bindirme miktarlarını etkileyerek tam dolu ürünlerin elde edilmesini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca sergi yoğunluğunun artışı ile lazer tarafından toza aktarılan enerji transferi iyileşmekte ve homojen ısı dağılımı sağlanarak daha kararlı eriyik havuzlarının oluştuğu bilinmektedir (Gu *et al.* 2014).



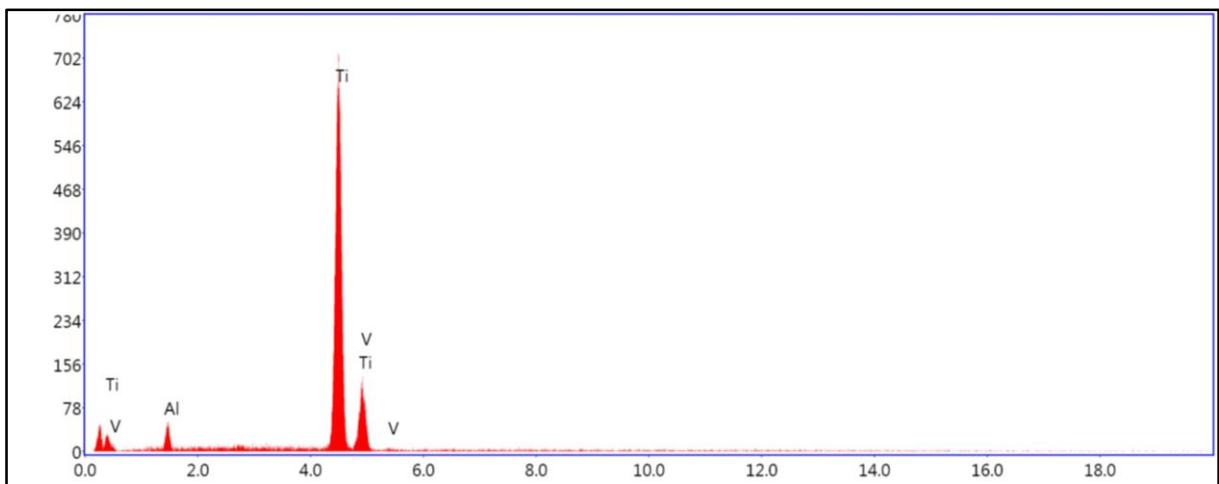
Şekil 29. Toz formundaki Ti-6Al-4V ELI alaşımına ait SEM görüntüsü

Şekil 30 ve 31 sırası ile toz formundaki Ti-6Al-4V ELI alaşımına ait XRD ve EDS analizi sonuçlarını içermektedir. EDS sonuçları incelendiğinde kullanılan tozun Ti-6Al-4V ELI alaşımına ait olduğu ve Şekil 30'dan elde edilen veriler ile tozun $\alpha+\beta$ alaşımı olduğu görülmektedir. Toz üretim prosesi neticesinde hızlı soğuma sonucu tamamen α' martenzitik yapıda olduğu bilinmekte, α ve α' fazlarının XRD incelemelerindeki oldukça yakın değerlerde yansıma açıları ile bu ayrımın yapılmasındaki sınırlar toz formundaki mikroyapı hakkında daha ileri bilgi sağlanmasını zorlaştırmaktadır. XRD analizi ile elde edilen sonuçlara bakıldığında 38° ve 70° elde edilen ve özellikle 70° 'deki yansımanın sadece β fazı ile örtüştüğü, 38° 'den elde edilen yansımanın ise her iki faza ait olabileceği görülmektedir. Toz üretim sürecindeki hızlı soğuma dikkate alındığında, yapıda dönüşümünü tamamlayamayan β fazının varlığı ve hızlı soğuma sonucu oluşan martenzitik fazların oluşabileceği bu durumu ifade etmektedir.

Benzer durum lazer etkileşimi sonucu $10^3 - 10^6$ K/s soğuma hızları ile ortaya çıkmakta ve mikroyapı α ve α' martenzitik iğergince zengin hale gelmektedir (Balla *et al.* 2014).



Şekil 30. Toz formundaki Ti-6Al-4V ELI alaşımına ait XRD grafiği



Şekil 31. Ti-6Al-4V ELI alaşımına ait EDS analizi.

Tablo 4 tedarikçi firma tarafından beyan edilen ve kullanılan Ti-6Al-4V ELI alaşımına ait tozun kimyasal içeriğini vermektedir.

Tablo 4. Toz tedarikçi firma tarafından beyan edilen kimyasal kompozisyon değerleri

Element	Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
Ağırlıkça (%)	5,5 6,5	3,5 4,5	< 0,25	< 0,008	< 0,13	< 0,05	< 0,012	Kalan

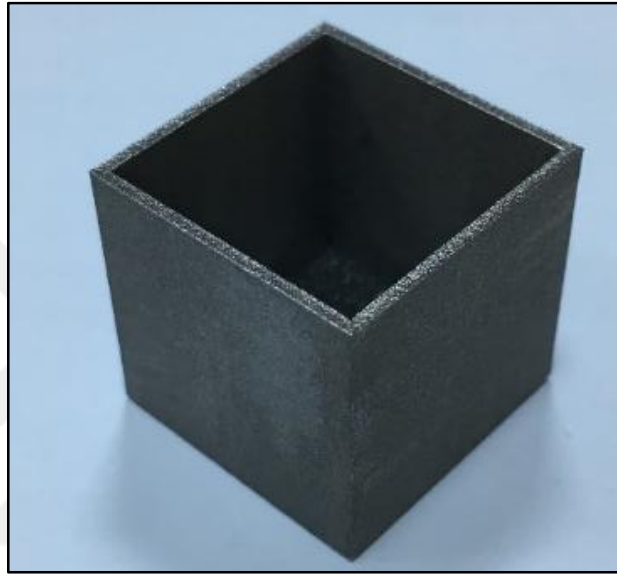
Tablo 5. EDS analizi ile elde edilmiş kimyasal kompozisyon değerleri

Element	Ağırlıkça (%)	Atomca (%)
Ti K	89,58	85,55
Al K	6,28	10,64
V K	4,24	3,81

Tablo 5’de elde edilen EDS analizleri ve Tablo 4’te sunulan, toz tedarikçi firmanın bilgileri ışığında, kullanılan tozun kimyasal oranının ASTM F3001-14 standardı ile belirlenen Ti-6Al-4V ELI alaşımına ait sınırlar içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

Toz Sergi Yoğunluğunun Belirlenmesi

Ekllemeli imalat sürecinde kullanılan tozun üretim tablasına serilmesinde sergi yoğunluğunun belirlenmesi amacı ile iç kenar uzunlukları 20x20x20 mm olan ve Şekil 32’de verilen küp şeklindeki hacmin üretimi gerçekleştirilmiş, üretim sürecinde sadece cidarları yazdırılan bu hacmi dolduran toz 0,1 mg hassasiyet ile tartılmış ve sergi yoğunluğu belirlenmiştir. Buna göre 25 µm tabaka kalınlığı ve üretim parametrelerindeki toz serme hızının 75 mm/s ve dolgu faktörü değerinin % 200 olması ile sergi yoğunluğu ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

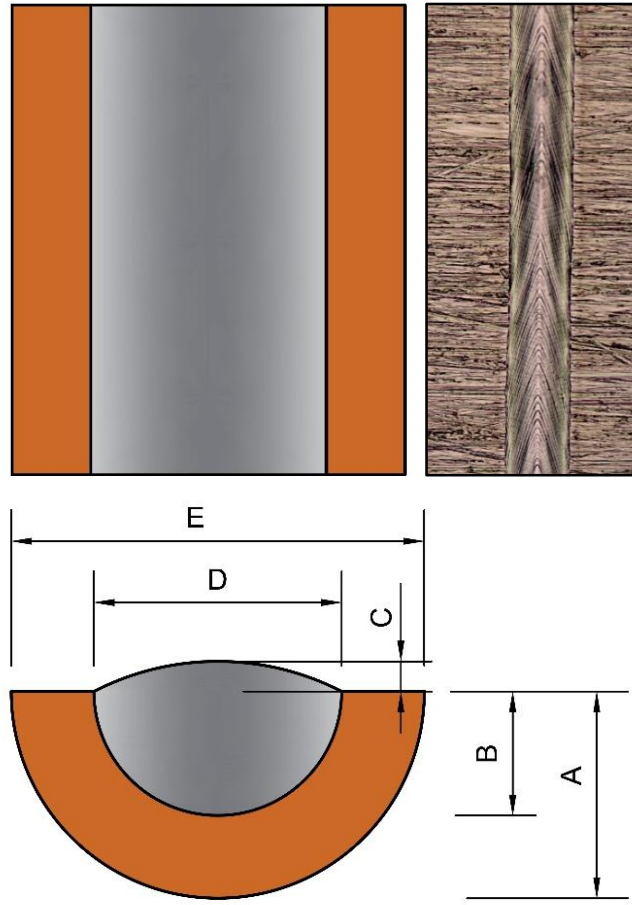


Şekil 32. Sergi yoğunluğunun belirlenmesinde kullanılan hacim

Saf su ile yapılan hacim ölçümünde, üretilen haznenin $8,0761 \pm 0,0014 \text{ cm}^3$ hacminde olduğu ve toz kütlelerinin tartımı ile elde edilen ağırlıkların ortalamasının ise $22,0360 \pm 0,00085 \text{ g}$ olduğu belirlenmiştir. Sergi yoğunluğu, elde edilen bu değerler ve kullanılan titanyum alaşımının yoğunluğu olan $4,405 \text{ g/cm}^3$ dikkate alınarak hesaplandığında, $\% 61,94 \pm 8 \times 10^{-5}$ olarak hesaplanmıştır.

Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi

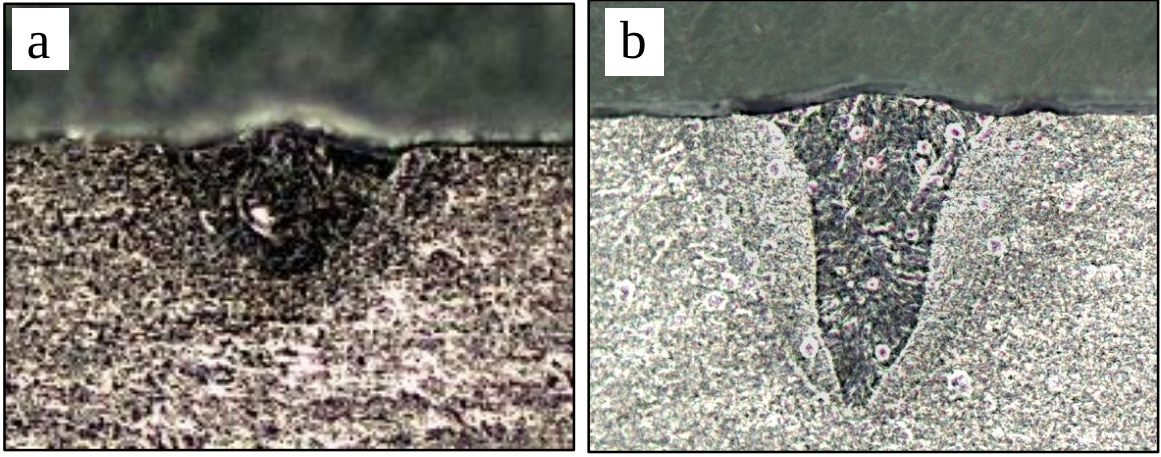
Üretimde kullanılan lazer gücü, tarama hızı ve tabaka kalınlığı etkileşimi sonucu oluşan eriyik havuzunun incelenmesi amacı ile toz tabakasının kalınlığı 25 µm ile sabit tutularak, tek katman kalınlığında farklı tarama hızı ve lazer gücü değerlerinde oluşan eriyik havuzunun karakterizasyonu Ti-6Al-4V plaka üzerinde tekil lazer vuruşları ile gerçekleştirilmiştir. Li *et al.* (2019) başlangıç parametrelerinin belirlenmesinde bu yöntemin oldukça yaygın ve efektif olduğunu belirtmişlerdir. Bu kapsamda eriyik havuzu ve ısı etkisi altında kalan bölgenin genişlik ve derinliği irdelenmiştir. Yüzey incelemesi sonucu elde edilen görüntülere ait şematik bir sunum Şekil 33’te verilmiştir.



Şekil 33. Eriyik havuzunun yüzeyden karakterizasyonu sonucu elde edilecek havuz özellikleri. (A: Isı etkisi altındaki bölge derinliği, B: Eriyik havuzu derinliği, C: Oluşan ergiyeğin yüzeyden yüksekliği, D: Eriyik havuzu genişliği, E: Isı etkisi altındaki bölge genişliği).

Eriyik havuzunun yüzey incelemeleri değerlendirildiğinde, yüzeyden sağlanan bilginin sadece eriyik havuzu genişliği hakkında bilgi sağladığı ve bu değer kesit incelemeleri ile elde edilen eriyik havuz genişliği (D) ile örtüştüğü görülmektedir. Yüzey incelemeleri, ısı etkisi altında kalan bölgeler ve eriyik havuzun formu hakkında yeterli bilgiyi sağlayamaması nedeni ile parametre belirlemede sınırlı kalmaktadır. Oluşan eriyik havuzunun ve çevreleyen ısı etkisi altında bölgenin tespiti üretim parametrelerinin belirlenmesinde oldukça önemli başlangıç değerleri sunmaktadır (Dilip *et al.* 2017). Oluşan havuzun boyutsal özelliklerinin yanı sıra yapıdaki boşluk miktarı, yeterli birleşmeme gibi hataların belirlenmesi ve üretim sürecinin iyileştirilmesinde kritik önem arz etmektedir. Havuz boyutlarının yanı sıra katılaşma sürecinde tane boyutu, yönelmesi ve tane sınırlarının oluşumu gibi faktörler de akma dayanımı, süneklik ve sertlik gibi mekanik özellikler üzerinde oldukça etkilidir (Vrancken *et al.* 2012).

Kesit analizleri ile sağlanacak havuz bilgilerinin yüzey incelemeleri ile elde edilecek bilgiye kıyasla daha kapsamlı olması nedeni ile kesit analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 34 kesit analizleri ile sağlanan havuz bilgisi, büyüklükleri ve analizlerden elde edilen örnek iki kesit görüntüsünü içermektedir.



Şekil 34. Kase ve anahtar deliği biçimine sahip iki eriyik havuzuna ait optik görüntüler a: kase biçimine sahip b: anahtar deliği biçimine sahip (anahtar deliği formu 95W -200mm/s 10x)

Uygulanan enerji yoğunluğunun ve bu etki ile oluşacak eriyik havuzu formunun belirlenmesi, nihai üründe yüzey durumu, boşluk konsantrasyonu ve ısıl girdinin neden olacağı değişimler ile tüm yapıya ait mekanik ve kimyasal özellikler üzerinde etkin rol oynamaktadır. Oluşan eriyik havuzu anahtar deliği ve konveksiyon durumları ile iki farklı formda biçimlenmektedir. Yoğun enerji girdisi ile ortaya çıkan anahtar deliği formu, ergime ve buharlaşma durumunu beraberinde getirmektedir. Hızlı katılaşma ile gaz çıkışının engellenmesi sonucu boşlukların katmanlar arasında kalması söz konusu olmakta ve gaz boşluğu üretim hatası ortaya çıkmaktadır. Dawes (1992) uygulanan enerji yoğunluğunun 10^3 ile 10^5 W/mm² arasında olması ile gaz boşluğu hatasının ortaya çıktığını belirtmiştir.

Lazer ile sağlanan enerjinin daha dengeli taşınımı ile ortaya çıkan konveksiyon formu ve derinlemesine ısı nüfuziyetinin olduğu durumlarda ortaya çıkan anahtar deliği formu havuzları, sırası ile Şekil 34 a ve b’de sunulmuştur. Artan ilerleme hızı ile metal tozu ile lazer etkileşim süresindeki düşüş sonucu metalik toza enerji aktarımı düşerek oluşan sıvı metal eriyik havuzu boyutlarında azalma elde edilmiştir. Bu düşüş sonucu yetersiz ergime durumu ortaya çıkmakta ve keskin hatlara sahip, küresel olmayan boşluk formu ile gaz boşluğu hatasından ayrılan erimemiş partiküllerin neden olduğu yetersiz ergime kusurları oluşmaktadır.

Kullanılan SLE cihazının üst güçlerinde (95W, 100W) farklı lazer tarama hızları ile elde edilen eriyik havuzları ve ısı tesiri altındaki bölgelerin kesit incelemeleri ile elde edilen bilgiler Tablo 6 ve 7’de verilmiştir. Bu iki tablo ve Şekil 33’ten de anlaşıldığı üzere ısı etkisi altındaki bölge derinliği (A), eriyik havuzu derinliği (B), eriyik havuzunun yüzeyden yüksekliği (C), eriyik havuzu genişliği (D), ve ısı etkisi altındaki bölge genişliği (E) ve bu değerler ile hesaplanan eriyik havuzu yarıçapı ve derinliği oranı (D/2B) değeri yer almaktadır. Buna göre eriyik havuzu formunun artan tarama hızları ile anahtar deliği biçiminden kase şeklindeki yarı küresel forma dönüştüğü görülmektedir. Katman kalınlığının 25 µm olarak sabit kaldığı ve

üretim hızının arttırılması hedeflendiğinde, ilerleme hızı, lazer gücü ve yana kayma miktarlarının birlikte değerlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Tablo 6’da 95 W lazer gücü ile farklı tarama hızları sonucu elde edilen eriyik havuzuna ait geometrik özellikler sunulmaktadır. Tarama hızının artması ile enerji girdisinin düşüşü ve oluşan eriyik hacminin azalması ile havuz formunun anahtar deliğinden kase formuna doğru evrildiği görülmektedir. Cihazın daha hızlı üretim gerçekleştirmesi maksadı ile üst lazer gücü ve tarama hızı irdelenmesi amaçlanarak, benzer çalışma 100 W lazer gücünde de gerçekleştirilmiştir. Tablo 6 sadece cihazın sahip olduğu üst güce dair davranışın yanı sıra bu değere yakın bir başka lazer gücü ile elde edilen, eriyik havuzu davranışının gösterilmesi ve parametrelerin belirlenmesi sürecinde gerçekleştirilen diğer bir metodolojik çalışma basamağının ortaya konulması nedeni ile verilmiştir.

Tablo 6. 95 W lazer gücü ve farklı tarama hızları ile elde edilen eriyik havuzuna ait boyutsal özellikler

Tarama Hızı mm/s	Eriyik Havuzu			Isı Tesiri Altındaki Bölge		
Tarama Hızı mm/s	Genişlik D μm	Derinlik B μm	Yüzeyden Yükseklik C μm	Genişlik E μm	Derinlik A μm	$\frac{D}{2B}$
100	258 ± 16	315 ± 11	26 ± 1	421 ± 15	336 ± 6	0,41
150	216 ± 2	261 ± 3	22 ± 2	361 ± 13	280 ± 10	0,41
200	178 ± 7	234 ± 2	24 ± 2	306 ± 11	250 ± 3	0,38
250	159 ± 2	213 ± 9	17 ± 2	273 ± 4	230 ± 2	0,37
300	148 ± 5	198 ± 5	21 ± 3	251 ± 4	218 ± 2	0,37
350	137 ± 2	195 ± 6	12 ± 1	224 ± 5	207 ± 2	0,35
400	125 ± 4	175 ± 3	12 ± 2	202 ± 6	186 ± 10	0,36
450	120 ± 8	154 ± 7	15 ± 1	198 ± 4	167 ± 4	0,39
500	116 ± 1	144 ± 4	12 ± 2	189 ± 6	156 ± 3	0,40
550	109 ± 1	125 ± 7	12 ± 1	179 ± 3	136 ± 8	0,43
600	107 ± 1	120 ± 2	12 ± 1	176 ± 3	135 ± 2	0,45
650	103 ± 2	113 ± 8	12 ± 1	176 ± 2	125 ± 9	0,46
700	100 ± 3	105 ± 6	11 ± 1	165 ± 3	120 ± 2	0,47
750	99 ± 3	92 ± 9	10 ± 1	159 ± 4	106 ± 7	0,54
800	97 ± 7	83 ± 10	9 ± 1	154 ± 3	97 ± 8	0,58
850	93 ± 2	71 ± 3	11 ± 1	150 ± 1	86 ± 4	0,66
900	91 ± 5	70 ± 2	10 ± 3	149 ± 2	82 ± 6	0,65
950	96 ± 3	65 ± 5	9 ± 1	151 ± 5	77 ± 3	0,74
1000	95 ± 1	54 ± 4	9 ± 1	138 ± 2	69 ± 5	0,88
1050	93 ± 1	50 ± 2	10 ± 1	134 ± 3	64 ± 3	0,93
1100	89 ± 2	48 ± 1	9 ± 0	129 ± 1	59 ± 3	0,93
1150	87 ± 2	45 ± 1	9 ± 0	126 ± 1	54 ± 1	0,97
1200	86 ± 5	42 ± 0	10 ± 1	123 ± 1	52 ± 1	1,02
1250	83 ± 2	39 ± 1	9 ± 1	120 ± 2	50 ± 2	1,07
1300	80 ± 1	36 ± 1	8 ± 2	114 ± 4	47 ± 0	1,12
1350	77 ± 1	33 ± 1	8 ± 1	112 ± 3	43 ± 1	1,16

Tablo 7 ve Şekil 35, 100 W sabit lazer gücü ve değiştirilen tarama hızlarında elde edilen eriyik havuzuna ait kesit görüntüleri ve bu havuzlara ait geometrik özellikleri sırası ile göstermektedir. Tablo 7’de verilen 100 W güç ile elde edilen iz genişlikleri dikkate alındığında, artan ilerleme hızı neticesinde $D/2B$ değerinin 1’e yaklaşması ile kase formunun kazanıldığı ve anahtar deliği formundan uzaklaşıldığı görülmüştür. Bu durum neticesinde eriyik havuzu içerisinde daha dengeli ısı dağılımının bir sonucu olarak yapı kusurlarının azalarak gaz boşluğu durumunun nispeten kalktığı görülmüştür.

