
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

MÜHENDİSLİK SERAMİKLERİNİN SLS/M EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Duran KAYA

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2024

ETİK BEYAN

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

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

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

Duran KAYA

13/06/2024

MÜHENDİSLİK SERAMİKLERİNİN SLS/M EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Duran KAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2024

ÖZET

Teknik seramiklerin eklemeli imalatı özellikle tek adımda prosesin gerçekleşmesi seramik eklemeli imalat alanı için önemli bir hedef olarak görülmektedir. Tez çalışmasında hedef malzeme alümina seçilmiştir. Lazer ışını ile toz yataklı ergitme yönteminde yeni bir yaklaşım uygulanarak iki farklı dalga boyunda lazer çifti ile alüminanın eklemeli imalatı çalışılmıştır. Tez kapsamında, iki farklı dalga boyundaki lazer ışınının ayrı ayrı ısı kaynağı olarak tanımlandığı ve alüminanın sıcaklıkla değişkenlik gösteren özelliklerinin dahil edildiği nümerik bir model geliştirilmiştir. Nümerik model ile parametre belirlemeye yönelik proses penceresi geliştirilmiştir. Deneme üretimleri ile nümerik model doğrulanmıştır. Proses parametrelerinin belirlenmesine yönelik çeşitli parametre kombinasyonları ile numuneler üretilmiştir. Yalnızca karbondioksit lazer ile üretilen numunelerin bağıl yoğunluk sonucu yoğun bir numune üretilememesi çift lazer ışınının etkinliğini göstermiştir. Lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi, katman kalınlığı ve ağırlıklı olarak zigzag tarama stratejisinin farklı açılarda uygulanmasıyla numuneler üretilmiştir. Zigzag tarama stratejisinin her bir katmanda 0˚, 45˚, 67˚, 90˚ açılarda rotasyonu, konsentrik içten dışa ve dıştan içe olmak üzere stratejiler kullanılmıştır. İki farklı tarama stratejisi geliştirilmiştir ve en yüksek bağıl yoğunluğa sahip numuneler bu stratejiler kullanılarak elde edilmiştir. Gözenek yapısının açık gözenekli olduğu, kapalı gözenek oranının çok düşük olduğu ölçülmüştür. Lazer-toz etkileşim süresinin daha uzun olan tarama hızlarında veya tarama stratejilerinde bölgesel olarak numune iç yapısında daha yoğun bölgelerin elde edildiği görülmüştür. Çalışmada kullanılan parametreler için uygun ön ısıtma lazer gücünün seçilmesi ile başarılı üretimler yapılabildiği, farklı parametre kombinasyonları için deneysel çalışmaların enerji yoğunluğu ile ilişkilendirilmesi önemlidir.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Seramik eklemeli imalat, alümina, bağıl yoğunluk, fiber lazer, karbondioksit lazer
Sayfa Adedi	:	186
Danışman	:	Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

INVESTIGATION OF THE MANUFACTURABILITY OF ENGINEERING CERAMICS WITH SLS/M ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

(Ph. D. Thesis)

Duran KAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2024

ABSTRACT

Additive manufacturing of technical ceramics, especially the realization of a single-step process, is an important goal for ceramic additive manufacturing. In this thesis study, the target material was chosen as alumina. By applying a new approach in the powder bed melting method with the laser beam, additive manufacturing of alumina was studied with laser pairs at two different wavelengths. Within the scope of this thesis, a numerical model has been developed in which laser beams of two different wavelengths are separately defined as heat sources and the properties of alumina that vary with temperature are included. A process window for parameter determination was developed with the numerical model. The numerical model was verified with experimental studies. Samples were produced with various parameter combinations to determine the process parameters. The fact that a dense sample could not be produced due to the relative density of samples produced only with carbon dioxide laser demonstrated the effectiveness of the double laser beam. Samples were produced by applying laser power, scanning speed, scanning distance, layer thickness, and a zigzag scanning strategy at different angle rotations in each layer. Strategies such as rotation of the zigzag scanning strategy at 0˚, 45˚, 67˚, and 90˚ angles, concentric inside-out and outside-in, were used. Two different scanning strategies were developed, and samples with the highest relative density were obtained using these strategies. It has been measured that the pore structure is open porous, and the closed pore ratio is meagre. It has been observed that denser regions are obtained locally in the sample's internal structure at scanning speeds or strategies with longer laser-powder interaction time. It is important to correlate experimental studies with energy density for different parameter combinations, as successful production can be achieved by selecting the appropriate preheating laser power for the parameters used in the study.

Science Code	:	91438
Key Words	:	Ceramic additive manufacturing, alumina, relative density, fiber laser, carbondioksit laser
Page Number	:	186
Supervisor	:	Prof. Dr. GökhanKÜÇÜKTÜRK

TEŞEKKÜR

Tez çalışması sürecinde tüm ilgi ve desteğini esirgemeyen, araştırma ve deneylerin yapılmasında kıymetli görüş ve tavsiyeleri ile bana ışık tutan, bilgi ve deneyimlerinden faydalanma şansı verdiği için saygıdeğer hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Hayatımın her aşamasında her türlü teşvik ve özveriyi gösteren, maddi manevi desteğini eksik etmeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Arkadaşım, Dr. Mohamed Eid Saied ABDELMOULA'ya tez çalışmalarım sırasında verdiği destek ve yardımları için teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında, görev yaptığım Gazi Üniversitesi Proje Koordinasyon Uygulama ve Araştırma Merkezi müdürü Prof. Dr. Elçin ÖZGÜR BÜYÜKATALAY ve çalışma arkadaşlarım Berrin TUZCU, Senem UYSAL ve Yusuf YILDIRIM'a, bana sağladıkları esnek çalışma ortamı ile tez çalışmalarına zaman ayırabildiğim için teşekkür ederim.

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2022-7853 nolu poje kapsamında desteklenmiştir. Üniversitemin sağlamış olduğu bu maddi destek için ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR 5

2.1. Mühendislik Seramikleri 5

2.2. Seramik Malzeme Kullanan Eklemeli İmalat Teknolojileri 7

2.2.1. Bağlayıcı püskürtme 7

2.2.2. Malzeme ekstrüzyonu 8

2.2.3. Malzeme püskürtme (Material Jetting, MJT) 9

2.2.4. Tabaka laminasyonu (Sheet Lamination, SHL) 9

2.2.5. Tekne-fotopolimerizasyonu (Vat Photopolymerization, VPP) 10

2.2.6. Yönlendirilmiş enerji biriktirme (Directed Energy Deposition, DED) 10

2.2.7. Toz yatağı füzyonu (Powder Bed Fusion, PBF) 10

2.3. Alümina Malzeme Kullanan PBF ile Yapılmış Çalışmalar 11

3. YÖNTEM 17

3.1. Sayısal Modelleme 17

3.1.1. Matematiksel modelin geliştirilmesi 18

3.1.2. Geometrik model ve ağ yapısı (mesh) 21

3.1.3. Ağ (mesh) yoğunluk analizi 22

3.1.4. Modelin doğrulanması 24

3.1.5. UDF kodunun çalıştırılması 25

Sayfa

3.1.6. Proses penceresi oluşturulması 27
3.2. Deneysel Çalışmalar 27
3.2.1. Malzeme 27
3.2.2. Alttaş plakası 29
3.2.3. Üretim sistemi 30
3.2.4. Deneme Üretimleri 31
3.3. Karakterizasyon Çalışmaları 31
3.3.1. Bağıl yoğunluk ölçümü ve gözenek analizi 31
3.3.2. FE-SEM görüntüleme 33
3.3.3. X-RD ölçümleri 33
3.3.4. Basma testi 33
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 35
4.1. Parametre Belirleme Denemeleri ve Sonuçları 35
4.1.1. Nümerik analiz sonuçları 35
4.1.2. Deneme üretimi parametreleri belirleme çalışmaları 47
4.1.3. İlk deneme üretimi 49
4.1.4. Numune karakterizasyonu 50
4.2. Proses Penceresi Nümerik Analiz Sonuçları 55
4.3. Numune Üretimleri 60
4.4. X-RD Analizi 76
4.5. Mikro Görüntülerin İncelenmesi 77
4.6. Bağıl Yoğunluk Sonuçları 81
4.6.1. Helyum piknometre ölçümleri 81
4.6.2. Mikro tomografi görüntüleme ve analizi sonuçları 82

Sayfa

4.7. Basma Testi Sonuçları 89

5. SONUÇ ve ÖNERİLER 93

KAYNAKLAR 97

ÖZGEÇMİŞ 185

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Endüstride kullanılan teknik seramik malzemeler 5

Çizelge 3.1. Alüminanın fiziksel ve termal özellikleri 20

Çizelge 3.2. Geometrik model boyutları 22

Çizelge 3.3. Ağ yoğunluk analizi sonuçları 23

Çizelge 3.4. Proses penceresi geliştirilmesinde kullanılan değişken parametreler 27

Çizelge 3.5. Alümina tozunun (d50=37 µm) parçacık dağılım boyutları 28

Çizelge 3.6. Alümina malzemesi teorik malzeme özellikleri 28

Çizelge 3.7. Kullanılan lazerlerin özellikleri 31

Çizelge 3.8. Üretimlerde kullanılan parametreler 31

Çizelge 4.1. Katman kalınlığı 20 µm ve ışın hızı 1000 mm/s parametre seti 35

Çizelge 4.2. Katman kalınlığı 20 µm ve tarama hızı 750 mm/s parametre seti 36

Çizelge 4.3. Katman kalınlığı 20 µm ve tarama hızı 500 mm/s parametre seti 37

Çizelge 4.4. Katman kalınlığı 30 µm ve tarama hızı 1000 mm/s parametre seti 37

Çizelge 4.5. Katman kalınlığı 30 µm ve tarama hızı 750 mm/s parametre seti 38

Çizelge 4.6. Katman kalınlığı 30 µm ve tarama hızı 500 mm/s parametre seti 39

Çizelge 4.7. Tarama aralığı incelemesi için fiber lazerin tek başına uygulandığı parametreler 43

Çizelge 4.8. Tarama aralığı incelemesi için çift lazerin birlikte uygulandığı parametreler 45

Çizelge 4.9. Deneme üretimi simülasyon parametreleri kontur görünümleri 48

Çizelge 4.10. Farklı tarama mesafeleri için ergime konturları 49

Çizelge 4.11. Deneme üretimi parametreleri. 50

Çizelge 4.12. Proses penceresi parametreleri 55

Çizelge 4.13. Birinci grup simülasyon parametreleri ve en yüksek sıcaklık [K] sonuçları 57

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.14. İkinci grup simülasyon parametreleri ve en yüksek sıcaklık [K] sonuçları 58

Çizelge 4.15. Deneme üretimlerinde kullanılan parametreler 60

Çizelge 4.16. Grup I üretim parametreleri 61

Çizelge 4.17. Grup II üretim parametreleri 63

Çizelge 4.18. Grup III üretimi parametreleri 65

Çizelge 4.19. Grup IV üretimi parametreleri 67

Çizelge 4.20. Grup V üretimi parametreleri 68

Çizelge 4.21. Grup VI üretim parametreleri 69

Çizelge 4.22. Grup VII parametreleri 71

Çizelge 4.23. Grup VIII parametreleri 72

Çizelge 4.24. Grup IX parametreleri 75

Çizelge 4.25. Grup X parametreleri 76

Çizelge 4.26. Numunelerin FE-SEM mikro fotoğrafları 78

Çizelge 4.27. Bağıl yoğunluk ve gözenek yoğunluğu verileri 84

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Geliştirilen yöntemin şematik gösterimi..... 18

Şekil 3.2. Çalışmada model geometrisi ve hesaplama alanı (ağ)..... 22

Şekil 3.3. Ağ yoğunluk analiz sonuçları 23

Şekil 3.4. Sayısal model çözüm prosedürünün akış şeması..... 24

Şekil 3.5. Geliştirilen modelin doğrulama sonuçları: (a) Zhang vd. (2018) tarafından sayısal modelden elde edilen maksimum sıcaklığın karşılaştırılması. 25

Şekil 3.6. Sayısal modelden elde edilen sıcaklık konturu [68] (a) ile Wiri ve diğerleri (2010) tarafından bildirilen kontur (b). 25

Şekil 3.7. UDF kodunun çalıştırılmasına ait kontur görüntüleri..... 26

Şekil 3.8. Alümina tozunun (d50=95 μm) parçacık dağılım grafiği..... 28

Şekil 3.9. Alümina (d50=37 μm) tozunun FE-SEM mikro fotoğrafı 29

Şekil 3.10. Üretimlerde kullanılan alttaş plakası 29

Şekil 3.11. Üretimde kullanılmak üzere geliştirilen deneysel düzenek..... 30

Şekil 4.1. Katman kalınlığı 20 μm ve tarama hızı 1000 mm/s sıcaklık zaman grafiği... 36

Şekil 4.2. Katman kalınlığı 20 μm ve tarama hızı 750 mm/s sıcaklık zaman grafiği..... 36

Şekil 4.3. Katman kalınlığı 20 μm ve tarama hızı 500 mm/s sıcaklık zaman grafiği..... 37

Şekil 4.4. Katman kalınlığı 30 μm ve tarama hızı 1000 mm/s sıcaklık zaman grafiği... 38

Şekil 4.5. Katman kalınlığı 30 μm ve tarama hızı 750 mm/s sıcaklık zaman grafiği..... 38

Şekil 4.6. Katman kalınlığı 30 μm ve tarama hızı 500 mm/s sıcaklık zaman grafiği..... 39

Şekil 4.7. Tek yönlü boyuna tarama stratejisi sıcaklık kontur gösterimi..... 40

Şekil 4.8. Tek yönlü boyuna tarama stratejisi sıcaklık zaman grafiği 40

Şekil 4.9. Zig zag tarama stratejisinde sıcaklık zaman grafiği 41

Şekil 4.10. Tek lazer ışını ile tarama aralıklarının gösterimi..... 42

Şekil 4.11. Çift lazer ışını ile tarama aralıklarının şematik gösterimi 42

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.12. Ergime kontur gösterimi, tarama mesafesi 1D, tek lazer, (19,7 µm kanal genişliği, 20,26 µm derinlik)..... 43

Şekil 4.13. Sıcaklık zaman grafiği, (tarama mesafesi: 1D, tek lazer)..... 43

Şekil 4.14. Ergime kontur gösterimi, (tarama mesafesi 0,5D, tek lazer, kanal genişliği 20,45 µm, derinlik 20,26 µm)..... 44

Şekil 4.15. Sıcaklık zaman grafiği, (tarama mesafesi: 0,5D, tek lazer)..... 44

Şekil 4.16. Ergime kontur gösterimi, tarama mesafesi 1,5D, çift lazer, (kanal genişliği: 51,59 µm, derinlik: 20,68 µm)..... 45

Şekil 4.17. Sıcaklık zaman grafiği, (tarama mesafesi 1,5D, çift lazer)..... 46

Şekil 4.18. Ergime kontur gösterimi, tarama mesafesi 1D, çift lazer derinlik: 20,53 µm 46

Şekil 4.19. Sıcaklık zaman grafiği, tarama mesafesi 1D, çift lazer 46

Şekil 4.20.CO2 lazer ile elde edilen ön ısıtma sıcaklık grafiği..... 48

Şekil 4.21. İlk deneme üretimi numuneleri: (a) 1 numaralı parametre seti numunesi, (b) 2 numaralı deneme üretimi parametre seti numunesi..... 50

Şekil 4.22. Numune A ve B için bağıl yoğunluk ölçüm sonucu..... 51

Şekil 4.23. Numunelerin FE-SEM mikro fotoğrafları, (a) Numune A 40x büyütme, (b) Numune A 500x büyütme, (c) Numune B 40x büyütme (d) Numune B 500x büyütme..... 52

Şekil 4.24. Numune A ve toz malzemenin X-RD grafiği..... 53

Şekil 4.25. (a) Yves-Christian ve diğerleri (2010) tarafından geliştirilen ön ısıtma sistemi kullanılarak basılan Alümina-zirkonya numunesinin SEM görüntüsü (b) tez çalışmasında geliştirilen ön ısıtma sistemi kullanılarak basılan saf Alümina malzemeden A numunesinin FE-SEM görüntüsü..... 54

Şekil 4.26. Liu ve diğerleri (2015) çalışmalarına ait (a) toz yatağı görüntüsü, (b) parça ile sinterlenmiş tozların görüntüsü, (c) tez çalışmasında üretilen numuneler..... 55

Şekil 4.27. Birinci grup parametre seti ile elde edilen en yüksek sıcaklık ilişkisi değerleri 58

Şekil 4.28. İkinci grup parametre seti ile elde edilen en yüksek sıcaklık ilişkisi değerleri 59

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.29. Grup I deneme üretimi numuneleri 62

Şekil 4.30. Grup II üretimi numuneleri 64

Şekil 4.31. Grup III üretimi numuneleri 66

Şekil 4.32. Grup IV üretimi numuneleri 67

Şekil 4.33. Grup V üretimi numuneleri 68

Şekil 4.34. Grup VI üretimi numuneleri 70

Şekil 4.35. Grup VII numuneleri 71

Şekil 4.36. Grup VIII numuneleri 73

Şekil 4.37. Grup IX numuneleri 75

Şekil 4.38. Grup X numuneleri 76

Şekil 4.39. On numaralı numunelerin X-RD grafiği 77

Şekil 4.40. Sadece CO2 lazeri ile üretilen 16.1 numaralı numuneye ait FE-SEM görüntüsü 81

Şekil 4.41. Numunelerin helyum piknometre sonuçları 82

Şekil 4.42. 10.1 numunesinin mikro tomografi ile taranması sonucu elde edilen katı model 83

Şekil 4.43. 10.1 numaralı numunenin üst ve yan görünüşün kesit görünümü 83

Şekil 4.44. Mikro tomografi ile elde edilen bağıl yoğunluk dağılımı 84

Şekil 4.45. 20.3 numaralı numunenin üst ve yan görünüşün kesit görünümü 86

Şekil 4.46. 21.3 numaralı numunenin üst ve yan görünüşün kesit görünümü 87

Şekil 4.47. 22.3 numaralı numunenin üst ve yan görünüşün kesit görünümü 88

Şekil 4.48. 23.3 numaralı numunenin üst ve yan görünüşün kesit görünümü 89

Şekil 4.49. Basma testi numunesi 90

Şekil 4.50. Basma testi gerilim gerinim grafiği 90

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
˚C	Santigrad derece
kPa	Kilopaskal
µm	Mikrometre
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
s	Saniye

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
Eİ	Eklemeli imalat
FE-SEM	Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopisi
PBF	Toz yatağı ergitme
UDF	Kullanıcı tanımlı fonksiyon
X-RD	X ışını krınımı

1. GİRİŞ

Seramik malzemeler, yüksek mekanik mukavemeti ve sertliği, iyi termal ve kimyasal kararlılığı, yüksek ısıl, optik, elektriksel ve manyetik performansına sahip olmalarından ötürü çok yönlü ve geniş malzeme özelliklerine sahiptir. Üstün malzeme özellikleri ile seramikler; makine, elektronik, kimya endüstrisi, havacılık ve biyomedikal mühendisliği gibi birçok sektörde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır.

Seramik malzemeden parça üretimi genellikle bağlayıcılar ve stabilizatörler ile karıştırılmış bir toz karışım/bulamaç ile ham mukavemetli parçalar üretilmektedir. Daha sonra, oluşturulan ham mukavemetli parçanın preslenmesi ve özel fırınlarda sinterlenmesi ile istenilen fonksiyonel ürün elde edilmektedir. Geleneksel seramik şekillendirme teknolojilerinde, genellikle şerit döküm, bant dökümü, presleme ve toz enjeksiyon kalıplama yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak, seramik esaslı malzemelerin geleneksel tekniklerle şekillendirilmesinde yüksek takım aşınması, yüksek işçilik becerisi gerektirmesi ve yüksek maliyetler gibi sınırlamalar bulunmaktadır. Ayrıca, ham mukavemetli parçaların sinterlenmesinden kaynaklanan çekmeyi önlemek için kontrollü bir işleme ihtiyaç duyulmaktadır. Seramik eklemeli imalat, hem işlenebilirlik hem de şekillendirilebilirlik gibi seramiğin doğal sınırlamalarının üstesinden gelebilecek bir teknoloji olarak vurgulanmaktadır. Belirtilen bu zorlukların/sınırlamaların üstesinden gelebilmek için, literatürde, karmaşık şekilli seramik parçaların üretiminde eklemeli imalat (Eİ) tekniklerinin kullanılabileceği bilinmektedir.

Eİ yöntemleri ile yüksek maliyetli takımlar veya çok kademeli üretim süreçlerine ihtiyaç olmaksızın, seramik malzemeden parçaların üretimi mümkün olmaktadır. Böylece üretim maliyetleri ve tedarik süresinin azalmasının yanında Eİ yöntemlerinde tasarım serbestliği önemli bir avantaj sağlamaktadır. Seramik endüstrisi, Eİ'nin yaygınlıkla kullanıldığı metal ve polimer Eİ yöntemlerine kıyasla, teknik zorluklardan ötürü daha yavaş ilerleme kaydedilen bir alandır. Ancak, yüksek yoğunluklu parçaların üretilebilmesi, yüzey kalitesi, boyutsal tamlık gibi üretim çıktısı özelliklerinin eldesinde doğru proses ve parametrelerinin seçiminden ziyade, kullanılan malzemenin özelliklerinin de önemli ölçüde etkili olduğu bilinmektedir. Bu nedenle seramik malzemelerin Eİ ile kullanımına yönelik çalışmaların artırılması gerekmektedir.

Eİ terminolojisi alanında, uluslararası kabul görmüş ilkelere dayanılarak yayınlanan, yöntemleri, Uluslararası Standartlar Teşkilatı (International Organization for Standardization, ISO) ve Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu'nun (American Society for Testing and Materials, ASTM International) birlikte yayınlamış oldukları ISO/ASTM 52900 numaralı standardı ile sınıflandırılmıştır. Güncel ve yürürlükte olan ISO/ASTM-52900:2021 standardına göre Eİ teknolojileri yedi ana gruba ayrılmıştır. Belirlenen yedi proses kategorisi; bağlayıcı püskürtme (binder jetting, BJT), yönlendirilmiş enerji biriktirme (directed energy deposition, DED), malzeme ekstrüzyonu (material extrusion, MEX), malzeme püskürtme (material jetting, MJT), toz yatağı füzyonu (powder bed fusion, PBF), tabaka laminasyonu (sheet lamination, SHL), tekne-fotopolimerizasyonu (vat photopolymerization, VPP) olarak belirlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalara göre, seramik Eİ yöntemleri tek adımlı veya çok adımlı olarak sınıflandırılabilmektedir. Bu metotlardan sadece PBF ve DED yöntemlerinin seramik Eİ ile tek adımda kullanılabildiği anlaşılmaktadır.

Seramik malzemelerin Eİ ile üretiminde proses, malzeme özellikleri ve toz-ışın etkileşimi konularının iyileştirilmesi gerekmektedir. Literatür incelendiğinde, özel toz hazırlama süreçleri içermeyen, alümina malzemenin doğrudan PBF yöntemlerinde kullanımına yönelik çalışmaların olmadığı görülmüştür. Tez çalışması kapsamında mühendislik seramiklerinden alümina tercih edilmiştir. Üretim yöntemi olarak ise tek adımlı Eİ yöntemlerinden PBF yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada iki farklı tipte, dolayısıyla iki farklı dalga boyunda lazer ışınının toz yatağını taramasıyla, yüksek yoğunluğa sahip parça üretimi sağlayabilen bir yöntem önerilmektedir. Önerilen bu yöntem ile PBF tekniğinde seramik Eİ sürecinin iyileştirmesi amaçlanmaktadır. Kullanılan lazer ışınlarından ilki karbondioksit lazerdir. Oksit seramikler ile etkileşiminde, geniş bir dalga boyuna sahip olmasıyla malzemede yüksek emilim sağlaması sebebi ile tercih edilmiş olan karbondioksit lazer, toz yatağına serilen alümina tozunun ön ısıtmasını sağlanmaktadır. Çok kısa bir zaman farkı ile fiber lazer aynı noktadan itibaren toz yatağına yönlendirilmektedir. Böylece toz yatağına ilk olarak malzeme tarafından emilimi daha yüksek olan karbondioksit lazer, peşinden de fiber lazer uygulanmaktadır. Fiber lazerin uygulanmaya başlamasıyla ön ısıtılmış toz malzeme ergitilerek tam yoğunluklu veya tam yoğunluğa yakın parça üretimi hedeflenmiştir. Seramik malzemelerin yüksek ergime sıcaklıklarına sahip olmasından ötürü yüksek enerji yoğunluğuna sahip ısı kaynağı kullanılmaktadır. Lazer ışınının yüzeye temas etmesiyle kısa sürede ani sıcaklık artışından ötürü ısıl şok ve çatlaklar oluşmaktadır. Isıl çatlakların önüne

geçilmesi için ısıl yükün parçada kademeli olarak artışının sağlanması gerekmektedir. Tez çalışmasında karbondioksit lazer vasıtasıyla ön ısıtma yapılarak çatlak oluşumunun azaltılması hedeflenmektedir. Literatürde, PBF yöntemi ile üretilen seramik parçaların, toz yatağında taranan katı model kesiti dışında kalan tozlarla bağ oluşturmaktadır. Parçanın üretim sonrası yüzey temizleme işlemlerine gerek kalmaksızın tabladan çıkarılması ise tez kapsamında önerilen yöntemin hedeflerinin arasında bulunmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde PBF'nin kullanıldığı çalışmalar kısıtlı sayıda olduğu görüldüğünden, tez çalışmasının bu alanda öncül çalışmalar arasında olduğu düşünülmektedir.

Araştırmanın önemi

- Yüksek katma değerli bir sektör olan seramik endüstrisine yeni bir üretim yönteminin önerilmesi,
- Toz yataklı ergitme yöntemi ile özel toz hazırlama işlemleri yapılmadan, oksit seramiklerden olan alüminanın tek adımlı Eİ ile yüksek yoğunluklu parça üretilebilmesi,
- Toz yatağından parça çıkarılmasının iyileştirilmesi,

olarak belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR

2.1. Mühendislik Seramikleri

Seramik malzemeler, yapısal özellikleri ve endüstriyel uygulamalarda kullanımlarına göre kil, çimento, cam, refrakterler, aşındırıcılar ve teknik seramikler olarak sınıflandırılan inorganik, metalik olmayan malzemelerdir [1]. Endüstride kullanılan teknik seramik malzemeler Çizelge 2.1 ile verilmiştir. Teknik seramikler olarak bilinen seramik grubu ürünler, doğal kaynaklarla elde edilen seramiklerin aksine yüksek saflık oranında üretilebilmektedir. Partikülün dağılımı, tane boyutu ve kimyasal bileşimi gibi toz özelliklerinin kontrol edilebilmesiyle sektörel alanlara göre özelleştirilmiş uygulamaların gereksinimleri karşılayabilecek ihtiyaçta sağlanabilmektedir [2]. Mühendislik seramiklerinin özellikleri incelendiğinde; yüksek sıcaklık direnci, yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı, biyouyumluluk, kimyasal kararlılık, korozyon direnci gibi önemli fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri bulunmaktadır. Üstün malzeme özellikleri, malzemenin sert iyonik ve kovalent bağlara dayanan atomik yapılarının bir sonucu olduğu bilinmektedir [3]. Bu özelliklerin ihtiyaç duyulduğu yapısal uygulamalarda, % 95 oranında bağıl yoğunluk gerekirken, zırh yapımı gibi bazı özel uygulamalar için ise % 98 oranında bağıl yoğunluk gerekmektedir [4].

Çizelge 2.1. Endüstride kullanılan teknik seramik malzemeler

Oksitler	Karbürler	Nitrürler
Alüminyum oksit Zirkonyum dioksit Alüminyum titanat Magnezyum oksit Kurşun zirkonat titanat Silikatlar - Silisyum dioksit - Magnezyum silikat - Mullit	Boron karbür Silisyum karbür Tungsten karbür	Silisyum nitrür Silisyum aluminyum oksinitrür Alüminyum nitrür Boron nitrür

Teknik seramikler kimyasal yapılarına göre alümina (Al_2O_3) ve zirkonya (ZrO_2) gibi metal oksitler, karbürler, nitrürler veya boritler gibi oksit olmayanlar olarak sınıflandırılmaktadır [5]. Eİ yöntemlerinde kullanılan seramik malzemeler arasında, diğer seramiklere kıyasla

nispeten düşük maliyet ve düşük sinterleme sıcaklığından ötürü alümina ve zirkonya yaygın olarak tercih edilmektedir [1].

Seramik şekillendirme yöntemleri, ticari üretim ölçeğinde kullanılan presleme, ekstrüzyon, slip döküm, şerit döküm, jel döküm ve enjeksiyon kalıplama yöntemleri olmak üzere iyi bilinen teknolojilerdir [4, 6]. Seramik malzemeler için kullanılan geleneksel üretim teknikleri, genellikle iki boyutlu tasarım özgürlüğüne izin vermektedir. Tasarım detayları arttıkça, karmaşık ve pahalı kalıplar gerektirmektedir [7]. Presleme ve ekstrüzyon ile diskler, çubuklar veya borular gibi basit geometriye sahip parçalar üretilmektedir [2].

Slip döküm [8], jel döküm [9, 10] ve enjeksiyonlu kalıplama [11, 12] yöntemleri, seramik malzemenin kullanıldığı diğer geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha fazla geometrik tasarım ve üretim özgürlüğü sağlamaktadır. Ayrıca, teknik seramiklerin yüksek aşınma direnci nedeniyle, zaman sarfiyatı ve işlemenin ekonomik maliyeti yüksektir. Üretim maliyetinin yaklaşık % 80'i işleme maliyetleri olduğu literatür verilerinden anlaşılmaktadır [4, 13].

Mühendislik seramiklerinin uygulamaları incelendiğinde; gözeneklilik ihtiyacı olan hidroksiapatit yapılar [14], kemik yapıları [15] ve seramik köpükleri [16] üretilmektedir. Entegre soğutma kanalları olan türbin kanatlarının üretiminde kullanılan kalıpların üretimi [17], aşınma ve korozyon direncinin artırılması için titanyum [18, 19] ve çelik malzeme üzerine [20 -22], biyouyumluluk özelliği kazandırılmak için seramik kaplama uygulanmaları örnek verilebilir. Alüminanın endüstriyel uygulamalarda kullanımı incelendiğinde, insan sağlığı ve can güvenliği uygulamaları, ortopedik implantlar, implante edilebilir eklem parçaları, hafif vücut zırhı, diş implantları ve doku iskelelerinin önemli düzeyde olduğu görülmektedir. Medikal sektör haricinde yer alan endüstriyel uygulamalarda ise aşınmaya ve korozyona dayanıklı ekipmanlar, refrakterler, mikroçipler, yalıtkanlar ve elektrik bağlantı elemanlarında kullanıldığı bilinmektedir [23].

Alümina kullanımının endüstride önemli bir pazar payı bulunmaktadır. Geleneksel yöntemlerle seramik malzemelerin işlenmesinde karşılaşılan zorluklar ve yüksek maliyetlerin meydana gelmesi, çok adımlı üretim süreçlerinin olması, karmaşık geometrilerin üretimi gibi sınırlılıklar bulunmaktadır [24]. Seramik Eİ'nin bahse konu

zorlukların üstesinden gelinmesi için tek adımda Eİ yöntemleri üzerinde odaklanılması gerektiği anlaşılmaktadır.

2.2. Seramik Malzeme Kullanan Eklemeli İmalat Teknolojileri

Eİ, üretimi yapılacak üç boyutlu katı modelinin özel yazılımlar ile işlenerek katman katman üretilmesi prensibine dayanmaktadır. Seramik malzemelerin yapısı nedeniyleEİ ile üretim yapılmasında da zorluklar taşımaktadır.

ISO/ASTM 52900:2021 standardına göre Eİ prosesleri yedi kategoride incelenmiş ve malzeme türlerine göre tek adımlı ve çok adımlı olarak sınıflandırılmış ve liste olarak verilmiştir [25]:

- Bağlayıcı püskürtme (Binder Jetting, BJT)
- Yönlendirilmiş enerji biriktirme (Directed Energy Deposition, DED)
- Malzeme ekstrüzyonu (Material Extrusion, MEX),
- Malzeme püskürtme (Material Jetting, MJT)
- Toz yatağı füzyonu (Powder Bed Fusion, PBF)
- Tabaka laminasyonu (Sheet Lamination, SHL)
- Tekne-fotopolimerizasyonu (Vat Photopolymerization, VPP).

Sınıflandırılan Eİ teknikleri seramik malzemelerin üretimi doğrultusunda devam eden bölümlerde genel olarak açıklanmaktadır.

2.2.1. Bağlayıcı püskürtme

BJT yönteminde, sıvı haldeki bağlayıcı malzemenin, kaba seramik tozundan oluşan bir toz yatağında, iki boyutlu yüzeye seçimli olarak püskürtülmesiyle üç boyutlu yapı üretilmektedir. Yöntemin üretim mekanizması; püskürtülen bağlayıcının serilmiş olan kaba taneli toz partikülleri arasında kılcallık yoluyla nüfuz ederek birleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Toz serimi ve bağlayıcı püskürtülmesi, ardışık olarak ham mukavemetli yapı oluşturulana kadar devam ettirilmektedir. Üretilen ham mukavemetli parça toz yatağından

alındıktan sonra bağlayıcı giderme ve/veya yoğunlaştırma gibi ikincil işlemlere tabi tutulmaktadır [1, 26].

Seramik malzemeler dışında, toz formunda olan polimer ve metal malzemeler de bu yöntemde hammadde olarak kullanılabilmektedir [27]. Toz yatağı içerisinde bağlayıcı püskürtülmeyen tozlar destek yapısı görevi görmektedir. Böylece gözenekli veya iç deliğe sahip olan yapılar üretilebilmektedir. Üretilen parçaların bağıl yoğunluğu % 20 - % 70 aralığında değişmektedir [28, 29]. Bağlayıcı doygunluğu artırılmasıyla bağıl yoğunluk artışı sağlanabilmektedir. Ayrıca soğuk izostatik presleme, ılık izostatik presleme veya infiltrasyon yöntemleri ile ikincil işlem yapılması durumunda bağıl yoğunluk artırılabilmektedir [30-33]. BJT yönteminde, temel olarak herhangi bir ısı kaynağı gerektirmeksizin parça oluşturulduğundan, üretim sonrası atık miktarı düşük olan çevreci bir yöntemdir [34].

2.2.2. Malzeme ekstrüzyonu

Malzemenin ekstrüzyonu prensibi ile çalışmakta olan Eİ ile makro ölçekli boyutlarda ticari ürünlerin imalatı için kullanılan bir yöntemdir. Ekstrüzyonda, katı, yarı katı veya sıvı malzemeden oluşan sürekli bir filaman, belirli bir yolu izleyerek bir nozuldan ekstrüde edilir [35].

Ekstrüzyon bazlı seramik malzemenin kullanıldığı üretim süreçleri arasında Ergiyik Malzeme Biriktirme, Ekstrüzyon Serbest Form İmalatı, Robocasting, Termoplastik 3D Baskı ve Dondurarak Form Ekstrüzyon İmalatı yöntemleri yer alır [36, 37]. Ekstrüzyon bazlı işlemler, bu teknikte kullanılan ekipmanların maliyetinin düşük olması nedeniyle yaygın kullanıma sahiptir. Ayrıca farklı malzemelerin kullanılması mümkün olması ve imalat sürecindeki malzeme kayıpları düşük olması önemli avantajlar olarak sıralanmaktadır [36]. Ekstrüzyon temelli Eİ, seramik ve metal malzemeler için yaygın olmamakla beraber literatürde bu yönteme olan ilgi artış eğilimindedir.

Düşük viskoziteli (genellikle 10 Pa·s'nin altında) bulamaçların ve seramik parçaların Eİ ile üretiminde bulamaçların ekstrüzyonunu kullanılmaktadır. Önemli bir alternatif olarak yoğun seramikler ve kompozitler için kullanılan bir ekstrüzyon temelli bir yöntem olan,

mürekkeple yazma olarak da adlandırılan robocasting yöntemi bulunmaktadır [38]. Bu teknik, çözelti halindeki bulamaçlarının katmanlar halinde biriktirilmesine dayanır [35].

Robocasting yönteminde, besleme stoğu malzemesi çok az miktarlarda polimerik bağlayıcı (% 1'den az) içerebilir. Su hacmi oransal olarak % 30'u aşabildiği bilinse de çoğu zaman % 50'den fazla kullanılmaktadır. Besleme stoğunun geri kalanı seramik tozu içermektedir. Son zamanlarda, yağ asidi bazlı süspansiyonlar gibi susuz sıvılar, depolanabilir hammaddeleri formüle etmek için test edilmektedir [39]. Robocasting tekniğinin bir alternatifi, bir süspansiyonun veya çözelti jelin soğutulmuş bir substrat üzerine biriktirildiği ve dondurulmasıyla dondurularak ekstrüzyon üretimidir [7].

2.2.3. Malzeme püskürtme (Material Jetting, MJT)

MJT sırasında, seramik parçacıklar ve bağlayıcı içeren bir süspansiyonun damlacıkları, nozullardan seçici olarak püskürtülerek katman katman biriktirilir. Damlacıklar alt tabakaya temas ettiğinde bir ısı kaynağı tarafından kurutulur, katılaştırmak için soğutulur veya ham mukavemete sahip yapı oluşturmak için UV ışığıyla kürlenir. Çöken mürekkebin kurutulması ve solventin buharlaştırılması ile yüksek yoğunluklu ham mukavim parçaların üretilmesine olanak tanır. Doğrudan parça üretimi mümkün olmayıp bağlayıcı giderme, sinterleme vb. ikincil işlemleri gerektiren bir yöntemdir [40]. Literatrürde yer alan çalışmalar incelendiğinde ideal geometride ürün elde etmek için bağlayıcı tasarımına, püskürtülen damla ile alt tabaka arasındaki etkileşime ve baskı parametrelerine odaklanmaktadır [41].

2.2.4. Tabaka laminasyonu (Sheet Lamination, SHL)

Seramik malzemelerin SHL ile istenen geometriyi oluşturmak için şerit döküm, ekstrüzyon gibi yöntemlerle üretilen seramik bantların sırayla istiflenmesi, kesilmesi ve yapıştırılması mekanizmasına sahiptir [42-44]. Her katman için, üretilecek parçanın dış hatları ilk olarak bilgisayar kontrollü bir bıçakla veya CO_2 lazerle kesilir. Daha sonra bitişik katmanlar arasındaki yapışmayı artırmak üzere bağlayıcıyı termal olarak etkinleştirmek için yüzeye ısıtılmış bir rulo uygulanır. SHL, düşük sıcaklıkta ve yuvarlanma basıncında çalıştırılır. Bu durumda kırışma (warping) ve delaminasyonla ilgili sorunların en aza indirilmesine yardımcı olmaktadır [1]. SHL'nin dar bir kullanım alanı bulunmaktadır. Al_2O_3 ve SiC ile takım kalıpları, Si_3N_4 polivinil alkol (PVA) ile şerit döküm yoluyla hazırlanan su bazlı LiO_2-

ZrO_2-SiO_2-Al_2O_3 (LZSA) levhalardan cam-seramikten parçaların üretiminde kullanılır. SHL yönteminde son aşama olan dekübasyon sırasında fazla malzemenin parça geometrisinden uzaklaştırılması sırasında yaşanan yüzey kusurlarının oluşması nedeniyle yüzey kalitesi açısından yöntemin sınırlılıkları bulunduğu bilinmektedir.

2.2.5. Tekne-fotopolimerizasyonu (Vat Photopolymerization, VPP)

Üç boyutlu nesne, her iki boyutlu katmanın belirli bir dalga boyundaki radyasyona seçici olarak maruz bırakılmasıyla oluşturulur. Seramik tozu parçacıklarıyla yüksek oranda doldurulmuş organik süspansiyonlar, belirli bir dalga boyundaki ışıkla ışınlanarak katman katman katılaştırılır ve sıvı reçinenin istenen geometride polimerizasyonu sağlanarak parça VPP yöntemleri ile üretilebilmektedir. Sterolitografi (SL) ve doğrudan ışık ile işleme (DLP), VPP altında bilinen yöntemlerdir [45]. Bu yöntemle üretilen ham mukavemetli parçaların da ikincil işlemlerle nihai ürün haline getirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bağlayıcı giderme veya sinterleme işlemleri yapılması gerekmektedir. Ayrıca bir metal polimer ve seramiklerin yanısıra kompozit malzeme üretimi de VPP yöntemleri ile mümkündür [46].

2.2.6. Yönlendirilmiş enerji biriktirme (Directed Energy Deposition, DED)

DED yönteminde, lazer, elektron ışını veya plazma arkı gibi odaklanmış termal enerji kullanılarak, biriktirilen malzemeyi ergiterek parça üretimi sağlanmaktadır. Enerji kaynağı ve malzeme besleme ağzı, bir portal sistemi veya robotik kol kullanılarak yönlendirilir [47] DED yöntemi tek adımlı bir üretim sürecine sahip olması, üretim sonrasında ilave sinterlemeye genellikle gerekli olmaması, hızlı biriktirme oranları ile önemli bir yöntem olarak göze çarpmaktadır. Ayrıca, üretim sisteminde yapılacak nozül ilavesi ile DED aynı anda birden fazla malzemenin biriktirilmesine seramik-seramik ve metal-seramik kompozitlerinin doğrudan üretilmesine olanak tanıyabildiği bilinmektedir [48, 49]. DED yönteminde gerçekleşen yüksek ısıl farklılıklar ve hızlı soğuma hızları ile ısıl çatlaklar oluşabilmektdir [50].

2.2.7. Toz yatağı füzyonu (Powder Bed Fusion, PBF)

Lazer ışınının, toz malzemeyi birleştirmek için toz yatağını katman katman seçici olarak taradığı PBF yöntemi, sinterlenmiş seramik parçaları tek bir adımda elde etmek için

doğrudan lazer sinterleme/ergitme biçiminde uygulanabilir. Burada lazer ışınıyla sinterlenen/ergitilen, düşük ergime sıcaklığına sahip bağlayıcı kullanılmadan, doğrudan seramik malzeme kullanılabilmektedir. İdeal olarak, doğrudan lazerle sinterlemeden sonra ek yoğunlaştırma adımlarına gerek yoktur. Bununla birlikte, teknik seramik malzemelerin doğal özelliklerinden olan çok yüksek ergime sıcaklığı, zayıf ısıl şok direnci ve düşük süneklik, seramiklerin PBF'sini metallere göre önemli ölçüde daha zorlu hale getirmektedir [51]. PBF yöntemi ile üretim sırasında, çok kısa lazer-toz etkileşim süresi, aşırı sıcaklık değişimleriyle birleştiğinde zayıf seramik sinterleme, eksik yoğunlaşma ve çatlak oluşumuna neden olan yüksek termal artık gerilimle sonuçlanma eğilimindedir [52, 53].