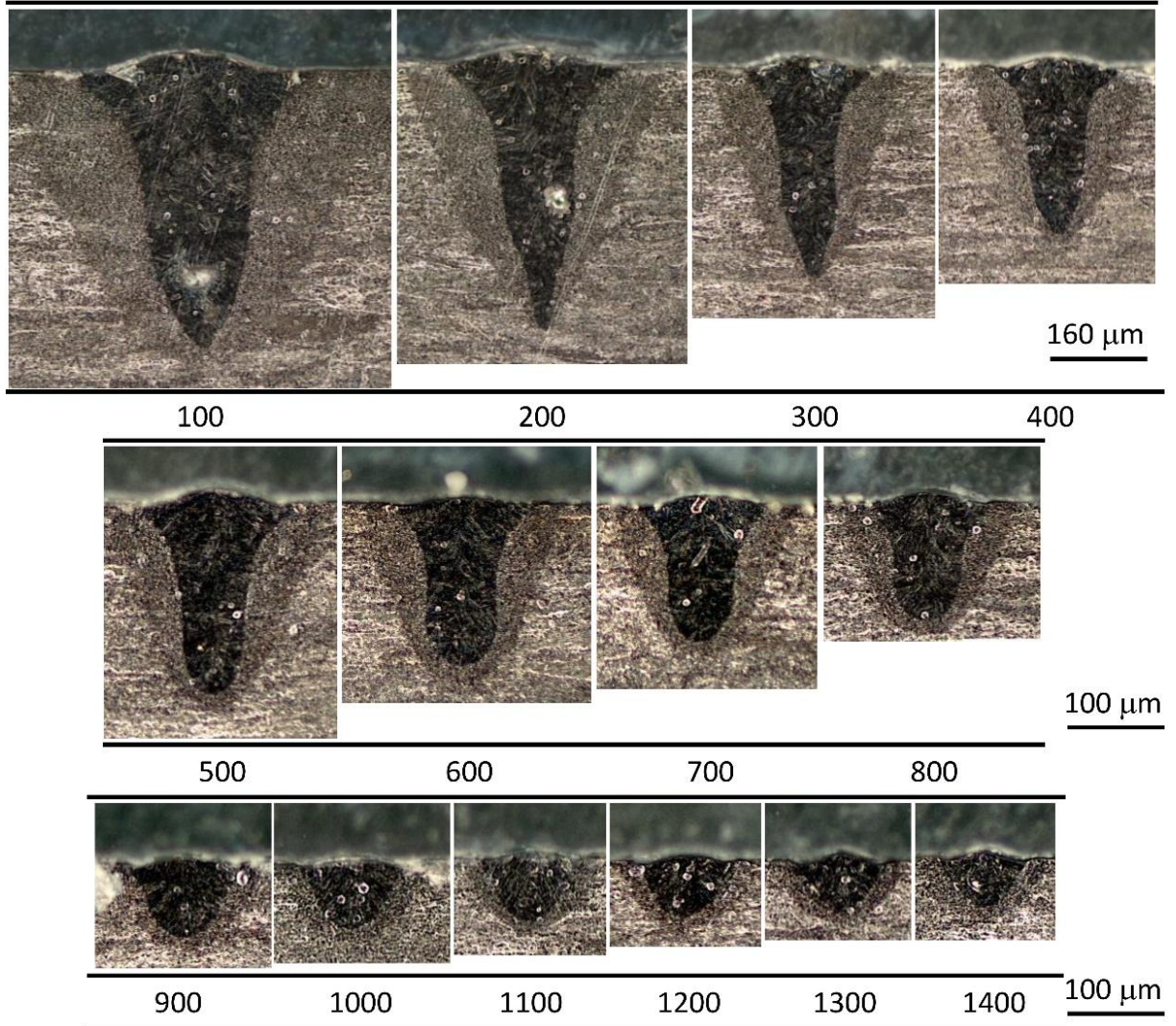
Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla kalıp, kesici takım vb. ihtiyacı göstermeyen SLE yönteminde, proses sürelerinin azaltılması amacı ile tarama hızının artışı üretime harcanan zamanı minimize etmektedir. Seçilen 100 W lazer gücünde farklı tarama hızları ile elde edilen, eriyik havuzu derinliği ve bu bölgenin kase formuna yakınlığı sebebiyle, 25 μm katman kalınlığı için uygun tarama hızı 1400 mm/s olarak seçilmiştir. Ti-6Al-4V ELI malzeme için belirlenen parametre ile kullanılan cihazın üst lazer gücü ve uygun olabilecek en yüksek tarama hızı seçilmiştir. Bu parametreler ile eriyik havuzu dikkate alındığında 25 μm katman kalınlığı ile katmanlar arası birleşme için yeterli olabilecek bir derinliğin sağlandığı Tablo 7’den elde edilmektedir.

Tablo 7. 100 W lazer gücü ve farklı tarama hızları ile elde edilen eriyik havuzuna ait boyutsal özellikler

	Tarama Hızı mm/s	Eriyik Havuzu			Isı Tesiri Altındaki Bölge		$\frac{D}{2B}$
		Genişlik D μm	Derinlik B μm	Yüzeyden Yükseklik C μm	Genişlik E μm	Derinlik A μm	
100 W	100	319 $\pm$ 16	377 $\pm$ 7	30 $\pm$ 1	485 $\pm$ 16	423 $\pm$ 3	0,42
	150	297 $\pm$ 12	400 $\pm$ 9	32 $\pm$ 1	465 $\pm$ 12	414 $\pm$ 3	0,37
	200	278 $\pm$ 11	369 $\pm$ 12	28 $\pm$ 1	397 $\pm$ 19	392 $\pm$ 5	0,38
	250	229 $\pm$ 9	325 $\pm$ 8	25 $\pm$ 4	345 $\pm$ 24	344 $\pm$ 13	0,35
	300	207 $\pm$ 12	302 $\pm$ 5	19 $\pm$ 2	297 $\pm$ 7	315 $\pm$ 7	0,34
	350	194 $\pm$ 10	267 $\pm$ 6	19 $\pm$ 1	277 $\pm$ 17	282 $\pm$ 6	0,36
	400	183 $\pm$ 8	231 $\pm$ 7	15 $\pm$ 1	253 $\pm$ 10	243 $\pm$ 10	0,40
	450	172 $\pm$ 7	212 $\pm$ 8	15 $\pm$ 1	238 $\pm$ 5	229 $\pm$ 10	0,41
	500	143 $\pm$ 9	226 $\pm$ 4	15 $\pm$ 2	226 $\pm$ 4	197 $\pm$ 1	0,32
	550	138 $\pm$ 4	162 $\pm$ 6	12 $\pm$ 2	205 $\pm$ 2	174 $\pm$ 4	0,43
	600	136 $\pm$ 1	154 $\pm$ 2	12 $\pm$ 1	195 $\pm$ 1	166 $\pm$ 1	0,44
	650	131 $\pm$ 1	152 $\pm$ 2	12 $\pm$ 1	188 $\pm$ 3	166 $\pm$ 6	0,43
	700	125 $\pm$ 2	140 $\pm$ 3	11 $\pm$ 3	183 $\pm$ 5	156 $\pm$ 5	0,45
	750	122 $\pm$ 6	131 $\pm$ 1	10 $\pm$ 1	179 $\pm$ 4	145 $\pm$ 1	0,47
	800	118 $\pm$ 2	121 $\pm$ 5	10 $\pm$ 3	174 $\pm$ 4	136 $\pm$ 7	0,49
	850	113 $\pm$ 3	85 $\pm$ 4	10 $\pm$ 1	159 $\pm$ 3	99 $\pm$ 4	0,66
	900	109 $\pm$ 5	78 $\pm$ 4	9 $\pm$ 2	153 $\pm$ 3	92 $\pm$ 3	0,70
	950	106 $\pm$ 4	73 $\pm$ 1	8 $\pm$ 2	145 $\pm$ 1	84 $\pm$ 1	0,73
	1000	101 $\pm$ 4	67 $\pm$ 1	8 $\pm$ 1	144 $\pm$ 1	80 $\pm$ 4	0,75

Tablo 7. (Devamı)

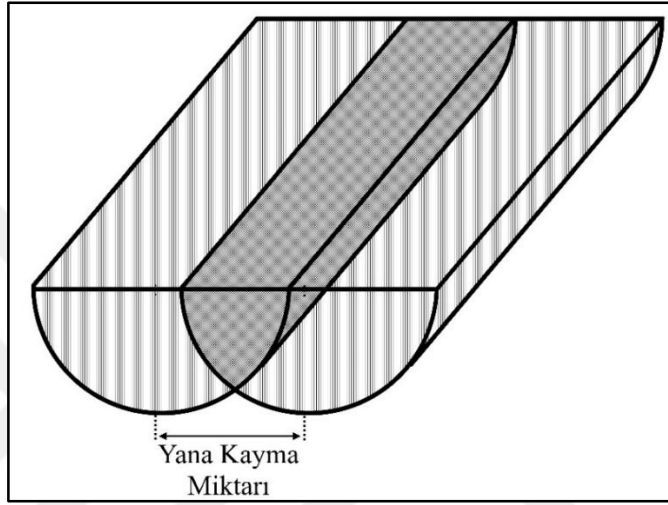
1050	98 ± 1	62 ± 1	7 ± 1	141 ± 2	78 ± 1	0,79
1100	97 ± 1	60 ± 1	8 ± 1	138 ± 2	75 ± 1	0,81
1150	96 ± 1	59 ± 2	8 ± 1	132 ± 3	74 ± 1	0,81
1200	95 ± 1	58 ± 1	7 ± 1	128 ± 1	69 ± 1	0,83
1250	94 ± 1	51 ± 1	7 ± 1	124 ± 3	64 ± 2	0,92
1300	92 ± 2	49 ± 1	8 ± 1	123 ± 3	62 ± 1	0,94
1350	88 ± 1	44 ± 1	7 ± 1	123 ± 3	60 ± 2	0,99
1400	82 ± 2	41 ± 1	8 ± 1	117 ± 2	57 ± 1	1,00

**Şekil 35.** 100 W lazer gücü ile farklı tarama hızlarında (100 – 1400mm/s) elde edilen eriyik havuzu kesit görüntüleri

Şekil 35, Tablo 7’de verilen eriyik havuzuna ait bilgilerin elde edildiği kesit görüntülerini içermektedir. Artan tarama hızı ile elde edilen havuz formunun değişerek anahtar deliği formunun yerini kase formuna bıraktığı sonucuna ulaşılmıştır. 100 W lazer gücü ve 1400 mm/s tarama hızı ile yanıl ve kesit derinliğinde yaklaşık aynı havuz özelliklerinin eldesi ile ısı girdinin homojenliği sağlanmıştır. Üretimin doğasından kaynaklanan ısıl gradyen etkisinin

böylelikle daha dengeli dağılımının sağlanacağı görülmüştür.

Lazer gücü ve tarama hızı etkileşiminin belirlenmesi sonrasında ilgilenecek kısım ise yana kayma miktarıdır. Yana kayma miktarı ve lazer tarama izlerinin birbiri üzerine bindirme miktarındaki değişimine ait şematik bir gösterim Şekil 36'da verilmiştir. Yana kayma miktarının kontrolü ile iki lazer tarama havuzu arasındaki bindirme miktarının kontrolü sağlanmaktadır. Şekil 36'daki koyu renkli orta bölge yana kayma sonucu ortaya çıkan bindirme miktarı ve aynı zamanda yeniden ergitilmiş bölge olarak karşımıza çıkmaktadır. Yana kayma miktarı ergime havuzunun merkezleri arasındaki fark olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 36. Yana kayma miktarına ait şematik bir gösterim

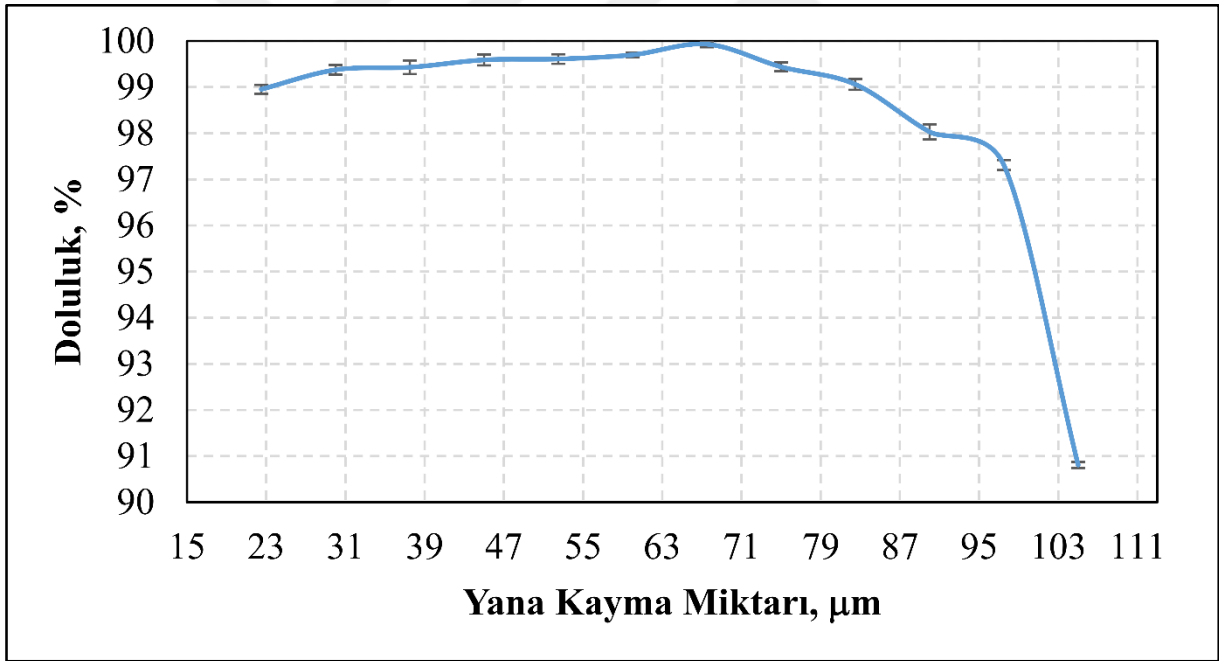
Katmanlar arasındaki birleşmenin sağlanarak mekanik bütünlüğün oluşturulması ile yeterli dayanım ve mekanik özelliklerin iyileşmesi sağlanabilmektedir. Eklemeli imalat sürecinde üretim hızının artırılması ve beraberinde yeterli mekanik özelliklerin hedeflendiği düşünüldüğünde, eldeki imkânlar ile uygulanabilecek en yüksek üretim hızı ve iyi özellikler için optimum lazer gücü ve uygun tarama hızı seçilmelidir. Yapılan çalışmalarda bu kombinasyon için 100 W lazer gücü ve 1400 mm/s ilerleme hızı sonucu oluşan eriyik havuzunda katmanlar arası yeterli birleşmeyi sağlayacak derinliğin oluştuğu belirlenmiştir. Oluşan eriyik havuzu formu dikkate alındığında kase şekline sahip eriyik havuzu ile derinlik ve genişlik formunun orantısal benzerliği, yüzeyden yüksekliği ve eriyik bölgedeki yapısal kusurların olmayışı bu parametere ile üretimin gerçekleştirilmesinin önünü açmıştır.

Yana kayma miktarlarının incelenmesi amacı ile lazer gücü ve ilerleme hızı 100 W ve 1400 mm/s ile sabit tutularak 22,5 - 105 mikron aralığında 7,5 μm artım ile değişen yana kayma miktarlarında üretilen çekme numunelerinden elde edilen mekanik özellikler ve mikroyapı karşılaştırması gerçekleştirilmiştir.

Eriyik Havuzuna Ait İncelemeler

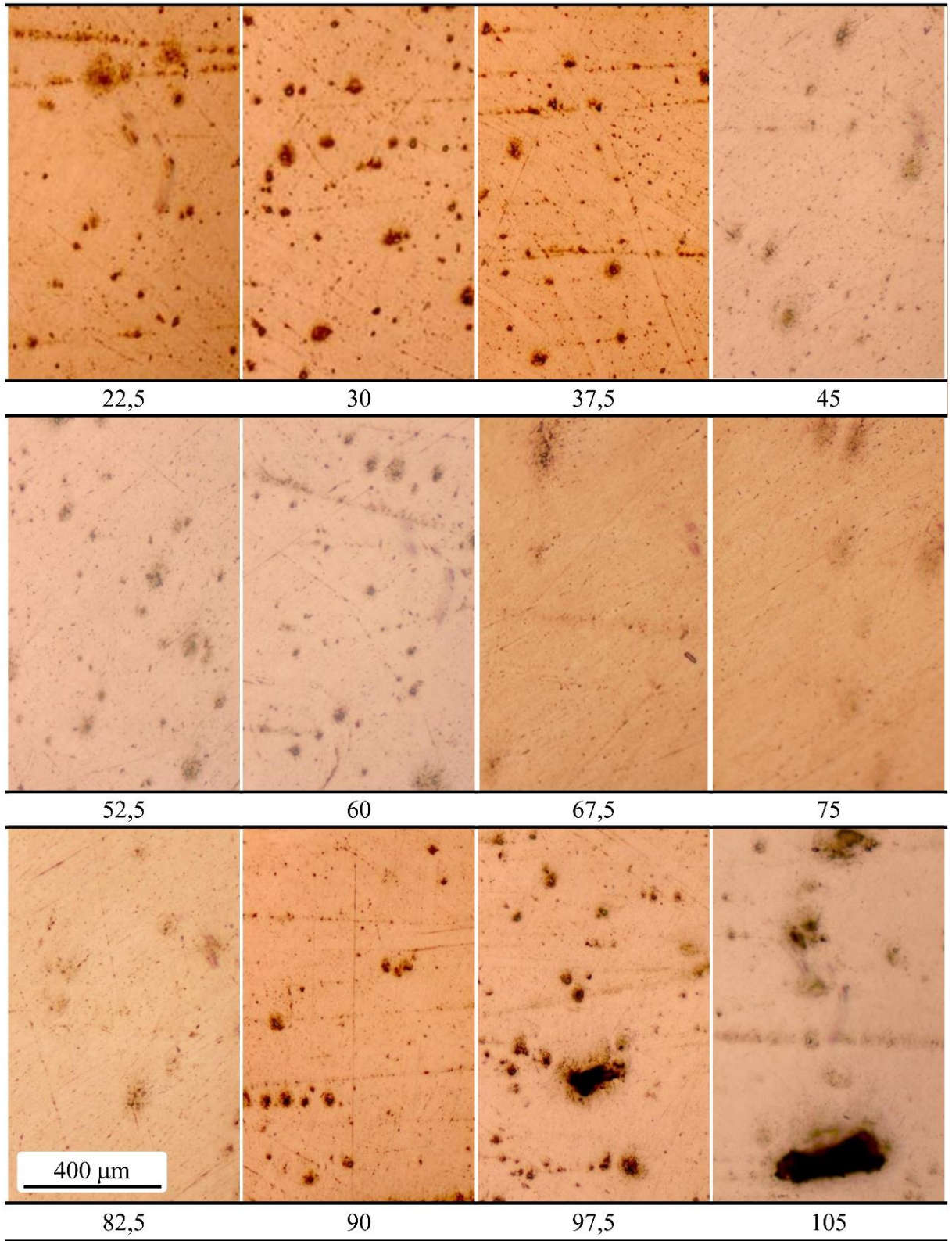
Doluluk oranının belirlenmesi

Yeterli ergime, birleşme ve elde edilebilen yüksek üretim hızı nedeni ile seçilen 100W lazer gücü ve 1400 mm/s tarama hızı ile 25 μm katman kalınlığında farklı yana kayma değerlerinin mikroyapıdaki boşluk miktarı, tane yapısı ve mekanik özellikler üzerindeki değişimlerin etkisi incelenmiştir. Elde edilen mikroyapıdaki doluluk miktarını gösterir grafik Şekil 37’de, içyapı görüntüleri ise Şekil 38’de verilmiştir. Şekil 37’de verilen doluluk analizleri, üretilen numunenin 3 farklı temel eksenine paralel olarak her bir eksen için en az 4 farklı kesitten metalografik incelemeler sonucu elde edilmiştir. Seçilen optimum yana kayma değeri olan 67,5 μm ’ye kadar yüzde doluluk oranında önemli bir değişiklik görülmezken, bu değer üzerinde yana kayma miktarlarının doluluk oranı üzerinde daha belirgin ve olumsuz etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Artan yana kayma miktarı ile içyapıdaki yetersiz ergime bölgelerinin varlığı ve bunun sonucu olarak birbirleri ile temas edemeyen komşu lazer izleri arasındaki yetersiz birleşme kusurları, doluluk değerinin düşüşünü hızlandırmıştır.



Şekil 37. Yana kayma miktarına bağlı olarak elde edilen yüzde doluluk miktarı

Şekil 38’de verilen iç yapıya ait yüzey görüntüleri, Şekil 37 ile birlikte incelendiğinde optimum altı yana kayma miktarlarında iç yapıdaki boşlukların küresel formları ile yüksek yana kayma değerlerinden farklılaştığı ve yapıdaki boşluk miktarının daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 38. 100 W lazer gücü ve 400 mm/s ilerleme hızında farklı yana kayma değerleri ile elde edilen mikro yapı görüntüleri

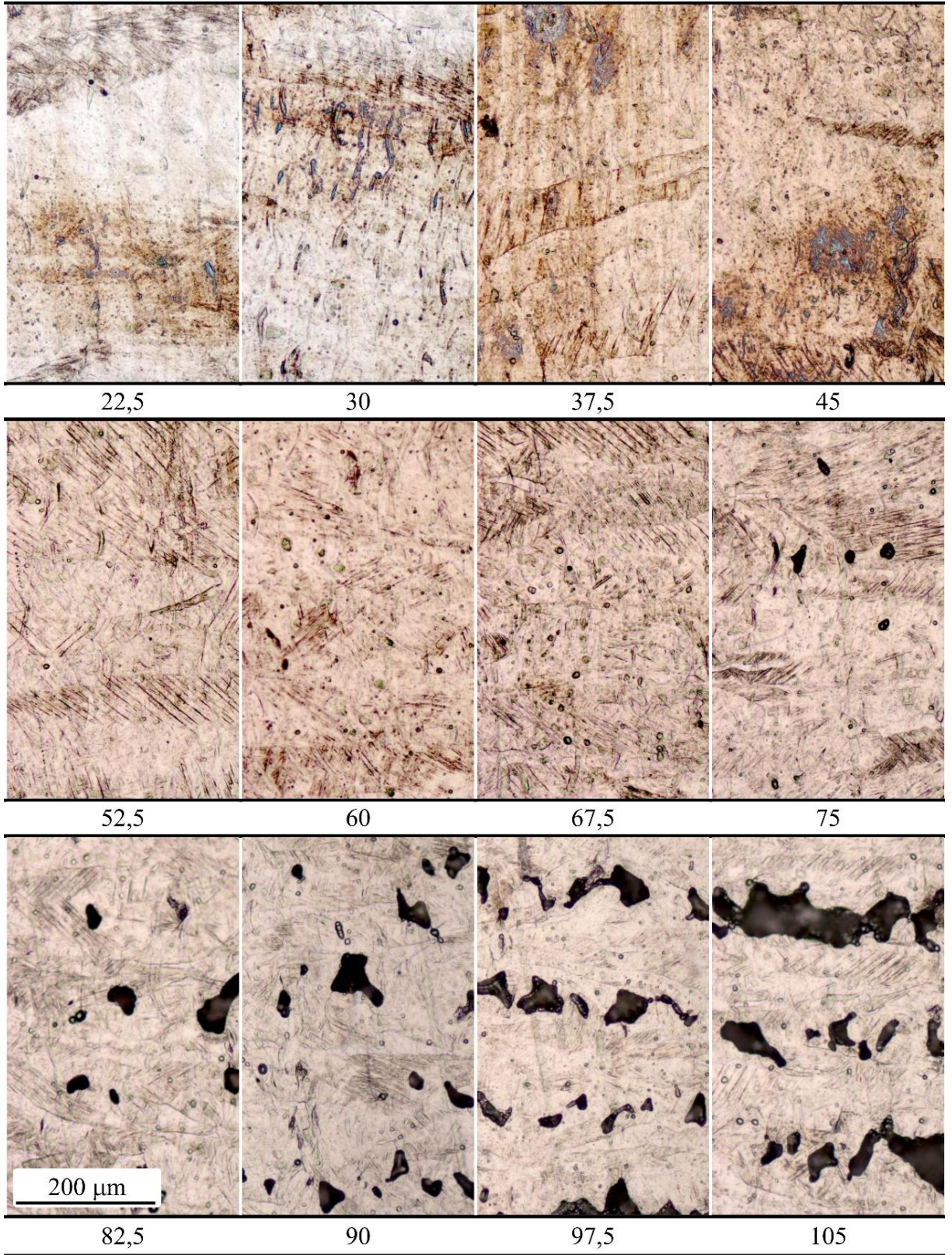
Mikro yapı analizleri

100 W lazer gücü ve 1400 mm/s tarama hızı ile farklı yana kayma değerleri (22,5-105 μm) ile elde edilen numunelere ait dağlama sonrası mikroyapı görüntüleri Şekil 39’da verilmiştir. Eriyik havuzlarının mikroyapı analizleri incelendiğinde hızlı soğuma sonucu

iğnemsî martenzitik yapının varlığı dikkati çekmektedir. Eriyik havuzu içerisinde yüksek ısı farklılıkları nedeni ile havuz cidarındaki düşük sıcaklık bölgesi katılaşma başlangıcını oluşturmuş ve katılaşmanın son aşamasına kadar eriyik merkezine uzanan bu yönelmiş tanelerin geliştiği belirlenmiştir. Bu durum eriyik havuzu içerisindeki yüksek ısı gradyanının oluşması ile açıklanmaktadır (Dezfoli *et al.* 2017). Hızlı soğumanın baskın olduğu eklemeli üretim tekniklerinde yapıdaki α ve α' fazlarının miktarı β fazına göre daha yüksek ve yapının martenzitik olduğu bilinmektedir (Balla *et al.* 2014).