2.3. Alümina Malzeme Kullanan PBF ile Yapılmış Çalışmalar

Seramik malzemelerin Eİ ile kullanımı, diğer malzemelerde yaşanan gelişmelere kıyasla araştırılması gereken ve gelişmelere açık bir alan olarak göze çarpmaktadır. Endüstriyel olarak kullanılmaya başlayan Eİ tezgahlarında polimerik ve metalik malzemelerin kullanımı önemli bir aşama kaydetmiştir. Bununla beraber teknik seramiklerin Eİ yöntemlerinde kullanımı ise kısmi bir gelişim göstermiştir. Lazer ışınının kullanıldığı ve doğrudan üretimi içeren teknik seramiklerin kırılgan yapıları, yüksek ergime sıcaklığı, düşük ısıl şok direnci, oksit seramiklerin düşük yoğunlaşma kapasitesi göz önüne alındığında literatürde çeşitli yöntemlerle bu zorlukların aşılması için çalışmalar yapılmıştır.

Wilkes, ve diğerleri (2013), çalışmalarında zirkonya ve alümina tozlarının karışımı ile PBF yöntemini kullanarak numuneler üretmişlerdir. Yöntemde bir karbondioksit lazer ile geniş bir alanın sürekli taranarak ön ısıtılması sonrasında bir fiber lazer ile numune üretimi yapmışlardır. Çalışmada tam yoğun numune üretimi gerçekleştirilirken, ince taneli mikro yapı ve en yüksek 500 MPa eğme dayanımı olan çatlaksız numune üretmişlerdir. Çalışmada ön ısıtma ile sıcaklığın en az 1.600 ˚C olması ile çatlak oluşumunun en aza indirilebileceği önerilmiştir [54].

Juste ve diğerleri (2014) yayımladıkları çalışmalarında oksit seramikler ile lazer toz etkileşiminin önemini vurgulamışlardır. Ticari tezgahlarda kullanılan lazer ışınının dalga boyunun (1.070 nm) oksit seramiklerden olan alümina ile temasında absorpsiyonunun % 10'un altında olduğu, bu hususun ise toz malzemenin lazer enerjisinin emiliminin artırılmasına yönelik girişimler ile PBF yöntemi ile numune üretilebilirliğini göstermişlerdir.

Toz alüminanın, toz karbon takviyesi ile lazer toz etkileşiminin iyileştirilmesi sonucunda % 90 üzerinde bağıl yoğunluğa sahip numune üretmişlerdir. Numunelerde gözenekli yapılar görülmüştür. Bağıl yoğunluk yüksek elde edilmiş olsa da mikro yapının geliştirilmesi ve sıcaklık kontrolü ile bu hususun üstesinden gelinebileceği önerilmiştir [52].

Liu ve diğerleri (2015) çalışmalarında, itriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) (93% +yttria 7%) malzemesinden parça üretilebilmesi için PBF yönteminde bir ön ısıtma tertibatı kullanmışlardır. Önısıtma ve ergitme işlemleri için fiber lazerler kullanmışlardır. Önısıtma için geniş bir alan tarandıktan sonra ergitme lazeri devreye girmektedir. Yaklaşık % 84 oranında bağıl yoğunluk ve ön ısıtma sıcaklığının artışıyla daha az çatlaklı bir yapı elde etmişlerdir. Toz yatağından parçanın alınmasında sinterlenme görüldüğü ergitilip katılaşan parçanın alttaştan sökülmesinde ikincil işlemlere gerekli olduğu açıklanmıştır [55].

Fan ve diğerleri (2018), tek bir tarama hattı boyunca PBF yöntemi ile saf alüminanın mikroyapı gelişimi ve mikro mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında α-Al_2O_3, 250 μm kalınlıklı toz katmanında 100-400 W güç, 300-1000 mm/s tarama hızları, diyot lazerin kullanıldığı ticari bir tezgahta deneysel çalışmalarını yapmışlardır. Çalışma ayrıca nümerik olarak termal sürecin modellenmesini de içermektedir. Çalışmanın sonucunda en yaygın görülen mikroyapının sütunlu dentritik mikro yapı olduğu, lazer enerji yoğunluğunun artışının kolon genişliğini arttığı, bu durumun ise soğuma hızının azalışı ile ilişkilendirildiği raporlanmıştır. Yüksek soğuma hızlarının olduğu numunelerinde ise daha ince yapılar, düşük enerji yoğunluğu ile ilişkilendirmişlerdir [56].

Zheng ve diğerleri (2019), PBF yöntemi ile alüminanın bulamacı hazırlayarak, PBF yöntemi ile atmosfer koruması olmaksızın 1070 nm dalga boyuna sahip lazer ışını ve bir indüksiyon sistemi olan laboratuvar ölçekli tezgah kullanılarak; tek hat, ada ve zigzag tarama stratejisi ile numuneler üretmişlerdir. Çatlak oluşum morfolojisinin enine çatlakların alüminanın yüksek sıcaklık farklarından ve ani sıcaklık değişiminin neden olduğu ısıl şokun oluşturduğu iç gerilmelerden kaynaklandığı, boyuna çatlakların ise kısmen katılaşmadan ve enine çatlakların sapmasından ötürü olduğu belirtilmiştir [57].

Bae ve diğerleri (2020) çalışmalarında, alümina/cam kompozit malzemesini PBF yöntemi ile üretilebilirliğini incelemişlerdir. Fiber lazer (λ=1064 nm) kullanılan bir tezgahta siyah renkli pigmentler ile geliştirdikleri SiO_2–B_2O_3–RO (R = Ba, Zn) cam hamurunun tozu ile

alümina tozu harmanlanarak kullanılmıştır. Alümina takviye oranı en fazla % 60 olduğu belirtilen çalışmada malzeme hazırlama (bilyalı dövme, 110 dev/dak.-3 sa.) ve yoğunlaştırma işlemi (750 °C- 20 dak.) ile çok kademeden oluşan bir süreç izlendiği belirtilmiştir. Alümina takviyesi arttıkça bağıl yoğunluğun % 60'a kadar düşüş sergilediği açıklanmıştır. Yapılan çalışmada çok adımlı bir süreç izlense de bağlayıcı kullanılmadan kompozit yapı PBF ile elde edildiği gösterilmiştir [58].

Verga ve diğerleri (2020), alümina ile sertleştirilmiş zirkonya (ATZ) tozunu fiber lazerin kullanıldığı bir tezgahta PBF ile yöntemi ile incelemişlerdir. Toz hazırlama işlemi sırasında öncelikle zirkonya ve alümina sprey kurutma yöntemiyle hazırlanmış sonrasında ağırlıkça % 0,4 oranında karbon piroliz yoluyla yüzeyde tutundurulmuştur. Yaklaşık % 90 oranında bağıl yoğunluk elde edilirken, 31 MPa eğme dayanımı elde etmişlerdir [59].

Varga ve diğerleri (2021), alümina ile TiC'in hacmen % 10 oranında hazırlanan karışım, PBF yöntemi ile bir fiber lazer kullanarak numune üretmişlerdir. Üretilen numunelerde eğme dayanımını en yüksek 232 MPa elde etmişlerdir. Ayrıca açık havada 900 ˚C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulan numunelerin, üretimin doğasında olan çatlak oluşumunun TiC'in rutil (TiO_2) dönüşümü ile çatlakların giderilebildiğini göstermişlerdir [60].

Liu ve diğerleri (2021) çalışmalarında $Al_2O_3/GdAlO_3/ZrO_2$ üçlü ötektik seramik karışımını kullanmışlardır. DED yöntemi ile tek aşamalı ergiyik büyümesine dayalı olarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklıklar altındaki ısıl stabilitesini araştırmışlardır. Üretimde kullanılan tezgah karbondioksit lazer ışını ile eş eksenli toz besleme ünitesine sahip olduğu ve üretim öncesi toz hazırlama işlemine tabi tutulduğu belirtilmiştir. Üretilen numunelerin parlatma sonrasında deliklerin varlığı göze çarpmış olduğu belirtilmiştir. Bu husus, çok kristalli yapılarda, yüzey serbest enerjisinin minimum tutulması amacıyla yüzey alanını düşürme fenomeninden kaynaklandığı vurgulanmıştır. Numunelerin ısıl kararlılıklarında ise en düşük ergime sıcaklığına sahip karışım öğesinin % 80 değerinde bile ısıl kararlığı koruduğu belirtilmiştir [61].

Abelmoula ve diğerleri (2022) yaptıkları çalışmada alümina tozu ve hacmen % 0,1 karbon karışımı ile hazırladıkları toz malzemeyi, PBF yöntemi kullanarak nümerik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Proses parametrelerinden lazer ışın gücü 95 W, lazer tarama hızı 200 mm/s, tarama mesafesi 50 µm, katman kalınlığı 100 µm sabit tutularak altı farklı

tarama stratejisi uygulamışlardır. Kullanılan tarama stratejilerinden ada tarama stratejisi ile en yüksek bağıl yoğunluğun % 87,8'e erişebilen numuneler elde ettiklerini belirtmişlerdir. Diğer tarama stratejilerinde % 67- % 75 arasında değişen bağıl yoğunluğa erişildiği raporlanmıştır. Ayrıca yeni bir tarama stratejisi de önerilmiş ancak ticari tezgahlarda şimdilik deneysel çalışmasının yapılamayacağı öngörülmüştür [62]. Aynı araştırmacıların 2024 yılında yayımlanan başka bir çalışmasında, toz hazırlanması sürecinin, tozun lazer ile etkileşiminde absorpsiyonunun artırılmasının önemini göstermişlerdir. Deneysel çalışmalarında karbon takviyeli alümina toz ile sprey kurutma (spray drying) yapılarak PFB tekniğini kullanmışlardır. Nümerik ve deneysel çalışmalarında lazer gücü ve tarama hızlarının değişken olarak kullanılarak üretilen numunelerin bağıl yoğunluklarını ölçmüşlerdir. En yüksek bağıl yoğunluk elde edilen parametrelerin 400 mm/s tarama hızı, 210 W lazer gücü ve 30 µm tarama aralığı kullanılarak % 94,5 bağıl yoğunluğa ulaşılabileceğini göstermişlerdir. Mekanik olarak basma testi uygulanan numunelerde, 140 MPa civarında dayanım ölçmüşlerdir. Bu dayanım, alüminanın ham mukavemeti ile kıyaslandığında düşük değerlerde bir sonuç elde etmişlerdir. Mekanik dayanımın artırılmasında gelişime açık bir alan olduğu belirtilmektedir [63].

Pfeiffer ve diğerleri 2022 yılında yaptıkları bir çalışmada ise alüminanın absorpsiyonu artıracak bir çözüm önerisi ile çatlak oluşumunu azaltacak bir öneri geliştirmişlerdir. Çalışmalarında indirgenmiş bir titanyum oksit katkı maddesinin ($TiO_2{-}x$) alümina ile farklı oranlarda karıştırılmasıyla üretimler yapmışlardır. Denemeler sırasında 532 nm dalga boyuna sahip lazer ışını ile sonuç alamadıklarını belirtmişlerdir. Bu nedenle 1.070 nm dalga boyuna sahip bir fiber lazer kullanmışlardır. PBF ile gerçekleşen üretimler sonucunda numune yapısında yüksek termal şok davranışına sahip alüminyum titanat oluşumu gözlemişlerdir. Üretilen numunelerde % 96,5 bağıl yoğunluk, 346,6 MPa bası dayanımı ve 90,2 GPa Young modülü ölçmüşlerdir. Numunelerin çatlak oluşumu azaltılmış ve %50 mol (%43,4 hacmen) $TiO_2{-}x$ içeren tozlar kullanılarak üretilebildiği anlatılmıştır [64].

Xiong ve diğerleri(2023) çalışmalarında tek kademeli olarak PBF yöntemi ile Al_2O_3 ve ZrO_2 seramik tozlarının karışımını, PBF yönteminin bilinen mekanizmasının dışında bir yöntem denemişlerdir. Lazer ışınının odak noktasının üretim yönü doğrultusunda pozitif ve negatif doğrultuda değiştirilmesiyle tek hat boyunca üretimler yaparak mikro yapı ve mekanik dayanımı incelemişlerdir. Mevcut yöntemde odak noktasının değiştirilmesi belirli bir ölçüde mekanik özellikleri iyileştirse de odak mesafesindeki artış sonuçları olumsuz etkilediği

vurgulanmıştır. Lazer odak noktasının dışında üretim yapılması durumunda mikro yapının değişiklik gösterdiği, sıcaklık gradyanlarının azaldığı belirtilmiştir. İnce taneli yapı oluşumu ve kırılma tokluğunun artışı ile sonuçlanabileceğini belirtmişlerdir [65].

Xiong ve diğerleri (2023) çalışmalarında PBF yönteminde tarama hızının, zirkonya ve alümina karışımı kullanarak mikroyapı ve mekanik dayanıma etkisini incelemişlerdir. Üretimde bir fiber lazer kullanmışlardır. Tarama hızının artışı mikroyapıdaki hücrelerin küçülmesine neden olduğu belirtilmiştir. Tarama hızının artışı ayrıca taneler arası dislokasyon sertleşmesine neden olduğu ve yüzey sertliğinin 16,7 GPa ölçüldüğü açıklanmıştır. Mikro yapının ince bir formasyona sahip olduğu belirtilirken, 7.76 $MPa \cdot m^{1/2}$ kırılma tokluğu değeri elde edilmiştir. Çalışmada seramik malzemelerin PBF'sinde mikroyapısal gelişimi incelenmiştir [66].

Zhang ve diğerleri (2024), çalışmalarında zirkonya ve alüminanın karışımını PBF yöntemi ile üretiminde çatlak oluşumunu incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda tek hatlı, çok hatlı ve daha geniş kesitli numunelerdeki çatlakların karakterizasyonu yapmışlardır. Tek seferde taranan bir hattın kısaltılması ile çatlak oluşumunun baskılanabileceğini önermişlerdir. Proses parametrelerini optimize ederek 100 W güç, 100 mm/s tarama hızı, 100 μm tarama aralığı, 3 hat boyunca tarama uzunluğu ile çatlaksız bir Al_2O_3–ZrO_2 ötektik seramik örneği elde etiklerini açıklamışlardır. Üretilen numunelerde ötektik, hücresel ve dentritik yapılar olmak üzere üç tipik mikro yapı tanımlamışlardır [67].

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, alüminanın lazer ışını ile temasında absorpsiyonunun artırılmasına yönelik ikili veya üçlü malzeme sistemlerinin kullanılması, karbon takviyesi, üretim mekanizmasında odak noktasının farklılaştırılması, kullanılan lazer ışınının dalga boyunun farklı kullanımları, kompozit yapı oluşturularak ikincil işlemlerle üretilmiş olan numunenin yoğunluğunu ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmaları göze çarpmaktadır. Tek başına alümina tozunun PBF ile kullanıldığı çalışma literatürde çok sınırlıdır. Alüminanın, özel teknikler ile toz hazırlama süreçleri kullanılmadan, PBF yöntemi ile doğrudan numune üretilebilirliği tez kapsamında ele alınmaktadır.

Literatürde de bilinen alüminanın fiber lazer ile olan düşük absorpsiyon özelliği, toz yatağının absorpsiyonu daha yüksek olduğu bilinen karbondioksit lazer ile ön ısıtmaya tabi tutulmasıyla fiber lazerin numune üretiminde etkinliği artırılması amaçlanmıştır. Ön ısıtma

işlemi fiber lazerden önce ve dar bir alanda uygulanması, üretim sonrasında numunenin sökülmesinde toz yatağında sinterlenmemiş olan tozlar nedeniyle daha kolay bir şekilde elde edileceği öngörülmüştür. Ön ısıtma ile sıcaklık gradyanları her ne kadar azaltılsa da üretilecek numunelerde yöntemin ve malzemenin doğası gereği çatlak oluşumu görüleceği düşünülmektedir. Ayrıca bağıl yoğunluğu yüksek numuneler üretilmesi hedeflenmiştir.

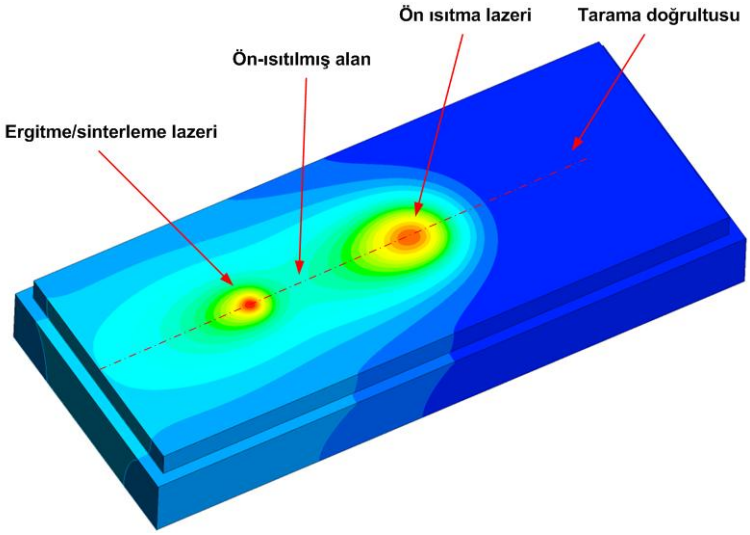
3. YÖNTEM

Tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde nümerik model geliştirilmesi ve deneysel çalışmalar planlanmış ve uygulanmıştır. Sayısal model geliştirilmesi, numune üretimi, numune karakterizasyon tekniklerinden faydalanarak tezin amacı doğrultusunda kullanılan teknikler ve teorik alt yapısı açıklanmıştır.

3.1. Sayısal Modelleme

PBF tekniği kullanılarak numune üretilmesinde uygulanan proses parametreleri elde edilecek ürün açısından büyük önem arz etmektedir. Parametre seçimi nihai ürünü doğrudan etkilemektedir. Enerji kaynağı olarak kullanılan lazer ışınının tarama hızı ve gücü, ardışık tarama yapan lazer ışınlarının merkezleri arası tarama mesafesi, katman kalınlığı ve tarama stratejisi parametreleri bir arada uygulanmaktadır. Uygun parametre değerlerinin belirlenmesi amacıyla sayısal bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model yardımıyla çok sayıda deneysel çalışma yapılmaksızın numune üretimi yapılabilecek parametrelerin belirlenmesinde kılavuz olarak kullanılmıştır.

Çalışmada ısıl gerilimlerin ve çatlakların gelişimini kontrol etmek ve ortadan kaldırmak amacıyla seramik malzemelerin PBF'si için yeni bir ön ısıtma sistemi olan yaklaşım geliştirmiştir. Tozun ön ısıtması için bir CO_2 lazeri kullanılırken, toz parçacıklarının ergitilmesi/sinterlenmesi için bir fiber lazer kullanılmıştır. İki lazer ışını, Şekil 3.1'de gösterilen tarama yolunu izleyerek toz tabakası üzerinde birlikte hareket etmektedir. CO_2 lazeri, toz parçacıklarını önceden ısıtmak için fiber lazerden 0,0001 s önce yüzeye yansıtılmaktadır. Böylece çift lazer ışının kullanımı, yüzeydeki tozun ön ısıtılması sağlamaktadır. Ayrıca, bu ön ısıtma sistemi sıcaklık gradyanını kontrol edip azaltabilir ve bunun sonucunda oluşan termal gerilimi ve çatlakları azaltabileceği düşünülmüştür.



Şekil 3.1. Geliştirilen yöntemin şematik gösterimi

3.1.1. Matematiksel modelin geliştirilmesi

PBF yönteminde birçok girdinin olduğu karmaşık bir sürecin döngüsel olarak uygulanmaktadır. Tüm parametreler kontrol edilebilir değildir ve çok sayıdaki parametrenin kombinasyonu halinde uygulanması sürecin modellemesini zorlaştırmaktadır. Modelin geliştirilmesinde Abdelmoula, M. (2022)'nın kullanmış olduğu model, çift lazer için geliştirilmiştir [68, 69].

Sayısal modelin geliştirilmesinde birtakım varsayımlar yapılmıştır. Bu varsayımlar;

i. Toz yatağı sürekli ve homojendir
ii. Lazer ışın demeti düzenli ve homojendir
iii. Ergiyik havuz yüzeyi düzdür.
iv. Buharlaşma yoluyla ısı ve malzeme kaybı yoktur

İki farklı dalga boyunda farklı lazer ışınından biri ön ısıtma için, diğeri ise toz parçacıklarının ergitilmesi/sinterlenmesi için kullanılmaktadır. Lazer ışınları yüzeyi taradığında, ısı toz parçacıklarına aktarılır. Isı transferini simüle etmek ısı transferini matematiksel olarak tanımlamak için Eş. 3.1 ile verilen Moser, D., ve arkadaşlarının (2015) kullanmış oldukları enerji denklemi kullanılmıştır [70].

$$\rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla . (k \nabla T) + S_H + S_{M/S} \quad (3.1)$$

Eş. 3.1 içerisinde yer alan ρ, Cp, T, k ve t sırasıyla alüminaya ait yoğunluk, özgül ısı, sıcaklık, tozun ısıl iletkenliği ve işlemin zamanıdır. S_H ve $S_{M/S}$ terimleri sırasıyla ön ısıtma ve ergitme/sinterleme için birim hacim başına lazer ısı kaynağını (W/m^3) ifade etmektedir. Moser, D. ve arkadaşlarına (2015) göre [70], ön ısıtma lazer kaynağı S_H ve erime/sinterleme kaynağı $S_{M/S}$ Eş. 3.2 ile tanımlanmaktadır:

$$S_H = A_H I_H \alpha_H exp\left(-2\frac{(x-v_x t)^2+\left(y-v_y t\right)^2}{R^2} - \alpha_H Z\right) \quad (3.2)$$

$$S_{M/S} = A_{M/S} I_{M/S} \alpha_{M/S} exp\left(-2\frac{(x-v_x t)^2+\left(y-v_y t\right)^2}{R^2} - \alpha_{M/S} Z\right) \quad (3.3)$$

$$I_H = \frac{p_H}{\pi {R_H}^2} \quad (3.4)$$

$$I_H = \frac{p_{\mathrm{M/S}}}{\pi {R_{\mathrm{M/S}}}^2} \quad (3.5)$$

Eş. 3.2 ve Eş. 3.3 ile verilen A, I, α, v ve R terimleri sırasıyla alüminanın absorpsiyon değeri, lazer ışın yoğunluğu, lazer ışınının absorpsiyon katsayısı, tarama hızı ve lazer yarıçapıdır. Absorpsiyon katsayısı [71, 72]'e göre tahmin edilmiştir. Eş. 3.2 ve Eş. 3.3'teki x ve y parametreleri, toz yatağı üzerindeki lazer hareketini kontrol etmek için kullanılmıştır. Enerji denklemindeki bu iki ısı kaynağını modellemek için bir Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon (User Defined Function, UDF) geliştirilmiştir. Geliştirilen sayısal modeli çözmek için ANSYS FLUENT 2020R2 kullanılmıştır. Bu çalışmada, Eş. 3.6 ve Eş. 3.7 ile tanımlanan başlangıç ve sınır koşulları dikkate alınmıştır. İlk başlangıç sıcaklığı 300 K olarak tayin edilmiştir.

$$T(x,y,z)_{t=0} = T_0 \quad (3.6)$$

$$-k\left(\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial z}\right) = \dot{S}_T - h_{cov}(T_a - T_s) - \sigma\varepsilon\left({T_a}^4 - {T_s}^4\right) \quad (3.7)$$

Lazer ön ısıtma ve tarama sırasında sıcaklığın alüminanın fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini dikkate almak için, Fan ve diğerleri (2018) [56] göre sıcaklığın bir fonksiyonu olarak

malzeme özellikleri Çizelge 3.1'de gösterilmektedir ve diğer sabitler geliştirilen UDF'de dikkate alınmıştır.

Çizelge 3.1. Alüminanın fiziksel ve termal özellikleri

Özellik	Değer	Kaynak.
Yoğunluk, kg/m^3	3.920	[56]
Özgül ısı, J/kg·K	(T ≤ 2.450): $3\times10^{-13}\cdot T^5-3\times10^{-9}\cdot T^4+5\times10^{-6}\cdot T^3-0{,}0073T^2+5{,}0097\cdot T-190{,}71$ (T > 2.450): 1.360	
Isıl iletkenlik, W/kg·K	(T ≤ 2.450): $-3\times10^{-15}T^5-3\times10^{-11}T^4-10^{-7}T^3+0{,}0002T^2-0{,}203T+79{,}673$ (T > 2.450): 5,5	
Ergime sıcaklığı, K	2.327	
Gizli ergime ısısı, J/kg	1.137.900	
Yayınım (emissivity)	0,7	
Stefan-Boltzmann sabiti, W/m^2 K^4	$5{,}6704\cdot e^{-8}$	
Isıl taşınım katsayısı, W/m^2 K^4	200	
Absorpsiyon/ CO_2 lazer	0,97	[73]
Absorpsiyon / Fiber lazer	0,03	

UDF kodu hazırlanırken, katıdan sıvıya ve sıvıdan katıya gerçekleşecek faz dönüşümü UDF yapısında dikkate alınmıştır. Bu husus, ANSYS firması [43] tarafından tanımlanan entalpi tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir [74].

$$H = U + P \cdot V \tag{3.8}$$

$$H = h + \Delta H \tag{3.9}$$

Malzeme entalpisi H, Eş. 3.8'de açıklandığı gibi sistemin iç enerjisi U ile basınç, P, ve hacim, V, çarpımının toplamı veya Eş. 3.9'da açıklandığı gibi sistemdeki hissedilebilir ısı, h ve gizli ısı içeriği, ΔH olarak tanımlanır.

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^{T} C_p \Delta T \tag{3.10}$$

$$\Delta H = \beta L \tag{3.11}$$

Eş. 3.10'da yer alan h_{ref}, referans entalpi, Cp, özgül ısı ve β, malzemedeki sıvı oranıdır. Sıvı oranı (β) aşağıdaki denklem ile tahmin edilebilir [74]:

$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \tag{3.12}$$

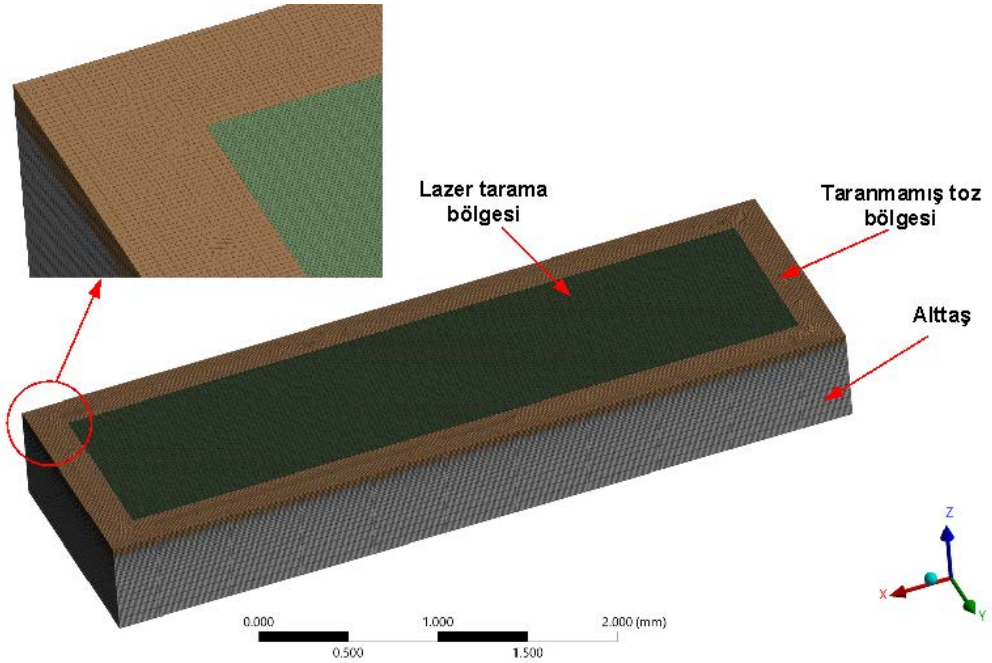
Enerji denklemi, Eş. 3.1, çözüm alanı boyunca sıcaklık dağılımı için hesaplatılır ve ardından Eş. 3.13'e göre çözüm alanı içindeki ergime ve katılaşma fazını tanımlayan β'yı tayin etmek için kullanılır. Ayrıca, toz yatağında lazer taraması sırasında ergimiş bölgeyi izlemek için ANSYS Fluent yazılımında bulunan bir Kullanıcı Tanımlı Bellek (UDM) kullanılmıştır.

$$\beta = \left\{ \begin{cases} < 1 \\ = 0 \\ > 1 \end{cases} \middle| \begin{matrix} katı\ bölge \\ katı - sıvı\ geçiş\ bölgesi \\ sıvı\ bölge \end{matrix} \right\} \tag{3.13}$$

Lazer ışınının Gauss dağılımına sahip enerji kaynağı olarak UDF'de tanımlanmıştır. Lazer ışınları doğrusal yol izleyerek toz katmanı ile temas etmektedir. Ayrıca ısıl iletkenlik, özgül ısı gibi sıcaklığa bağlı alüminanın malzeme özellikleri için gerekli fonksiyonlar UDF içerisinde "DEFINE" makroları ile tanımlanmıştır.

3.1.2. Geometrik model ve ağ yapısı (mesh)

Simülasyon çalışmalarında kullanılan model geometrisi ve hesaplama alanı Şekil 3.2'de gösterilmiş ve boyutları Çizelge 3.2'de özetlenmiştir. Model geometrisini oluşturmak için ANSYS Design Modeller kullanılmıştır. Model geometrisi toz tabakası, onu çevreleyen toz ve alttaş plakasından oluşmaktadır. Her bir ardışık katmanda aynı davranış tekrarlandığından, analiz için yalnızca bir katman dikkate alınmıştır. Hesaplama alanını (mesh) oluşturmak için ANSYS Mesher kullanılmıştır. Ağ boyutu, Şekil 3'te gösterildiği gibi toz bölgesinde çok küçük boyutlarda olacak şekilde sık ve çevre toz alanı ve altlık plakası bölgelerinde kaba olacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 3.2. Çalışmada model geometrisi ve hesaplama alanı (ağ)

Çizelge 3.2. Geometrik model boyutları

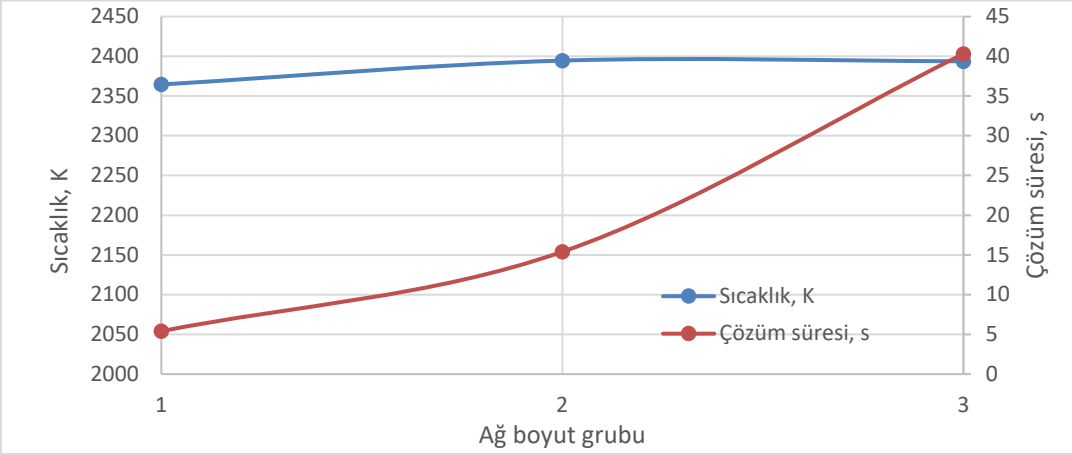
Boyut	Alttaş plakası	Toz katmanı
Uzunluk (mm)	4,4	4
Genişlik (mm)	1,4	1
Kalınlık (mm)	0,5	0,05

3.1.3. Ağ (mesh) yoğunluk analizi

Ağ hücre boyutlarının etkinliği mesh yoğunluk analizi ile uygun hücre boyutu tespiti yapılmıştır. Toz yatağı yüzeyi için sırasıyla 5 µm, 2,5 µm ve 1,5 µm olmak üzere üç farklı kenar boyutlu kübik hücreler için ağ yapısı oluşturulmuştur. Her bir mesh için aynı sayıda iterasyon gerçekleştirilmesinde harcanan süre kronometre ile tutulmuş ve elde edilen sıcaklık sonuçları Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Ağ yoğunluk analizi sonuçları grafiği ise Şekil 3.3 ile verilmiştir.

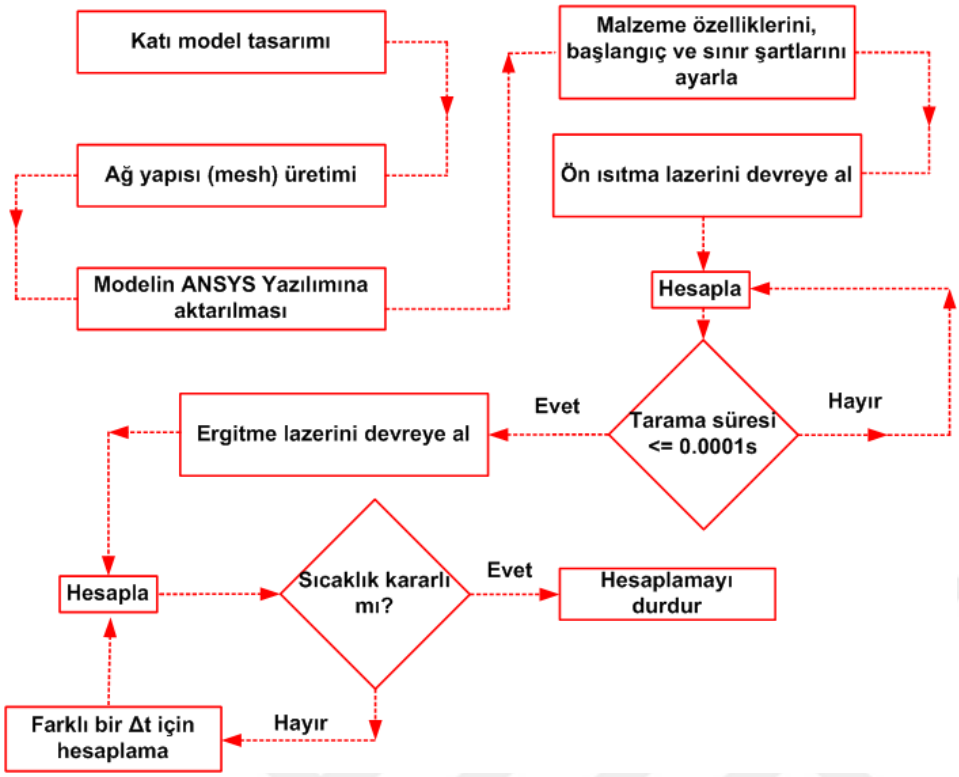
Çizelge 3.3. Ağ yoğunluk analizi sonuçları

#	Hücre boyutu (µm)	En yüksek sıcaklık (K)	İşlem süresi (s)
Ağ_1	5	2364,5	5,4
Ağ_2	2,5	2394,6	15,4
Ağ_3	1,5	2393,7	40,3



Şekil 3.3. Ağ yoğunluk analiz sonuçları

Ağ_1 ve ağ_2 arasında hücre boyutu % 50 oranında küçültülmesi sonucunda elde edilen en yüksek sıcaklık değerinde 30,1 K sıcaklık farkı ve aynı miktarda iterasyon için yaklaşık 3 kat işlem süresi gözlenmiştir. Ağ_2 ve ağ_3 için en yüksek sıcaklık değeri arasında 1,1 K sıcaklık farkı için harcanan süre gözetildiğinde yaklaşık 2,6 kat ağ_2'ye göre işlem süresi harcanmaktadır. En yüksek sıcaklık farkı ve harcanan süreler gözetildiğinde 2,5 µm büyüklükteki ağ_2 ile modellenen ağ yapısı boyutunun uygunluğuna karar verilmiştir. Sayısal modelin çözümü sırasında izlenen çözüm prosedürü
Şekil 3.4 ile gösterilmektedir.

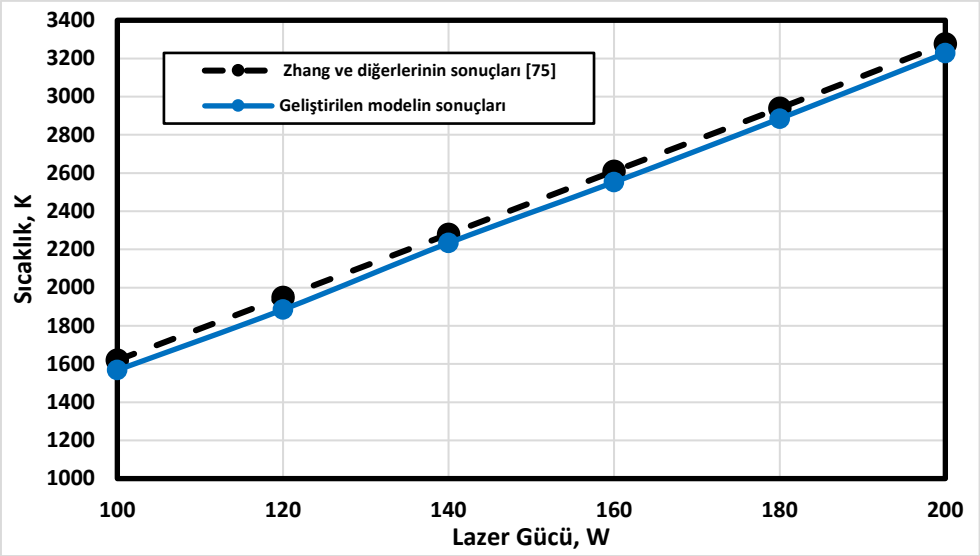


Şekil 3.4. Sayısal model çözüm prosedürünün akış şeması.

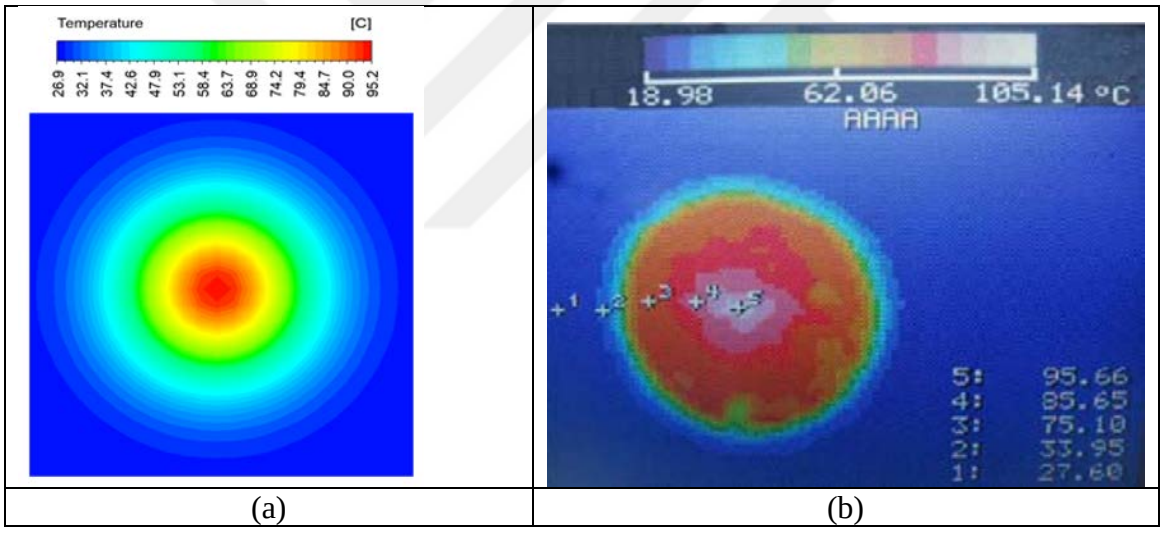
3.1.4. Modelin doğrulanması

Geliştirilen nümerik model, uygun parametrelerin seçiminde etkin bir şekilde kullanılması için literatürde yer alan mevcut deneysel verilerle doğrulanmıştır. Bu nedenle, sayısal modeli oluşturmak için elde edilen maksimum sıcaklık, Şekil 3.5'te sunulan grafikte, Zhang ve diğerleri (2018) mevcut verileriyle karşılaştırılmıştır [75]. Zhang ve diğerleri (2018), ilk olarak modelden elde edilen sıcaklık geçmişini, bir kızılötesi termal kamera aracılığıyla elde edilen deneysel sıcaklık geçmişiyle karşılaştırarak doğrulamıştır. Geliştirilen model ile Zhang ve diğerlerinin [75] modeli arasındaki karşılaştırma, iki sonuç arasında iyi bir uyum olduğunu göstermiştir. Ancak, aralarındaki maksimum hata % 3,34 olmuştur.

Ardından, model doğrulamasını teyit etmek için başka bir doğrulama gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6'te gösterilen sıcaklık konturu, Wiria ve diğerleri [76] tarafından rapor edilen çalışmalarda kullanılanlara yakın koşullar kullanılarak sayısal model tarafından elde edilmiştir. Termal kamera kullanılarak elde edilen kontur, % 1,24'lük bir hesaplama hatası ile iyi bir uyum gösterdiğini doğrulamıştır.



Şekil 3.5. Geliştirilen modelin doğrulama sonuçları: (a) Zhang vd. (2018) tarafından sayısal modelden elde edilen maksimum sıcaklığın karşılaştırılması [68].



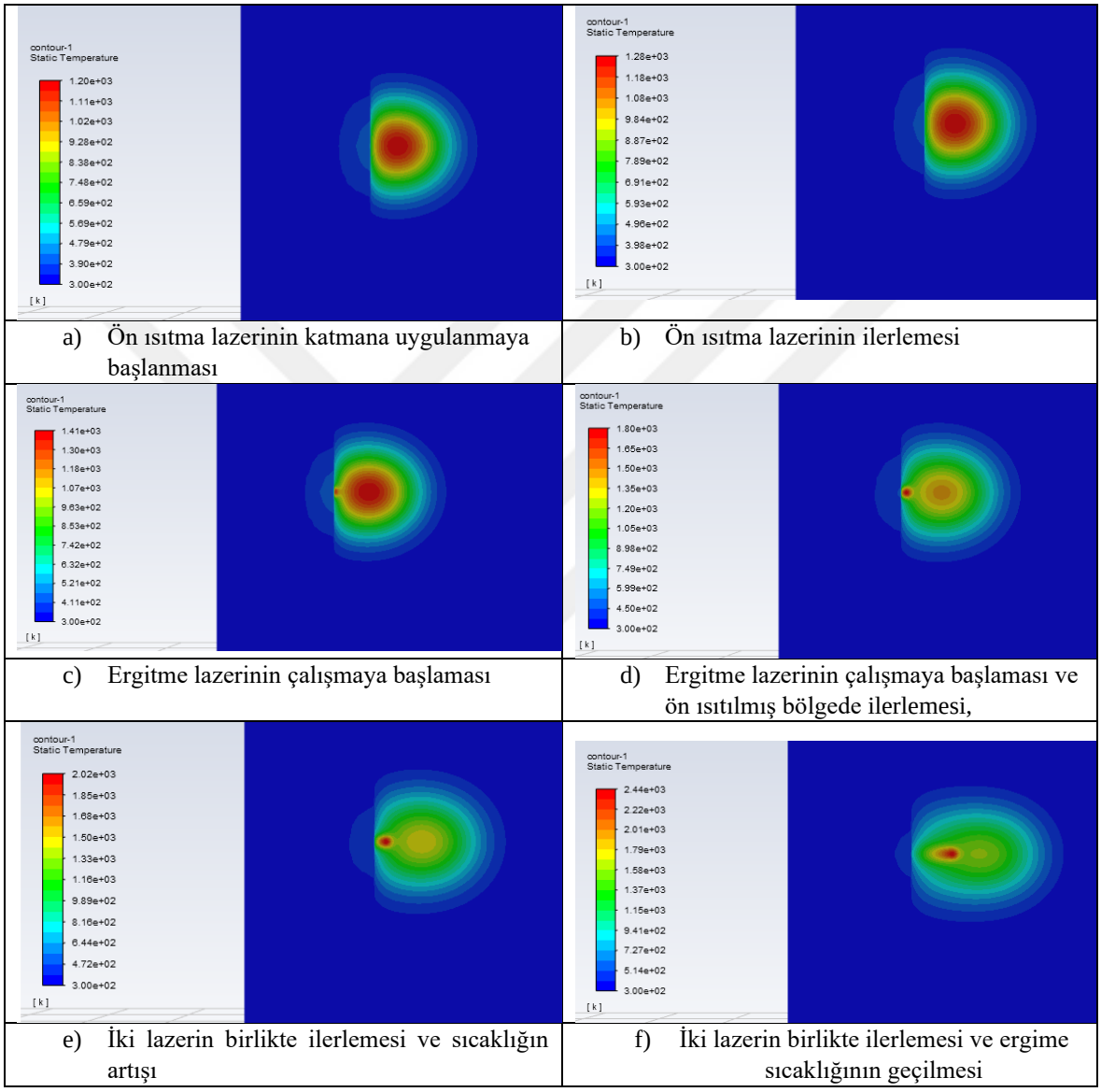
(a) (b)

Şekil 3.6. Sayısal modelden elde edilen sıcaklık konturu [68] (a) ile Wiria ve diğerleri (2010) tarafından bildirilen kontur [76] (b).