Değişen yana kayma miktarı ile optimum değerin altındaki iç yapıda iğnemsî yapıların kolonsal olarak geniş bir dağılım sergilediği görülmektedir. Düşük yana kayma değerinin neden olduğu aşırı ısı girdi, yapıda küresel forma sahip gaz boşlukları oluşmasına neden olmuştur. Bu hataların artan yana kayma ile örtüşmeyen lazer iz genişlikleri sonucu biçim değiştirerek yetersiz ergime bölgelerine dönüştüğü gözlemlenmiştir. Biçimsiz formların oluşması özellikle 75 μm ve daha büyük yana kayma değerlerinde ortaya çıkmış ve artan yana kayma ile yapıdaki belirginlikleri artmıştır. Şekil 37’de sunulan doluluk analizi mikroyapı görüntüleri ile birlikte değerlendirildiğinde, benzer durumun var olduğu ancak dağlama sonucu yapıdaki gözeneklerin daha belirgin hale geldiği görülmektedir (Şekil 38).

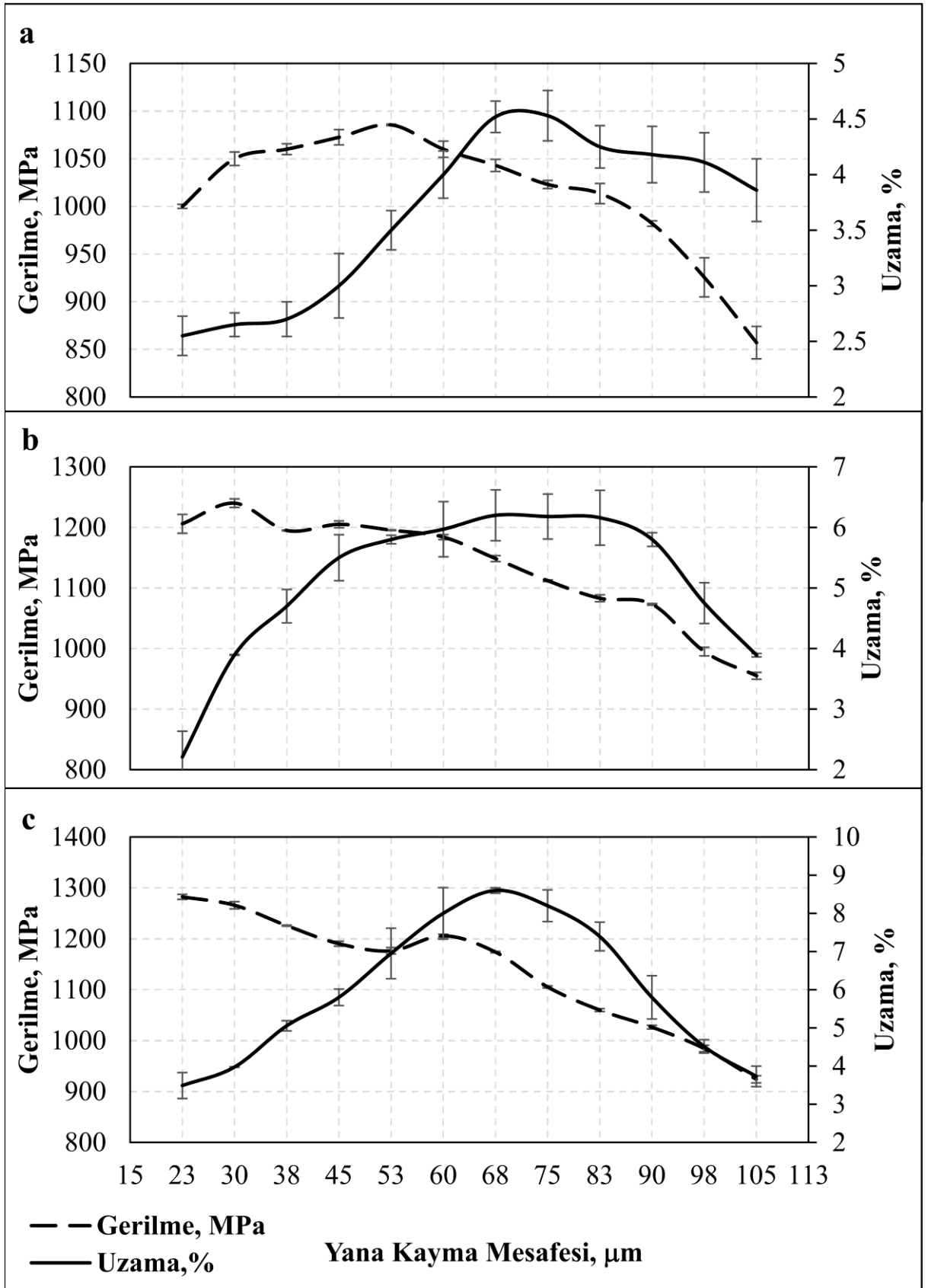
Şekil 39’da verilen mikroyapılar incelendiğinde 45 mikron ve altı yana kayma değerlerinde yapının dentritik ancak kaba sütunlar halinde oluştuğu ve bu davranışın artan yana kayma sonucu azalan enerji yoğunluğu ile azaldığı görülmektedir. Sütunsal durumun 45 μm yana kayma sonucu gözden kaybolduğu ve 67,5 μm yana kayma değerine kadar yapının homojen dentritik ve 67,5 μm sonrası biçimsiz formları nedeni ile belirginleşen yetersiz ergime hatalarının varlığı söz konusudur. Yana kayma değerinin 75 μm ve üzerindeki değerlerinde, yetersiz ergime bölgelerinin varlığı belirginlik kazanmıştır.



Şekil 39. 100 W lazer gücü ve 1400 mm/s tarama hızı ile farklı yana kayma değerleri (22,5-105 µm) ile elde edilen numunelere ait dağlama sonrası mikroyapı görüntüleri

Mekanik özelliklerin belirlenmesi

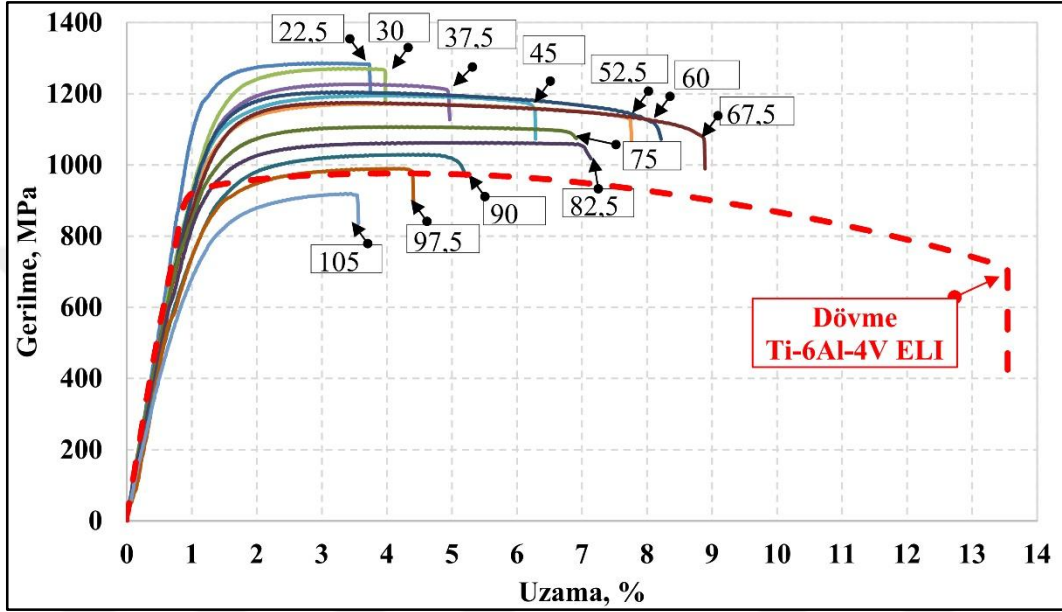
Eklemeli imalat sürecinde bilinen en temel eksiklik yetersiz birleşmeler ve aşırı soğuma sonucu ortaya çıkan yetersiz uzama değerleridir. Çekme deneyi ile elde edilen gerilme ve uzama değerleri dikkate alınarak uygun yana kayma değerinin belirlenmesi ve üretim platformundaki oryantasyonun bu temel değer üzerindeki etkileri Şekil 40'da verilmiştir. Yüzde uzama miktarı dikkate alındığında $67,5\ \mu\text{m}$ yana kayma değerinin her üç oryantasyonda (0° , 45° ve 90°) en iyi uzama değerini verdiği görülmüştür. Gerilme değerlerindeki değişim dikkate alındığında ise artan yana kayma miktarı ile çekme gerilmesi değerinin azaldığı ancak en iyi uzama miktarının elde edildiği $67,5\ \mu\text{m}$ değerine kadar dikkate değer bir kayıp olmaksızın her üç oryantasyonda da geleneksel yöntemlerden elde edilen referans Ti-6Al-4V ELI alaşımın yüzde uzama değerine olabildiğince yakın durum sergilediği görülmüştür. Gerilme değerleri açısından metal eklemeli imalat sürecinin doğasından gelen aşırı soğuma nedeni ile oluşan martenzitik mikroyapıdan dolayı geleneksel yöntemlerle üretilen parçalardan daha yüksek dayanım değerleri sunduğu bilinmektedir. En iyi uzama miktarının elde edildiği yana kayma değeri altındaki değerlerde uzama değerinin oldukça düşük kaldığı görülmektedir. Bu durum aşırı enerji girdisi ile yapıda oluşan gaz boşlukları ve özellikle kolonsal mikroyapıdan kaynaklanmaktadır. Mikroyapı ve çekme grafikleri birlikte değerlendirildiğinde mekanik davranışa ait değerlerin özellikle düşük yana kayma miktarlarında yetersiz kaldığı görülmektedir. Üretim oryantasyonu olarak ifade edilen ve üretim tablası ile ürün arasındaki açının dik olduğu 90° 'lik üretim oryantasyonu ile 100 W lazer gücü ve 1400 mm/s ilerleme hızında değişken yana kayma değerleri ile üretilen standart çekme numunelerine ait çekme deneyleri sonuçları Şekil 40'ta verilmiştir. Yana kayma miktarının artışı $67,5\ \mu\text{m}$ değerine kadar uzama miktarını arttırmış ve bu değer sonrası uzama değeri giderek azalmıştır. Çekme dayanımı açısından incelendiğinde ise yana kayma miktarındaki artışın gerilme açısından düşüşe neden olduğu ve $67,5\ \mu\text{m}$ değerinde bu azalma ve uzama değerlerinin kabul edilebilir bir birliktelik ile yeterli uzama ve gerilme değerini sunduğu görülmektedir. Seçilen parametre, ticari Ti-6Al-4V ELI alaşımının sunduğu $\% 12,55 \pm 0,44$ uzama değerini sağlayamamakla birlikte, ticari alaşımın sahip olduğu $960 \pm 30\ \text{MPa}$ gerilme değerinin üzerinde dayanım değerlerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 40. Yana kayma miktarına bağlı olarak Gerilme ve Yüzde uzama değerlerinin değişimi (a: 0°, b: 45°, c: 90°)

100 W lazer gücü ve 1400 mm/s ilerleme hızında farklı yana kayma değerleri ile üretilen ve geleneksel yöntemlerle üretilmiş hali hazırda ticari olarak kullanılan Ti-6Al-4V ELI

alaşımına ait çekme eğrileri Şekil 41’de verilmiştir. Çekme deneyleri her bir yana kayma değeri için 3 farklı numuneden elde edilen değerler ile sağlanmıştır. Artan yana kayma değerinin seçilen 67,5 μm ’ye kadar gerilmede dikkate değer bir azalma olmaksızın yüzde uzama değerini yaklaşık % 3,5 değerinden % 9 değerine taşıması ve bu kazanımın SLE ile üretilen parçaların üretildiği hali ile elde edilmesi, uygulanan lazer gücü ve tarama hızının oldukça iyi sonuç verdiğini göstermekte ve kafes sistemlerinin üretimi için bu parametrelerin kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.



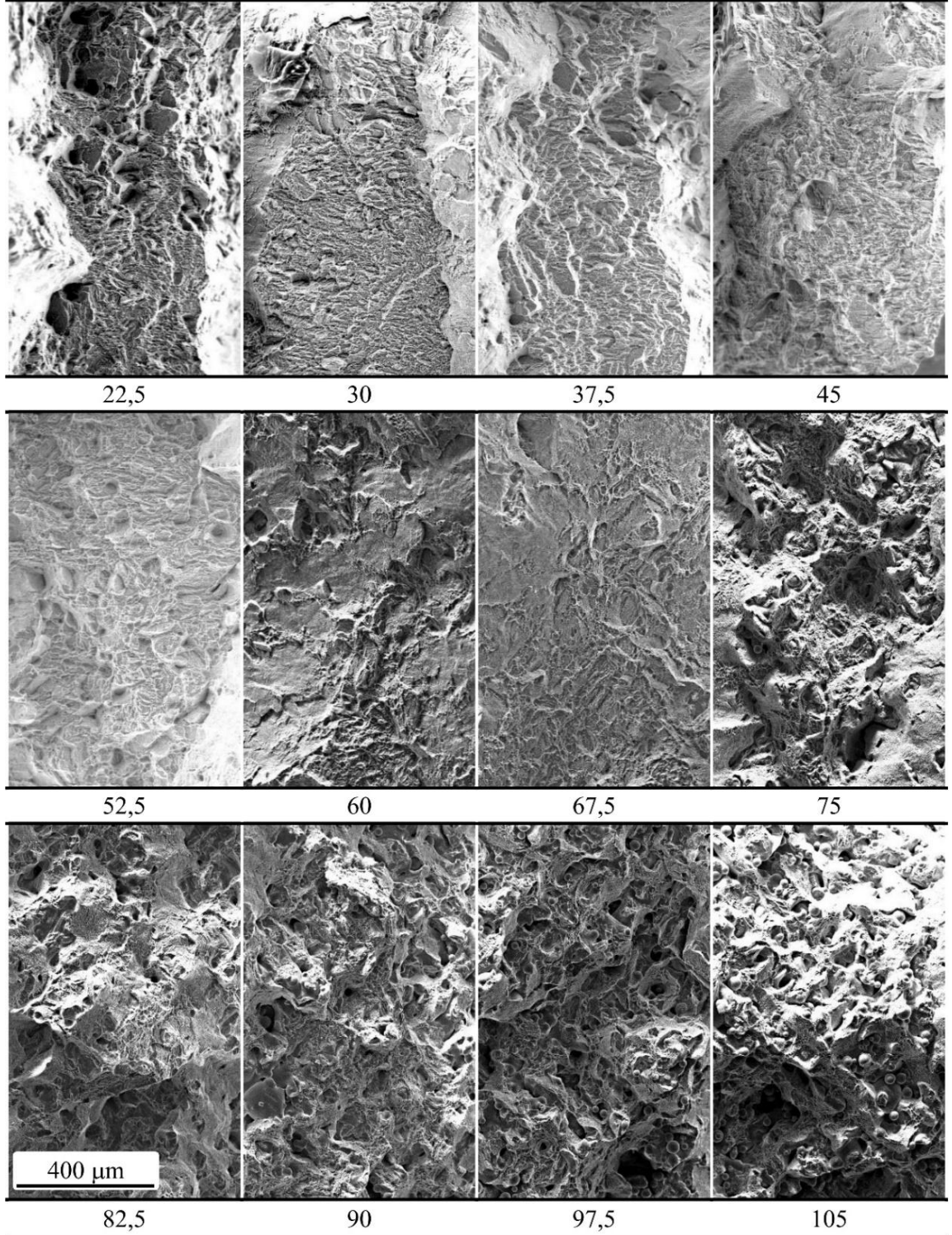
Şekil 41. 100 W lazer gücü ve 1400 mm/s ilerleme hızında farklı yana kayma değerleri ile elde edilen çekme numunelerine ait mekanik özelliklerin değişimi grafiği

Kırılma yüzeylerine ait irdelemeler

Farklı yana kayma değerleri ile elde edilen numunelerin kırılma yüzey görüntüleri Şekil 42’de verilmiştir. Maksimum uzama değerinin elde edildiği 67,5 μm yana kayma değerine kadar kırılma yüzeylerinde yapı kusurlarının nispeten azlığı ve kırılma karakteri olarak sünek kırılmanın gerçekleştiği görülmektedir. Artan yana kayma miktarı ile 67,5 μm üzerindeki değerlerde kırılma yüzeyleri birbirleri ile temas edemeyen lazer izleri neticesinde yetersiz ergime ve birleşmeyen lazer izleri ile biçimsiz gözenekli kırılma yüzeyleri sergilemişlerdir. En iyi uzamanın elde edildiği 100 W lazer gücü, 25 μm katman kalınlığı, 1400 mm/s tarama hızı ve 67,5 μm ’lik yana kayma değeri üretim parametreleri sonucu uygulanan üretim parametrelerinde bu yana kayma yaklaşık, % 35 lik bir bindirme miktarına karşılık gelmektedir.

Eriyik havuzuna ait incelemeler bir bütün olarak dikkate alındığında mekanik özellikler açısından oldukça etkili olan doluk oranının % 99.95 seviyelerinde olduğu yana kayma miktarı ile yüzde uzama ve kırılma yüzeyleri dikkate alındığında 67,5 μm yana kayma değerinin en iyi davranışı sergilediği görülmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda, kullanılan toz

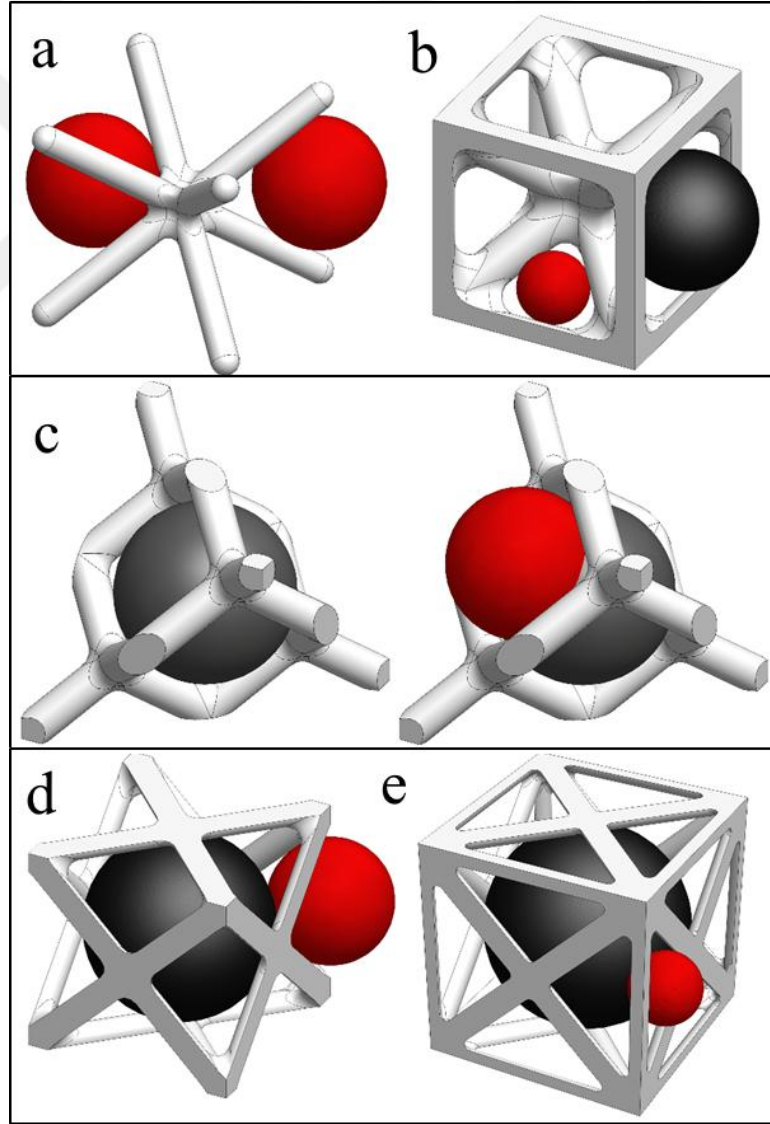
formundaki malzemenin 25 μm katman kalınlığında, 100 W lazer gücü ile kullanılan cihazın nihai gücü ve buna bağılı olarak belirlenen 1400 mm/s tarama hızı ile üretim parametreleri belirlenmiştir. Buna göre uygulanan enerji yoğunluğu 42,328 J/mm³ olarak belirlenmiş ve kafes sistemlerinin üretiminde kullanılacak üretim parametresi olarak belirtilen değerler seçilmiştir.



Şekil 42. Farklı yana kayma değerleri (22,5 – 105 μm) ile elde edilen kırılma yüzey görüntüleri

Kafes Sistemlerine Ait Porozite ve Gözenek Boyutunun Hesaplanması

Tasarım parametreleri olan çubuk çapı ve birim kafes kenar uzunluğu ile elde edilecek gözenek boyutunun belirlenmesi Şekil 43'de gösterildiği üzere kafes sistemleri içerisine yerleştirilebilecek boşluklardaki gözeneklerin çizimi ile elde edilmiştir. BCC kafes sistemi topolojisi gereği iki farklı boşluk bölgesinde tek bir gözenek boyutu sergilemiş ve bu gözeneklerin kafes sistemindeki yerleşimi Şekil 43 a'da gösterilmiştir. BCCZ sistemi, ilave XYZ çubukları ile BCC sisteminden farklılaşmış ve iki farklı gözenek boyutu sergileme davranışı kazanmıştır. BCCZ sistemine ait gözenek yerleşimi Şekil 43 b'de ifade edilmiştir. Şekil 43 c ve d ile gösterilen yerleşimler iki farklı gözenek büyüklüğüne sahip ELMAS kafes sistemine ait gözeneklerin kafes sistemi içerisindeki konumlarını ifade etmektedir. FCC ve FCCZ sistemleri içerisindeki gözeneklerin kafes sistemleri içerisindeki yerleşimler Şekil 43 e'de ve f'de sırası ile verilmiştir.



Şekil 43. Kafes sistemlerinde gözenek konumları a) BCC, b) BCCZ, c) ELMAS, d) FCC, e) FCCZ

Kafes sistemlerine ait gözenek boyutları ve bunlara bağlı olarak belirlenen basma numunelerine ait bilgiler Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Kafes sistemlerine ait gözenek ve numune boyutları

	Porozite (%)	Ortalama Gözenek Boyutu (mm)	Birim Hücre Kenar Uzunluğu (mm)	Kesitteki Birim Kafes Sayısı (Adet)	Basma Numunesi Kesit Alanı (mm ²)	Deformasyon Hızı (mm/s)
BCC	60	0,82	1,61	7	138,5	0,01177
	75	1,22	2,11	6	173,2	0,01316
	90	2,32	3,45	7	607,7	0,02465
BCCZ	60	0,84	2,00	5	110,3	0,01050
	75	1,23	2,6	5	182,3	0,01350
	90	2,31	4,22	6	666,7	0,02582
ELMAS	60	0,73	1,61	7	138,5	0,01177
	75	1,19	2,22	5,5	161,5	0,01271
	90	2,21	3,56	6,5	558,9	0,02364
FCC	60	1,08	1,85	6	134,6	0,01160
	75	1,55	2,40	7	299,3	0,01730
	90	2,83	3,90	8	1004,9	0,03170
FCCZ	60	0,60	2,11	5	122,1	0,01105
	75	1,51	2,83	6	305,6	0,01748
	90	2,72	4,55	6	772,8	0,02789

Kafes Sistemlerine Ait Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

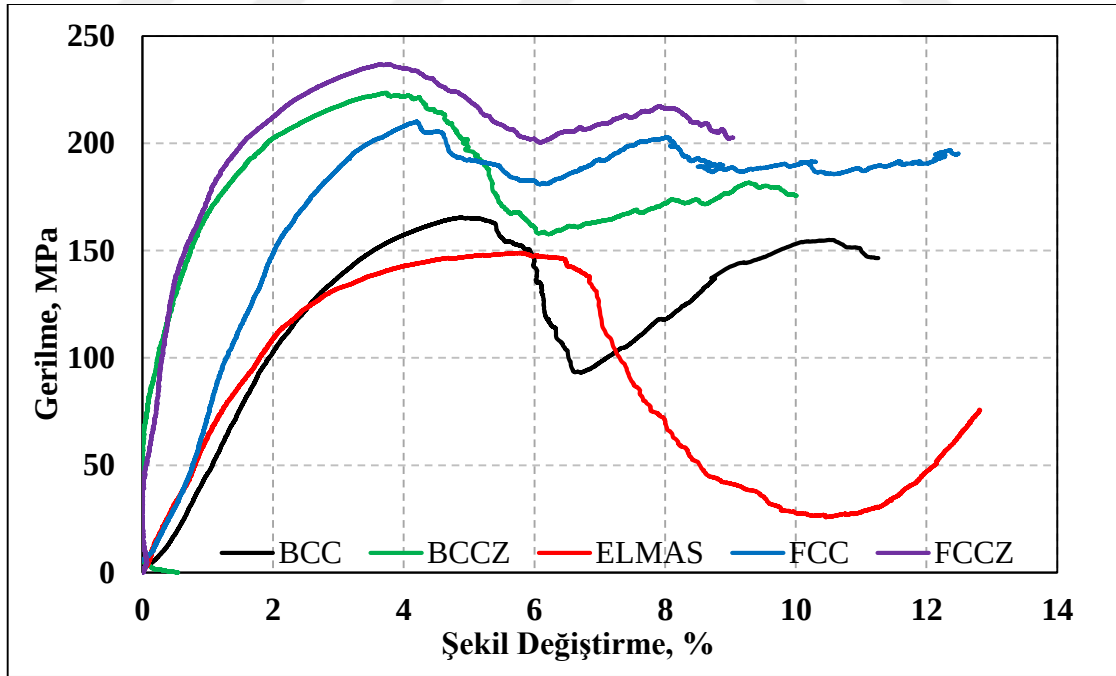
Kafes sistemleri sundukları yüksek özgül mukavemetleri, kontrol edilebilir mekanik özellikleri ve periyodik yapıları ile izotropik malzeme davranışı sergilemeleri gibi nedenlerden ötürü dikkat çeken yapılardır. Geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmelerindeki zorluk, bu yapıların üretimini sınırlandırmakta iken günümüzde alışılmamış üretim yöntemleri ve özellikle eklemeli imalat ile üretilmeleri bu yapıların kullanımının önünü açmaktadır. Tasarım aşamasında periyodik özelliklerinden faydalanılarak karmaşık özgün formlu hacimlerin içerisini doldurabilme ve kişiye özgü tekil tasarımlara kolayca uyarlanabilmeleri ile biyomekanik ve implant tasarımlarında sıklıkla tercih edilir olmakta ve uygulama alanı bulmaktadırlar. Tasarlanan ve üretimi gerçekleştirilen modellerin teorik olarak hesaplanan modeller ile karşılaştırılmaları amacı ile bu yapılara ait statik basma davranışları irdelenmiştir. Bu amaç ile poroz yapılara ait mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan ISO 13314 standardı uyarınca hazırlanan ve boyutlandırılan beş farklı kafes topolojisine ve üç farklı poroziteye sahip numunelere ait basma test sonuçları Şekil 44, 46 ve 48’de sunulmuştur.

Yuan *et al.* (2019), implant uygulamalarında kemik morfolojisine benzerlikleri dolayısı ile kafes sistemlerinin kullanımının, kemik gelişimi için biyolojik hareketliliğe katılmaları ve

mekanik özelliklerin kullanılan bölgeye göre uyarlanabilmeleri nedeniyle uygun olduğunu belirtmişlerdir. İmplant uygulamalarında, kemik için gereken porozite değerinin en az % 60 mertebesinde olması gerekliliği ve kemik içerisindeki mikro ve makro porozitenin varlığının kemik gelişimini olumlu etkilediği bilinmektedir. Bu sebeple minimum porozite değeri % 60 olmak üzere, % 75 ve % 90 porozite değerlerinde de üretim yapılmıştır.

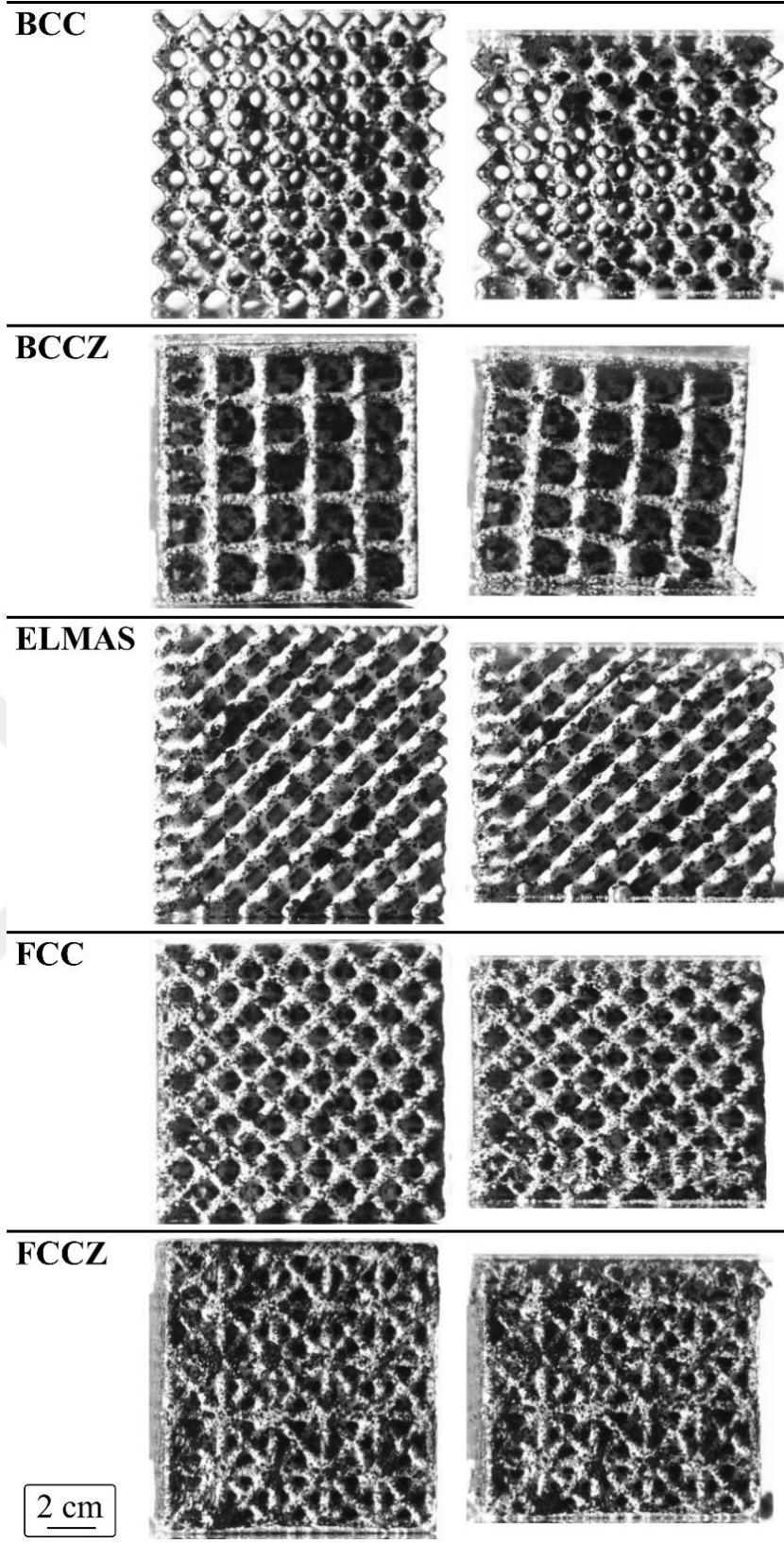
Yüzde 60, 75 ve 90 porozite değerlerinde artan poroziteye bağlı olarak kesit alanındaki yük taşıyan kesitlerin azalması, tüm kafes sitemlerinin basma dayanımında düşüşe neden olmuştur. Kafes sistemlerine ait bir özellik olan ve maksimum basma dayanımı sonrası artan deformasyon ile bir plato bölgesi ve sonrasındaki gerilme değerinin artması şeklinde tanımlanabilen yoğunlaşma davranışının, artan porozite ile kaybedildiği görülmüştür. FCCZ kafes sistemi, bu davranışı % 75 porozitede de sürdürmüş ancak bir üst porozite davranışında bu durum ortadan kalkmıştır.

BCC ve ELMAS kafes sitemleri $35,26^\circ$ ile aynı oryantasyondaki çubuk elemanlara sahip olması ile nispeten benzer davranışlar sergilemiş ve diğer kafes sistemlerinden daha düşük dayanım değerleri sunmuşlardır. XYZ çubuklarının ilave edildiği BCC ve FCC kafeslerinin yük taşıma kabiliyetlerinin arttığı ve BCC kafes sisteminin bu etkiye daha duyarlı olduğu görülmüştür.

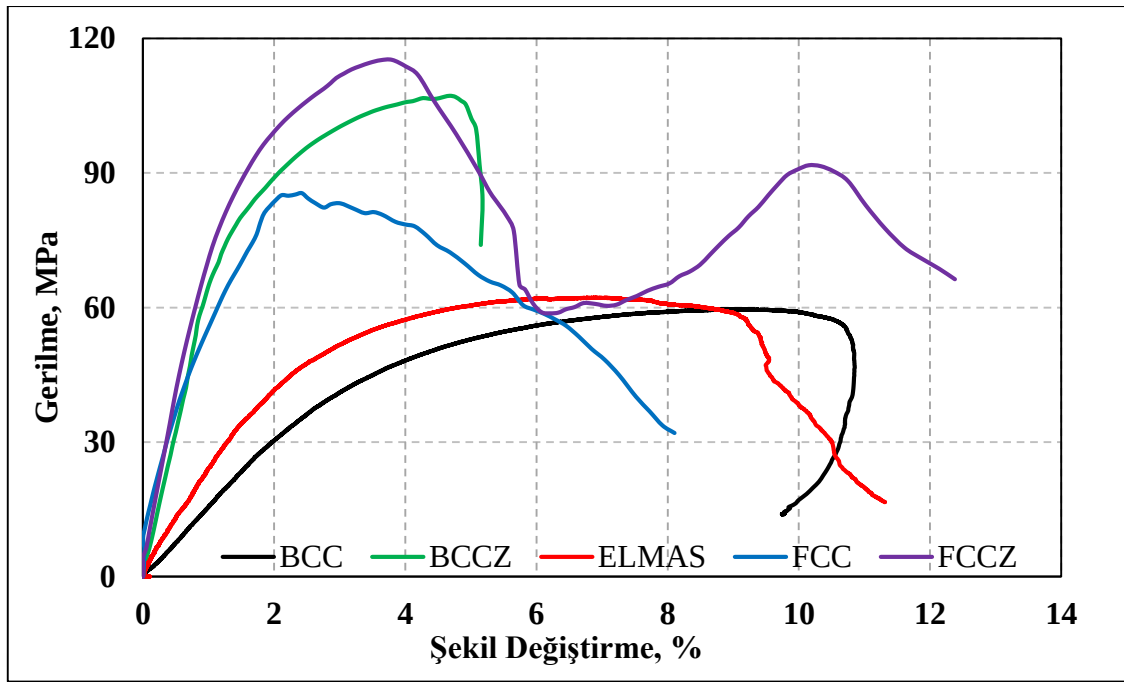


Şekil 44. % 60 poroziteye sahip kafes sistemlerinin basma test sonuçları

Şekil 45, % 60 doluluk oranına sahip kafes sitemlerinin basma deneyleri sonucunda hasar ve deney öncesi başlangıç durumlarını göstermektedir. Bu porozite değeri için BCC, BCCZ ve ELMAS kafeslerinin kayma kırılması hasarına, FCC ve FCCZ kafeslerinin ise katman katman çökme durumu ile hasara uğradıkları görülmektedir.



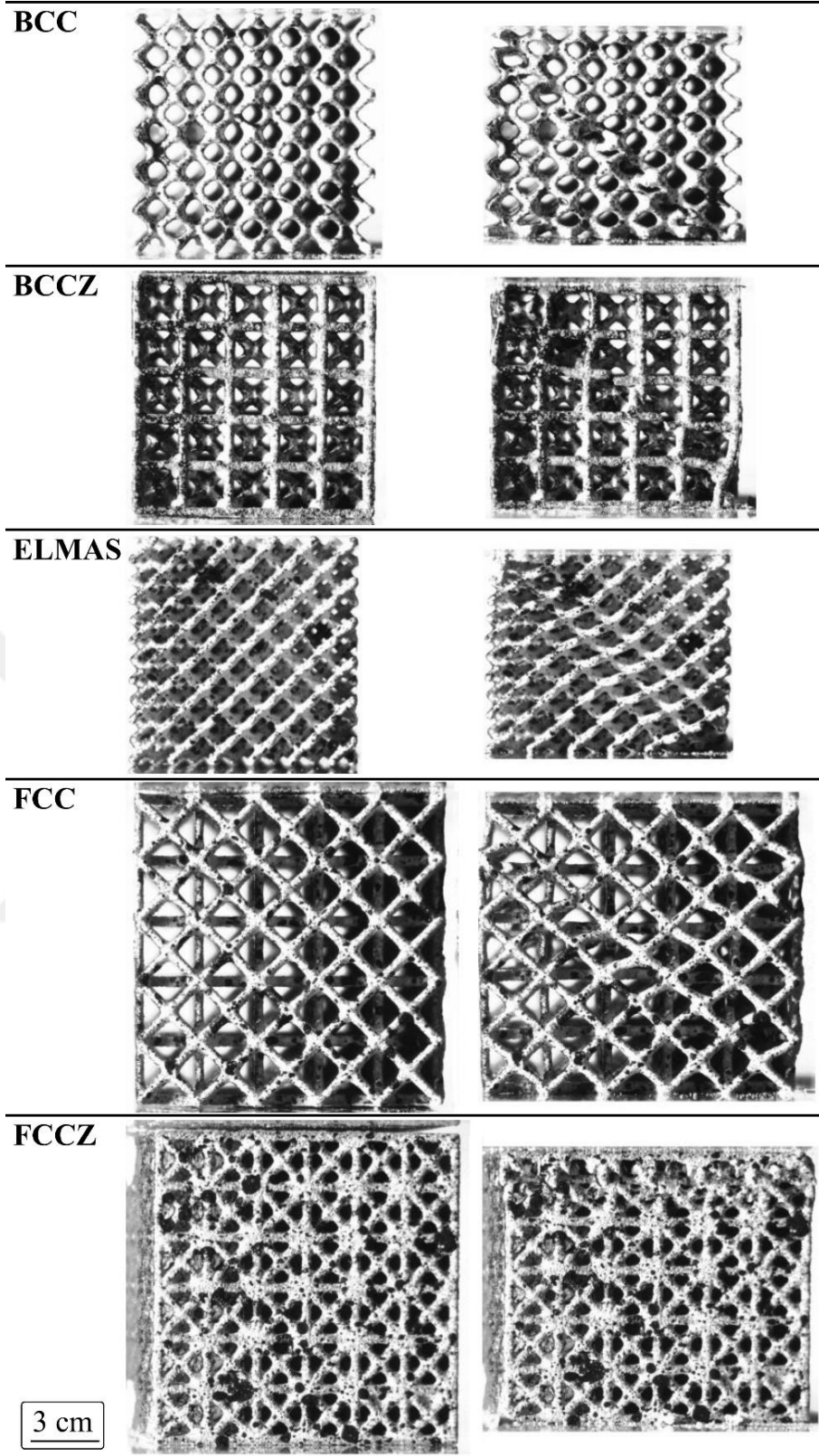
Şekil 45. % 60 doluluk oranına sahip kafes sistemlerinin basma deneyi öncesi ve deformasyon sonrasına ait gösterimler



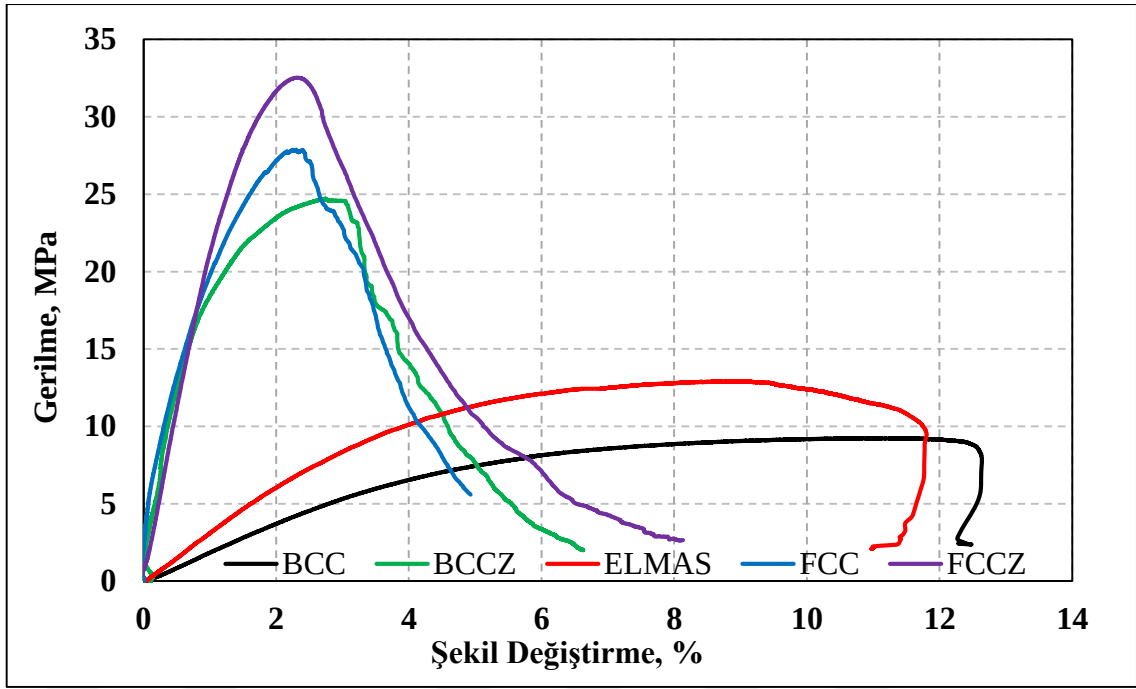
Şekil 46. % 75 poroziteye sahip kafes sistemlerinin basma test sonuçları

Yüzde 75 porozite değerinde BCC ve ELMAS sistemlerinin diğer sistemlerden daha düşük rijitlik sergiledikleri, deformasyon sertleşmesi bakımından benzer karakterde oldukları gözlemlenmiştir. FCC ve BCC kafes sistemine eklenen ilave XYZ çubukları ile dayanım beklenildiği üzere artmıştır. Şekil 47 incelendiğinde FCCZ kafeslerinin katman katman çökme davranışı ile hasara uğradıkları görülürken diğer kafeslerin kayma kırılması hasarı ile deforme oldukları tespit edilmiştir. Katman katman çökme hasarının bir sonucu olarak FCCZ sistemi artan deformasyon ile zarar görmeyen katmanların uygulanan deformasyona karşı direnç göstermeye devam ettiği ve kısa bir plato bölgesi sonrası yoğunlaşma davranışına girdiği belirlenmiştir.

ELMAS kafes sisteminde BCC'den farklı olarak kayma hattının bir bant şeklinde olduğu ve deformasyona bu bant bölgesinde uğradığı görülmektedir.

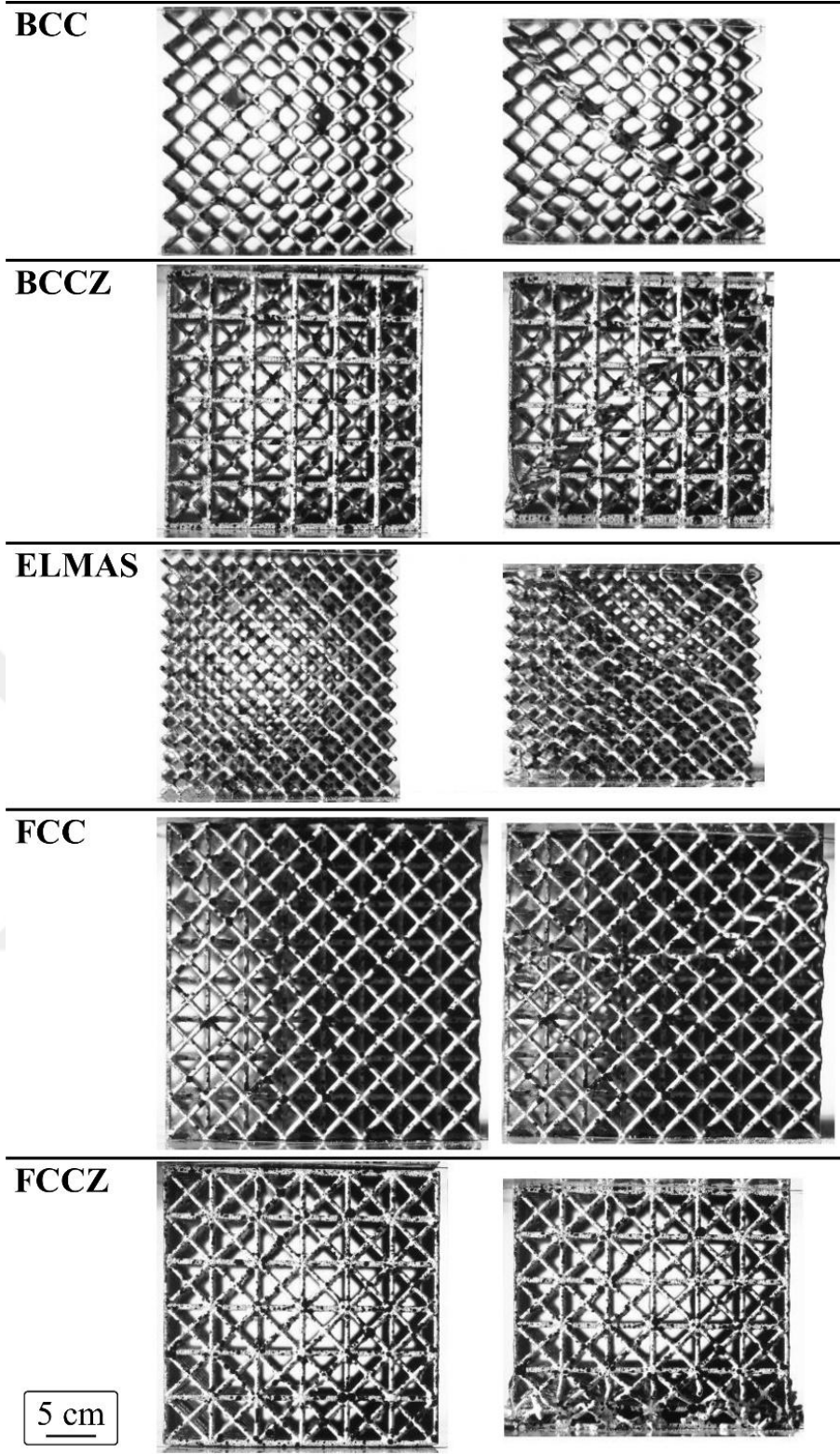


Şekil 47. % 75 doluluk oranına sahip kafes sistemlerinin basma deneyi öncesi ve deformasyon sonrasına ait gösterimleri

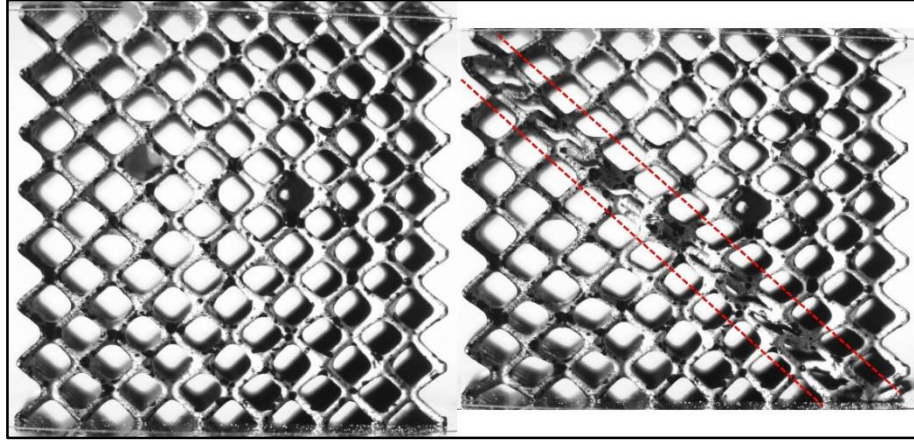


Şekil 48. % 90 poroziteye sahip kafes sistemlerinin basma test sonuçları

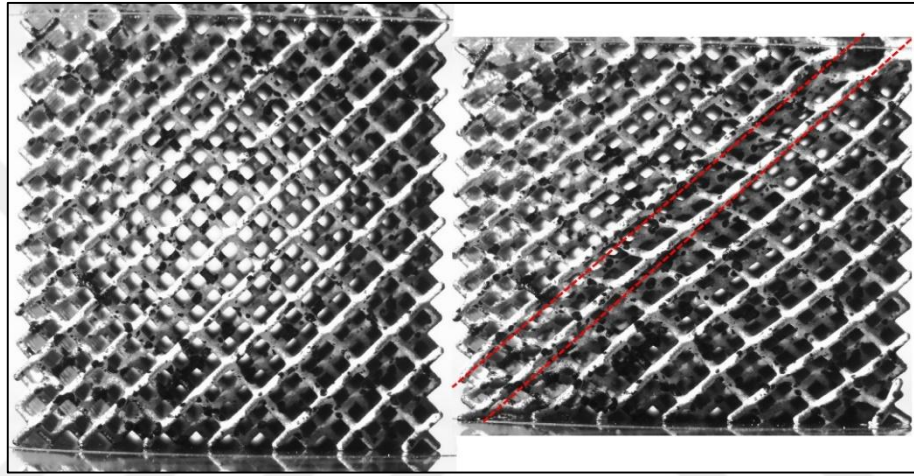
Yüzde 90 porozite değerinde BCC ve ELMAS kafes sistemlerinin basma davranışından da görüldüğü üzere diğer kafes sistemlerinden daha ileri deformasyon oranlarında homojen deformasyona uğradığı görülmektedir. Bu iki kafes sistemi kayma kırılması ile hasara uğramaktadır. Şekil 50 ve 51 sırası ile bu iki kafes sisteminin hasar görüntülerini ve kayma kırılması hattını içermektedir. Basma eksenini ile 45° açı yaparak kırılma hattının oluştuğu ve kafes sisteminin deforme olduğu görülmektedir.