3.1.5. UDF kodunun çalıştırılması

Hazırlanan UDF kodunun ANSYS Fluent ile beklendiği gibi çalışıp çalışmaması durumu belirlenen parametreler ile denenmiştir. UDF kodu, proses başlatıldığında, sıcaklık ve ergime durumunu hesaplarken; ilk aşamada CO_2 lazerin yüzeye temas etmesi ve ilerlemesi fiber lazerin ısıtılmış toz yatağına temas etmesi ve iki lazerin birlikte hareket etmesi ile ergitme gerçekleştirmesi hususuna göre uygulanmıştır. UDF kodu çalıştırıldığında simülasyonlar sürdürülürken FLUENT'in kullanıcı ara yüzünden takip edilen sonuçlar Şekil

3.7 ile verilmiştir. Öncelikle ön ısıtma lazerinin yüzeye uygulanması sonucunda yaklaşık 1.200 K sıcaklıkta ön ısıtma sıcaklığı elde edilmektedir. Daha sonra ikinci ergitme lazerinin belirmesi ve sıcaklığın artışı görülmektedir. Ergitme lazerinin yüzeye uygulanmasıyla, en yüksek sıcaklığın ergime sıcaklığını geçtiği ilerleyen süreçlerde görülmektedir.



a) Ön ısıtma lazerinin katmana uygulanmaya başlanması

b) Ön ısıtma lazerinin ilerlemesi

c) Ergitme lazerinin çalışmaya başlaması

d) Ergitme lazerinin çalışmaya başlaması ve ön ısıtılmış bölgede ilerlemesi,

e) İki lazerin birlikte ilerlemesi ve sıcaklığın artışı

f) İki lazerin birlikte ilerlemesi ve ergime sıcaklığının geçilmesi

Şekil 3.7. UDF kodunun çalıştırılmasına ait kontur görüntüleri

Denemelerde kullanılan parametreler ve elde edilen en yüksek sıcaklıklar kaydedilmiş ve çizelgeler halinde sunulmuştur. Kullanılan parametreler her denemede en yüksek sıcaklığın alüminanın ergime sıcaklığından, 2.327 K, daha yüksek olması aynı zamanda kaynama noktasından, 3.250 K, daha düşük olması hedeflenmiştir. Burada lazer güçleri, katman kalınlıkları ve tarama hızları değiştirilmiştir. Geliştirilen UDF ile prosesin simüle edildiği,

ergime sıcaklığını geçecek sıcaklığın elde edildiği, tek bir lazer izi ile elde edilen sıcaklığın belirli bir süre sonra sabit kaldığı görülmüştür.

3.1.6. Proses penceresi oluşturulması

Parça üretiminde parametrelerin etkisini araştırmak için çeşitli parametreler dikkate alınmıştır. Yalnızca deneysel incelemeler kullanarak araştırmak maliyet ve zaman açısından verimsiz olacağı bilinmektedir. Özellikle PBF yönteminde üretimi için bilgi birikimi sığ olan alüminanın, uygun parametre belirlemesinde deneysel bir yaklaşımda bulunmak zordur. Daha verimli bir yol, deneyleri nümerik modelleme yaklaşımı ile birlikte kullanmaktır. Burada, üretimlerin proses parametrelerine bağımlılığını daha fazla değerlendirmek için tahminler yapılabilir. Bu amaçla kullanılabilir parametreler açısından Çizelge 3.4'te verilen parametreler ile iki grup proses penceresi geliştirilmiştir.

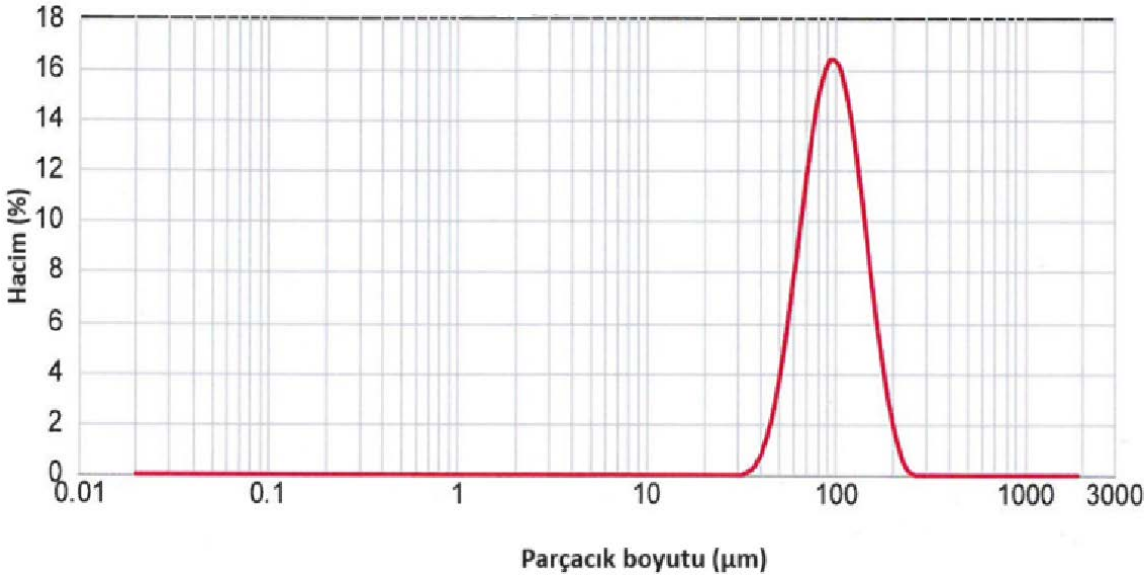
Çizelge 3.4. Proses penceresi geliştirilmesinde kullanılan değişken parametreler

Parametre	1. Grup	2. Grup
CO_2 lazer gücü (W)	10, 20, 30, 40, 50	15, 20, 25
Fiber lazer gücü (W)	100, 110, 120, 130, 140, 150	40, 50, 60, 70, 80, 90
Tarama hızı (mm/s)	100, 200, 300, 400, 500	100, 200

3.2. Deneysel Çalışmalar

3.2.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan hammadde, Nanografi Nanoteknoloji'den (Türkiye) temin edilmiştir. Öncül denemelerde kullanılan toz α-alümina, d_{50}=95 µm olan alümina tozudur. Numune üretimlerinde ve α-alümina, d_{50}=37 µm boyutlu tozlar kullanılmıştır. Tozlara ait Nanografi tarafından temin edilen partikül boyut bilgisi Şekil 3.8'da ve Çizelge 3.5'te gösterilmektedir. Öncül çalışmalar doğrultusunda üretilen sadece iki adet numune d_{50}=95 µm olan tozlar kullanılarak üretilmiştir. Diğer numuneler d_{50}=37 µm boyutlu alümina tozu kullanılarak üretilmiştir. Alümina malzemesinin teorik özellikleri Çizelge 3.6 ile sunulmuştur.



Şekil 3.8. Alümina tozunun (d_{50}=95 µm) parçacık dağılım grafiği

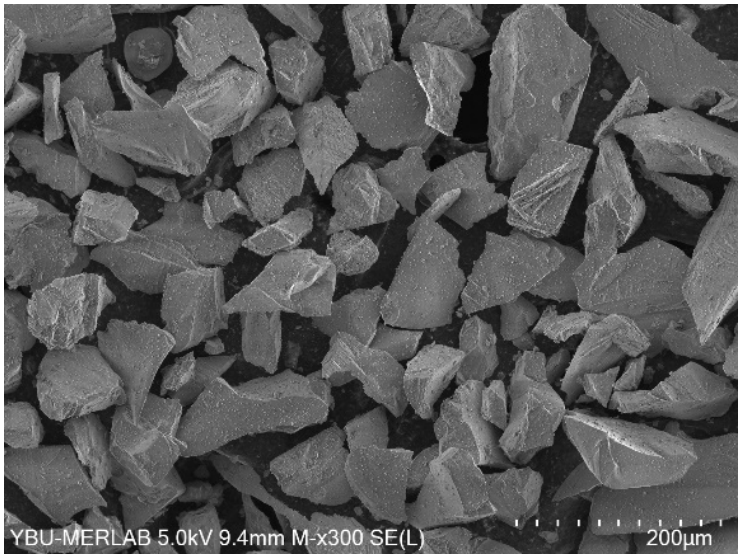
Çizelge 3.5. Alümina tozunun (d_{50}=37 µm) parçacık dağılım boyutları

Çap	Boyut
d94	22 µm
d50	37 µm
d3	59 µm

Çizelge 3.6. Alümina malzemesi teorik malzeme özellikleri

#	Özellik	Değer	Birim	Ref
1	Yoğunluk	3,9	kg/cm^3	[77]
2	Isıl iletkenlik	40	W/m·K	
3	Sertlik	1500	Kg/mm^2	
4	Elastik modül	370	GPa	
5	Çekme mukavemeti	262	MPa	
6	Isıl genleşme katsayısı	$8 \cdot 10^{-6}$	/˚C	
7	Ergime sıcaklığı	2072	˚C	

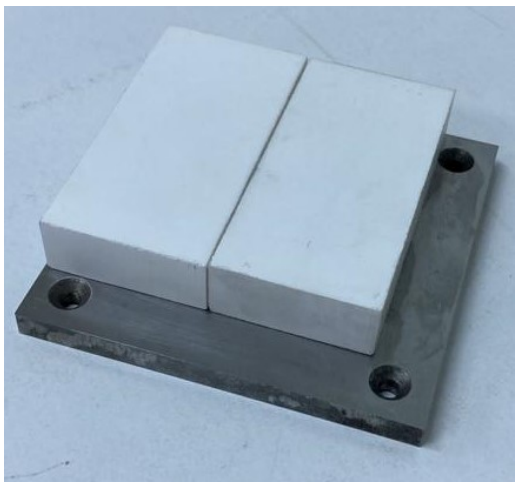
Şekil 3.9 düzensiz şekle sahip toz partiküllerinin FE-SEM görüntülerini göstermektedir. Düzensiz toz geometrisi, partiküller arası sürtünmeyi artırabileceğinden katman biriktirme sırasında sorunlara neden olabilmektedir. Katman birikimini kontrol etmek için deneme serimleri yapılmış ve tozun herhangi bir kusur veya sorun olmadan biriktirildiği görülmüştür.



Şekil 3.9. Alümina (d_{50}=37 µm) tozunun FE-SEM mikro fotoğrafı

3.2.2. Alttaş plakası

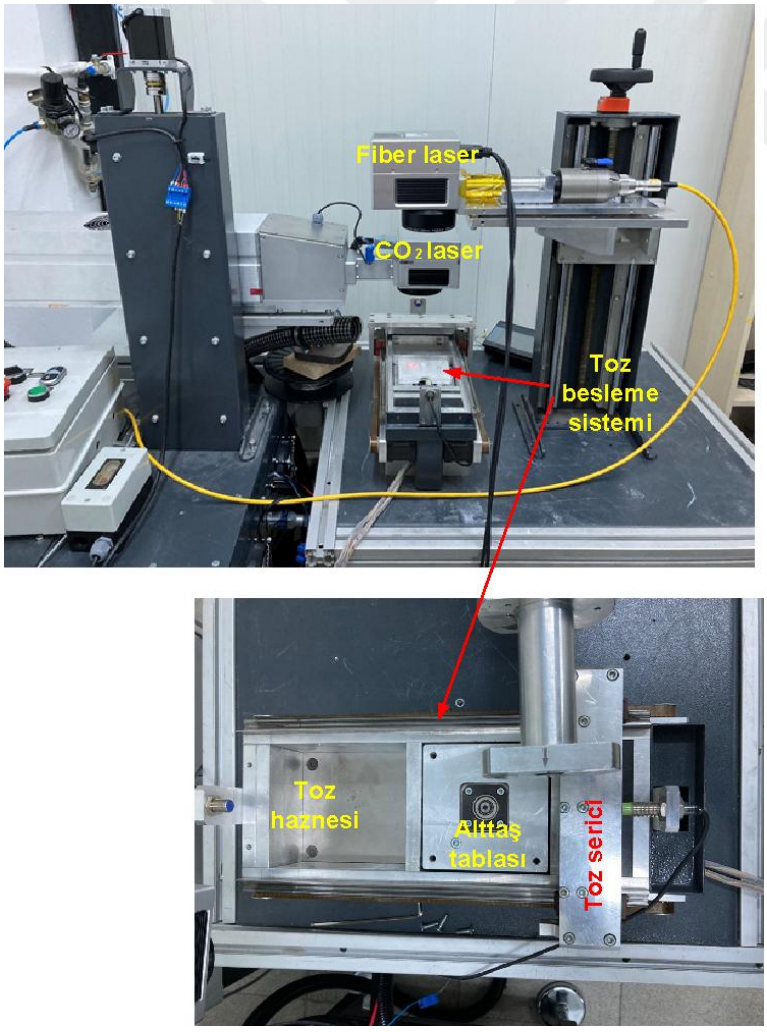
Alttaş plakası toz ile aynı malzemeden seçilmiştir. Alümina malzemeden plaka formunda porozitesiz ve % 95 saflıkta plakalar kullanılmıştır. Plaka boyutları 100 mm x 50 mm x 10 mm'dir. İki lazer ışınının kesişim alanını görecek şekilde, plakalar çiftler halinde toz yatağının plakasına endüstriyel yapıştırıcı yardımıyla sabitlenerek kullanılmıştır. Kullanılan plakalara ait görsel Şekil 3.10'de verilmiştir.



Şekil 3.10. Üretimlerde kullanılan alttaş plakası

3.2.3. Üretim sistemi

Bu çalışmada geliştirilen deneysel düzenek Şekil 3.11'de gösterilmektedir. İki lazer ışın kaynağı bulunmaktadır: ön ısıtma için bir CO_2 lazer ve toz partiküllerini ergitmek/sinterlemek için bir fiber lazer, toz yatağında ortak bir alanı görecek şekilde konumlandırılmıştır. Lazer ışın kaynaklarının özellikleri Çizelge 3.7'de özetlenmiştir. Deneysel çalışma başlatılmadan önce lazer güçleri ölçülmüştür. Toz katmanının serilmesi için bir süpürge mekanizması, tozun depolandığı bir toz tankı ve fazlaca serilen toz için başka bir toz haznesinin bulunduğu temel bir toz besleme sistemi kullanılmıştır. Alttaş plakası, Şekil 3.11'de gösterildiği gibi iki tank arasında yer almaktadır. Ayrıca seyyar bir egzoz tahliye sistemi üretimler sırasında kullanılmıştır. Tüm üretimler, açık hava şartlarında gerçekleşmiştir.



Şekil 3.11. Üretimde kullanılmak üzere geliştirilen deneysel düzenek

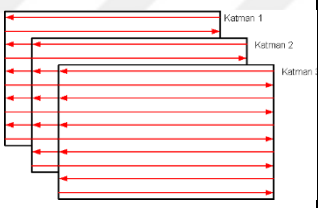
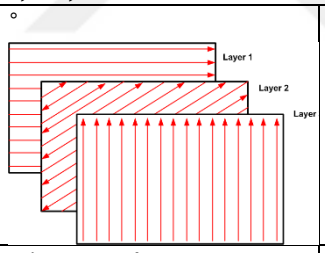
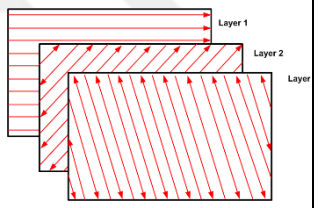
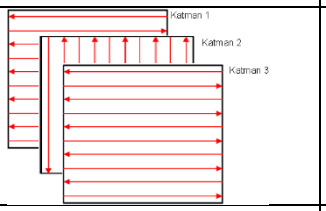
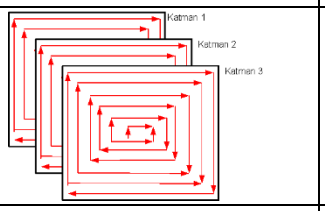
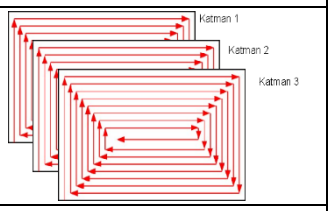
Çizelge 3.7. Kullanılan lazerlerin özellikleri

Özellik	CO_2 lazer	Fiber lazer
Lazer modeli	Universal URL-50	IPG-150 W
Toz yatağındaki ışın çapı (spot size)	170 – 180 µm	90 -120 µm
Dalga boyu	10,64 µm	1,064 µm

3.2.4. Deneme Üretimleri

Bir dizi parametre belirlemeye yönelik deneme üretimleri gerçekleştirilmiştir. Güç, tarama hızı, tarama mesafesi, katman kalınlığı ve altı farklı tarama stratejileri denenmiştir. Denemelerde kullanılan parametre aralıkları Çizelge 3.8 ile sunulmuştur.

Çizelge 3.8. Üretimlerde kullanılan parametreler

Parametre	Değerler
CO_2 lazer ışın gücü (W)	10 ,15, 20, 25, 30
Fiber lazer ışın gücü (W)	40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 105, 110, 130, 140, 150
Tarama hızı (mm/s)	100, 200
Katman kalınlığı (µm)	50, 60, 75, 100
Tarama mesafesi (µm)	20, 25, 30, 50, 75
Tarama stratejileri :	 Lineer 0°
	 Lineer 45°
	 Lineer 67°
	 Lineer 90
	 Konsentrik içten dışa
	 Konsentrik dıştan içe

3.3. Karakterizasyon Çalışmaları

3.3.1. Bağıl yoğunluk ölçümü ve gözenek analizi

Tezin amacı doğrultusunda, üretilen numunelerin bağıl yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Üretilen numunelerin açık ve kapalı gözeneklere sahip olabileceği öngörüldüğünden bağıl yoğunluk ölçümleri farklı yöntemlerle ölçülmüştür. Bağıl yoğunluk ölçümlerinde Arşimet

yoğunluğu ve Helyum piknometresi yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Öncül üretimler sonucu elde edilen iki adet numuneye Arşimet yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Mikro tomografi görüntüleme sonuçları numune bünyesinde açık ve kapalı gözeneklerin varlığı tespit edilebildiğinden tarama stratejisinin uygulandığı numunelere, Arşimet yoğunluğu tayinine ek olarak Helyum piknometresi yoğunluk ölçümü ve mikro tomografi görüntülemesi yapılmıştır. Ayrıca mikro tomografi verilerinin işlenmesi sonucunda açık ve kapalı gözenek oranları tayin edilmiştir.

Numunelerin bağıl yoğunluğu, katı malzeme kütlesinin, katı malzeme hacimlerinin ve malzeme içindeki kapalı gözeneklerin toplamına oranıdır. Arşimet'in akışkan taşması yasasını ve Boyle kanununun hacim-basınç ilişkisini kullanarak bir malzemenin hacmini gaz yer değiştirmesiyle ölçmektedir. Yer değiştirme ortamı olarak bir inert gaz, yaygın olarak Helyum kullanılır. Numune, hacmi bilinen, kapalı bir kaba yerleştirilir. Bu kap daha sonra numune odasına yerleştirilir. Gaz numune odasına iletilir ve daha sonra hacmi bilinen ikinci bir boş odaya genişletilir. Numune hücresi doldurulduktan sonra gözlemlenen basınç ve genleşme odasına boşaltılan basınç ölçülerek hacim hesaplanır. Yoğunluk, numune ağırlığının ölçülen hacme bölünmesiyle belirlenir. Helyum Piknometresi tarafından ölçülen yoğunluk genellikle helyum yoğunluğu olarak anılır ve bu da açık gözeneklerin hesaplamaya dahil edilmediğini gösterir. Kapalı gözeneklere erişemediği için toplam hacme dahil edilirler.

Arşimet prensibi ile ölçümler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan Sartorius CP224S model hassas terazi ve Arşimet kiti kullanılmıştır. Piknometre yoğunluk ölçümleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı Yüzey ve Gözenek Karakterizasyon Laboratuvarında bulunan Quantachrome Ultrapycnometer 1000 cihazı kullanılmıştır. Mikro tomografi ölçümlerinde Ankara Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Merkez Araştırma Laboratuvarı Micro BT Laboratuvarında yer alan Bruker marka Skyscan 1275 bilgisayarlı mikro tomografi tarayıcısı kullanılarak numunelerin tomografik kesit görüntüleri alınmıştır. Alınan kesit görüntülerinin analiz edilmesinde, ekipman sağlayıcı firma olan Bruker tarafından yayımlanan CT-Analyser (ctAN) yazılımı kullanılmıştır.

3.3.2. FE-SEM görüntüleme

Seçili numunelerin yüzeyleri, lazer tarama izlerinin görüntülenmesi amacıyla alan emisyonlu taramalı elektron mikroskop ile görüntülemeler yapılmıştır. Mikro fotoğrafların elde edilmesinde Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı, Elektron Mikroskopi Laboratuvarında bulunan HITACHI SU5000 alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopu (FE-SEM) kullanılmıştır.

3.3.3. X-RD ölçümleri

Geliştirilen yöntemle üretimi yapılan numunelerin toz halden katı hale geçişi sırasında baskın faz yapısının gözlenmesi amacıyla X-ışını kırınımı (X-RD) ile yapıdaki kristalografi incelenmiştir. Ölçüm Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboratuvarlarında bulunan Bruker marka D8 Advance X-RD cihazı kullanılmıştır.

3.3.4. Basma testi

Çalışmada seçilen parametreler ile üretilen numunelere yönelik mekanik mukavemet tayini için basma testi uygulanmıştır. Test için ASTM C1424−15 kodlu Standard Test Method for Monotonic Compressive Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature başlıklı standardının tarif ettiği minimum boyutlu basma test numuneleri üretilmiştir. Basma testi uygulanırken 1 mm/dak. ilerleme hızı ile maksimum 100 kPa yük uygulanmıştır. Test, Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi Mekanik Karakterizasyon Laboratuvarında bulunan ZWICK/ROELL Çekme-Basma Cihazı kullanılmıştır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Parametre Belirleme Denemeleri ve Sonuçları

Literatür incelendiğinde alüminanın doğrudan PBF yöntemi ile üretilmesinde çalışma kısıtlı sayıda veya mevcut çalışmaların toz hazırlama uygulamalarına tabii tutulmasını içerdiğinden, saf alümina için proses parametrelerinin tayin edilmesi gerekliliği doğmuştur. Belirlenecek parametrelerin ergime sıcaklığını aşabileceği ve deneme üretimlerinde kullanılabilecek üretim düzeneğinin hazırlanması amacıyla bir dizi çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar devam eden bölümlerde açıklanmıştır.

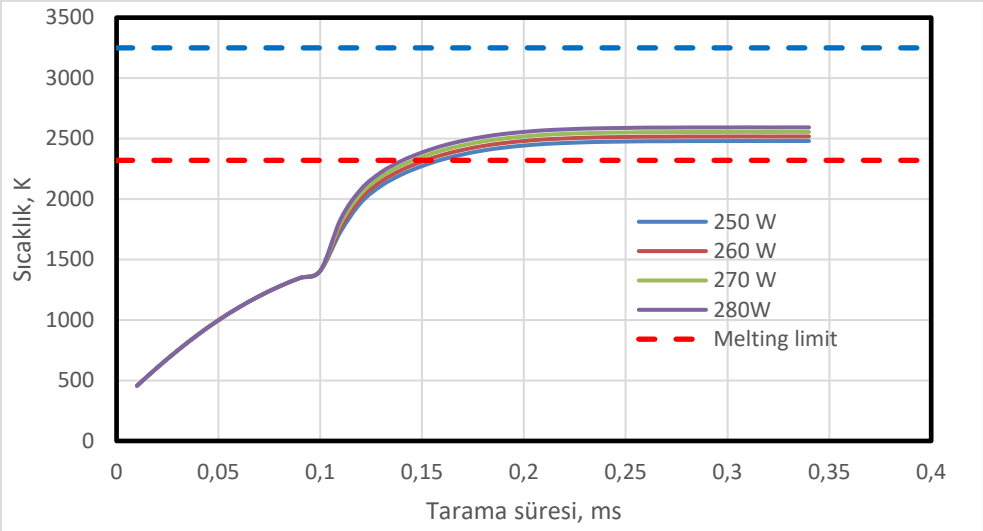
4.1.1. Nümerik analiz sonuçları

Öncül nümerik çalışmalar kapsamında katman kalınlığının 20 µm ve 30 µm olan katman kalınlığı ile sabit tarama hızı ve ön ısıtma lazer gücü kullanılmıştır. Tarama stratejilerinin sıcaklık geçmişine etkisi incelenmek amacıyla tek yönlü boyuna tarama ve zig-zag tarama stratejileri incelenmiştir.

Ayrıca bu denemelerde katman kalınlığı, ön ısıtma lazeri olan CO_2 lazer gücü ve tarama hızlarının sabit tutulmasıyla ergitme lazer gücü değiştirilmiştir. Nümerik analizlerde kullanılan parametreler Çizelge 4.1 - Çizelge 4.6 ile sunulmuştur. Nümerik analiz sonuçlarında görülen en yüksek sıcaklıklar kaydedilmiş ve grafikler Şekil 4.1- Şekil 4.6 ile sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Katman kalınlığı 20 µm ve ışın hızı 1000 mm/s parametre seti

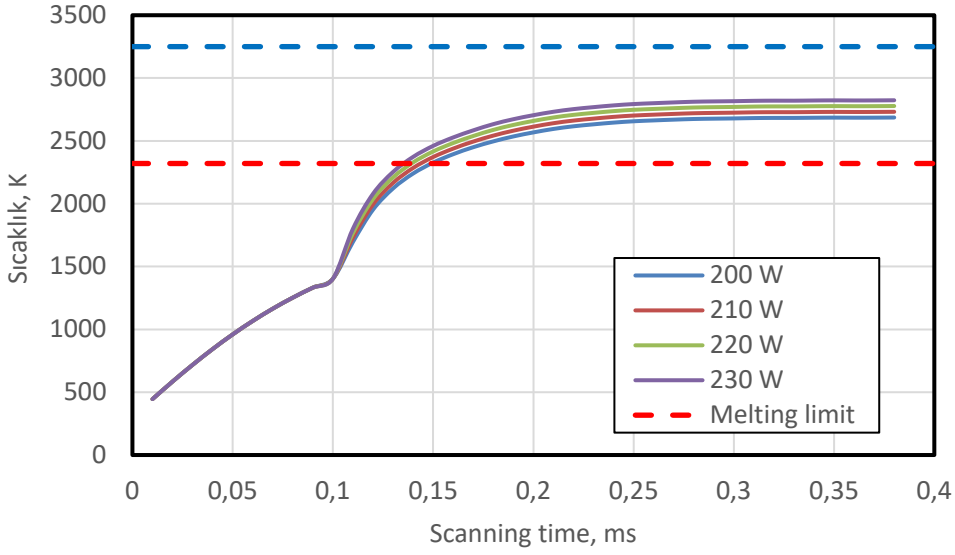
i. Katman kalınlığı 20 µm				
	A	B	C	D
Ön ısıtma lazer gücü, W	150	150	150	150
Ergitme lazer gücü, W	250	260	270	280
Tarama hızı, mm/s	1000	1000	1000	1000
En yüksek sıcaklık, K	2480,37	2517,57	2555,43	2592,71



Şekil 4.1. Katman kalınlığı 20 µm ve tarama hızı 1000 mm/s sıcaklık zaman grafiği

Çizelge 4.2. Katman kalınlığı 20 µm ve tarama hızı 750 mm/s parametre seti

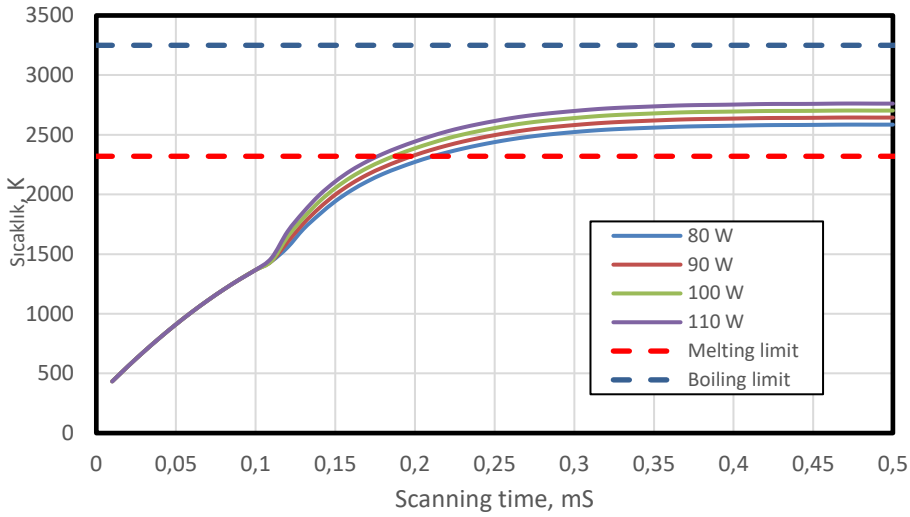
ii. Katman kalınlığı 20 µm				
	A	B	C	D
Ön ısıtma lazer gücü, W	140	140	140	140
Ergitme lazer gücü, W	200	210	220	230
Tarama hızı, mm/s	750	750	750	750
En yüksek sıcaklık, K	2686,23	2730,71	2776,72	2821,99



Şekil 4.2. Katman kalınlığı 20 µm ve tarama hızı 750 mm/s sıcaklık zaman grafiği

Çizelge 4.3. Katman kalınlığı 20 µm ve tarama hızı 500 mm/s parametre seti

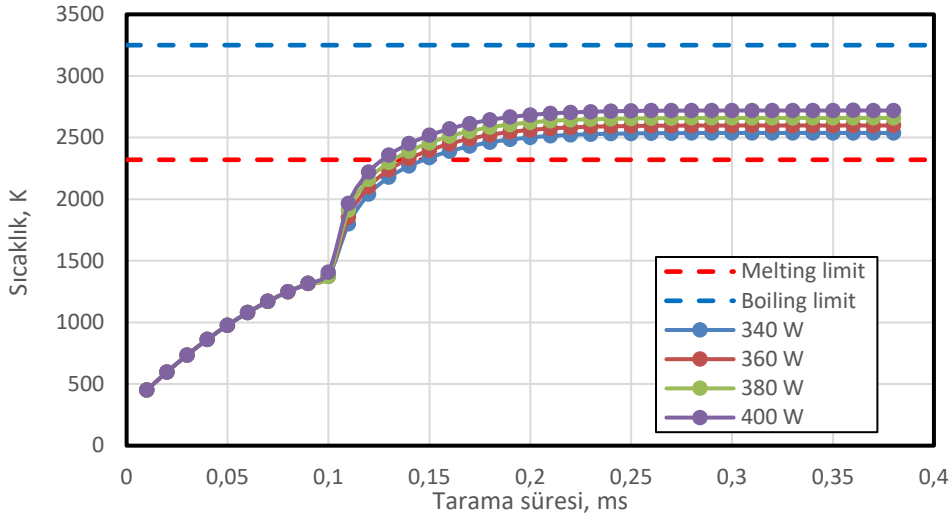
iii. Katman kalınlığı 20 µm				
	A	B	C	D
Ön ısıtma lazer gücü, W	130	130	130	130
Ergitme lazer gücü, W	80	90	100	110
Tarama hızı, mm/s	500	500	500	500
En yüksek sıcaklık, K	2586.37	2646.44	2704.12	2758.63



Şekil 4.3. Katman kalınlığı 20 µm ve tarama hızı 500 mm/s sıcaklık zaman grafiği

Çizelge 4.4. Katman kalınlığı 30 µm ve tarama hızı 1000 mm/s parametre seti

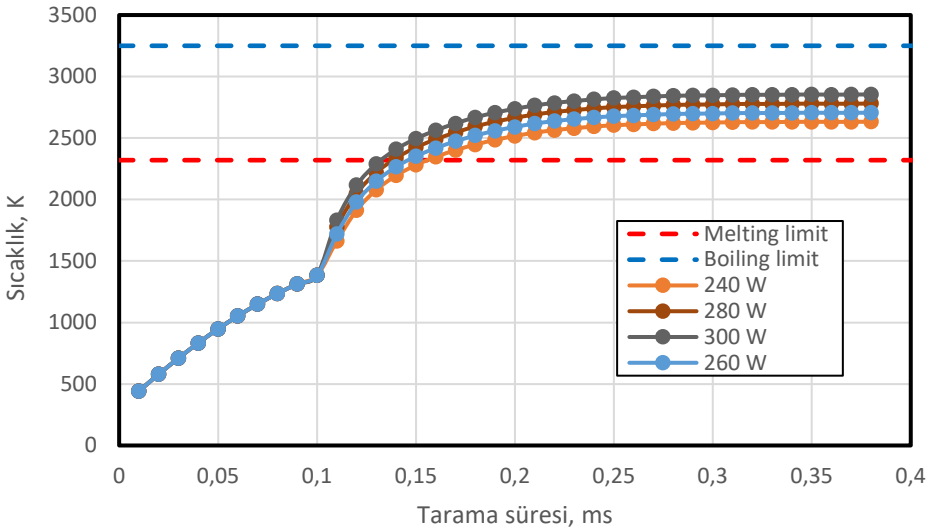
iv. Katman kalınlığı 30 µm				
	A	B	C	D
Ön ısıtma lazer gücü, W	180	180	180	180
Ergitme lazer gücü, W	340	360	380	400
Tarama hızı, mm/s	1000	1000	1000	1000
En yüksek sıcaklık, K	2537,97	2597,72	2658,72	2720,38



Şekil 4.4. Katman kalınlığı 30 µm ve tarama hızı 1000 mm/s sıcaklık zaman grafiği

Çizelge 4.5. Katman kalınlığı 30 µm ve tarama hızı 750 mm/s parametre seti

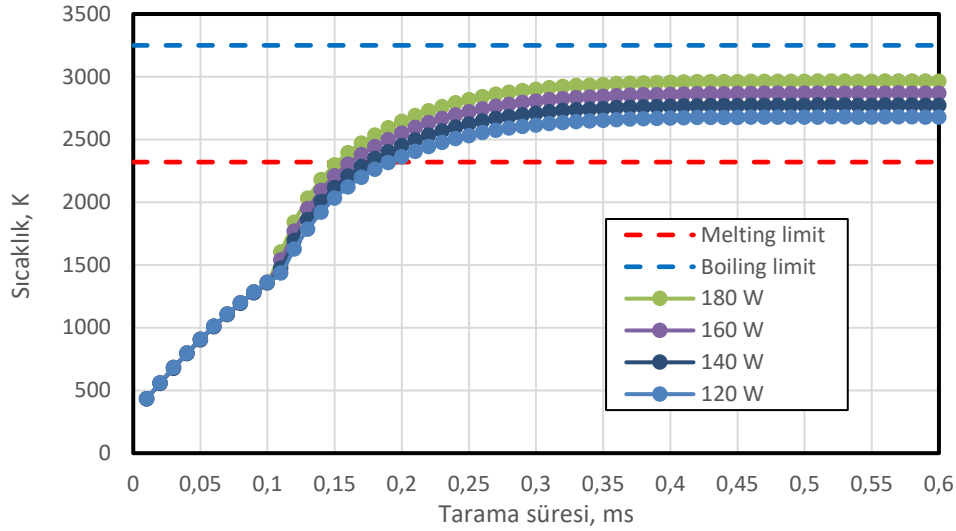
v. Katman kalınlığı 30 µm				
	A	B	C	D
Ön ısıtma lazer gücü, W	170	170	170	170
Ergitme lazer gücü, W	240	260	280	300
Tarama hızı, mm/s	750	750	750	750
En yüksek sıcaklık, K	2631.87	2704.88	2780.24	2854.36



Şekil 4.5. Katman kalınlığı 30 µm ve tarama hızı 750 mm/s sıcaklık zaman grafiği

Çizelge 4.6. Katman kalınlığı 30 µm ve tarama hızı 500 mm/s parametre seti

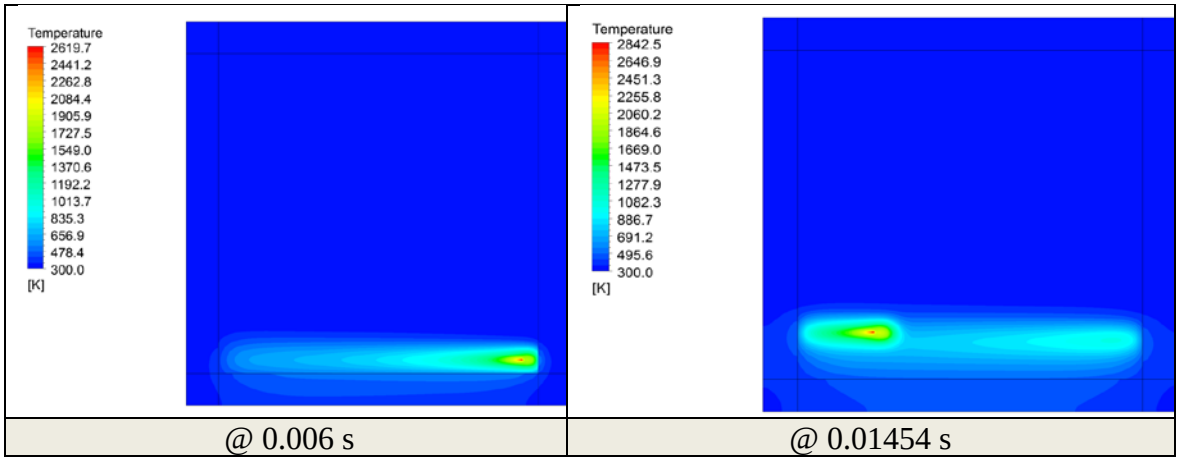
vi. Katman kalınlığı 30 µm				
	A	B	C	D
Ön ısıtma lazer gücü, W	160	160	160	160
Ergitme lazer gücü, W	120	140	160	180
Tarama hızı, mm/s	500	500	500	500
En yüksek sıcaklık, K	2679,02	2774.69	2869.93	2964.99



Şekil 4.6. Katman kalınlığı 30 µm ve tarama hızı 500 mm/s sıcaklık zaman grafiği

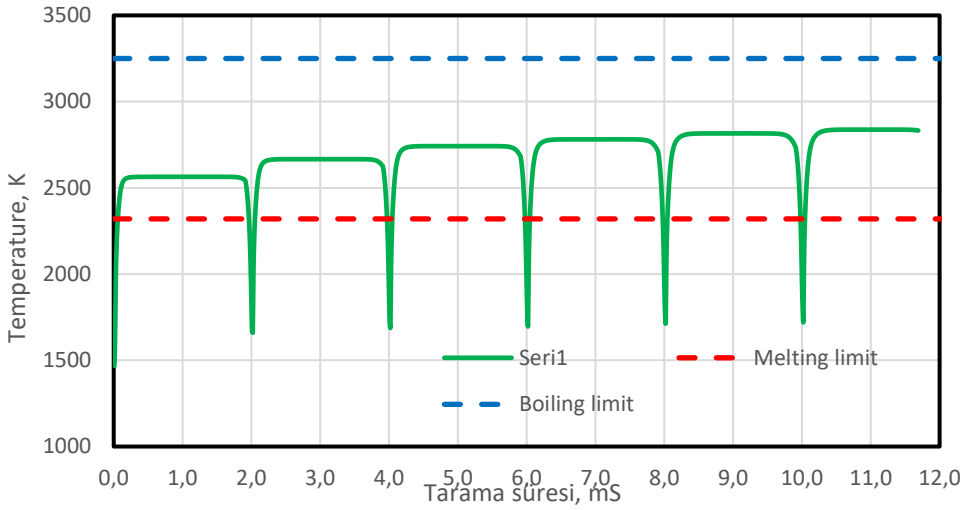
Katman kalınlığı, tarama hızı ve ön ısıtma lazerinin gücünün sabit tutulmasıyla farklı parametreler kullanılarak toz yatağında ergime sıcaklığının geçildiği parametreler elde edilmiştir. Ön ısıtma sıcaklığının 1.435 K' e kadar ulaştığı ve ergitme lazerinin aktifleşmesi sonrasında sinterleme sıcaklığı olan 2.000 K ve üzeri sıcaklığa erişmesi ve hızla arttığı görülmüştür. Bu durumda iki lazerin birlikte uygulanmasıyla sinterleme ve ergime, sıcaklığın durumuna göre beraber geliştiği söylenebilir.

Tarama stratejisinin sıcaklık geçmişine etkisinin incelenmesi amacıyla tek yönlü boyuna tarama ve zig-zag tarama stratejileri nümerik olarak incelenmiştir. Şekil 4.7'de 0,006 s ve 0,01454 s anındaki nümerik sıcaklık konturu görülmektedir. Şekil 4.8 ise tarama stratejisinin etkisi ile sıcaklık geçmişi grafik olarak sunulmuştur. Her bir görselin sağ tarafında yer alan sıcaklık ölçeğinde en yüksek sıcaklıklar görülmektedir. Tarama devam ettiği süre boyunca en yüksek sıcaklığın artış gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.7. Tek yönlü boyuna tarama stratejisi sıcaklık kontur gösterimi

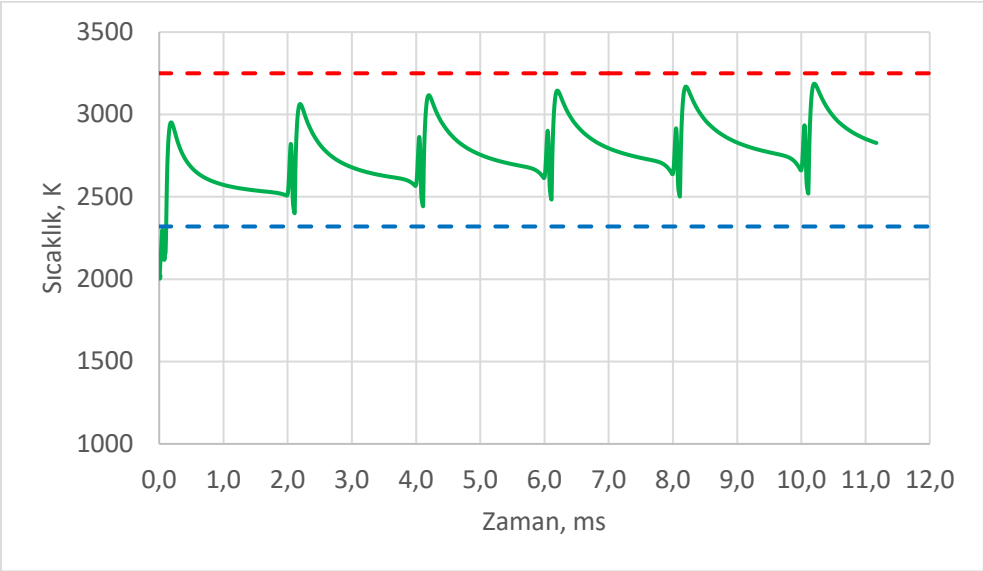
Şekil 4.8 incelendiğinde lazer ışının doğrusal hat boyunca ilerlediği anlarda sıcaklığın sabit olduğu ve her bir tarama hattı geçişinde toz yatağında tutulan ısı nedeniyle sıcaklığın kademeli olarak artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Tarama hattının sonuna gelindiğinde yeni bir taramaya başlandığında, ani bir sıcaklık düşüşü olduğu, ilerleyen taramalarda ise düşüş noktasının bir önceki sıcaklığa göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Tarama hattı boyunca sıcaklığın ergime sıcaklığı üstünde olduğu, ancak sıcaklık geçmişinin tamamının da bu aralıkta olmadığı da anlaşılmıştır. Bu durumda ani sıcaklık farklarının oluşumuna neden olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.8. Tek yönlü boyuna tarama stratejisi sıcaklık zaman grafiği

Şekil 4.9 ile zig zag tarama stratejisi ile toz yatağında meydana gelen sıcaklık geçmişi görülmektedir. Sıcaklık lazer ışınlarının ilerlemesi ile ergime sıcaklığı ile buharlaşma

sıcaklığı arasında dalgalanmaktadır. Burada önemli olan iki lazer ışınının da uygulandığında ergime sıcaklığına erişilmesidir. Ayrıca sıcaklığın minimum ve maksimum farkının olabildiğince düşük olması beklenmektedir.

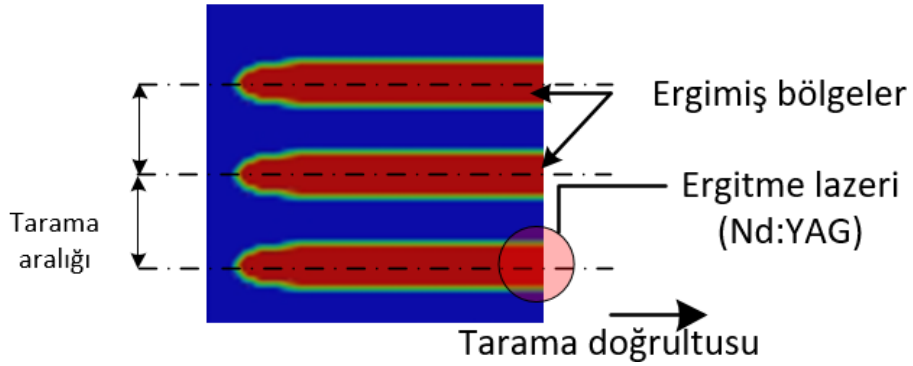


Şekil 4.9. Zig zag tarama stratejisinde sıcaklık zaman grafiği

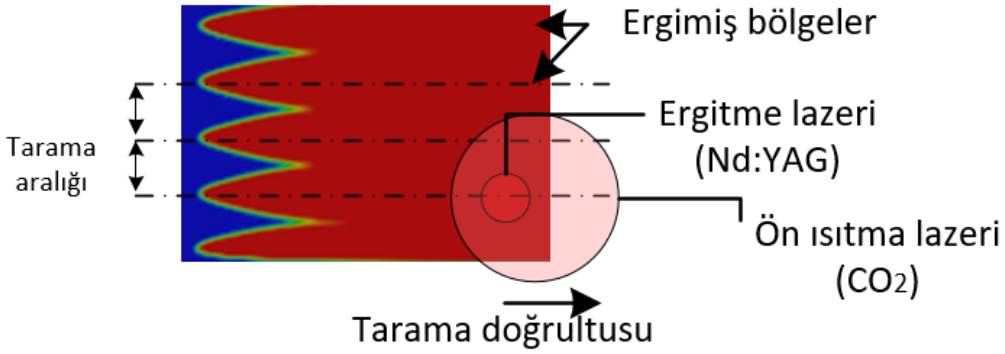
Tarama aralığı (hatch distance, H), sıcaklık geçmişi, mikro yapı ve ergiyik havuzu boyutu, örtüşme oranı, yüzey kalitesi ve bağıl yoğunluk üzerinde metal Eİ'de etkili olduğu literatürde belirtilmekle birlikte, tarama aralığının arttırılması, parçacıkların yetersiz ergimesine ve yüksek gözenekliliğe neden olduğu anlaşılmaktadır [78]. PBF yönteminde, lazer ışının ısıl davranışı, faz geçişlerini ve ergiyik havuzu davranışını doğrudan gözlemenin zor olduğu ve tarama aralığı, tarama hızı ve lazer gücü gibi lazer ışınının uygulanmasını kontrol eden parametrelerine büyük ölçüde bağlı olduğu bilinmektedir [79]. Farklı tarama aralıkları metal çalışmalarında, toz yatağının farklı ısı transferi davranışı sergilediği, yüzey kalitesini (gözeneklilik, pürüzlülük, vb.) doğrudan etkilediği ve örtüşme oranlarına etkilerini incelemişlerdir [79, 80]. Gözenekleri önlemek için yüksek lazer gücünde tam ergitme gerekli olduğu vurgulanmıştır. Yüksek tarama hızlarında ergitme profilinde kararsızlık, lazer gücünün artırılması durumunda bile devam ettiği vurgulanmıştır.

Tarama aralığının arttırılması maksimum sıcaklık ve ısı birikimini azaltmaktadır. Yüksek tarama aralığı uygulandıkça eriyiğin hem tepe sıcaklığı hem de sıcaklık gradyanı düşüş eğiliminde olduğu belirtilmiştir [78, 80].

Çalışma kapsamında sadece fiber lazer ışını ve CO_2 ve fiber lazerin toz katmanına uygulaması şematik olarak Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Tek lazer ışını ile tarama aralıklarının gösterimi



Şekil 4.11. Çift lazer ışını ile tarama aralıklarının şematik gösterimi

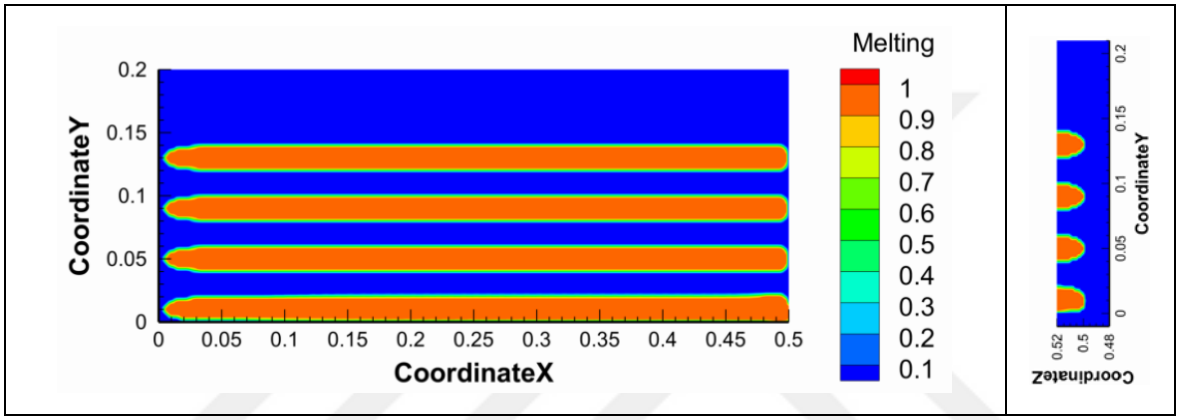
Model, başlangıç olarak uygun tarama mesafesini görmek için lazer ışını dikkate alınarak simülasyonlar yapılmıştır. D lazer ışınının çapı olmak üzere, tarama mesafesi 1D (40 µm) ve 0,5D (20 µm) gibi farklı tarama mesafesi değerleri analiz edilmiştir. Çizelge 4.7 ile verilen tarama aralığı parametreleri ile tek yönlü ilerleme nümerik çalışması gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar sonucu tarama aralığının 1D olduğu üst yüzeyin ve kesitin, lazer ışınlarının teması sonrasında oluşan ergiyik alanların kontur görünümü Şekil 4.12'te ve tarama mesafesinin 0,5D olduğu simülasyon sonucu elde edilen kontur görünümü Şekil 4.13'de verilmiştir.

Doğrusal tek yönlü olarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda 19,7 µm kanal genişliği, 20,26 µm derinlik ölçülmüştür. Lazer ışının hareketli olması, aktif lazer konumu dışında yüzey sıcaklığı hızlıca düşüş göstermektedir. Şekil 4.13'te sıcaklık geçmişi görülmektedir. Lazer ışının toz yatağını taraması sonucunda elde edilen sıcaklık geçmişi, lazer ile temas

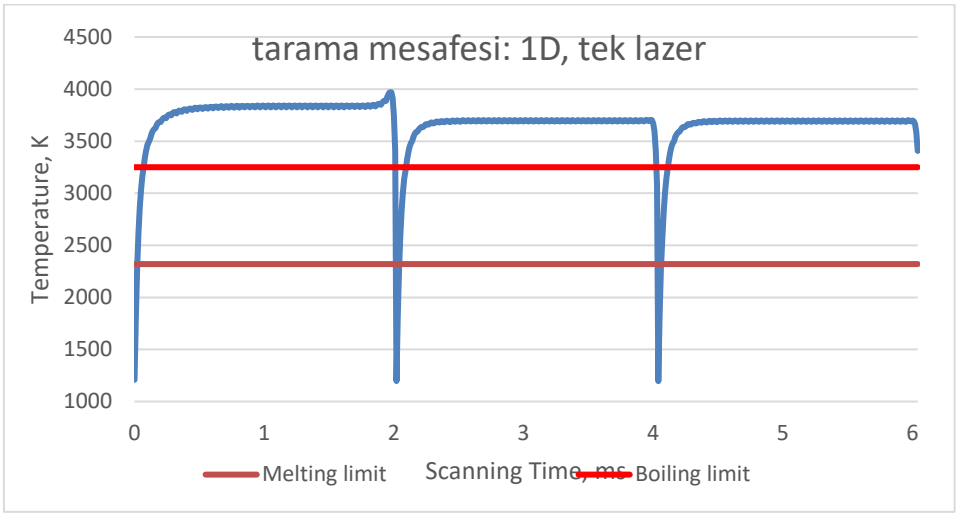
eden toz bölgesinde buharlaşma sıcaklığının geçildiği anlaşılmaktadır. Üretimi yapılması durumunda iş parçasında buharlaşma sebebiyle gözeneklilik ve yüksek sıcaklık farkı ile de çatlaklı bir yüzey görülmesi beklenmektedir.

Çizelge 4.7. Tarama aralığı incelemesi için fiber lazerin tek başına uygulandığı parametreler

Lazer gücü, P (W)	40
Lazer ışını çapı, D (µm)	40
Tarama hızı (mm/s)	250
Katman kalınlığı (µm)	20



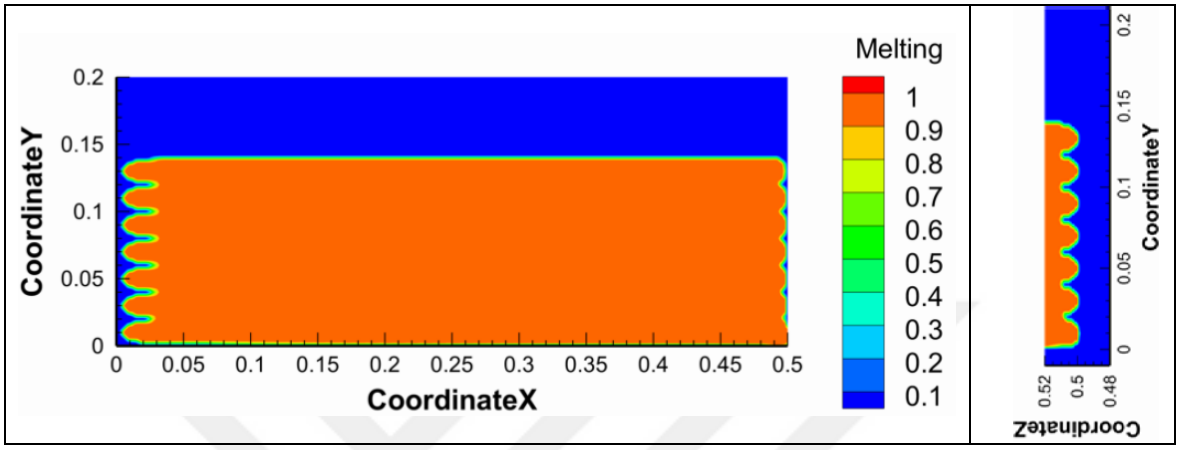
Şekil 4.12. Ergime kontur gösterimi, tarama mesafesi 1D, tek lazer, (19,7 µm kanal genişliği, 20,26 µm derinlik)



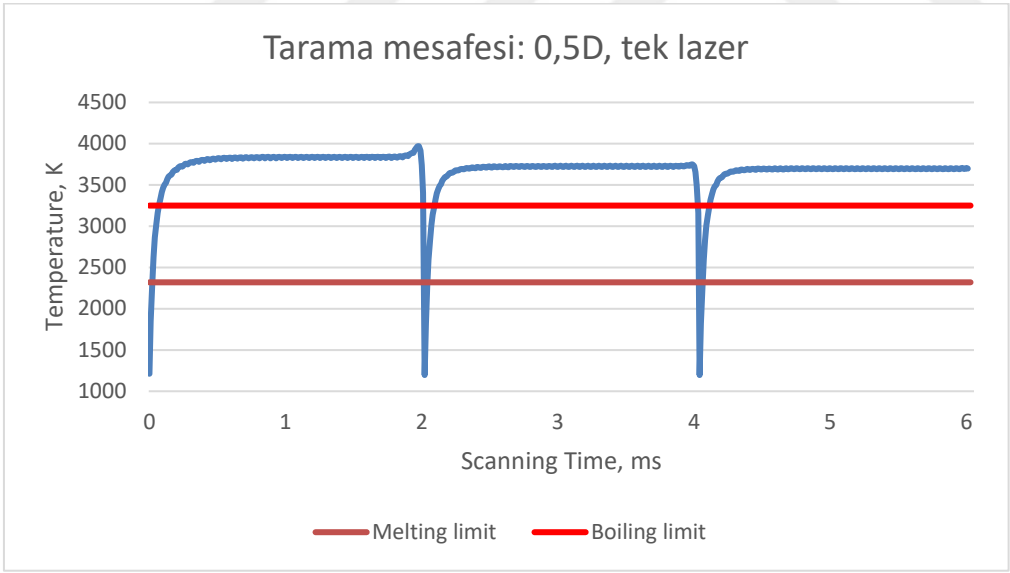
Şekil 4.13. Sıcaklık zaman grafiği, (tarama mesafesi: 1D, tek lazer)

Şekil 4.14 ile tarama aralığının 0,5D olan ergiyik yüzey konturu verilmiştir. Doğrusal tek yönlü tarama stratejisi ve 0,5D tarama stratejisi ile üst yüzeyde ergime gerçekleşirken, katmanın altında ergimeyen bölgelerin varlığı görülmektedir. Şekil 4.15 ile verilen grafik

incelendiğinde katman altında ergime sıcaklığına erişemeyen bölgeler bulunurken yüzeyde buharlaşma sıcaklığının üzerine çıkıldığı tespit edilmiştir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.15 incelendiğinde sadece tarama stratejisinin değişikliği yüzeyde hesaplanan en yüksek sıcaklık değerlerini değiştirmediği görülmüştür.



Şekil 4.14. Ergime kontur gösterimi, (tarama mesafesi 0,5D, tek lazer, kanal genişliği 20,45 µm, derinlik 20,26 µm)



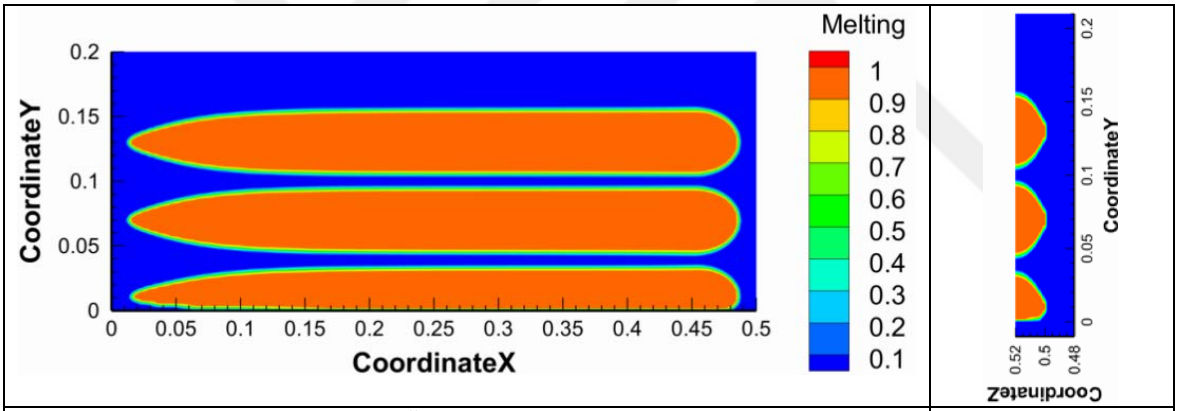
Şekil 4.15. Sıcaklık zaman grafiği, (tarama mesafesi: 0,5D, tek lazer)

Çift lazer ışınının kullanıldığı simülasyon ile 1,5D (60 µm) tarama mesafesi incelemeleri için Çizelge 4.8 ile verilen parametreler kullanılmıştır.

Çizelge 4.8. Tarama aralığı incelemesi için çift lazerin birlikte uygulandığı parametreler

Lazer gücü, P (W)	15- (fiber), 180- (CO_2)
Lazer ışını çapı, D (µm)	40 - (fiber), s400- (CO_2)
Tarama hızı (m/s)	0,250
Katman kalınlığı µm	20

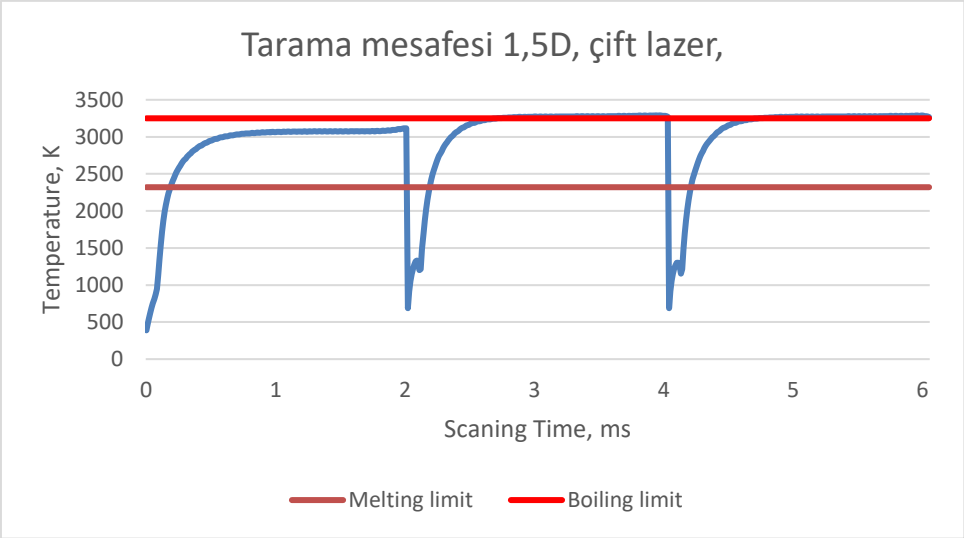
1,5D ile yapılan çalışmalar sonucunda Şekil 4.16'de verilen kontur görünümünde hem üst yüzeyde hem de katman kesitinde homojen bir birleşme görülememiştir. Ergimeyen bölgeler mavi renkle görülmektedir. Lazer tarama vektörlerinin başlangıç bölgelerinde yetersiz ergimelerin veya ergimemiş bölgeler görülmektedir. Kesit altında ise ergiyemeyen alanlar bulunmaktadır. Şekil 4.17 ile verilen grafikte çift lazer ile 1,5D tarama mesafesi uygulanmasıyla oluşan sıcaklık zaman grafiği sunulmuştur. Grafik incelendiğinde en yüksek sıcaklığın buharlaşma sıcaklığına erişebildiği görülmüştür.



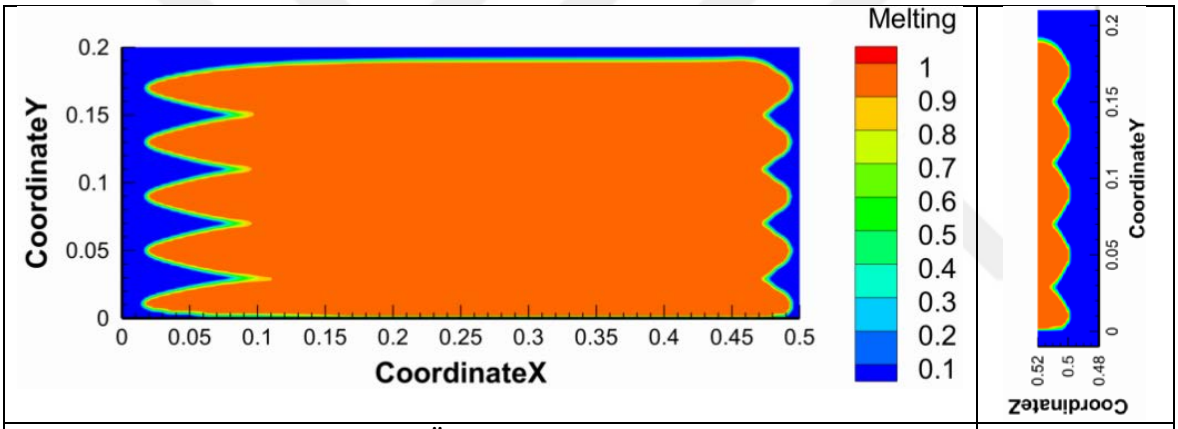
Üst yüzey | Yan kesit

Şekil 4.16. Ergime kontur gösterimi, tarama mesafesi 1,5D, çift lazer, (kanal genişliği: 51, 59 µm, derinlik: 20,68 µm)

Çizelge 4.8 ile verilen lazer parametrelerinde, 1,5D olan tarama mesafesinin, üst yüzeyde bütünleşik bir alan oluşturmaması nedeniyle aynı parametreler kullanılarak 1D tarama mesafesi ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ergiyik kontur gösterimi Şekil 4.18'de sunulmuştur. Toz yatağı alanının lazer tarama başlangıcına denk gelen sol tarafında ergimeyen bölgeler görülmektedir. Ayrıca katman altında en derin ucun katman kalınlığına eriştiği ölçülse de ergime sıcaklığına erişemeyen, katı halde bulunan bölgeler de görülmektedir. Şekil 4.19 ile yüzeyin sıcaklık geçmişi sunulmuştur. Şekil 4.17 ile Şekil 4.19 kıyaslandığında sıcaklık geçmişi profilinin benzerlik içerdiği göze çarpmaktadır.

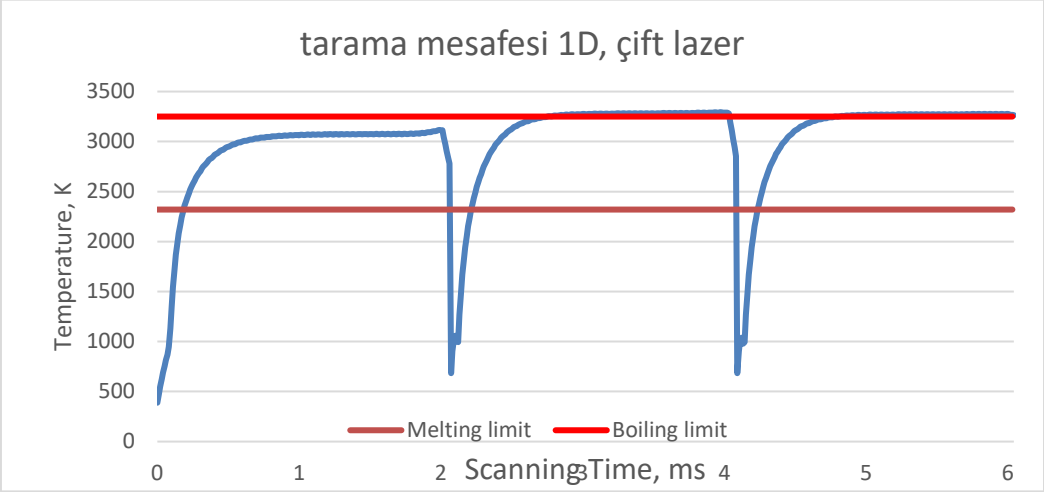


Şekil 4.17. Sıcaklık zaman grafiği, (tarama mesafesi 1,5D, çift lazer)



Üst yüzey	Yan kesit

Şekil 4.18. Ergime kontur gösterimi, tarama mesafesi 1D, çift lazer derinlik: 20,53 µm



Şekil 4.19. Sıcaklık zaman grafiği, tarama mesafesi 1D, çift lazer

4.1.2. Deneme üretimi parametreleri belirleme çalışmaları

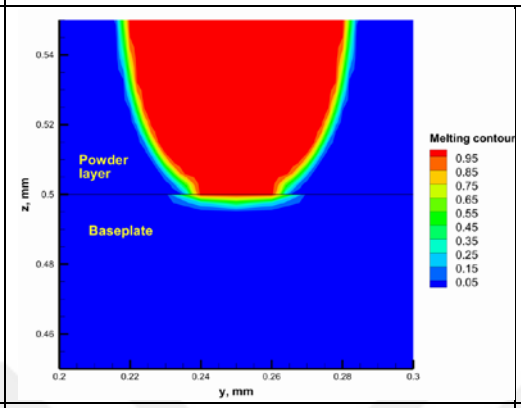
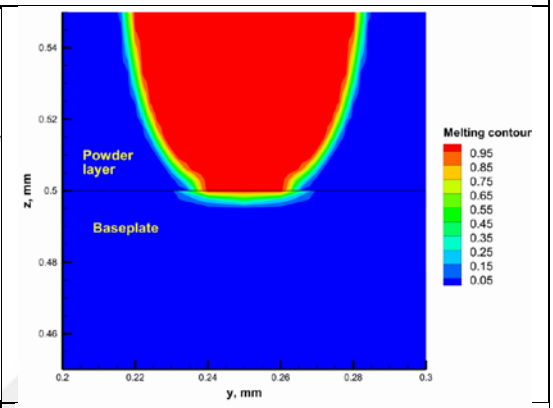
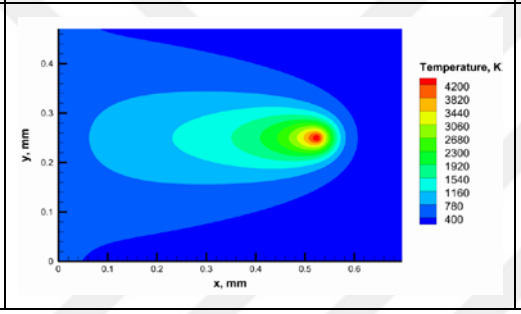
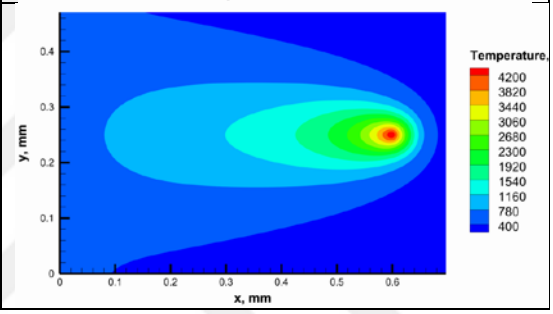
Deneme üretimi kapsamında yapılan ön nümerik analiz çalışmalarında belirlenen CO_2 lazer ışını güç aralıklarında lazer ekipmanı ve Eİ teçhizatı bulunamamıştır. Mevcut imkanlar dahilinde olan lazer ekipmanlarına göre parametre belirlenmesine yönelik nümerik çalışmalar yapılmıştır.

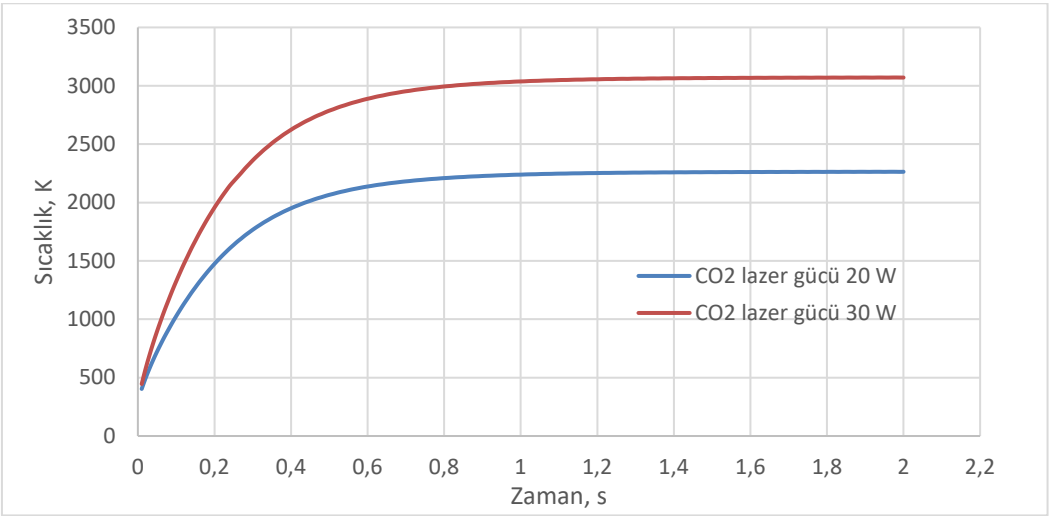
İşlem parametrelerinden lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi ve katman kalınlığının seçimi başarılı bir üretim için önemlidir. Lazer gücü ve tarama hızı, toz parçacıklarına aktarılan ısı miktarını etkilemektedir. Lazer gücü birim sürede aktarılan enerjiyi gösterirken, tarama hızı ise ısının toz tabakası üzerinde aktarım hızını kontrol etmektedir. Düşük tarama hızına sahip yüksek lazer gücü, basılan parça içerisinde gözeneklere yol açarken, düşük tarama hızına sahip düşük lazer gücü, toz parçacıklarının yetersiz ergimesine/sinterlenmesine yol açtığı bilinmektedir [81]. Bu nedenle lazer gücü ile tarama hızı arasında bir dengenin korunması önemlidir.

Lazer gücü ve tarama hızının uygun değerini belirlemek için sayısal model kullanılmıştır. Toz yatağının üst yüzeyinin ve yan kesitten alınan ergime konturları Çizelge 4.9 ile verilmiştir. Önceki nümerik analizlerde kullanılan parametrelerin aksine CO_2 lazer gücü azaltılmış ve fiber lazer gücü artırılmıştır. Ayrıca tarama hızları 150 mm/s hıza düşürülmüş ve katman kalınlığı üretim sistemine uygun şekilde 60 µm olacak şekilde geometrik model ve ağ yapısı (mesh) güncellenmiştir. Deneme üretimlerinde, üretim ekipmanına göre toz serici sistemin serimini yapılabildiği için katman kalınlığı 60 µm dikkate alınmıştır. Çizelge 4.9 ile verilen parametrelerin iyi bir ergime profili oluşturduğu, katman kalınlığından fazla bir derinliğe inerek hem alt taş plakasına tutunması hem de önceki katmanlar ile yeniden ergime yoluyla katmanlar arası bağ oluşturabileceği öngörülmüştür.

Ön ısıtma lazer ışını için, lazer gücü, 2000 K -3000 K arasındaki bir ön ısıtma sıcaklık aralığına ulaşılmasına göre hesaplanmıştır. Ön ısıtma sıcaklık değerleri, Liu ve diğerleri (2015) tarafından açıklanan sonuçlara göre seçilmiştir [82]. Ön ısıtma sıcaklığının arttırılmasının, basılı parçada oluşan çatlakları önemli ölçüde azalttığını önermişlerdir. Geliştirilen model, ön ısıtma lazer güç aralığını hesaplamak için kullanılmış ve Şekil 4.20'da 20 W ve 30 W CO_2 lazer gücü ile toz yatağı tarandığında meydana gelen sıcaklık geçmişi sunulmaktadır.

Çizelge 4.9. Deneme üretimi simülasyon parametreleri kontur görünümleri

	CO_2 lazer gücü 20 W	CO_2 lazer gücü 30 W
	Fiber lazer gücü 150 W Tarama hızı 150 mm/s	
Ergime konturu, kesit görünümü		
Sıcaklık konturu, üst yüzey		

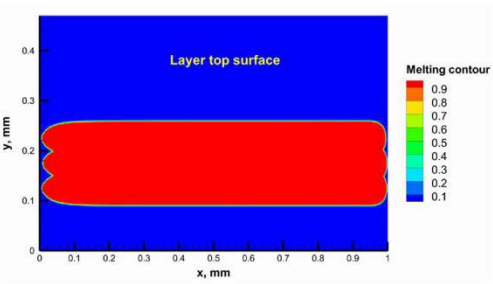
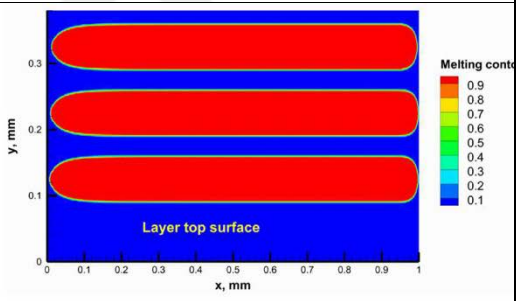
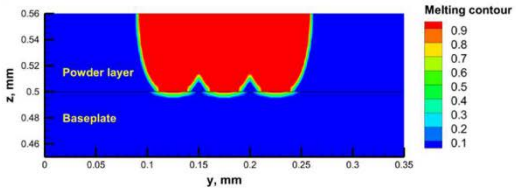
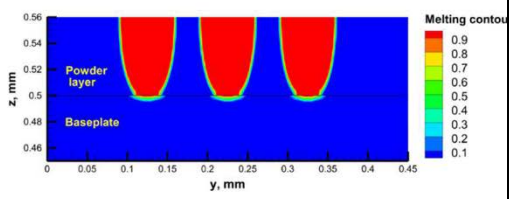


Şekil 4.20.CO_2 lazer ile elde edilen ön ısıtma sıcaklık grafiği

Tarama mesafesi, iki bitişik tarama izi arasındaki mesafeyi tanımlamaktadır. Yetersiz ergimeyi önlemek için tarama hatları arasında örtüşmenin sağlanması önemlidir [81]. Nümerik model, farklı tarama mesafelerini test etmek ve uygun bir değer seçmek için kullanılmıştır. Çizelge 4.10, katmanın üst yüzeyinde ergitme lazeri ışın çapı (D) kadar

mesafe 1D ve 2D tarama mesafelerini katman boyunca dikey bir kesiti kullanarak bitişik izler için ergime konturunu göstermektedir. 2D tarama mesafesini kullanarak bitişik lazer izlerinin örtüşmediği ve aralarında yetersiz ergime oluştuğu görülmektedir. Bu husus üretilen parçanın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Öte yandan, bitişik izler 1D tarama mesafesi kullanılarak neredeyse tamamen birbirine bağlandığı ve aralarında yeterli ergime oluştuğu görülmektedir. Ayrıca literatürdeki önceki çalışmalar [83, 84] incelendiğinde, seramiklerin PBF'sinde başarılı baskı için tarama mesafesinin 0,5D olması gerektiğini bildirmiştir. Ancak bu çalışmada geliştirilen ön ısıtma sistemi tarama mesafesinin 1D'ye kadar arttırılabileceğini göstermiştir. Üretim süresini de hızlandırmaktadır. Bu durum çalışma kapsamında geliştirilen ön ısıtma sistemi için önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.10. Farklı tarama mesafeleri için ergime konturları

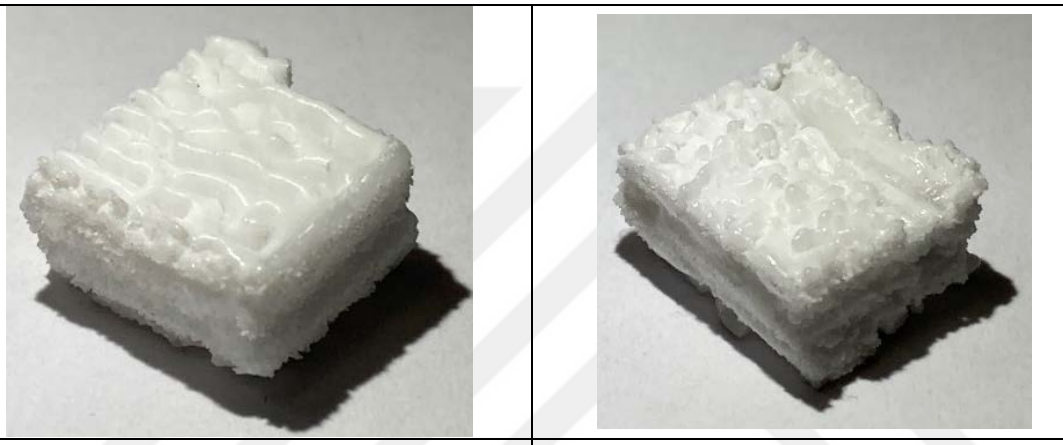
	Tarama mesafesi 1D	Tarama mesafesi 2D
Üst katman ergime konturu		
Yan kesit ergime konturu		

4.1.3. İlk deneme üretimi

Sayısal modelden yapılan denemeler sonucunda belirlenen parametreler yardımı ile deneme üretimi Çizelge 4.11 ile verilen parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Parametre 1 ve Parametre 2 arasında sadece CO_2 lazer ışın gücü farklılık göstermektedir. İlk denemelerde, iki adet numune başarıyla üretilmiştir. Üretimi yapılan numuneler Şekil 4.21'te verilen fotoğraflarda alttaştan ayrılmadan önceki hali gösterilmektedir. Numuneler görsel olarak muayene edildiğinde pürüzlü bir doku görülmektedir.

Çizelge 4.11. Deneme üretimi parametreleri.

	Parametre 1-Numune A		Parametre 2-Numune B	
Tarama mesafesi	0,050 mm			
Tarama stratejisi	zigzag			
Tarama hızı	150 mm/s			
Lazer güçleri	CO_2 lazer gücü, 20 W	Fiber lazer gücü, 150 W	CO_2 lazer gücü, 30 W	Fiber lazer gücü, 150 W
Alttaş	sinterlenmiş alümina plaka			
Lazer ışın çapı	Fiber: 120-130 µm, CO_2: 170-180 µm			
Katman kalınlığı	~ 60 µm			



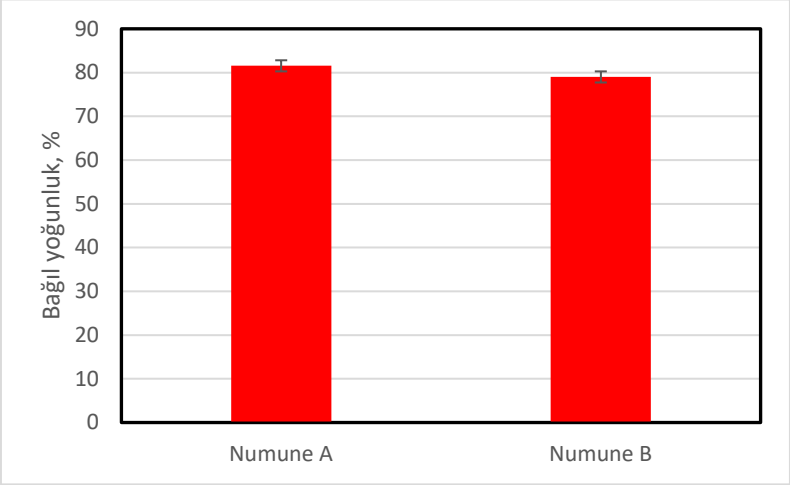
(a) A-20 W CO_2 lazer gücü numunesi (b) B-30 W CO_2 lazer gücü numunesi

Şekil 4.21. İlk deneme üretimi numuneleri: (a) 1 numaralı parametre seti numunesi, (b) 2 numaralı deneme üretimi parametre seti numunesi

4.1.4. Numune karakterizasyonu

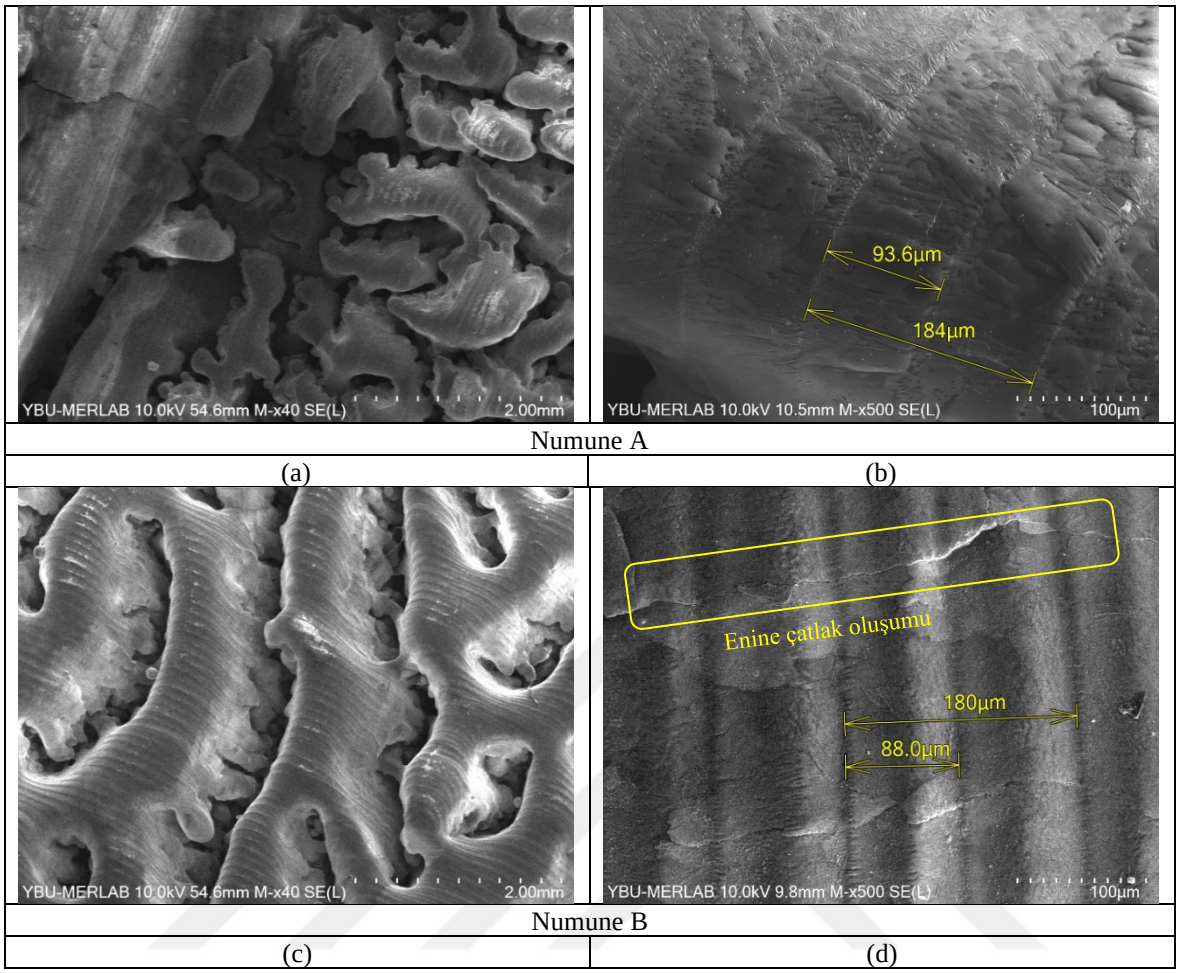
Numunelerin, Arşimet prensibi ile hacim ve kütleleri ölçülerek bağıl yoğunluk hesaplaması yapılmıştır. Her numune için üç ölçüm yapılarak, ortalama değer dikkate alınmıştır. Sonuçlar grafiksel olarak Şekil 4.22 ile sunulmuştur. A numunesinin yoğunluğu 3,161 kg/cm^3, % 81 bağıl yoğunluk, B numunesinin ise 3,094 kg/cm^3, % 79 bağıl yoğunluk ölçülmüştür. Numune B'de kısmen daha düşük bağıl yoğunluk elde edilmesinin ön ısıtma için kullanılan 30 W CO_2 lazer gücü nedeniyle ergitme lazeri sonrasında buharlaşma meydana gelmiş olabileceği düşünülmektedir. Elde edilen bağıl yoğunluk sonucu, tek adımlı bir Eİ yöntemi kullanılarak PBF ile üretilen alümina seramik için en yüksek bağıl yoğunluk olarak kabul edilebilir. Tez çalışması kapsamında PBF yöntemiyle uygulanan üretim sistematiğinin, seramik malzemeler için ön ısıtma sisteminin etkinliğini göstermektedir. Bu bulgu, tek

adımda nihai ürüne ulaşmak için ikincil işlem(ler)e gerek kalmadan doğrudan toz malzemeden seramiklerin PBF'sinde bir gelişme olarak değerlendirilmektedir.