Şekil 49. % 90 doluluk oranına sahip kafes sistemlerinin basma deneyi öncesi ve deformasyon sonrasına ait gösterimleri



Şekil 50. % 90 porozite ile üretilmiş BCC kafes sistemine ait hasar mekanizması

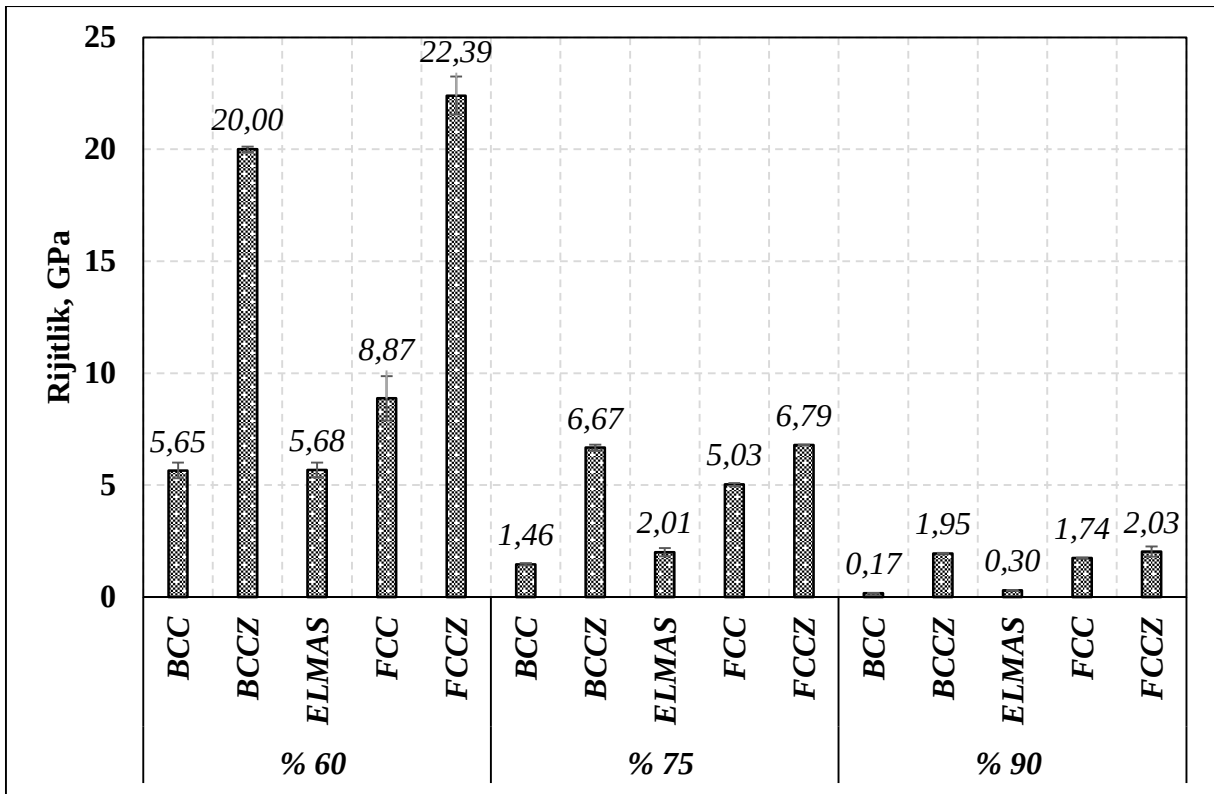


Şekil 51. % 90 porozite ile üretilmiş ELMAS kafes sistemine ait hasar mekanizması

FCC kafes sistemine ait hasar gören numuneler incelendiğinde tek bir kırılma düzleminden farklı olarak birden çok kırılma düzlemi ile deforma olduğu ve hasara uğradığı görülmektedir.

XYZ çubukları ilave edilerek değiştirilen topolojilere ait hasar durumu incelendiğinde BCCZ kafes sisteminde hasar, BCC sistemine benzer şekilde kayma kırılması sonucu oluşurken, her 3 porozite değerinde de FCCZ için katman katman çökme şeklinde gerçekleşerek, FCC sisteminden farklılaştığı görülmüştür.

Şekil 46, Şekil 48, Şekil 50 ve Şekil 52 birlikte incelendiğinde artan porozite ile kafes sistemine ait rijitlik değerinin azalma eğiliminde olduğu, seçilen kafes sistemleri dikkate alındığında XYZ çubukları içeren FCCZ ve BCCZ her üç porozite değerinde sırası ile en yüksek iki rijitlik değerini sunduğu görülmektedir.

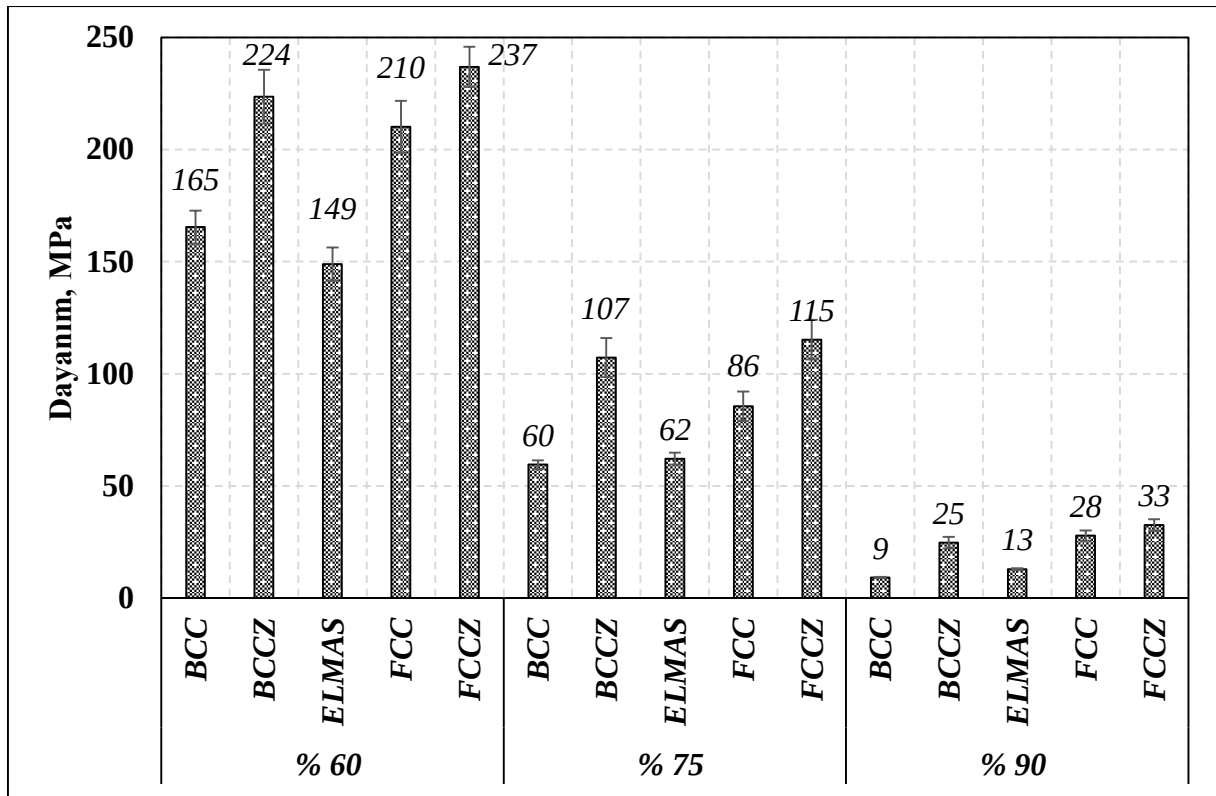


Şekil 52. Kafes sistemlerine ait rijitlik değerini porozite ile değişimi

Her üç porozite değerinden görüldüğü üzere rijitlik davranışı BCC ve FCC kafeslerinin topolojik modifikasyonundan oldukça etkilendiği ve rijitlik değerlerinin arttığı görülmüştür. BCC sistemi bu etki için tüm porozite değerlerinde FCC sisteminden daha duyarlı davranırken FCC sisteminin artan porozite ile bu duruma karşı duyarlılığından ödün verdiği görülmüştür. ELMAS kafes sistemi her üç porozite değerinde de BCC sistemine benzer değerler sergilemiş ve bu iki kafes sistemi FCC kafes sisteminden rijitlik bakımından daha düşük değerler sunmuşlardır.

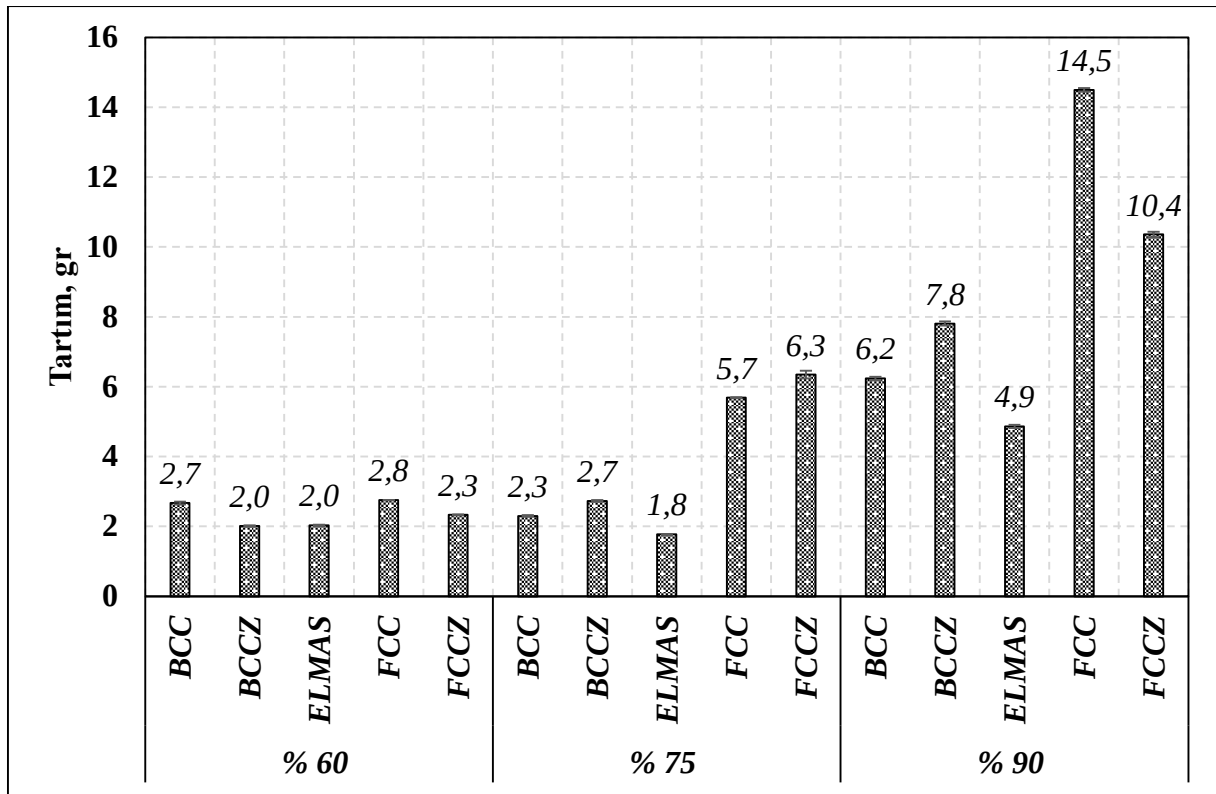
Rijitlik açısından incelendiğinde, süngerimsi kemik dokuların sahip oldukları en düşük rijitlik değerine % 90 porozite değerindeki BCC ve ELMAS yapıların yakınsadığı ve sırası ile $0,2 \pm 0,034$ ve $0,3 \pm 0,011$ GPa mertebelerinde olduğu görülmüştür.

Dayanım davranışlarının poroziteye göre değişimi Şekil 53'te verilmiştir. Topolojiye ilave edilen XYZ çubukları ile BCCZ ve FCCZ kafes sistemleri her üç porozite seviyesinde de rijitlik davranışında olduğu gibi, basma dayanımı açısından da en yüksek iki değeri sunmuşlardır. BCC kafes sistemi, artan porozite değerlerinde bu modifikasyon ile sırasıyla % 35, 80 ve 167 artış gösterirken bu davranış FCC sisteminde daha düşük değerler sunmuştur. FCC kafesi aynı porozite değerlerindeki modifikasyona sırası ile % 12, 34 ve 16'lık artışlar ile reaksiyon vermiştir.



Şekil 53. Kafes sistemlerine ait basma dayanımı değerlerinin porozite ile değişimi

Üretilen kafes sistemlerinin tartımı ile elde edilen kütle değerleri Şekil 54'te verilmiş olup, deneylerden elde edilen basma dayanımlarının kütle değerlerine oranlaması sonucu aynı porozite değerindeki topolojik performansın karşılaştırılması söz konusu olacaktır. Bu durumda ELMAS kafes topolojisinin, BCC ve FCC topolojilerine kıyasla daha üstün özellikler sergilediği görülmektedir. Bu etki % 60 porozite değeri için çok belirgin olarak ortaya çıkmazken artan porozite değerlerinde etkisini göstermiştir



Şekil 54. Kafes sistemlerine ait kütle değerlerinin porozite ile değişimi

XYZ çubuk ilavesine sahip BCCZ ve FCCZ sistemlerinin, her üç porozite değeri için rijitliğin kütleye oranı dikkate alındığında iyi performans sergiledikleri görülmüştür. BCC sistemine, ilave edilen XYZ çubukları ilavesi artan porozite ile daha ciddi rijitlik/kütle artışı sergilediği göze çapmaktadır (% 222, 346, 850). FCC sistemi ise artan porozite ile bu çubukların kattığı kazanım oranını düşürdüğü görülmüştür (% 151, 36, 17). ELMAS kafes sisteminin her üç porozitede BCC sisteminden daha performanslı olduğu ve % 60 porozitede FCC sisteminin gerisinde olmasına karşın FCC sisteminin artan porozite ile değer kaybetmesi ile ELMAS sisteminin FCC yapısının da önüne geçtiği belirlenmiştir.

Rijitlik kazanımı açısından XYZ çubukları modifiye ettikleri BCC ve FCC kafesleri için kazanım olmakla birlikte dayanım değerleri incelendiğinde bu durum bir miktar değişmektedir.

Rijitlik açısından düşük porozitelerde XYZ çubuğu daha etkili olup, BCC kafes sistemi bu duruma daha duyarlıdır.

Sonlu Elemanlar Analizi ile Kafes Sistemlerine Ait Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Bu kısımda Materyal ve Metot bölümünde tanımlanan modellerin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Üretim ve sonlu elemanlar modellerinde aynı .STL dosyası kullanılarak her iki süreçte olabilecek model farklılıklarının önüne geçilmesi hedeflenmiştir. ANSYS Workbench yazılımında gerçekleştirilen analizler ile uygulanan deplasman sonucu elde edilen reaksiyon kuvveti deneysel olarak elde edilen basma kuvveti ile karşılaştırılmıştır.

Sonlu elemanlar analizi çalışmalarından, her bir kafes sisteminin 3 farklı porozite değeri için elde edilen reaksiyon kuvvetleri Tablo 9’da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, deneysel çalışma ve numerik çözümlerden elde edilen kuvvet değerleri arasındaki farkın oldukça küçük olduğu ve geneli incelendiğinde bu farklılık miktarının % 7,7 değerini aşmadığı görülmüştür.

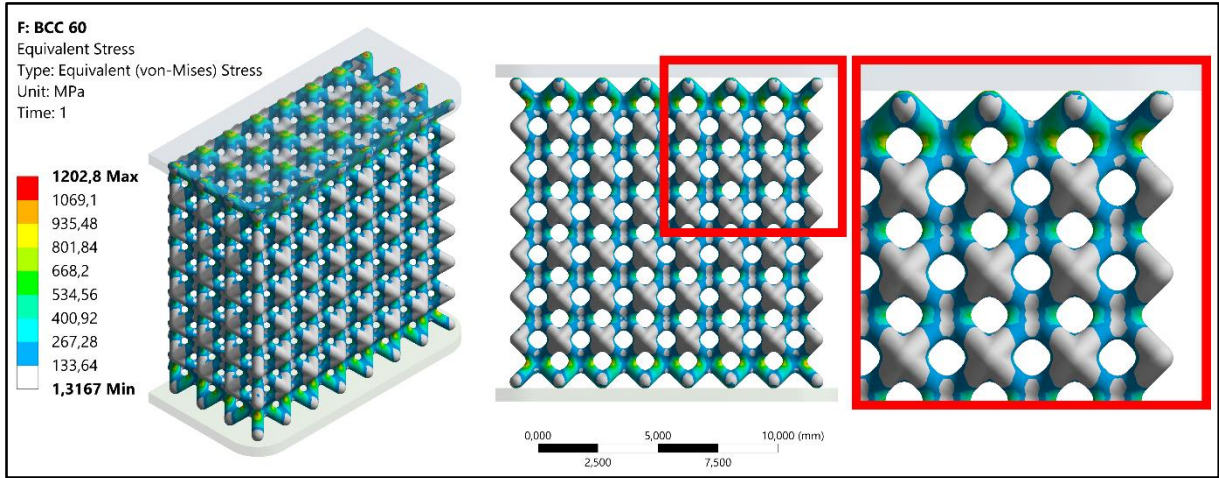
Sonlu elemanlar analizleri her bir kafes sistemi için % 1 deformasyon oranına kadar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen gerilme değerleri ve kafes sistemlerindeki gerilme dağılımları aşağıda sunulmuştur.

Tablo 9. Numerik çözümler ile elde edilen reaksiyon kuvvetleri ve model özellikleri

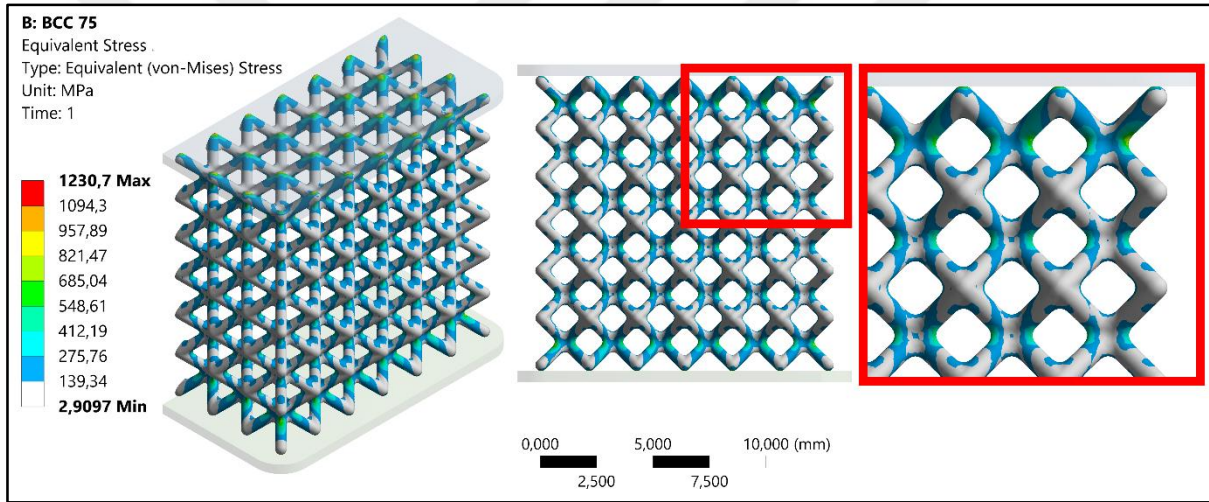
	Porozite	Deplasman	Reaksiyon Kuvveti	Deneysel Kuvvet	Hata	Eleman Sayıları		Mesh Metrik	
		(mm)	(N)	(N)	(%)	Düğüm	Eleman	Skewness	Element Quality
BCC	60	0,1177	5570	5600	0,5	1377161	824078	0,256	0,809
	75	0,1316	2760	2890	4,5	1231263	702095	0,238	0,835
	90	0,2465	1202	1248	3,7	1116840	564916	0,247	0,845
BCCZ	60	0,1050	10660	10920	2,4	1220031	708239	0,252	0,818
	75	0,1350	8280	8876	6,7	1426334	823050	0,244	0,830
	90	0,2582	9040	8480	6,2	1523244	724057	0,249	0,839
ELMAS	60	0,1177	6760	7110	4,9	1382127	800229	0,240	0,831
	75	0,1271	2600	2680	3,0	979830	544412	0,229	0,853
	90	0,2364	1754	1733	1,2	958768	425320	0,203	0,866
FCC	60	0,1160	13420	12780	4,8	1355714	809509	0,241	0,823
	75	0,1730	12960	13950	7,1	892453	474936	0,243	0,828
	90	0,3170	11220	11480	2,3	2142084	1087152	0,246	0,849
FCCZ	60	0,1105	14990	14340	4,3	1217141	727302	0,236	0,827
	75	0,1748	20458	21540	5,0	2404699	1434645	0,267	0,806
	90	0,2780	15086	16340	7,7	1097297	519887	0,291	0,779

BCC kafes sistemine ait gerilme dağılımını gösteren numerik analiz görselleri her bir porozite değeri için sırası ile Şekil 55, 56 ve 57’de verilmiştir. BCC kafes sistemine ait gerilme dağılımı incelendiğinde, artan porozite ile deformasyonun basma plakalarına yakın kafes katmanında nispeten daha yoğun gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum basma deneyleri esnasında da gözlemlenmiş ve kafes sisteminin plakalar ile temas eden katmanların çökmesine kadar iç kısımlarda gözle görülür deformasyonun olmadığı, plakalar ile temas eden katmanların deforme olması sonrası yapının iç kısımlarında deformasyonun olduğu belirlenmiştir. Basma deneyleri esnasında BCC 60 ve BCC 75 sistemlerindeki bu davranışa ait görselleri içeren Şekil

44 ve 46 ile numerik çözümlerden elde edilen gerilme dağılımı durumları (Şekil 55, 56) birlikte incelendiğinde bu anlamda bir deformasyon uyumu olduğu görülmüştür.

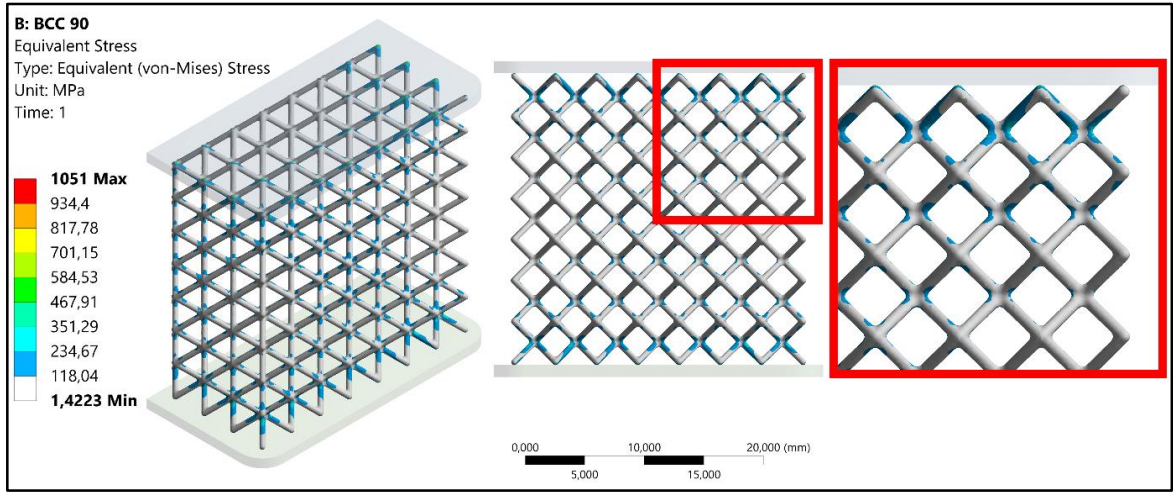


Şekil 55. BCC 60 kafes sistemine ait gerilme dağılımı



Şekil 56. BCC 75 kafes sistemine ait gerilme dağılımı

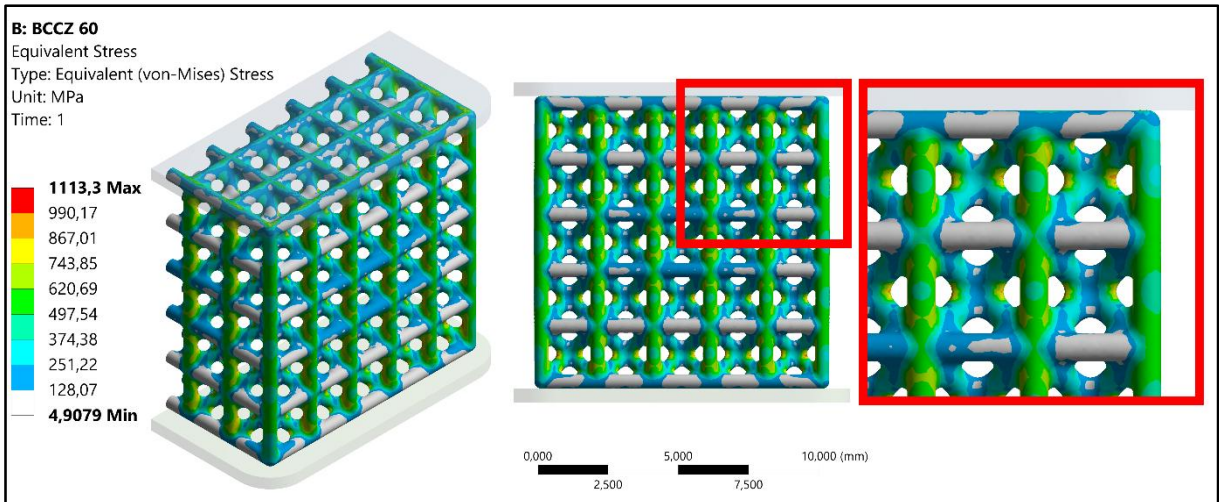
Yüzde 90 porozite için davranış, % 60 ve 75 poroziteye sahip kafes sistemlerinden bir miktar değişmiş ve plakalar ile temasta olan kısımlarda gerçekleşen deformasyon miktarı bu kısımlarda hasarın yoğunlaşması ya da gerçekleşmesi olmaksızın kafes sisteminin geneline dağılarak deformasyon sonucu kayma kırılması ile deforme olduğu görülmüştür. Şekil 48 ve 57 bu durumu gösterir deneysel ve numerik analizlere ait görselleri içermekte olup her iki durumun örtüştüğü görülmektedir.



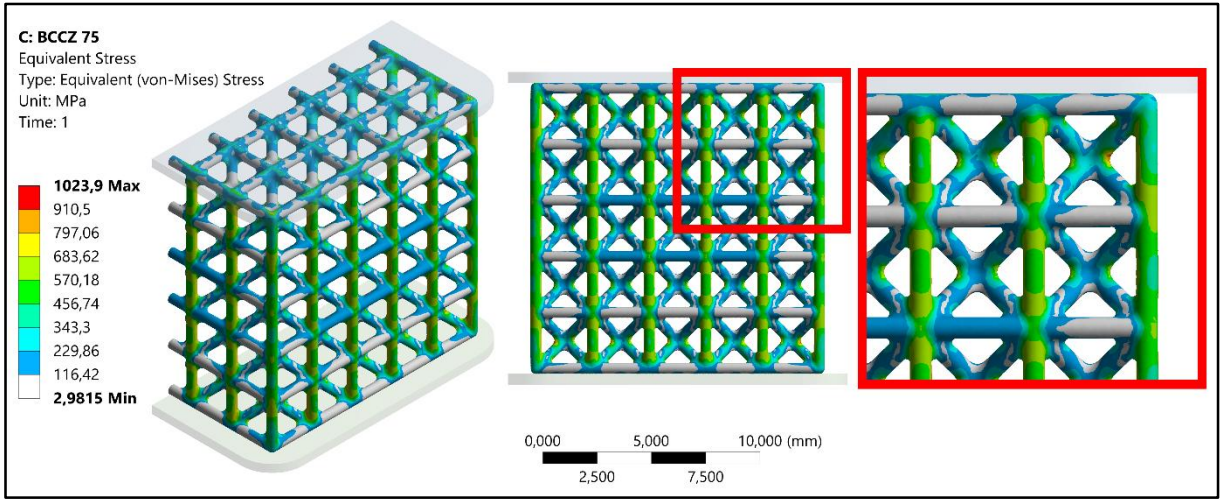
Şekil 57. BCC 90 kafes sistemine ait gerilme dağılımı

Porozite değerinin artırılmasının, çubuk çapı ve birleşme noktalarında küresel pah işlemine ait değerlerin sabit tutularak, birim kafes kenar boyutunun artımı ile elde edildiği dikkate alındığında, artan çubuk uzunluğu çubuk üzerindeki gerilmelerin çubukların birleşme noktasında yığılmasının bir miktar önüne geçerek deformasyonun kafes sistemine yayılması ve hasar mekanizmasının sadece basma plakalarına yakın olan kafes hattında meydana gelmesi durumunu değiştirmiş ve tüm yapının deforme olması ile daha iyi kırılma uzaması değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Bu durum, tüm porozite değerlerinde bütün numune hacminin deformasyona katıldığı ELMAS sistemi üzerinden ifade edilerek desteklenebilir.

Koordinat takımının üç eksenli doğrultusunda ilave edilen XYZ çubukları ile oluşturulan BCCZ kafes sistemine ait sonuçlar incelendiğinde ilave edilen XYZ çubukları ile yapının gerilme dağılımı durumunun değişerek basma plakaları ile temas eden kafesleri değil tüm kafes sisteminin deforme edilmesine olanak sağladığı görülmüştür. BCCZ sisteminin numerik analizlerine ait gerilme dağılımı sonuçlarını içeren görseller % 60, 75 ve 90 porozite için sırası ile Şekil 58, 59 ve 60'da verilmiştir.

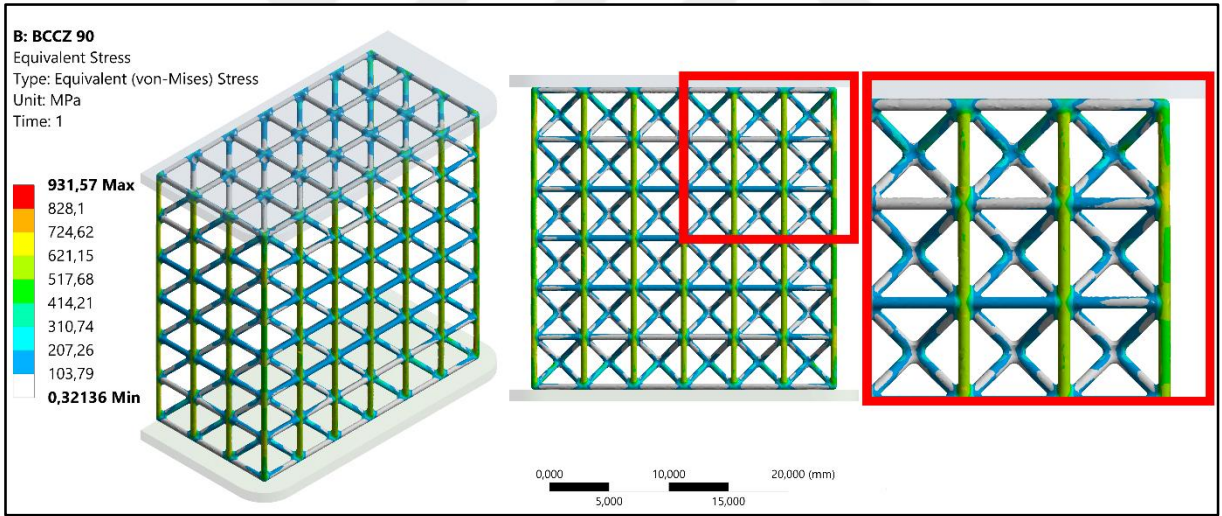


Şekil 58. BCCZ 60 kafes sistemine ait gerilme dağılımı



Şekil 59. BCCZ 75 kafes sistemine ait gerilme dağılımı

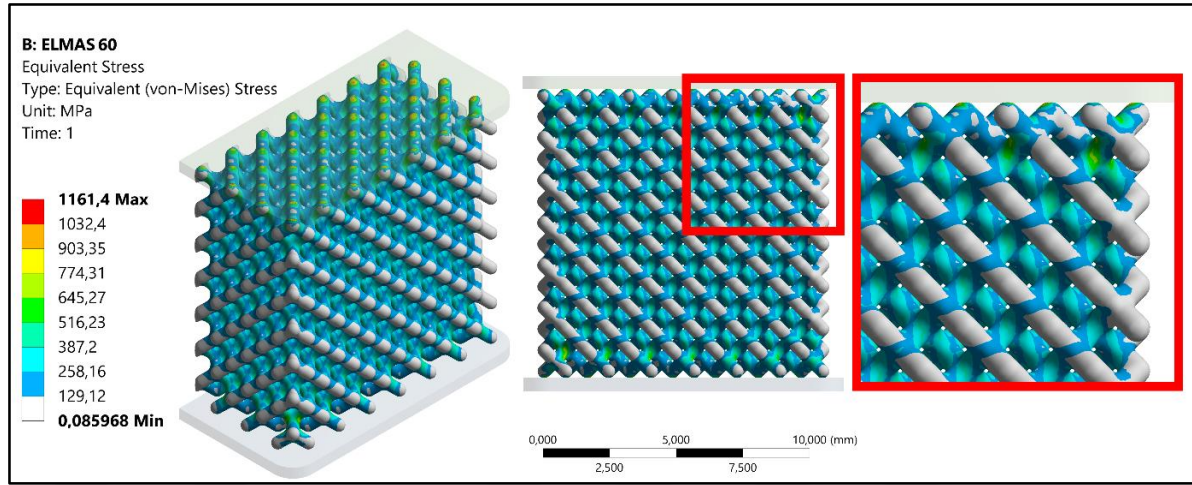
Elde edilen gerilme dağılımına bakıldığında, XYZ çubuklarının özellikle deformasyon doğrultusundaki elemanlar ile yük taşımına katkı sağladıkları ve diğer iki yöndeki elemanların neredeyse deforme olmadığı görülmüştür. Ayrıca basma testi esnasında karşılaşılan fiçilaşma benzeri davranış sonucu özellikle kafes merkezine yakın kısımlardaki yatay çubukların çekme gerilmesi etkisi altında kaldığı belirlenmiştir.



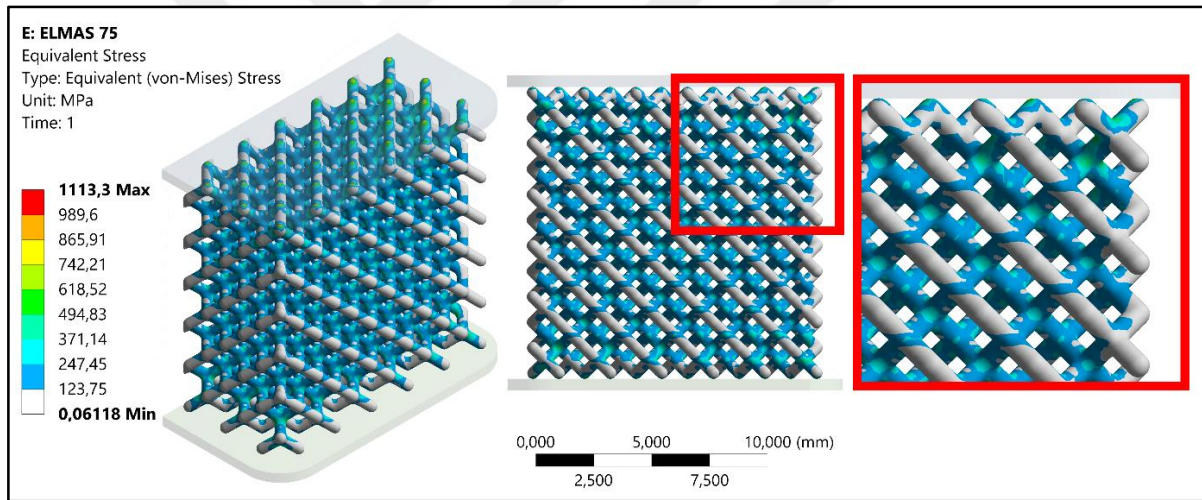
Şekil 60. BCCZ 90 kafes sistemine ait gerilme dağılımı

Deneyler esnasındaki görüntüler dikkate alındığında hasarın bu çubukların kopması ile başladığı ve yatay çubukların kopmasının kayma kırılması hasarını ortaya çıkardığı görülmüştür. Bu durum % 60 porozite değerine sahip kafes sisteminde farklılık göstermiş, BCCZ sisteminin, bu porozite değerinde BCC sistemine benzer şekilde katman katman çökme durumu sergilediği belirlenmiştir. Yatay çubuklar ise üzerlerinde taşıdıkları gerilme değeri kritik değere ulaşıncaya kadar kafes sistemini bir arada tutarak deformasyon doğrultusundaki çubukların yük taşıma kapasitesini iyileştirmiştir. Bu sonuç BCCZ kafes sisteminden deformasyon yönüne dik olarak konumlanan çubukların çıkartılması ile revize edilen modelin numerik çözümleri ile elde edilmiştir. Bu durumda revize sistemin sunduğu reaksiyon kuvveti

Bu durumda revize sistemin sunduğu reaksiyon kuvveti, BCCZ 90 sistemi için 4520 N değerinden 3050 N değerine gerilemiştir (Tablo 9). Bu düşüşe rağmen revize sisteminin BCC 90 yapısından elde edilen reaksiyon kuvveti değerinin oldukça üzerinde kaldığı görülmüştür.

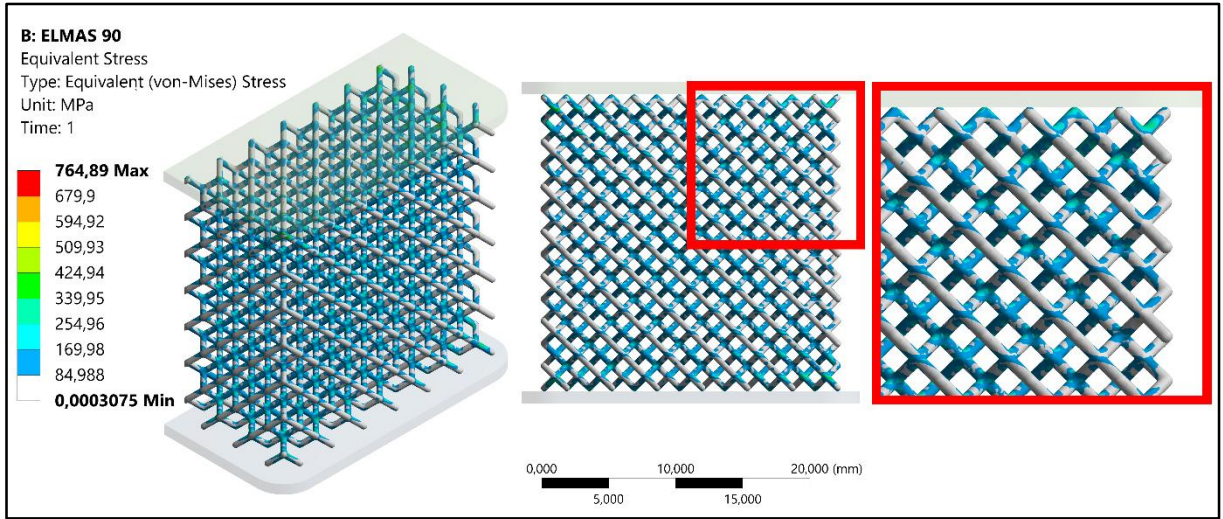


Şekil 61. ELMAS 60 kafes sistemine ait gerilme dağılımı

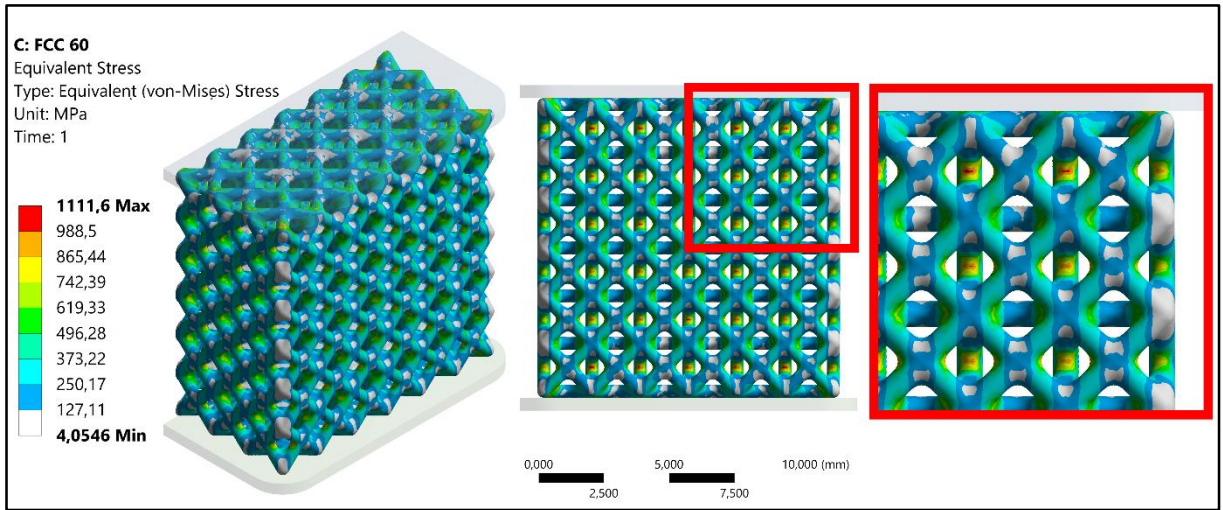


Şekil 62. ELMAS 75 kafes sistemine ait gerilme dağılımı

ELMAS kafes sistemine ait gerilme dağılımı görselleri sırası ile % 60, 75 ve 90 porozite değerleri için Şekil 61, 62 ve 63’de sunulmuştur. ELMAS kafes sistemi, en yakın mekanik davranışları sergileyen BCC kafes sisteminden her üç porozite değeri için gerilme dağılımının tüm yapıda daha dengeli dağılması ile öne çıkmaktadır. ELMAS kafes sistemi tasarımsal olarak BCC kafes sistemine benzer birim kafes özellikleri sergilemesine rağmen topolojik üstünlüğü ile daha kısa çubuk boyuna sahiptir. Bu sayede kafes sisteminin basma plakaları ile temas eden katmanında gerilme bir miktar yüksek değerlerde olmasına karşın yük aktarımının oldukça homojen sağlandığı görülmüştür. Şekil 45, 47, 49 ve 51’de verilen, kafes sistemine ait hasar sonrası görüntüler dikate alındığında, tüm porozite değerlerinde ELMAS kafes sisteminin kayma kırılması sergilediği ve hasar öncesi kayma durumunun geniş bir bant bölgesinde gerçekleştiği görülmüştür.

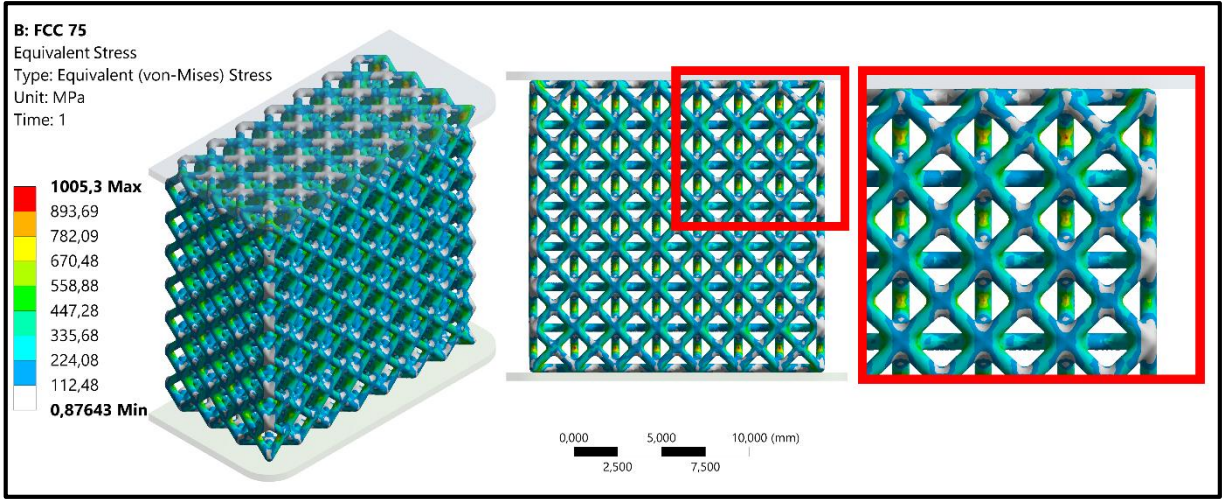


Şekil 63. ELMAS 90 kafes sistemine ait gerilme dağılımı



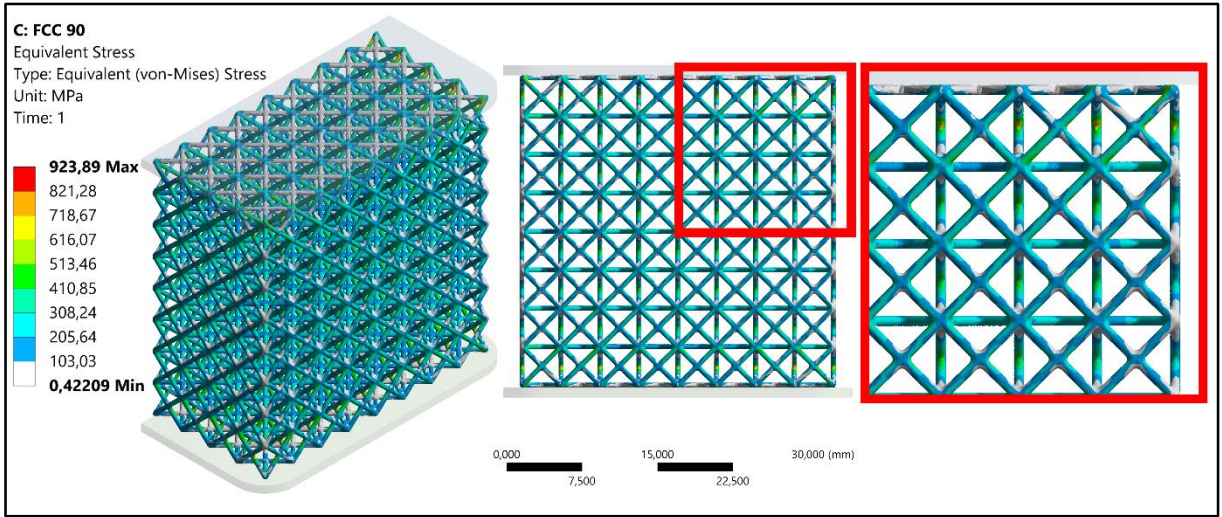
Şekil 64. FCC 60 kafes sistemine ait gerilme dağılımı

FCC kafes sistemine ait gerilme dağılımını gösteren numerik analiz görselleri her bir porozite değeri için sırası ile Şekil 64, 65 ve 66’da verilmiştir. FCC kafes sistemine ait gerilme dağılımları incelendiğinde özellikle % 60 ve 75 porozite seviyelerinde görülen, düğüm noktalarında deformasyon doğrultusundaki gerilme hatlarının keskin bir geçiş göstermesi sonucu bu noktalardan kesme şeklinde kafesin deformasyonu gerçekleşmiştir. Basma deney görüntüleri ve gerilme dağılımları bu anlamda birliktelik sergilemektedir. Düğüm noktaları üzerindeki bu etkinin varlığı, gerilmenin düğüm noktasından ziyade düğüm noktasından çubuk kesitine geçişin olduğu bölge üzerinden taşındığını göstermiştir. FCC kafes sistemi, basma plakalarına temas eden ilk katmanların deforme oluncaya kadar tüm sistemin deformasyonu ve ilk katman üzerindeki hasar sonrası diğer katmanların ilk katmana benzer şekilde düğüm noktaları ile çubuk kesitine geçiş bölgesinden kesme şeklinde gerçekleşmiştir.