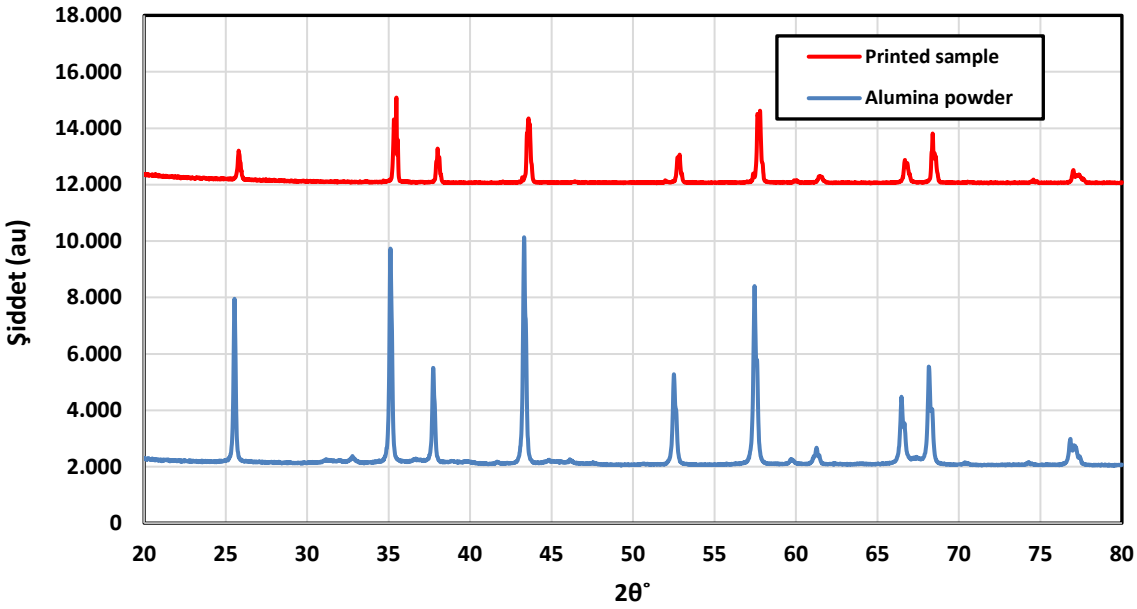
Şekil 4.22. Numune A ve B için bağıl yoğunluk ölçüm sonucu

Şekil 4.23'te A ve B numunelerinin herhangi bir işleme tabii tutulmadan üst yüzeyine ait FE-SEM görüntüleri gösterilmektedir. Numunelerde, üretimde kullanılan büyük toz boyutu dağılımından kaynaklanabilecek düzeyde gözeneklilik görülmektedir. A numunesinde belirgin çatlak tespit edilmemiştir ve lazer ergitme çizgileri görünür durumdadır. Çatlakların olmaması, esas olarak ön ısıtmadan dolayı toz yatağı üzerinde ergitme öncesi meydana gelen düşük sıcaklık farklarından kaynaklanmaktadır. Numune B'de enine bir çatlak modeli ve yüksek gözeneklilik seviyesi görülmüştür (Şekil 4.23-(d)). Bunun temel nedeni numune için kullanılan yüksek ön ısıtma lazer gücünden (30 W) ötürü ani sıcaklık artışı ile gelişen iç gerilmelerden ötürü [57] enine çatlaklı yapı oluştuğu anlaşılmaktadır. Ayrıca nümerik analizler sonucu 30 W ön ısıtma lazer gücü kullanımı ile elde edilebilecek sıcaklık yaklaşık olarak 3.000 K'e kadar çıkabilmektedir. Elde edilen numune neticesinde 30 W ön ısıtma lazer gücünün üretimlerde uygun olmadığı düşünülmektedir. FE-SEM mikro fotoğraflarında lazer ergitme izleri incelendiğinde ergitme lazeri olan fiber lazer ışın çapı olan 90 -120 µm değerinden daha düşük kalınlıklarda ölçülmesi ile fiber lazerin etkinliğini göstermektedir. Her ne kadar B numunesinde ön ısıtma sıcaklığı 3.000 K değerlerine çıkmış olsa da numune yüzeyinde bu çizgilerin belirgin olması ergitme lazerinin yapıya son halinin verilmesinde etkili olduğu anlaşılmıştır.



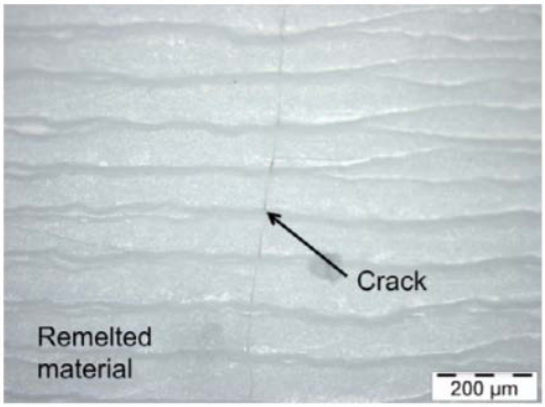
Şekil 4.23. Numunelerin FE-SEM mikro fotoğrafları, (a) Numune A 40x büyütme, (b) Numune A 500x büyütme, (c) Numune B 40x büyütme (d) Numune B 500x büyütme

Üretilmiş olan A numunesine ve kullanılan toz malzemeden alınan numuneye X-RD analizi yapılmıştır. Kristal yapı pikleri grafik Şekil 4.24 ile sunulmuştur. Alümina tozuna ait pikler ve numuneye ait pikler benzerlik gösterdiğinden başlangıç tozu ile basılan numune arasındaki fazlarda herhangi bir değişiklik olmadığı ve yeni fazların oluşmadığı görülmüştür.

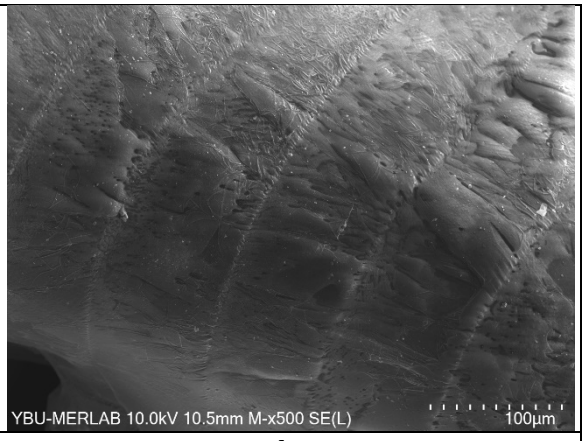


Şekil 4.24. Numune A ve toz malzemenin X-RD grafiği

Deneme üretimi sonucunda geliştirilen ön ısıtmalı seramik Eİ yöntemi ile alümina toz malzemesinden yoğun numunelerin üretilebileceği sonucuna varılmıştır. Üretilen numunelerde belirgin çatlak gözlenmemiştir. Yves-Christian ve diğerleri (2010) çalışmalarında geniş bir alanı ön ısıtma sistemi ile ısıtmalarından ötürü çatlak oluşumunu azaltmış olsalar da numunelerinde derin çatlaklar oluştuğu yayımlanan makalelerinde görülmektedir. [85]. Çalışmada üretilen A numunesine ait FE-SEM görüntüsü ile Yves-Christian ve diğerleri (2010)'nın numune yüzeylerine ait FE-SEM görüntüleri Şekil 4.25 ile gösterilmektedir. Tez çalışmasında üretilen numune daha kontrollü bir önısıtma sağlandığından çatlak oluşumu görülmemiştir.



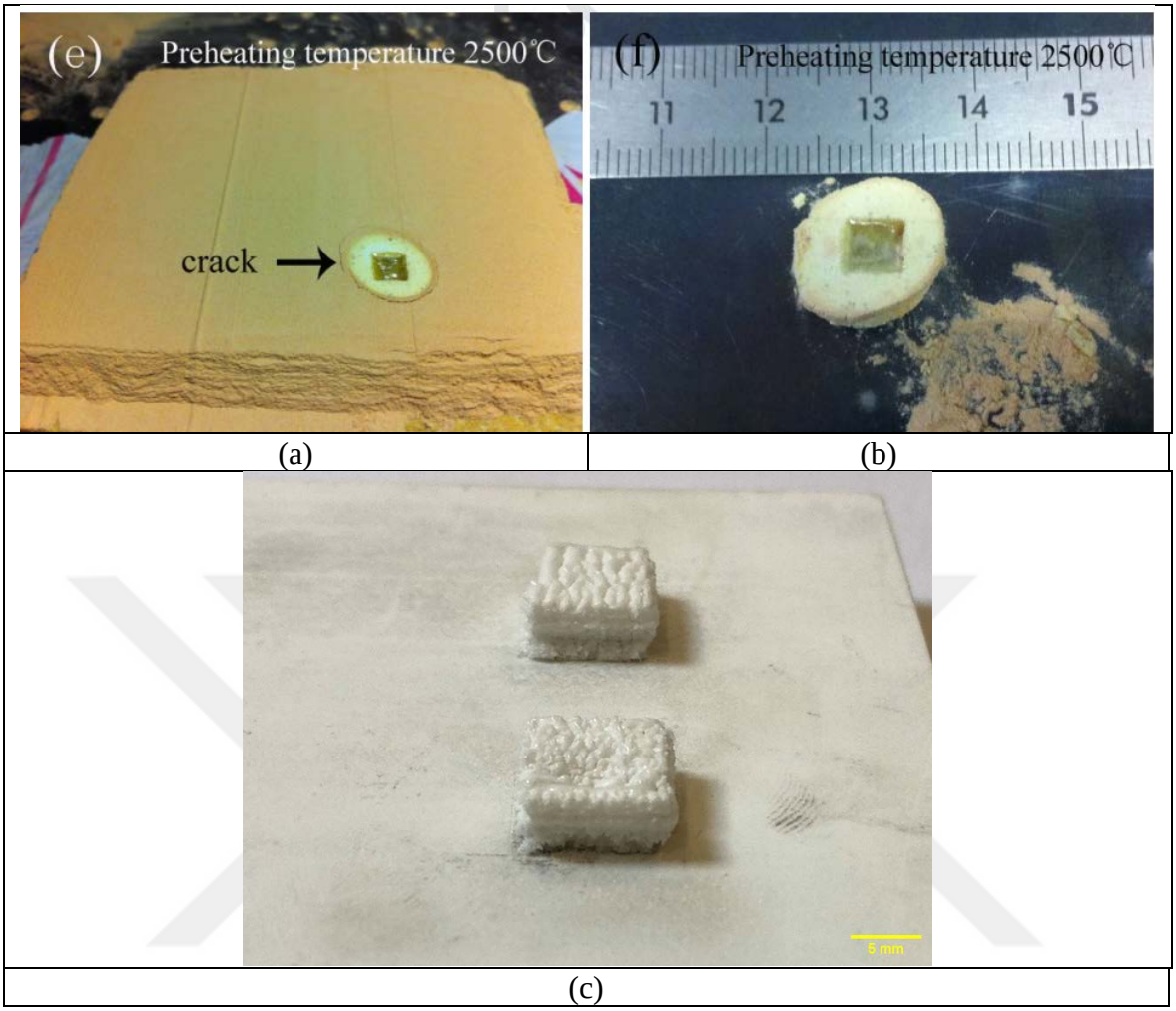
a



b

Şekil 4.25. (a) Yves-Christian ve diğerleri (2010) tarafından geliştirilen ön ısıtma sistemi kullanılarak basılan Alümina-zirkonya numunesinin SEM görüntüsü (b) tez çalışmasında geliştirilen ön ısıtma sistemi kullanılarak basılan saf Alümina malzemeden A numunesinin FE-SEM görüntüsü

Dar bir alanda ön ısıtma sağlandığından, taranmayan tozlar sinterlenmemiş ve parçanın toz yatağından alınmasında da zorluk yaşanmamıştır. Literatür ile kıyaslandığında ön ısıtma sistemi kullanan Liu ve diğerleri (2015) YSZ tozunun fiber lazer ile ön ısıtılması sonucu parça çevresinde sinterlenmiş toz Şekil 4.26 (a) ve (b)'de gösterilmektedir. Ön ısıtma sıcaklığının artışı ile daha fazla sinterlenen tozlar üretilen parçanın kalitesini önemli ölçüde etkileyebilir. Sinterlenmiş tozun parça yüzeylerinden çıkarılması için ikincil işlemler gerekebilir. Bununla birlikte, tez kapsamında geliştirilen ön ısıtma tekniği ile numune alttaşı ile toz yatağından alındığında parçayı çevreleyen yapışmış tozlar görülmemektedir (Şekil 4.26 (c)). Geliştirilen yöntemde toz yatağından parçanın alınmasında önemli bir gelişme elde edildiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.26. Liu ve diğerleri (2015) çalışmalarına ait (a) toz yatağı görüntüsü, (b) parça ile sinterlenmiş tozların görüntüsü, (c) tez çalışmasında üretilen numuneler

4.2. Proses Penceresi Nümerik Analiz Sonuçları

Deneme üretimleri sonrasında geliştirilen ön ısıtmalı sistem ile üretilebilirliği mümkün olduğu görülen alüminanın PBF yöntemi için parametre geliştirilmesine yönelik proses penceresi geliştirilmiştir. Bu kapsamda Çizelge 4.12 ile verilen parametreler göre simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Birinci grupta daha kapsamlı bir pencere geliştirilirken ikinci grupta daha dar bir parametre seti seçilmiştir.

Çizelge 4.12. Proses penceresi parametreleri

Parametre	1. Grup	2. Grup
CO2 lazer gücü (W)	10, 20, 30, 40, 50	15, 20, 25
Fiber lazer gücü (W)	100, 110, 120, 130, 140, 150	40, 50, 60, 70, 80, 90
Tarama hızı (mm/s)	100, 200, 300, 400, 500	100, 200

Belirlenen parametreler ile toplamda 150 adet simülasyon birinci grupta, 36 adet simülasyon ikinci grupta yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarından maksimum sıcaklık, sıcaklık dağılım konturları ile ergiyen yüzey ve yan kesit verileri elde edilmiştir. Birinci grupta elde edilen sonuçlar Ek-1 ile verilmiştir. İkinci grupta elde edilen sonuçlar ise Ek-2 ile sunulmuştur.

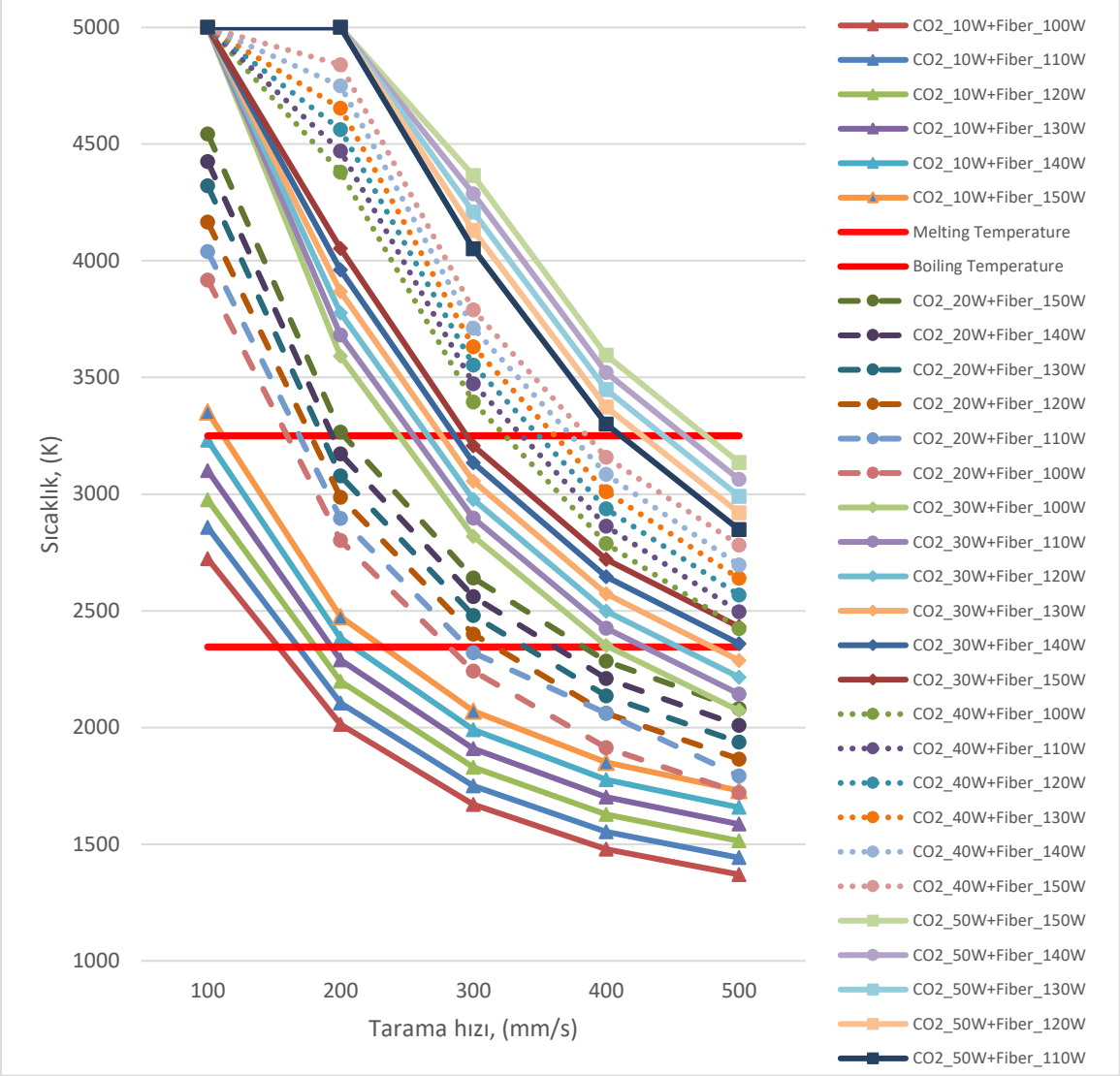
Simülasyonlardan elde edilen en yüksek sıcaklık sonuçları Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14 ile gösterilmiştir. Tablolarda yeşil ile boyalı parametre noktalarında elde edilen sıcaklıklar ergime noktasının üzerinde ve kaynama noktasının da altında bulunmaktadır. Hesaplanan sıcaklığın 5.000 K değerini geçmesi durumunda, buharlaşma sıcaklığının çok üzerinde bir sıcaklık olması nedeniyle hesaplamalar UDF kodu ile durdurulduğundan, daha yüksek sıcaklıklar hesaplanmamıştır. Elde edilen sıcaklık ve parametre ilişkisi çizgi grafiği ile Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 ile sunulmuştur.

Çizelge 4.13. Birinci grup simülasyon parametreleri ve en yüksek sıcaklık [K] sonuçları

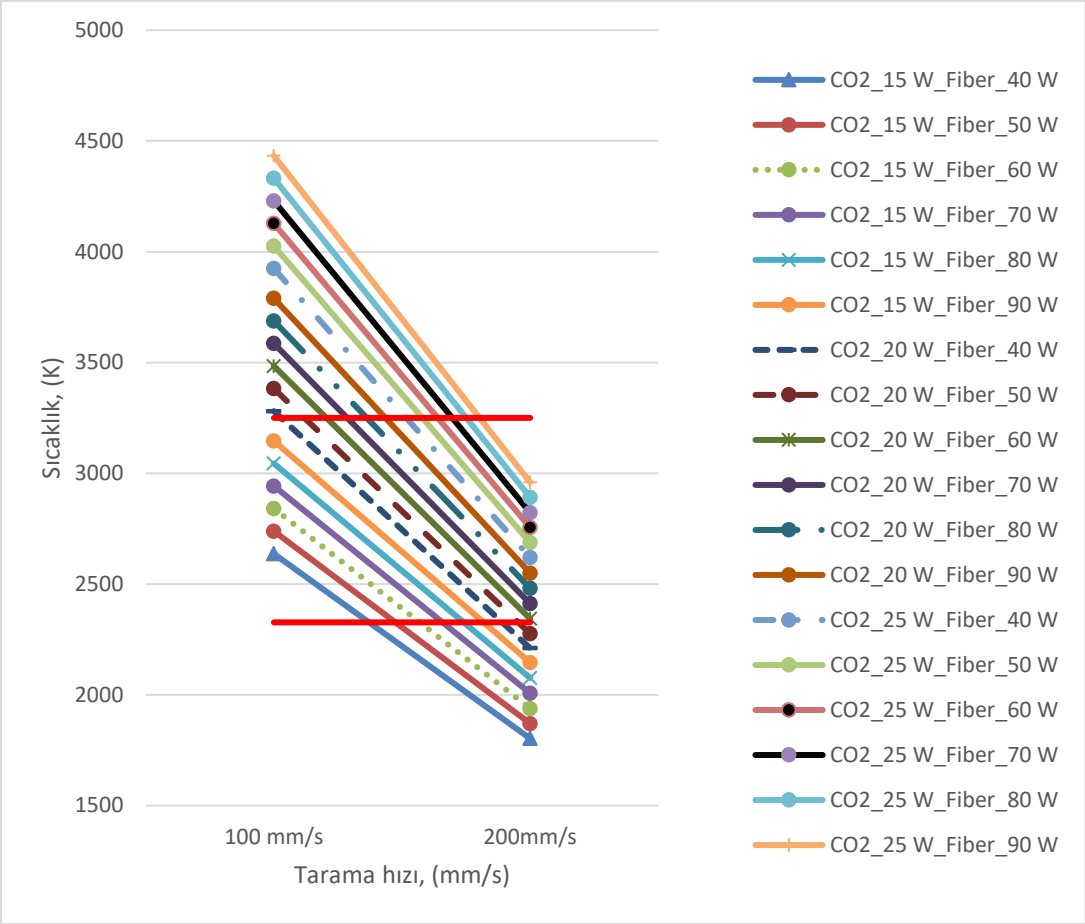
	CO_2 lazer gücü 10 W					
Fiber lazer	150 W	*3351,71*	*2474,13*	*2069,53*	*1850,43*	*1729,28*
	140 W	*3230,47*	*2381,78*	*1989,55*	*1775,94*	*1657,38*
	130 W	*3100,97*	*2289,66*	*1909,66*	*1701,49*	*1585,49*
	120 W	*2975,54*	*2197,3*	*1829,68*	*1627,01*	*1513,6*
	110 W	*2857,58*	*2104,72*	*1749,74*	*1552,54*	*1441,7*
	100 W	*2722,86*	*2012,37*	*1669,8*	*1478,09*	*1369,8*
	Tarama hızı	100 mm/s	200 mm/s	300 mm/s	400 mm/s	500 mm/s
	CO_2 lazer gücü 20 W					
Fiber lazer	150 W	*4543,52*	*3265,21*	*2640,14*	*2283,82*	*2080,13*
	140 W	*4425*	*3171,83*	*2560,12*	*2209,32*	*2008,21*
	130 W	*4320,72*	*3077,81*	*2480,05*	*2135,06*	*1936,34*
	120 W	*4165,71*	*2986,41*	*2400,2*	*2061,17*	*1864,44*
	110 W	*4039,62*	*2895,1*	*2320,36*	*2061,17*	*1792,55*
	100 W	*3917,35*	*2800,8*	*2241,24*	*1913,44*	*1720,63*
	Tarama hız	100 mm/s	200 mm/s	300 mm/s	400 mm/s	500 mm/s
	CO_2 lazer gücü 30 W					
Fiber lazer gücü	150 W	*5000*	*4052,88*	*3206,33*	*2720,17*	*2430,98*
	140 W	*5000*	*3960,53*	*3133,49*	*2646,3*	*2359,09*
	130 W	*5000*	*3867,2*	*3054,63*	*2572,48*	*2287,2*
	120 W	*5000*	*3776,423*	*2976,21*	*2498,64*	*2215,29*
	110 W	*5000*	*3681,72*	*2897,18*	*2424,72*	*2143,55*
	100 W	*5000*	*3590,71*	*2818,47*	*2350,92*	*2071,97*
	Tarama hızı	100 mm/s	200 mm/s	300 mm/s	400 mm/s	500 mm/s
	CO_2 lazer gücü 40 W					
Fiber lazer gücü	150 W	*5000*	*4839,7*	*3789,1*	*3157,7*	*2781,94*
	140 W	*5000*	*4749,69*	*3710,44*	*3083,9*	*2695,676*
	130 W	*5000*	*4653,45*	*3631,58*	*3010,12*	*2638,76*
	120 W	*5000*	*4561,12*	*3552,93*	*2936,34*	*2567,14*
	110 W	*5000*	*4470,33*	*3472,96*	*2862,49*	*2495,61*
	100 W	*5000*	*4379,01*	*3394,87*	*2788,59*	*2424,05*
	Tarama hızı	100 mm/s	200 mm/s	300 mm/s	400 mm/s	500 mm/s
	CO_2 lazer gücü 50 W					
Fiber lazer gücü	150 W	*5000*	*5000*	*4364,61*	*3595,06*	*3135,16*
	140 W	*5000*	*5000*	*4286,68*	*3521,1*	*3062,76*
	130 W	*5000*	*5000*	*4208,29*	*3447,09*	*2990,71*
	120 W	*5000*	*5000*	*4129,16*	*3373,44*	*2919,49*
	110 W	*5000*	*5000*	*4051,29*	*3299,67*	*2847,83*
	100 W	*5000*	*5000*	*3972,42*	*3225.81*	*2776,25*
	Tarama hızı	100 mm/s	200 mm/s	300 mm/s	400 mm/s	500 mm/s

Çizelge 4.14. İkinci grup simülasyon parametreleri ve en yüksek sıcaklık [K] sonuçları

		CO_2 lazer gücü 15 W		CO_2 lazer gücü 20 W		CO_2 lazer gücü 25 W	
Fiber lazer gücü	40 W	*2636,48*	*1802,61*	*3279,99*	*2210,28*	*3923,8*	*2618,95*
	50 W	*2738,49*	*1870,43*	*3381,88*	*2275,58*	*4025,69*	*2686,87*
	60 W	*2840,41*	*1938,27*	*3483,74*	*2343,46*	*4127,49*	*2754,99*
	70 W	*2942,26*	*2007,05*	*3585,61*	*2411,78*	*4229,33*	*2822,09*
	80 W	*3044,16*	*2075,83*	*3687,44*	*2480,55*	*4331,16*	*2891,14*
	90 W	*3145,93*	*2145,24*	*3789,27*	*2549,42*	*4432,99*	*2959,28*
		100 mms	200mms	100 mms	200mms	100 mms	200mms



Şekil 4.27. Birinci grup parametre seti ile elde edilen en yüksek sıcaklık ilişkisi değerleri



Şekil 4.28. İkinci grup parametre seti ile elde edilen en yüksek sıcaklık ilişkisi değerleri

Simülasyon sonuçlarından elde edilen en yüksek sıcaklık parametre seti ilişkisi sonucunda ergimenin gerçekleştiği, buharlaşma sıcaklığının ise geçilmediği toplamda 49 parametre seti belirlenmiştir. Beş parametre setinin tamamı, altı parametre setinin ise parçalı olarak 18'i ergime-buharlaşma sıcaklığı arasında yer almıştır. İkinci parametre setinde ise ergime sıcaklığı ile buharlaşma sıcaklığı arasında kalan 16 parametre seti belirlenmiştir. Devam eden bölümde sunulacak olan numune üretimlerinde, kullanılan parametrelere ilişkin geliştirilmiş olan nümerik model ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Üretimi yapılabilen numuneler ve parametre setleri incelendiğinde ergime -buharlaşma sıcaklığı arasında kalan parametreler ile üretimin yapılması gerektiği düşünülmektedir. Ancak, simülasyonlar sonucunda elde edilen en yüksek sıcaklıklar noktasal olarak en üst yüzeyin anlık sıcaklık değerleridir. Bu durumda, Çizelge 4.13 ve

Çizelge 4.14'te verilen parametrelerden üst yüzeyin buharlaşma sıcaklığını geçtiği görülen parametre setleri ile de üretim sağlanabildiği devam eden bölümlerde görülmektedir.

4.3. Numune Üretimleri

Gerçekleştirilen nümerik çalışmalar ve numune üretimleri sonucunda Çizelge 4.15 ile verilen parametreler kullanılarak numuneler üretilmiştir. Numune üretimlerinde birçok parametre kontrollü bir şekilde uygulanarak üretilmiştir. Üretilen numuneler fotoğraflanmıştır. Kurulan çift lazerli sistem kontrolleri yapılmıştır. Lazer güçleri kontrol edilmiştir. Kullanılan tozlar üretime başlamadan önce 200 ˚C sıcaklıkta endüstriyel bir fırın kullanılarak 45 dakika nem alma işlemine tabi tutulmuştur. Her yeni üretim başlangıcında nem alma işlemi tekrarlanmıştır. Seramik alttaşlar üretim tablasına her üretim öncesi sabitlenmiştir. Sabitleme sırasında iki lazerin ortak çalışma alanı kontrol edilmiştir. Üretimlerde, her bir sette 3 numunenin bulunduğu her bir numune için farklı parametre setleri kullanılmıştır. Bazı numuneler üretilememiş, bazı numunelerde alttaştan sökmek için parçalamak gerekmiş olmasına karşın PBF yöntemi ile tek aşamada numune üretimi başarılı sonuçlanmıştır.

Çizelge 4.15. Deneme üretimlerinde kullanılan parametreler

Parametre	Değerler
CO_2 lazer ışın gücü (W), P_{CO2}	10 ,15, 20, 25, 30
Fiber lazer ışın gücü (W), P_{fiber}	40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 105, 110, 130, 140, 150
Tarama hızı (mm/s), V	100, 200
Katman kalınlığı (µm), L	50, 60, 75, 100, 125
Tarama mesafesi (µm), H	20, 25, 30, 50, 75
Tarama stratejileri *(aksi belirtilmedikçe kullanılan parametre lineer 45˚ uygulanmıştır)*	- Lineer 0˚ - Lineer 45 ˚ - Lineer 67 ˚ - Lineer 90 ˚ - Konsentrik içten dışa - Konsentrik dıştan içe
Toz	Al_2O_3 (Boyut: 22-59 µm)
Plaka	Al_2O_3 (Boyutlar: ~100 mm x 50mm x 10 mm, Saflık: % 95 Al_2O_3)
Numune boyutları	10x10x8 mm

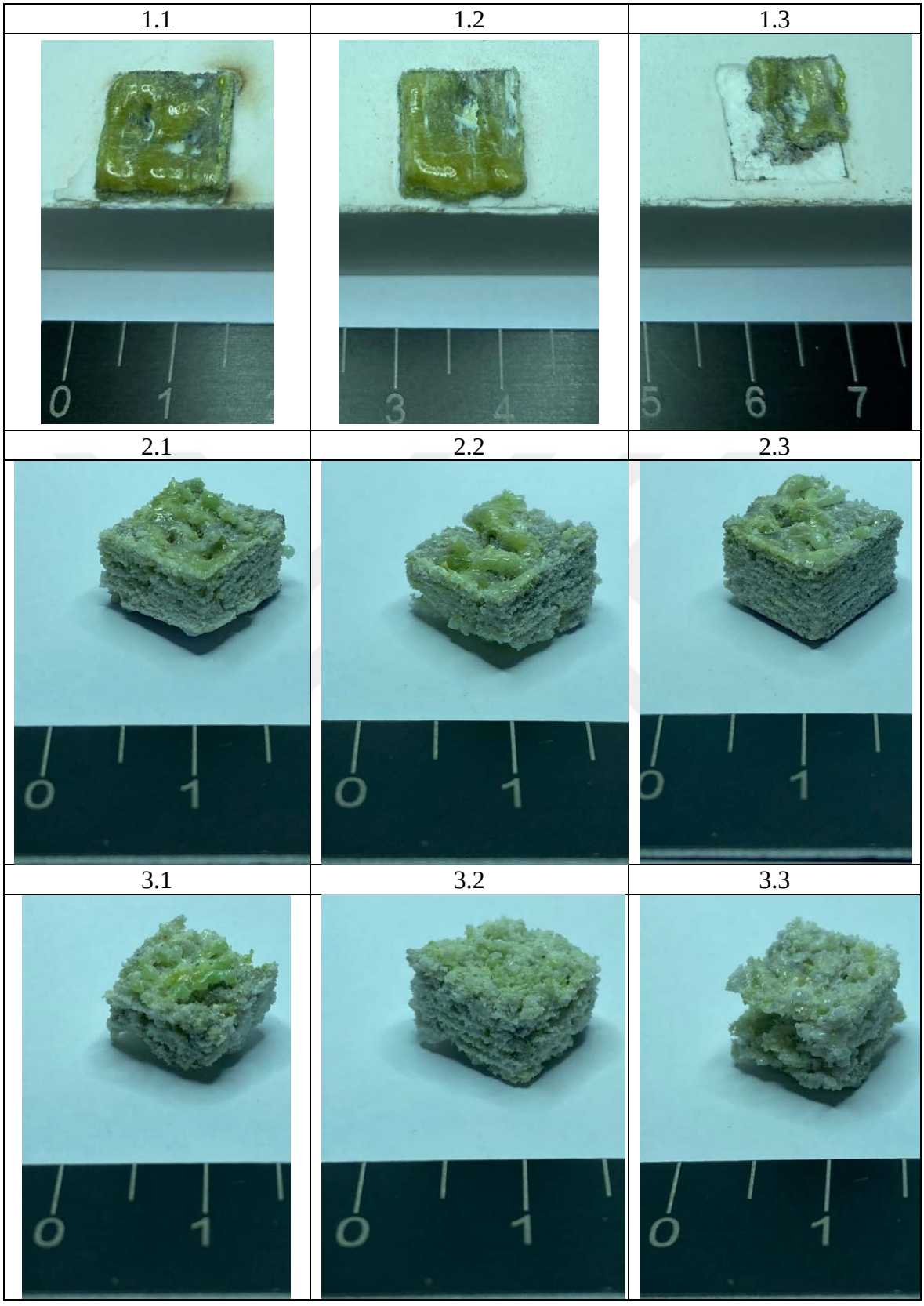
Grup I'in üretiminde kullanılan parametreler Çizelge 4.16 ile verilmiştir. Üretilen numuneler ise Şekil 4.29'de görülmektedir. Tarama stratejisi, her bir lazer tarama vektörünün her bir

katmanda 45˚açıda katmanı taraması ve her bir katman değişiminde +90˚ vektörlerin açısının döndürülmesi ile üretilmiştir. Tarama stratejisinin incelendiği çalışmalar haricinde tüm numune üretimlerde bu tarama stratejisi kullanılmıştır.

Çizelge 4.16. Grup I üretim parametreleri

Grup I					
Numune no	$P_{CO2,}$ W	P_{fiber}, W	V, mm/s	L, µm	H, µm
1.1	20	130	100	60	50
1.2		140			
1.3		150			
2.1	20	130	200	100	50
2.2		140			
2.3		150			
3.1	20	130	200	100	75
3.2		140			
3.3		150			

Grup I üretiminde 1.1-1.3 numaralı numunelerde ergitme lazer gücü haricinde ön ısıtma lazer gücü sabit tutulmuştur. Bu numuneler alttaştan sökülememiştir. Numunelerin orta bölgelerinde boşluk, kenarlarına doğru yığılmış malzeme olması uygulanan enerjinin yüksekliği ile ilişkilendirilmiştir. İlk üretim denemesinde A ve B numunelerinin üretiminde kullanılan 60 µm katman kalınlığının, toz boyut dağılımı (22-59 µm) dikkate alındığında diğer üretimler için de uygun olmadığı görülmüştür. 1.1-1.3 numuneleri Nümerik çalışmalardan elde edilen parametreler kullanılmıştır. Nümerik analiz çalışmalarında, makro ölçekte simülasyonlar yapıldığından ve toz boyutunun etkisi mikro analizlerde olduğu gibi görülemediğinden simülasyon sonuçları halen geçerlidir ancak katman kalınlığının artırılması gerektiği düşünülmüştür.



Şekil 4.29. Grup I deneme üretimi numuneleri

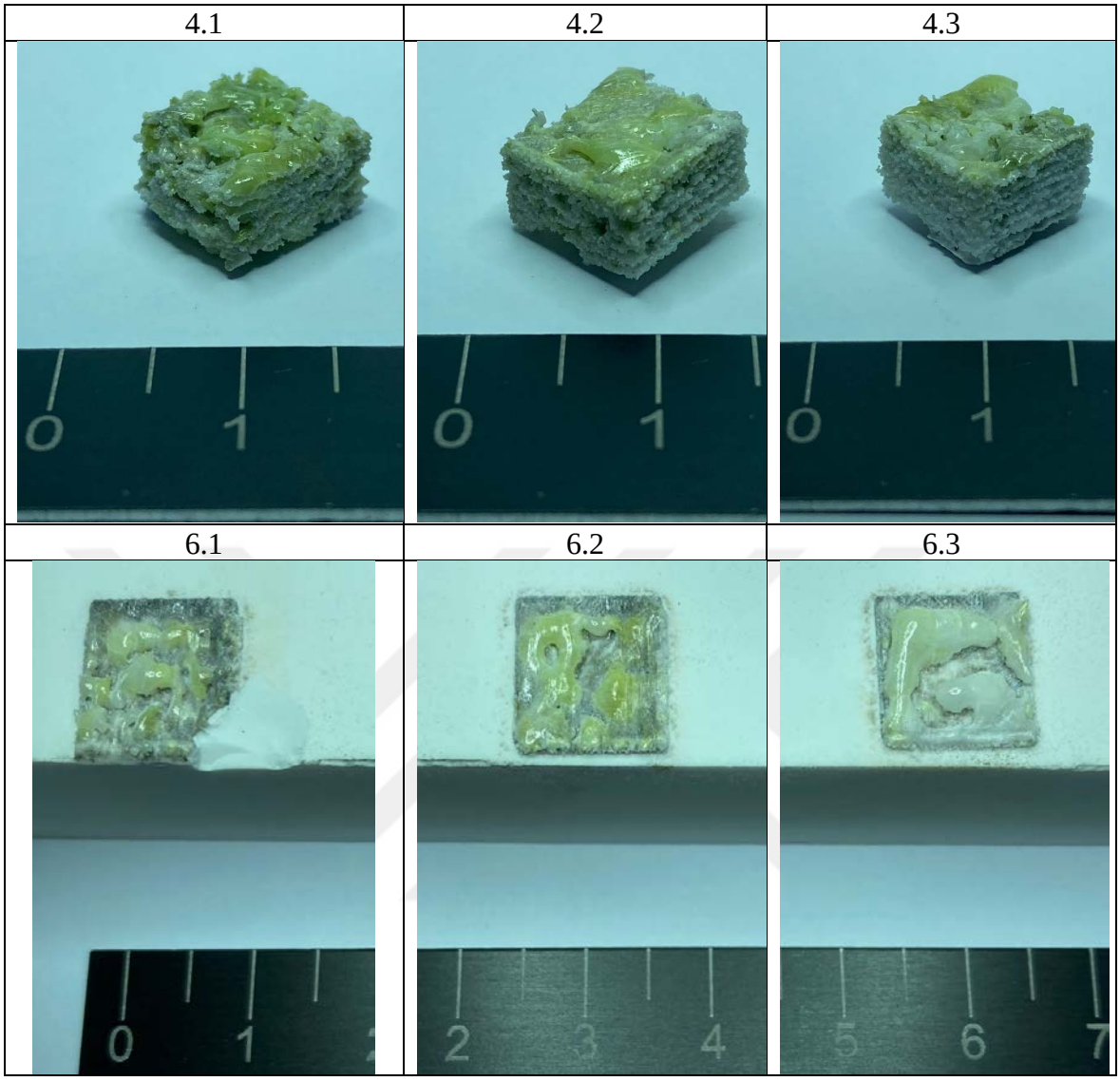
Numune 2.1-2.3'ün üretiminde ise katman kalınlığı ve tarama hızı artırılarak üç numune için sabit tutulmuştur. Ön ısıtma lazer gücü ve fiber lazer gücü sabit uygulanmıştır. Üretilen numuneler alttaştan sökülebilmiştir ancak numuneler kırılgan ve parça bütünlüğü iyi değildir. 2.1 ve 2.2 numunelerinde derin çatlaklar ve oyuklar görülmektedir. Ancak 2.3 numunesi diğer ikisine göre boyutları belirgin, köşeleri keskin olduğu görülmektedir. Numunelerin üst yüzeyleri, ergiyik alüminanın yüzey geriliminden ötürü balling effect olarak isimlendirilen topaklaşma görülmektedir [86]. Tarama hızının azaltılması ve katman kalınlığının artırılması uygulanan enerjinin yoğunluğunu düşürmüştür.

Numune 3.1-3.3'ün üretiminde bir öncekinden farklı olarak tarama mesafesi artırılmıştır. Artırılan trama mesafesi ile birim alana uygulanan enerjinin azalmasıyla parça bütünlüğü olmayan numunelerin üretildiği görülmüştür. Tarama mesafesi bu aşamadan itibaren 50 µm'den daha büyük seçilmemiştir.

Grup I deneme üretiminde elde edilen sonuçlara istinaden Grup II üretimlerinde ön ısıtma ve ergitme lazer güçleri değiştirilerek tarama hızı, katman kalınlığı ve tarama mesafesinin sabit tutulduğu parametreler Çizelge 4.17 ile gösterilmektedir. Üretilen numunelere ait görseller ise Şekil 4.30 ile sunulmuştur.

Çizelge 4.17. Grup II üretim parametreleri

Grup II					
Numune no	$P_{CO2,}$ W	P_{fiber}, W	V, mm/s	L, µm	H, µm
4.1	20	100	100	100	50
4.2		105			
4.3		110			
5.1	15	100	100	100	50
5.2		105			
5.3		110			
6.1	30	100	100	100	50
6.2		105			
6.3		110			



Şekil 4.30. Grup II üretimi numuneleri

Grup II parametreleri ile üretilebilen numune yüzeylerinde ergiyip katılaşma olduğu görülmektedir. Numunelerin genel durumu, CO_2 lazer gücü sabit tutulduğunda, fiber lazer gücü arttıkça iyileştiği görülmektedir. Ancak yine de daha keskin köşeler ve kaliteli yüzeylere sahip olması beklenmektedir. 5.1-5.3 numunelerinin ise düşük ön ısıtma lazeri gücü nedeniyle üretilemediği düşünülmüştür. Bu aşamadan sonra kullanılacak üretimlerde ön ısıtma lazer gücünün en az 20 W olması kararlaştırılmıştır.

6.1-6.3 numunelerinde, bir öncekine kıyasla sadece ön ısıtma lazer ışın gücü artırılmıştır. Ancak sonuçta elde edilen üretim ilk deneme sonuçları ile benzerlik göstermesi yüzeye uygulanan enerjinin azaltılması gerektiği düşünülmüştür. Yüksek ısı girdisi nedeniyle 6.1

numunesi üzerinde alttaşın çatladığı görülmektedir. Numuneler alttaştan alınabilir bir durumda olmadığı Şekil 4.30'de görülmektedir.

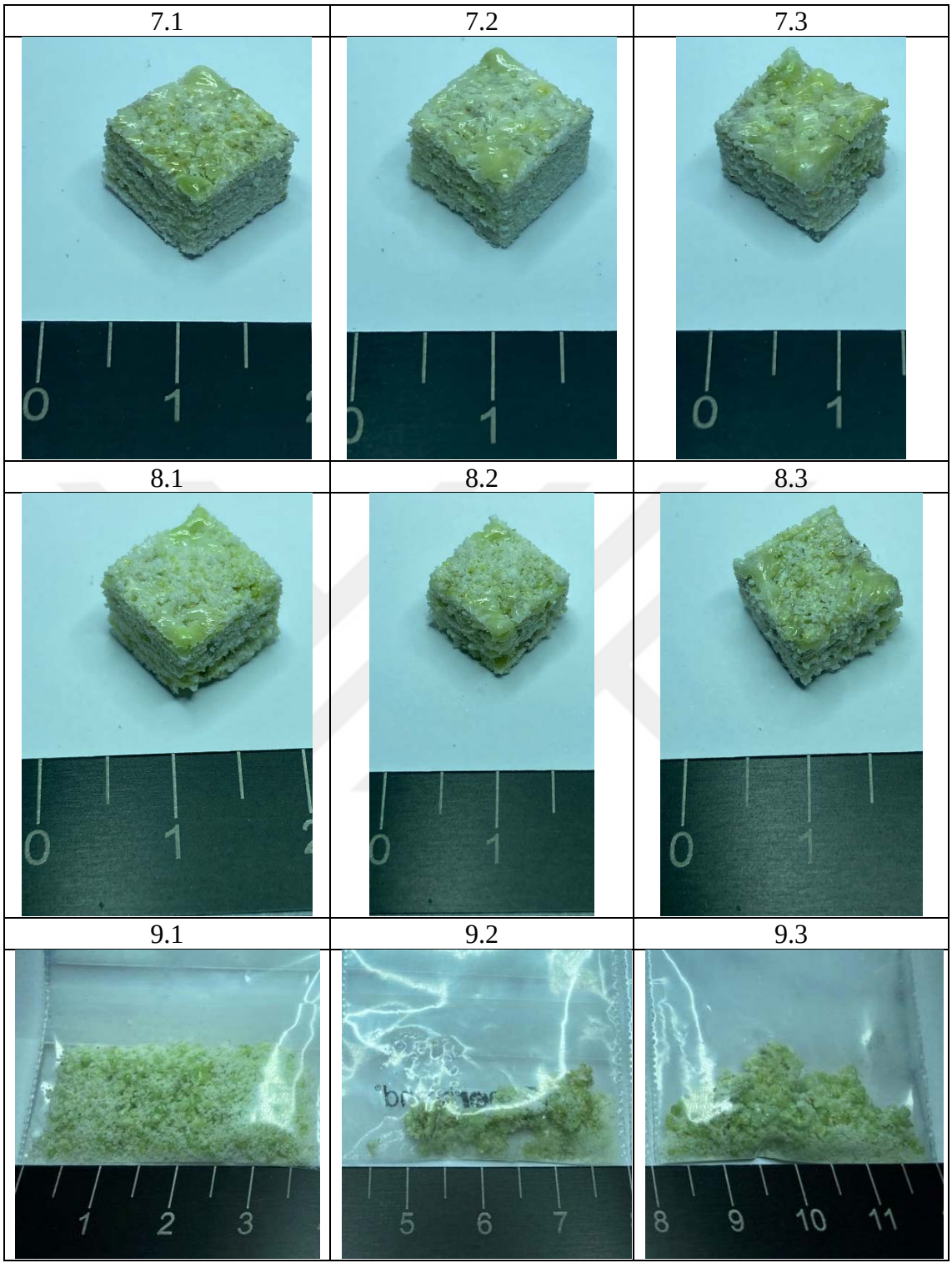
Grup III numunelerinin üretiminde kullanılan parametreler Çizelge 4.18'de verilmiştir. Üretilen numunelere ait görseller ise Şekil 4.31 ile verilmektedir.

Çizelge 4.18. Grup III üretimi parametreleri

Grup III					
Numune no	$P_{CO2,}$ W	P_{fiber}, W	V, mm/s	L, µm	H, µm
7.1	20	70	100	100	50
7.2		80			
7.3		90			
8.1	15	70	100	100	50
8.2		80			
8.3		90			
9.1	10	70	100	100	50
9.2		80			
9.3		90			

Numune no 7.1-7.3 deneme üretiminde, dördüncü deneme üretimi parametrelerinden fiber lazer gücü düşürülerek numuneler üretilmiştir. Numuneler incelendiğinde geometrik olarak daha iyi durumda numunelerin üretildiği görülmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda alüminanın PBF yöntemi ile yapısal bütünlüğü olan numunelerin üretilebileceği anlaşılmıştır. Bu aşamadan sonraki numuneler için malzeme karakterizasyon yöntemleri ile incelemelere tabi tutulacaktır.

Sekizinci deneme üretimi ile yedinci deneme üretiminde kullanılan ön ısıtma lazer gücünün azaltılmasıyla numuneler üretilmiştir. Sekizinci deneme ile beşinci deneme üretiminde ortak olan 15 W ön ısıtma lazer gücü, ergitme lazerinin kullanılan gücü azaltıldığında numune üretiminin mümkün olduğunu göstermiştir. Beşinci denemede numune üretilemeyip sekizinci denemede üretimin gerçekleşebilmesinde lazer ergitme ışınının yüzeye çarptığında ön ısıtılmış tozların çarpma etkisi ile dağıldığını ve alttaşa tutunma gerçekleşememesi olduğu düşünülmüştür [87]. Benzer şekilde numune 9.1-9.3 arasındaki üretimde CO_2 lazer gücü 10 W a kadar düşürülmüş olmasına karşın bütünleşik bir yapı oluşturulamasa da sinterlenebilmiş yapıların varlığı görülmektedir. Bu durumda yüksek fiber lazer ışın gücünün toz partiküllerin birleşmesinde olumsuz etkileri olduğu görülmektedir.



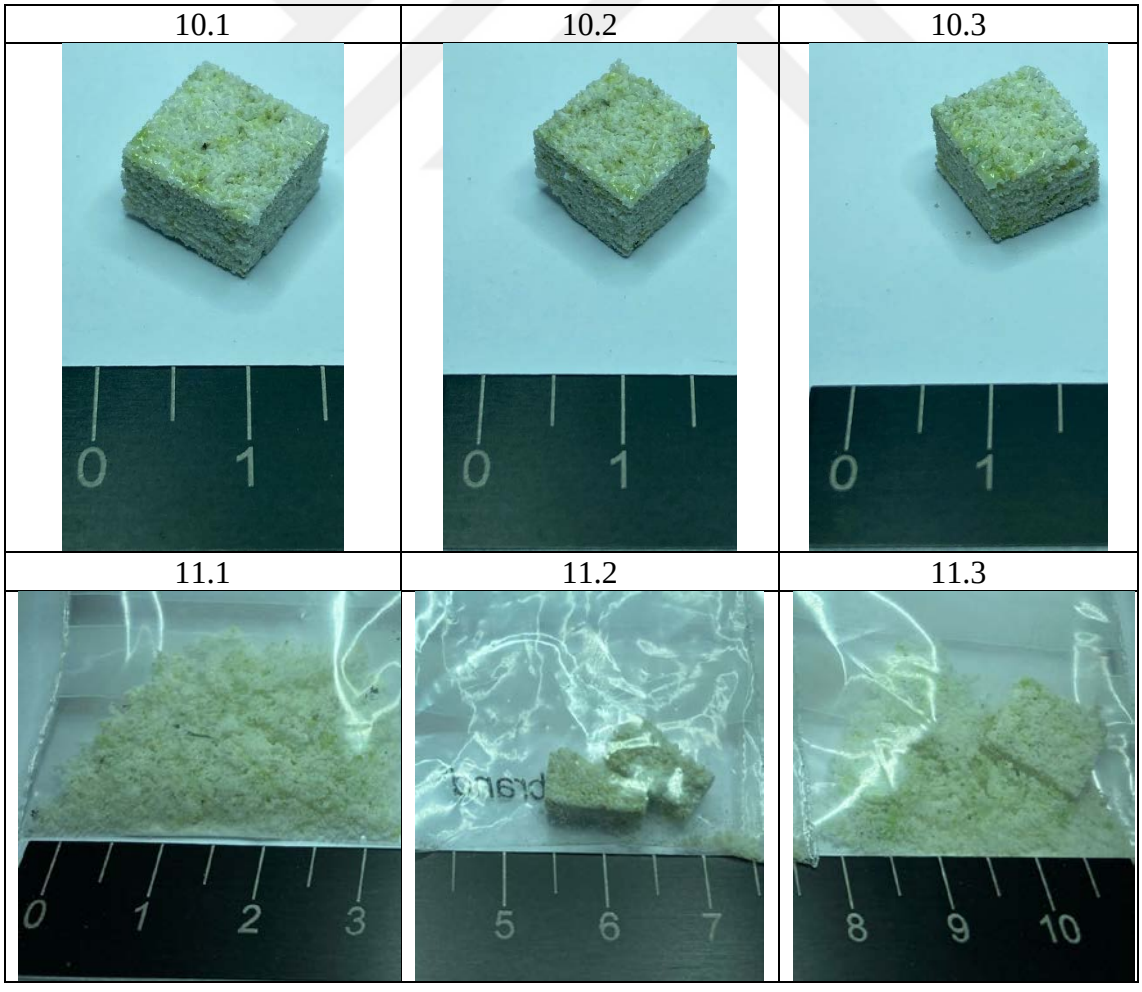
Şekil 4.31. Grup III üretimi numuneleri

Grup III kapsamında üretilen numunelerden 7.1-7.3 numaralı olanların parça bütünlüğü dikkate alınarak bu parametreler üzerine Grup IV altında Çizelge 4.19 ile verilen parametreler denenmiştir. Grup IV parametreleri ile üretilen numuneler Şekil 4.32'de görülmektedir. Burada 10.1-10.3 numaralı numeneler 7.1-7.3 numunelerin parametrelerine

kıyasla fiber lazer gücü düşürülmüştür. Üretim sonucunda yedinci denemeye kıyasla keskin köşelere sahip numuneler elde edilmiştir. CO_2 lazer ışın gücü düşürülerek 11.1-11.3 numaralı numunelerin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yapısal bütünlüğü sağlayamadığı görüldüğünden; 20 W ön ısıtma lazer gücünün altında olumlu sonuç elde edilemeyeceği anlaşılmıştır.

Çizelge 4.19. Grup IV üretimi parametreleri

Grup IV					
Numune no	$P_{CO2,}$ W	P_{fiber}, W	V, mm/s	L, µm	H, µm
10.1	20	40	100	100	50
10.2		50			
10.3		60			
11.1	15	40	100	100	50
11.2		50			
11.3		60			

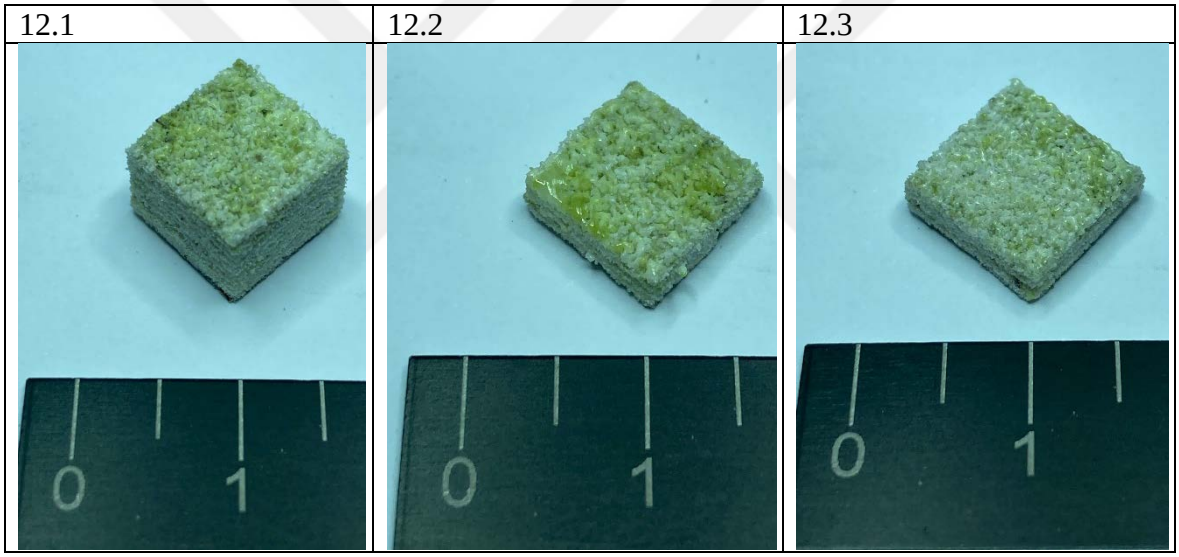


Şekil 4.32. Grup IV üretimi numuneleri

Grup IV ile verilen parametrelerden 10.1-10.3 numunelerinin görsel muayenesi en iyi olan numuneler olduğundan, devam eden üretimlerde tarama aralığı ve katman kalınlığı açısından denenmiştir. Tarama aralığı incelenmesi için kullanılan parametreler, Grup V olarak ayrıştırılarak uygulanan parametreler Çizelge 4.20 ile sunulmuştur. Üretilmiş numuneler ise Şekil 4.33'de görülmektedir.

Çizelge 4.20. Grup V üretimi parametreleri

Grup V					
Numune no	$P_{CO2,}$ W	P_{fiber}, W	V, mm/s	L, µm	H, µm
12.1	20	40	100	100	40
12.2					30
12.3					20



Şekil 4.33. Grup V üretimi numuneleri

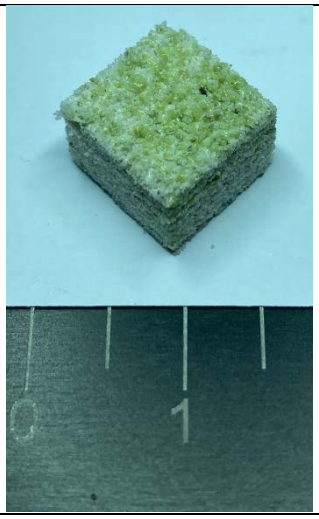
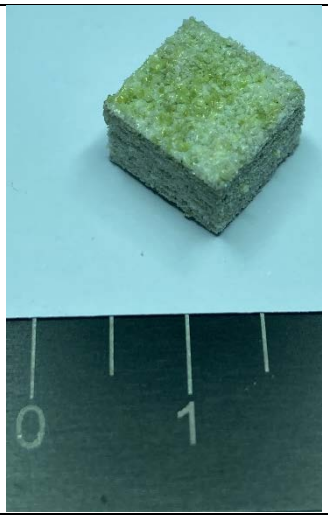
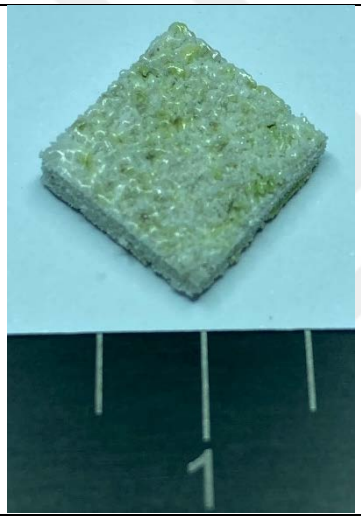
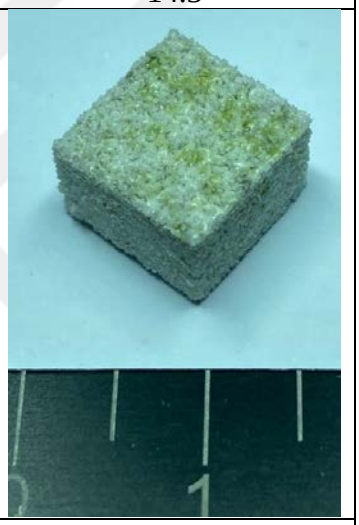
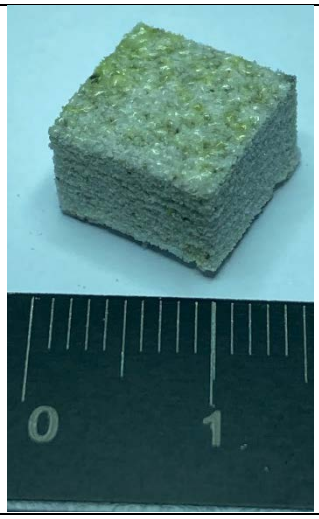
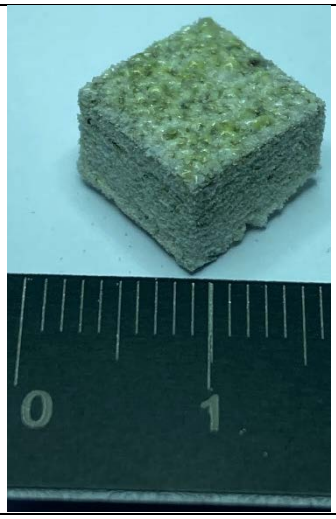
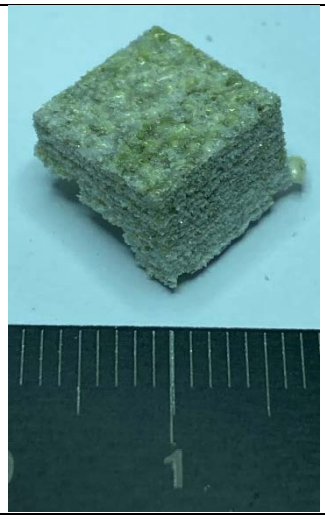
Grup V'in üretiminde 10.1 numunesinin parametrelerinin tarama aralıkları değişken tutularak kullanılmıştır. Üretilen numunelerden 12.2 ve 12.3 numuneleri üretilirken bir süre sonra alt taşa tutunamamış ve toz serici hareketi ile toz biriktirme haznesine süpürülmüştür. Bu grup iki kere üretimi denenmiş ve tam boy numune sadece 12.1 numunesi için üretimi sağlanabilmiştir. Bu nedenle tekrarlanabilirlik açısından tarama aralığının 50 µm altındaki değerlerinde zayıf olduğu değerlendirilmiştir.

Grup IV parametrelerinden 10 numaralı numunelerin parametrelerinden katman kalınlıkları değiştirilerek numuneler üretilmiştir. Kullanılan parametreler Çizelge 4.21 ile verilmiştir. Üretilmiş numunelere ise Şekil 4.34 ile gösterilmektedir.

Çizelge 4.21. Grup VI üretim parametreleri

Grup VI					
Numune no	$P_{CO2,}$ W	P_{fiber}, W	V, mm/s	L, µm	H, µm
13.1	20	40	100	125	50
13.2		50			
13.3		60			
14.1	20	40	100	75	50
14.2		50			
14.3		60			
15.1	20	40	100	50	50
15.2		50			
15.3		60			

Grup VI numuneleri incelendiğinde katman kalınlığının artışı katmanlar arası bağlanmanın yeteri kadar olmadığından delaminasyon oluşumu 13 numunelerinden görülmektedir. Katman kalınlığının 75 µm kalınlığı kullanıldığında, tam boy üretim gerçekleştirilemeyen numuneler bulunmaktadır. Bu nedenle üretim tekrarlanabilirliğinde sorun olduğu anlaşılmıştır. Katman kalınlığının 50 µm kullanımında ise toz boyutu dağılımına yakın bir değer olmasından ötürü küçük tozların katmanda kaldığı, büyük tozların ise süpürüldüğü düşünülmüştür. Böylece iyi bir katman elde edilemediği için parçalanmış, katmanlar arası bağlanmanın olmadığı kırlgan yapıda numuneler elde edilmiştir. Bu nedenle 10 numaralı numunelerin parametrelerinin hem tekrarlanabilirlik hem de parça bütünlüğüne sahip olması nedeniyle tarama stratejileri ile devam eden çalışmalarda kullanılması kararlaştırılmıştır.

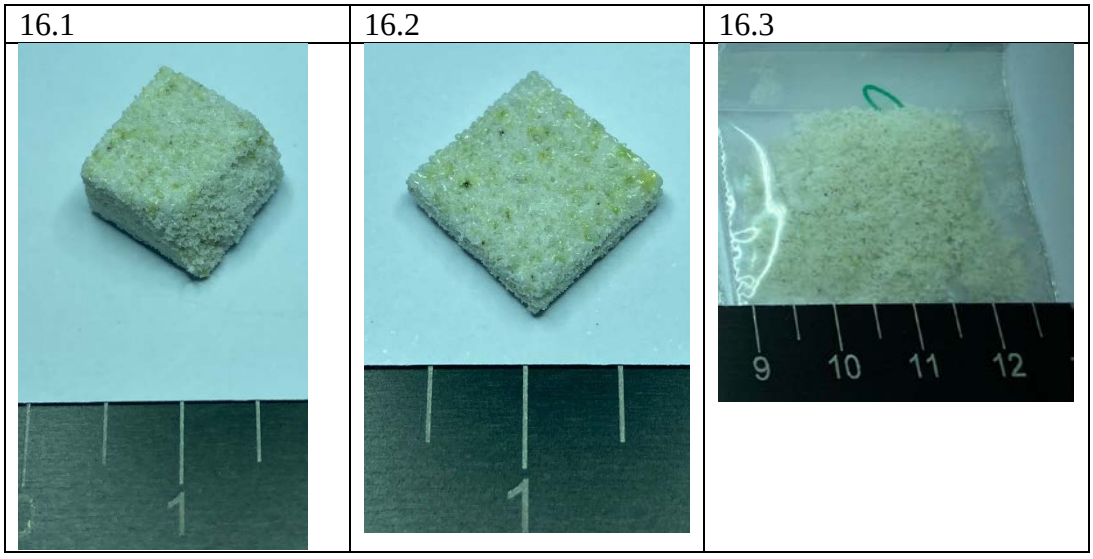
13.1	13.2	13.3
		
14.1	14.2	14.3
		
15.1	15.2	15.3
		

Şekil 4.34. Grup VI üretimi numuneleri

Yapılan çalışmalarda çift lazerin bir arada kullanımı ile alüminanın PBF ile üretilebilirliği incelenmektedir. Ancak sadece CO_2 lazerinin tek başına kullanımında numune üretilebilirliği ve üretilen numunenin durumunu gözlemek için Çizelge 4.22 ile verilen Grup VII parametreleri kullanılarak numune üretilmiştir. Numunelere ait görseller Şekil 4.35'te görülmektedir. Fiber lazer uygulanmadan, tarama hızı, katman kalınlığı ve tarama mesafesi sabit tutularak 15 W, 20 W, 25 W güçlerinde CO_2 lazer ışını tek başına kullanılarak numune üretimi denenmiştir. En düşük güç olan 15 W lazer gücünde sinterlenmiş numune üretilmiştir. 16.2 numunesi için 20 W lazer ışını kullanılmış ancak kısa bir süre sonra alt taşa tutunamamış ve toz haznesine süpürülmüştür. 16.3 numunesi ise birbirine sinterlenmiş ve kümelenmiş toz partikülleri halinde, kuvvet uygulandığında ufalanan bir yapı oluşturmuştur. 15 W ile üretilen 16.1 numunesi ise toz partikülleri arası sürtünmeden ötürü toz serim başlangıcı yönünde aşınarak yamuk kesitli bir parça oluşturmuştur Parçanın aşınması ergimenin gerçekleşmediği, sadece sinterlemenin meydana geldiğini göstermektedir. Tez çalışmasında çift lazer kullanımının alümina malzemesinin kullanıldığı PBF yöntemi ile numune üretimini mümkün kıldığı görülmektedir.

Çizelge 4.22. Grup VII parametreleri

Grup VII					
Numune no	$P_{CO2,}$ W	P_{fiber}, W	V, mm/s	L, µm	H, µm
16.1	15	0	100	100	50
16.2	20				
16.3	25				

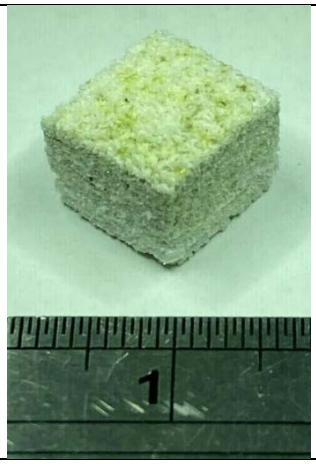
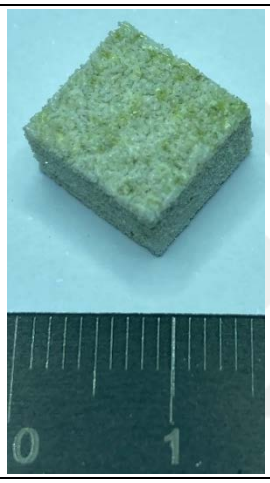
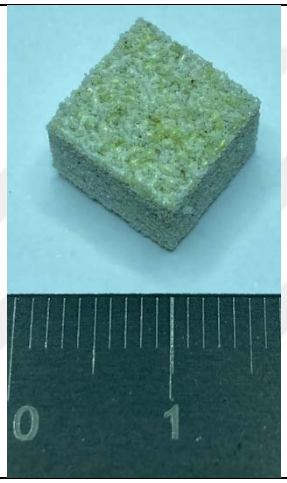
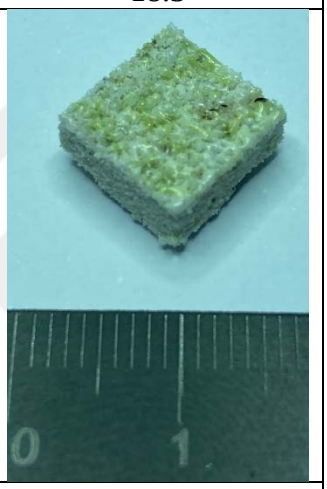
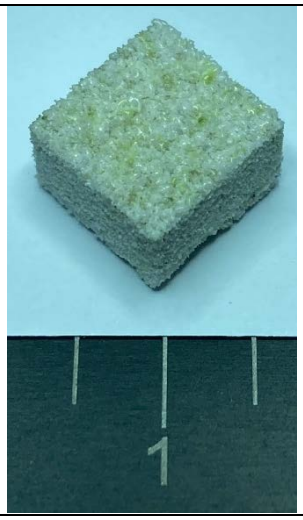


Şekil 4.35. Grup VII numuneleri

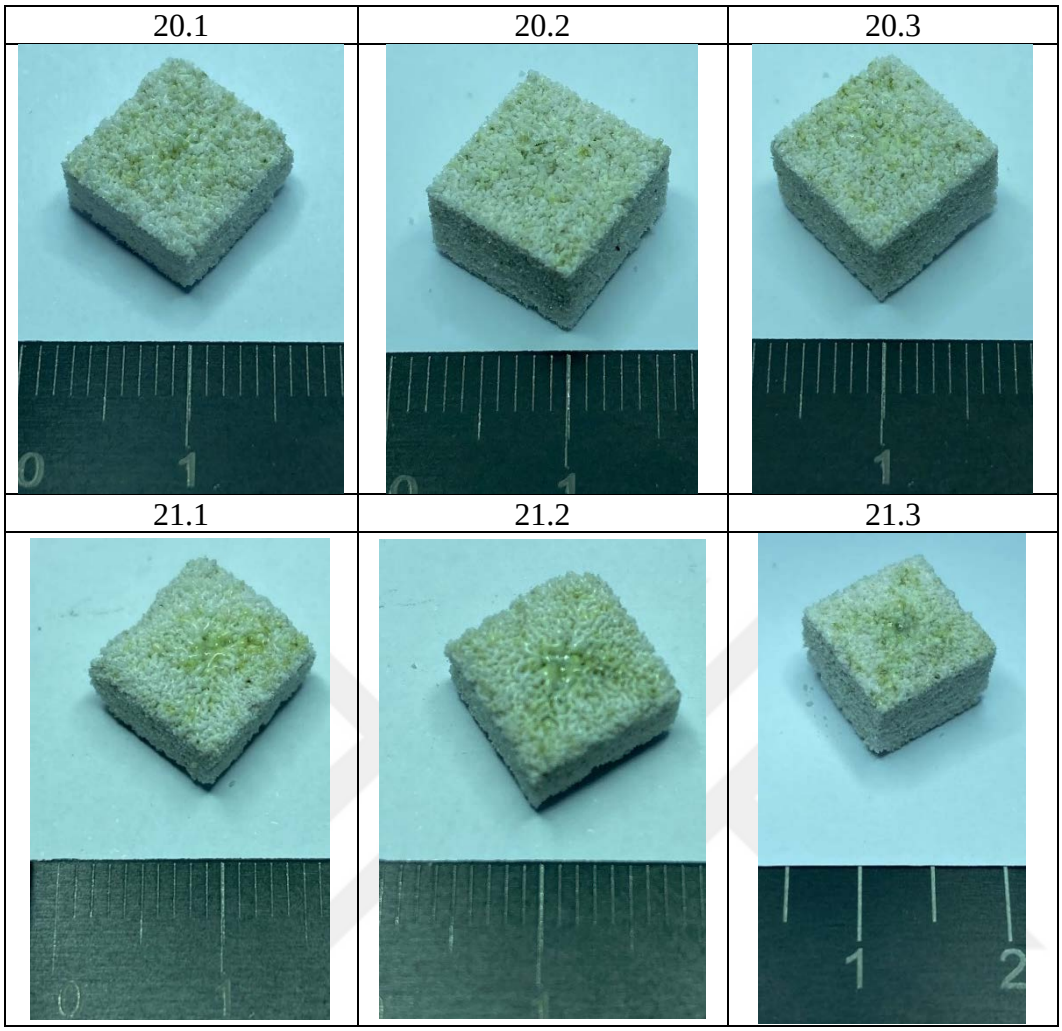
Tarama stratejilerinin parça üretiminde bağıl yoğunluğa etkisinin görülmesi amacıyla parametre çalışmalarında kullanılan lineer 45˚ tarama stratejisine ek olarak beş farklı tarama stratejisi daha denemiştir. Denemelerde Grup VIII sınıflandırması ile kullanılan parametreler Çizelge 4.23 ile sunulmuştur. Üretim parametreleri 10. Numunelere ait parametreler seçilmiştir. Taramalardan lineer 67˚ ve lineer 90˚ açılı stratejiler her bir katmanda 90 ˚saat yönünde döndürülmüştür. Üretilen numuneler Şekil 4.36 ile gösterilmektedir.

Çizelge 4.23. Grup VIII parametreleri

Grup VIII						
Numune no	$P_{CO2,}$ W	P_{fiber}, W	V, mm/s	L, µm	H, µm	Tarama Stratejisi
17.1	20	40	100	100	50	Lineer 0˚
17.2		50				
17.3		60				
18.1	20	40	100	100	50	Lineer 67˚
18.2		50				
18.3		60				
19.1	20	40	100	100	50	Lineer 90˚
19.2		50				
19.3		60				
20.1	20	40	100	100	50	Konsentrik içten dışa
20.2		50				
20.3		60				
21.1	20	40	100	100	50	Konsentrik dıştan içe
21.2		50				
21.3		60				

17.1	17.2	17.3
		
18.1	18.2	18.3
		
19.1	19.2	19.3
		

Şekil 4.36. Grup VIII numuneleri



Şekil 4.36. (devam) Grup VIII numuneleri

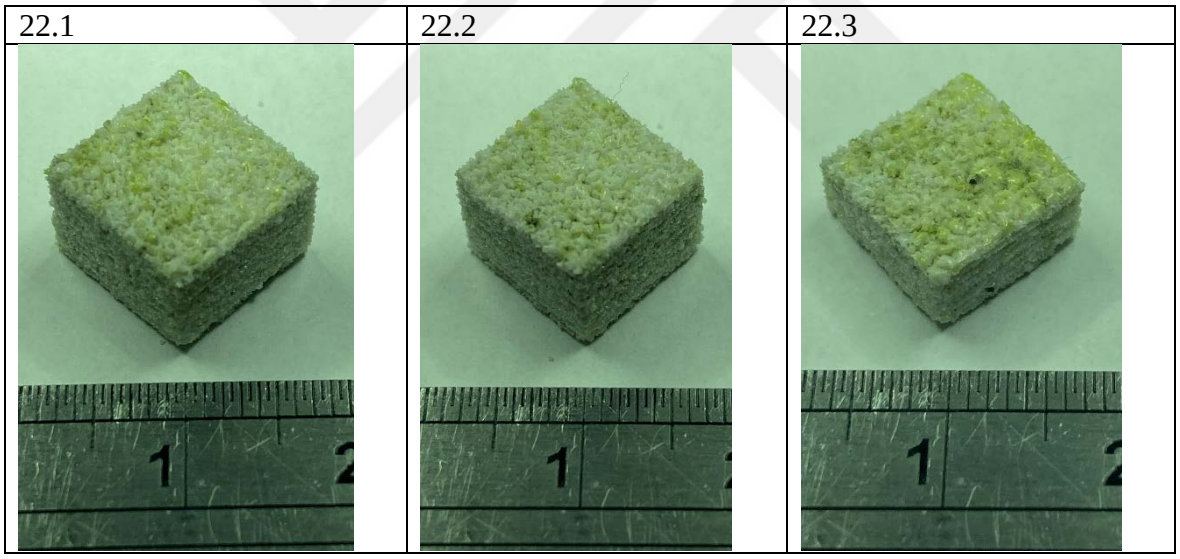
Grup VIII numuneleri belirlenen tarama stratejileri ile başarıyla üretilebilmiştir. Boyutsal tamlık açısından incelendiğinde tüm numuneler iyi durumdadır. Konsentrik dıştan içe ve içten dışa doğru olan numunelerin (20-21. setler) üst yüzeylerinde belirli belirsiz X şeklinde iz oluşumu görülmektedir. Bu durum tarama stratejisinde tarama vektörlerinin ani bir 90˚ dönüşü ile dönüş noktasında lazer ışınının göreceli olarak dar bir alanda daha fazla zaman geçirmesinden daha fazla enerji uygulanması nedeniyle olmuştur.

Grup IX altında parametreleri Çizelge 4.24 ile verilen tarama stratejisi, alüminanın PBF'si için yeni bir tarama stratejisi olarak önerilmektedir. Tezgahlarda bulunan standart tarama stratejilerinde yer almamaktadır. Bahsedilen tarama stratejisinde, tez kapsamında üretilen diğer numunelerde olduğu gibi çift lazer kullanılmaktadır. Ön ısıtma lazeri olan CO_2 ışın kaynağı, ergitme lazeri olarak nitelendirilen fiber lazerden önce işleme başlamaktadır. V hızıyla ilerleyen ön ısıtma lazeri H mesafesinde tarama mesafesi ilerlemektedir. Ergitme

lazeri, ön ısıtma lazerinin peşinden yüzeye 2V hızıyla ve H/2 tarama mesafesinde uygulandığında aynı sürede katman taranmış olmaktadır. Bu stratejinin uygulanmasında uzun tarama mesafelerinde sadece taranan ilk vektörde fiber lazer önden ilerleyeceği düşünülmektedir. Böylece daha yoğun numuneler ede edilebileceği düşünülmektedir. Numune karakterizasyonları ilerleyen bölümlerde ele alınacaktır ancak diğer numunelerle kıyaslandığında daha yoğun numunelerin üretildiği görülmüştür. Üretilen numuneler Şekil 4.37 ile gösterilmektedir.

Çizelge 4.24. Grup IX parametreleri

Numune no	$P_{CO2,}$ W	P_{fiber}, W	V_{CO2}, mm/s	V_{fiber}, mm/s	L, µm	H_{CO2}, µm	H_{fiber}, µm	Tarama açısı
22.1	20	40	100	200	100	50	25	Lineer 67˚
22.2		50						
22.3		60						

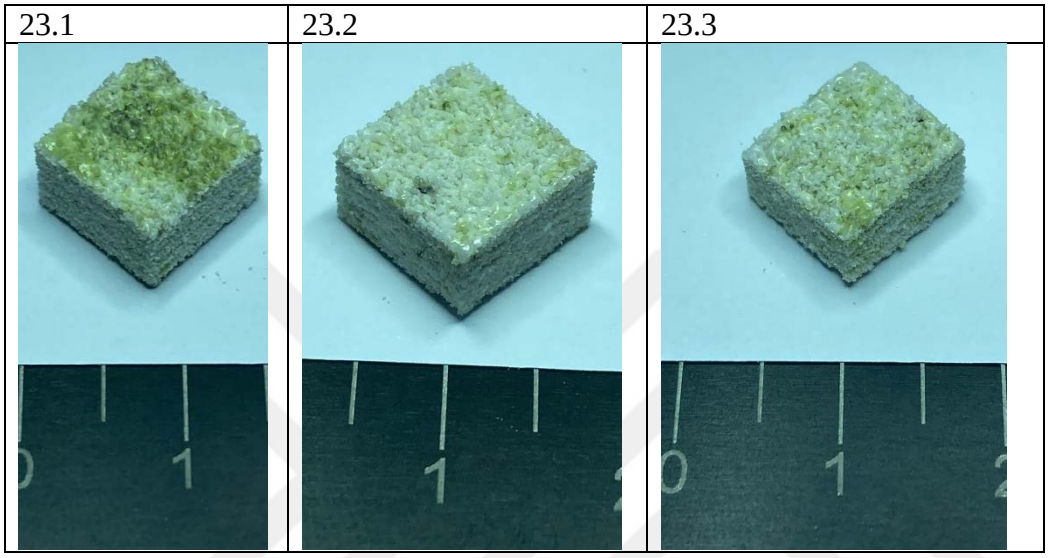


Şekil 4.37. Grup IX numuneleri

Grup X kapsamında Grup IX ile benzer şekilde farklı bir tarama stratejisi daha önerilmektedir. Bu tarama stratejisinde Lineer 67˚ tarama stratejisi ile verilen parametrelere ilaveten ilk tarama iki lazerin birlikte çalışmasıyla tamamlandıktan sonra CO_2 lazer ışını tek başına yüzeyi tekrar taramaktadır. Bu tarama stratejisi diğer üretimlere kıyasla iki kat süre harcamaktadır. Yoğun enerji girdisi nedeniyle daha yüksek bağıl yoğunluğa sahip parça üretimi hedeflenmiştir. Kullanılan parametreler Çizelge 4.25 ile verilirken, üretilmiş numuneler ise Şekil 4.38'de görülmektedir.

Çizelge 4.25. Grup X parametreleri

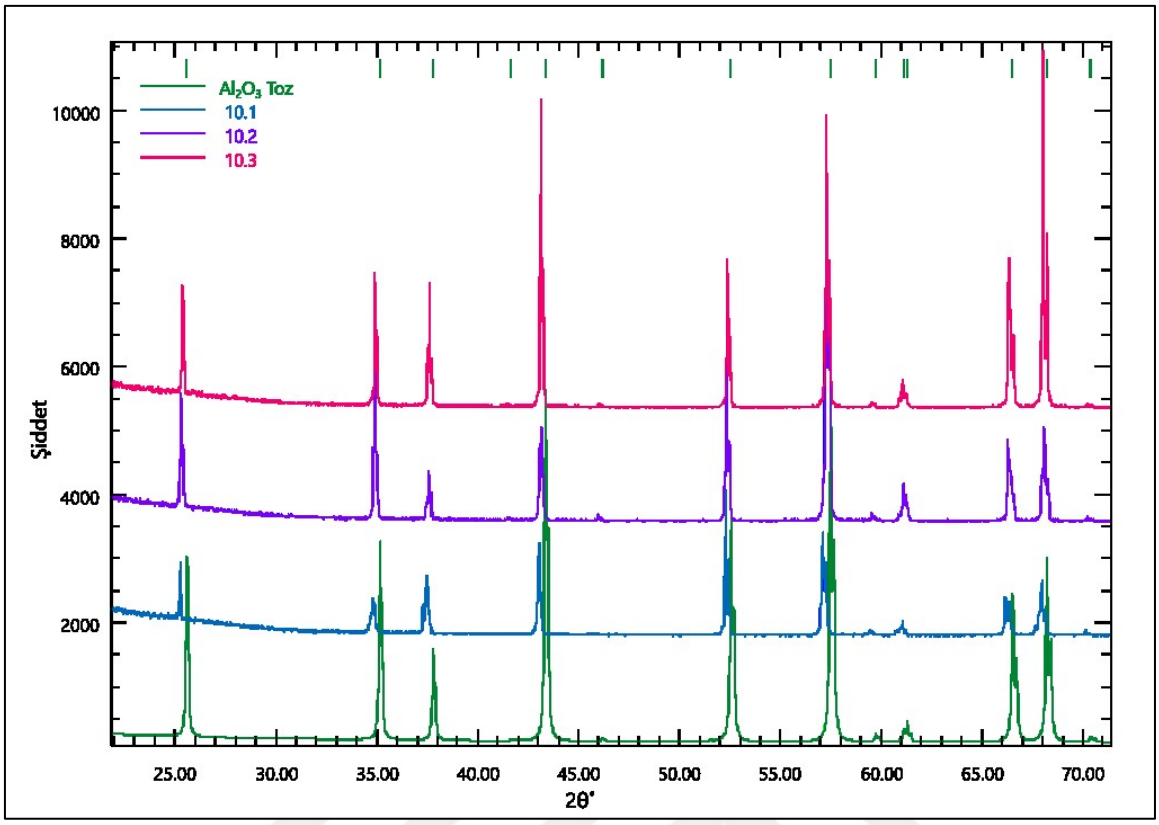
Numune no	$P_{CO2,}$ W	P_{fiber}, W	V, mm/s	L, µm	H, µm	Tarama Stratejisi
23.1	20	40	100	100	100	Lineer 67˚+ 1 paso CO_2 lazer taraması
23.2		50				
23.3		60				



Şekil 4.38. Grup X numuneleri

4.4. X-RD Analizi

Üretilen numunelerden 10 numaralı numune setine ve kullanılan alümina tozuna üretim sırasında farklı bir bileşiğin veya fazın oluşup oluşmadığını anlamak amacıyla X-RD analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda elde edilen X-RD grafiği Şekil 4.39 ile sunulmuştur. Grafik kullanılmamış alümina tozunu referans alınarak okunduğunda numunelere ait elde edilen taramada 2θ˚ açısı ile yaptığı piklerin örtüştüğü görülmektedir. Numuneler ile toz malzemede bu örtüşme sonucu, iki farklı dalga boyuna sahip lazer ışını ile temas eden tozun, ayrıca açık havada, koruyucu atmosfer uygulaması olmaksızın üretimi sonucunda farklı bir bileşik veya faz oluşturmadığı anlaşılmıştır.

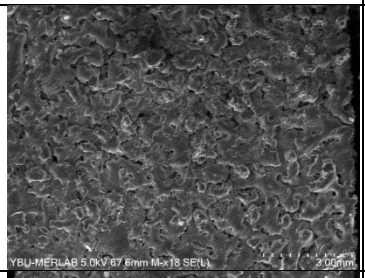
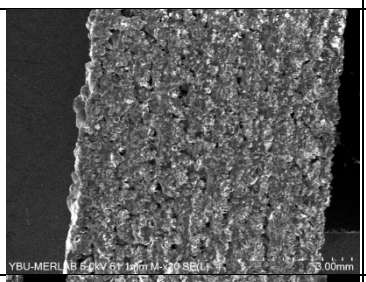
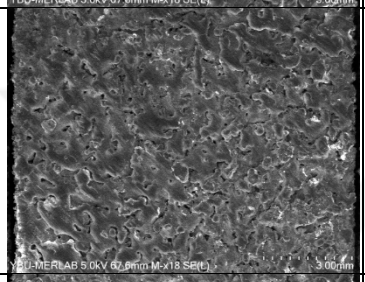
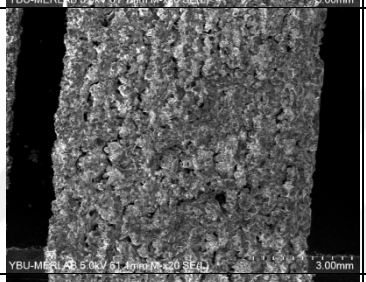
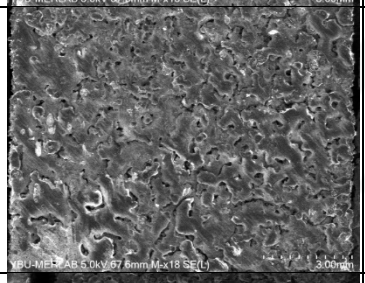
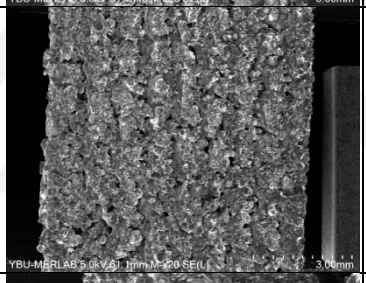
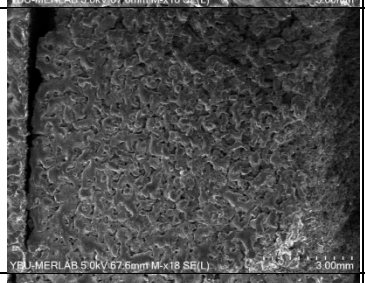
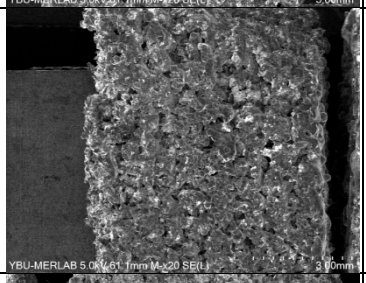
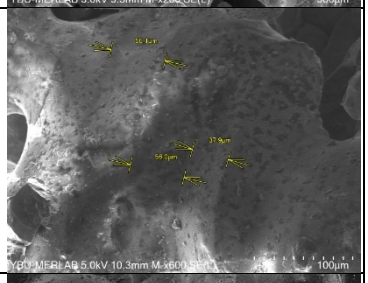
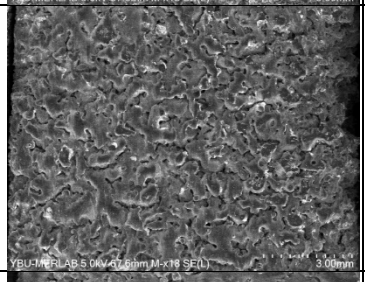
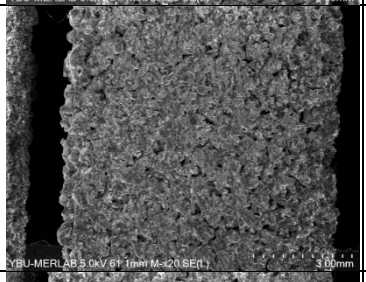
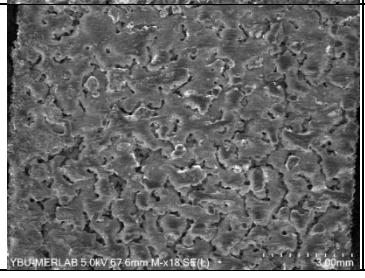
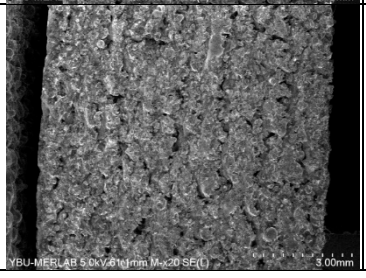
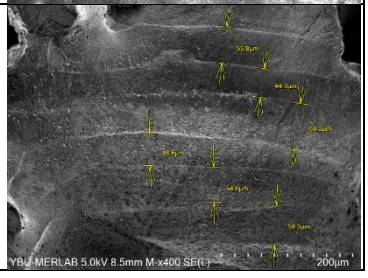


Şekil 4.39. On numaralı numunelerin X-RD grafiği

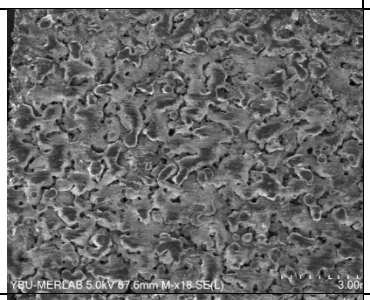
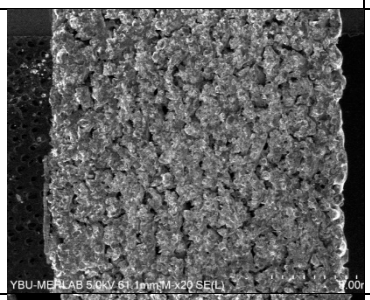
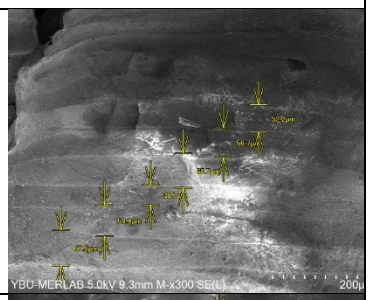
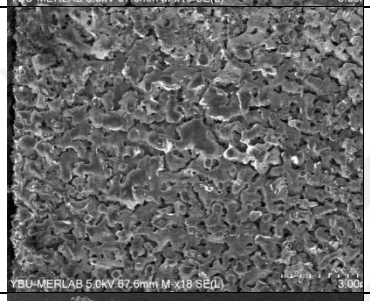
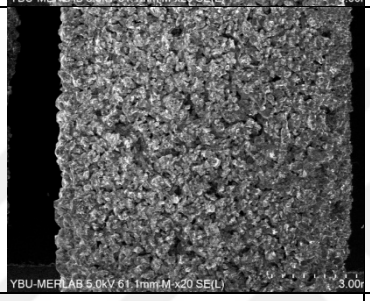
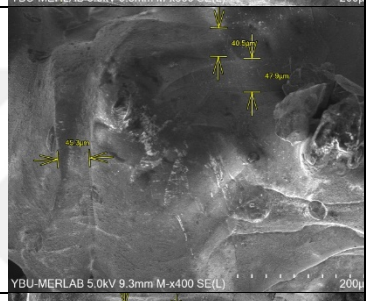
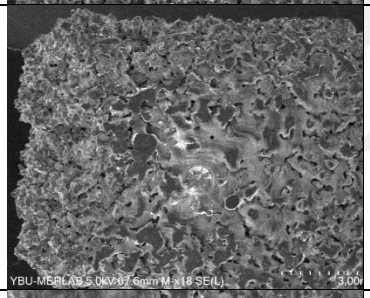
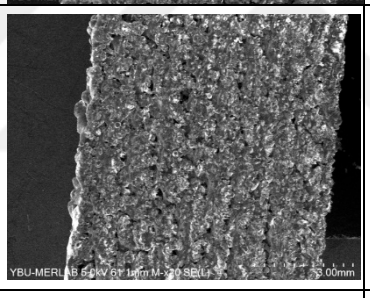
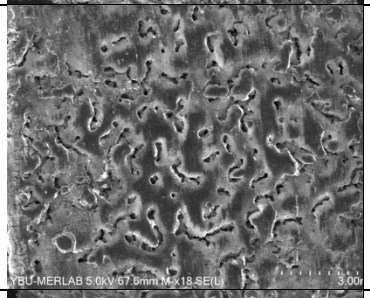
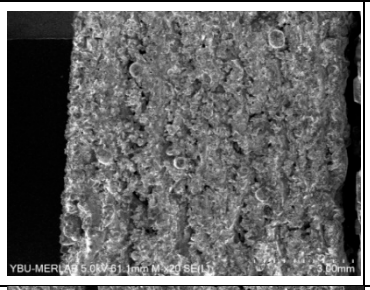
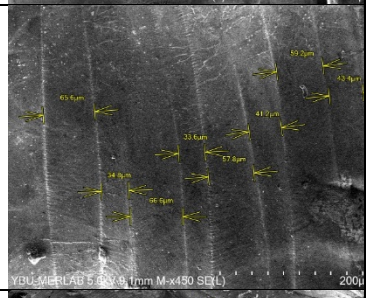
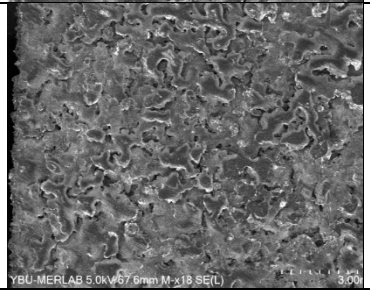
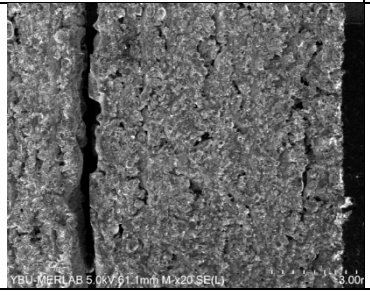
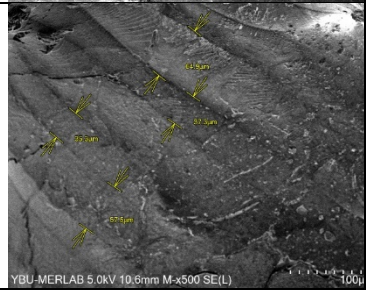
4.5. Mikro Görüntülerin İncelenmesi

Üretilmiş numunelerden 10.1-10.3 numaralı numuneler, sadece CO_2 ışını ile üretilen numune ve tarama stratejisinin uygulandığı numunelerin FE-SEM mikro fotoğrafları alınmıştır. Görüntülemeler üst yüzeyden, yan yüzeyden ve üst yüzeyin lazer ergitme izlerinin görüntülenmesini içermektedir. Lazer ergitme izlerinin kalınlıklarını ölçülmüştür. Yüzeyin durumu incelenmiştir. FE-SEM görüntüleri verilen numunelerin lazer güç değerleri aynı olup sadece tarama stratejisinde farklılıklar içermektedir.

Çizelge 4.26. Numunelerin FE-SEM mikro fotoğrafları

Numune	ÜST	YAN	ÜST-yüksek büyütme oranı
10.1			
10.2			
10.3			
16.1			
17.3			
18.3			

Çizelge 4.26. (devam) Numunelerin FE-SEM mikro fotoğrafları

Numune	ÜST	YAN	ÜST-yüksek büyütme oranı
19.3			
20.3			
21.3			
22.3			
23.3			

FE-SEM görüntülerinin üst yüzeyleri incelendiğinde ergiyip katılaşma sonucunda kümelenmiş, pürüzlü bir doku görülmektedir. Alüminanın ergime sıcaklığına yakın değerlerinde ~35 cP [88] viskozite değeri olduğu literatürde yer almaktadır. Yüksek

viskozite ve yüzey gerilimi nedeniyle, pürüzlü ve tepeciklerle dolu bir doku oluşturduğu düşünülmüştür [89].

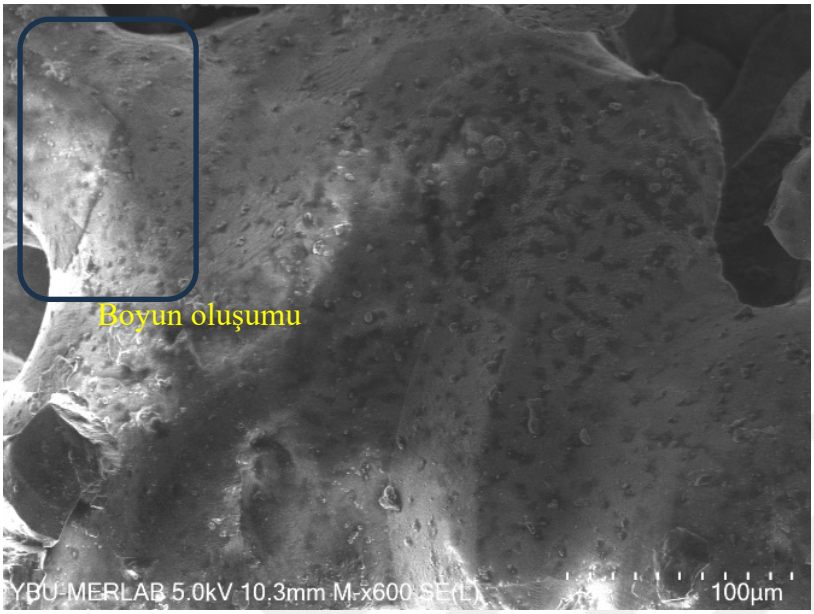
FE-SEM görüntüsü verilen numunelerin yan duvarlarının incelenmesinde katmanların gruplar halinde istiflendiği görülmektedir. Yüzey dokusu pürüzlü ve dağınık halde küçük delikler göze çarpmaktadır. Bu delikler yakından yüzeye bakılan FE-SEM görüntülerinde de görülmektedir. PBF sürecinde doğal yollarla oluşmuş ~50 µm çapında delikler bulunmaktadır. Bu deliklerin yapı içerisinde açık gözeneklerin varlığı, helyum piknometresi ile bağıl yoğunluk analizlerinde tam yoğunluğa yakın sonuçların elde edilirken mikro tomografide görülen gözeneklerin varlığı ile doğrulanmıştır. Bağıl yoğunluk sonuçları ilerleyen bölümlerde açıklanacaktır.

Numunelerin üst yüzeylerinde, yüksek büyütmelerde bakıldığında lazer ergitme izleri görülmektedir. Ergitme izleri genel olarak ~60 µm genişliğinde lazer ilerleme hattı boyunca oluştuğu görülmektedir. Özellikle 20.3 ve 21.3 numunelerinde sırasıyla konsentrik içten dışa ve dıştan içe tarama stratejisi uygulandığından, köşelerde lazerin 90˚ açıyla yön değiştirmesi görülmektedir. Lazer izlerinin yüzeyin FE-SEM görüntülerinde görülüyor olması, kararlı bir şekilde ergimenin gerçekleştiği ve çift lazerli PBF yönteminin başarılı bir şekilde uygulandığını göstermektedir. Üretimler yapılmadan önce ergitme lazer ışın çapının toz yatağı yüzeyinde 90 µm ölçüldüğü göz önüne alındığında, ergime izlerinin kalınlığı ile benzer şekilde etkin lazer ışınının yaklaşık 60 µm çapında olduğunu da göstermektedir.

Numune no 16.1 olan parçanın FE-SEM görüntüleri incelendiğinde diğer FE-SEM görüntülerinde olduğu gibi belirgin bir ergime görülmemektedir. Bu numunenin üretiminde fiber lazer ışını kullanılmamıştır. Sadece karbondioksit lazer ışınının kullanılması ile sinterleme gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Yüzeye yapışmış olan çok küçük boyutlu tozların da daha büyük olan toz partikülüne yapıştığı ve sinterlemeyle boyun oluşumu Şekil 4.40'da görülmektedir.

Numune no 22.3'ün üst yüzeyinden alınan FE-SEM görüntüsü incelendiğinde yüzeyde görüntülenebilen lazer ergitme çizgilerinin farklı kalınlıklarda bantlar halinde ilerlediği görülmektedir. Bu durum kullanılan lazer tarama stratejisinde ergitme lazeri olarak kullanılan fiber lazerin tarama mesafesinin azaltılmış olması nedeniyle oluştuğu anlaşılmıştır. Ayrıca yan yüzeylerdeki kademeli yapı daha geniş bant aralıkları ile

görülmektedir. Bu durum 23.3 numunesinde de görülmektedir. Bu iki tarama stratejisi ile lazer ışınlarının toz ile daha fazla temas halinde bulunması ile geliştiği yorumlanmıştır.



Şekil 4.40. Sadece CO_2 lazeri ile üretilen 16.1 numaralı numuneye ait FE-SEM görüntüsü

Yüzeylerde çatlak oluşumları da görülmektedir. En belirgin çatlak ise 21.3 numunesinin merkezinde görülmektedir. Merkezde dar bir alanın lazer ışınlarıyla taranması sonucu ısı transferinin dış konturunda ergitilerek ilerlendiği bir katmanda ısı birikimi ve sıcaklık farkının daha yüksek olması nedenleri ile derin ve uzun bir çatlak görülmüştür. Üretilen numunelerin genel durumu diğer numunelere kıyasla daha düşük nitelikte olduğu da düşünüldüğünde konsentrik dıştan içe tarama stratejisinin alümina için uygun olmadığı değerlendirilmektedir.

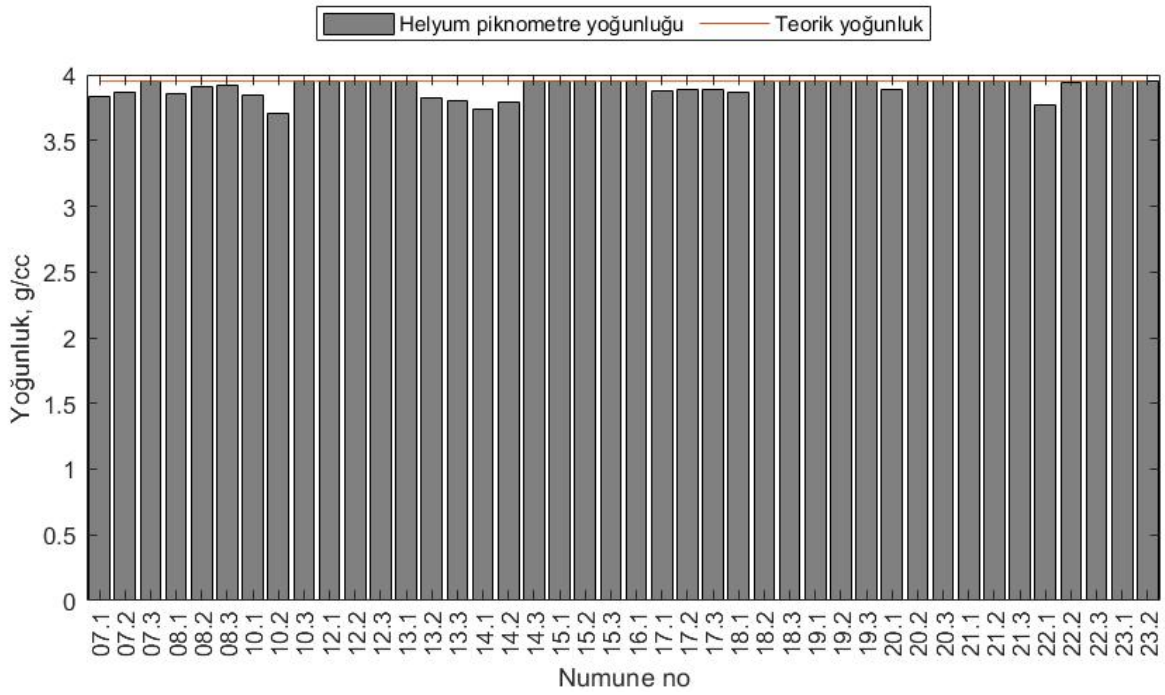
4.6. Bağıl Yoğunluk Sonuçları

4.6.1. Helyum piknometre ölçümleri

Numunelerin gerçek yoğunluk ölçümü için Arşimet prensibi ile çalışan helyum piknometresi kullanılmıştır. Helyum piknometresi, ölçümlerde parçanın tüm gözeneklerine girebilen ve reaktif olmayan bir gaz olması nedeniyle tüm parçaya nüfuz edebilmektedir. Numune yüzeylerinin gözenekli olmasından ötürü suyla yapılan ölçülere göre daha kararlı bir sonuç

vereceğinden tercih edilmiştir. Bununla beraber bir kısım numunelere mikro tomografi analizi ile gözenek ve bağıl yoğunluk analizi yapılmıştır.

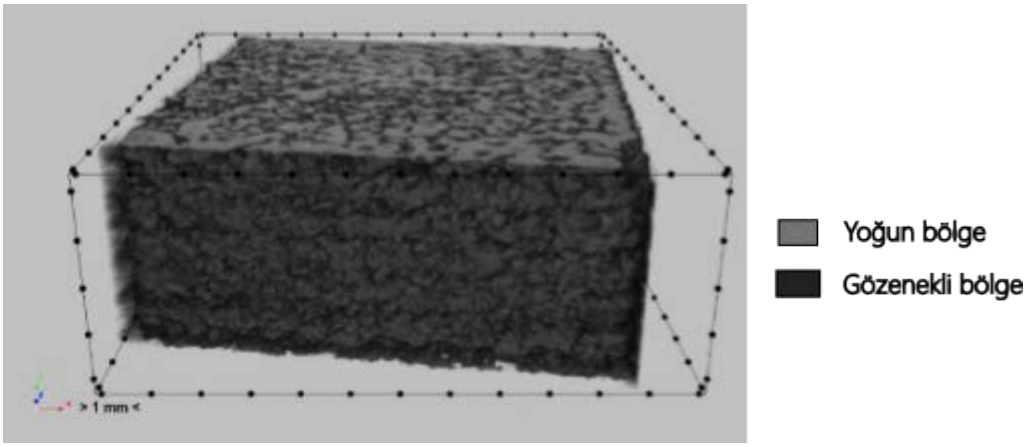
Numunelere ait yoğunluk ölçüm sonuçları ve teorik yoğunluğun kırmızı bir çizgi ile sunulduğu Şekil 4.41 ile gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde tam yoğunluğa yakın sonuçlar elde edilmiştir. Numunelerin helyum piknometresi ile teorik yoğunluğa yakın değerlerde olması tezin amacı ile örtüşmektedir. Parçaların açık gözenekli olması durumunda helyum piknometresi sonuçları numunelerde bulunan gözenekler hakkında açık veya kapalı gözeneklerin varlığı konusunda fikir vermektedir. Helyum piknometresi ile alınan ölçüm sonuçlarının mikro tomografi görüntülerinden elde edilecek olan bağıl yoğunluk sonuçları ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.



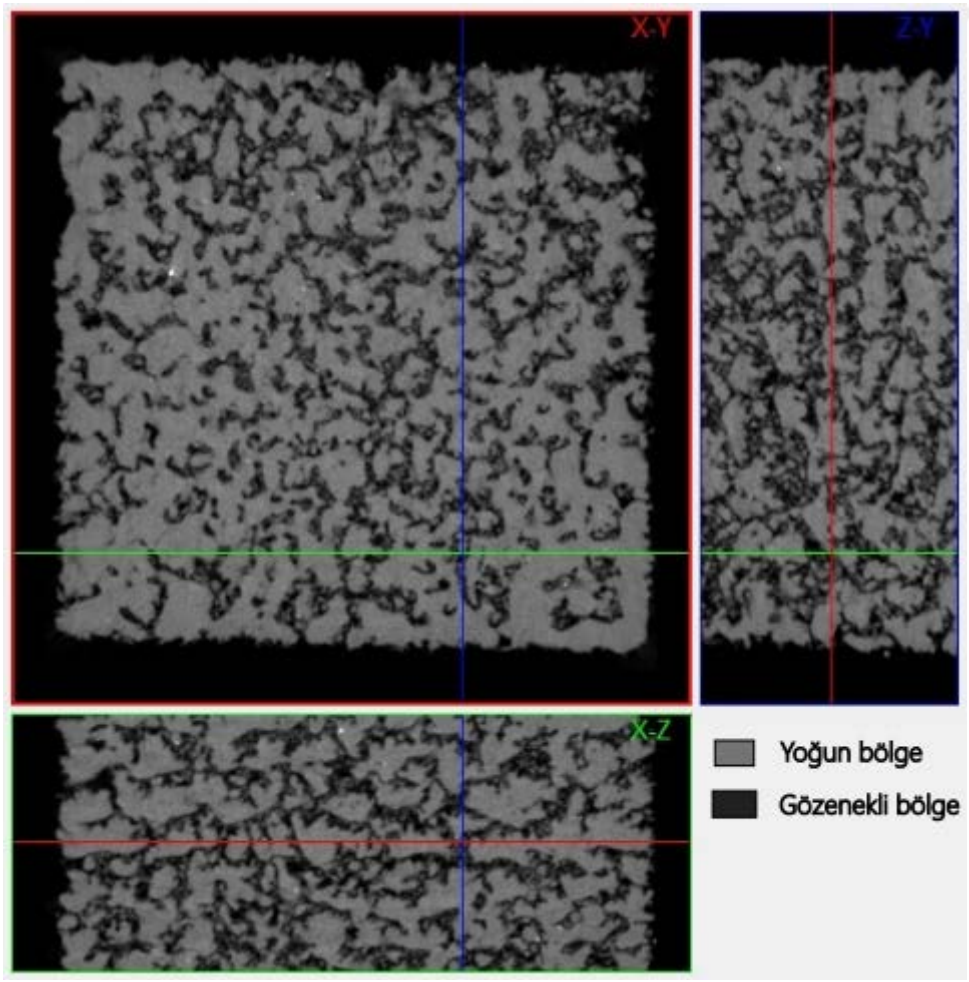
Şekil 4.41. Numunelerin helyum piknometre sonuçları

4.6.2. Mikro tomografi görüntüleme ve analizi sonuçları

Mikro tomografi ile Grup IV, VII-X arasından 11 adet numune için görüntüleme ve yeniden inşa işlemine tabii tutulmuştur. Numune 10.1'e ait katı model görünümü Şekil 4.42'te verilmiştir. Aynı numunenin kesitlerinden alınan görsel ise Şekil 4.43 ile gösterilmektedir. Diğer numunelere ait katı model görünümleri ve kesit görüntüleri Ek-3 ile verilmiştir.



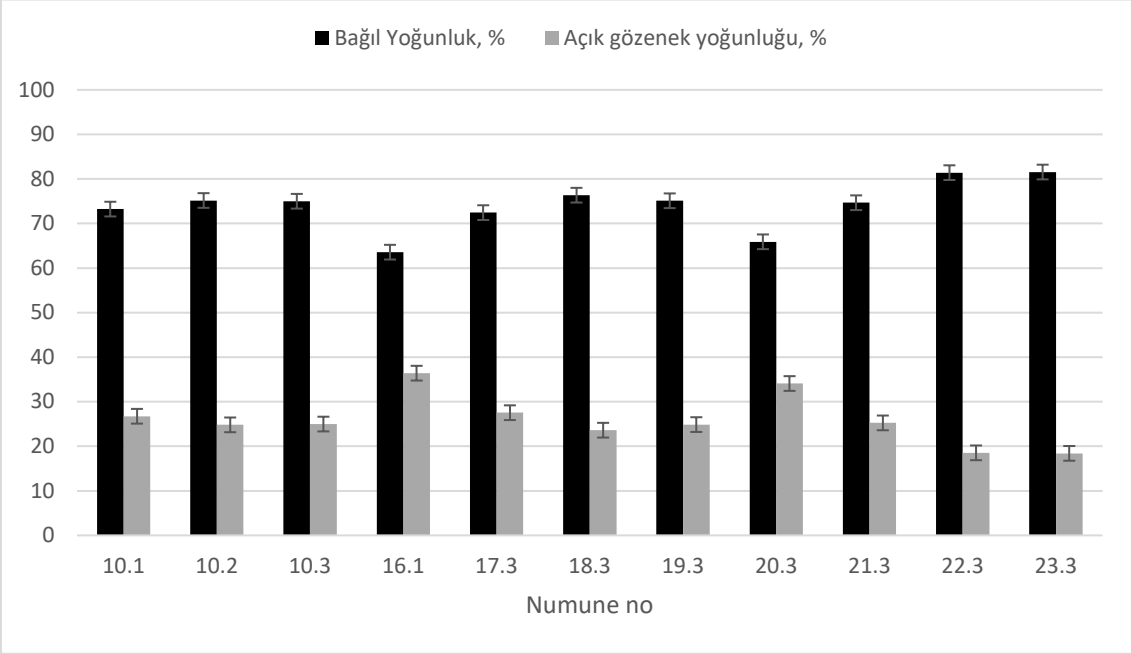
Şekil 4.42. 10.1 numunesinin mikro tomografi ile taranması sonucu elde edilen katı model



Şekil 4.43. 10.1 numaralı numunenin üst ve yan görünüşün kesit görünümü

Şekil 4.42 ve Şekil 4.43 ile verilen katı model ve kesit görüntülerinde üst ve yan yüzeylerin pürüzlü bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü kanallı bir yapı sergilemektedir. Benzer şekilde yapı içerisinde farklı eksenlerden alınan kesitler de

incelendiğinde birbiri ile bağlantılı gözeneklerin oluşumu görülmektedir. Mikro tomografiden elde edilen kesit fotoğrafları cihaz üreticisi tarafından sağlanan yazılımlar ile incelenmiştir. İnceleme sonucunda numunelerin bağıl yoğunlukları, açık ve kapalı gözenek oranları tayin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.44 ile verilen sütun grafiğinde gösterilmektedir. Ayrıca bağıl yoğunluk, açık ve kapalı gözenek oranları Çizelge 4.27 ile sunulmuştur. Kapalı gözenek oranları çok küçük değerlerde ölçüldüğünden grafikte gösterilememiştir.



Şekil 4.44. Mikro tomografi ile elde edilen bağıl yoğunluk dağılımı

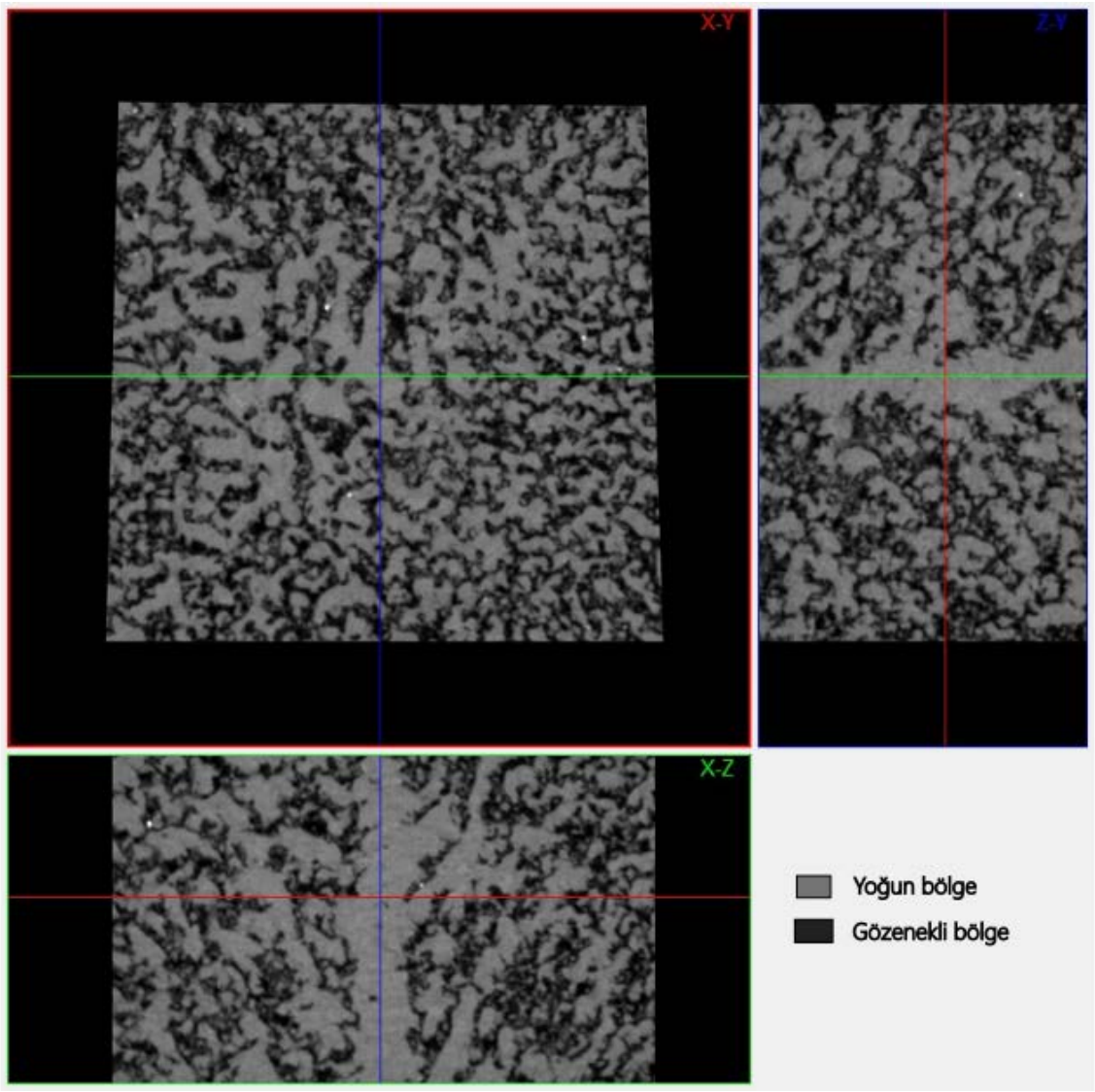
Çizelge 4.27. Bağıl yoğunluk ve gözenek yoğunluğu verileri

	Bağıl Yoğunluk, %	Açık gözenek yoğunluğu, %	Kapalı gözenek yoğunluğu, %
10.1	73,24	26,74	0,02
10.2	75,17	24,81	0,02
10.3	75	24,99	0,01
16.1	63,57	36,42	0,02
17.3	72,45	27,54	0,01
18.3	76,36	23,61	0,03
19.3	75,11	24,87	0,02
20.3	65,9	34,10	0,01
21.3	74,67	25,27	0,08
22.3	81,42	18,54	0,05
23.3	81,56	18,42	0,03

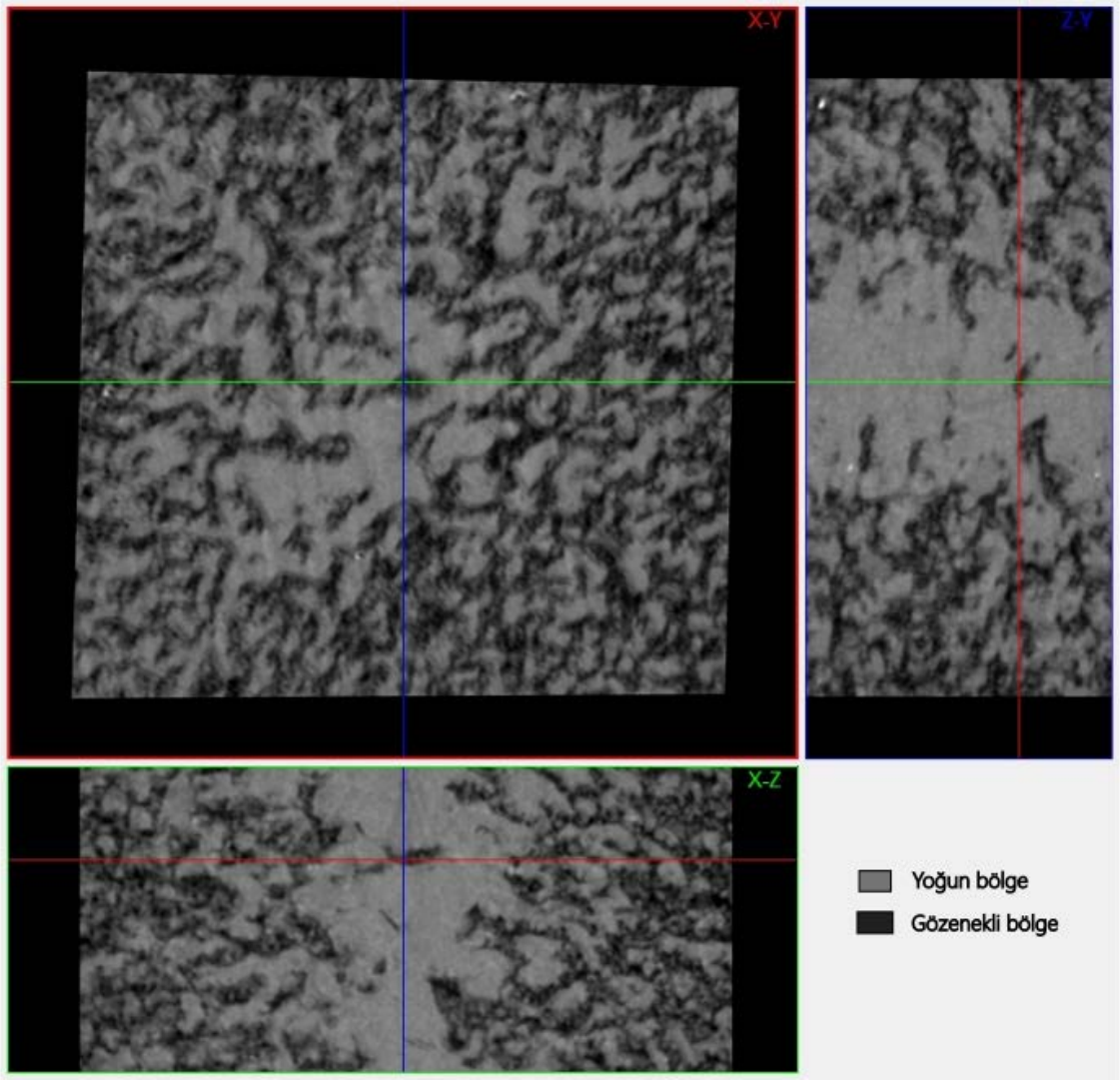
Şekil 4.44 incelendiğinde 16.1 numaralı numune hariç tüm numunelerin tarama stratejisi haricinde tüm parametrelerinin aynı olduğu göz önüne alındığında % 72-% 82 oranında bağıl yoğunluk analiz edilmiştir. Ayrıca gözenekler kendi içerisinde incelendiğinde, önemli ölçüde açık gözeneklerin oluştuğu görülmektedir. Bu husus helyum piknometresi sonuçlarının tam yoğun parça sonucunu göstermesi ile örtüşmektedir. Geliştirilen yöntemle üretilen alümina numuneler açık gözenekli yapıda olduğu sonucuna varılmıştır.

Sadece CO_2 lazeri ile sinterlenerek üretilmiş numunenin bağıl yoğunluğu % 63,57 hesaplanmıştır. Bu yoğunluk değeri ölçülen en düşük yoğunluktur. Ayrıca % 0,2 oranında kapalı gözenek yoğunluğu, hacminin üçte birinin ise açık gözenek oluşumu görülmesi tek başına CO_2 ışını ile sinterlemenin gerçekleştiği düşünülmüştür. Benzer şekilde ~% 66 bağıl yoğunluğa sahip olan konsentrik içeriden dışarıya doğru tarama stratejisinin çift lazeri kullanmış olmasına karşın diğer numunelere kıyasla daha düşük performans sergilendiği görülmüştür.

Mikro tomografiden elde edilen 20.3 ve 21.3 numaralı numunelerin mikrofotoğrafları Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da görülmektedir. Görüntüler incelendiğinde iki numunenin üretimlerinde sırasıyla konsentrik içeriden dışarıya ve dışarıdan içeriye doğru tarama stratejileri uygulanmıştır. Bu tarama stratejilerinde belirli bir hat boyunca ilerleyen lzer ışını doksan derecelik dönüş gerçekleştirmektedir. Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da verilen görsellerde X-Y düzlemlerine karşılık gelen yüzeylerde köşegen hattı boyunca yoğunluğun arttığı ve diğer kesit görünümlerin merkezinde numune boyunca uzanan yoğun bir bölge görülmektedir. Bu dönüşler sırasında lazer ışını ile teması kesişen bölgeler olması nedeniyle birim alana daha fazla enerji transfer edildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca merkez bölgesinde daha dar bir alanda bu kesişimlerin daha dar bir alanda tarama gerçekleştiğinden merkezden dış çepere doğru yoğunluk artışı görülmüştür. Lazer ışını ile toz malzemenin etkileşim süresinin yoğunluğa etkisi görülmüştür.

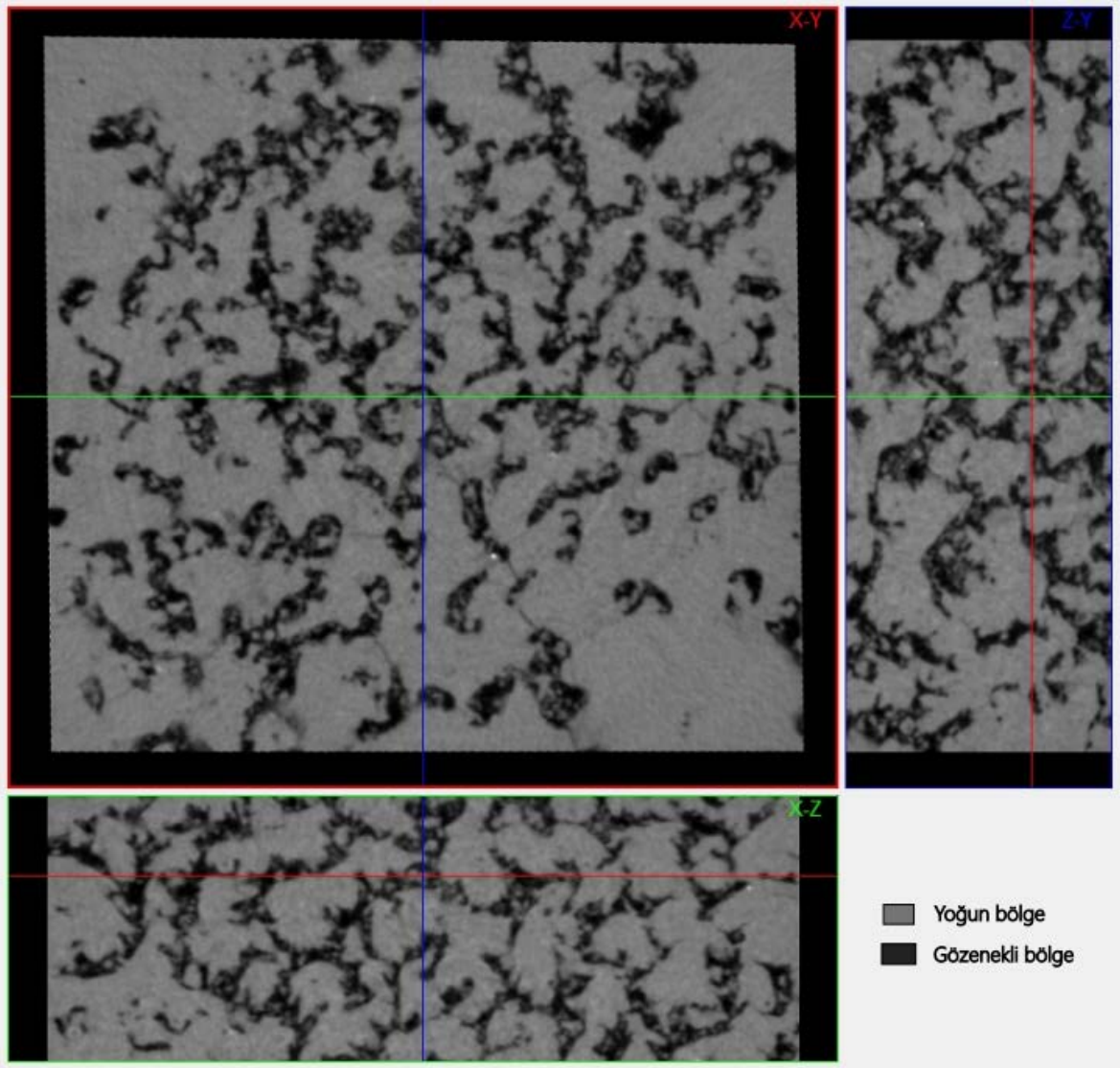


Şekil 4.45. 20.3 numaralı numunenin üst ve yan görünüşün kesit görünümü

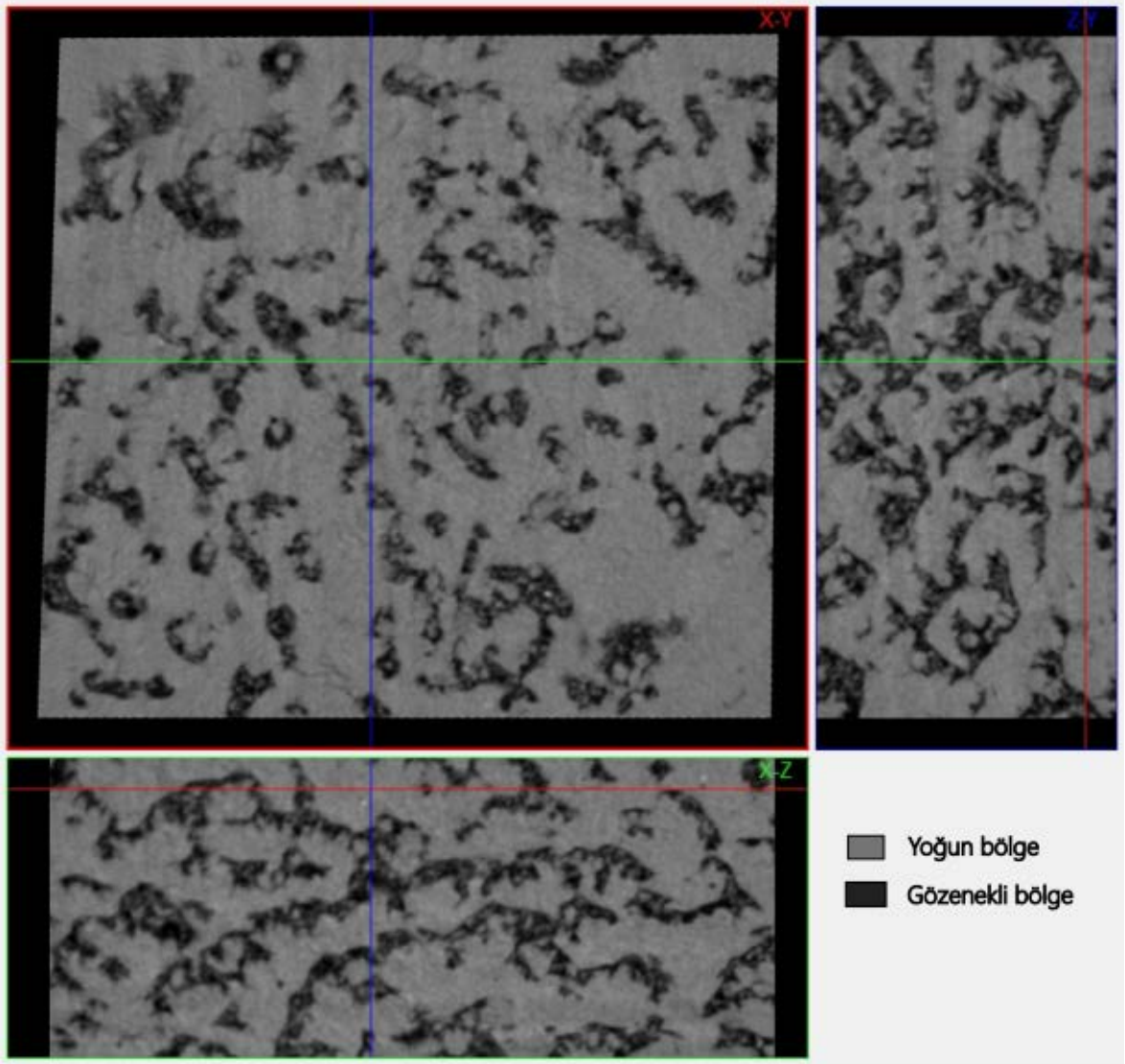


Şekil 4.46. 21.3 numaralı numunenin üst ve yan görünüşün kesit görünümü

Bağıl yoğunluk analizleri sonucunda tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ışığında önerilmiş olan iki farklı tarama stratejisinin sonuçları göze çarpmaktadır. Elde edilen yoğunluk oranı diğer numunelere kıyasla % 7 oranında daha yüksektir. 22.3 numunesinde uygulanan tarama stratejisinde fiber lazerin tarama mesafesinin CO_2 lazer ışınının tarama mesafesinin yarısı seçilerek tarama hızı iki katı olacak şekilde uygulanmıştır. 23.3 numunesinde ise çift lazerli prosedür uygulandıktan sonra tek paso CO_2 lazer ışını tekrar toz yüzeyine uygulanmıştır. Uygulanan tarama stratejisinin, birim alana enerji yoğunluğunu artırmasıyla bu sonucun elde edildiği düşünülmektedir. Diğer numunelere kıyasla bu iki numunenin (22.3, 23.3) gözenek yapısı da diğerleri ile benzer şekilde açık gözenekli yapıdadır. Numunelere ait mikro tomografi görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 4.47. 22.3 numaralı numunenin üst ve yan görünüşün kesit görünümü



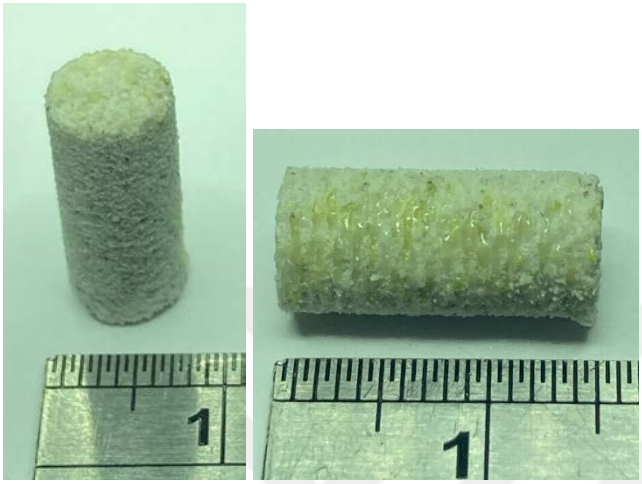
Şekil 4.48. 23.3 numaralı numunenin üst ve yan görünüşün kesit görünümü

4.7. Basma Testi Sonuçları

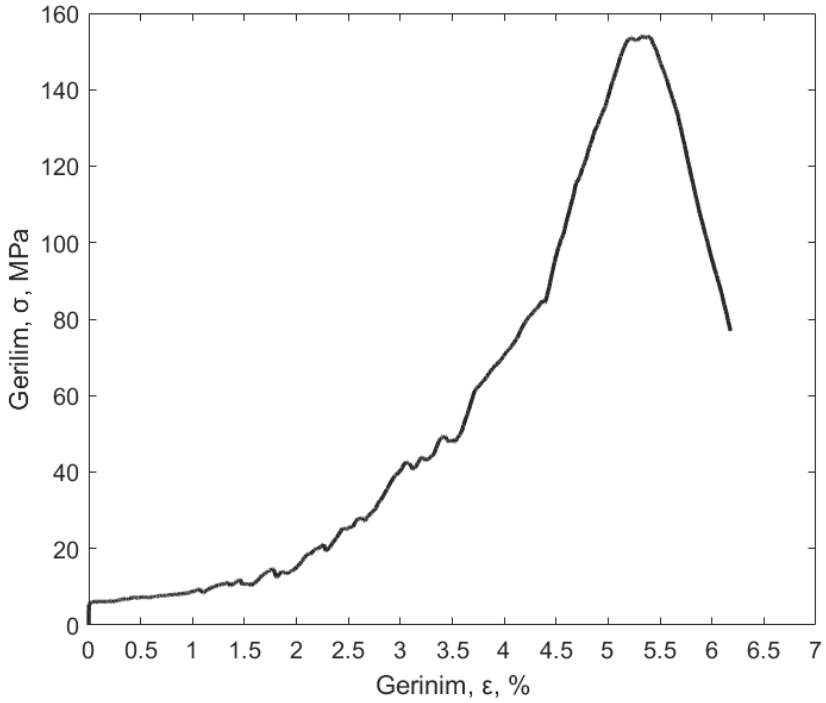
Basma testi numunesi, üretilmiş olan 17.3 numaralı numunenin parametreleri ile ASTM C1424 numaralı ve Gelişmiş Seramiklerin Ortam Sıcaklığında Monotonik Basınç Dayanımı için Standart Test Yöntemi başlıklı [90] standartta verilen minimum numune ölçüleri olan 6,35 mm çap ve 12,70 mm uzunlukta üretilen numuneye test uygulanmıştır. Testte kullanılan numune Şekil 4.49 ile gösterilmektedir. Test uygulanırken 1 mm/dak. hız ile bası yükü uygulanmıştır. Test sonuçları uygulanan kuvvet (N) ve yer değiştirme (mm) sonuçları alınmıştır. Basma dayanımının elde edilmesinde Eş. 4.1 ile verilen formül kullanılmıştır. Yer değiştirme miktarı ise Eş. 4.2 ile verilen formül kullanılmıştır. Elde edilen verilerden çizdirilen gerilim gerinim grafiği ise Şekil 4.50'te görüntülenmektedir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{4.1}$$

$$\varepsilon = \frac{\text{Yer değişimi (mm)}}{\text{Numune boyu (mm)}} \tag{4.2}$$



Şekil 4.49. Basma testi numunesi



Şekil 4.50. Basma testi gerilim gerinim grafiği

Basma testi sonucunda elde edilen gerilim gerinim grafiği incelendiğinde en yüksek basma dayanımı 153,89 MPa olarak okunmuştur. Bilindiği üzere ham alümina malzemenin teorik

basma mukavemeti yaklaşık 3.000 MPa [91] olduğu göz önüne alındığında elde edilen basma mukavemetinin yüksek kuvvetlere dayanamayacağı görülse de alümina malzemesinin PBF ile numune üretilebiliyor olması başlangıç için başarılı olduğu değerlendirilmiştir. Elde edilen grafikten basma numunesinin elastik modülü de hesaplanmıştır. Parametre çalışmalarından elde edilen sonuca göre yaklaşık % 25 oranında gözenekli bir yapı üretiliyor olması elastik modülün düşük elde edilmesi ile ilişkilendirilebilir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında oksit grubu mühendislik seramiklerden olan alüminanın doğrudan Eİ'si üzerine çalışılmıştır. Bilindiği üzere alüminanın ikili veya üçlü malzeme grupları hazırlanarak kullanımı haricinde, numunelerin doğrudan üretilebildiği çalışma bulunmamaktadır. Tez çalışmasında Lazer ışınının kullanıldığı PBF yönteminde iki farklı dalga boyuna sahip lazer ışınları kullanılmıştır. Alüminanın malzeme özelliklerinden absorpsiyon katsayısı belirli dalga boyları için farklılık göstermesi, Eİ'ye girdi malzemesi olarak kullanımının önünde önemli bir kısıt olarak yer almaktadır. Lazer ışınının kullanıldığı PBF yönteminde absorpsiyon etkisinin aşılması için iki farklı dalga boyuna sahip lazer ışınları kullanılmıştır. Lazer ışınlarından ilki karbondioksit lazer ön ısıtma yapılması için kullanılırken, fiber lazer ışını ise ergitme fonksiyonunu yerine getirecek şekilde çalışmada nümerik analizler ve deneysel çalışmalar birlikte yürütülmüştür.

Nümerik analizler kapsamında, alüminanın sabit ve sıcaklıkla değişkenlik gösteren malzeme özellikleri, PBF yöntemi parametrelerinden olan lazer ışın gücü, tarama hızı, tarama aralığı, katman kalınlığının dahil edildiği bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile üretim parametrelerinin tahmin edilmesi hususunda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizler sonucunda lazer ışınlarının etkisiyle toz yatağında lazer ile temas eden malzemenin sıcaklık konturları çıkartılmıştır. Öncül parametreler belirlenerek deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi için zemin oluşturulmuştur.

Deneysel üretimler kapsamında numerik analiz sonuçlarından faydalanılmıştır. Alümina ile gerçekleşen deneysel çalışmalarda iki lazer ışını kullanılırken herhangi bir koruyucu atmosfer kullanılmamıştır. X-RD analizleri sonucunda numunelerin toz malzeme ile aynı kristalografide olduğu anlaşılmıştır. Alümina tozuna ait pikler ve numuneye ait pikler benzerlik gösterdiğinden başlangıç tozu ile üretilen numune arasındaki fazlarda herhangi bir değişiklik olmadığı ve yeni fazların oluşmadığı, mevcut α-alümina kristal yapısının korunduğu görülmüştür. Atmosfer kontrolsüz üretim yapılması ve tozun iki farklı lazerle üretilmesi sonrasında, kristal yapının bozulmadan kaldığının görülmesi yöntemin başarısı ile ilişkilendirilmiştir.

Karbondioksit lazeri ile deneme üretimi yapılarak üretilen numunede % 65 bağıl yoğunluk elde edilirken diğer üretimlerde ortalama % 75 oranında bağıl yoğunluğa ulaşılmıştır. Çalışmada ayrıca bilinenden farklı iki yeni tarama stratejisi önerilmiştir. Önerilen tarama stratejileri ile üretilen numunelerde % 82 oranında bağıl yoğunluk ölçülmüştür. Mikro tomografi ile yapılan görüntüleme çalışmaları ve helyum piknometresi ile yapılan ölçüm sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, yapılarda görülen gözenekliliğin neredeyse tamamı açık gözenek olduğu sonucuna varılmıştır. Kapalı gözeneklerin varlığı, % 1'in altında hesaplanmıştır.

Mikro yapıda enine ve boyuna çatlaklar görülmüştür. Lazer ışınları yoluyla aktarılan ısının, transfer edilememesi çatlaklara neden olduğu anlaşılmıştır. Basma testi numunesi de üretilerek mekanik dayanım incelenmiştir. Alüminanın sinterlenmiş ham mukavemetinin yanında elde edilen 154 MPa dayanım düşük olsa da doğrudan Eİ yoluyla herhangi bir bağlayıcı malzeme kullanılmadan üretimin yapılabilmiş olması tezin amacına ulaştığını göstermektedir.

Proses penceresi çalışmaları ve deneme üretimleri incelendiğinde, üretimi yapılan ve iyi durumda olan numunelerin, parametrelerine ait kontur görünümlerinde üst yüzey sıcaklığı buharlaşma sıcaklığı üzerinde olduğu, alüminanın düşük ısıl iletkenliği nedeniyle katmanın kesiti boyunca ilerlendiğinde ergime sıcaklığının geçildiği görülmektedir. Geliştirilen proses penceresinde numune üretimi için seçilecek parametre setlerinin üst yüzeyde buharlaşma sıcaklığı üzerinde, kesit boyunca ise ergime sıcaklığını aşan parametrelerin tercih edilmesi gerektiği görülmüştür.

Proses penceresi ile verilen konturlar incelendiğinde, enerjinin yüzey ve kesit dokusunu ergitebilecek düzeyde olan parametre setlerinde homojen ve pürüzsüz bir faz dönüşümü olduğu görülebilmektedir. Ancak enerjinin yeterli olmadığı parametre setlerinde faz dönüşümünün karasızlık gösterdiği, boğumlu ve boncuksu bir profil sergilediği ya da kesintili olarak belirli bölgelerde ergime olan bir şekilde devam ettiği görülmüştür. Bu durum genellikle tez çalışmasında kullanılan lazer güçlerinin 200 mm/s ve üzerindeki tarama hızlarında görülmüştür (Ek-1). Numune üretimleri de göz önüne alındığında, uygulanan parametrelerin en iyi şekilde 100 mm/s hız ile üretim sağlandığı özetlenebilir.

Deneysel çalışmalar sırasında sadece ön ısıtma lazeri ve ergitme lazerlerinin kullanımı ile toz malzeme etkileşimi gözlenmiştir. Ergitme lazeri ile toz malzemede herhangi bir ergime görülmezken, sadece CO_2 lazerinin 15 W gücünde uygulanması ile sinterlenmiş bir yapı elde edilmiştir. CO_2 lazerinin daha yüksek güç aralıklarında tek başına uygulandığında karakterize edilebilir numune üretilememiştir. Bu nedenle iki lazerin bir arada, ardı sıra uygulanması ile başarılı üretimler gerçekleştirilmiştir. Tek başına iki lazer ışınının, alümina malzemesinden PBF ile numune üretimi yapılamaması, alüminanın PBF'sinde tez kapsamında ele alınan konunun seramik Eİ'si için önemli bir gelişme olarak yorumlanmıştır.

FE-SEM mikro fotoğraflarında lazer ergitme izleri incelendiğinde, fiber lazer ışın çapı 90 - 120 µm değerinden daha düşük kalınlıkların olduğu görülmesi, Gauss dağılımına sahip fiber lazer ışınının etkinliğini ayrıca göstermektedir.

Toz serimi sırasında sadece CO_2 lazeri ile üretimi yapılmış olan 16.1 numunesinde tozlar arası sürtünmenin toz yatağında işlem gören numunenin yüzey bütünlüğünü bozduğu, toz yatağından aşınmış bir halde çıkabildiği görülmüştür. Toz yatağına uygulanan enerji yoğunluğunun yetersiz olması ergimeyi sağlamadığı gibi üretilen yapıyı da bozmaktadır.

Literatürde ön ısıtma işlemi yapılarak seramik Eİ prosesinde iki adet ön ısıtma işlemi uygulayan çalışma görülmüştür. Bu çalışmalarda geniş bir alanın sürekli lazer ışınına maruz bırakılması ile numune üretimi gerçekleştirmişlerdir. Tez çalışmasında ise daha kontrollü bir ön ısıtma işleminin uygulanmasıyla hiçbir takviye malzeme olmaksızın alüminanın Eİ ile numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Geniş bir alandan ziyade daha dar bir alanın lazer ışınına maruz kalması ile üretilen numunenin toz yatağından çıkartılmasında ikincil bir işleme gerek kalmaksızın rahatlıkla parçalar sökülmüştür.

Ön ısıtma için kullanılan lazer gücünün 15 W olması ile başarısız üretimler gerçekleştirilmiştir (5, 8, 11 numaralı numuneler). Ön ısıtma lazer gücünün yükseltilmesi ile geometrik olarak belirlendiği gibi üretilmiş numuneler elde edildiği anlaşıldığından, ön ısıtma lazer gücünün en az 20 W olacak şekilde üretim planlaması yapılması gerektiği anlaşılmıştır.

Tarama aralığının tek başına 40 µm ve üzerinde olması durumunda tez çalışması kapsamında başarılı olarak nitelendirilebilen numuneler üretilmiştir. Grup V altında yer alan

numunelerde tarama aralığı düşürüldükçe tam boy numunelerin üretilemediği, belirli bir yüksekliğe gelen parçanın yüksek enerji girdisi nedeniyle alttaşa tutunamadığı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda daha fazla deneysel çalışmanın planlanarak gelecek çalışmaları arasında incelenmesi değerlendirilebilir.

Tez kapsamında önerilen iki tarama stratejisi deneysel çalışmalar sırasında uygulanabilirliği anlaşılmış ve başarılı numuneler üretilmiştir. Grup VIII ile Grup IX-X numuneleri kıyaslandığında, lazer toz etkileşim süresi daha fazladır. Her bir lazer hareketi vektörel olarak tanımlanması durumunda Grup IX ile fiber lazer, Grup X'te ise CO_2 lazer ışının toz yatağında daha fazla temas ettiği anlaşılmaktadır. Bu durum bağıl yoğunluk sonuçlarına yansımıştır. Daha düşük gözeneklere sahip numunelerin elde edilmesiyle lazer toz etkileşiminin uygun enerji yoğunluğunda, nihai parça üzerinde etkileri olumlu yönde olduğu görülmüştür.

Tez çalışması sonucunda alüminanın Eİ ile üretiminde gözenekli bir yapı oluştuğu görüldüğünden, yapıda bulunan gözeneklerin daha kontrollü bir şekilde üretilebilmesi üzerine çalışmalar yapılabilir. Tez çalışmasında numune üretim hızı 100 mm/s en fazla kullanılan üretim hızıdır. Enerji yoğunluğunun, parametre belirlemelerine dahil edilerek deneysel çalışmaların planlanması, üretim hızının artırılması gelecek çalışmaları arasında ele alınabilir.

KAYNAKLAR

1. Lakhdar, Y., Tuck, C., Binner, J., Terry, A., ve Goodridge, R. (2021). Additive manufacturing of advanced ceramic materials. *Progress in Materials Science*, 116, 100736.

2. Richerson, D. W., ve Lee, W. E. (2018). *Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design.* (Dördüncü Baskı). Florida: CRC press, 25-29.

3. Bengisu, M., (2001). *Engineering ceramics*. (Birinci Baskı). Berlin: Springer, 1-25.

4. Pelz, J. S., Ku, N., Meyers, M. A., ve Vargas-Gonzalez, L. R. (2021). Additive manufacturing of structural ceramics: a historical perspective. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 670-695.

5. Drouet, C., Leriche, A., Hampshire, S., Kashani, M., Stamboulis, A., Iafisco, M., ve Tampieri, A. (2017). *Advances in Ceramic Biomaterials* (21-82). Delhi: Woodhead Publishing, 21-82.

6. Carter, C. B., ve Norton, M. G., (2007). *Ceramic materials: science and engineering* (İkinci Baskı). New York: Springer, 159-183.

7. Travitzky, N., Bonet, A., Dermeik, B., Fey, T., Filbert-Demut, I., Schlier, L., Schlordt, T., ve Greil, P. (2014). Additive manufacturing of ceramic-based materials. *Advanced Engineering Materials*, 16, 729-754.

8. Le Ferrand, H. (2021). Magnetic slip casting for dense and textured ceramics: A review of current achievements and issues. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(1), 24-37.

9. Morissette, S. L., Lewis, J. A., Cesarano, J., Dimos, D. B., ve Baer, T. (2000). Solid freeform fabrication of aqueous alumina–poly (vinyl alcohol) gelcasting suspensions. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(10), 2409-2416.

10. Yang, J., Yu, J., ve Huang, Y. (2011). Recent developments in gelcasting of ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 31(14), 2569-2591.

11. Wiesner, V. L., Youngblood, J. P., ve Trice, R. W. (2014). Room-temperature injection molding of aqueous alumina-polyvinylpyrrolidone suspensions. *Journal of the European Ceramic Society*, 34(2), 453-463.

12. Weaver, E. A., Stegman, B. T., Trice, R. W., ve Youngblood, J. P. (2022). Mechanical properties of room-temperature injection molded, pressurelessly sintered boron carbide. *Ceramics International*, 48(8), 11588-11596.

13. Klocke, F. (1997). Modern approaches for the production of ceramic components. *Journal of the European Ceramic Society*, 17(2-3), 457-465.

14. Chu, T. M. G., Orton, D. G., Hollister, S. J., Feinberg, S. E., ve Halloran, J. W. (2002). Mechanical and in vivo performance of hydroxyapatite implants with controlled architectures. *Biomaterials*, 23(5), 1283-1293.

15. Bose, S., Vahabzadeh, S., ve Bandyopadhyay, A. (2013). Bone tissue engineering using 3D printing. *Materials Today*, 16(12), 496-504.

16. Muth, J. T., Dixon, P. G., Woish, L., Gibson, L. J., ve Lewis, J. A. (2017). Architected cellular ceramics with tailored stiffness via direct foam writing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(8), 1832-1837.

17. Bae, C. J., ve Halloran, J. W. (2011). Integrally cored ceramic mold fabricated by ceramic stereolithography. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 8(6), 1255-1262.

18. Weng, F., Chen, C., ve Yu, H. (2014). Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review. *Materials ve Design*, 58, 412-425.

19. Zhang, Y., Sahasrabudhe, H., ve Bandyopadhyay, A. (2015). Additive manufacturing of Ti-Si-N ceramic coatings on titanium. *Applied Surface Science*, 346, 428-437.

20. Balla, V. K., Bandyopadhyay, P. P., Bose, S., ve Bandyopadhyay, A. (2007). Compositionally graded yttria-stabilized zirconia coating on stainless steel using laser engineered net shaping (LENS™). *Scripta Materialia*, 57(9), 861-864.

21. Wang, H. M., Wang, C. M., ve Cai, L. X. (2003). Wear and corrosion resistance of laser clad Ni2Si/NiSi composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 168(2-3), 202-208.

22. Xu, X., Han, J., Wang, C., ve Huang, A. (2016). Laser cladding of composite bioceramic coatings on titanium alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25, 656-667.

23. Ruys, A. J. (2018). *Alumina ceramics: biomedical and clinical applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 1-37.

24. Hur, H., Park, Y. J., Kim, D. H., ve Ko, J. W. (2022). Material extrusion for ceramic additive manufacturing with polymer-free ceramic precursor binder. *Materials and Design*, 221, 110930.

25. International Organization for Standardization. (2021). *ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary*. Cenevre: ISO/ASTM International, 1-12.

26. Ziaee, M., ve Crane, N. B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781-801.

27. Hashmi, S., Batalha, G. F., Tyne, C. J. V. ve Yilbas, B. (Editörler). (2014). *Comprehensive materials processing*, Amsterdam: Elsevier, 265-281.

28. Asadi-Eydivand, M., Solati-Hashjin, M., Farzad, A., ve Osman, N. A. A. (2016). Effect of technical parameters on porous structure and strength of 3D printed calcium sulfate prototypes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37, 57-67.

29. Gaytan, S. M., Cadena, M. A., Karim, H., Delfin, D., Lin, Y., Espalin, D., MacDonald, E. ve Wicker, R. B. (2015). Fabrication of barium titanate by binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramics International*, 41(5), 6610-6619.

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

31. Zhang, S., Miyanaji, H., Yang, L., Zandinejad, A. A., Dilip, J. J. S., ve Stucker, B. (2014, 4-6 Ağustos). *An experimental study of ceramic dental porcelain materials using a 3D print (3DP) process.* International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 991-1011.

32. Carrijo, M. M. M., Lorenz, H., Filbert-Demut, I., de Oliveira Barra, G. M., Hotza, D., Yin, X., Greil, P. ve Travitzky, N. (2016). Fabrication of Ti3SiC2-based composites via three-dimensional printing: Influence of processing on the final properties. *Ceramics International*, 42(8), 9557-9564.

33. Zhang, W., Melcher, R., Travitzky, N., Bordia, R. K.,ve Greil, P. (2009). Three-dimensional printing of complex-shaped alumina/glass composites. *Advanced Engineering Materials*, 11(12), 1039-1043.

34. Hagedorn, Y. (2017). Laser additive manufacturing of ceramic components: materials, processes, and mechanisms. *Laser additive manufacturing*. Cambridge: Woodhead Publishing, 163-180.

35. Rane, K., ve Strano, M. (2019). A comprehensive review of extrusion-based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts. *Advances in Manufacturing*, 7, 155-173.

36. Romanczuk-Ruszuk, E., Sztorch, B., Pakuła, D., Gabriel, E., Nowak, K., ve Przekop, R. E. (2023). 3D printing ceramics—materials for direct extrusion process. *Ceramics*, 6(1), 364-385.

37. Bourell, D. L., Frazier, W., Kuhn, H., ve Seifi, M. (Editörler). (2020). *ASM handbook volume 24 additive manufacturing processes*, Ohio: ASM International ,40-50.

38. Cesarano, J. (1998). A review of robocasting technology. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 542, 133.

39. Slots, C., Jensen, M. B., Ditzel, N., Hedegaard, M. A., Borg, S. W., Albrektsen, O., Thygesen, T., Kassem, M. ve Andersen, M. Ø. (2017). Simple additive manufacturing of an osteoconductive ceramic using suspension melt extrusion. *Dental Materials*, 33(2), 198-208.

40. Willems, E., Turon-Vinas, M., Dos Santos, B. C., Van Hooreweder, B., Zhang, F., Van Meerbeek, B., ve Vleugels, J. (2021). Additive manufacturing of zirconia ceramics by material jetting. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(10), 5292-5306.

41. Elkaseer, A., Chen, K. J., Janhsen, J. C., Refle, O., Hagenmeyer, V., ve Scholz, S. G. (2022). Material jetting for advanced applications: A state-of-the-art review, gaps and future directions. *Additive Manufacturing*, 60, 103270.

42. Cui, X., Ouyang, S., Yu, Z., Wang, C., ve Huang, Y. (2003). A study on green tapes for LOM with water-based tape casting processing. *Materials Letters*, 57(7), 1300-1304.

43. Weisensel, L., Travitzky, N., Sieber, H., ve Greil, P. (2004). Laminated object manufacturing (LOM) of SiSiC composites. *Advanced Engineering Materials*, 6(11), 899-903.

44. Zhang, Y., He, X., Han, J., ve Du, S. (1999). Ceramic green tape extrusion for laminated object manufacturing. *Materials Letters*, 40(6), 275-279.

45. Fiume, E., Coppola, B., Montanaro, L., ve Palmero, P. (2023). Vat-photopolymerization of ceramic materials: exploring current applications in advanced multidisciplinary fields. *Frontiers in Materials*, 10, 1242480.

46. Li, X., ve Chen, Y. (2021). Vat-Photopolymerization-based ceramic manufacturing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 4819–4836.

47. Bourell, D. L., Frazier, W., Kuhn, H., ve Seifi, M. (Editörler). (2020). *ASM handbook volume 24 additive manufacturing processes*, Ohio: ASM International, 131–151.

48. Wang, F., Mei, J., Jiang, H., ve Wu, X. (2007). Laser fabrication of Ti6Al4V/TiC composites using simultaneous powder and wire feed. *Materials Science and Engineering: A*, 445, 461-466.

49. Niu, F., Wu, D., Ma, G., Wang, J., Guo, M., ve Zhang, B. (2015). Nanosized microstructure of Al2O3–ZrO2 (Y2O3) eutectics fabricated by laser engineered net shaping. *Scripta Materialia*, 95, 39-41.

50. Niu, F., Wu, D., Ma, G., Wang, J., Zhuang, J., ve Jin, Z. (2016). Rapid fabrication of eutectic ceramic structures by laser engineered net shaping. *Procedia CIRP*, 42, 91-95.

51. Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., ve Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*, 2(4), 041101.

52. Juste, E., Petit, F., Lardot, V., ve Cambier, F. (2014). Shaping of ceramic parts by selective laser melting of powder bed. *Journal of Materials Research*, 29(17), 2086-2094.

53. Kruth, J. P., Levy, G., Klocke, F., ve Childs, T. H. (2007). Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals*, 56(2), 730-759.

54. Wilkes, J., Hagedorn, Y. C., Meiners, W., ve Wissenbach, K. (2013). Additive manufacturing of ZrO2-Al2O3 ceramic components by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 19(1), 51-57.

55. Liu, Q., Danlos, Y., Song, B., Zhang, B., Yin, S., ve Liao, H. (2015). Effect of high-temperature preheating on the selective laser melting of yttria-stabilized zirconia ceramic. *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 61-74.

56. Fan, Z., Lu, M., ve Huang, H. (2018). Selective laser melting of alumina: a single track study. *Ceramics International*, 44(8), 9484-9493.

57. Zheng, Y., Zhang, K., Liu, T. T., Liao, W. H., Zhang, C. D., ve Shao, H. J. C. I. (2019). Cracks of alumina ceramics by selective laser melting. *Ceramics International*, 45(1), 175-184.

58. Bae, B. H., Lee, J. W., Cha, J. M., Kim, I. W., Jung, H. D., ve Yoon, C. B. (2020). Preliminary characterization of glass/alumina composite using laser powder bed fusion (L-PBF) additive manufacturing. *Materials*, 13(9), 2156.

59. Verga, F., Borlaf, M., Conti, L., Florio, K., Vetterli, M., Graule, T., Schmid, M. ve Wegener, K. (2020). Laser-based powder bed fusion of alumina toughened zirconia. *Additive Manufacturing*, 31, 100959.

60. Verga, F., Makowska, M., Cellerai, G., Florio, K., Schmid, M., ve Wegener, K. (2021). Crack-healing, a novel approach for a laser-based powder bed fusion of high-performance ceramic oxides. *Additive Manufacturing Letters*, 1, 100021.

61. Liu, H., Su, H., Shen, Z., Zhao, D., Liu, Y., Guo, Y., Zhang, J., Liu, L. ve Fu, H. (2021). Insights into high thermal stability of laser additively manufactured Al2O3/GdAlO3/ZrO2 eutectic ceramics under high temperatures. *Additive Manufacturing*, 48, 102425.

62. Abdelmoula, M., Küçüktürk, G., Juste, E., ve Petit, F. (2022). Powder bed selective laser processing of alumina: Scanning strategies investigation. *Applied Sciences*, 12(2), 764.

63. Abdelmoula, M., Küçüktürk, G., Juste, E., ve Petit, F. (2024). Enhancing powder bed fusion of alumina ceramic material: a comprehensive study from powder tailoring to mechanical performance evaluation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131(3), 1745-1767.

64. Pfeiffer, S., Florio, K., Makowska, M., Marone, F., Yüzbasi, S., Aneziris, C. G., Swygenhoven, H. V., Wegener, K. ve Graule, T. (2022). Crack-reduced alumina/aluminum titanate composites additive manufactured by laser powder bed fusion of black TiO2− x doped alumina granules. *Journal of the European Ceramic Society*, 42(8), 3515-3529.

65. Xiong, Z., Zhang, K., Zhu, Z., Liu, T., Zhang, Y., Li, S., ve Liao, W. (2023). Effect of laser focus shift on the forming quality, microstructure and mechanical properties of additively manufactured Al2O3–ZrO2 eutectic ceramics. *Ceramics International*, 49(22), 35948-35962.

66. Xiong, Z., Zhang, K., Liu, T., Zhu, Z., Wei, H., Zou, Z., ve Liao, W. (2023). Role of scanning speed on the microstructure and mechanical properties of additively manufactured Al2O3–ZrO2. *Journal of the American Ceramic Society*, 106(12), 7760-7775.

67. Zhang, Y., Zhang, K., Chen, D., Liu, T., Xiong, Z., Li, S., Li, F. ve Zhu, Z. (2024). Morphology and formation mechanism of cracks in Al2O3–ZrO2 eutectic ceramics fabricated via laser powder bed fusion. *Journal of the American Ceramic Society*, 107(4), 2128-2142.

68. Abdelmoula, M. (2022). *Powder Bed Selective Laser Melting/Sintering of High-Technical Ceramic Materials*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 45-52.

69. Abdelmoula, M., Küçüktürk, G., Juste, E., ve Petit, F. (2022). Powder bed selective laser processing of alumina: scanning strategies investigation. *Applied Sciences*, 12(2), 764.

70. Moser, D, Fish, S, Beaman, J, ve Murthy, J. (2014, Kasım 14–20). Multi-layer computational modeling of selective laser sintering processes. *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. *Volume 2A: Advanced Manufacturing*. Montreal, V02AT02A008.

71. Lisitsyn, A. V., Dombrovsky, L. A., Mendeleyev, V. Y., Grigorenko, A. V., Vlaskin, M. S., ve Zhuk, A. Z. (2016). Near-infrared optical properties of a porous alumina ceramics produced by hydrothermal oxidation of aluminum. *Infrared Physics & Technology*, 77, 162-170.

72. Lawrence, J. (2004). An analysis of the beam interaction characteristics of selected lasers with an alpha-alumina bioceramic. *Optics and lasers in engineering*, 41(3), 505-514.

73. Pham, D. T., Dimov, S. S., ve Petkov, P. V. (2007). Laser milling of ceramic components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(3-4), 618-626.

74. İnternet: Ansys, Fluent Theory Guide. URL: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/flu_th/flu_th.html?q=ansys%20fluent%20theory%20guide, Son Erişim Tarihi: 05.04.2024.

75. Zhang, K., Liu, T., Liao, W., Zhang, C., Zheng, Y., ve Shao, H. (2018, Ağustos 13-15). Simulation of the thermal behavior and analysis of solidification process during selective laser melting of alumina. *2018 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, 1808- 1820.

76. Edith Wiria, F., Fai Leong, K., ve Kai Chua, C. (2010). Modeling of powder particle heat transfer process in selective laser sintering for fabricating tissue engineering scaffolds. *Rapid Prototyping Journal*, 16(6), 400-410.

77. Ramesh Kumar, C., ve Nagarajan, G. (2012). Performance and emission characteristics of a low heat rejection spark ignited engine fuelled with E20. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26, 1241-1250.

78. Dong, Z., Liu, Y., Wen, W., Ge, J., ve Liang, J. (2018). Effect of hatch spacing on melt pool and as-built quality during selective laser melting of stainless steel: modeling and experimental approaches. *Materials*, 12(1), 50.

79. Khairallah, S. A., ve Anderson, A. (2014). Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2627-2636.

80. Dong, Z., Zhang, X., Shi, W., Zhou, H., Lei, H., ve Liang, J. (2018). Study of size effect on microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg samples made by selective laser melting. *Materials*, 11(12), 2463.

81. Grossin, D., Montón, A., Navarrete-Segado, P., Özmen, E., Urruth, G., Maury, F., Frances, C., Tourbin, M.,Lenormand, P. ve Bertrand, G. (2021). A review of additive manufacturing of ceramics by powder bed selective laser processing (sintering/melting): Calcium phosphate, silicon carbide, zirconia, alumina, and their composites. *Open Ceramics*, 5, 100073.

82. Liu, Q., Danlos, Y., Song, B., Zhang, B., Yin, S., ve Liao, H. (2015). Effect of high-temperature preheating on the selective laser melting of yttria-stabilized zirconia ceramic. *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 61-74.

83. Abdelmoula, M., Küçüktürk, G., Juste, E., ve Petit, F. (2022). Powder bed selective laser processing of alumina: scanning strategies investigation. *Applied Sciences*, 12(2), 764.

84. Abdelmoula, M., Zarazaga, A. M., Küçüktürk, G., Maury, F., Grossin, D., ve Ferrato, M. (2022). Scanning strategy investigation for direct powder bed selective laser processing of silicon carbide ceramic. *Applied Sciences*, 12(2), 788.

85. Yves-Christian, H., Jan, W., Wilhelm, M., Konrad, W., ve Reinhart, P. (2010). Net shaped high performance oxide ceramic parts by selective laser melting. *Physics Procedia*, 5, 587-594.

86. Qiu, Y. D., Wu, J. M., Chen, A. N., Chen, P., Yang, Y., Liu, R. Z., Chen, G., Chen, S., Shi, Y. S. ve Li, C. H. (2020). Balling phenomenon and cracks in alumina ceramics prepared by direct selective laser melting assisted with pressure treatment. *Ceramics International*, 46(9), 13854-13861.

87. Young, Z. A., Guo, Q., Parab, N. D., Zhao, C., Qu, M., Escano, L. I., Fezzaa, K., Everhart, W. Sun, T. ve Chen, L. (2020). Types of spatter and their features and formation mechanisms in laser powder bed fusion additive manufacturing process. *Additive Manufacturing*, 36, 101438.

88. İnternet: Blomquist, R. A., Fink, J. K. ve Leibowitz, L. Viscosity of Molten Alumina-1978, URL: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc303735/, Son Erişim Tarihi: 01.05.2024.

89. Yousefi, E., Sun, Y., Kunwar, A., Guo, M., Moelans, N., ve Seveno, D. (2021). Surface tension of aluminum-oxygen system: A molecular dynamics study. *Acta Materialia*, 221, 117430.

90. American Society for Testing and Materials. (2019). *C1424 – 15: Standard test method for monotonic compressive strength of advanced ceramics at ambient temperature*, Pensilvanya: ASTM International, 1-14.

91. Acharya, S., Bysakh, S., Parameswaran, V., ve Mukhopadhyay, A. K. (2015). Deformation and failure of alumina under high strain rate compressive loading. *Ceramics International*, 41(5), 6793-6801.

EKLER

(Ekler Tezin arka kapağında CD ortamında verilmiştir.)



Gazili olmak ayrıcalıktır