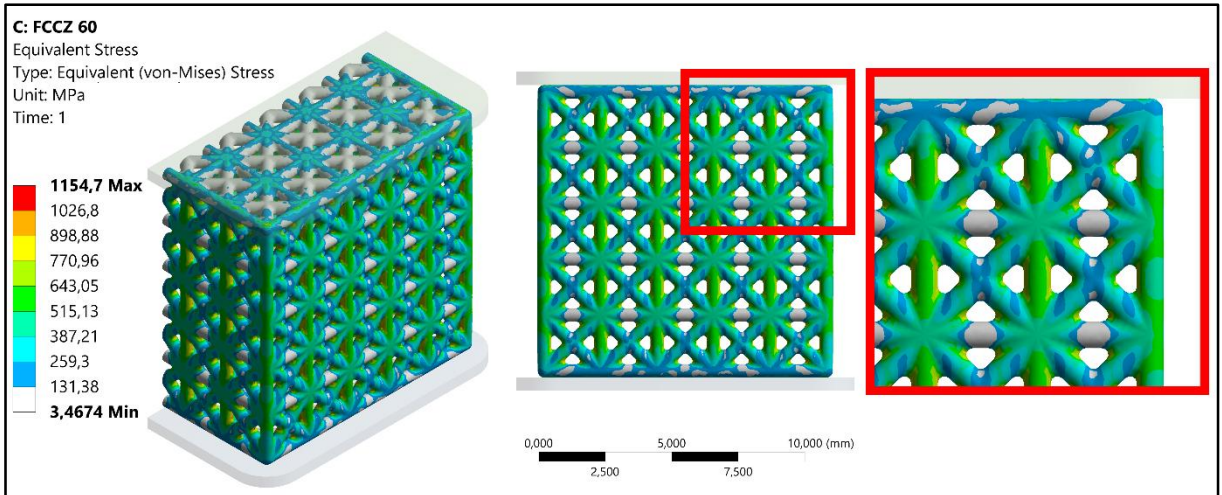
Şekil 65. FCC 75 kafes sistemine ait gerilme dağılımı

Yüzde 90 porozite durumu için FCC kafes sistemine ait davranış bir miktar değişerek, gerilme dağılımının çubuklar üzerinde basma yönündeki keskin geçişleri etkisini yitirmiştir. FCC 90 sistemi % 60 ve 75 poroziteye göre deformasyon davranışında farklılık göstermiş ve düğüm noktaları etrafındaki gerilme dağılımının etkisi ile bu bölgelerin nihai kırılma hasarından önce deforme olduğu ve bu etkinin nihai kırılma hasarında kafes sisteminin kayma kırılması ile sonuçlanmasına neden olmuştur. Deformasyonun basma plakalarına yakın kafeslerde gerçekleşmeyerek kafes sistemi içerisinde kayma hasarı veya katman çökme hasarı şeklinde gerçekleşmesi ile FCC 90 kafes sisteminin gerilme dağılımında % 60 ve 75 kafes sistemlerine göre daha dengeli olduğunu göstermiştir. FCC kafes sistemi topolojisinde bulunun ve basma doğrultusuna dik olarak konumlanan üst ve alt yüzeylerdeki çubuklar, basma yükü altında çekme gerilmesi oluşturmaktadır. Benzer durumun BCCZ sisteminde var olduğunu ifade etmiş olmakla birlikte FCC sisteminde çekme gerilmesi taşıyan çubuk elemanların varlığı deformasyon davranışı açısından dikkati çekmemektedir. Bu durum özellikle FCC 60 ve 75 sistemlerinde karşımıza çıkan düğüm noktalarına yakın kısımlardaki keskin gerilme geçişleri nedeni ile çekme durumundan kaynaklı bir deformasyon görülmemesinin düğüm noktaları civarından kesme şeklindeki deformasyonun hasar üzerinde daha etkin rol oynaması ile açıklanabilir. FCC 90 sisteminde ise düğüm noktalarındaki bu keskin gerilme geçişlerinin azalması ile çekme gerilmesi altında çalışan yatay çubukların etkisi ile hasar başlangıçları görülmüş ve nihai kırılma kayma hasarı ile gerçekleşmiştir.

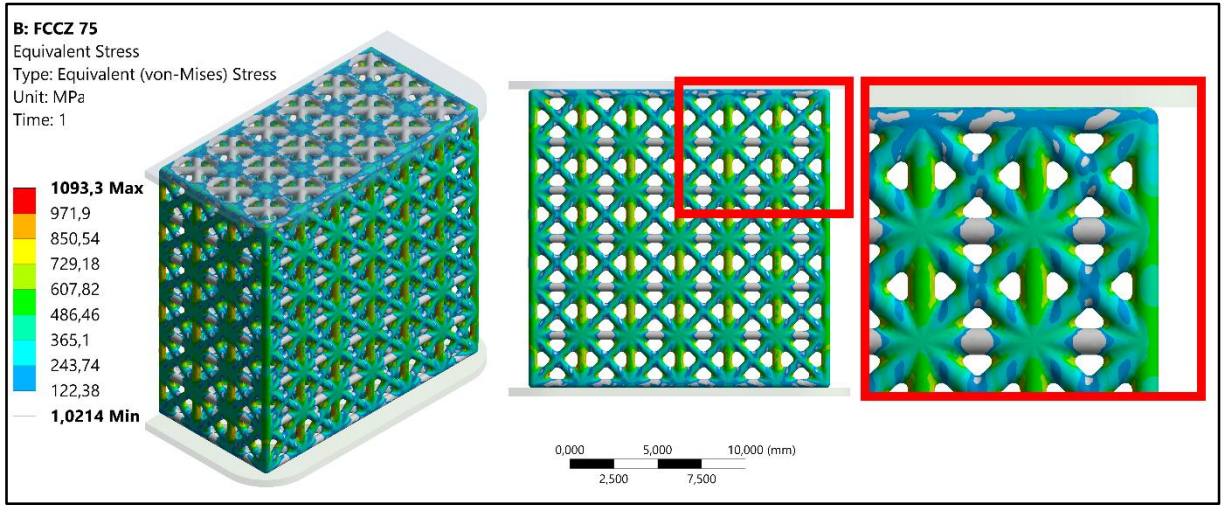


Şekil 66. FCC 90 kafes sistemine ait gerilme dağılımı

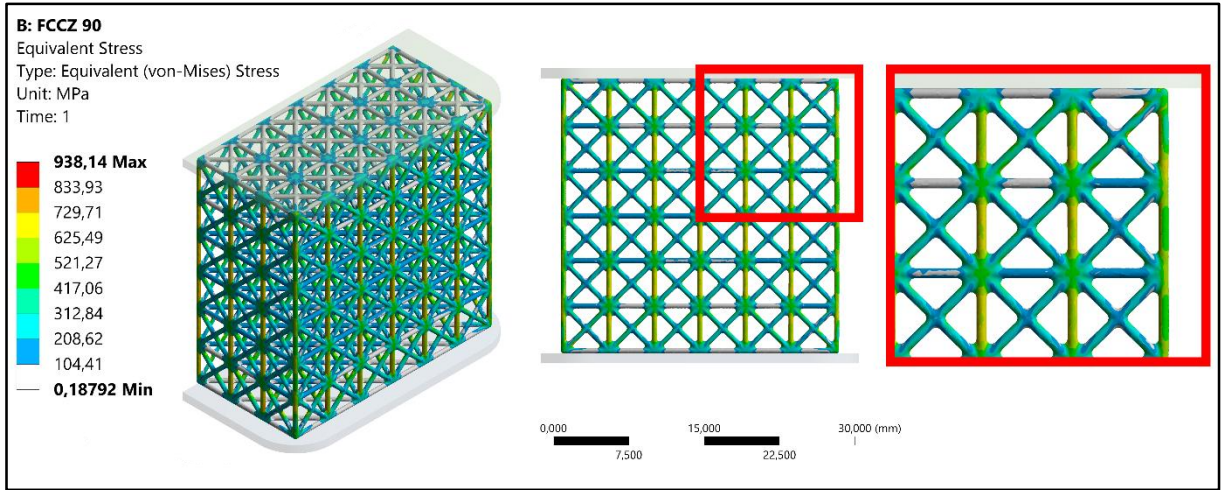
Şekil 67, 68 ve 69 FCCZ kafes sistemlerine ait sonlu elemanlar analizi sonuçlarının gerilme dağılımı hakkında bilgi vermektedir. FCCZ sistemi, revize edilmemiş hali olan FCC kafes sistemine benzer gerilme dağılımı sergileyerek, % 60 ve 75 porozite değerinde düğüm noktaları yakınında çubuk elemanlar üzerinde kısa çubuk boyu etkisi ile gerilme geçişin dar bir alanda gerçekleşmiştir. Bu durumun sonucu olarak kesme etkisi oluşmuş ve kafes sisteminin bu kesme etkisinde düğüm noktalarının çubuk kesitine geçiş hattında hasara uğrayarak ve deformasyon doğrultusunda katman katman çökme hasarının olduğu görülmüştür. Yüzde 90 poroziteye sahip kafes sisteminin hasar görüntüleri incelendiğinde, çökme öncesi birim kafes sisteminin yüzey ortalarında kalan düğümlerin bir miktar dönmeye zorlandığı görülmekte olup bu etkinin alt porozitedeki kafes sistemlerinde çok daha az ortaya çıktığı görülmüştür. Bu durum gerilme dağılımı sonuçlarındaki uzun çubuk boyunda gerilme geçişlerinin daha geniş bir alanda olması sonucu ile ilişkili olup, gerilme geçişinin geniş bir alandan sağlanması ile kesme durumunun çubuk üzerinde etkisini azaltarak yapıyı deformasyona zorladığı sonucunu ortaya koymaktadır.



Şekil 67. FCCZ 60 kafes sistemine ait gerilme dağılımı



Şekil 68. FCCZ 75 kafes sistemine ait gerilme dağılımı



Şekil 69. FCCZ 90 kafes sistemine ait gerilme dağılımı

SONUÇ ve ÖNERİLER

Ekllemeli imalat ile elde edilen ürünlerin, günümüz ve gelecekte nihai ürün olarak kullanılabilirliği önünde bulunan en temel engel, üretim kalitesi ve tasarımların gerçek performans analizlerine olan güvendir. Tekil üretimler ve standartlaştırılmayan testler nedeni ile özellikle numerik çözümlerin doğruluğu, bu dar boğazın en ciddi açılımı olmaktadır. Tasarıma uygun üretim parametrelerinin belirlenmesi ve numerik analiz sonuçlarının iyi yakınsama ile belirlenmesi, atık miktarının olabildiğince az ve tasarımdan üretime geçen sürenin oldukça düşük olduğu ve dahası özellikle ileri teknoloji uygulamalarda geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmeyecek karmaşık geometriler ve zor malzemeler için ekllemeli imalatın başarısını perçinlemektedir.

Ti-6Al-4V ELI alaşımının seçici lazer erğitme yönteminde üretim parametrelerinin belirlenerek beş farklı kafes sisteminin üç farklı porozite değeri için statik basma analizlerinin deneysel ve numerik olarak incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Kullanılan tozun toz boyutu analizleri ile ortalama toz boyutunun 29 μm olduğu ve bu değeri veren toz frekans dağılımı ile yaklaşık % 62 sergi yoğunluğunun elde edildiği belirlenmiştir.
- Seçici lazer erğitme ile yapıda hızlı soğuma sonucu martenzitik fazların bulunduğu görülmüştür.
- Üretimdeki gaz akışının kontrolü ve üretim hacmindeki oksijen miktarının % 0,2 değerinin altında kalması ile üretim sonrası kimyasal değerler alaşıma ait standart değerler içerisinde kaldığı belirlenmiştir.
- Üretim parametrelerinin belirlenmesi aşamasında yüzey incelemeleri ile elde edilen eriyik havuz genişliği ve ısı tesiri altındaki bölgenin, kesit incelemesi ile elde edilen değerler ile örtüştüğü ancak parametre belirlemede tek başına yeterli olmayacağı ve kesit incelemesinin gerektiği görülmüştür.
- Yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızı ile yapıya olan aşırı enerji girdisinin, anahtar deliği formu oluşturarak eriyik havuzunu kararsızlaştırdığı ve katman altına aşırı ısı girdisine neden olduğu belirlenmiştir.
- Üretim için kullanılan parametrelerin kontrolü ile aynı eriyik havuzu boyutlarının farklı lazer gücü ve tarama hızları ile elde edilmesinin mümkün olduğu ancak bunun nihai ürüne ait üretim zamanı üzerinde etkili olacağı belirlenmiştir.

- Artan lazer tarama hızının eriyik havuzunun biçimini giderek kâse formuna dönüştürdüğü, mikroyapıdaki martenzitik yapının kaba sütünsal durumdan daha ince sütünsal duruma değiştiği belirlenmiştir.
- Katman kalınlığının 25 μm olması durumunda 100 W lazer gücü ve 1400 mm/s tarama hızı ile elde edilen yaklaşık 41 μm derinliği ve yaklaşık 57 μm 'lik ısı etkisi altındaki bölge derinliği ile oluşan eriyik havuzunun yeterli birleşmeyi sağladığı görülmüştür.
- Belirlenen 100 W lazer gücü ve 1400 mm/s tarama hızında, 67,5 μm yana kayma değerinin mikroyapısal olarak en iyi değer olduğu ve bu parametrede elde edilen numunelerin % 99,95 değerinde doluluğa sahip olduğu belirlenmiştir. Optimum yana kayma değeri altında doluluk oranında ciddi değişiklik olmazken, bu değer üzerinde doluluk oranında ciddi düşüş görüldüğü belirlenmiştir.
- Üç farklı inşa oryantasyonunda çekme gerilmesi irdelendiğinde optimum yana kayma değerine kadar belirgin değişimin görülmediği ancak yüzde uzamanın bu artışa daha duyarlı olduğu belirlenmiştir.
- Üretim oryantasyonunda üretim tablasına uzanan, yatay üretilen çekme numunelerinin diğer iki yerleşimdekilere göre daha düşük kopma gerilmesi ve kopma uzaması sergilediği belirlenmiştir.
- Seçici lazer ergitme yönteminde optimum üretim parametereleri ile elde edilen çekme numunelerinin, geleneksel dövme Ti-6Al-4V ELI alaşımına kıyasla daha iyi çekme dayanımı ancak nispeten düşük kopma uzaması sergiledikleri görülmüştür.
- Optimum yana kayma miktarı altındaki değerlerde kırılma sonrası kaba taneli, gözenekli kırılma yüzeyi elde edilirken, bu değer üzerinde, yanal birleşmenin sağlanmaması sonucu izlerin örtüşmemesi ve gözenekli kırılma yüzeyi elde edilmiştir.
- Üretilen kafes sistemlerinin kendi kendilerini destekler yapıda olmaları ile ilave destek tasarımlarına ihtiyaç olmaksızın üretilebildikleri belirlenmiştir.
- BCC kafes sistemine yapılan XYZ modifikasyonunun FCC sistemine yapılan modifikasyondan rijitlik ve dayanım bakımından daha etkili olduğu görülmüştür.
- BCC ve ELMAS sistemleri çubuk elemanlarının aynı oryantasyona sahip olması ile diğer kafes sistemlerine kıyasla gerilme – basma uzaması bakımından benzer karakter sergilemişlerdir.
- Numerik çözümlerde yapılan analizler için en iyi mesh kalitesinin, uniform mesh yaklaşımının ve meshlere ait kenar boyutu değerlerinin çubuk çapının 1/10 seviyesinde olması ile elde edildiği görülmüştür.

- Kafes sistemlerinden BCC sisteminin tek gözenek boyutu değerine sahip olduğu, modifiye edilen BCCZ sisteminin ikinci bir gözenek boşluğu oluşturması ile ortalama gözenek boyutunun düştüğü belirlenmiştir. FCC sistemi iki farklı gözenek büyüklüğüne sahip olmakla birlikte, topolojik modifikasyonunun BCCZ sistemine benzer şekilde ortalama gözenek boyutu değerini azalttığı görülmüştür.
- Modellemelerde kafes sisteminin simetrik durumundan faydalanılması ile birim kafes çizimleri ve bunun çoğaltılmasının model oluşturmada kolaylık sağladığı belirlenmiştir. Kafes sistemlerinin simetri yaklaşımında “*symmetry region*” modelinin kabul edilebilir hesaplama zamanı sunduğu ve bu yaklaşımın elde edilecek reaksiyon kuvvetinin tam modelin yarısı şeklinde hesapladığı belirlenmiştir.
- Artan porozitenin kafes sistemlerinin gerilme dağılımını iyileştirdiği ve tüm kafes sisteminin deforme olmasına katkı sağladığı, düşük porozitelerde deformasyonun özellikle basma plakalarına temas eden katmanlarda kaldığı belirlenmiştir.
- BCCZ sisteminde deformasyon yönündeki çubukların bası gerilmesi altında olmalarına karşın, deformasyona dik doğrultulardaki elemanların çeki gerilmesine maruz kaldıkları görülmüştür.
- Yüzde 60 porozite değerinde çubuk boyunun kısa olması ve gerilmenin özellikle düğüm noktaları civarında dar bir bölgede geçiş göstermesi ile bu bölgelerden kesme şeklinde deformasyon görülürken, ELMAS kafes sistemi tüm çubuk elemanların basma gerilmesi altında olması gerilmenin tüm yapıya dağıtılması ile diğer kafes sistemlerine göre her porozite değerinde homojen deforme olarak fiçilaşma benzeri davranış sergilemiştir.
- Hasar mekanizması ve rijitlik değerleri dikkate alındığında ELMAS kafes sisteminin homojen deformasyon davranışı ve trabeküler kemiğe yakın mekanik özellikleri nedeni ile gözenekli implant tasarımlarında kullanılabilir bir model olacağı sonucuna varılmıştır.
- Özellikle % 60 porozite değerinde olmak üzere ELMAS hariç diğer kafes sistemlerinin düğüm noktalarındaki rijitlik değerinin oldukça yüksek olduğu ve bu durumun düğüm noktalarında kesme etkisini ortaya çıkardığı görülmüştür.

Çalışma kapsamında irdelenmeyen ancak gelecek çalışmalar için öneri olabilecek hususlar aşağıda sunulmuştur.

- Isıl işlem yapılarak gerilme – basma uzaması davranışlarına kafes sistemlerinin reaksiyonları değerlendirilebilir.
- Kafes sistemlerine ait dinamik davranışlar araştırılabilir.

- Kafes sistemi, biyoaktif yüzeylere kavuşturularak biyolojik reaksiyonları ve doku etkileşimi incelenebilir.
- Her üç ekseninde deformasyon dağılımına göre farklı çubuk çapları kullanılması ile yeni modellerin numerik hesaplamaları yapılarak performansları irdelenebilir.



KAYNAKLAR

- Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H. and Barlow, J., 1995. Direct selective laser sintering of metals. *Rapid Prototyping Journal*.
- Ahmadi, S., Hedayati, R., Li, Y., Lietaert, K., Tümer, N., Fatemi, A., Rans, C., Pouran, B., Weinans, H. and Zadpoor, A., 2018. Fatigue performance of additively manufactured meta-biomaterials: The effects of topology and material type. *Acta biomaterialia*, 65, 292-304.
- Ahmadi, S.M., Yavari, S.A., Wauthle, R., Pouran, B., Schrooten, J., Weinans, H. and Zadpoor, A.A., 2015. Additively manufactured open-cell porous biomaterials made from six different space-filling unit cells: The mechanical and morphological properties. *Materials*, 8 (4), 1871-1896.
- Ahn, D.-G., 2011. Applications of laser assisted metal rapid tooling process to manufacture of molding & forming tools—state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12 (5), 925-938.
- Al-Bermani, S. S., Blackmore, M. L., Zhang, W., & Todd, I. (2010). The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti-6Al-4V. *Metallurgical and materials transactions a*, 41(13), 3422-3434.
- Anonymous <https://www.xilloc.com/patients/stories/total-mandibular-implant/> (15.06.2019), Anonymous, https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2018-12/CLMAT_41TI%20ELI_DS_EN_US_2_v1.pdf (07.07.2020),
- ANSYS, (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA)
- Arabnejad, S., Johnston, B., Tanzer, M. and Pasini, D., 2017. Fully porous 3D printed titanium femoral stem to reduce stress- shielding following total hip arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Research*, 35 (8), 1774-1783.
- Arabnejad, S., Johnston, R.B., Pura, J.A., Singh, B., Tanzer, M. and Pasini, D., 2016. High-strength porous biomaterials for bone replacement: A strategy to assess the interplay between cell morphology, mechanical properties, bone ingrowth and manufacturing constraints. *Acta biomaterialia*, 30, 345-356.
- Ashby, M., 2006. The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364 (1838), 15-30.
- Ashby, M.F., Evans, T., Fleck, N.A., Hutchinson, J., Wadley, H. and Gibson, L., 2000. *Metal foams: a design guide*. Elsevier.
- ASTM., F2792-12a, 2012. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ASTM., ISO. ASTM 52900-15, 2015. *Standard Terminology for Additive Manufacturing. General Principles Terminology*. ASTM International.
- Awad, R.H., Habash, S.A. and Hansen, C.J., 2018. *3D Printing Methods. 3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*. Elsevier, 11-32.
- Bahraminasab, M., Sahari, B., Hassan, M.R., Arumugam, M. and Shamsborhan, M., 2011. Finite element analysis of the effect of shape memory alloy on the stress distribution and contact pressure in total knee replacement. *Trends Biomater Artif Organs*, 25 (3), 95-100.
- Baker, R., 1925 *Method of making decorative articles*. U.S. Patent No. US1533300A
- Bandyopadhyay, A., Espana, F., Balla, V.K., Bose, S., Ohgami, Y. and Davies, N.M., 2010. Influence of porosity on mechanical properties and in vivo response of Ti-6Al-4V implants. *Acta biomaterialia*, 6 (4), 1640-1648.
- Banhart, J., What are cellular metals and metal foams?, <http://www.metalfoam.net/>, (Eylül 2019).

- Bártolo, P.J., 2011. Stereolithography: materials, processes and applications. Springer Science & Business Media.
- Bartolo, P.J.S., Almeida, H.A., Alves N.F., 2008. Virtual and rapid manufacturing, Taylor & Francis Group, London (2008), T. Wohlers
- Beaman, J., Bourell, D. and Wallace, D., 2014. Additive manufacturing (AM) and 3D printing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136 (6).
- Bernard, S., Balla, V. K., Bose, S., Bandyopadhyay, A., 2011. Rotating bending fatigue response of laser processed porous NiTi alloy. *Materials Science and Engineering: C*, 31(4), 815-820.
- Bilgin, G.M., Esen, Z., Akın, Ş.K. and Dericioglu, A.F., 2017. Optimization of the mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated by selective laser melting using thermohydrogen processes. *Materials Science and Engineering: A*, 700, 574-582.
- Bineli, A.R.R., Peres, A.P.G., Jardini, A.L. and Maciel Filho, R., 2011. Direct metal laser sintering (DMLS): Technology for design and construction of microreactors.
- Born, M. and Wolf, E., 2013. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Elsevier.
- Bose, S., Ke, D., Sahasrabudhe, H. and Bandyopadhyay, A., 2018. Additive manufacturing of biomaterials. *Progress in materials science*, 93, 45-111.
- Bose, S., Vahabzadeh, S. and Bandyopadhyay, A., 2013. Bone tissue engineering using 3D printing. *Materials today*, 16 (12), 496-504.
- Bremen, S., Meiners, W. and Diatlov, A., 2012. Selective laser melting: a manufacturing technology for the future? *Laser Technik Journal*, 9 (2), 33-38.
- Brenne, F., Niendorf, T. and Maier, H., 2013. Additively manufactured cellular structures: Impact of microstructure and local strains on the monotonic and cyclic behavior under uniaxial and bending load. *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (9), 1558-1564.
- Carter, L.N., Attallah, M.M. and Reed, R.C., 2012. Laser powder bed fabrication of nickel-base superalloys: influence of parameters; characterisation, quantification and mitigation of cracking. *Superalloys*, 2012, 577-586.
- Dallago, M., Fontanari, V., Torresani, E., Leoni, M., Pederzoli, C., Potrich, C. and Benedetti, M., 2018. Fatigue and biological properties of Ti-6Al-4V ELI cellular structures with variously arranged cubic cells made by selective laser melting. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 78, 381-394.
- Deshpande, V., Ashby, M. and Fleck, N., 2001. Foam topology: bending versus stretching dominated architectures. *Acta materialia*, 49 (6), 1035-1040.
- Dilip, J., Anam, M.A., Pal, D. and Stucker, B., 2016. A short study on the fabrication of single track deposits in SLM and characterization, *Solid freeform fabrication symposium*, pp. 1644-1659.
- Dilip, J., Zhang, S., Teng, C., Zeng, K., Robinson, C., Pal, D. and Stucker, B., 2017. Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*, 2 (3), 157-167.
- Dutta, B. and Froes, F.H.S., 2015. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys. *Titanium powder metallurgy*. Elsevier, 447-468.
- Dutta, B., Palaniswamy, S., Choi, J., Song, L. and Mazumder, J., 2011. Additive manufacturing by direct metal deposition. *Advanced Materials & Processes*, 169 (5), 33-36.
- Edwards, P. and Ramulu, M., 2015. Effect of build direction on the fracture toughness and fatigue crack growth in selective laser melted Ti- 6Al- 4 V. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 38 (10), 1228-1236.
- El Maraghy, H., Schuh, G., ElMaraghy, W., Piller, F., Schönsleben, P., Tseng, M. and Bernard, A., 2013. Product variety management. *Cirp Annals*, 62 (2), 629-652.

- Emmelmann, C., Scheinemann, P., Munsch, M. and Seyda, V., 2011. Laser additive manufacturing of modified implant surfaces with osseointegrative characteristics. *Physics Procedia*, 12, 375-384.
- Facchini, L., Magalini, E., Robotti, P., Molinari, A., Höges, S. and Wissenbach, K., 2010. Ductility of a Ti- 6Al- 4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders. *Rapid Prototyping Journal*.
- Ferrar, B., Mullen, L., Jones, E., Stamp, R. and Sutcliffe, C., 2012. Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 212 (2), 355-364.
- Frost, H.M., 1994. Wolff's Law and bone's structural adaptations to mechanical usage: an overview for clinicians. *The Angle Orthodontist*, 64 (3), 175-188.
- Ghouse, S., Babu, S., Van Arkel, R.J., Nai, K., Hooper, P.A. and Jeffers, J.R., 2017. The influence of laser parameters and scanning strategies on the mechanical properties of a stochastic porous material. *Materials & Design*, 131, 498-508.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing—3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*.
- Gibson, I., Rosen, D.W. and Stucker, B., 2010. Design for additive manufacturing. *Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 299-332.
- Gibson, I., Rosen, D.W. and Stucker, B., 2014. *Additive manufacturing technologies*, 17. Springer.
- Gibson, L., 2000. Mechanical behavior of metallic foams. *Annual review of materials science*, 30 (1), 191-227.
- Gibson, L.J. and Ashby, M.F., 1999. *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge university press.
- Gibson, L.J., Ashby, M.F. and Harley, B.A., 2010. *Cellular materials in nature and medicine*. Cambridge University Press.
- Gong, H., Rafi, K., Gu, H., Starr, T. and Stucker, B., 2014. Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*, 1, 87-98.
- Gorny, B., Niendorf, T., Lackmann, J., Thoene, M., Troester, T. and Maier, H., 2011. In situ characterization of the deformation and failure behavior of non-stochastic porous structures processed by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 528 (27), 7962-7967.
- Gu, D., Hagedorn, Y.-C., Meiners, W., Meng, G., Batista, R.J.S., Wissenbach, K. and Poprawe, R., 2012. Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium. *Acta materialia*, 60 (9), 3849-3860.
- Gümüşderelioğlu, M., 2002. *Biyomalzemeler*. *Bilim ve Teknik Dergisi*, TÜBİTAK, Temmuz özel sayısı.
- Guo, P., Zou, B., Huang, C. and Gao, H., 2017. Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 240, 12-22.
- Harrysson, O. and Cormier, D., 2006. Direct fabrication of custom orthopedic implants using electron beam melting technology. *Advanced manufacturing technology for medical applications*, 193-208.
- Heinl, P., Müller, L., Körner, C., Singer, R.F. and Müller, F.A., 2008. Cellular Ti-6Al-4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting. *Acta biomaterialia*, 4 (5), 1536-1544.
- Heinl, P., Rottmair, A., Körner, C. and Singer, R.F., 2007. Cellular titanium by selective electron beam melting. *Advanced Engineering Materials*, 9 (5), 360-364.

- Hollander, D.A., Von Walter, M., Wirtz, T., Sellei, R., Schmidt-Rohlfing, B., Paar, O. and Erli, H.-J., 2006. Structural, mechanical and in vitro characterization of individually structured Ti-6Al-4V produced by direct laser forming. *Biomaterials*, 27 (7), 955-963.
- Hooreweder, V. B., Apers, Y., Lietaert, K., and Kruth, J. P. 2017. "Improving the fatigue performance of porous metallic biomaterials produced by Selective Laser Melting". *Acta Biomaterialia*, 47, 193-202.
- Huiskes, R., Weinans, H. and Van Rietbergen, B., 1992. The relationship between stress shielding and bone resorption around total hip stems and the effects of flexible materials. *Clinical orthopaedics and related research*, 124-134.
- Ikeo, N., Ishimoto, T., Serizawa, A. and Nakano, T., 2014. Control of mechanical properties of three-dimensional Ti-6Al-4V products fabricated by electron beam melting with unidirectional elongated pores. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45 (10), 4293-4301.
- Ishikawa, K., 2010. Bone substitute fabrication based on dissolution-precipitation reactions. *Materials*, 3 (2), 1138-1155.
- Ituarte, I.F., Coatanea, E., Salmi, M., Tuomi, J. and Partanen, J., 2015. Additive manufacturing in production: a study case applying technical requirements. *Physics Procedia*, 78, 357-366.
- Kadkhodapour, J., Montazerian, H., Darabi, A.C., Anaraki, A., Ahmadi, S., Zadpoor, A. and Schmauder, S., 2015. Failure mechanisms of additively manufactured porous biomaterials: Effects of porosity and type of unit cell. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 50, 180-191.
- Karageorgiou, V. and Kaplan, D., 2005. Porosity of 3D biomaterial scaffolds and osteogenesis. *Biomaterials*, 26 (27), 5474-5491.
- Kasperovich, G. and Hausmann, J., 2015. Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 220, 202-214.
- Kaya, G., Yildiz, F., Hacisalihoğlu, İ., 2019. Characterization of the Structural and Tribological Properties of Medical Ti-6Al-4V Alloy Produced in Different Production Parameters Using Selective Laser Melting. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 6(5), 253-261.
- Kim, S. and Lee, C.-W., 2014. A review on manufacturing and application of open-cell metal foam. *Procedia Materials Science*, 4, 305-309.
- Klingbeil, N.W., Beuth, J.L., Chin, R. and Amon, C., 2002. Residual stress-induced warping in direct metal solid freeform fabrication. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44 (1), 57-77.
- Korkmaz, İ.H., 2016. Kişiye Özel Diz Protezinin Olasılığa Dayalı Analiz Yardımıyla Tasarımı Ve Deneysel Olarak Doğrulanması, Atatürk Üniversitesi.
- Krakhmalev, P., Fredriksson, G., Yadroitsava, I., Kazantseva, N., Du Plessis, A. and Yadroitseva, I., 2016. Deformation behavior and microstructure of Ti-6Al-4V manufactured by SLM. *Physics Procedia*, 83, 778-788.
- Kruth, J.-P. and Laoui, T., 2001. Selective laser sintering: state-of-the-art. *International journal of electrical machining*, 6, 7-17.
- Kruth, J.-P., Badrossamay, M., Yasa, E., Deckers, J., Thijs, L. and Van Humbeeck, J., 2010. Part and material properties in selective laser melting of metals, *Proceedings of the 16th international symposium on electromachining*, pp. 1-12.
- Kruth, J.-P., Mercelis, P., Vaerenbergh, J.V., Froyen, L. and Rombouts, M., 2005. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11 (1), 26-36.
- Kusuma, C., Ahmed, S.H., Mian, A. and Srinivasan, R., 2017. Effect of laser power and scan speed on melt pool characteristics of commercially pure titanium (CP-Ti). *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26 (7), 3560-3568.

- LaMonica M., 2008. State of the industry, annual worldwide progress report Wohlers Associates, Inc
- Lee, H., Lim, C.H.J., Low, M.J., Tham, N., Murukeshan, V.M. and Kim, Y.-J., 2017. Lasers in additive manufacturing: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4 (3), 307-322.
- Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H.a. and Maier, H., 2013. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. *International Journal of Fatigue*, 48, 300-307.
- Levy, G.N., Schindel, R. and Kruth, J.-P., 2003. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *Cirp Annals*, 52 (2), 589-609.
- Leyens, C. and Peters, M., 2003. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. John Wiley & Sons.
- Li, G., Wang, L., Pan, W., Yang, F., Jiang, W., Wu, X., Kong, X., Dai, K. and Hao, Y., 2016. In vitro and in vivo study of additive manufactured porous Ti-6Al-4V scaffolds for repairing bone defects. *Scientific reports*, 6, 34072.
- Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L. and Jiang, W., 2012. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59 (9-12), 1025-1035.
- Liu, Y., Yang, Y., Mai, S., Wang, D., Song, C., 2015. Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder. *Materials & Design*, 87, 797-806.
- Liu, F., Zhang, D.Z., Zhang, P., Zhao, M. and Jafar, S., 2018. Mechanical properties of optimized diamond lattice structure for bone scaffolds fabricated via selective laser melting. *Materials*, 11 (3), 374.
- Liu, Z., 2017. Economic comparison of selective laser melting and conventional subtractive manufacturing processes.
- Löber, L., Biamino, S., Ackelid, U., Sabbadini, S., Epicoco, P., Fino, P. and Eckert, J., 2011. Comparison of selective laser and electron beam melted titanium aluminides, Conference paper of 22nd International symposium "Solid freeform fabrication proceedings", University of Texas, Austin, pp. 547-556.
- Loh, L.-E., Chua, C.-K., Yeong, W.-Y., Song, J., Mapar, M., Sing, S.-L., Liu, Z.-H. and Zhang, D.-Q., 2015. Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80, 288-300.
- Luo, X., Li, J. and Lucas, M., 2017. Galvanometer scanning technology for laser additive manufacturing, *Laser 3D Manufacturing IV*. International Society for Optics and Photonics, pp. 1009512.
- Lütjering, G., 1998. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of (α + β) titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 243 (1-2), 32-45.
- Lyons, B., 2011. Additive manufacturing in Aerospace; examples and research outlook, *frontiers of engineering*.
- Majumdar, J.D. and Manna, I., 2003. Laser processing of materials. *Sadhana*, 28 (3-4), 495-562.
- Manthiram, A., Bourell, D. and Marcus, H., 1993. Nanophase materials in solid freeform fabrication. *JOM*, 45 (11), 66-70.
- Meier, H. and Haberland, C., 2008. Experimental studies on selective laser melting of metallic parts. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 39 (9), 665-670.
- Melchels, F.P.W., 2010. Preparation of advanced porous structures by stereolithography for application in tissue engineering. University of Twente: Enschede, The Netherlands.

- Mercelis, P. and Kruth, J.P., 2006. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*.
- Mohamed, O.A., Masood, S.H. and Bhowmik, J.L., 2015. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3 (1), 42-53.
- Moiduddin, K., Anwar, S., Ahmed, N., Ashfaq, M. and Al-Ahmari, A., 2017. Computer assisted design and analysis of customized porous plate for mandibular reconstruction. *IRBM*, 38 (2), 78-89.
- Mower, T.M. and Long, M.J., 2016. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science and Engineering: A*, 651, 198-213.
- Mullen, L., Stamp, R.C., Brooks, W.K., Jones, E. and Sutcliffe, C.J., 2009. Selective Laser Melting: A regular unit cell approach for the manufacture of porous, titanium, bone in-growth constructs, suitable for orthopedic applications. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 89 (2), 325-334.
- Murr, L.E., Gaytan, S., Medina, F., Lopez, H., Martinez, E., Machado, B., Hernandez, D., Martinez, L., Lopez, M. and Wicker, R., 2010. Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368 (1917), 1999-2032.
- Murr, L.E., Gaytan, S.M., Ramirez, D.A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K.N., Shindo, P.W., Medina, F.R. and Wicker, R.B., 2012. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 28 (1), 1-14.
- Niendorf, T., Brenne, F. and Schaper, M., 2014. Lattice structures manufactured by SLM: on the effect of geometrical dimensions on microstructure evolution during processing. *Metallurgical and materials transactions B*, 45 (4), 1181-1185.
- Panesar, A., Abdi, M., Hickman, D., Ashcroft, I., (2018). Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 19, 81-94.
- Parthasarathy, J., Starly, B. and Raman, S., 2008. Design of Patient-Specific Porous Titanium Implants for Craniofacial Applications, RAPID 2008 conference & exposition.
- Parthasarathy, J., Starly, B., Raman, S. and Christensen, A., 2010. Mechanical evaluation of porous titanium (Ti-6Al-4V) structures with electron beam melting (EBM). *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 3 (3), 249-259.
- Pattanayak, D.K., Fukuda, A., Matsushita, T., Takemoto, M., Fujibayashi, S., Sasaki, K., Nishida, N., Nakamura, T. and Kokubo, T., 2011. Bioactive Ti metal analogous to human cancellous bone: fabrication by selective laser melting and chemical treatments. *Acta biomaterialia*, 7 (3), 1398-1406.
- Piili, H., Happonen, A., Väistö, T., Venkataramanan, V., Partanen, J. and Salminen, A., 2015. Cost estimation of laser additive manufacturing of stainless steel. *Physics Procedia*, 78, 388-396.
- Pinkerton, A.J., 2016. Lasers in additive manufacturing. *Optics & Laser Technology*, 78, 25-32.
- Pyka, G., Burakowski, A., Kerckhofs, G., Moesen, M., Van Bael, S., Schrooten, J. and Wevers, M., 2012. Surface modification of Ti-6Al-4V open porous structures produced by additive manufacturing. *Advanced Engineering Materials*, 14 (6), 363-370.
- Pyka, G., Kerckhofs, G., Papantoniou, I., Speirs, M., Schrooten, J. and Wevers, M., 2013. Surface roughness and morphology customization of additive manufactured open porous Ti-6Al-4V structures. *Materials*, 6 (10), 4737-4757.

- Rehme, O. and Emmelmann, C., 2010. Cellular design for laser freeform fabrication. Cuvillier Göttingen.
- Rombouts, M., 2006. Selective Laser Sintering/Melting of Iron-Based Powders (Selectief laser sinteren/smelten van ijzergebaseerde poeders), Katholieke Universiteit Leuven.
- Ryan, G., Pandit, A. and Apatsidis, D.P., 2006. Fabrication methods of porous metals for use in orthopaedic applications. *Biomaterials*, 27 (13), 2651-2670.
- Sames, W.J., List, F., Pannala, S., Dehoff, R.R. and Babu, S.S., 2016. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*, 61 (5), 315-360.
- Schnabel T., Oettel, M., Muelle, B., 2017. Design For Additive Manufacturing Guidelines and Case Studies for Metal Applications, Fraunhofer Institute For Machine Tools And Forming Technology, 110p, Dresden.
- Shackelford, J.F., 1999. Bioceramics-current status and future trends, *Materials Science Forum*. Trans Tech Publ, pp. 99.
- Shirazi, S.F.S., Gharehkhani, S., Mehrali, M., Yarmand, H., Metselaar, H.S.C., Kadri, N.A. and Osman, N.A.A., 2015. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing. *Science and technology of advanced materials*, 16 (3), 033502.
- Sidambe, A. T., 2014. Biocompatibility of advanced manufactured titanium implants—A review. *Materials*, 7(12), 8168-8188.
- Simchi, A., 2004. The role of particle size on the laser sintering of iron powder. *Metallurgical and materials transactions B*, 35 (5), 937-948.
- Sing, S.L., Yeong, W.Y., Wiria, F.E. and Tay, B., 2016. Characterization of titanium lattice structures fabricated by selective laser melting using an adapted compressive test method. *Experimental Mechanics*, 56 (5), 735-748.
- SolidWorks, (SolidWorks, v2016; Dassault Systems, Concord, MA, USA)
- Tan, X., Tan, Y., Chow, C., Tor, S. and Yeong, W., 2017. Metallic powder-bed based 3D printing of cellular scaffolds for orthopaedic implants: A state-of-the-art review on manufacturing, topological design, mechanical properties and biocompatibility. *Materials Science and Engineering: C*, 76, 1328-1343.
- Taniguchi, N., Fujibayashi, S., Takemoto, M., Sasaki, K., Otsuki, B., Nakamura, T., Matsushita, T., Kokubo, T. and Matsuda, S., 2016. Effect of pore size on bone ingrowth into porous titanium implants fabricated by additive manufacturing: an in vivo experiment. *Materials Science and Engineering: C*, 59, 690-701.
- Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Van Humbeeck, J. and Kruth, J.-P., 2010. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta materialia*, 58 (9), 3303-3312.
- Thompson, M.K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R.I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P. and Ahuja, B., 2016. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *Cirp Annals*, 65 (2), 737-760.
- Thompson, S.M., Bian, L., Shamsaei, N. and Yadollahi, A., 2015. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. *Additive Manufacturing*, 8, 36-62.
- Tolochko, N.K., Mozzharov, S.E., Yadroitsev, I.A., Laoui, T., Froyen, L., Titov, V.I. and Ignatiev, M.B., 2004. Balling processes during selective laser treatment of powders. *Rapid Prototyping Journal*.
- Tsopanos, S., Mines, R., McKown, S., Shen, Y., Cantwell, W., Brooks, W. and Sutcliffe, C., 2010. The influence of processing parameters on the mechanical properties of selectively laser melted stainless steel microlattice structures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132 (4).
- Van Bael, S., Kerckhofs, G., Moesen, M., Pyka, G., Schrooten, J. and Kruth, J.-P., 2011. Micro-CT-based improvement of geometrical and mechanical controllability of selective laser

- melted Ti-6Al-4V porous structures. *Materials Science and Engineering: A*, 528 (24), 7423-7431.
- Vasconcellos, L.M.R.d., Leite, D.O., Oliveira, F.N.d., Carvalho, Y.R. and Cairo, C.A.A., 2010. Evaluation of bone ingrowth into porous titanium implant: histomorphometric analysis in rabbits. *Brazilian oral research*, 24 (4), 399-405.
- Vilaro, T., Colin, C. and Bartout, J.-D., 2011. As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42 (10), 3190-3199.
- Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J.-P. and 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.
- Wang, X., Xu, S., Zhou, S., Xu, W., Leary, M., Choong, P., Qian, M., Brandt, M. and Xie, Y.M., 2016. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. *Biomaterials*, 83, 127-141.
- Wauthle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J.-P. and Van Humbeeck, J., 2015. Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V lattice structures. *Additive Manufacturing*, 5, 77-84.
- Wieding, J., Jonitz, A. and Bader, R., 2012. The effect of structural design on mechanical properties and cellular response of additive manufactured titanium scaffolds. *Materials*, 5 (8), 1336-1347.
- United Nations. 2019. World population prospects 2019: Highlights (st/esa/ser. A/423)..
- Wysocki, B., Idaszek, J., Szlązak, K., Strzelczyk, K., Brynk, T., Kurzydłowski, K.J. and Świączkowski, W., 2016. Post processing and biological evaluation of the titanium scaffolds for bone tissue engineering. *Materials*, 9 (3), 197.
- Yadollahi, A. and Shamsaei, N., 2017. Additive manufacturing of fatigue resistant materials: Challenges and opportunities. *International Journal of Fatigue*, 98, 14-31.
- Yadroitsev, I., 2009. Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Lambert Academic Publishing.
- Yadroitsev, I., Bertrand, P. and Smurov, I., 2007. Parametric analysis of the selective laser melting process. *Applied surface science*, 253 (19), 8064-8069.
- Yadroitsev, I., Gusarov, A., Yadroitsava, I. and Smurov, I., 2010. Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (12), 1624-1631.
- Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., Bertrand, P. and Smurov, I., 2012. Factor analysis of selective laser melting process parameters and geometrical characteristics of synthesized single tracks. *Rapid Prototyping Journal*.
- Yan, C., Hao, L., Hussein, A. and Young, P., 2015. Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface structures for bone implants fabricated via selective laser melting. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 51, 61-73.
- Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P. and Raymont, D., 2014. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. *Materials & Design*, 55, 533-541.
- Yang, J., Yu, H., Yin, J., Gao, M., Wang, Z. and Zeng, X., 2016. Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting. *Materials & Design*, 108, 308-318.
- Yasa, E. and Kruth, J.-P., 2011. Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. *Procedia Engineering*, 19, 389-395.
- Yuan, L., Ding, S. and Wen, C., 2019. Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review. *Bioactive Materials*, 4, 56-70.

- Yoo, H.W., Ito, S. and Schitter, G., 2016. High speed laser scanning microscopy by iterative learning control of a galvanometer scanner. *Control Engineering Practice*, 50, 12-21.
- Zargarian, A., Esfahanian, M., Kadkhodapour, J. and Ziaei-Rad, S., 2016. Numerical simulation of the fatigue behavior of additive manufactured titanium porous lattice structures. *Materials Science and Engineering: C*, 60, 339-347.
- Zhang, L., Klemm, D., Eckert, J., Hao, Y. and Sercombe, T., 2011. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of a biomedical Ti–24Nb–4Zr–8Sn alloy. *Scripta Materialia*, 65 (1), 21-24.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	İlyas HACISALİHOĞLU
Doğum tarihi:	14 Ağustos 1985
Doğum Yeri:	Trabzon
Uyruğu:	T.C.
Adres:	Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
E-mail:	hacisalihoglu@erzurum.edu.tr
Eğitim	
Lise:	Trabzon Fatih Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2010)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi