



**YÖNLENDİRİLMİŞ LAZER ENERJİ YIĞMA YÖNTEMİ İLE SS316L -
IN718 MALZEMELERİYLE FONKSİYONEL GEÇİŞLİ YAPILARIN
ÜRETİLMESİNDE TERMAL MODEL GELİŞTİRME VE MALZEME
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Büşra ASLAN ÇIĞIR

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2025

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Büşra ASLAN ÇİĞİR

02/10/2025

YÖNLENDİRİLMİŞ LAZER ENERJİ YIĞMA YÖNTEMİ İLE SS316L - IN718
MALZEMELERİYLE FONKSİYONEL GEÇİŞLİ YAPILARIN ÜRETİLMESİNDE
TERMAL MODEL GELİŞTİRME VE MALZEME DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)

Büşra ASLAN ÇİĞİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2025

ÖZET

Bu tez çalışmasında, lazer tabanlı yönlendirilmiş lazer enerji yığma yöntemiyle (LYEY) SS316L-IN718 alaşım çiftinden fonksiyonel geçişli malzemeler (FGM) üretilmiş ve üretim parametrelerinin mikro yapı, kimyasal homojenlik, kristal yönelim, yoğunluk ve mekanik özelliklere etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, SS316L-IN718 tabanlı FGM’lerde üretim parametrelerinin mikroyapısal ve mekanik performans üzerindeki rolünü deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemektir, elde edilen bulgularla uygun üretim koşullarını tanımlamaktır. Çalışma üç aşamada yürütülmüştür: (i) farklı kompozisyonlarda tek dikiş üretimleri, (ii) Abaqus tabanlı termal simülasyonlarla eriyik havuz geometrisinin doğrulanması, (iii) farklı enerji yoğunluğu stratejileriyle çok katmanlı FGM duvar yapılarının üretilmesi. Çalışma bulguları, SS316L açısından zengin numunelerde sütunsu ve kararlı tanelerin gözlemlendiğini; artan IN718 oranının ise dendritik yapılar ve laves fazı çökeltilerini artırdığını göstermiştir. Özellikle %25 IN718 bileşimi, literatürde kritik aralık olarak tanımlanan makro çatlak oluşumunu göstermiştir. EBSD analizleri, %50 IN718 içeren numunenin en dengeli kristal yönelim ve deformasyon özelliklerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Abaqus simülasyonları eriyik havuz genişliği için çoğu kompozisyonda %2’nin altında, derinlik için ise %1,3-5,5 aralığında hata ile deneysel sonuçlarla uyum sağlamış; ancak yüksek oranda IN718 içeren bileşimlerde hata oranı %7’ye kadar çıkmıştır. FGM 2 en kararlı ve yüksek dayanımlı yapıyı sunarken, FGM 3 kimyasal geçişlerde en düzenli ve sertlik açısından en homojen sonuçları vermiştir. FGM 1 ise mikroyapısal ve mekanik açıdan en zayıf performansı göstermiştir. Sonuç olarak, enerji yoğunluğu parametresi yalnızca eriyik havuz geometrisini değil, aynı zamanda FGM yapılarının mekanik homojenliğini de belirleyici biçimde etkilemiştir.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, LYEY, FGM, enerji yoğunluğu, simülasyon
Sayfa Adedi : 130
Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan Yılmaz

THERMAL MODELING AND INVESTIGATION OF MATERIAL BEHAVIOR IN THE
FABRICATION OF FUNCTIONALLY GRADED STRUCTURES USING SS316L–
IN718 BY DIRECTED ENERGY DEPOSITION METHOD

(Ph. D. Thesis)

Büşra ASLAN ÇİĞİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2025

ABSTRACT

In this thesis, functionally graded materials (FGMs) were fabricated from the SS316L-IN718 alloy system using the laser based directed energy deposition (LDED) method, and the effects of processing parameters on microstructure, chemical homogeneity, crystallographic orientation, density, and mechanical properties were investigated. The primary objective of the study is to examine the role of processing parameters on the microstructural and mechanical performance of SS316L-IN718 based FGMs through experimental and numerical approaches, and to identify suitable manufacturing conditions based on the findings. The study was conducted in three stages: (i) single track depositions with different compositions, (ii) validation of melt pool geometry through Abaqus based thermal simulations, and (iii) fabrication of multi layer FGM walls under different energy density strategies. The results revealed that SS316L rich samples exhibited columnar and stable grains, while increasing IN718 content promoted dendritic structures and Laves phase precipitations. In particular, the 25% IN718 composition demonstrated macro-crack formation, which is also reported in the literature as a critical compositional range. EBSD analyses showed that the sample containing 50% IN718 provided the most balanced crystallographic orientation and deformation characteristics. Abaqus simulations showed good agreement with the experimental results, with errors below 2% for melt pool width and between 1,3%-5,5% for depth, while compositions with a high fraction of IN718 exhibited errors of up to 7%. FGM 2 exhibited the most stable structure with superior strength, while FGM 3 achieved the most uniform chemical transitions and hardness distribution. In contrast, FGM 1 showed the weakest performance in terms of both microstructural integrity and mechanical properties. In conclusion, the energy density parameter was found to be a decisive factor affecting not only the melt pool geometry but also the mechanical homogeneity of FGMs.

Science Code : 91438

Key Words : Additive manufacturing, LDED, FGM, energy density

Page Number : 130

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve desteğini esirgemeyen, bilimsel bakış açısı kazanmamda büyük emeği olan değerli tez danışmanım Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez İzleme Komitesi üyelerim Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU ve Doç. Dr. Tunç APATAY'a, kıymetli katkıları ve yol göstericilikleri için teşekkür ederim. Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde birlikte çalışma fırsatı bulduğum araştırma görevlisi arkadaşlarıma, akademik ve sosyal anlamda sağladıkları destekten dolayı teşekkür ederim. Akademik yolculuğum boyunca bana koşulsuz destek veren sevgili annem Tülin ASLAN ve babam Nevzat ASLAN'a; her daim yanımda olan kız kardeşlerim Beyza ve Betül ASLAN'a; varlığıyla hayatıma anlam katan kızım Nil ÇİĞİR'a ve en büyük destekçim, sevgili eşim Berkay ÇİĞİR'a sabırları, anlayışları ve sevgileri için gönülden teşekkür ederim.

Kızım Nil'e ithafen...

Umuyorum ki bir gün bu satırları gururla okur ve kendi yolculuğunda ışığını hiç kaybetmezsin.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1002-A Hızlı Destek Programı (Proje No: 223M403), 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (Proje No: FGA-2024-9152) tarafından sağlanan katkılar da bu çalışmanın yürütülmesine önemli destek olmuştur. TÜBİTAK BİDEB'e, TÜBİTAK ARDEP'e ve Gazi Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi'ne verdikleri değerli katkılar için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Eklemeli İmalat	5
2.1.1. Metal eklemeli imalat.....	5
2.1.2. Yönlendirilmiş lazer enerji yığma yöntemi (LYEY)	7
2.2. Fonksiyonel Geçişli Malzemeler	18
2.3. Enerji Yoğunluğu Kavramı	23
2.4. Yönlendirilmiş Lazer Enerji Yığma Yönteminde Termal Davranışın Modellenmesi.....	24
2.4.1. LYEY simülasyon / Termal model.....	26
2.4.2. Isı kaynağı modeli.....	30
2.4.3. Eklemeli imalat için sonlu elemanlar tabanlı modelleme eklentisi.....	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
3.1. Deney Düzenegi	35
3.2. Malzemeler	37
3.3. LYEY Proses Parametreleri	38

	Sayfa
3.4. Enerji Yoğunluğu Girdisinin Hesaplanması	38
3.5. Tek Katman Dikişlerinin Üretimi.....	39
3.6. Duvar Geometri Üretimi	40
3.7. Metalografik Numune Hazırlığı	41
3.8. Malzeme Karakterizasyon Teknikleri	42
3.8.1. Taramalı elektron mikroskobu analizi	42
3.8.2. EDS analizi	42
3.8.3. EBSD analizi.....	43
3.8.4. Porozite ölçüm testi.....	43
3.8.5. Mikro sertlik testleri	44
4. SONLU ELEMENLAR TABANLI SAYISAL MODELLE VE ISIL ANALİZLER	45
4.1. Modelleme Yaklaşımı ve Sonlu Elemanlar Metodu	45
4.1.1. Geometrik modelleme	46
4.1.2. Mesh yapısı ve eleman tipi	47
4.1.3. Malzeme özellikleri	48
4.1.4. Sınır koşullar	49
4.1.5. Analiz tipi ve adımları	50
4.1.6. Model varsayım.....	51
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	53
5.1. Tek Dikiş Numunelerin Deneyisel Sonuçları	53
5.1.1. Mikro yapı ve kimyasal bileşim analizleri	53
5.1.2. Kristal yapı ve yönlenme analizleri	66
5.1.3. Eriyik havuzu bölgelerine ait kristal yapı ve yönlenme analizleri	72

	Sayfa
5.1.4. Enerji yoğunluğu ve katılma davranışları	77
5.1.5. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması	79
5.1.6. Uygun enerji yoğunluğu seçimi	83
5.2. FGM Duvar Yapılarının İncelenmesi	85
5.2.1. Makro yapı gözlemleri ve boyutsal karşılaştırmalar	85
5.2.2. Yoğunluk ve gözeneklilik ölçümleri (Arşimet prensibi)	87
5.2.3. Mikro yapı ve kimyasal bileşim analizleri	91
5.2.4. Kristal yapı ve yönelme analizleri	98
5.2.5. Mikro sertlik dağılımları	111
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	115
KAYNAKLAR	119
ÖZGEÇMİŞ	129

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. SS316L ve IN718 alaşımlarına ait temel kimyasal bileşim oranları (ağırlıkça yüzde, wt.%)	37
Çizelge 3.2. Tek kaynak dikişli üretimde kullanılan parametreler	40
Çizelge 4.1. SS316L'nin termofiziksel özellikleri	49
Çizelge 4.2. Inconel718'in termofiziksel özellikleri	49
Çizelge 5.1. Deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırması	81
Çizelge 5.2. FGM duvar yapılarının arşimet yöntemi ile yoğunluk ve gözeneklilik karşılaştırması	90
Çizelge 5.3. FGM numune 1'e ait beş farklı kompozisyon bölgesinden alınan EDS spektrumları	93
Çizelge 5.4. FGM numune 2'ye ait beş farklı kompozisyon bölgesinden alınan EDS spektrumları	94
Çizelge 5.5. FGM numune 3'e ait beş farklı kompozisyon bölgesinden alınan EDS spektrumları	96

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Seçici lazer ergitme (SLM) yönteminin prensibi: ince toz tabakasının, serilmesi lazerle seçici ergitme ve katmanlı üretim süreci	7
Şekil 2.2. LYEY yönteminin şematik gösterimi: lazer ışınının odaklanması, tozların ergitilmesi ve katmanlı yapının inert atmosferde oluşturulması	8
Şekil 2.3. LYEY sürecinde lazer ışını, toz parçacıkları ve alt tabaka arasındaki temel etkileşimlerin şematik temsili	11
Şekil 2.4. Toz püskürtme sisteminde farklı yüksekliklerde elde edilen toz yoğunluğu dağılımı; alt bölgelerde odaklanma ve yoğunluk artışı, üst bölgelerde dağınık profil	12
Şekil 2.5. Lazer toz biriktirme sürecinde toz parçacıklarının eriyik havuzuyla etkileşim mekanizması	13
Şekil 2.6. Lazerle biriktirme sürecinde toz parçacıklarının farklı bölgelere yönelimi: üstten görünümde A, B, C bölgeleri; yandan görünümde eriyik havuz yüzeyindeki parçacık davranışları	15
Şekil 2.7. LYEY yönteminde eriyik havuzunun oluşumu ve tarama yönünde ilerleyişi ile birlikte, ısı transferi ve akış mekanizmalarının şematik gösterimi	16
Şekil 2.8. Lazer ışını ile toz partikülleri ve altlık arasındaki etkileşimler: parçacıkların eriyik havuzuna katılımı, sıçrama davranışı ve koruyucu gazın etkisi	16
Şekil 2.9. Goldak çift elipsoid ısı kaynağı modeli: ısı akısının ön (cf) ve arka (cr) yarı elipsoidlerde dağılımı; 2a, b ve c parametreleri ile kaynak yönündeki ısı yayılımının tanımlanması	30
Şekil 4.1. Sayısal analizlerde kullanılan 3B model: SS316 taban üzerinde farklı kompozisyonlara sahip katman	46
Şekil 4.2. Sayısal modelde %100 SS316L'den %100 IN718'e geçişli beş farklı kompozisyon bölgesi ve ağ yapısı	48
Şekil 4.3. Eİ modelinde tanımlanan olaylar dizisi boyunca ısı kaynağının başlangıç (0,00 s) ve bitiş (4,54 s) noktaları	51
Şekil 5.1. Mesh bağımsızlık analizi kapsamında 1500 W lazer gücü ve %100 IN718 kompozisyonu için elde edilen eriyik havuzu derinliği değişimi.	82

Şekil	Sayfa
Şekil 5.2. Her bir FGM numunesine ait katman bileşimleri ve katmanlara uygulanan enerji yoğunluğu değerlerini gösteren üretim şemaları	84
Şekil 5.3. FGM numune 1'in farklı bölgelerinden alınan mikrosertlik ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterimi	112
Şekil 5.4. FGM numune 2'nin farklı bölgelerinden alınan mikrosertlik ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterimi	113
Şekil 5.5. FGM numune 3'ün farklı bölgelerinden alınan mikrosertlik ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterimi	114



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Isı akısı dağılımının geometrik gösterimi: (a) tek iz yapısında eriyik havuzum modeli, (b) çok izli yığmada çift yönlü yayılım	31
Resim 3.1. FormAlloy X-Series LYEY sistemine ait üretim hücresi: kapalı hazne, yapısı üst kısımda lazer ve toz nozulları ve yüksek hassasiyetli 5 eksenli tabla	36
Resim 3.2. Çift hazneli toz besleme sistemi: (a) ikili toz haznesinin laboratuvar ortamındaki yerleşimi, (b) nozul ucunda birleşen toz akışının görsel gösterimi	36
Resim 3.3. SS316L-IN718 alaşımlarından farklı kompozisyon oranlarıyla üretilmiş tek ;dikişli numunelerin üstten görünümü	40
Resim 3.4. Üç farklı FGM duvar numunesine ait üretim sonrası makro görünüm: (a-c) ön ve yan yüzey görselleri ile taban genişliği ve yapı yüksekliği ölçümlerini gösteren detaylı fotoğraflar	41
Resim 5.1. %100 SS316L kompozisyonuna ait tek dikiş numunelerin farklı enerji yoğunluklarında (a) 54,54 J/mm ² , (b) 65,45 J/mm ² ve (c) 76,36 J/mm ² ile üretilmiş SEM görüntüleri	54
Resim 5.2. %100 SS316L kompozisyonuna ait tek dikiş numunenin (a) üst, (b) orta ve (c) alt bölgelerinden elde edilen EDS harita görüntüleri	55
Resim 5.3. %75 SS316L - %25 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunelerin farklı enerji yoğunluklarında (a) 54,54 J/mm ² , (b) 65,45 J/mm ² ve (c) 76,36 J/mm ² ile üretilmiş SEM görüntüleri	56
Resim 5.4. %75 SS316L - %25 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunenin (a) üst, (b) orta ve (c) alt bölgelerinden elde edilen EDS harita görüntüleri	57
Resim 5.5. %50 SS316L - %50 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunelerin farklı enerji yoğunluklarında (a) 54,54 J/mm ² , (b) 65,45 J/mm ² ve (c) 76,36 J/mm ² ile üretilmiş SEM görüntüleri	59
Resim 5.6. %50 SS316L - %50 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunenin (a) üst, (b) orta ve (c) alt bölgelerinden elde edilen EDS harita görüntüleri ...	60
Resim 5.7. %25 SS316L - %75 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunelerin farklı enerji yoğunluklarında (a) 54,54 J/mm ² , (b) 65,45 J/mm ² ve (c) 76,36 J/mm ² ile üretilmiş SEM görüntüleri	61
Resim 5.8. %25 SS316L - %75 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunenin (a) üst, (b) orta ve (c) alt bölgelerinden elde edilen EDS harita görüntüleri	63

Resim	Sayfa
Resim 5.9. %100 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunelerin farklı enerji yoğunluklarında (a) 54,54 J/mm ² , (b) 65,45 J/mm ² ve (c) 76,36 J/mm ² ile üretilmiş SEM görüntüleri	64
Resim 5.10. %100 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunenin (a) üst, (b) orta ve (c) alt bölgelerinden elde edilen EDS harita görüntüleri	65
Resim 5.11. Farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarına ait numunelerin IPF haritaları (soldan sağa: %100 SS316L, %75-25, %50-50, %25-75, %100 IN718)	67
Resim 5.12. Farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarına ait numunelerin IQ haritaları (soldan sağa: %100 SS316L, %75-25, %50-50, %25-75, %100 IN718)	68
Resim 5.13. Farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarına ait numunelerin KAM haritaları (soldan sağa: %100 SS316L, %75-25, %50-50, %25-75, %100 IN718)	69
Resim 5.14. Farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarına ait numunelerin faz haritaları (soldan sağa: %100 SS316L, %75-25, %50-50, %25-75, %100 IN718)	70
Resim 5.15. Farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarına ait numunelerin tane sınırı haritaları (soldan sağa: %100 SS316L, %75-25, %50-50, %25-75, %100 IN718)	71
Resim 5.16. %75 SS316L - %25 IN718 kompozisyonuna ait eriyik havuz merkezli (a) IPF haritası, (b) IQ haritası, (c) faz haritası, (d) KAM haritası, (e) tane sınırı haritası	73
Resim 5.17. %50 SS316L - %50 IN718 kompozisyonuna ait eriyik havuz merkezli (a) IPF haritası, (b) IQ haritası, (c) faz haritası, (d) KAM haritası, (e) tane sınırı haritası	75
Resim 5.18. %25 SS316L - %75 IN718 kompozisyonuna ait eriyik havuz merkezli (a) IPF haritası, (b) IQ haritası, (c) faz haritası, (d) KAM haritası, (e) tane sınırı haritası	77
Resim 5.19. Tek dikişlerde eriyik havuz boyutları: (a) optik mikroskop görüntüsü, (b) sonlu elemanlar analizinden elde edilen sıcaklık dağılımı	80
Resim 5.20. Farklı kompozisyon ve lazer gücü kombinasyonlarında deneysel (sol) ve sayısal (sağ) eriyik havuz profillerinin karşılaştırılması	83
Resim 5.21. Her bir FGM numunesine ait üretim sonrası elde edilen makro görünüm	84

Resim	Sayfa
Resim 5.22. Üç farklı FGM numunesine ait üretim sonrası makro görünüm ve boyutsal karşılaştırmaları	86
Resim 5.23. Optik mikroskop kesit görüntüleri: (a) FGM 1;düşük enerji yoğunluğu, (b)FGM 2; yüksek/sabit enerji yoğunluğu, (c) FGM 3;orta/gradyan enerji yoğunluğu	87
Resim 5.24. Hava ve sıvı içi kütle ölçüm görselleri: (a) FGM 1, (b) FGM 2, (c) FGM 3	89
Resim 5.25. FGM numune 1'nin çapraz kesitine ait SEM görüntüsü.....	92
Resim 5.26. FGM numune 2'nin çapraz kesitine ait SEM görüntüsü.....	95
Resim 5.27. FGM numune 3'ün çapraz kesitine ait SEM görüntüsü	97
Resim 5.28. FGM numune 1'in %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait IPF haritaları	99
Resim 5.29. FGM numune 1'in %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait KAM haritaları	100
Resim 5.30. FGM numune 1'in %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait faz haritaları	101
Resim 5.31. FGM numune 1'in %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait tane sınırı haritaları	102
Resim 5.32. FGM numune 2'nin %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait IPF haritaları	103
Resim 5.33. FGM numune 2'nin %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait KAM haritaları	104
Resim 5.34. FGM numune 2'nin %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait faz haritaları	105
Resim 5.35. FGM numune 2'nin %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait tane sınırı haritaları	106
Resim 5.36. FGM numune 3'e %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait IPF haritaları	107
Resim 5.37. FGM numune 3'e %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait KAM haritaları	108
Resim 5.38. FGM numune 3'e %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait faz haritaları	109

Resim**Sayfa**

Resim 5.39. FGM numune 3'e %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait tane sınırı haritaları	110
--	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

C_p	Özgül ısı kapasitesi
d	Lazer ışını çapı
E	Elastik modül
h	Konveksiyon katsayısı
k	Isıl iletkenlik katsayısı
M_h	Numunenin havadaki ağırlığı
M_s	Numunenin sıvıdaki ağırlığı
P	Lazer gücü
q	Isı akısı vektörü
Q	Isı kaynağı
$\dot{Q}$	Hacimsel ısı kaynağı
r	Yarıçap
r_x, r_y, r_z	Goldak modelindeki ısı yayılım yarıçapları
t	Zaman
T	Sıcaklık
v	Tarama hızı
V	Volt
μm	Mikrometre
ρ	Malzeme yoğunluğu
η	Enerji verimliliği katsayısı
ε	Yüzey yayıcılığı katsayısı

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASTM	Amerikan test ve malzeme derneği
AT	Atomik yüzde

Kısaltmalar**Açıklamalar****CH₃COOH**

Asetik asit

C3D8T

Hexahedral termo mekanik eleman

DC3D8

Hexahedral termal eleman

EBS

Elektron geri saçılma kırınımı

ED

Enerji yoğunluğu

EDS

Enerji dağılımlı x ışını spektroskopisi

Eİ

Eklemeli imalat

FGM

Fonksiyonel geçişli malzeme

GED

Global enerji yoğunluğu

HAZ

Isıl etkilenmiş bölge

HAGB

Yüksek açılı tane sınırları

HCl

Hidroklorik asit

HNO₃

Nitrik asit

HV

Vickers Sertliği

IN718

Inconel 718 nikel bazlı süperalaşımı

IPF

Ters kutupluluk haritası

IQ

Görüntü kalitesi haritası

KAM

Çekirdek ortalama sapma haritası

LAGB

Düşük açılı tane sınırları

LYEY

Yönlendirilmiş lazer enerji yığma

OP-S

Silika bazlı son parlatma süspansiyonu

PBF

Toz yataklı füzyon

SEM

Taramalı elektron mikroskobu

SiC

Silikon karbür

SLM

Seçici lazer ergitme

SS316L

AISI 316L paslanmaz çelik

WAAM

Tel ve ark tabanlı eklemeli imalat

XRD

X ışınımı kırınımı

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (AM), dijital veriye dayalı olarak katmanlı üretim prensibiyle çalışan ileri bir üretim teknolojisidir. Özellikle metal eklemeli imalat yöntemleri, kompleks geometrili ve yüksek performanslı yapıların üretimini mümkün kılmasıyla havacılık, uzay, enerji ve biyomedikal alanlarda hızla yaygınlaşmaktadır. Toz yataklı füzyon (PBF) ve yönlendirilmiş lazer enerji yığma (LYEY) gibi teknikler, metal malzemelerin katmanlı biçimde işlenmesine olanak tanırken; son yıllarda çok malzemeli üretim, fonksiyonel geçişli yapılar (FGM) ve yerinde sensör destekli kalite kontrol gibi yenilikçi uygulamalar bu teknolojilerin mühendislikteki önemini daha da artırmıştır.

FGM, farklı malzeme özelliklerinin bir yapı içerisinde sürekli veya kademeli olarak birleştirilmesiyle, malzeme performansının kullanım alanına göre yerel olarak optimize edilmesine olanak tanır. Bu tür geçişli yapılar, ani malzeme geçişlerinden kaynaklanan termomekanik gerilme yığılmalarını azaltarak özellikle havacılık, savunma ve enerji sektörleri gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. FGM'ler sayesinde hem dayanım hem de ağırlık gibi kritik mühendislik parametreleri istenen bölgelerde kontrol edilebilir [1-4].

Fonksiyonel geçişli malzemeler için en uygun üretim yöntemlerinden biri olan yönlendirilmiş lazer enerji yığma, metalik tozların lazer ışını ile ergitilerek katmanlı biçimde birleştirilmesini esas alır. Bu yöntem, çoklu toz haznesi kullanımıyla farklı alaşımların üretim sürecinde geçişli olarak birleştirilmesini mümkün kılar. Yüksek geometrik esneklik ve kompozisyon kontrolü sunan LYEY yöntemi, çok malzemeli üretim için ileri düzeyde uygulanabilirlik sağlamaktadır [5-7].

Bu tez çalışmasında, paslanmaz çelik SS316L ile nikel bazlı süperalaşım IN718 arasında geçişli yapılar LYEY yöntemiyle üretilmiştir. SS316L, yüksek korozyon direnci ve işlenebilirliğiyle bilinirken; IN718 alaşımı yüksek sıcaklıklarda mekanik dayanımı ve oksidasyon direnciyle öne çıkmaktadır [8-12]. Ancak bu iki malzemenin farklı erime sıcaklıkları ve ısı iletkenlikleri, geçiş bölgelerinde metalurjik uyumsuzluk riskini arttırmaktadır. Bu nedenle geçiş kompozisyonlarına uygun enerji yoğunluğu değerlerinin belirlenmesi, mikroyapısal bütünlük ve mekanik performans açısından kritik öneme sahiptir.

Bu tez çalışmasının temel amacı, SS316L-IN718 alaşım çiftine sahip geçişli yapıların LYEY yöntemiyle üretimi sırasında uygulanan enerji yoğunluğunun; eriyik havuzu geometrisi, mikroyapı sürekliliği ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal yaklaşımlarla bütüncül biçimde değerlendirmektir.

Bu doğrultuda çalışmanın hedefleri şu şekilde belirlenmiştir:

- Her bir kompozisyon oranı için (SS316L-IN718) tek dikişli numuneler üretmek ve bu numunelerin eriyik havuz geometrisini deneysel olarak karakterize etmek,
- Aynı üretim parametreleri altında Abaqus ortamında geçici ısı analizler yaparak sayısal olarak eriyik havuz geometrisini tahmin etmek,
- Deneysel ve sayısal eriyik havuz geometrilerini karşılaştırarak model doğruluğunu değerlendirmek,
- Her kompozisyon oranı için optimum enerji yoğunluğu aralıklarını belirlemek,
- Farklı üretim stratejilerini temsil eden üç adet çok katmanlı FGM duvar yapısını, belirlenen enerji yoğunlukları doğrultusunda üretmek,
- Üretilen FGM yapıların mikroyapı sürekliliği, kristal yönlenmesi, gözeneklilik oranı, mikrosertlik dağılımı ve kimyasal geçiş profilleri açısından detaylı karakterizasyonunu gerçekleştirmek,
- Kompozisyona özgü enerji yoğunluğu optimizasyonunun mikroyapısal kalite ve mekanik performansa etkisini ortaya koymak.

Bu tez çalışması, altı ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, araştırmanın amacı, kapsamı, motivasyonu ve genel yaklaşımı sunulmuştur. İkinci bölümde, eklemeli imalat teknolojileri, metal bazlı üretim yöntemleri özellikle LYEY yöntemi detaylandırılmış; FGM ve bu malzemelerin üretiminde enerji yoğunluğu ile termal modelleme konularına ilişkin literatür incelenmiştir. Üçüncü bölümde, deneysel çalışmaların detayları verilmiş; kullanılan malzemeler, üretim parametreleri ve karakterizasyon yöntemleri açıklanmıştır. Dördüncü bölüm, Abaqus yazılımı kullanılarak geliştirilen sonlu eleman modelleme sürecine ayrılmış; geçici termal analizlerin kurulumu, malzeme tanımları, sınır koşulları ve ısı kaynağı modellemeleri sunulmuştur. Beşinci bölümde, deneysel ve sayısal bulgular bütüncül şekilde ele alınarak, tek dikişli ve çok katmanlı üretimlerin mikroyapısal, mekanik ve termal

performansları tartişılmıştır. Son olarak, altıncı bölümde, elde edilen bulgular özetlenmiş ve gelecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.





2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat, adından da anlaşılacağı üzere, bir parçanın malzeme eklenerek katman katman oluşturulması esasına dayanan bir üretim yöntemidir. Bu yönüyle, geleneksel üretim yöntemlerinden ayrılır. Çünkü klasik yöntemlerde genellikle malzeme çıkarılır (frezeleme, tornalama gibi) ya da birleştirilir (kaynak, döküm vb.), ancak eklemeli imalatta tam tersi şekilde malzeme üst üste eklenerek nesne oluşturulur [13, 14]. Eklemeli imalatı daha iyi anlayabilmek için, geleneksel yöntemlerle temel farklarını göz önünde bulundurmak gerekir. Örneğin talaşlı imalat (frezeleme, delme vb.) malzeme çıkarılarak şekil verilir. Şekillendirme yöntemlerinde ise (dövme vb.) malzemeye kuvvet uygulanarak şekil değiştirmesi sağlanır. Ancak bu yöntemlerde hem malzeme israfı olabilir hem de üretim esnekliği sınırlıdır. Eklemeli imalatın en büyük avantajı, esnekliğidir. Parça tasarımı değiştiğinde üretim sistemi değişmeden, yalnızca dijital model üzerinde yapılan değişikliklerle yeni parça üretilebilir. Oysa döküm gibi yöntemlerde, her yeni tasarım için yeni bir kalıp gereklidir. Bu da zaman ve maliyet açısından büyük fark yaratır. Örneğin, LYEY yöntemiyle üretim yapan bir sistemde, malzeme belirli bir yol boyunca bir nozuldan biriktirilir. Tasarım değiştiğinde, aynı makine ve sistemle sadece bu yol değiştirilerek tamamen farklı bir parça üretilebilir. Bu esneklik, eklemeli imalatı klasik yöntemlerden ayıran en temel özelliklerden biridir [15, 16]. Eklemeli imalat süreci genel olarak beş temel adımdan oluşur: Tasarım; üretilecek parça, CAD yazılımı ile 3 boyutlu olarak modellenir. Dosya hazırlığı; bu model, .STL formatına dönüştürülerek üretime uygun hâle getirilir. Dilimleme; model, belirlenen katman kalınlıklarına göre kesitlere ayrılır. Takım yolu ve G-kodu; katmanların izleneceği yollar ve parametreler (hız, sıcaklık, enerji yoğunluğu vs.) belirlenir ve makineye uygun G-kodu oluşturulur. Üretim ve son işlem; üretim makinesi bu G-kodu bilgilerine göre parçayı katman katman üretir. Gerekli durumlarda son işlem (örneğin ısıtma işlemi, yüzey düzeltme) uygulanabilir [17].

2.1.1. Metal eklemeli imalat

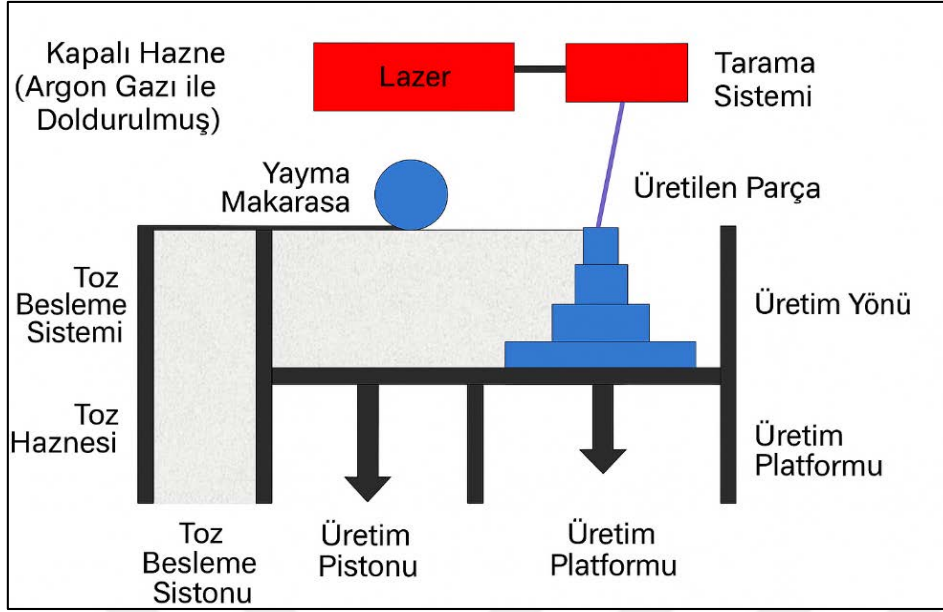
Günümüzde sanayide en çok kullanılan metal eklemeli imalat yöntemleri arasında Toz yatağı füzyonu ve yönlendirilmiş lazer enerji yığıma öne çıkmaktadır. Özellikle toz yatağı sistemleri, metal parçaların üretiminde en yaygın şekilde tercih edilen yöntemlerden biridir.

Metal eklemeli imalatatta kullanılan toz yatağına dayalı sistemler, enerji kaynağına göre iki gruba ayrılır:

- Lazer kullanılan sistemler
- Elektron ışını kullanılan sistemler [18-20].

Bu sistemlerde, önce bir merdane ya da bıçak yardımıyla üretim alanına ince bir metal tozu serilerek toz yatağı oluşturulur. Ardından enerji kaynağı, yatağın üst yüzeyine etki ederek bu tozu seçici olarak eritir veya sinterler. Her katman tamamlandıktan sonra yapı platformu bir katman kadar aşağı iner ve yeni toz serilir. Bu döngü, üç boyutlu parça tamamlanana kadar tekrar eder. Toz yatağı sistemleri genellikle, metal tozlarının yüksek sıcaklıkta oksitlenmesini önlemek amacıyla inert gaz atmosferi ile korunmuş bir hazne içerisinde çalışır [20].

Toz yataklı füzyon (PBF) yöntemi, yüksek çözünürlüklü detaylar oluşturabilmesi, boyutsal hassasiyet sağlaması, farklı malzemelerle çalışabilmesi ve net şekle oldukça yakın parçalar üretebilmesiyle öne çıkar [19]. Ancak bu yöntemin bazı sınırlamaları da vardır. Örneğin üretim hacmi genellikle küçük ve orta boy parçalarla sınırlıdır. Ayrıca PBF yönteminin alt teknolojilerinden biri olan SLM yöntemiyle üretilen parçalarda görülebilecek gözenekliliği azaltmak amacıyla çoğunlukla izostatik sıcak presleme gibi ek ısı işlemlere ihtiyaç duyulur [21]. SLM yönteminin genel işleyişi Şekil 2.1’de şematik olarak sunulmuştur.



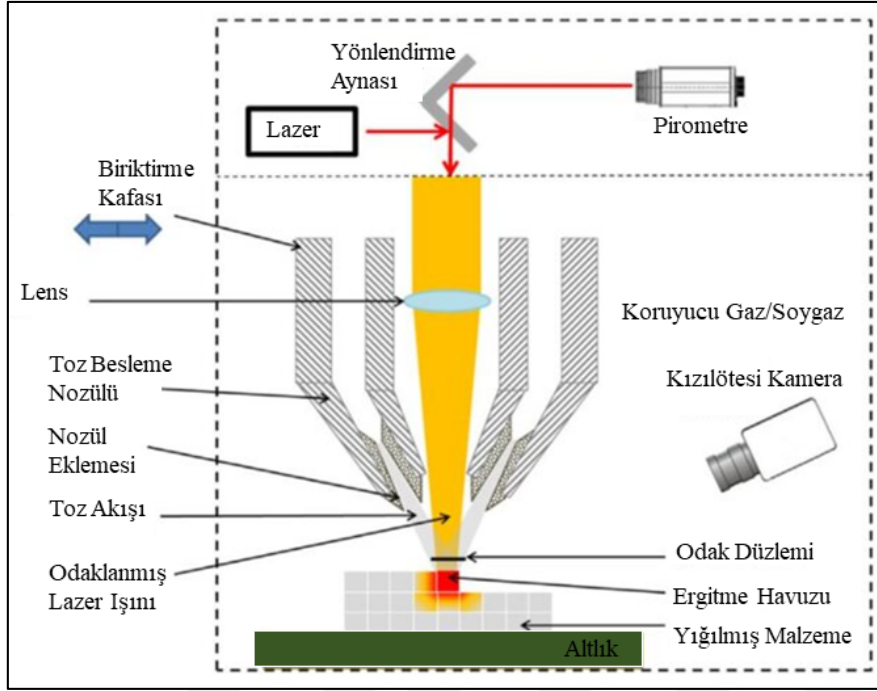
Şekil 2.1. Seçici lazer ergitme (SLM) yönteminin prensibi: ince toz tabakasının serilmesi, lazerle seçici ergitme ve katmanlı üretim süreci [22]

Bunun yanı sıra, metal parça üretiminde yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntem de LYEY'dir. Bu yöntemin tezde önemli bir yeri olması nedeniyle, sonraki bölümlerde özellikle toz bazlı LYEY sistemlerine daha ayrıntılı olarak yer verilecektir.

Genel olarak metal eklemeli imalat yöntemleri özellikle bu çalışmada da odakta olan LYEY bugün fonksiyonel parça üretiminde en çok tercih edilen teknolojilerden biri hâline gelmiştir. Malzeme kaldırma esasına dayanan geleneksel üretim yöntemlerinin yerine geçmeye başlayan eklemeli imalat sistemleri, son yıllarda önemli bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır.

2.1.2. Yönlendirilmiş lazer enerji yığma yöntemi (LYEY)

Yönlendirilmiş lazer enerji yığma, lazer teknolojisi, robotik sistemler, proses kontrolü, toz metalurjisi ve bilgisayar destekli tasarım üretim (CAD/CAM) gibi birçok alanın birleştiği yenilikçi bir üretim yöntemidir. Temel olarak, bir enerji kaynağı (lazer veya elektron ışını) ve bir hammadde akışı (toz ya da tel), genellikle koruyucu bir gaz ortamında bir noktada buluşur. Bu noktada oluşan yüksek sıcaklık, gelen malzemeyi eriterek bir eriyik havuzu oluşturur ve bu havuza katman katman yeni malzeme eklenerek üç boyutlu parçalar üretilir [23-25]. LYEY sisteminin genel şeması Şekil 2.2'de sunulmuştur.



Şekil 2.2. LYEY yönteminin şematik gösterimi: lazer ışınının odaklanması, tozların eritilmesi ve katmanlı yapının inert atmosferde oluşturulması [26]

LYEY sistemleri, kullanılan malzeme şekline ve enerji türüne göre farklı gruplara ayrılır:

Malzeme türüne göre:

- Toz beslemeli sistemler
- Tel beslemeli sistemler

Enerji türüne göre:

- Lazer temelli sistemler
- Elektron ışını temelli sistemler
- Plazma ya da elektrik arkı temelli sistemler

Bu yöntemler içinde özellikle lazer toz beslemeli yönlendirilmiş lazer enerji yığma, metal parça üretiminde en sık tercih edilen tekniktir. Bu süreçte, lazer ışınıyla aynı doğrultuda yerleştirilmiş bir nozuldan gelen metal tozları, lazerin oluşturduğu eriyik havuzuna yönlendirilir ve bu malzeme, altlık yüzeye katman katman biriktirilerek parça oluşturulur.

Gaz taşıyıcı olarak genellikle argon kullanılır; bu gaz, tozları lazerin odak noktasına taşıırken aynı zamanda oksidasyonu da önler [14-16].

Bu üretim süreci aslında birçok farklı fiziksel olayın çok kısa sürelerde gerçekleştiği bir zincirdir. Lazerin aktarılması, tozun hareketi, gaz akışı, eriyik havuzunun oluşması, soğuma ve katılma gibi olaylar sürekli birbirini takip eder. Bu nedenle, süreç boyunca lazer gücü, tarama hızı, toz akışı, katman kalınlığı gibi tüm parametrelerin dikkatle ayarlanması gerekir. Aksi halde, yüzeyde gözenekler, birleşme eksiklikleri veya istenmeyen yapısal hatalar oluşabilir [27, 28].

LYEY'in en güçlü yanlarından biri, esnek ve ölçeklenebilir olmasıdır. Diğer yöntemlerde üretim hacmi belirli bir hazneye sınırlıyken, LYEY sistemleriyle çok daha büyük parçalar üretmek mümkündür. Bu özelliği sayesinde özellikle kalıp onarımı, büyük bileşenlerin üretimi ve prototipleme gibi uygulamalarda yaygın olarak tercih edilir [29-33].

Ayrıca LYEY yöntemi, birden fazla toz besleme noktasına sahip sistemlerde farklı tozların aynı anda veya sırayla kullanılabilmesine olanak tanır. Bu da, parçanın farklı bölgelerine farklı malzeme özellikleri kazandırarak "fonksiyonel geçişli" yapılar üretmeyi mümkün kılar. Böylece, örneğin aşınma direnci yüksek ama iç kısmı daha hafif bir yapı tasarlanabilir [34-36].

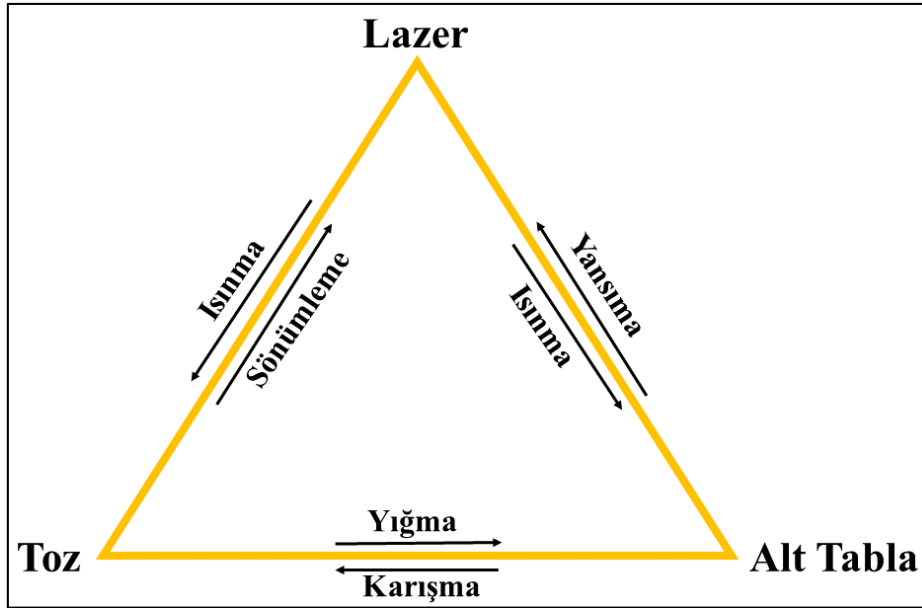
Tüm bu yönleriyle LYEY, geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan çelikler, nikel alaşımları ya da molibden gibi malzemelerde bile etkili bir şekilde kullanılabilir. Günümüzde gerek akademide gerekse sanayide, malzeme kaybını azaltan, özelleştirilebilir üretim sağlayan ve tasarıma sınırsız özgürlük tanıyan bir teknoloji olarak LYEY'in önemi giderek artmaktadır.

Termal olaylar

Yönlendirilmiş lazer enerji yığıma süreçlerinde meydana gelen termal olayların anlaşılması; bu süreçlerde oluşan sıcaklık gradyanlarının, lokal katılma davranışlarının ve artık gerilmelerin öngörülebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu tür bilgiler, sürecin etkin şekilde optimize edilmesine ve tutarlı, yüksek kaliteli parçaların elde edilmesine olanak tanır. LYEY, lazer tabanlı bir eklemeli imalat yöntemi olabilir ve bu durumda sürecin temel

itici gücü ısı transferidir. Katmanlar ve dikişler arasında güçlü bir bağ oluşabilmesi için, termal enerjinin etkin şekilde aktarılması ve eriyik havuzunun akışkan davranışının iyi anlaşılması gerekir. LYEY süreci, birbirine bağlı birçok fiziksel olayın eşzamanlı olarak gerçekleştiği karmaşık bir yapıya sahiptir. Uygun işlem parametreleriyle bir arada değerlendirildiğinde, bu olaylar tam yoğunlukta ve mekanik açıdan sağlam parçaların üretilmesine imkân sağlar. Öne çıkan bu fiziksel olaylar arasında; lazer ışınının iletimi, toz beslemesi, lazer/toz/taşıyıcı gaz etkileşimleri, eriyik havuzunun oluşumu, havuzun enerji dengesi, kararlılığı ve morfolojisi, ortamla olan ısı kayıpları (radyasyon ve konveksiyon), eriyik havuzunun katılaşması, yapı içi ısı iletimi, termal çevrimler ve parçadan altlığa olan ısı iletimi yer almaktadır [16].

LYEY sürecindeki karmaşıklık, lazer, toz ve alt tabaka arasındaki çoklu etkileşimlerle daha da artmaktadır. Bu etkileşimler Şekil 2.3’de şematik olarak sunulmaktadır. Uçuş halindeki toz parçacıkları, lazer ışını tarafından ısıtılır; bu sırada lazer enerjisini absorplayan parçacıklar, katıdan sıvıya veya gaza faz dönüşümüne uğrayabilir. Aynı anda, toz bulutu lazer ışını üzerinde bir zayıflatma veya gölgeleme etkisi oluşturur ve lazer enerjisinin yalnızca bir kısmı alt tabakaya ulaşır. Bu zayıflamış lazer ışını alt tabakaya çarptığında, kısmen yansıtılır ve yalnızca sınırlı bir kısmı emilerek eriyik havuzunun oluşumuna katkı sağlar. Erimiş ve henüz erimemiş toz parçacıkları, eriyik havuzuna birikir ve altlığa kütle kazandırır. Katılaşmadan önce, bu parçacıklar eriyik havuzu içerisinde karışır. Bu karışım, eriyik havuzunda oluşan konvektif akışlar tarafından yönlendirilerek homojen bir yapı elde edilmesine katkı sağlar [37].



Şekil 2.3. LYEEY sürecinde lazer ışını, toz parçacıkları ve alt tabaka arasındaki temel etkileşimlerin şematik temsili [37]

Lazer toz alt tabaka etkileşimi

Eklemeli imalat, nesnelerin katman katman malzeme eklenerek oluşturulduğu yenilikçi bir üretim teknolojisidir. Bu kapsamda LYEEY yöntemi, lazer kullanılarak oluşturulan bir eriyik havuzuna malzeme beslenmesine dayanan bir prosestir. Genellikle metal tozları, taşıyıcı bir gaz yardımıyla yanal ya da koaksiyel olarak konumlandırılmış bir nozul aracılığıyla lazer ışınının odaklandığı bölgeye, yani eriyik havuzuna iletilir. Bu süreç sonucunda, alt tabaka ile ilave edilen malzeme arasında düşük seyreltmeye sahip güçlü bir metalurjik bağ elde edilir.

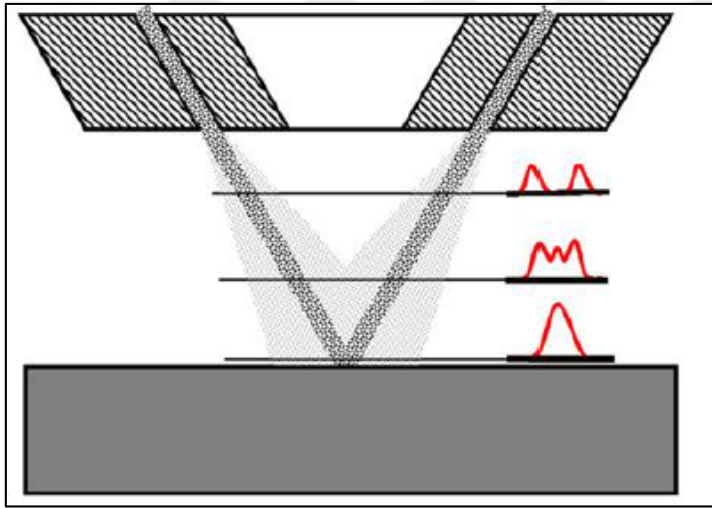
Eriyik havuzunun derinliği ve oluşan seyreltme, lazer gücü ve tarama hızı ile doğrusal olmayan bir ilişki içerisinde. Lazer ışını, süreç boyunca çeşitli yüzeylerden emilen, yansıtılan ve saçılan enerji bileşenlerine bölünür. Yapılan teorik tahminlere göre, orijinal lazer gücünün yalnızca yaklaşık %10'u efektif olarak ergitme işleminde kullanılmaktadır.

Toz akışı

LYEEY süreci, mikroskobik ölçekte bir toz parçacığının davranışı incelenerek analiz edilebilir. Toz parçacığı nozüle girdikten sonra şu fiziksel olaylara maruz kalır:

- Parçacık-katı etkileşimleri (nozulun iç duvarı ve diğer parçacıklarla çarpışma),
- Parçacık-gaz etkileşimleri (gaz akışıyla taşınma),
- Parçacık-lazer etkileşimi (lazerle ısınma),
- Parçacık-sıvı etkileşimi (eriyik havuzuna giriş),
- Parçacık faz değişimleri (eriyik içinde erime ve katılaşma).

Literatürde, toz dağılımının genellikle Gauss profiline sahip olduğu varsayılmaktadır. Şekil 2.4’de hem deneysel hem de sayısal modellemelere dayalı olarak bu profile ilişkin örnekler sunulmaktadır. Ancak, Tabernero ve arkadaşlarının çalışmasında belirtildiği üzere, bu Gauss dağılımı yalnızca toz akışının belirli bir yükseklik aralığında ve alt tabaka düzlemi yakınında geçerli olduğu durumlarda gözlenebilmektedir [38].



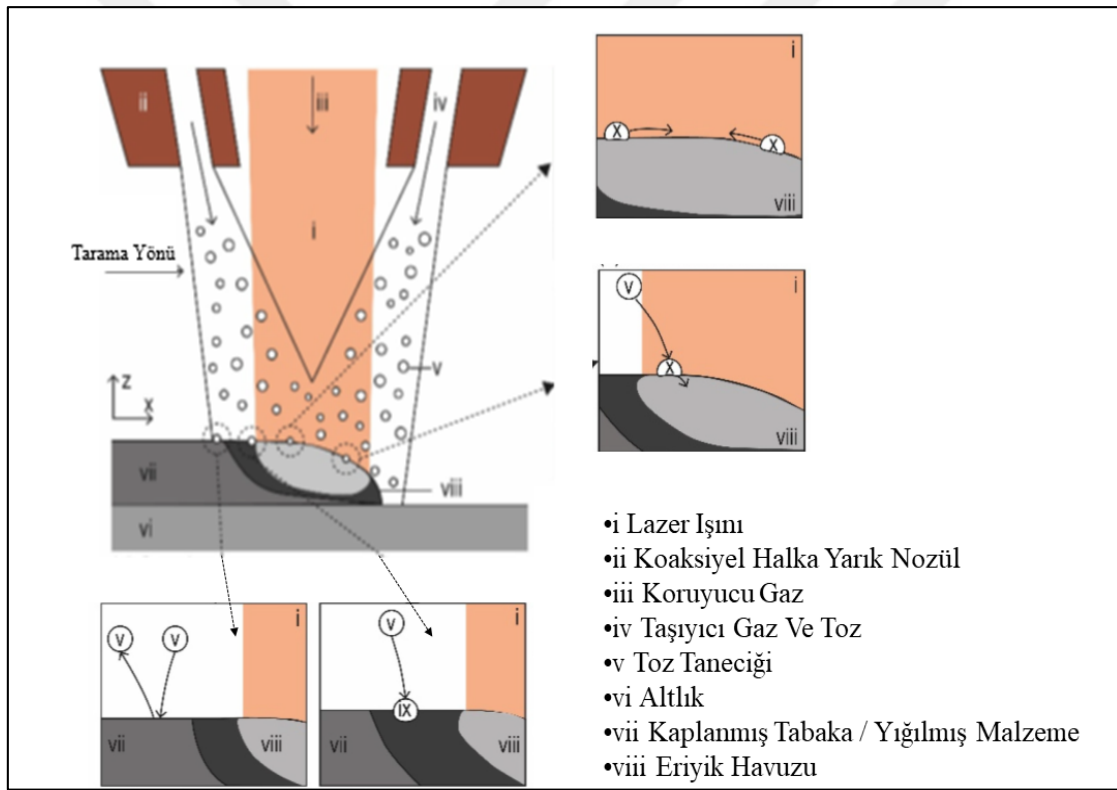
Şekil 2.4. Toz püskürtme sisteminde farklı yüksekliklerde elde edilen toz yoğunluğu dağılımı; alt bölgelerde odaklanma ve yoğunluk artışı, üst bölgelerde dağınık profil [37]

İlk aşamada, nozul ucuna yakın bölgede toz akışının dairesel bir dağılım sergilediği gözlemlenir. İkinci aşamada ise, toz akışı merkezde birleşerek en yüksek konsantrasyonuna ulaşır ve bu noktada dağılım karakteristiği Gauss tipi bir profil sergiler. Üçüncü aşamada, birleşme noktasından sonra toz akışı ıraksar biçimde yayılırken Gauss dağılımını korumaya devam eder. Süreç boyunca, uçuş halindeki toz parçacıkları nozul ucuna yakın konumda lazer ışınıyla etkileşime girer ve bu sırada parçacıklarda sıcaklık artışı meydana gelir [27]. Bu sıcaklık artışı; parçacıkların lazer enerjisini absorplaması, yansıtması ve saçması ile ilişkilidir. Bu etkileşimler sonucunda lazer gücünde azalma oluşur. Lin’in çalışmasında da belirtildiği üzere, koaksiyel LYEY sistemlerinde bu lazer zayıflaması %50’ye kadar

ulaşabilmektedir. Lazer gücündeki bu azalma, kullanılan tozun malzeme türüne, parçacık konsantrasyonuna, toz besleme hızına, tarama hızına ve lazer gücüne doğrudan bağlıdır [39].

Toz tabla etkileşimi

Şekil 2.5’de kesit olarak gösterilen LYEY işleminde, lazer noktasının merkezine yönlendirilen toz parçacıklarının tamamı eriyik havuzuna ulaşmamaktadır. Yüksek hızlı kamera görüntülerinde, parçacıkların yalnızca eriyik havuzunun uzunluğu boyunca değil, aynı zamanda havuz dışından da alt tabakaya veya daha önce katılmış kaplamaya doğru hareket ederek bu bölgeleri beslediği tespit edilmiştir [40].



Şekil 2.5. Lazer toz biriktirme sürecinde toz parçacıklarının eriyik havuzuyla etkileşim mekanizması [40]

Lazer tarafından sağlanan enerji, alt tabaka yüzeyinde bir eriyik havuzu oluşmasına neden olur. Aynı anda, metal tozları bu eriyik havuzuna yönlendirilerek beslenir. Eriyik havuzuna giren toz parçacıkları, yüksek sıcaklık etkisiyle çok kısa sürede erir ve böylece katman oluşturularak iz bırakılır. Bu süreçte eriyik havuzunun oluşumu ve davranışı, başlıca üç temel işlem parametresine bağlıdır: lazer gücü, toz kütle akış hızı ve lazer tarama hızı.

Ancak, yalnızca bu üç parametre kullanılarak sürecin fiziksel mekanizmalarının doğru şekilde açıklanması mümkün değildir. Literatürde, parçaların nihai özelliklerini etkileyebilecek ondan fazla işlem parametresi tanımlanmıştır. Bu parametreler arasında lazer gücü, lazerin özellikleri (dalga boyu, mod), lazer nokta çapı, taşıyıcı gazın akış karakteristikleri (sıcaklık, basınç, hız), toz malzemenin fiziksel özellikleri (boyut, dağılım, şekil ve termal özellikler), nozul geometrisi ve işlem parametreleri (tarama mesafesi, tarama hızı, tarama stratejisi) yer almaktadır [36].

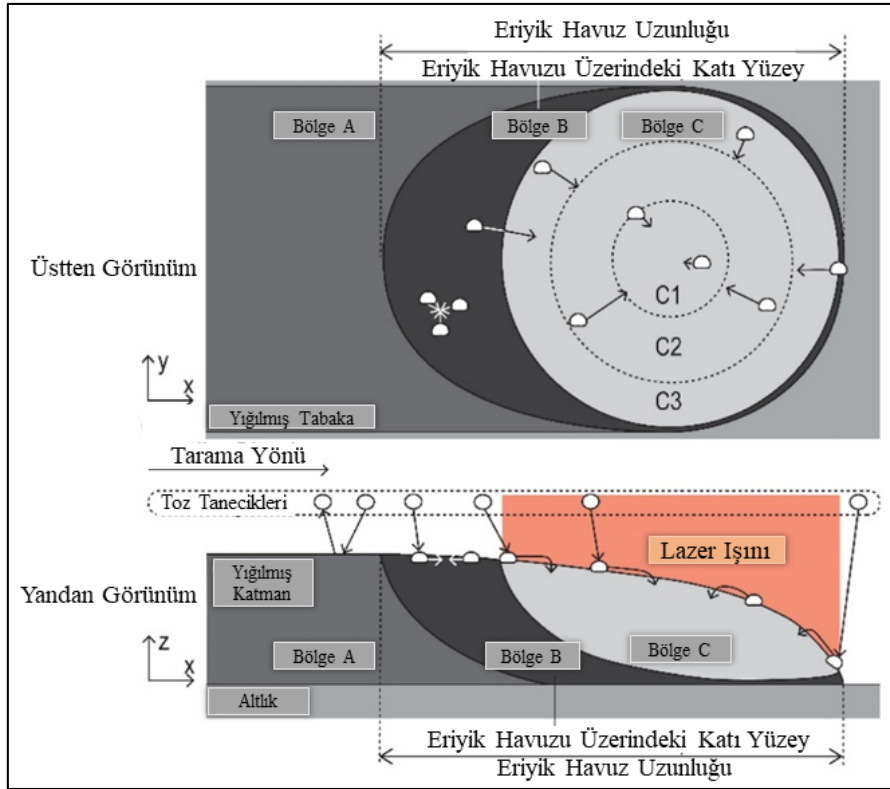
LYEY sürecinde toz davranışı, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi üç bölge altında incelenebilir:

Bölge A: Proses alanının çevresinde, alt tabaka ve kaplama dâhil olmak üzere katılmış bölgelerdir. Bu bölgeye ulaşan toz taneleri yüzeyden seker ve genellikle sisteme dâhil olmaz. Bölge B: Eriyik havuzunun dış çevresinde, genellikle oksitlenmiş bir yüzey veya katı bir tabaka ile kaplı olan bölgedir. Bu alana gelen toz taneleri yüzeye tutunarak kümelenmeler (agregalar) oluşturabilir. Eğer bu taneler katılmasından önce yüzey gerilimini aşar ya da C bölgesine doğru taşınırsa, üretim sürecine gecikmeli olarak katılabilirler.

Bölge C: Lazer ışınının doğrudan temas ettiği eriyik havuzunun merkez bölgesidir. Tüm yönlerden gelen toz taneleri bu alana kolayca katılabilir. Bu taneler, erimeden önce kısa bir süre için lazer noktasının merkezine doğru radyal olarak içeri hareket eder. Bu bölge kendi içinde üç alt bölgeye ayrılır:

- C1: Lazer noktasının kenarı,
- C2: Ara geçiş bölgesi,
- C3: Lazer noktasının merkezi.

Bu bölgelerde toz taneciklerinin hareketi, eriyik havuzundaki sıcaklık kaynaklı yüzey gerilim farklarından kaynaklanan Marangoni akışı tarafından yönlendirilir. Bu nedenle yüksek verimlilikte toz birikimi sağlamak için tozların, özellikle C bölgesine beslenmesi gerekmektedir [40].

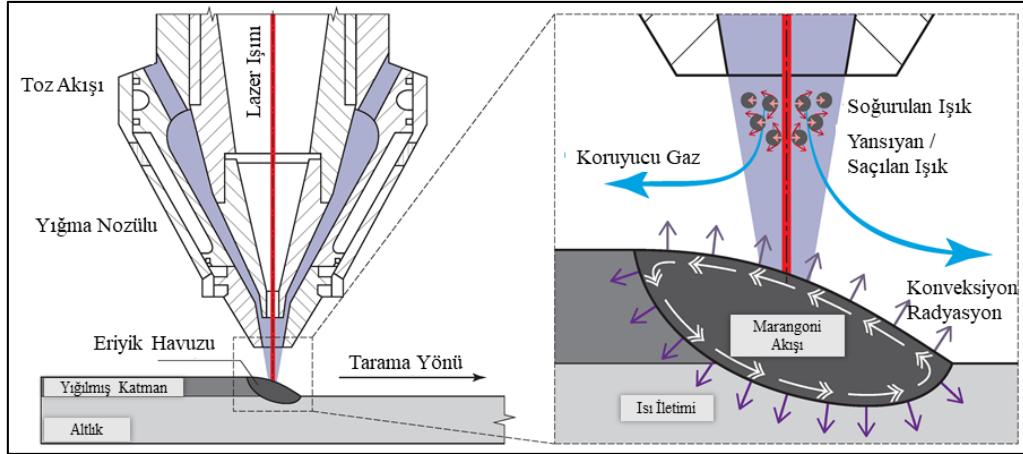


Şekil 2.6. Lazerle biriktirme sürecinde toz parçacıklarının farklı bölgelere yönelimi: üstten görünümde A, B, C bölgeleri; yandan görünümde eriyik havuz yüzeyindeki parçacık davranışları [40]

Lazer tabla etkileşimi

Eriyik içerisindeki parçacıkların hareketi, sıvının düşük yüzey gerilimli bölgelerden yüksek yüzey gerilimli bölgelere doğru akış gösterdiği Marangoni akışı ile açıklanabilir. Bu akışın yönü, erimiş malzemenin kimyasal bileşimine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Yüzey gerilimi, sıcaklıkla doğrudan ilişkili olduğundan, eriyik havuzu boyunca bir yüzey gerilim gradyanı oluşur. Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

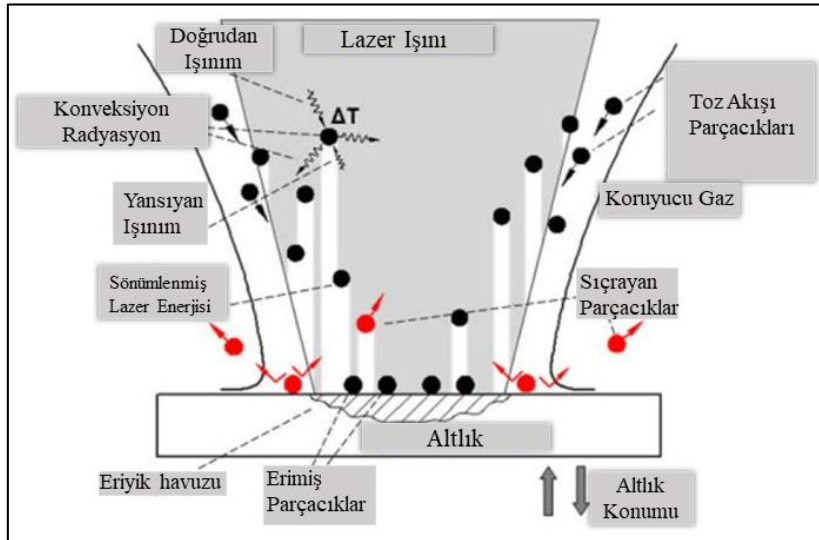
LYEY işlemi sırasında, toz taneleri ilk olarak lazer ışını tarafından ısıtılır. Bu tanecikler eriyik havuzuna ulaştıklarında ve yüzeyinde yüzdüklerinde, hem doğrudan lazer ışını hem de çevredeki eriyik malzeme tarafından ek olarak ısıtılırlar. Eğer bu toz taneleri, yüzey gerilim kuvvetlerini aşarak tamamen eriyik havuzuna dâhil olursa, çevreleyen eriyik tarafından tamamen sarılır ve nihai olarak eriyik sıcaklığına bağlı biçimde eritilirler. Tozun erimesi, erime sıcaklığının mevcut eriyik sıcaklığına eşit ya da ondan daha düşük olması durumunda gerçekleşir [41].



Şekil 2.7. LYEY yönteminde eriyik havuzunun oluşumu ve tarama yönünde ilerleyişi ile birlikte, ısı transferi ve akış mekanizmalarının şematik gösterimi [41]

Lazer toz etkileşimi

Tozun dağılım profili bilindiğinde, tek bir parçacığın kendi yörüngesi boyunca maruz kaldığı sıcaklık geçmişi detaylı olarak belirlenebilir. Lazer ve toz arasındaki etkileşim, alt tabakanın lazer ışınıyla ısıtılmasından önce dikkate alınması gereken önemli bir süreçtir. Bu etkileşim, toz parçacıklarının lazer tarafından ısıtılması ve aynı zamanda toz akışı nedeniyle lazer gücünün zayıflaması gibi iki temel bileşenden oluşur. Şekil 2.8’de, bu biriktirme süreci boyunca gerçekleşen temel fiziksel olayların şematik bir gösterimi sunulmaktadır [42].



Şekil 2.8. Lazer ışını ile toz partikülleri ve altlık arasındaki etkileşimler: parçacıkların eriyik havuzuna katılımı, sıçrama davranışı ve koruyucu gazın etkisi [42]

LYEY yönteminin daha ileri düzeyde geliştirilebilmesi için, toz parçacıkları, lazer ışını ve alt tabaka arasındaki etkileşimlerin kuramsal düzeyde daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu süreçte, hem ısı hem de kütle transferinin birlikte modellenmesi; süreç modellenmesinin ilerletilmesi açısından temel bir gerekliliktir. Lazer ışını kalitesi, toz akışı profili ve parçacık hızı gibi pek çok parametrenin kullanılan makine sistemine özgü olması, optimum işlem parametrelerinin belirlenmesini oldukça güçleştirmektedir. Bu nedenle, temel hedef; lazer ışını, toz akışı ve kullanılan malzemelerin termofiziksel özelliklerine dayalı olarak işlem parametrelerinin ve ortaya çıkan birikim geometrisinin öngörülebilmesidir.

LYEY süreçlerine ilişkin çeşitli modelleme yaklaşımları geliştirilmiştir. Bunlar genel olarak analitik, sayısal ve ampirik/istatistiksel modelleme olarak üç grupta toplanabilir. Ampirik/istatistiksel modeller çoğunlukla deneysel verilere dayandırılmakta olup, özellikle LYEY sürecinde tekli iz biriktirme optimizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır [43]. Ancak bu yaklaşımda yalnızca lazer gücü, ışın çapı, tarama hızı ve toz besleme debisi gibi sınırlı sayıda parametre dikkate alınır. Oysa her LYEY sisteminde, kullanılan nozul, toz ve lazer tasarımı birbirinden farklı olduğu için, süreçteki fiziksel olaylar da sistemden sisteme farklılık göstermektedir. Bu nedenle, fizik temelli modellemeler, yani sayısal ve analitik yaklaşımlar daha kapsamlı bir çözüm sunmaktadır. Fizik tabanlı modeller, üretim sürecini farklı fiziksel aşamalara böler ve bu aşamaların her biri için ayrı değişkenler tanımlar. Özellikle lazer, toz ve alt tabaka etkileşimiyle oluşan eriyik havuzunun özellikleri, sonuçta elde edilen iz geometrisini ve yapının genel karakterini belirler. Sayısal modelleme; toz akı dağılımı, lazer toz etkileşimi, katman geometrisi ve sıcaklık gibi birçok süreci temsil edebilme yeteneğiyle, LYEY yönteminin çeşitli yönlerinin modellenmesinde oldukça etkin bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir [44].

Analitik modelleme ise sürecin temel fiziğini kavramada klasik bir yöntem olarak kullanılır. Ancak süreçte yer alan fiziksel etkileşimlerin karmaşıklığını sadeleştirmek adına birçok varsayım yapılması, bu modellerin doğruluğunu sınırlayabilir. Yine de, yüksek hassasiyet gerektirmeyen tahminler için süreç haritalama ve işlem parametresi seçimi gibi uygulamalarda oldukça faydalı olabilir.

LYEY sürecinin analitik modelleme ile haritalanmasına yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan biri olan Jouvard ve ark. [45], lazer ışınının toz bulutu tarafından zayıflatılmasını Beer Lambert yasası ile açıklamış ve alt tabaka ile tozun

kaynaşması için gerekli eşik koşullarını belirleyebilmek amacıyla ısı iletiminin tek boyutlu çözümünü esas alan bir model geliştirmiştir. Benzer şekilde, Oliveira ve ark. [46] da, tozun ergitilmesi için gereken minimum lazer gücünü tanımlayan kısa bir işlem haritası oluşturmak amacıyla aynı yaklaşımı kullanmıştır [46, 47].

2.2. Fonksiyonel Geçişli Malzemeler

Fonksiyonel geçişli malzemeler, bir malzeme içerisinde özelliklerin, belirli bir yönde kademeli olarak değiştiği ileri teknoloji ürünü malzemelerdir. Bu değişim, genellikle malzeme bileşimi ya da mikroyapıdaki kontrollü farklılıklarla sağlanır. Özellikle farklı malzeme fazlarının bir arada bulunduğu yapılarda, geçiş bölgelerinde oluşabilecek gerilme yığılmalarını önlemek amacıyla FGM'ler tercih edilmektedir. Bu yönüyle, klasik kompozit malzemelerden farklılaşır ve çeşitli mühendislik uygulamalarında daha uzun ömürlü ve güvenli çözümler sunar [48-51].

FGM'ler, çoğunlukla seramik ve metal gibi farklı özellikler sergileyen iki temel malzemenin, bir arayüz oluşturmada, hacimsel olarak kademeli geçişle birleştirilmesiyle elde edilir. Seramik faz yüksek sıcaklıklara dayanım sağlarken, metal faz mekanik dayanıklılığı artırır. Bu şekilde, hem termal hem de yapısal gereksinimlerin karşılandığı dengeli bir yapı elde edilmiş olur [52].

Bu malzeme türü ilk kez 1980'li yılların başında Japonya'da, bir uzay aracı projesi kapsamında ortaya konmuştur. O dönemde, yüksek sıcaklık farklarına maruz kalacak yapılar için geliştirilen geleneksel kompozitler, katmanlar arası ayrılmalar nedeniyle yetersiz kalmış, bunun üzerine kademeli yapı fikri gündeme gelmiştir. Doğadan ilham alan bu yaklaşım, zamanla kontrollü üretim teknikleriyle geliştirilen bir teknoloji haline gelmiştir [53, 54].

Günümüzde FGM'ler, sadece kaplama malzemesi olarak değil, aynı zamanda hacimsel yapılar için de tercih edilmektedir. Özellikle havacılık, otomotiv, enerji sistemleri ve biyomedikal uygulamalarda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [55]. FGM üretiminde kullanılacak yöntemin seçiminde, malzeme yapısındaki geçişlerin hassas şekilde kontrol edilebilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, bu ihtiyaca en uygun çözüm olarak LYEY yöntemi tercih edilmiştir.

LYEY yöntemi, özellikle metal esaslı malzemelerde bileşim geçişlerinin katman katman ve kontrollü şekilde oluşturulabilmesine olanak tanıdığı için FGM üretimi açısından oldukça elverişlidir. Lazer ışınıyla oluşturulan eriyik havuzuna tozlar belirli oranlarda beslenerek, her bir katmanda istenen kompozisyon ayarlanabilmekte, böylece malzeme özelliklerinde yumuşak ve kontrollü bir geçiş sağlanabilmektedir. Bu özellik, FGM yapının temelinde yatan kademeli geçiş fikriyle birebir örtüşmektedir [28, 56, 57].

Ayrıca LYEY, sadece yüzey kaplamaları değil, hacimli ve işlevsel parça üretiminde de etkili bir yöntemdir. Bu sayede üretilecek bileşen hem yük taşıma kapasitesi hem de termal dayanım gibi işlevsel gereksinimleri aynı anda karşılayabilecek şekilde tasarlanabilir. Lazer destekli LYEY gibi gelişmiş uygulamalar ise, işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisinin daha iyi kontrol edilmesine imkân verir.

Literatürde de SS316L ve Inconel 718 gibi farklı alaşımların LYEY yöntemiyle başarılı bir şekilde gradyanlı yapılar hâlinde üretildiği pek çok örnek mevcuttur. Bu yöntemle hem yeniden ergitme davranışı hem de bileşimlerin birbiriyle geçişkenliği doğal olarak sağlanabilmekte ve böylece homojen olmayan ancak uyumlu yapılar elde edilebilmektedir [58, 59]. Tüm bu nedenlerle, LYEY yöntemi bu çalışmanın hedefleriyle örtüşmekte ve istenilen FGM yapılarının üretimi için en uygun yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Malzemenin özelliklerinin belirli bir yönde değiştiği bu yapılarda, elastik modül, kayma modülü ve yoğunluk gibi parametreler de gradyan boyunca değişkenlik gösterir. Bu etkin özellikleri tahmin edebilmek için çeşitli mikromekanik modeller geliştirilmiştir. Ancak, çoğu zaman mikroyapının tüm detayları bilinemediğinden, hacim oranlarına ve fazların şekillerine dayalı modeller tercih edilir. Bu kapsamda en yaygın kullanılan yöntemlerden biri, karışım kuralı olarak bilinen Voigt modelidir [60]. Bu modelde tüm fazlarda şekil değiştirmenin aynı olduğu varsayılır. Bir diğer önemli yöntem ise Mori Tanaka modelidir [61]. Bu yaklaşım, matris faz içindeki takviye fazların ortalama etkisini hesaba katarak, daha gerçekçi sonuçlar sunar. Ayrıca Hashin Shtrikman sınırları, öz uyumlu modellemeler, Halpin Tsai denklemleri gibi yöntemler de literatürde sıklıkla yer almaktadır [61-68].

Aşağıda bu yaklaşımlar özetlenmiştir:

Mori-Tanaka malzeme modeli

Bu model, matris fazına gömülü küresel takviye parçacıkları içeren yapılar için uygundur ve komşu takviye parçacıkları arasındaki etkileşimi yaklaşık olarak hesaba katar. Bu yönüyle, süreksiz takviye fazına ve sürekli bir matris yapısına sahip gradyanlı mikroyapılarda etkin şekilde kullanılabilir. Mori Tanaka modeli, ilk olarak 1973 yılında geliştirilmiş olup, daha sonra Benveniste (1987) tarafından kompozit malzemelerin etkin özelliklerinin hesaplanmasında kullanılabilecek şekilde yeniden düzenlenmiştir.

Modelde, poisson oranının etkisinin oldukça sınırlı olduğu varsayılmakta ve bu nedenle bu oran genellikle sabit kabul edilmektedir. Bu kabulle birlikte, model yardımıyla etkin kayma modülü ve etkin hacimsel modül hesaplanabilmektedir. Bu parametreler, gradyanlı malzemenin elastik davranışını karakterize etmek için temel öneme sahiptir. Mori Tanaka yaklaşımı Eş.2.1, özellikle belirli bir yön boyunca düzenli olarak değişen bileşim ve faz dağılımı içeren FGM sistemlerinde güvenilir sonuçlar sunar [69, 70].

$$E(z) = E_b + (E_t - E_b) \cdot \frac{V_t}{1 + (1 - V_t) \cdot \left(\frac{E_t}{E_b} - 1 \right) \cdot (1 + \nu) / [3(1 - \nu)]} \quad (2.1)$$

Voigt malzeme modeli

Voigt modeli, ilk kez 1889 yılında Voigt tarafından tanıtılmış olup, homojenleştirme yaklaşımları arasında en bilinen ve en yaygın kullanılan modellerden biridir. Bu model, farklı türdeki kompozit malzemelerin etkin elastik özelliklerinin tahmini amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir. Temel yaklaşımı, bütün fazlarda aynı şekil değişimi varsayımı altında, gerilmelerin ortalananması prensibine dayanır [60, 71].

Modelin basitliği ve uygulanabilirliği nedeniyle, FGM özelinde de oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadır. Voigt yaklaşımına göre, FGM'nin herhangi bir etkin malzeme özelliği (P), kompoziti oluşturan bileşenlerin özellikleri ile hacim oranlarının bir fonksiyonu olarak, genellikle kalınlık yönünde düzgün bir şekilde değiştiği kabul edilir. Bu özellik, matematiksel olarak Eş.2.2 şeklinde ifade edilir:

$$E(z) = E_t V_t + E_b V_b \quad (2.2)$$

Burada V_t ve V_b üst malzeme ve alt malzemenin hacim fraksiyonları gösteriyor.

Hacim fraksiyonu V_t 'nin ilişkiyle tanımlandığı varsayılırsa Eş.2.3 ve Eş.2.4 aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$V_t = (0,5 + \frac{z}{h})^k \quad (2.3)$$

$$E(z) = (0,5 + \frac{z}{h})^k + E_b(1 - V_t) \quad (2.4)$$

Güç yasası malzeme modeli

Malzeme derecelendirmesinde kullanılan güç yasası, ilk olarak Wakashima ve ark. tarafından önerilmiştir [72]. Bu yaklaşım, özellikle FGM için yapılan gerilme ve deformasyon analizlerinde geniş çapta kabul görmüş ve birçok çalışmada başarıyla uygulanmıştır [73].

Güç yasası modeli, FGM içerisindeki malzeme özelliklerinin, genellikle kalınlık yönü boyunca belirli bir matematiksel ilişki çerçevesinde kademeli olarak değiştiğini varsayar. Bu model sayesinde, etkin elastik özellikler, ısı iletkenlik, yoğunluk, termal genleşme katsayısı gibi özelliklerin konuma bağlı olarak nasıl değiştiği sayısal olarak ifade edilebilir. Aynı zamanda bu yaklaşım, ilgili özelliklerin gradyanlı geçişini dikkate alarak gerilme yığılmalarını daha doğru tahmin edebilmeye olanak tanır.

Güç yasası, sadece malzeme özelliklerinin tanımlanmasında değil, aynı zamanda bu özelliklere bağlı olarak gelişen mekanik davranışların (deformasyon ve gerilmeler) hesaplanmasında da en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu yönüyle, hem analitik çözümler hem de sonlu eleman modellemeleri için güçlü ve uygulanabilir bir temel sağlar ve Eş.2.5 ile tanımlanır.

$$E(z) = E_b + (E_t - E_b)(0,5 + \frac{z}{h})^k \quad (2.5)$$

Sigmoid yasası malzeme modeli

Sigmoid yasası, malzeme özelliklerinin daha dengeli ve yumuşak bir geçişle tanımlanabilmesi amacıyla geliştirilmiş bir gradyasyon modelidir. Özellikle, z yönünde $-h/2$ ile $h/2$ arasında uzanan bir plaka ya da kirişin iki farklı bölgesi ($-h/2 \dots 0$ ve $0 \dots h/2$) için ayrı matematiksel ifadelerin kullanılmasına olanak tanır. Bu yaklaşımda, her iki bölge için farklı güç fonksiyonlarının kullanılmasıyla oluşan birleşik yapı, özellikle çok katmanlı sistemlerde ortaya çıkan gerilme yoğunluklarını azaltmak amacıyla tercih edilir.

Chung ve Chi bir tekil güç yasasının çok katmanlı kompozit yapılara uygulanması durumunda, malzeme sürekli olsa da özelliklerin keskin değiştiği bölgelerde gerilme yoğunlaşmalarının oluşabileceğini belirtmiş ve bu problemi aşmak için sigmoid yasa modelini geliştirmiştir. Bu model, iki farklı güç yasasının kombinasyonu olarak tanımlanır ve gerilmenin tüm katmanlar arasında daha düzgün dağılmasını sağlar. Özellikle çatlaklı yapılarda, gerilme yoğunluğu faktörlerini azaltmak amacıyla da kullanıldığı bilinmektedir [74, 75].

Sigmoid yasa modeli ile oluşturulan FGM, karışım kuralı temel alınarak aşağıdaki Eş.2.6 şeklinde modellenebilir:

$$\begin{aligned} E(z) &= E_b + (E_t - E_b) \cdot [1 - 0,5(0,5 + \frac{z}{h})^k] \quad -h/2 \leq z \leq 0 \\ E(z) &= E_b + 0,5(E_t - E_b) \cdot (\frac{z}{h} - 0,5)^k \quad 0 \leq z \leq h/2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Üstel yasası malzeme modeli

Üstel yasası, FGM kırılma mekanizmasıyla ilgili problemlerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan bir diğer önemli gradyasyon yaklaşımıdır. Bu model, literatürde Kim ve Paulino ile Zhang ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş ve önerilmiştir [76, 77].

Bu yasa kapsamında, özellikle kalınlık yönü boyunca malzeme özelliklerinde düzgün olmayan ancak süreklilik arz eden değişimlerin tanımlanması hedeflenir. Üstel yasa, malzeme özelliklerinin ani değil, üssel (logaritmik) biçimde değiştiği durumlar için uygundur. Böylece, ani değişimlerin neden olabileceği gerilme yığılmaları ve çatlak oluşumları azaltılabilir.

Model kapsamında, herhangi bir etkin malzeme özelliği (young modülü E, yoğunluk ρ veya ısı iletkenlik k), z yönüne bağlı olarak aşağıdaki Eş.2.7 gibi genel formda tanımlanır:

$$E(z) = E_t \cdot e^{[-\lambda(1 - \frac{2z}{h})]}$$

$$\lambda = 0,5 \ln\left(\frac{E_t}{E_b}\right) \quad (2.7)$$

2.3. Enerji Yoğunluğu Kavramı

LYEY ve benzeri lazer tabanlı eklemeli imalat süreçlerinde, enerji yoğunluğu, birim alana veya hacme aktarılan enerji miktarını ifade eden kritik bir süreç parametresidir. Enerji yoğunluğu, lazer gücü, tarama hızı ve lazer spot çapı gibi parametrelerin bir fonksiyonudur ve süreç dinamiklerini doğrudan etkiler. Bu çalışma kapsamında kullanılan enerji yoğunluğu, aşağıdaki Eş.2.8 ile tanımlanmıştır.

$$ED = \frac{P}{v \cdot d} \quad (2.8)$$

Burada, P lazer gücü (W), v tarama hızı (mm/s), d lazer ışını çapı (mm) olarak tanımlanmıştır [78].

Bu formülasyon, lazer ışınının hedef malzeme üzerindeki etkili enerji aktarımını nicel olarak ifade etmektedir. Enerji yoğunluğu, LYEY sürecinde erime havuzu oluşumu, mikro yapı evrimi, gözeneklilik düzeyi ve mekanik özellikler üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Düşük enerji yoğunluklarında; erime yetersizliği, kaynaşma eksikliği ve artmış gözeneklilik riski ortaya çıkmaktadır. Yüksek enerji yoğunluklarında; aşırı seyreltme, keyhole tipi porozite ve yüksek sıcaklık gradyanları kaynaklı mikro yapı bozulmaları oluşabilmektedir. Enerji yoğunluğunun uygun aralıkta tutulması, düzgün iz oluşumu, düşük porozite, homojen mikro yapı ve iyi mekanik özellikler elde edilmesi açısından kritik önemdedir.

Rathor ve ark. (2024), LYEY sürecinde 20-32 J/mm³ arası hacimsel enerji yoğunlukları kullanarak depozit karakteristiklerini incelemiş ve 24 J/mm³ değerinin en düşük porozite ve ideal mikro yapı için optimum olduğunu göstermiştir [79].

Kunieda ve ark. (2023), PBF süreci için geleneksel enerji yoğunluğu tanımını geliştirerek yeni formülasyon önermiş ve bu yeni tanımın özellikle termal iletim modunda yoğunluk değişimlerini daha doğru temsil ettiğini belirtmiştir [80].

Kahya ve ark. (2023), LYEY ile üretilen 316L paslanmaz çelik yapılarında enerji yoğunluğu ile katman yüksekliği, porozite ve mikro yapı değişimlerini analiz etmiş, en düşük poroziteyi 62,03 J/mm² üzeri enerji yoğunluklarında elde ettiklerini bildirmiştir [81].

Thompson ve ark. (2015), LYEY sürecinde enerji yoğunluğunu lazer gücü, spot çapı ve tarama hızı parametreleri üzerinden tanımlamış, düşük enerji yoğunluklarında kaynaşma eksikliği, yüksek enerji yoğunluklarında ise keyhole tipi porozitelerin oluştuğunu vurgulamıştır [82].

Muslim ve ark. (2021), LYEY sürecinde PH 13-8 Mo alaşımıyla yapılan çalışmada, düşük enerji yoğunluklarında balling kusuru, yüksek enerji yoğunluklarında ise ısı birikimi nedeniyle geometrik kararsızlık gözlemlendiğini raporlamıştır [83].

Wolff ve ark. (2017), LYEY ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerde global enerji yoğunluğu ile gözeneklilik tipleri arasında ilişki kurmuş, düşük GED’de kaynaşma eksikliği, yüksek GED’de keyhole tipi gözeneklerin baskın olduğunu göstermiştir [84].

Yi Zhang (2024), PBF ile üretilen IN718 ve Haynes 282 alaşımlarında yerinde termal ölçüm izleme yaparak, yerel enerji yoğunluğu ile gözenek oluşumu ve mikro yapı evrimi arasındaki ilişkiyi ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur [85].

Pilagatti (2024), LYEY sürecinde toz akışı, erime havuzu oluşumu ve iz geometrisi üzerinde enerji yoğunluğu ve taşıyıcı gaz parametrelerinin etkisini araştırmış, istatistiksel modellemeler yoluyla optimum üretim parametrelerini belirlemiştir [86].

2.4. Yönlendirilmiş Lazer Enerji Yığma Yönteminde Termal Davranışın Modellenmesi

LYEY yöntemi, metal bazlı eklemeli imalat teknolojileri arasında en karmaşık süreçlerden biridir. Bu yöntemde, süreç boyunca hem ısı transferi, hem faz geçişleri, hem de akışkan hareketleri gibi birçok fiziksel olay aynı anda meydana gelir. Aynı zamanda, bu olaylar

mikroyapısal değişimler, artık gerilmeler ve şekil bozulmaları gibi etkilerle birbirini tetikler. Bu yönüyle LYEY, hem termodinamik hem de kinetik bakış açısıyla değerlendirilmesi gereken çok boyutlu bir üretim sürecidir [87].

LYEY sürecini sayısal olarak doğru şekilde modelleyebilmek için bazı temel fiziksel olayların mutlaka göz önünde bulundurulması gerekir:

- Yüksek sıcaklık gradyanlarının neden olduğu ısı geçişi,
- Erimiş havuz içindeki konvektif akışlar,
- Katı sıvı arayüzlerinde oluşan genleşme ve büzülme,
- Mikroyapının oluşumu ve değişimi,
- Termal gerilmeler ile birlikte ortaya çıkan plastik deformasyonlar,
- Faz geçişlerinde rol oynayan gizli ısı etkileri,
- Gaz jetlerinin oluşturduğu lokal zorlanmış taşınım [88, 89].

Bu olayların bazıları mikrosaniyeler içinde gelişirken, bazıları saatler sürebilen uzun etkiler doğurabilir. Dolayısıyla, LYEY sürecine ait modeller hazırlanırken hem zaman hem de ölçek bakımından çok dikkatli olunmalı; hangi düzeyde analiz yapılacağı baştan belirlenmelidir. [90].

Peyre ve ark. (2008), öncelikle toz parçacıklarının sıcaklığını belirleyebilmek amacıyla analitik bir model geliştirmiştir. Bu model kapsamında, fiziksel etkileşim bölgesi ayrıklaştırılmış ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, ince duvar yapıların geometrisinin öngörülmesi hedeflenmiştir [91].

Fu ve ark. (2010), LYEY sürecinde oluşan sıcaklık dağılımını tahmin etmeye yönelik bir model geliştirmiştir. Yaptıkları analizler sonucunda, biriktirilen metal tozunun ve altlık malzemesinin düşük ısı iletkenlik ve genleşme katsayısına sahip olması durumunda, oluşan termal gradyanların daha düşük seviyelerde kaldığı ve buna bağlı olarak artık gerilmelerin de azaldığı rapor edilmiştir. Ayrıca, çalışmada lazer gücü ve tarama hızındaki artışların, maksimum sıcaklıkları artırarak artık gerilme birikimini yükseltebileceği ifade edilmiştir [92].

Batut ve ark. (2017), LYEY sürecinde oluşan sıcaklık değişimlerini tahmin etmek amacıyla, hem analitik hem de sayısal yaklaşımları bir arada kullandıkları bir araştırma gerçekleştirmiştir. Deneysel verilerle desteklenen bu çalışmada, temel hedef; sıcaklık gradyanının, soğuma hızının ve erime havuzu geometrisinin doğru bir şekilde öngörülmesidir. Sonuçlar, analitik yöntemin sayısal yaklaşımlara kıyasla daha düşük hesaplama maliyetiyle, parçanın termal davranışını anlamada etkili ve güvenilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur [93].

Gouge ve ark. (2017), LYEY sürecinin SEM ile modellenmesi sırasında, gelişmiş bir termal taşınım girdisinin modele entegre edilmesini sağlayan bir yöntem geliştirmiş ve bu yöntemi deneysel verilerle doğrulamıştır [94].

Ju ve ark. (2015), tarama hızının, parçalar üzerindeki seyreltme oranına etkisini incelemek amacıyla, 304 paslanmaz çelik malzemeler üzerinde lazerle biriktirme sürecine yönelik bir sonlu elemanlar tabanlı termal simülasyon modeli geliştirmiştir. Geliştirilen model, test edilmiş ve süreç boyunca oluşan sıcaklık alanı, SEM aracılığıyla başarılı bir şekilde oluşturulmuştur [95].

2.4.1. LYEY simülasyon / Termal model

LYEY sürecinin modellenmesinde ilk adım, üretim sırasında oluşan sıcaklık değişimlerinin zamanla nasıl geliştiğinin belirlenmesidir. Bu doğrultuda, üç boyutlu geçici termal analiz uygulanarak sürecin ısı davranışı incelenir. Modelleme kapsamında, geçici ısı transferine dayanan enerji dengesi temel alınır ve bu sayede farklı zaman adımlarında oluşan sıcaklık dağılımı hesaplanır. Böylece, LYEY süreci boyunca oluşan termal alan ayrıntılı biçimde elde edilmiş olur ve Eş.2.9 ile tanımlanır.

$$\rho C_p = \frac{dT}{dt} = -\nabla \cdot q(r, t) + Q(r, t) \quad (2.9)$$

Burada:

- ρ malzeme yoğunluğunu,
- C_p özgül ısı kapasitesini,

- T sıcaklığı,
- t zamanı,
- Q ısı kaynağını,
- r görelî referans koordinatını ve
- q ısı akısı vektörünü temsil etmektedir.

Isı girdisinin tanımlanmasında Goldak'ın çift elipsoit modeli tercih edilmiştir ve bu modelin matematiksel formülasyonu Eş.2.10'da sunulmaktadır. Bu denklemde $\dot{Q}$, birim hacim başına aktarılan ısı miktarını ifade ederken; P , lazer ışınının gücünü, η ise sistemin genel enerji verimliliğini temsil eden katsayıdır. Lazer noktasının x , y ve z yönlerindeki yayılma yarıçapları ise sırasıyla r_x , r_y ve r_z ile gösterilmektedir.

$$\dot{Q}(x, t) = \frac{6\eta\sqrt{3}P}{\pi\sqrt{\pi}r_x r_y r_z} \exp\left[-\left(\frac{3x^2}{r_x^2}\right)\left(\frac{-3y^2}{r_y^2}\right)\left(-\frac{3z^2}{r_z^2}\right)\right] \quad (2.10)$$

Isı akısı vektörü (q), sıcaklık gradyanları dikkate alınarak hesaplanır ve bu hesaplamada, sıcaklığa bağlı değişkenlik gösteren ısı iletkenlik katsayısı (k) ile birlikte iletkenlik dağılımı kullanılır. Bu ilişki, Eş.2.11'de gösterilmektedir.

$$q = -k\nabla T \quad (2.11)$$

LYEY sürecinde, toz parçacıkları, taşıyıcı ortam görevi gören inert bir gaz aracılığıyla erime havuzuna yönlendirilir. Bu taşıyıcı gazın etkisiyle, özellikle erime havuzunun üst bölgesinde zorlanmış taşınım meydana gelir. Sürecin doğası gereği oluşan türbülanslı akış koşulları, ısı kayıplarının artmasına neden olabilir. Bu nedenle, taşıyıcı gaz yalnızca toz iletiminde değil, aynı zamanda ısı transfer mekanizmalarının şekillenmesinde de önemli bir rol oynar ve Eş.2.12'de gösterilmiştir.

$$\dot{q}_{con}(x_s, t) = h_{con}(T - T_{cevre}) \quad (2.12)$$

Termal ışıınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı, özellikle sıcaklıkların oldukça yüksek olduğu LYEY gibi süreçlerde belirgin şekilde artış gösterir. Bu ısı transfer mekanizması, sayısal modellerde genellikle Stefan Boltzmann yasası temel alınarak tanımlanır. Söz konusu yasa, yüzeyden yayılan ışıınım enerjisini Eş.2.13'e göre ifade edilir:

$$\dot{q}_{rad}(x_s, t) = K_B \varepsilon (T^4 - T_{cevre}^4) \quad (2.13)$$

- ε : Yüzeyin yayıcılık katsayısı,
- σ : Stefan Boltzmann sabiti olup, değeri $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ 'tür.

Bu yasa uyarınca, radyasyon yoluyla gerçekleşen ısı kaybı, yüzey sıcaklığının dördüncü dereceden fonksiyonu olarak artar. Sayısal modellemelerde, ε değeri çoğunlukla sabit kabul edilmekte ve deneysel verilerle kalibre edilmektedir. Bu yaklaşım, ışıınım etkisinin modele gerçekçi şekilde dâhil edilmesini sağlar.

Isıl sınır koşulları, özellikle LYEY gibi yüksek sıcaklık içeren süreçlerde büyük önem taşır. Literatürde genellikle taşınım ve ışıınım sabit katsayılarla ifade edilse de, bazı çalışmalar bu etkileri ihmal etmiştir [16, 96-99]. Oysa ki, inert gaz jetleri gibi zorlanmış taşınım etkileri, erimiş havuz çevresindeki sıcaklık dağılımını ciddi şekilde etkileyebilir. Bu nedenle, bu çalışmada lokal taşınım katsayıları artırılarak daha hassas bir modelleme hedeflenmiştir.

Kiran ve ark. (2020) çalışmalarında, 316L çeliği için LYEY sürecine uygun termo mekanik bir kaynak modeli geliştirmiş; bu modeli tekli ve çoklu iz üretimlerinde deneysel sıcaklık verileriyle doğrulamışlardır. Ayrıca, artık gerilme analizinde hesaplama süresini azaltmak için ısı döngüsü girişi ve katman birleştirme yöntemlerini uygulamışlardır [100].

Bonifaz (2019), çalışmalarında WAAM sürecinde kullanılan çok katmanlı birikim için 3 boyutlu, geçici ve doğrusal olmayan bir ısıl model geliştirmiştir. IN738LC süperalaşımının karbon çeliği üzerine yığılması simüle edilmiş, katmanlar arası ısı geçişi, konveksiyon ve radyasyon kayıpları ve hareketli ısı kaynağı etkileri modele dâhil edilmiştir. Geliştirilen model, eriyik havuzu geometrisi ve ısıl çevrimleri doğru şekilde tahmin edebilmiş, WAAM süreci için güçlü bir termal simülasyon temeli oluşturmuştur [101].

Zhao ve ark. (2025) çalışmalarında, LYEY yöntemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çeliğin katmanlı üretim sürecinde oluşan termomekanik salınımları hem deneysel hem sayısal olarak incelemişlerdir. Gerçek zamanlı sıcaklık ve eğilme kuvveti ölçümleriyle birlikte, iki aşamalı bir sayısal modelleme çerçevesi geliştirmişlerdir. Çalışmada, her katmanın sonunda oluşan periyodik eğilme kuvveti dalgalanmaları, katılma gerilme etkileşimi ve eriyik havuzunun tavlama benzeri etkisine bağlanmıştır. Ayrıca, soğuma aşamasının deformasyona

%26,97 oranında katkı sağladığı ve tablanın altına ısı yalıtımı eklemenin veya 400 °C üzeri ön ısıtmanın distorsiyonu %59'a kadar azaltabileceği gösterilmiştir [102].

Dantin ve ark. (2018) çalışmalarında, LYEY süreci için karmaşık geometrilerin ısı ve malzeme birikimini simüle edebilen açık kaynaklı bir ön işlem çerçevesi geliştirmişlerdir. Bu çerçeve, G kodundan elde edilen takım yolu koordinatları ve eleman aktivasyon kriterleri ile Abaqus ortamında katmanlı üretimi simüle etmeyi mümkün kılar. Çalışma, farklı aktivasyon mesafelerinin eriyik havuzu sıcaklık profili ve çapı üzerindeki etkilerini inceleyerek, maksimum sıcaklık değişimi küçük olsa da eriyik havuzu çapında %9'a varan farklar gözlemlenmiştir. Bu yaklaşım, özel parça geometrilerinin üretiminde LYEY sürecine yönelik parametrik optimizasyonlara olanak tanımaktadır [103].

Marion ve ark. (2014), doğrudan metal yığıma süreci için, termal, metalurjik ve mekanik etkileşimleri bir arada değerlendiren kapsamlı bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. Model, Ti-6Al-4V alaşımı için faz dönüşümlerini (α , β , α') dikkate alarak gerçek ısı geçişine dayalı artık gerilme tahmini sunar. Z-set yazılımında uygulanan bu modelde, eleman aktivasyonu lazer yolu ile senkronize olarak gerçekleştirilmiş ve farklı tarama stratejilerinin termal gerilmeye etkisi analiz edilmiştir. Modelin çıktıları, yüksek soğuma hızlarında martensit (α') oluşumu ve tabakalar arası farklı faz dağılımları gibi mikro yapısal evrimleri başarıyla yansıtmaktadır [104].

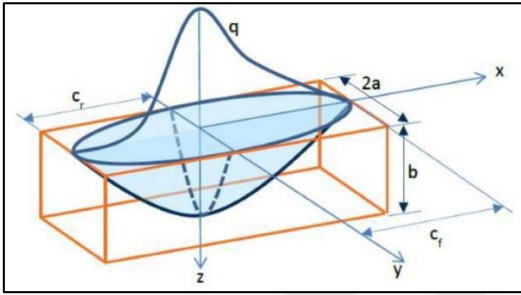
Liang ve ark. (2018), LYEY yöntemiyle üretilmiş tek duvarlı yapıların artık deformasyonlarını hızlı ve doğru şekilde tahmin etmek amacıyla “değiştirilmiş özgerilme” temelli bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem, ayrıntılı ısı mekanik simülasyonlardan elde edilen özgerilme verilerini, katman bazlı statik analizlerde kullanarak hesaplama süresini ~80 kat azaltmakta ve sonuçları deneysel verilerle başarıyla doğrulamaktadır. Ayrıca, bu yöntemin küçük ölçekli simülasyonlar üzerinden genellenebilir hale getirilmesiyle, farklı tek duvarlı yapıların distorsiyonları hızlıca tahmin edilebilmektedir [105].

Li ve ark. (2023), SS316L/Inconel 718 alaşımlarından LYEY yöntemiyle üretilen fonksiyonel geçişli malzemelerin üretimini modellemek amacıyla çoklu fizik ve çoklu malzeme temelli bir termal akışkan simülasyon modeli geliştirilmiştir. Model, ergime havuzu dinamikleri, malzeme geçişleri ve duvar geometrisini başarıyla tahmin etmiş; simülasyon sonuçları deneysel verilerle doğrulanmıştır. Inconel 718 oranının artışıyla

birlikte ısı birikimi ve ergime havuzu boyutunda değişiklikler gözlenmiştir. Bu kapsamlı model, LYEY sürecinde FGM üretiminin anlaşılması ve optimizasyonu açısından etkili bir araç sunmaktadır [106].

2.4.2. Isı kaynağı modeli

Bu tez kapsamında kullanılan termal modellemede, yaygın olarak tercih edilen Goldak'ın çift elipsoit ısı kaynağı modeli kullanılmıştır [107].



Şekil 2.9. Goldak çift elipsoidal ısı kaynağı modeli: ısı akısının ön (c_f) ve arka (c_r) yarı elipsoidlerde dağılımı; $2a$, b ve c parametreleri ile kaynak yönündeki ısı yayılımının tanımlanması [108]

Güç yoğunluğu dağılımı aşağıdaki Eş.2.14 ile gösterilir:

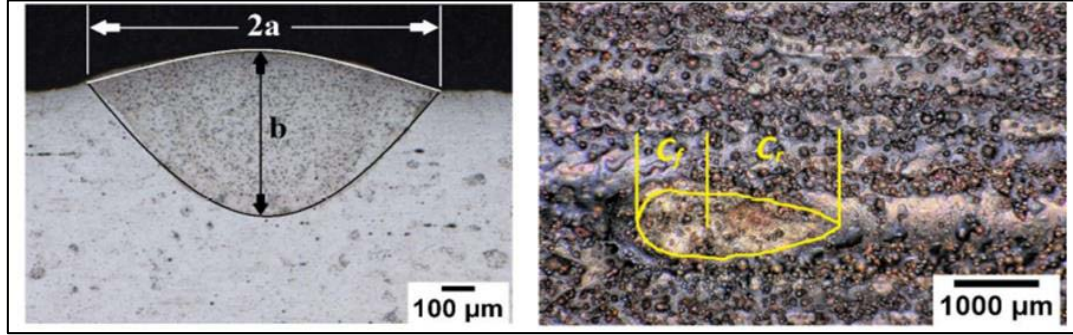
$$q_{f/r} = \frac{6\sqrt{3}f_{f/r}}{abc\pi\sqrt{\pi}} Q e^{\left(\frac{-3x^3}{c_f^2}\right)} e^{\left(\frac{-3y^3}{a^2}\right)} e^{\left(\frac{-3z^3}{b^2}\right)} \quad (2.14)$$

Burada a , b , c_f , c_r , elipsoidal ısı kaynağının eksenlerini tanımlayan değişkenleri tanımlar. Q , ısı kaynağı gücüdür. $f_{f/r}$ enerji akışı yoğunluğunu tanımlar. Alt simge "f" eriyik havuzunun ön bölgesini temsil eder ve "r", Şekil 2.9'da gösterildiği gibi eksenlerin orijininin itibaren eriyik havuzunun arka bölgesini temsil eder ve aşağıdaki Eş.2.15 koşul yerine getirilir [109, 110].

$$f_r + f_f = 2 \quad (2.15)$$

Goldak parametreleri, deneysel olarak gözlemlenen ergime havuzu boyutlarına göre hesaplanabilir. Eş.2.16 'da gösterilmiştir. Elipsoidal ısı kaynağı parametreleri 'a' ve 'b',

Resim 2.1 (a)'da gösterildiği gibi, tek izli biriktirmenin enine kesitinden ölçülür, ' C_f ' ve ' C_r ' ise yığmanın kuş bakışı görünümünden Resim 2.1 (b)'de ki gibi belirlenir.



(a)

(b)

Resim 2.1. Isı akısı dağılımının geometrik gösterimi: (a) tek iz yapısında eriyik havuzu modeli, (b) çok izli yığmada çift yönlü yayılım [110]

$$f_f = \alpha \frac{C_f}{C_f + C_r} \quad \alpha = 2 \quad (2.16)$$

Lazerin simetrik dağılımı göz önünde bulundurulduğunda, elipsoidal yapı ile daha uyumlu ve güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Süreç verimliliği, lazerin yarıçapı, derinliği ve geometrik dağılımı gibi parametreler üzerinde çeşitli optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

2.4.3. Eklemeli imalat için sonlu elemanlar tabanlı modelleme eklentisi

Eklemeli imalat model (Eİ model) eklentisi, metal bazlı eklemeli imalat süreçlerini simüle etmek ve analiz etmek için geliştirilmiş, oldukça güçlü ve modern bir araçtır [111]. Bu eklenti ile yalnızca termal analiz, yalnızca yapısal analiz ya da her ikisinin birlikte ele alındığı termal-yapısal analizler gerçekleştirilebilir. Eİ model'in sunduğu bu esneklik, üretim sürecinin daha iyi anlaşılmasına, hataların en aza indirilmesine ve parçanın nihai davranışının daha doğru tahmin edilmesine imkân sağlar.

Eİ model, parçaların katman katman inşa edilmesini dikkate alarak çalışır. Bu süreçte; malzeme özellikleri, ısı girdisi, hareket hızı, biriktirme yönelimi, ısı iletimi, konveksiyon ve çevresel koşullar gibi birçok faktör modele dâhil edilebilir. Tüm bu özellikler sayesinde bu araç, sadece Eİ süreçlerinin değil, kaynak işlemlerinin de simülasyonunda kullanılabilir.

Dantin ve ark. (2018) çalışmalarında, LYEY süreci için karmaşık geometrilerin ısı ve malzeme birikimini simüle edebilen açık kaynaklı bir ön işlem çerçevesi geliştirmişlerdir. Bu çerçeve, G-kodundan elde edilen takım yolu koordinatları ve eleman aktivasyon kriterleri ile Abaqus ortamında katmanlı üretimi simüle etmeyi mümkün kılar. Çalışma, farklı aktivasyon mesafelerinin eriyik havuzu sıcaklık profili ve çapı üzerindeki etkilerini inceleyerek, maksimum sıcaklık değişimi küçük olsa da eriyik havuzu çapında %9'a varan farklar gözlemlenmiştir. Bu yaklaşım, özel parça geometrilerinin üretiminde LYEY sürecine yönelik parametrik optimizasyonlara olanak tanımaktadır [103].

Song ve ark. (2020), LYEY ve SLM yöntemleriyle üretilen Inconel 718 yapılarında oluşan artık gerilmeleri ve geometrik distorsiyonları Abaqus Eİ modülü ile sayısal olarak simüle etmişlerdir. Gerçekleşen distorsiyonlar, malzeme anizotropisi ve soğuma sürecinin detayları gibi parametrelere karşı yüksek hassasiyet göstermiştir. LYEY için goldak ısı kaynağı modeli kullanılırken, SLM'de nodal yüzey ısı girdisi ve destek kalınlığının etkileri detaylı şekilde incelenmiştir. Model çıktıları, XRD ölçümleriyle doğrulanmış, ince duvarlı yapıların köşe bölgelerinde yüksek gerilmeye bağlı çatlak oluşumu gözlemlenmiştir [108].

Bonifaz ve Mena (2021), çalışmada Abaqus Eİ model eklentisi kullanılarak LYEY süreci başarıyla simüle edilmiştir. Elemanların kademeli aktifleştirilmesi yöntemi kullanılarak katman katman malzeme eklenmesi ve ısı girişi, zaman ve konum bazlı olarak modellenmiştir. Hem ince (4 mm) hem kalın (12 mm) duvar yapılar üzerinde yapılan simülasyonlarda, her katmanda 25 sıra ve her sırada birkaç elemanla yapı inşa edilmiştir. model değiştirme yerine Eİ model'in sunduğu yeni etkinleştirme yaklaşımı ile, LYEY üretim sürecine daha uygun ve verimli bir simülasyon gerçekleştirilmiştir [112].

An ve ark. (2021), elektron ışıını ile toz yatağı ergitme yöntemi için Abaqus ortamında hem kullanıcı alt programları hem de Eİ model eklentisi kullanılarak termal analiz gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımı için geliştirilen sonlu eleman modeli ile eriyik havuz geometrisi, sıcaklık dağılımı ve malzeme geçişi (toz → sıvı → katı) başarılı şekilde simüle edilmiştir. Kullanıcı alt programları ile elde edilen sonuçlar, Eİ model ile elde edilen sonuçlarla yüksek oranda uyuşmuş ve literatürdeki verilerle doğrulanmıştır. Ayrıca, "Eİ" harfleri şeklinde 3B bir nesnenin katmanlı üretimi örneklendirilerek Eİ model'in tüm üretim sürecini simüle edebileceği gösterilmiştir [113].

Genel olarak literatür incelendiğinde, LYEY yöntemi ile FGM üretimi üzerine yapılan çalışmaların sayısının giderek arttığı görülmektedir. Özellikle SS316L ve IN718 gibi malzemeler kullanılarak yapılan araştırmalar, bu yapıların mikro yapısal ve mekanik performanslarının anlaşılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Bununla birlikte, geçişli bölgelerdeki metalürjik uyumsuzlukların önlenmesine yönelik olarak kompozisyon bazlı enerji yoğunluğu optimizasyonunun sistematik şekilde ele alındığı çalışmaların sınırlı olduğu fark edilmektedir. Ayrıca, deneysel bulgular ile sayısal modellemelerin bütüncül bir yaklaşımla entegre edildiği, özellikle eriyik havuzu davranışlarını üç boyutlu geçici analizlerle ele alan çalışmalar da literatürde oldukça sınırlı kalmaktadır.

Bu tez çalışması, söz konusu boşluklara katkı sunmayı hedeflemektedir. Farklı kompozisyonlar için optimum enerji yoğunluğu aralıklarının belirlenmesi, bu değerlerin çok katmanlı üretimlerde uygulanması ve elde edilen yapıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin detaylı biçimde karakterize edilmesi bu kapsamda ele alınmıştır. Ayrıca Abaqus ortamında geliştirilen sayısal termal modeller aracılığıyla elde edilen eriyik havuzu geometrileri, deneysel verilerle karşılaştırılarak model doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Böylece, LYEY yöntemiyle FGM üretiminde enerji girdisi mikroyapı ilişkisine hem deneysel hem de sayısal veriler ışığında kapsamlı bir bakış sunulmuştur.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

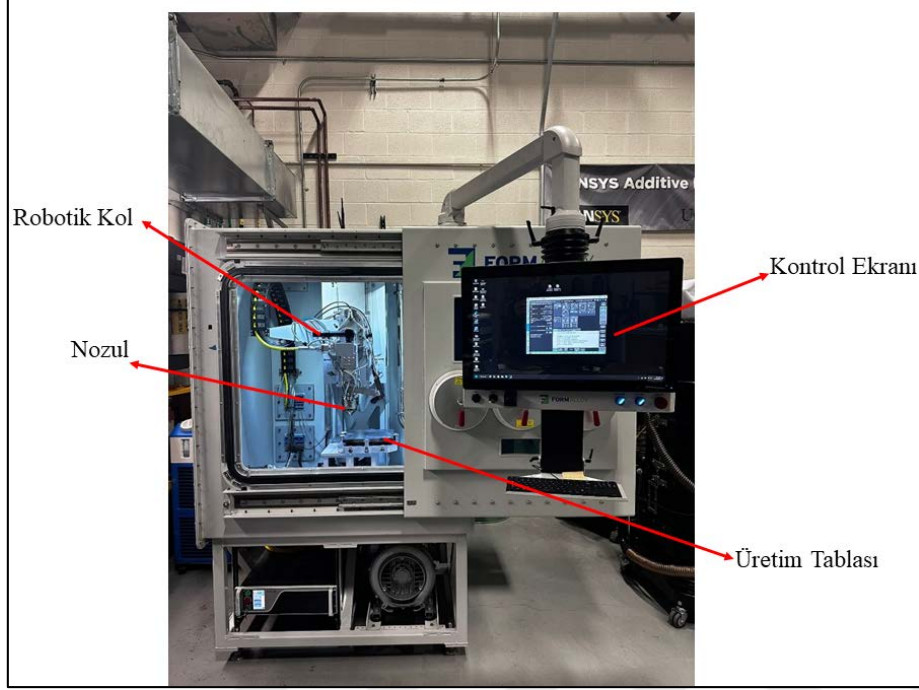
Bu bölümde, tez kapsamında gerçekleştirilen LYEY deneylerine ilişkin genel bilgiler sunulmuştur. Kullanılan LYEY sisteminin yapısı, altlık malzemesi, metal tozlarının özellikleri, üretim geometrileri ve uygulanan proses parametreleri detaylı biçimde açıklanmıştır. Deneysel çalışmalar hem tek dikişli numuneler hem de çok katmanlı (duvar tipi) yapılar üzerinde gerçekleştirilmiş olup, bu üretimlerin amacı, farklı kompozisyonlardaki biriktirme davranışlarını, mikro yapılarını ve süreç performanslarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Ayrıca bu bölümde, kullanılan lazer sistemi, toz besleme mekanizması ve üretim atmosferi gibi sistem bileşenlerinin yanı sıra, enerji yoğunluğu, tarama hızı, katman kalınlığı gibi sabit ve değişken parametreler de ayrıntılı şekilde sunulmuştur.

3.1. Deney Düzenegi

Bu çalışmada kullanılan üretim sistemleri, hem tek dikişli numunelerin hem de çok katmanlı FGM yapıların üretimi için yüksek hassasiyetli altyapılar sunmaktadır. Tek dikişli numuneler, Bilsing Automation (Bursa) bünyesinde yer alan ve Fraunhofer IWS tarafından geliştirilen COAX12 lazer kaplama başlığı ile donatılmış LYEY sistemi kullanılarak üretilmiştir. Bu başlık, dört ayrı toz nozulu sayesinde homojen toz dağılımı sağlamakta; altı eksenli KUKA robot kolu ile entegrasyon sayesinde, karmaşık hareket kabiliyeti sunmaktadır. Böylece tek dikişli yapılarda stabil bir üretim süreci gerçekleştirilmiştir.

Öte yandan, çok katmanlı FGM yapılar, ABD'deki RPM Innovations Inc. firmasına ait 222XR LYEY sistemi ile üretilmiştir. Bu sistem kapalı bir ortam, koaksiyel toz besleme nozulu, ve bilgisayar kontrollü hassas hareket platformu ile donatılmıştır. Sistem, LYEY sürecini kontrollü bir şekilde gerçekleştirmek üzere tasarlanmış olup, özellikle paslanmaz çelik altlık üzerine SS316L ve IN718 malzemelerinin farklı bileşim oranlarında biriktirilmesine olanak sağlamıştır. Resim 3.1'de sistemin genel görünümü yer almaktadır. Her iki sistemde de kullanılan çift hazneli toz besleme sistemleri, FGM üretiminde farklı kompozisyon oranlarını katmanlar boyunca hassas şekilde değiştirebilmek için kullanılmıştır. SS316L ve Inconel 718 tozları, bu hazneler aracılığıyla istenen oranlarda kontrollü olarak biriktirme bölgesine iletilmiştir. Böylece hem keskin geçişli hem de

kademeli geçişli fonksiyonel geçişli yapılar başarıyla üretilmiştir. Kullanılan toz besleme sisteminin genel görünümü Resim 3.2’de gösterilmiştir.



Resim 3.1. FormAlloy X-Series LYEY sistemine ait üretim hücresi: kapalı hazne yapısı, üst kısımda lazer ve toz nozulları ve yüksek hassasiyetli 5 eksenli tabla



(a)



(b)

Resim 3.2. Çift hazneli toz besleme sistemi: (a) ikili toz haznesinin laboratuvar ortamındaki yerleşimi, (b) nozul ucunda birleşen toz akışının görsel gösterimi

3.2. Malzemeler

Bu çalışmada, LYEY yöntemiyle, saf SS316L'den saf IN718'e kadar %25'lik ağırlık artışıyla geçişli şekilde fonksiyonel geçişli malzemeler üretilmiştir. Üretim sürecinde hem Inconel 718 hem de AISI 316L tozları aktif olarak kullanılmış; bu tozlar SS316L altlık üzerine belirlenen oranlarda biriktirilerek katmanlı yapılar oluşturulmuştur. Bu altlık malzemesinin seçilmesinin nedeni, hem sanayide hem de akademik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan, yüksek korozyon direnci ve iyi işlenebilirliğiyle öne çıkan bir paslanmaz çelik olmasıdır [114].

Yığılma işleminde kullanılan metal tozları, gaz atomizasyonu yöntemiyle üretilmiş olup, küresel yapıları sayesinde yüksek akışkanlık gösterir. IN718 tozlarının boyutu 45-150 µm, SS316L tozlarının ise 53-150 µm aralığındadır. Her iki malzemenin ergime noktası, yoğunluğu ve kristal yapısı benzer olduğundan birlikte kullanılmaları üretim sürecinde denge sağlar ve olası uyumsuzlukların önüne geçer [115]. Bu alaşımlara ait temel kimyasal bileşimler Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. SS316L ve IN718 alaşımlarına ait temel kimyasal bileşim oranları (ağırlıkça yüzde, wt.%) [115]

Özellik	SS316L	IN718
Krom (Cr)	%16 – %18	%19
Nikel (Ni)	%10 – %14	Esas element
Molibden (Mo)	%2 – %3	%3
Demir (Fe)	Esas element	%18
Niyobyum (Nb)	–	%5
Titanyum (Ti)	–	%1
Alüminyum (Al)	–	%0,5

SS316L, düşük karbon içeriği sayesinde çeşitli atmosferik ve koroziv ortamlarda uzun süreli korozyon direnci sunar. Özellikle denizcilik uygulamalarında sıkça tercih edilir çünkü orta sıcaklıklarda (yaklaşık 60°C'ye kadar) 1000 mg/L'ye kadar klorür içeren ortamlarda güvenle kullanılabilir. Ayrıca 870°C'ye kadar aralıklı 925°C'ye kadar sürekli sıcaklıklarda oksidasyon direnci gösterir. Bununla birlikte, 425-860°C arasındaki sıcaklıklarda uzun süreli kullanımı, deniz ortamına karşı korozyon dayanımı açısından önerilmemektedir [114-118]. IN718 ise nikel bazlı yüksek dayanımlı bir süperalaşımdır. Niyobyum, titanyum ve alüminyum gibi element katkıları sayesinde, 593-816°C aralığında ısıtılma işlemiyle sertleştirilebilir. Yorulma dayanımı, sürünme direnci ve yüksek sıcaklık korozyon direnci

gibi üstün özellikleriyle havacılık, savunma ve nükleer uygulamalarda tercih edilen kritik mühendislik malzemelerinden biridir [119].

Bu iki farklı alaşımın birlikte kullanımı, daha dayanıklı ve uzun ömürlü bileşenlerin üretilmesini mümkün kılarken; bakım, değiştirme ve üretim maliyetlerini de azaltma potansiyeli sunmaktadır. Bu nedenlerle, çalışmada IN718 ve SS316L alaşımları farklı oranlarda birleştirilerek fonksiyonel geçişli yapılar üretilmiş ve performansları araştırılmıştır.

3.3. LYEY Proses Parametreleri

Bu çalışmada kullanılan LYEY sistemine ait proses parametreleri, üretim stratejisine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Deneysel çalışmalar kapsamında hem çok katmanlı hem de tek katmanlı üretimler gerçekleştirilmiş; bu iki senaryo için temel parametreler aşağıda özetlenmiştir.

Tek katmanlı üretimlerde yalnızca lazer gücü değişken parametre olarak ele alınmış, diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur. Üretim süreci boyunca çalışma mesafesi 13 mm, odaklanmış lazer çapı 2,5 mm, toz besleme hızı 15 g/dk, taşıyıcı argon gazı debisi 6 L/dk ve koruyucu gaz debisi 5 L/dk olarak belirlenmiştir. Ayrıca sistemin entegre ısıtma birimi ile altlık sıcaklığı sabit 298 K (25 °C) düzeyinde korunmuştur. Çok katmanlı üretimlerde ise toz besleme hızı her bir hazne için 5 g/dk olarak sabitlenmiştir. Tozların kontrollü ve düzgün bir şekilde yığılmasını sağlamak amacıyla, taşıyıcı gaz debisi 3 L/dk, koruyucu gaz debisi ise 7 L/dk olarak ayarlanmıştır. Bu parametreler, üretim sırasında oluşabilecek malzeme oksidasyonunu en aza indirmeyi ve elde edilen yapının mikro yapısal kalitesini artırmayı hedeflemektedir. Farklı üretim stratejileri için belirlenen bu sabit ve değişken parametreler, lazer-malzeme etkileşiminin kontrol edilmesi ve tekrar üretilebilir sonuçlar elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

3.4. Enerji Yoğunluğu Girdisinin Hesaplanması

Enerji yoğunluğunun mikro yapı oluşumu, erime davranışı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri daha önce Bölüm 2.3'te detaylı bir şekilde literatür çalışmalarıyla birlikte sunulmuştur. Bu bölümde ise yalnızca bu tez çalışmasında kullanılan enerji yoğunluğu değerlerinin hesaplanmasına yer verilmiştir.

ED, lazer gücü (P), tarama hızı (v) ve spot çapı (d) kullanılarak aşağıdaki Eş.3.1 yardımıyla hesaplanmıştır:

$$ED = \frac{P}{v.d} \quad (3.1)$$

3.5. Tek Katman Dikişlerinin Üretimi

Bu çalışmada, farklı kompozisyonlara sahip alaşım sistemlerinin LYEYöntemiyle biriktirme davranışlarını değerlendirmek amacıyla tek katmanlı dikiş yapıları üretilmiştir. Resim 3.3’de üretimler gösterilmiştir. Üretimlerin temel amacı, değişen enerji yoğunluğu seviyeleri ve malzeme bileşimlerinin, eriyik havuzu geometrisi, iz kalitesi ve mikro yapısal özellikler üzerindeki etkilerini araştırmaktır.

Numuneler, SS316L ve IN718 tozlarının farklı oranlarda karıştırılmasıyla oluşturulan beş farklı bileşimde üretilmiştir:

- %100 SS316L
- %75 SS316L – %25 IN718
- %50 SS316L – %50 IN718
- %25 SS316L – %75 IN718
- %100 IN718

Her bileşim için üçer adet olmak üzere toplamda 15 adet tek dikişli numune üretilmiştir. Dikişler yaklaşık olarak 50 mm uzunluğunda, 2,5 mm genişliğinde ve 0,3 mm kalınlığında olacak şekilde tasarlanmıştır. Üretim öncesinde altlık yüzeyi, sıkıştırılmış hava ve etanol ile temizlenmiştir. Çalışmada tek dikiş yığma üretimin de tarama hızı sabit olarak 11 mm/s, spot çapı ise 2,5 mm olarak belirlenmiştir. Lazer gücü üç farklı seviyede uygulanmış olup, elde edilen enerji yoğunluğu değerleri aşağıda Çizelge 3.2’de verilmiştir:

Çizelge 3.2. Tek kaynak dikişli üretimde kullanılan parametreler

Kompozisyon	Tarama Hızı [mm/s]	Lazer Gücü [W]	Enerji Yoğunluğu [J/mm ²]
%100 SS316L	11	1500	54,54
	11	1800	65,45
	11	2100	76,36
%75 SS316L + %25 Inc718	11	1500	54,54
	11	1800	65,45
	11	2100	76,36
%50 SS316L + %50 Inc718	11	1500	54,54
	11	1800	65,45
	11	2100	76,36
%25 SS316L + %75 Inc718	11	1500	54,54
	11	1800	65,45
	11	2100	76,36
%100 Inc718	11	1500	54,54
	11	1800	65,45
	11	2100	76,36



Resim 3.3. SS316L-IN718 alaşımlarından farklı kompozisyon oranlarıyla üretilmiş tek dikişli numunelerin üstten görünümü

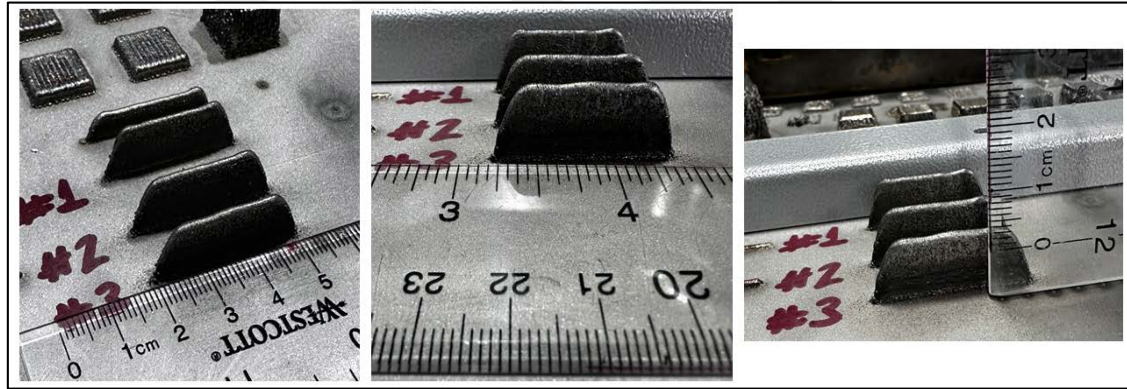
3.6. Duvar Geometri Üretimi

Deneylerin ikinci aşamasında, fonksiyonel derecelendirilmiş duvar yapıların üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu üretim sürecinde, öncelikle her bir kompozisyon için tek dikişli yığma deneylerinden elde edilen veriler değerlendirilmiş ve bu veriler ışığında, uygun enerji yoğunluğu değerleri belirlenmiştir. Böylece, her bir malzeme bileşimi için erime havuzu stabilitesi, iz geometrisi ve üretim kararlılığı dikkate alınarak optimize edilmiş parametrelerle üretim yapılmıştır.

Üretimler, %25'lik kompozisyon geçişleriyle (100% SS316L → 100% IN718) tasarlanmış olup, her geçiş aralığında 10 katman biriktirilerek toplamda 50 katmanlı FGM yapıları oluşturulmuştur. Bu kapsamda üç farklı üretim stratejisi kullanılarak üç adet FGM duvar numunesi başarıyla üretilmiştir. Tüm yapılar aynı altlık ve çevresel koşullar altında

gerçekleştirilmiştir. Farklı enerji yoğunluğu stratejileri ile üretilen üç adet FGM duvar yapısına ait üretim sonrası makro ölçekte görseller Resim 3.4'te sunulmuştur. Görseller, katmanlı yapının genel geometrik bütünlüğünü, yapı yüksekliğini ve tabanla olan bağlantısını doğrudan göstermektedir. Her bir numune farklı enerji yoğunluğu dağılımı ile üretildiği için, elde edilen duvar profilleri üretim parametrelerinin mikroyapı ve morfoloji üzerindeki etkisine dair ön bilgi sunmaktadır.

Duvar tipi çok katmanlı yapıların üretiminde kullanılan proses parametreleri sabit tutularak, homojen ve tekrarlanabilir katman birikimi hedeflenmiştir. Üretim süresince tarama hızı 10 mm/s, lazer spot çapı ise 1 mm olarak belirlenmiştir. Lazer gücü, yapı boyunca değişken olarak uygulanmış ve 500 W ile 700 W arasında ayarlanmıştır. Böylece, farklı bileşimler için uygun enerji yoğunluğu sağlanarak stabil erime havuzu elde edilmiştir.



(a)

(b)

(c)

Resim 3.4. Üç farklı FGM duvar numunesine ait üretim sonrası makro görünüm: (a-c) ön ve yan yüzey görselleri ile taban genişliği ve yapı yüksekliği ölçümlemleri gösteren detaylı fotoğraflar

3.7. Metalografik Numune Hazırlığı

Tek ve çok katmanlı numunelerin dış analizleri için metalografik hazırlık işlemleri, her iki numune tipi için de aynı prosedürler izlenerek gerçekleştirilmiştir. Numuneler, standart metalografik prosedürler doğrultusunda hazırlanmıştır. Numuneler, 320, 500 ve 800 grit büyüklüğünde silikon karbür (SiC) zımpara kâğıtları ile sırasıyla ıslak zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Parlatma aşamasında süspansiyon kullanılmamış; bunun yerine elektropolishing yöntemi tercih edilmiştir. Mikroyapısal kontrastın artırılması amacıyla elektrokimyasal dağlama işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde %40 HCl (hidroklorik asit), %30

CH_3COOH (asetik asit) ve %30 HNO_3 (nitrik asit) içeren bir çözelti kullanılmış ve 6 V gerilim altında 15 saniye süreyle uygulanmıştır. Yüzey morfolojisinin ve kimyasal bileşimlerin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen SEM analizlerinde, ZEISS Merlin model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. EDS analizleri 15 kV çalışma voltajı altında gerçekleştirilmiştir. Kristal yapı, tane sınırları ve yönelimlerinin karakterizasyonu için EDAX OIM sistemi kullanılmış, analiz verileri OIM Analysis yazılımı aracılığıyla değerlendirilmiştir.

3.8. Malzeme Karakterizasyon Teknikleri

3.8.1. Taramalı elektron mikroskobu analizi

Bu çalışmada, üretilen numunelerin mikro yapısal özelliklerini incelemek ve eriyik havuzu geometrik ölçümlerini gerçekleştirmek amacıyla taramalı elektron mikroskopisi analizleri yapılmıştır. Tek dikiş örneklerinde, katılaşma yapısı ve eriyik havuz geometrisi detaylı olarak incelenmiş, elde edilen geometrik veriler sayısal modelleme sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sayesinde, enerji yoğunluğunun eriyik havuzu şekli ve boyutları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Fonksiyonel geçişli malzeme duvar numunelerinde ise, farklı bileşim geçişlerinin ve katmanlar arasındaki mikro yapısal değişimlerin analizi amacıyla SEM görüntüleri alınmıştır. Katman geçiş bölgelerinde oluşan mikroyapısal farklılıklar, potansiyel kusur oluşumları ve mikro çatlaklar detaylı olarak incelenmiştir. Böylece, kompozisyon ve enerji yoğunluğu değişimlerinin mikroyapıya etkisi ortaya konmuştur.

3.8.2. EDS analizi

Numunelerin kimyasal bileşim analizleri ve element dağılım haritalarının elde edilmesi amacıyla enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi yöntemi kullanılmıştır. Tek dikiş numunelerinde, farklı enerji yoğunluklarının element dağılımı üzerindeki etkilerini belirlemek ve olası segregasyon bölgelerini tespit etmek amacıyla noktasal analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, özellikle interdendritik bölgelerde laves fazı oluşumuna zemin hazırlayan Nb ve Mo zenginleşmeleri detaylı olarak incelenmiştir. FGM duvar numunelerinde ise, bileşim geçiş bölgelerinin kimyasal homojenliği ve elementel geçiş sürekliliği değerlendirilmiştir. Katmanlar arasında beklenen bileşim değişimlerinin sağlanıp

sağlanmadığı, EDS haritaları ile doğrulanmış; ayrıca potansiyel faz ayrışmaları ve segregasyon bölgeleri analiz edilmiştir. Bu incelemeler, farklı kompozisyonlardaki katman geçişlerinin kimyasal sürekliliği ve üretim kalitesi açısından değerlendirilmesine katkı sağlamıştır.

3.8.3. EBSD analizi

Numunelerde kristal yapının detaylı incelenmesi, tane yönelimleri, iç gerilmeler ve deformasyon bölgelerinin belirlenmesi amacıyla elektron geri saçılma kırınımı analizleri gerçekleştirilmiştir. Tek dikiş numunelerinde ve FGM duvar yapılarında farklı enerji yoğunlukları ve bileşim değişimlerinin mikroyapı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Yapılan EBSD analizlerinde şu haritalar elde edilmiştir:

- IPF haritası; tane yönelimleri ve sütunsu yapılar incelenmiş, katılaşma yönüne bağlı kristal yönelimleri değerlendirilmiştir.
- IQ haritası; kristal kalite dağılımı analiz edilerek, düşük IQ değerlerinin yoğunlaştığı bölgeler potansiyel kusur ve deformasyon alanları olarak yorumlanmıştır.
- Faz haritası; gamma (γ) matris fazının hâkimiyeti doğrulanmış, olası faz dönüşümleri ve ikinci faz oluşumları incelenmiştir.
- KAM haritası; yerel dislokasyon yoğunluğu ve plastik deformasyon izleri analiz edilmiş, özellikle enerji yoğunluğu ve bileşim değişimlerinin neden olduğu iç gerilme birikimleri belirlenmiştir.
- Tane sınırı haritası; yüksek açılı (mavi) ve düşük açılı (kırmızı) tane sınırlarının dağılımı haritalandırılarak, tane sınırı karakterlerinin yapısal bütünlük üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Bu kapsamlı analizlerle, kompozisyon ve proses parametrelerinin mikroyapısal evrim ve potansiyel mekanik performans üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

3.8.4. Porozite ölçüm testi

Fonksiyonel geçişli malzeme duvar numunelerinde, farklı bileşim geçişlerinin yoğunluk ve gözeneklilik üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla arşimet prensibi'ne dayalı klasik yoğunluk ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, numuneler önce havada, ardından

belirli bir sıvı ortamında tartılarak ölçümler gerçekleştirilmiş ve yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, teorik yoğunluk değerleri ile karşılaştırılarak gözeneklilik oranları belirlenmiştir. Yapılan bu analizler, FGM duvar yapılarında üretim parametrelerinin ve bileşim geçişlerinin yoğunluk ve gözeneklilik üzerindeki etkilerini değerlendirmede kullanılmıştır.

3.8.5. Mikro sertlik testleri

Bu çalışmada, FGM duvar yapılarında farklı bileşim oranları ve enerji yoğunluklarının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, ASTM E384 standardına uygun olarak Vickers mikro sertlik yöntemi ile yapılmıştır. Testlerde HV 0,2 skalası kullanılmış ve 136° açılı elmas piramit uç, numune yüzeyine 1,961 N yük altında uygulanmıştır. Her iz için yükleme süresi belirli bir bekleme süresi sonrasında kaldırılmış; oluşan izin köşegen uzunlukları optik mikroskop ile ölçülmüştür. Ölçümler, Highwood HWMMT-X3 marka cihaz ile 20:1 objektif lens büyütmesi ve 25 mm/dk test hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4. SONLU ELEMENLAR TABANLI SAYISAL MODELLE VE ISIL ANALİZLER

Bu bölümde, LYEY yöntemiyle üretilen fonksiyonel geçişli yapıların üretim sürecinde oluşan sıcaklık dağılımlarının ve eriyik havuzu geometrilerinin sayısal olarak analizine yönelik yürütülen sonlu eleman modelleme çalışmaları sunulmuştur. Katmanlı üretim sırasında ortaya çıkan geçici ısı etkilere, malzeme geçiş bölgelerindeki sıcaklık gradyanları ve eriyik havuzu davranışları gibi kritik parametrelerin anlaşılması amacıyla Abaqus yazılımı kullanılarak üç boyutlu, geçici termal analizler gerçekleştirilmiştir.

Modelleme sürecinde, üretim geometrileri ve katman stratejileri dikkate alınarak mesh yapısı, malzeme özellikleri, sınır koşulları ve ısı girdisi tanımlamaları yapılmıştır. Lazerin hareketini ve enerji girdisini temsil etmek üzere, zamanla değişen konum bazlı ısı kaynağı tanımı kullanılmıştır. Farklı kompozisyonlar için farklı enerji yoğunluğu senaryoları modellenmiş ve simülasyon sonuçları, deneysel olarak elde edilen eriyik havuzu şekilleri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

Sayısal analizlerin çıktıları ve deneysel doğrulama sonuçları, beşinci bölümde detaylı olarak sunulmuştur. Bu bölümde ise sadece model kurulumuna ve analiz süreçlerine ilişkin bilgiler yer almaktadır.

4.1. Modelleme Yaklaşımı ve Sonlu Elemanlar Metodu

Bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde, kaynak ve eklemeli imalat gibi yüksek sıcaklık ve hızlı soğuma içeren karmaşık proseslerin analizinde üç boyutlu, geçici ısıl-mekanik sonlu eleman modellerinin kullanımı yaygın hale gelmiştir. Bu tür sonlu eleman modelleri, deneysel çalışmaların tamamlayıcısı olarak görev görmekte; hem ısıl-mekanik davranışların daha iyi anlaşılmasını sağlamakta hem de deneysel yöntemlerle elde edilmesi zor ya da imkânsız olan verilerin (iç gerilmeler, sıcaklık dağılımları, deformasyon alanları vb.) elde edilmesine imkân tanımaktadır. Özellikle yönlendirilmiş lazer enerji yığma gibi çok katmanlı üretim süreçlerinde, katmanlar arası etkileşimler, termal gradyanlar ve art arda gelen termal döngüler nedeniyle ortaya çıkan karmaşık fiziksel olayların modellenmesi, SE analizleri sayesinde daha kontrollü ve sayısal olarak izlenebilir hale gelmiştir.

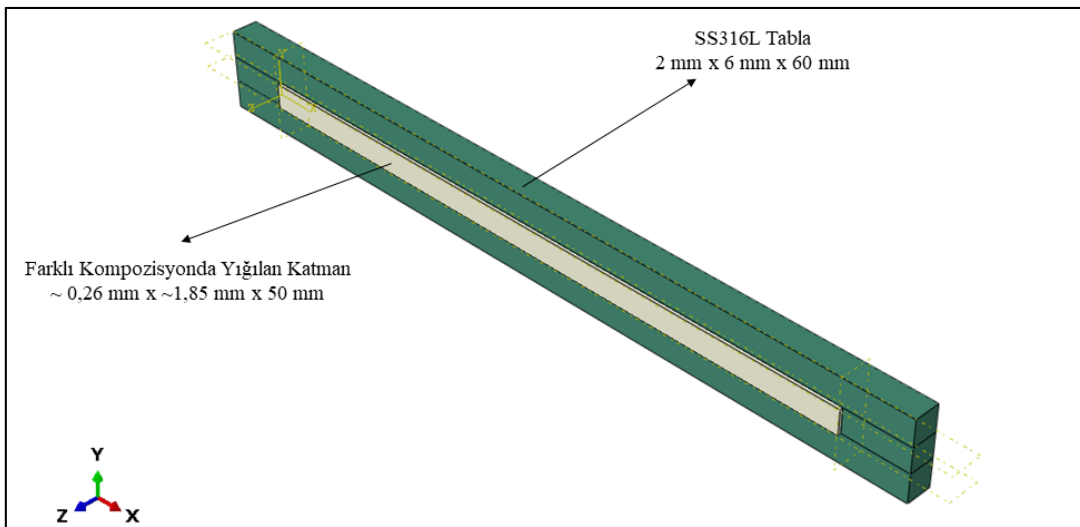
4.1.1. Geometrik modelleme

Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi için oluşturulan üç boyutlu model, LYEY yöntemiyle üretilen tek dikişli numunenin boyutları esas alınarak yapılandırılmıştır. Analizlerde kullanılan geometrik model, üretim sürecinin zamana bağlı termal davranışlarını yansıtacak şekilde tasarlanmıştır.

Üretim, SS316L malzemesinden hazırlanmış altlık üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tek dikiş tek katman modelleme çalışmalarında altlık 2 mm×6 mm×60 mm (kalınlık ×genişlik×uzunluk) boyutlarında kullanılmıştır.

LYEY işlemini sayısal olarak simüle edebilmek amacıyla, öncelikle iş parçasının tablası ve katmanların yığılacağı bölgeler tanımlanmıştır. Tabla, tüm işlem süresince sabit bir referans yüzeyi olarak kabul edilmiş ve farklı kompozisyonlar bu yüzeye sırasıyla biriktirilmiştir. Tek dikişli yapı yaklaşık 50 mm uzunluğunda, 2 mm genişliğinde ve ~2 mm yüksekliğinde olacak şekilde modellenmiştir ve Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Model, LYEY işlemi sırasında lazerin ilerlemesiyle oluşan sıcaklık alanlarını yakalayabilecek şekilde yapılandırılmıştır. Bu doğrultuda, özellikle dikişin bulunduğu bölgeyi daha hassas şekilde temsil edebilmek amacıyla sonlu eleman ağı oluşturulmuş ve analizlerde kullanılmak üzere ağ yapısı bir sonraki başlıkta detaylandırılmıştır.



Şekil 4. 1. Sayısal analizlerde kullanılan 3B model: SS316 taban üzerinde farklı kompozisyonlara sahip katman

4.1.2. Mesh yapısı ve eleman tipi

LYEY sürecinin sonlu elemanlar analizi için hazırlanan modellerde, analiz türüne göre farklı eleman tipleri ve mesh yapıları kullanılmıştır. Bu seçim, hem hesaplama verimliliğini artırmak hem de analiz doğruluğunu optimize etmek amacıyla yapılmıştır.

Isıl (Termal) analiz için mesh ve eleman tipi

Termal analiz modeli, Abaqus/CAE ortamında tanımlanan DC3D8 eleman tipi (3 boyutlu, 8 düğüm noktalı, yalnızca sıcaklık çözümüne uygun eleman) kullanılarak hazırlanmıştır. Isıl analizde lazer kaynaklı sıcaklık dağılımının detaylı şekilde izlenebilmesi için özellikle yığılma bölgesi çevresinde hassas bir mesh yapısı tercih edilmiştir. Bu kapsamda:

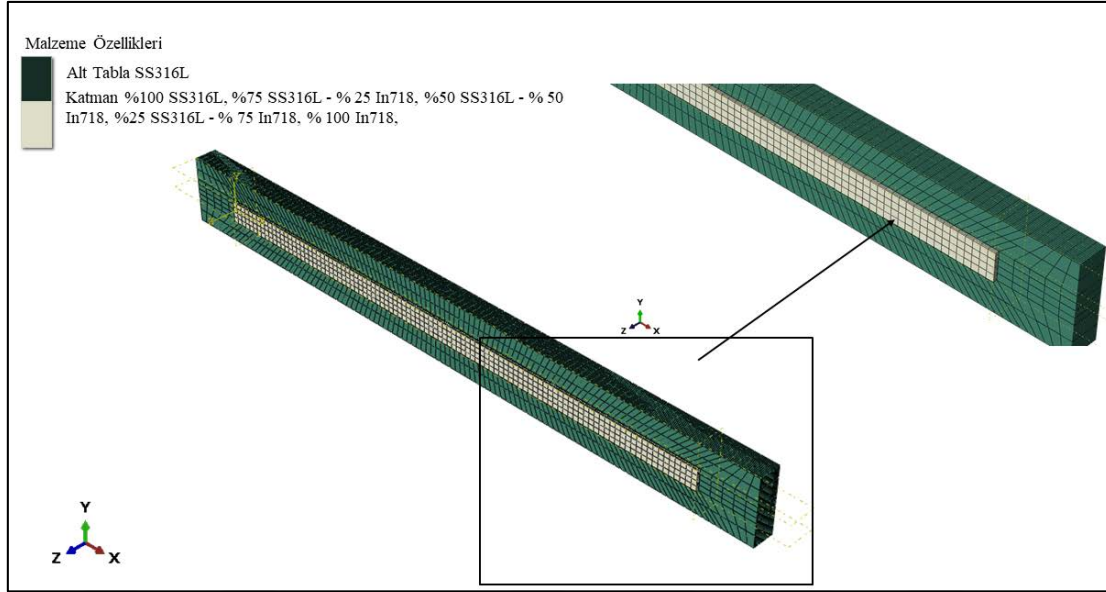
- Yığılma bölgesi: 0,1 mm kenar uzunluğunda ince mesh uygulanmıştır.
- Taban plakası: 0,5 mm'ye kadar daha büyük elemanlarla modellenmiş, çözüm süresi optimize edilmiştir.

Termal analiz adımı, "Isı Transfer" adımı olarak tanımlanmış ve lazerin ilerlemesi olay dizisi aracılığıyla modellenmiştir.

Mekanik analiz için mesh ve eleman tipi

Her ne kadar bu çalışmada yalnızca termal analiz gerçekleştirilmiş olsa da, Abaqus'ta termal mekanik analiz altyapısı da hazırlanmıştır. Mekanik analizde, C3D8T (3 boyutlu, 8 düğümlü, sıcaklığa duyarlı mekanik eleman) tipi kullanılmıştır. Bu elemanlar, termal genişmeden kaynaklı gerilme ve deformasyonların hesaplanmasında tercih edilmektedir. Mekanik modelde mesh yapısı termal model ile aynı şekilde oluşturulmuştur.

Termal analiz sonuçları, mekanik modelde sınır şartı olarak kullanılmak üzere yapılandırılmış; ancak bu çalışmada mekanik analiz gerçekleştirilmemiştir. Malzeme kompozisyonlarının sayısal model üzerindeki dağılımı ve kullanılan ağ yapısı Şekil 4.2'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4. 2. Sayısal modelde %100 SS316L'den %100 IN718'e geçişli beş farklı kompozisyon bölgesi ve ağ yapısı

4.1.3. Malzeme özellikleri

Bu çalışmada, sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan tüm malzemeler izotropik olarak tanımlanmış ve sıcaklığa bağlı termofiziksel özellikler dikkate alınmıştır. Altlık malzemesi olarak SS316L paslanmaz çeliği tercih edilmiş olup, biriktirme bölgesinde %100 SS316L'den %100 IN718'e kadar değişen oranlarda beş farklı kompozisyon tanımlanmıştır. Her kompozisyon, Abaqus ortamında ayrı bir malzeme olarak tanımlanmış ve modelde ilgili eleman gruplarına atanmıştır. Fonksiyonel geçişli yapıdaki elastisite modülü gibi diğer malzeme özellikleri, her bileşenin hacimsel oranına bağlı olarak hesaplanmış ve bu hesaplamada Voigt karışım modeli kullanılmıştır. Bu modele ilişkin teorik açıklama Bölüm 2.2'de detaylı olarak verilmiştir.

SS316L ve Inconel 718 alaşımlarına ait temel ortalama termal özellikler Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu veriler, analizlerde sıcaklık dağılımının doğru tahmin edilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Çizelge 4. 1. SS316L'nin termofiziksel özellikleri [120]

Faz	T [K]	ρ_s , l [kg/m ³]	C_p s, l [J/K/kg]	k_s , l [W/m/K]
Katı	300	7954	499	13,96
Katı	400	7910	512	15,53
Katı	500	7864	525	17,10
Katı	600	7818	538	18,68
Katı	700	7771	552	20,25
Katı	800	7723	565	21,82
Katı	900	7674	579	23,39
Katı	1000	7624	592	24,96
Katı	1100	7574	605	26,53
Katı	1200	7523	618	28,10
Katı	1300	7471	632	29,67
Katı	1400	7419	645	31,25
Katı	1500	7365	658	32,82
Katı	1600	7311	671	34,39
Katı	1700	7256	685	35,96
Sıvı	1750	6979	770	17,98
Sıvı	1800	6920	770	18,31
Sıvı	1900	6857	770	18,64
Sıvı	2000	6791	770	18,97
Sıvı	2100	6721	770	19,3

Çizelge 4. 2. Inconel718'in termofiziksel özellikleri [120]

Faz	T [K]	ρ_s , l [kg/m ³]	C_p s, l [J/K/kg]	k_s , l [W/m/K]
Katı	298	8190	435	8,09
Katı	373	8160	455	10,08
Katı	473	8118	479	12,09
Katı	573	8079	497	15,02
Katı	673	8040	515	17,04
Katı	773	8001	527	18,07
Katı	873	7962	558	20,08
Katı	973	7925	568	21,09
Katı	1073	7884	680	26,09
Katı	1173	7845	640	25,08
Katı	1273	7806	620	26,07
Katı	1373	7767	640	28,03
Katı	1443	7727	650	29,03
Sıvı	1609	7400	720	29,06
Sıvı	1673	7340	720	29,06
Sıvı	1773	7250	720	29,06
Sıvı	1873	7160	720	29,06

4.1.4. Sınır koşulları

Sayısal modelde iş parçasının alt yüzeyine sabitleme koşulları uygulanmıştır. Alt yüzeydeki tüm düğüm noktalarının x, y ve z yönlerindeki yer değiştirmeleri sınırlandırılarak serbest hareketleri engellenmiştir ve Eş.4.1 gösterilmiştir.

$$U_1=U_2=U_3=0 \quad (4.1)$$

Bu sabitleme, üretim sırasında oluşan termal genleşmelerin yalnızca üst katmanlarda değerlendirilmesini sağlamak ve mekanik dengeyi korumak amacıyla uygulanmaktadır.

Modelin tüm yüzeylerine çevresel ısı kaybını temsil edecek şekilde radyasyon ve konveksiyon tanımlamaları yapılmıştır:

- Konveksiyon: Yüzey ile çevre arasındaki ısı alışverişi, konveksiyon katsayısı kullanılarak tanımlanmış olup; ortam sıcaklığı 25 °C olarak belirlenmiştir.
- Radyasyon: Stefan Boltzmann yasasına göre tanımlanmış ve tüm yüzeylerden çevreye doğru enerji yayılımı dikkate alınmıştır. Işıma Katsayısı değeri sabit kabul edilmiştir.

Bu ısı kayıpları, lazer etkisiyle oluşan sıcaklık alanlarının daha gerçekçi modellenmesini ve soğuma süreçlerinin doğru tahmin edilmesini sağlamaktadır.

Simülasyonun doğruluğunu artırmak amacıyla, biriktirme bölgesi ile altlık arasında birleştirme tanımı yapılmıştır. Bu kısıtlama sayesinde, eklenecek katmanlar altlıkla tamamen birleşmiş gibi davranmakta ve termal mekanik etkiler doğru şekilde aktarılmaktadır. Birleştirme kısıtlaması, özellikle birden fazla katman içeren analizlerde katmanlar arası etkileşimin modellenmesi açısından önem taşımaktadır.

4.1.5. Analiz tipi ve adımları

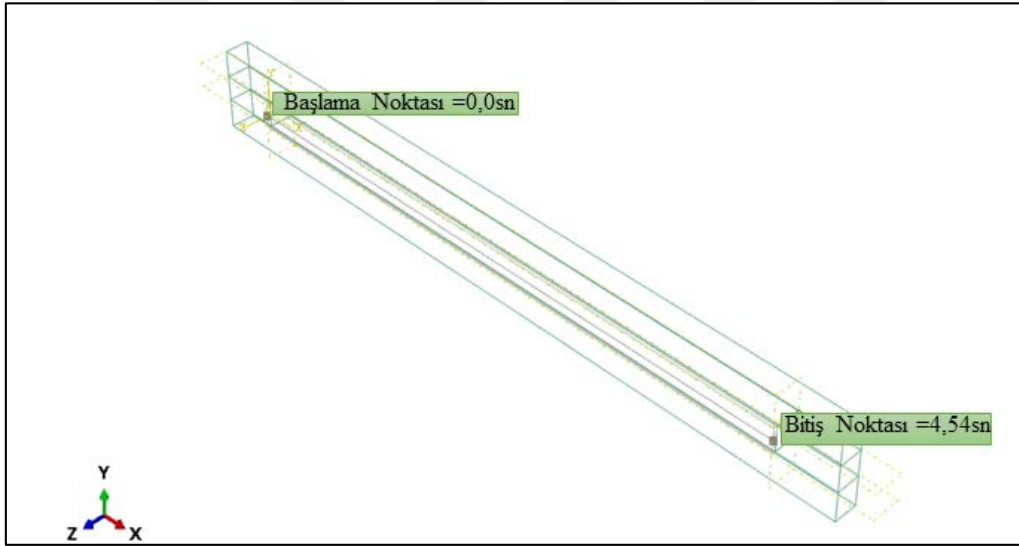
Bu çalışmada, LYEY işleminin termal davranışlarını incelemek amacıyla yalnızca geçici bir ısı geçişi analizi gerçekleştirilmiştir. Isı kaynağı olarak, kaynak proseslerini fiziksel olarak en iyi temsil eden modellerden biri olan Goldak çift elipsoidal ısı kaynağı modeli kullanılmıştır. Bu model, hem lazerin ilerlediği yön (ön bölge) hem de gerisindeki (arka bölge) ısı dağılımını asimetric olarak ifade ederek, eriyik havuzu ve ısı etkisi altındaki bölgenin (HAZ) daha doğru simülasyonunu mümkün kılar.

Goldak modeli kapsamında kullanılan parametreler (ön ve arka bölgeye ait elipsoidal yarı eksenler, ısı giriş gücü, absorpsiyon oranı vb.), bu çalışmada deneysel olarak elde edilen tek dikiş üretimlerinin geometrik ölçüleri esas alınarak belirlenmiştir. Böylece, ısı kaynağının

etkisi altında oluşan sıcaklık dağılımı, gerçek üretim boyutlarına uygun biçimde modellenmiştir.

Lazerin iş parçası üzerindeki hareketi, olay dizisi tanımı kullanılarak zamanla ilerleyecek şekilde modellenmiştir. Böylece, farklı konumlardaki elemanlar, lazer geçişine bağlı olarak sırayla ısıtılmış ve ısı döngüler gerçeğe uygun şekilde yakalanmıştır.

Goldak modeli sayesinde, hem eriyik havuzu sınırları hem de katılaşma sonrası sıcaklık dağılımları literatürle uyumlu, fiziksel gerçekliğe yakın bir şekilde elde edilmiştir. Isı kaynağının iş parçası üzerindeki ilerleyişi, Eİ model arayüzünde tanımlanan olay dizisi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Bu hareketin başlangıç ve bitiş noktaları Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Eİ modelinde tanımlanan olaylar dizisi boyunca ısı kaynağının başlangıç (0,00 s) ve bitiş (4,54 s) noktaları

4.1.6. Model varsayımları

Literatür araştırmaları, LYEY işleminde toz toplama verimliliği, yığma geometrisi, seyreltme oranı ve artık gerilmelerin üretim parametrelerinin bir fonksiyonu olarak doğru şekilde tahmin edilebileceği kapsamlı ve fizik tabanlı bir modelin henüz geliştirilmediğini göstermektedir. Bu parametreler arasında lazer gücü, lazer nokta çapı, toz besleme hızı, tarama hızı, taşıyıcı gaz akışı, nozul geometrisi, toz parçacık boyutu ve kullanılan malzemelerin (altlık ve yığma bölgesi) termofiziksel ve metalurjik özellikleri yer almaktadır.

Bu bağlamda, LYEY yönteminin daha ileri düzeyde modellenenebilmesi için, lazer toz altlık etkileşimini kapsayan teorik yaklaşımların geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

Fizik temelli modeller, genellikle sayısal ve analitik modelleme yaklaşımlarını birlikte kullanarak, sürecin bir aşamasından diğerine fiziksel değişkenlerin aktarımına olanak tanır. LYEY süreci, birden fazla fiziksel aşamaya bölünebilir ve her bir aşamada farklı parametrelerin etkisi belirginleşir. Özellikle toz lazer altlık etkileşimi sonucu oluşan eriyik havuzu, yığma kalitesini ve nihai mikro yapıyı doğrudan etkiler. Literatür araştırmaları, sayısal modellemenin toz akışı, lazer toz etkileşimi, yığma geometrisi ve sıcaklık dağılımı gibi süreç parametrelerinin modellenmesinde etkili bir yöntem olduğunu; analitik modellemenin ise temel fiziksel davranışları anlamak adına klasik ancak açıklayıcı bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında kurulan sonlu elemanlar temelli termal analiz modeli, çözüm süresini makul seviyede tutmak ve fiziksel temsiliyet sağlamak amacıyla aşağıdaki varsayımlar altında geliştirilmiştir:

- Alt tabaka yüzeyi, koaksiyel nozul eksenine ve yerçekimi yönüne diktir.
- Eriyik havuzun yüzeydeki yayılması ihmal edilmiştir.
- Lazer ışını, tarama yönünde hareket eden, düzgün dağılmış dairesel bir ısı kaynağı olarak tanımlanmış; ısı akısı çemberinin yarıçapı lazer nokta çapına eşit kabul edilmiştir.
- Güç dağılımı, çift elipsoidal Goldak modeli ile temsil edilmiştir.
- Alt tabaka, toz jetinin odak noktasına yerleştirilmiş olup, bu bölgede toz dağılımı dairesel Gauss profiline sahiptir.
- Konveksiyon kaynaklı Marangoni akışı ihmal edilmiştir.
- Ortam sıcaklığı sabit 300 K (yaklaşık 25 °C) olarak kabul edilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, LYEY yöntemiyle üretilen tek dikiş ve FGM duvar numunelerine ait deneysel ve sayısal analiz sonuçları sunulmuştur. Çalışmada, enerji yoğunluğu ve kompozisyon değişimlerinin eriyik havuzu geometrisi, mikro yapı, kimyasal bileşim ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Abaqus tabanlı sayısal modelleme çalışması yalnızca tek dikiş numunelerine yönelik olarak gerçekleştirilmiş ve bu model aracılığıyla eriyik havuzu geometrisi öngörülmüştür. Sayısal analiz sonuçları, deneysel bulgularla karşılaştırılarak modelin doğruluğu değerlendirilmiş ve uygun enerji yoğunluğu aralıklarının belirlenmesine katkı sağlamıştır. Bu analizler, FGM duvar yapılarında uygulanacak üretim parametrelerinin belirlenmesinde yol gösterici olmuştur.

FGM duvar numunelerinde ise, bileşim geçişlerinin ve proses parametrelerinin etkileri SEM, EDS ve EBSD analizleriyle incelenmiş; ayrıca mikro sertlik ve arşimet prensibine dayalı yoğunluk ölçümleri ile malzeme performansı değerlendirilmiştir.

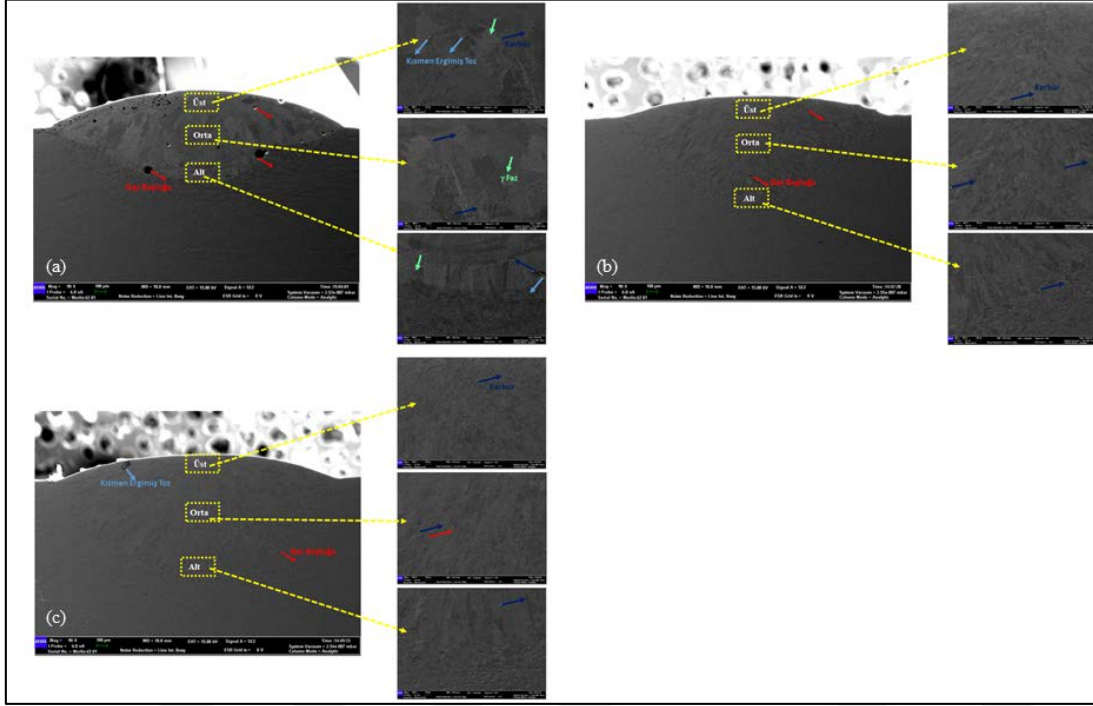
5.1. Tek Dikiş Numunelerin Deneysel Sonuçları

Bu bölümde, LYEY yöntemiyle farklı kompozisyonlarda üretilmiş tek dikiş numunelerine ait mikro yapı, kimyasal bileşim ve kristal yapıyönlenme analiz sonuçları detaylı biçimde sunulmuştur. Çalışmada %100 SS316L, %75 SS316L-%25 IN718, %50 SS316L-%50 IN718, %25 SS316L-%75 IN718 ve %100 IN718 kompozisyonlarına sahip numuneler üzerinde incelemeler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bileşim değişiminin mikro yapısal evrim, element dağılımı ve kristal yönlenme üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

5.1.1. Mikro yapı ve kimyasal bileşim analizleri

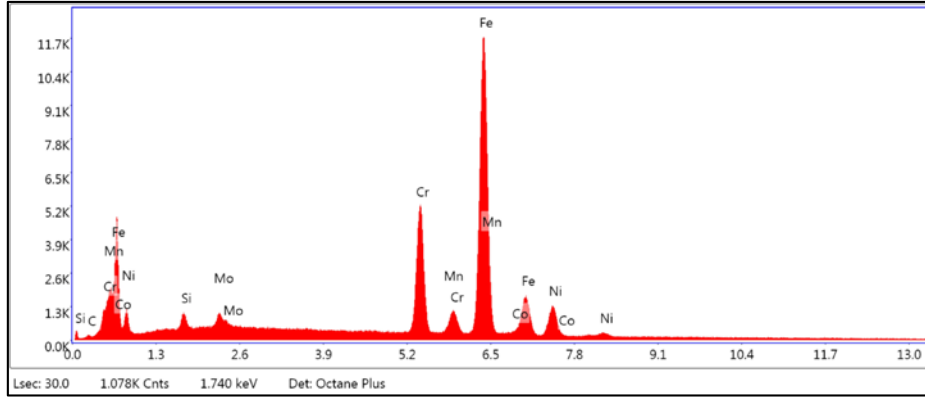
Farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarında üretilen tek dikiş numunelerin mikro yapı morfolojileri ve kimyasal bileşim dağılımları sırasıyla SEM ve EDS analizleri ile değerlendirilmiştir. SEM görüntüleri, bileşim oranlarına bağlı olarak eriyik havuzu katılaşma yapılarında ve mikro gözenek oluşumlarında belirgin farklılıklar ortaya

koymuştur. EDS haritalamaları ise, IN718 oranının artmasıyla birlikte Nb, Mo ve Ti elementlerinin yoğunlaştığı bölgelerde mikrosegregasyon eğilimlerini ortaya çıkarmıştır. Her bir kompozisyon için elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur:

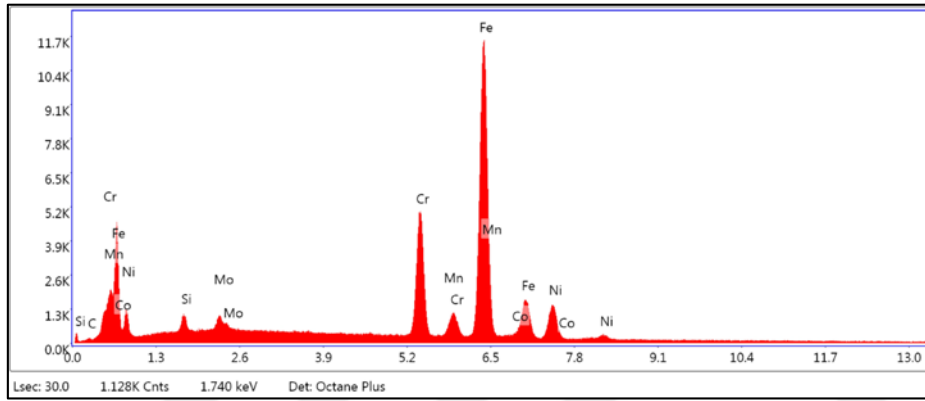


Resim 5.1. %100 SS316L kompozisyonuna ait tek dikiş numunelerin farklı enerji yoğunluklarında (a) 54,54 J/mm², (b) 65,45 J/mm² ve (c) 76,36 J/mm² ile üretilmiş SEM görüntüleri

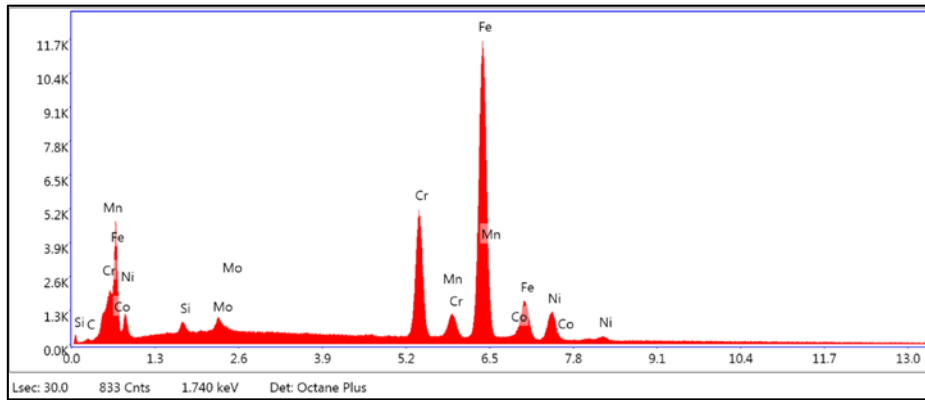
%100 SS316L kompozisyonuna ait tek dikiş numuneler, sırasıyla 54,54, 65,45 ve 76,36 J/mm² enerji yoğunluklarına karşılık gelen 1500 W, 1800 W ve 2100 W lazer güçleri kullanılarak üretilmiştir. Bu numunelere ait mikro yapı ve kimyasal bileşim analizleri Resim 5.1’de sırasıyla (a), (b) ve (c) alt görselleri olarak sunulmuştur. SEM görüntülerinde, tüm enerji seviyelerinde yüzeye yakın bölgelerde eş eksenli ve ince taneli yapılar gözlenmiş, bu durum yüksek çekirdeklenme oranı ve hızlı katılaşma koşullarına işaret etmiştir. Düşük enerji yoğunluğunda (54,54 J/mm²) daha homojen taneler ve dengeli bir yapı elde edilirken, lazer gücü arttıkça yönlenmiş dendritik yapılar belirginleşmiştir. Ayrıca, bazı bölgelerde kısmen ergimiş toz partikülleri ve gaz boşlukları tespit edilmiştir. Görseller üzerinde renkli oklarla gösterilen yapılar arasında kırmızı oklarla belirtilen gaz boşlukları ve lacivert oklarla işaretlenen karbür oluşumları dikkat çekmektedir.



(a)



(b)

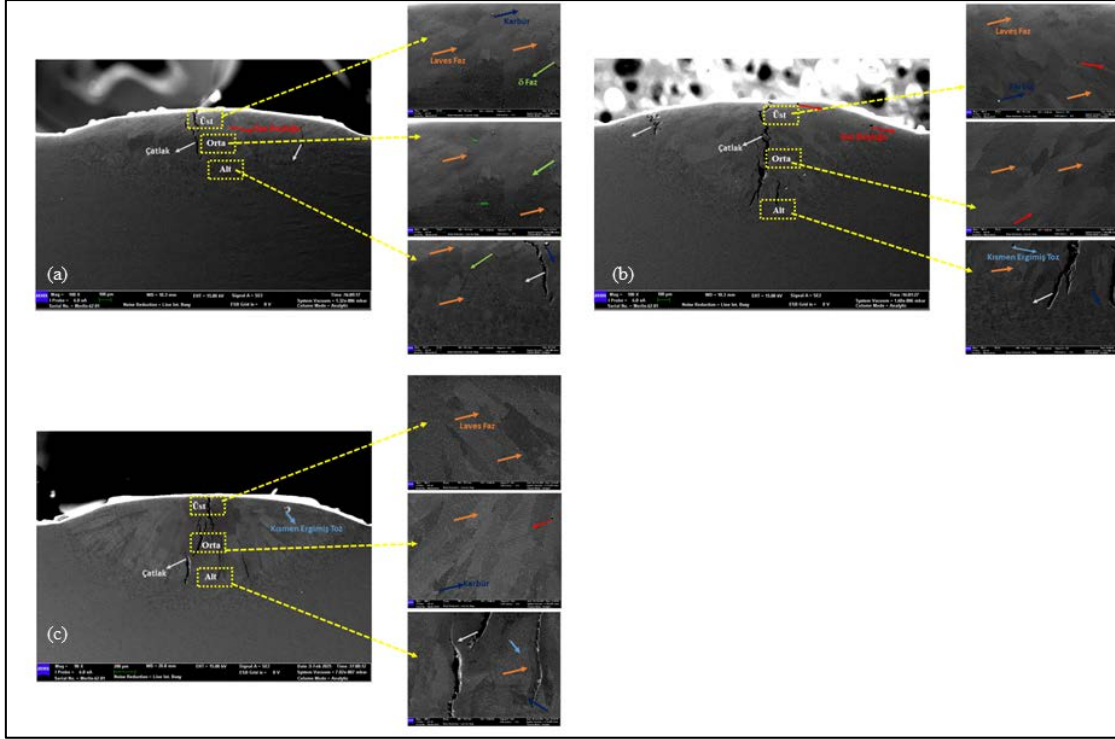


(c)

Resim 5.2. %100 SS316L kompozisyonuna ait tek dikiş numunenin (a) üst, (b) orta ve (c) alt bölgelerinden elde edilen EDS harita görüntüleri

LYEY yöntemiyle %100 SS316L kullanılarak üretilen tek dikişli numunede yapılan EDS analizleri, alaşımın tipik bileşimiyle yüksek uyumlu bir yapı sergilediğini göstermiştir. Üst (a), orta (b) ve alt (c) bölgelerden alınan EDS haritalamaları Resim 5.2’de sunulmuştur. Üç

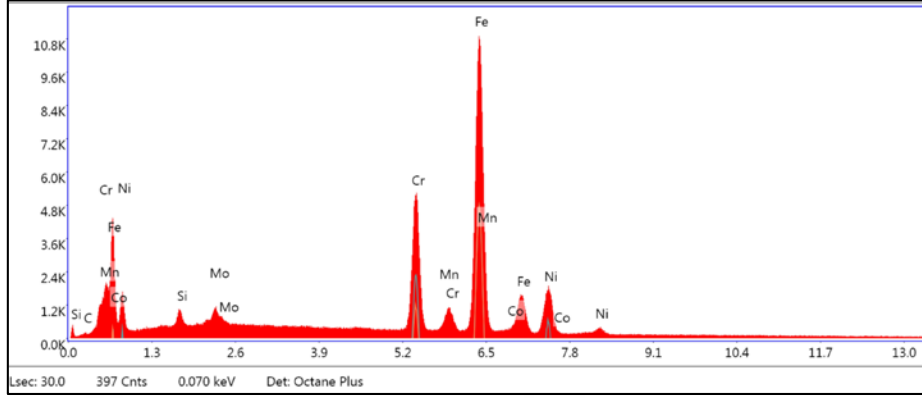
bölgede de benzer element dağılımı gözlenmiş olup, değerlendirme ortak olarak yapılmıştır. Elde edilen kimyasal bileşimde Fe (%61-65), Cr (%17,6-18,1), Ni (%9-10), Mo (%1,5-1,9) ve Mn (%1,6-1,8) elementleri nominal değerlere yakın oranlarda tespit edilmiştir. Co oranı %2,5-2,7 aralığında olup, Cr ile birlikte bulunması $M_{23}C_6$ tipi karbür çökeltilerinin oluşma potansiyeline işaret etmektedir.



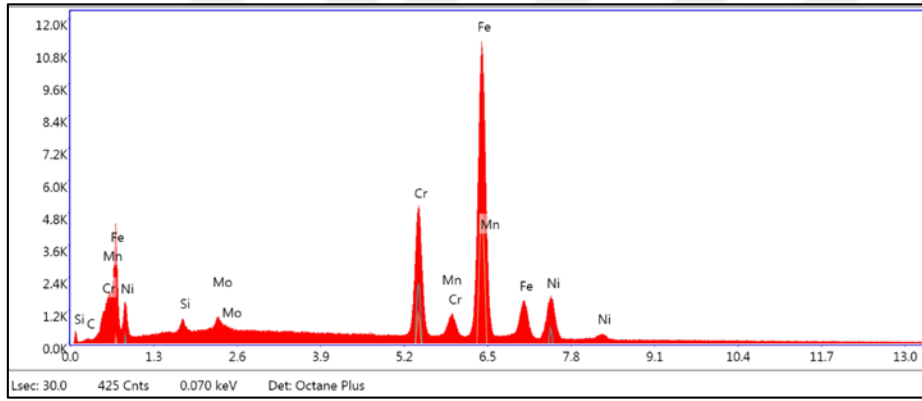
Resim 5.3. %75 SS316L - %25 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunelerin farklı enerji yoğunluklarında (a) 54,54 J/mm², (b) 65,45 J/mm² ve (c) 76,36 J/mm² ile üretilmiş SEM görüntüleri

%75 SS316L - %25 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numuneler, sırasıyla 54,54, 65,45 ve 76,36 J/mm² enerji yoğunluklarında üretilmiş olup, elde edilen SEM görüntüleri Resim 5.3'te (a), (b) ve (c) olarak sunulmuştur. Artan IN718 oranının etkisiyle, önceki %100 SS316L yapıya kıyasla mikroyapı morfolojisinde daha fazla yönlendirilmiş dendritik oluşumlar ve bölgesel mikrosegregasyonlar gözlenmiştir. Özellikle yüksek enerji yoğunluklarında daha keskin ve büyümüş dendrit kolları tespit edilmiştir. Üst bölgelerde çatlak oluşumları, iç bölgelerde ise belirgin gaz boşlukları ve kısmen ergimiş toz partikülleri görülmüştür. Ayrıca, laves fazı gibi IN718'e özgü intermetalik yapılar daha belirgin hale gelmiştir. Bu kompozisyona özgü olarak, Resim 5.3'teki görüntülerde turuncu oklar laves fazını ve beyaz oklar çatlak bölgelerini göstermektedir. Karbür oluşumları (lacivert ok) ve kısmen ergimiş

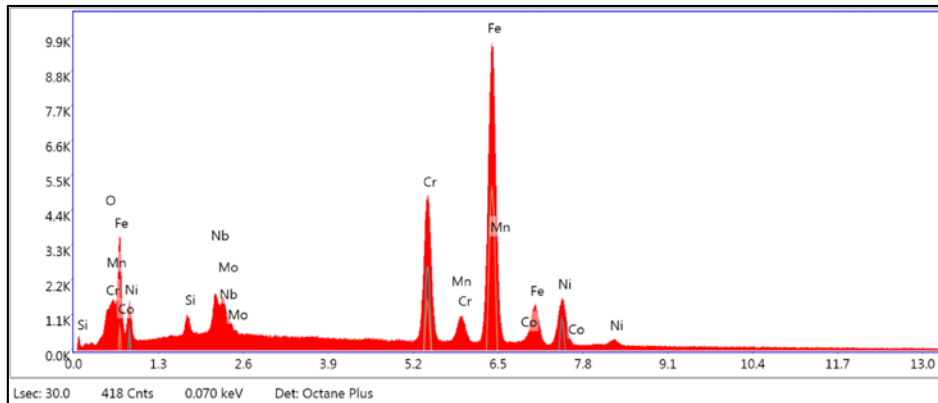
toz partikülleri (mavi ok) gibi diğer yapılar ise önceki Resim 5.1’de tanımlanan renk kodlarıyla aynı şekilde işaretlenmiştir.



(a)



(b)



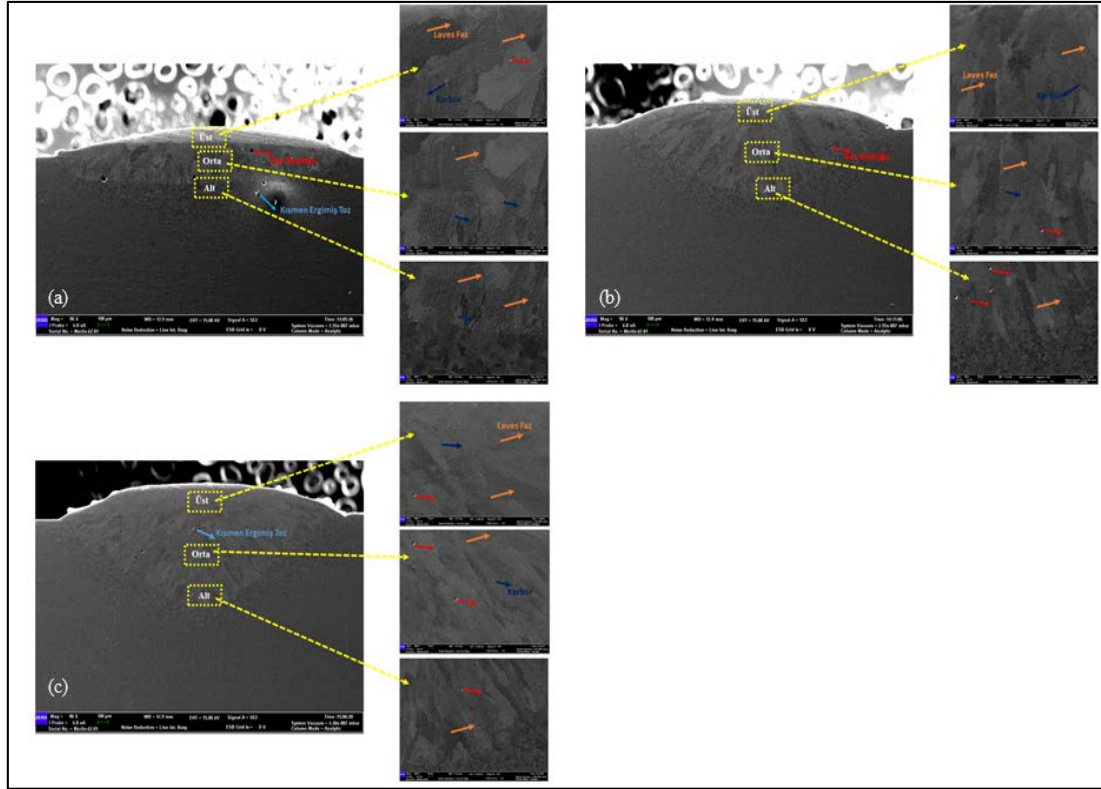
(c)

Resim 5.4. %75 SS316L - %25 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunenin (a) üst, (b) orta ve (c) alt bölgelerinden elde edilen EDS harita görüntüleri

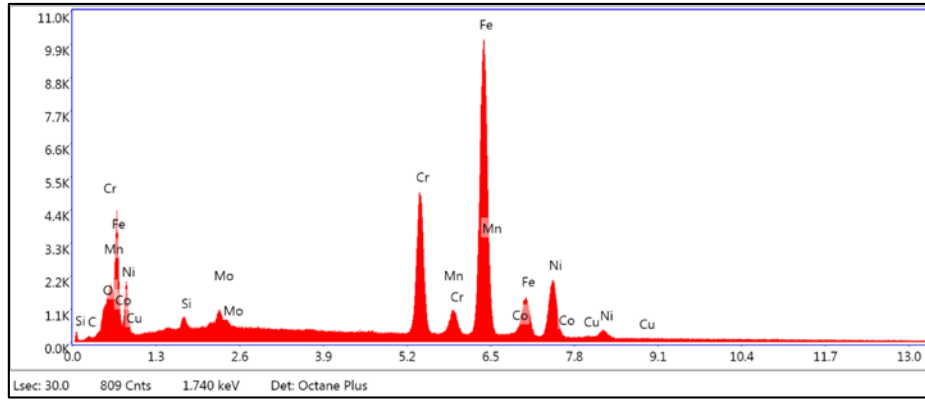
%75 SS316L - %25 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunelere farklı enerji yoğunluklarında uygulanan EDS analizlerinde benzer dağılımlar gözlenmiş olup, temsili olarak orta enerji yoğunluğuna (65,45 J/mm²) ait analizler değerlendirilmiştir. Resim 5.4'te, bu numunenin orta bölgesine ait EDS haritaları sunulmaktadır. Analiz sonuçları, farklı bölgelerde belirgin elementel segregasyonların ve faz ayrışmalarının meydana geldiğini göstermektedir. Üst ve orta bölgelerde Nb tespit edilemezken, alt bölgede yaklaşık %4,2 oranında Nb bulunmuştur. Bu durum, Nb'nin interdendritik bölgelerde segrege olarak laves fazı oluşturduğunu düşündürmektedir. Üst bölgede yüksek oranda tespit edilen C (%2,6) ve Co (%1,3) elementleri, Cr ve Mo ile birlikte değerlendirildiğinde Cr₇C₃, Cr₂₃C₆ ve Mo₂C gibi karbür çökeltilerinin oluşma potansiyelini ortaya koymaktadır. Orta bölgede Co tespit edilmemiştir; ancak Cr ve C oranlarının yüksekliği, M₂₃C₆ tipi karbür oluşumu ile uyumlu bulunmuştur. Alt bölgede ise tespit edilen Nb, Mo ve O elementleri, hem laves fazı hem de Nb-oksit oluşumu açısından anlamlıdır.

Bu bulgular, LYEY üretiminde yalnızca toz karışım oranlarının değil, aynı zamanda lokal termal koşulların da faz oluşumu üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermekte; bu nedenle yapısal bütünlüğün korunması açısından sürecin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesini gerektirmektedir.

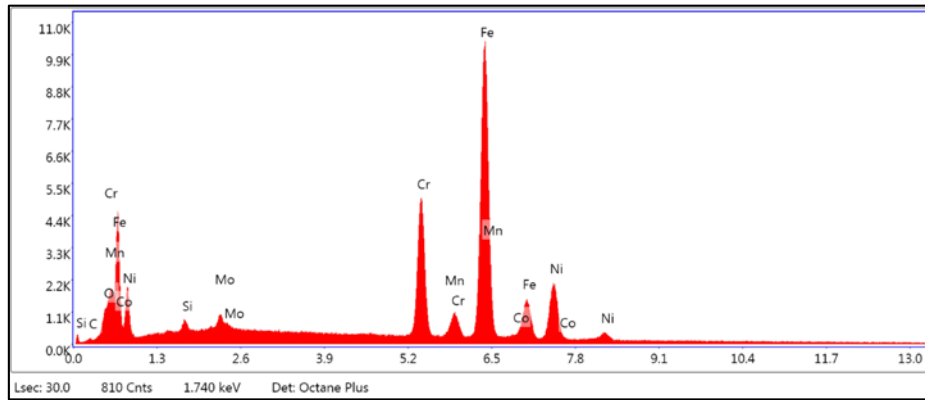
%50 SS316L - %50 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numuneler, 54,54, 65,45 ve 76,36 J/mm² enerji yoğunluklarıyla üretilmiş olup, SEM görüntüleri Resim 5.5'te (a), (b) ve (c) olarak sunulmuştur. Bu kompozisyonda SS316L ve IN718 tozlarının eşit oranlarda bulunması, mikroyapıda belirgin dendritik yapılar ve faz segregasyonları ile kendini göstermiştir. Özellikle orta ve yüksek enerji yoğunluğunda, yönlenmiş hücrel dendritik yapılar baskın hâle gelmiş, buna bağlı olarak da bazı bölgelerde gaz boşlukları oluşmuştur. Resim 5.5'te sunulan SEM görüntülerinde, turuncu oklarla gösterilen laves fazları ve lacivert oklarla işaretlenen karbür çökeltileri belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Ayrıca kırmızı okla belirtilen gaz boşlukları, tüm enerji yoğunluklarında görülebilir. Diğer mikroyapısal göstergeler için kullanılan renkli işaretlemeler önceki şekillerle tutarlıdır (bkz. Resim 5.1).



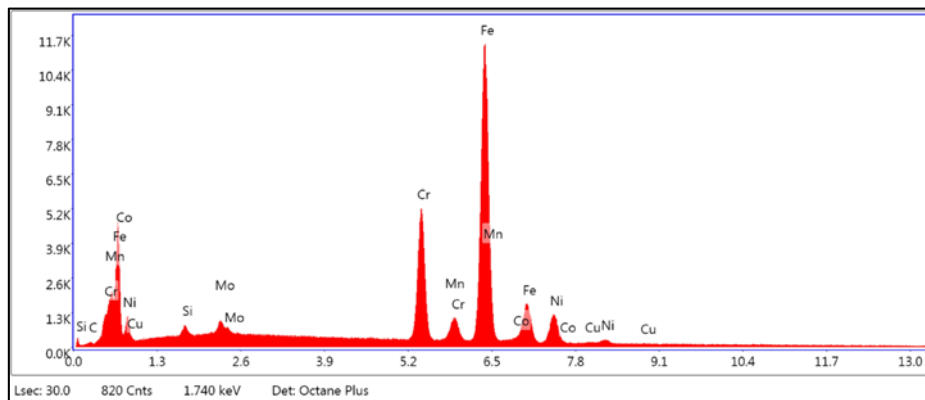
Resim 5.5. %50 SS316L - %50 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunelerin farklı enerji yoğunluklarında (a) 54,54 J/mm², (b) 65,45 J/mm² ve (c) 76,36 J/mm² ile üretilmiş SEM görüntüleri



(a)



(b)



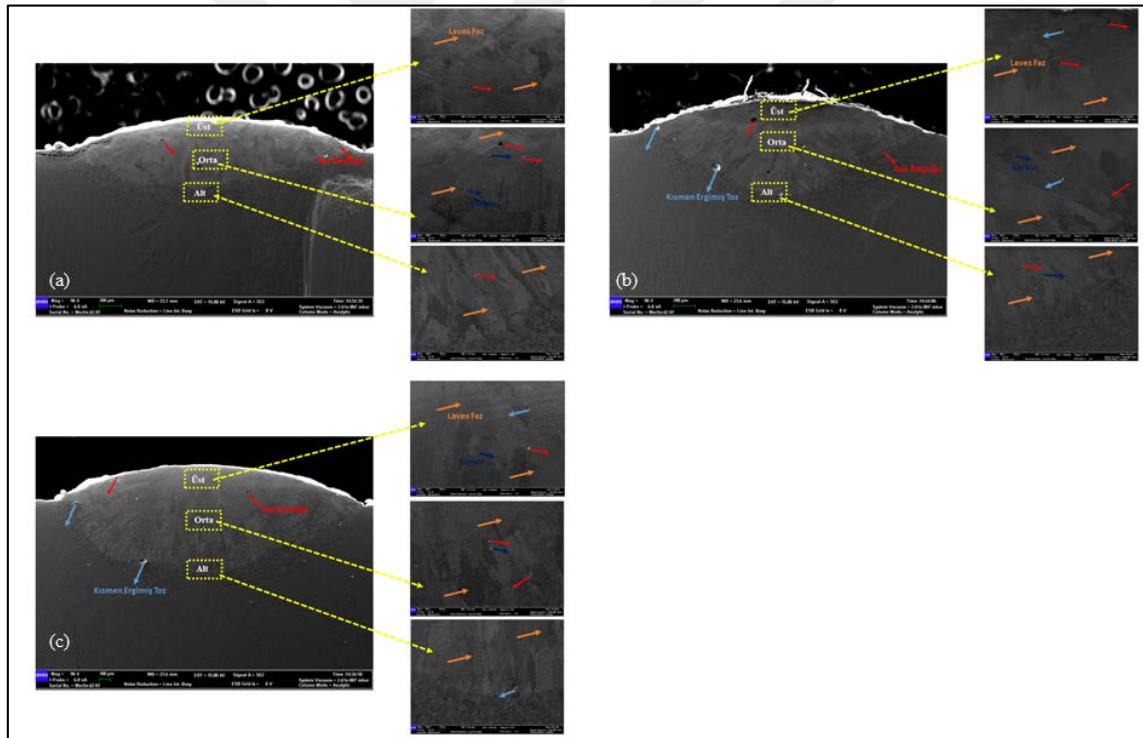
(c)

Resim 5.6. %50 SS316L - %50 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunenin (a) üst, (b) orta ve (c) alt bölgelerinden elde edilen EDS harita görüntüleri

EDS analizleri, önceki numunelerde olduğu gibi bu kompozisyonda da yalnızca orta enerji yoğunluğu ($65,45 \text{ J/mm}^2$) ile üretilen numunenin orta bölgesinden elde edilen verilere dayanarak değerlendirilmiştir. Resim 5.6’da sunulan EDS haritalarında, eşit oranlı SS316L

ve IN718 içeriğine sahip yapının kimyasal dağılımı gözlemlenmektedir. Analiz sonuçlarına göre, Fe, Cr ve Ni gibi temel elementler numune genelinde homojen şekilde dağılmıştır. Buna karşın, Nb ve Ti elementleri EDS analizinde tespit edilememiştir. Bu durum, bu elementlerin katı çözelti yerine interdendritik bölgelerde laves fazı veya diğer çökelti fazlarına segregasyon olmuş olabileceğini göstermektedir. Ni içeriği bazı bölgelerde %16 seviyesine kadar çıkarken, Mo oranı %1,5-1,8 aralığında değişmiştir. Ayrıca Cu (%0,4-0,6) ve Co (%1,3) elementlerinin varlığı, lokal mikrosegregasyonlar veya üretim sürecinden kaynaklanan iz bileşen etkisi ile açıklanabilir.

EDS bulguları, SEM görüntülerinde gözlemlenen laves fazı ve karbür çökeltilerinin kimyasal zeminini desteklemekte, kompozisyon dengesinin bozulduğu bölgelerde faz ayrışmalarının daha yoğun olduğunu ortaya koymaktadır.



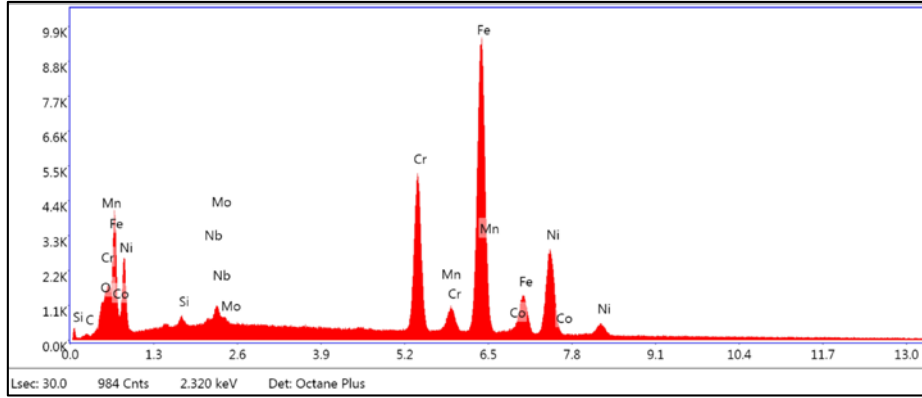
Resim 5.7. %25 SS316L - %75 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunelerin farklı enerji yoğunluklarında (a) 54,54 J/mm², (b) 65,45 J/mm² ve (c) 76,36 J/mm² ile üretilmiş SEM görüntüleri

%25 SS316L - %75 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numuneler, 54,54, 65,45 ve 76,36 J/mm² enerji yoğunluklarında üretilmiş olup, SEM görüntüleri Resim 5.7’de (a), (b) ve (c) olarak sunulmuştur. IN718 oranının yüksek olması nedeniyle bu kompozisyonda mikroyapıdaki dendritik yapıların daha belirginleştiği, intermetalik faz oluşumunun ise

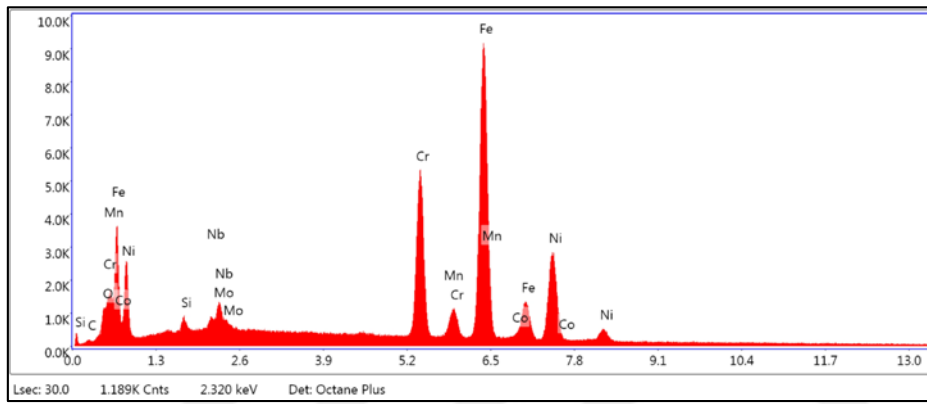
yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Artan enerji yoğunluğu ile birlikte dendrit kol büyüklükleri artmış, özellikle üst bölgelerde kısmen ergimiş toz partikülleri ve gaz boşlukları daha sık görülmüştür. Resim 5.7'deki SEM görüntülerde, turuncu oklarla işaretlenen laves fazı, lacivert oklarla gösterilen karbür çökeltileri, kırmızı oklarla belirtilen gaz boşlukları ve açık mavi oklarla işaretlenen kısmen ergimiş toz partikülleri açıkça tespit edilmiştir. Bu yapılar, önceki kompozisyonlara kıyasla daha yaygın ve daha yoğun şekilde gözlenmiş; IN718'in mikrosegregasyona yatkın doğasını ve yüksek sıcaklıkta faz ayrışmalarını artırma eğilimini yansıtmaktadır. Diğer işaretlemeler, önceki şekillerle tutarlıdır (bkz. Resim 5.1).

EDS analizleri, %25 SS316L - %75 IN718 kompozisyonuna ait ve orta enerji yoğunluğu ($65,45 \text{ J/mm}^2$) ile üretilmiş numunenin orta bölgesinden alınan üç farklı noktaya ait verilere dayalı olarak değerlendirilmiştir. Resim 5.8'de sunulan EDS haritaları, bu kompozisyonda IN718'e özgü elementlerin yoğunluğunun yüksek olduğunu ve yerel kimyasal farklılıkların faz ayrışmalarına zemin hazırladığını göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre, Ni (%20,3-22,5) oranları FCC fazın korunduğunu, Nb (%0,4-1,9) ve Mo (%1,4-2,2) birikimleri ise laves fazı oluşumuna uygun bir ortam sağlandığını ortaya koymaktadır. Cr (%18,0-18,6) ile birlikte tespit edilen karbon (%2,6-2,8) varlığı, özellikle M_{23}C_6 tipi karbür çökeltilerinin oluşma potansiyelini desteklemektedir. Ayrıca oksijen (%0,6-0,8) ve Nb elementlerinin aynı bölgelerde saptanması, Nb oksit oluşumu açısından dikkat çekicidir. Co (%1,0-1,2) elementinin tüm bölgelerde homojen şekilde dağılması, FCC faz stabilizasyonunu desteklediğini göstermektedir.

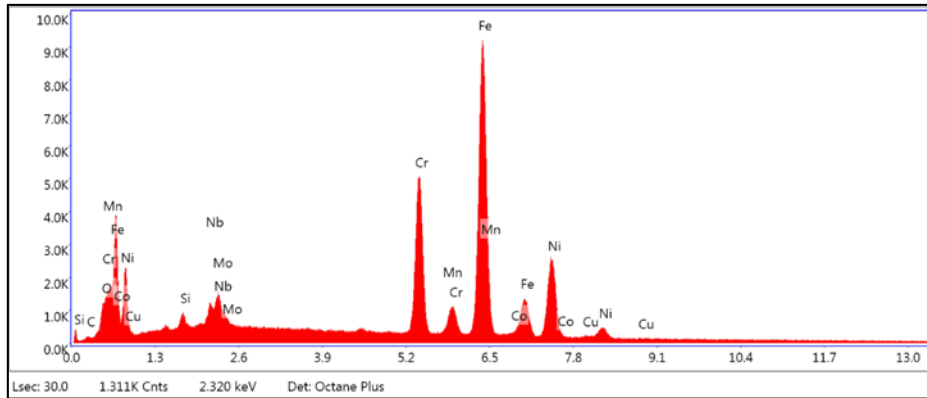
Sonuç olarak, bu kompozisyonda artan IN718 oranı ve uygulanan $65,45 \text{ J/mm}^2$ enerji yoğunluğu altında, mikroyapısal olarak segregasyon, intermetalik faz oluşumu ve çökelti fazlarının gelişimi belirginleşmiş; bu da yapısal bütünlük ve mekanik performans açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken bir durum ortaya koymuştur.



(a)

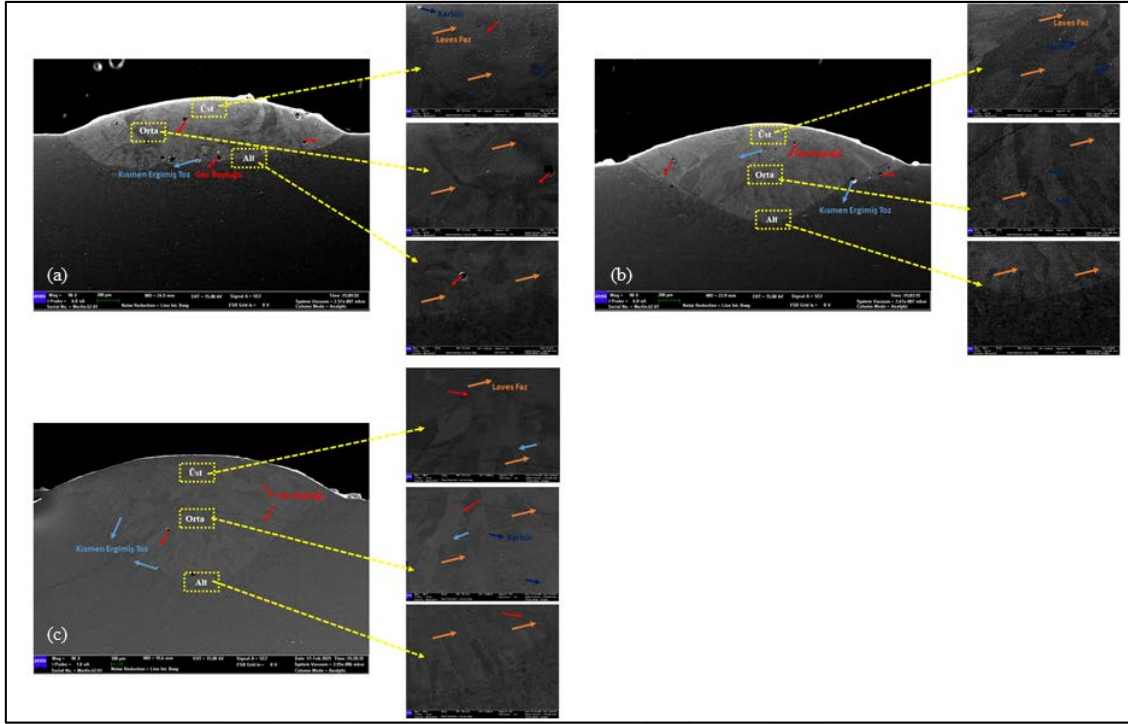


(b)



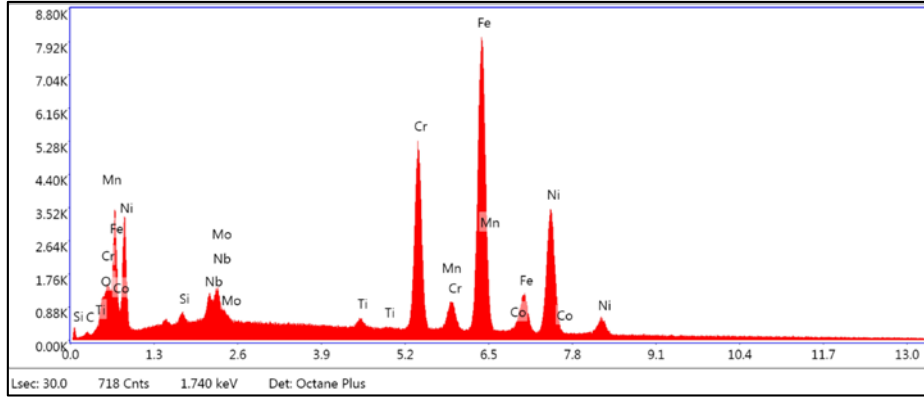
(c)

Resim 5.8. %25 SS316L - %75 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunenin (a) üst, (b) orta ve (c) alt bölgelerinden elde edilen EDS harita görüntüleri

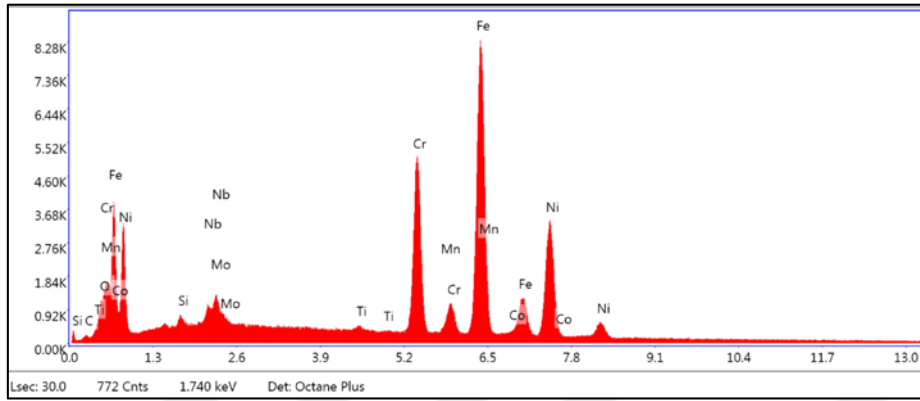


Resim 5.9. %100 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunelerin farklı enerji yoğunluklarında (a) 54,54 J/mm², (b) 65,45 J/mm² ve (c) 76,36 J/mm² ile üretilmiş SEM görüntüleri

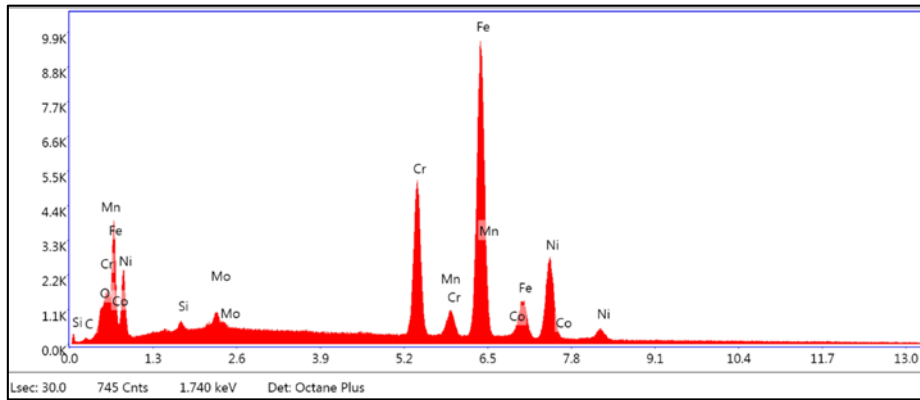
Son olarak, %100 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numuneler, 54,54, 65,45 ve 76,36 J/mm² enerji yoğunluklarında üretilmiş olup, SEM görüntüleri Resim 5.9'da (a), (b) ve (c) olarak sunulmuştur. IN718'in yüksek alaşım içeriği nedeniyle tüm enerji seviyelerinde belirgin dendritik katılaşma yapıları, faz segregasyonları ve intermetalik çökeltiler gözlemlenmiştir. Artan enerji yoğunluğu ile birlikte eriyik havuzu hacmi büyümüş, dendritik kolların uzaması ve yapısal düzensizliklerin artması dikkat çekmiştir. Resim 5.9'da, turuncu oklarla işaretlenen laves fazları, lacivert oklarla gösterilen karbür çökeltileri, kırmızı oklarla belirtilen gaz boşlukları ve açık mavi oklarla tanımlanan kısmen ergimiş toz partikülleri yaygın şekilde tespit edilmiştir. Bu yapılar, IN718 alaşımının yüksek enerji girdisine verdiği karakteristik tepkiyi temsil etmekte olup, önceki kompozisyonlarla kıyaslandığında mikroporozite ve faz ayrışmasının daha yoğun olduğu görülmüştür.



(a)



(b)



(c)

Resim 5.10. %100 IN718 kompozisyonuna ait tek dikiş numunenin (a) üst, (b) orta ve (c) alt bölgelerinden elde edilen EDS harita görüntüleri

EDS analizleri, bu kompozisyona ait 65,45 J/mm² enerji yoğunluğuyla üretilmiş numunenin üst, orta ve alt bölgelerinden alınan verilere dayanarak gerçekleştirilmiştir Resim 5.10. Ni (%21-27), Cr (%18-19) ve Fe (%37-45) gibi FCC matris elementleri tüm bölgelerde yüksek

oranda bulunmuştur. Nb (%3,5-4,6) ve Ti (%0,8-1,1) gibi mukavemet artırıcı elementler de yeterli seviyelerde saptanmış olup, Nb–Mo zenginleşmesi laves fazı oluşumu açısından dikkat çekicidir. Cr ile birlikte tespit edilen karbon (%2,5-2,9) içeriği $M_{23}C_6$ tipi karbür çökeltilerini desteklerken, oksijen (%0,7-0,9) ile birlikte bulunan Nb varlığı ise Nb-oksit fazlarının oluşma potansiyeline işaret etmektedir.

Bu bulgular, hem SEM hem de EDS analizleriyle birlikte değerlendirildiğinde, yüksek IN718 içeriğinin ve artan lazer gücünün yapısal kararlılığı bozarak segregasyon ve gevrek faz oluşumu riskini artırdığını ortaya koymaktadır.

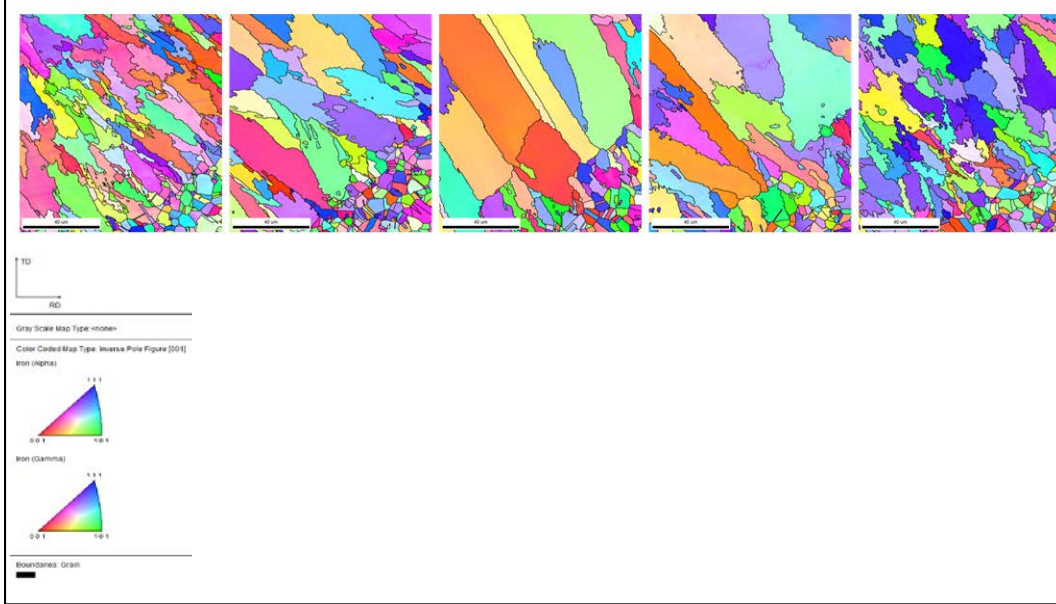
Farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarında üretilen tek dikiş numunelere ait SEM ve EDS analizleri, bileşim oranı ve uygulanan enerji yoğunluğunun mikro yapısal özellikler ve kimyasal homojenlik üzerinde belirleyici etkileri olduğunu göstermiştir. SEM görüntülerinde, IN718 oranının artmasıyla birlikte mikroyapının daha belirgin dendritik yapılara dönüştüğü, intermetalik fazların ve porozite oluşumunun yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Düşük enerji yoğunluklarında daha homojen ve ince taneli yapılar elde edilirken, yüksek enerji yoğunluklarında yönelmiş dendritik morfoloji, laves fazı, karbür çökeltileri ve kısmen ergimiş toz partiküllerine bağlı mikroyapısal bozulmalar artmıştır. EDS analizleri ise bu morfolojik bulguları kimyasal düzeyde desteklemiş; özellikle Nb, Mo ve Ti gibi elementlerin IN718 içeriği ile birlikte interdendritik bölgelerde zenginleştiği, bu durumun laves fazı ve karbür çökeltilerinin oluşumuna zemin hazırladığı belirlenmiştir. Cr-C birlikteliği $M_{23}C_6$ tipi karbür oluşumu açısından kritik bulunmuş, O ve Nb birlikteliği ise Nb oksit fazı oluşumu açısından dikkat çekmiştir. Bu bulgular, farklı kompozisyonların ve işlem parametrelerinin, LYEY yöntemiyle üretilen parçaların mikroyapısal kararlılığı ve performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur. Mikro yapı ve kimyasal dağılım üzerindeki bu etkilerin kristal yapı ve yönelme davranışına olan yansımaları ise bir sonraki bölümde EBSD analizleriyle değerlendirilmiştir.

5.1.2. Kristal yapı ve yönelme analizleri

LYEY yöntemiyle üretilen metalik yapıların kristalografik karakterizasyonu için EBSD yöntemi kullanılmıştır. Bu analiz yöntemi, mikroyapıdaki tane yönelmeleri, sınır özellikleri, misoryantasyon dağılımları ve faz ayrımları gibi parametreleri yüksek çözünürlükle değerlendirmeye olanak sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında, farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarına sahip tek dikiş numunelerin üretim yönüne dik kesitlerinden elde edilen kristal yönelim haritaları, görüntü kalitesi haritaları, yerel deformasyon dağılımı haritaları, faz dağılımı haritaları ve tane sınırı haritaları analiz edilmiştir. Bu haritalar aracılığıyla hem tane boyutu ve şekli gibi temel mikroyapı özellikleri hem de yönlenme derecesi, deformasyon yoğunluğu ve faz ayrışmaları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

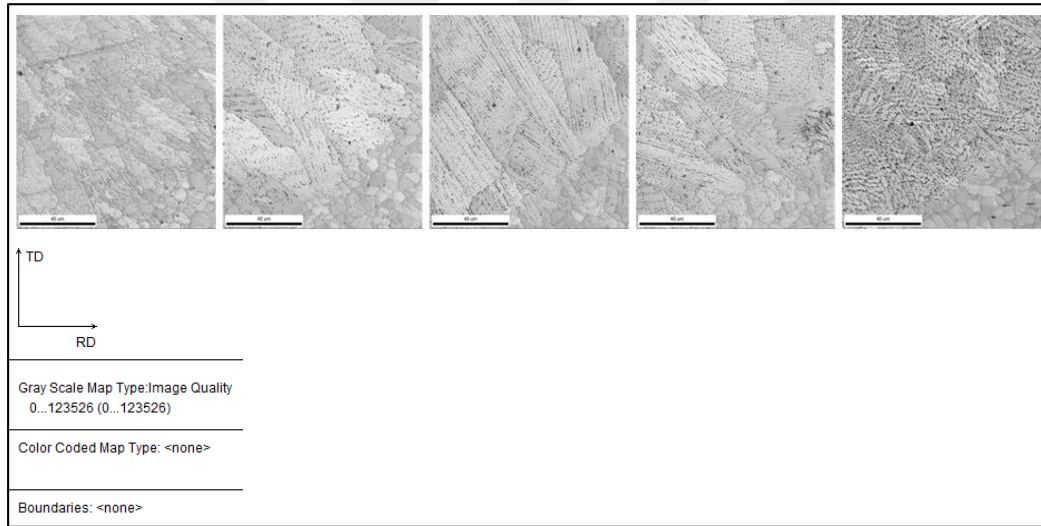
1800 W lazer gücünde ($65,45 \text{ J/mm}^3$ enerji yoğunluğunda) üretilen numune, çalışmada temsil edici bir örnek olarak değerlendirilmiş ve analizler bu numune üzerinden sunulmuştur. Kompozisyon oranlarındaki değişimin ve uygulanan üretim parametrelerinin kristal yapı üzerindeki etkileri, özellikle IN718 oranı arttıkça artan yönlenme, büyüyen kolonlu taneler, düşük IQ bölgeleri ve yerel deformasyon seviyelerindeki artış gibi göstergeler üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, LYEY sürecine özgü termal gradyanların mikroyapı üzerindeki belirleyici rolünü ve nihai yapısal performansa olan etkilerini anlamaya yönelik önemli çıktılar sunmuştur.



Resim 5.11. Farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarına ait numunelerin IPF haritaları (soldan sağa: %100 SS316L, %75-25, %50-50, %25-75, %100 IN718)

Resim 5.11. farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarında üretilen tek dikiş numunelere ait IPF haritaları sunulmaktadır. Haritalar, üretim yönüne dik düzlemde kristalografik yönlenmeleri göstermekte olup, her bir renk belirli bir kristal yönünü temsil etmektedir. Bu haritalar, tane şekli, boyutu ve dokusal farklılıkların kompozisyona bağlı olarak nasıl değiştiğini görsel

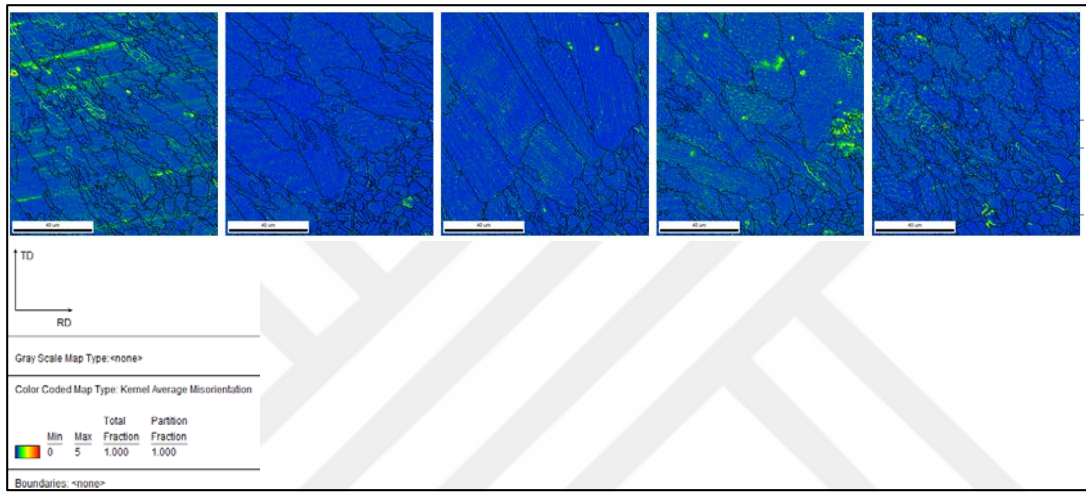
olarak ortaya koymaktadır. IN718 oranı arttıkça mikroyapıdaki katılaşma karakteri belirgin şekilde değişmiştir. %100 SS316L kompozisyonunda, yüksek çekirdeklenme potansiyeline rağmen eriyik havuz bölgesinde yönlenmiş sütunsu taneler hâkimdir. Bu yapı, lazer tarama yönü ve baskın termal gradyan etkisiyle oluşmuş; IPF haritalarında net kristal yönlenmeleri ile kendini göstermiştir. Buna karşılık, IN718 oranı %100 seviyelerine ulaştığında, çekirdeklenme davranışı baskılanmış ve katılaşma sonunda daha eşeksiz ve küçük taneler gelişmiştir. Özellikle %100 IN718 kompozisyonunda, yoğun element segregasyonu ve Laves fazının oluşumu, yönlenmiş büyümeyi sınırlamış; bu da daha düzensiz, izotropik bir tane morfolojisine yol açmıştır. Sonuç olarak, SS316L tarafında yönlenmiş sütunsu taneler baskınken, IN718 tarafında eşeksiz ve küçük taneler hâkimdir. Bu durum, kompozisyon geçişinin ve katılaşma koşullarının kristal yapıyı doğrudan etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır.



Resim 5.12. Farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarına ait numunelerin IQ haritaları (soldan sağa: %100 SS316L, %75-25, %50-50, %25-75, %100 IN718)

IQ haritaları, numunelerdeki kristal yapının bütünlüğünü ve tarama sırasında alınan difraksiyon desenlerinin kalitesini yansıtmaktadır. IQ değeri düşük bölgeler, genellikle kristal yapı kusurlarının, dislokasyon yoğunluğunun, alt tane sınırlarının veya çökelti fazlarının bulunduğu alanları temsil eder. Resim 5.12’de sunulan IQ haritalarında, %100 SS316L kompozisyonunda yüksek görüntü kalitesine sahip, homojen ve net taneler gözlemlenmiştir. Bu durum, düşük içsel gerilme ve yüksek kristal düzenlilik ile ilişkilidir. Kompozisyondaki IN718 oranı arttıkça, özellikle %50–%50 ve sonrası numunelerde IQ değerlerinde düşüş gözlenmiş; taneler daha düzensiz ve dağınık bir hale gelmiştir. %100

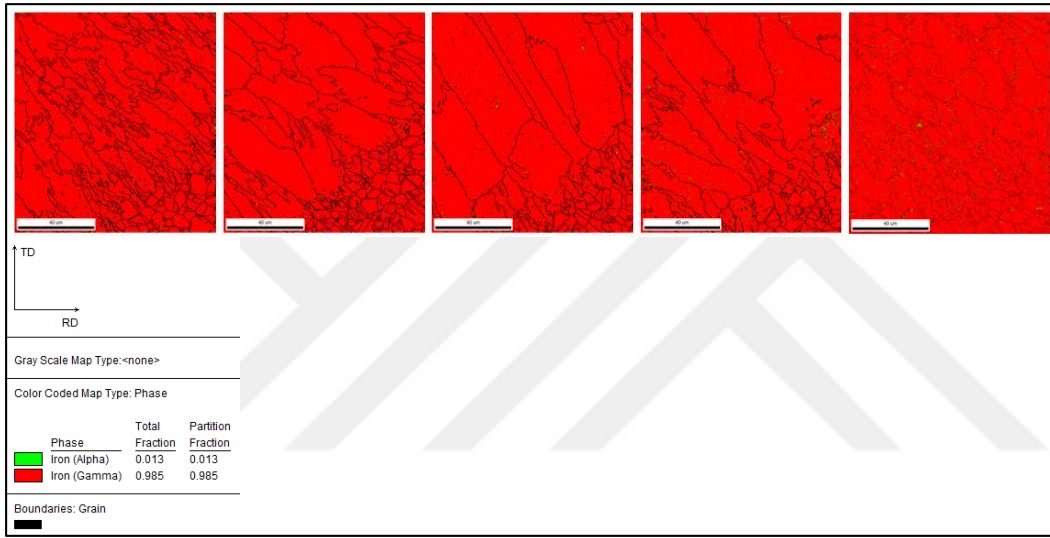
IN718 kompozisyonunda ise belirgin şekilde düşük IQ bölgeleri dikkat çekmektedir. Bu, laves fazının varlığına, artan dislokasyon yoğunluğuna ve mikroyapısal bozulmalara işaret etmektedir. Ayrıca IN718'deki element segregasyonları ve çökelti fazları, elektron difraksiyon desenlerinin kalitesini düşürerek IQ değerlerinde bölgesel azalmaya neden olmuştur. Sonuç olarak, SS316L zengin numunelerde kristal yapının daha düzenli olduğu, IN718 oranı arttıkça ise kristal bütünlüğün bozulduğu ve IQ kalitesinin düştüğü görülmektedir.



Resim 5.13. Farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarına ait numunelerin KAM haritaları (soldan sağa: %100 SS316L, %75-25, %50-50, %25-75, %100 IN718)

KAM haritaları, numunelerdeki yerel plastik deformasyon seviyelerini ve iç gerilme birikimlerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Her bir pikselin komşu piksellerle olan açısal farkı esas alınarak elde edilen bu haritalar, dislokasyon yoğunluğu ve yönelme bozuklukları hakkında bilgi vermektedir. Bu çalışmada elde edilen KAM haritaları, farklı kompozisyonlara sahip numunelerde katılma sonrası oluşan mikro deformasyon dağılımlarını ortaya koymuştur. Görsel karşılaştırma için sunulan Resim 5.13'te, %100 SS316L numunesinde genel olarak düşük KAM değerleri dikkat çekmektedir. Bu durum yönelimsiz ve düşük iç gerilme ile ilişkilendirilmiştir. Bu kompozisyon, yüksek süneklik potansiyeli ve yapısal kararlılığıyla öne çıkmaktadır. IN718 oranı %25'e çıkarıldığında, özellikle yönelmiş taneler arası bölgelerde ve eriyik havuz kenarlarında lokal KAM artışları görülmüştür. Bu artış, laves fazı oluşumu, termal gradyan farklılıkları ve çatlak başlangıç noktalarıyla ilişkilendirilmiştir. %50 SS316L - %50 IN718 kompozisyonunda ise KAM değerlerinin daha dengeli ve homojen dağıldığı gözlenmiştir; bu durum düşük çatlak riski ve kontrollü katılma davranışıyla uyumludur. %75 IN718 içeren numunede, sütunsu taneler

arası bölgelerde ve eriyik havuzu sınırlarında KAM değerleri belirgin şekilde yükselmiştir. Bu, katılaşma sırasında gelişen termal gerilmeler, yönelmiş büyüme ve faz ayrışmalarıyla açıklanabilir. %100 IN718 numunesinde ise ortalama KAM değerleri düşük kalsa da, intermetalik fazlar ve lokal misoryantasyon birikimleri tespit edilmiştir. Bu alanlar, kırılgen yapılarla ilişkili olup, çatlak başlama potansiyeli taşımaktadır. Sonuç olarak, KAM analizleri, IN718 oranının artmasıyla birlikte termal gerilme birikimi, mikroyapısal düzensizlikler ve lokal deformasyonların arttığını; buna bağlı olarak çatlak oluşumu ve yapısal kırılgenlik riskinin yükseldiğini ortaya koymuştur.

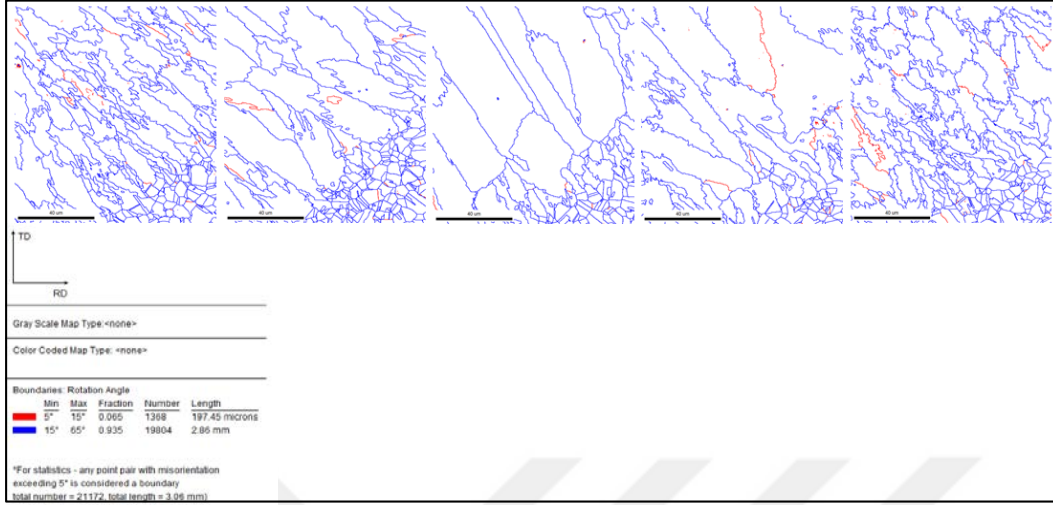


Resim 5.14. Farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarına ait numunelerin faz haritaları (soldan sağa: %100 SS316L, %75-25, %50-50, %25-75, %100 IN718)

Faz haritaları, farklı kompozisyonlardaki numunelerde kristal yapı türlerinin (FCC, BCC, HCP vb.) dağılımını ve faz ayrışmalarını görselleştirmek amacıyla kullanılmıştır. Resim 5.14'te sunulan haritalar, LNEY yöntemiyle üretilen numunelerde baskın olarak FCC fazının korunduğunu göstermektedir. %100 SS316L'den %100 IN718'e kadar uzanan kompozisyon geçişinde, FCC ana faz neredeyse sabit kalmakta; faz dönüşümleri ise ihmal edilebilir düzeydedir. Bununla birlikte, %100 IN718 kompozisyonuna ait haritada sınırlı sayıda farklı faz sinyalleri (laves gibi) lokal bölgelerde gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar, diğer EBSD analizlerinde de desteklendiği üzere, IN718'in yüksek alaşım içeriğine bağlı olarak oluşan çökelti fazları ile ilişkilendirilebilir.

Sonuç olarak, tüm kompozisyonlarda FCC faz sabit kalmış, ancak IN718 içeriği arttıkça lokal faz ayrışmalarının başladığı görülmüştür. Bu durum, mekanik özelliklerin ve

kırılgenlik eğiliminin farklı kompozisyonlarda nasıl değiştiğini anlamada önemli bir ipucu sunmaktadır.



Resim 5.15. Farklı SS316L-IN718 kompozisyonlarına ait numunelerin tane sınırı haritaları (soldan sağa: %100 SS316L, %75-25, %50-50, %25-75, %100 IN718)

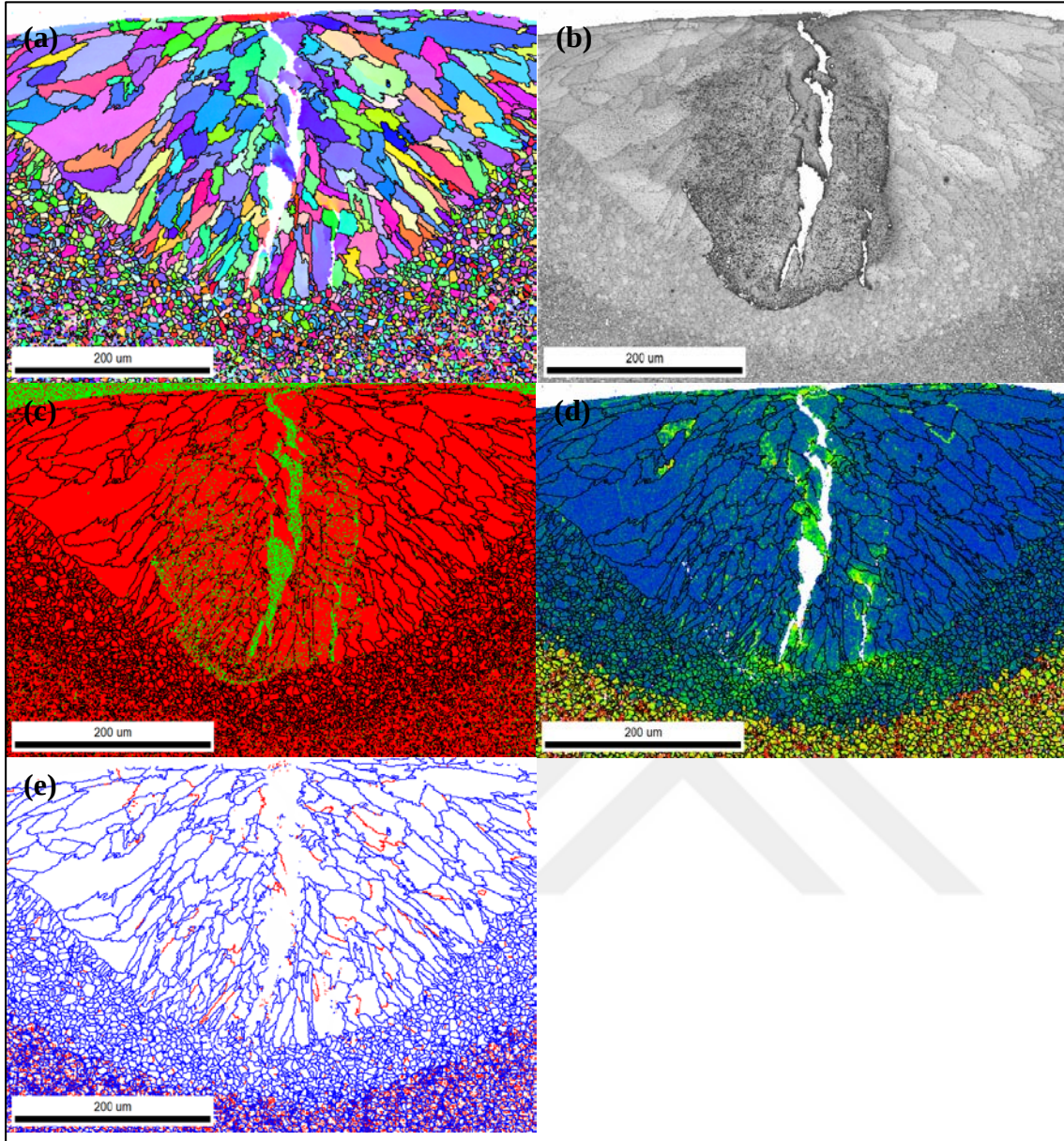
Tane sınırı haritaları, farklı kompozisyonlardaki numunelerde kristal taneler arasındaki sınır karakterini belirlemek ve düşük/yüksek açılı sınırların dağılımını incelemek amacıyla kullanılmıştır. Resim 5.15'te sunulan haritalar, her bir kompozisyonda meydana gelen mikroyapısal farklılıkların sınır yapısına yansımalarını göstermektedir. %100 SS316L kompozisyonunda, yüksek açılı tane sınırları (HAGB) ağırlıklı olarak gözlemlenmiş, bu durum homojen ve tane yapısıyla uyumlu bir mikro yapıya işaret etmiştir. IN718 oranı arttıkça düşük açılı sınırların (LAGB) görünürlüğü artmış, özellikle %50 ve üzeri IN718 içeren numunelerde yönlenmiş büyümenin etkisiyle sütunsu taneler arasında LAGB'lerin yoğunlaştığı belirlenmiştir. %100 IN718 numunesinde ise LAGB'lerin artması ve HAGB'lerin göreceli olarak azalması, yönlenmiş büyüme, element segregasyonu ve intermetalik faz oluşumunun neden olduğu alt tane yapılarının bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, SS316L zengin numunelerde yüksek açılı sınırlar baskınken, IN718 içeriği arttıkça düşük açılı sınır oluşumları artmış ve bu durum, yönlenmiş katılma ve deformasyon birikimiyle doğrudan ilişkilendirilmiştir.

Yapılan EBSD analizleri, SS316L-IN718 kompozisyonundaki artışın kristal yapı, yönlenme davranışı, deformasyon seviyesi ve faz oluşumu üzerinde belirleyici etkiler yarattığını göstermiştir. IPF haritalarında, SS316L tarafında yönlenmiş sütunsu taneler hâkimken, IN718 oranı arttıkça eşeksenli ve düzensiz tane yapısına geçiş gözlenmiştir. IQ haritaları, SS316L zengin numunelerde kristal bütünlüğün daha yüksek olduğunu, IN718 içeriğiyle

birlikte ise yapı kalitesinde düşüş ve mikroyapısal bozulmaların arttığını ortaya koymuştur. KAM haritaları, %100 IN718 kompozisyonunda lokal deformasyon birikimlerinin yoğunlaştığını ve çatlak oluşumu açısından kritik bölgelerin oluştuğunu göstermiştir. Faz haritalarında tüm numunelerde baskın olarak FCC faz korunurken, IN718 içeriği yüksek olan numunelerde lokal faz ayrışmalarına ait sinyaller tespit edilmiştir. Tane sınırı haritalarında ise SS316L tarafında yüksek açılı sınırlar baskınken, IN718 oranı arttıkça düşük açılı sınırların yoğunlaştığı ve bu durumun alt tane oluşumu ile ilişkili olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, kompozisyon geçişi ve termal katılaşma koşulları, mikroyapısal yönelmeden deformasyon ve faz oluşumuna kadar tüm kristal yapı özelliklerini etkilemekte olup, LYEY ile üretilen parçaların mekanik performansını doğrudan belirlemektedir.

5.1.3. Eriyik havuzu bölgelerine ait kristal yapı ve yönelme analizleri

Bu bölümde de, %25 IN718, %50 IN718 ve %75 IN718 içeriğine sahip üç farklı kompozisyonda, yalnızca eriyik havuzu bölgelerine odaklanılarak yapılan EBSD analizleri sunulmuştur. Ayrıca bu bölümde de, orta enerji yoğunluğu stratejisiyle ($65,45 \text{ J/mm}^3$) üretilen numune temsil olarak değerlendirilmiştir. Numunelerin üretim sırasında katılaşma merkezini temsil eden bu bölge, mikroyapısal yönelmenin, deformasyon birikiminin ve faz oluşumunun en yoğun olduğu alanlardan biri olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, eriyik havuz merkezini kapsayan EBSD haritaları sunulmuştur. Bu haritalar yalnızca kompozisyon farklarını değil, aynı zamanda eriyik havuz geometrisinin kristal yapı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla alınmıştır. Elde edilen EBSD verileri doğrultusunda, her kompozisyonun eriyik havuz bölgesine ait sırasıyla kristal yönelim haritaları, görüntü kalitesi haritaları, yerel deformasyon haritaları, faz haritaları ve tane sınırı haritaları analiz edilerek, bölgesel kristal yapı davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

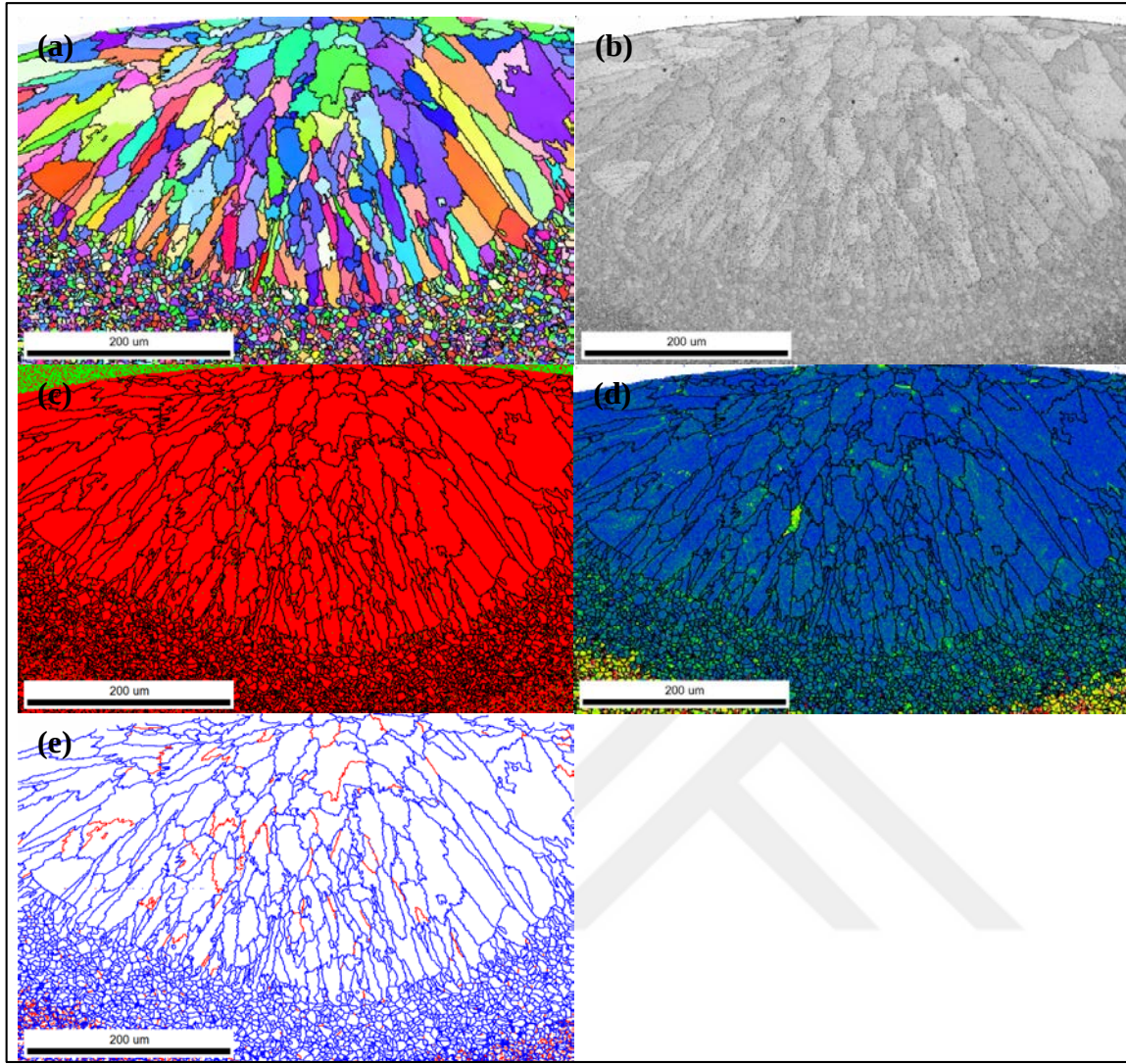


Resim 5.16. %75 SS316L - %25 IN718 kompozisyonuna ait eriyik havuz merkezli (a) IPF haritası, (b) IQ haritası, (c) faz haritası, (d) KAM haritası, (e) tane sınırı haritası

Resim 5.16’da sunulan EBSD haritaları, %25 IN718 içeriğine sahip kompozisyonda eriyik havuzu bölgesine ait kristal yapı davranışlarını ortaya koymaktadır. IPF haritası (a), eriyik havuzu merkezinden yukarı doğru yönelmiş sütunsu tanelerin hâkimiyetini göstermekte olup, belirgin bir yönelmiş katılaşma morfolojisi sergilemektedir. Bu yapı, baskın termal gradyan etkisi altında gerçekleşen epitaksiyel büyümeye işaret etmektedir. IQ haritası (b), eriyik havuz genelinde kristal yapının yüksek kaliteye sahip olduğunu göstermektedir. Ancak eriyik havuzu merkezinde gözlemlenen belirgin çatlak, katılaşma sürecinde gelişen termal gerilmeler ve düşük süneklik bölgelerinde oluşan faz ayrışmalarıyla

ilişkilendirilebilir. Faz haritası (c), bölgede FCC fazının hâkim olduğunu ve belirgin bir faz dönüşümü olmadığını göstermektedir. KAM haritası (d), özellikle çatlak çevresinde yerel misoryantasyon değerlerinin yükseldiğini ortaya koymaktadır. Bu artış, dislokasyon yoğunluğunun ve plastik deformasyonun çatlak oluşumuna zemin hazırladığını göstermektedir. Tane sınırı haritası (e) ise yüksek açılı tane sınırlarının baskınlığını ortaya koymakla birlikte, yönlenmiş büyüme yapısına bağlı olarak bazı düşük açılı sınırların da tespit edildiğini göstermektedir. Sonuç olarak, bu kompozisyonda eriyik havuz bölgesinde yönlenmiş katılma davranışı ve kristal yapı kararlılığı korunmakla birlikte, çatlak oluşumu; lokal deformasyon, termal gerilme ve mikro yapısal zayıflıkların birleşik etkisiyle açıklanabilmektedir.

Resim 5.17’de sunulan EBSD haritaları, %50 IN718 içeriğine sahip kompozisyonda eriyik havuzu bölgesine ait kristal yapı davranışlarını ortaya koymaktadır. IPF haritası (a), eriyik havuz merkezinden yukarıya doğru yönlenmiş sütunsu tanelerin varlığını göstermekte olup, belirgin bir yönlenmiş katılma morfolojisi sergilemektedir. Alt bölgede ise yeniden kristalleşmiş, ince ve yönsüz taneler dikkat çekmektedir. Bu yapı, baskın termal gradyan etkisiyle oluşan epitaksiyel büyümenin yanı sıra, havuz sınırlarında yeniden kristalleşmenin gerçekleştiğine işaret etmektedir. IQ haritası (b), genel olarak kristal yapının yüksek kalitede olduğunu, tane sınırlarının belirgin biçimde izlendiğini göstermektedir. Üst bölgelerde mikroyapısal karmaşıklık artmakta; buna karşın eriyik havuz merkezinde yapısal bütünlük korunmaktadır. Faz haritası (c), tüm bölgede FCC fazının hâkim olduğunu ve belirgin bir faz dönüşümünün meydana gelmediğini ortaya koymaktadır. KAM haritası (d), özellikle eriyik havuz üst kenarlarında yerel misoryantasyon değerlerinin hafif şekilde yükseldiğini göstermektedir. Bu, termal gradyan kaynaklı gerilme birikimi ve segregasyon etkisiyle açıklanabilir. Alt bölgede ise yeniden kristalleşmeye bağlı olarak deformasyon seviyesinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Tane sınırı haritası (e), yüksek açılı tane sınırlarının baskınlığını ortaya koymakla birlikte, alt bölgelerde deformasyonla ilişkili bazı düşük açılı sınırların da tespit edildiğini göstermektedir. Sonuç olarak, bu kompozisyonda eriyik havuz bölgesinde yönlenmiş katılma, faz kararlılığı ve kristal yapı bütünlüğü büyük ölçüde korunmuştur. Düşük deformasyon seviyeleri ve dengeli tane yönelimi, %50-%50 kompozisyonunun yapısal stabilite açısından avantajlı olduğunu göstermektedir.

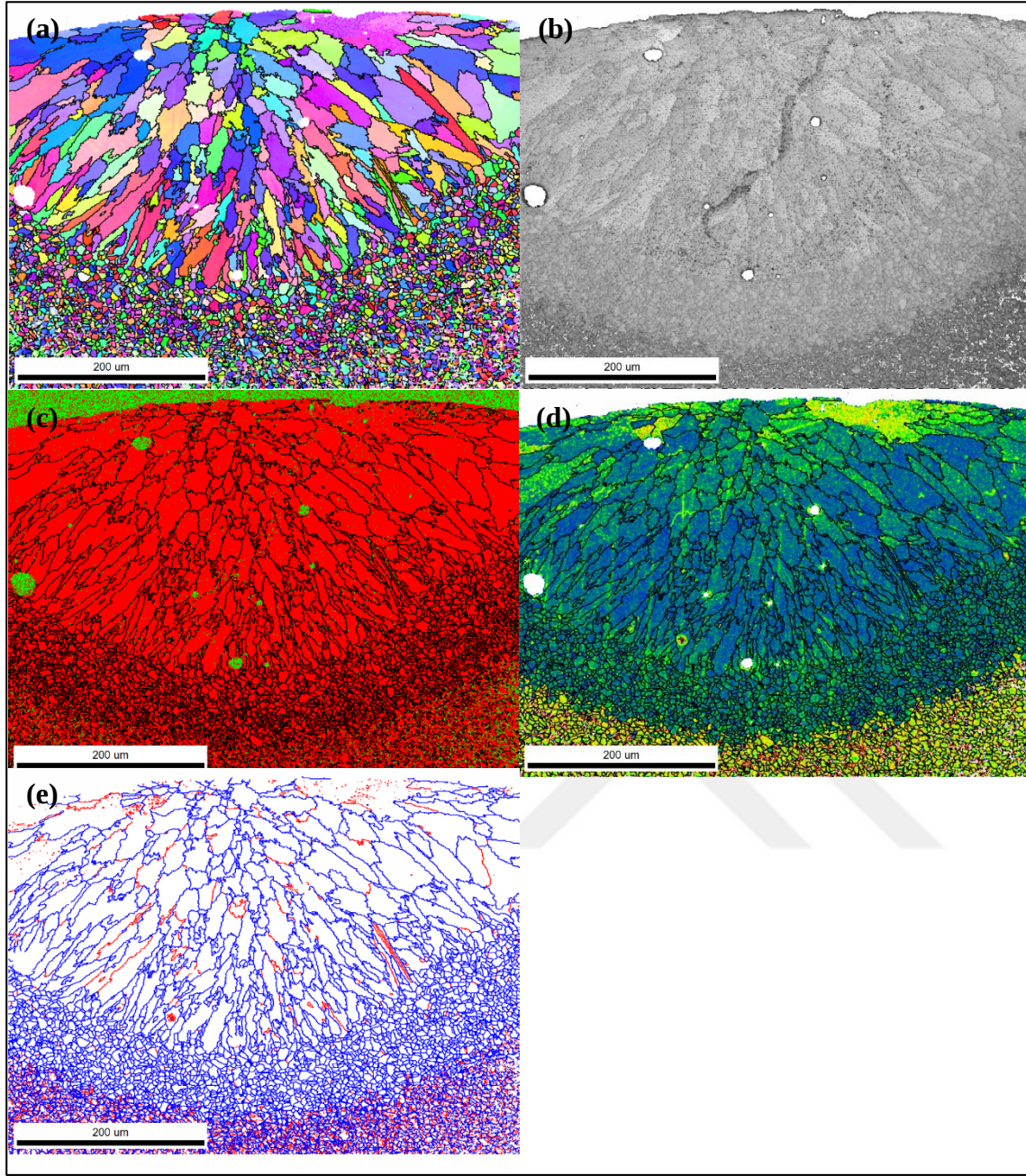


Resim 5.17. %50 SS316L - %50 IN718 kompozisyonuna ait eriyik havuz merkezli (a) IPF haritası, (b) IQ haritası, (c) faz haritası, (d) KAM haritası, (e) tane sınırı haritası

Resim 5.18’de sunulan EBSD haritaları, %75 IN718 içeriğine sahip kompozisyonda eriyik havuz bölgesine ait kristal yapı davranışlarını ortaya koymaktadır. IPF haritası (a), eriyik havuz merkezinden yukarıya doğru uzanan, yönlenmiş sütunsu tanelerin hâkimiyetini göstermektedir. Alt bölgede ise yeniden kristalleşmiş küçük taneler gözlemlenmekte, bu da termal gradyan etkisiyle oluşan yönlenmiş büyümeyi ve havuz sınırlarında gelişen yeniden kristalleşmeyi işaret etmektedir. IQ haritası (b), kristal yapının genel olarak yüksek kaliteye sahip olduğunu göstermekle birlikte, harita boyunca yaygınlaşan mikro boşluklar yapısal bütünlüğün zayıfladığını ortaya koymaktadır. Bu bölgelerdeki kontrast kaybı, muhtemel faz ayrışmaları, intermetalik çökeltiler ve yüksek sıcaklık gerilmeleri ile ilişkilendirilebilir. Faz haritası (c), tüm bölgede FCC fazının hâkim olduğunu ve belirgin bir faz dönüşümünün

oluşmadığını göstermektedir. Ancak daha önceki analizlerle birlikte değerlendirildiğinde, boşlukların çevresinde laves fazı gibi kırılğan fazların oluşma olasılığı göz önünde bulundurulmalıdır. KAM haritası (d), eriyik havuz kenarlarında artan misoryantasyon değerlerini göstermektedir. Bu artış, lokal deformasyon birikimi, alt tane oluşumu ve termal gerilme etkilerinin yoğunlaştığı alanlara karşılık gelmektedir. Alt bölgede yeniden kristalleşme nedeniyle deformasyonun göreceli olarak daha az olduğu izlenmektedir. Tane sınırı haritası (e), yüksek açılı tane sınırlarının çoğunlukta olduğunu göstermektedir. Ancak düşük açılı sınırların da arttığı, bu durumun deformasyon etkisiyle oluşan alt tanelere karşılık geldiği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, %75 IN718 içeriğine sahip bu kompozisyonda eriyik havuz bölgesi yönelmiş katılaşma karakterini korumakta, ancak mikro boşluklar ile yapısal bütünlük önemli ölçüde zayıflamaktadır. Yüksek termal gerilmeler, segrege faz oluşumları ve yönelmiş büyüme morfolojisi bu bölgede kırılğanlık riskini artıran temel etkenler arasında yer almaktadır.

Üç farklı kompozisyona ait eriyik havuz bölgesi EBSD haritaları karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, kompozisyon değişiminin kristal yapı, deformasyon birikimi ve mikro yapısal bütünlük üzerinde belirleyici etkiler yarattığı görülmüştür. %25 IN718 içeren numunede eriyik havuz bölgesinde yönelmiş sütunsu taneler hâkim olmuş, kristal yapı kalitesi büyük oranda korunmuştur. Ancak eriyik havuz merkezinde gelişen çatlak, lokal termal gerilme birikimi ve segregasyon etkilerinin yapısal zayıflık yarattığını göstermiştir. %50 IN718 içeriğine sahip numunede eriyik havuz bölgesinde hem kristal yönelme hem de deformasyon dağılımı açısından en dengeli yapıyı sunmuştur. Düşük misoryantasyon, net faz stabilitesi ve tane sınırı bütünlüğü, bu kompozisyonu mikro yapısal kararlılık açısından avantajlı konuma taşımıştır. %75 IN718 içeriğine sahip numunede ise eriyik havuz bölgesinde kırılğanlık potansiyeli yüksek düzeye ulaşmıştır. Sütunsu yönelme ve yeniden kristalleşme birlikte görülürken, mikro boşluklar ve yüksek KAM bölgeleri, yapısal bütünlüğün önemli ölçüde zayıfladığını ortaya koymuştur. Sonuç olarak, artan IN718 oranı, eriyik havuz bölgesinde daha fazla yönelmiş büyüme ve daha yüksek termal gerilme birikimine yol açarken; %50 IN718 içeren kompozisyon, kristal yapı bütünlüğü ve deformasyon dağılımı açısından en kararlı mikroyapıyı sunmuştur.



Resim 5.18. %25 SS316L - %75 IN718 kompozisyonuna ait eriyik havuz merkezli (a) IPF haritası, (b) IQ haritası, (c) faz haritası, (d) KAM haritası, (e) tane sınırı haritası

5.1.4. Enerji yoğunluğu ve katılaşma davranışları

Enerji yoğunluğu, LYEY sürecinde oluşan eriyik havuzunun boyutu, soğuma hızı, katılaşma şekli ve nihai mikro yapının karakteri üzerinde doğrudan belirleyici bir etkidir. Bu çalışmada kullanılan üç farklı lazer gücü (1500 W, 1800 W, 2100 W) ile elde edilen enerji yoğunlukları sırasıyla 54,54 J/mm², 65,45 J/mm² ve 76,36 J/mm² olarak hesaplanmıştır.

Farklı kompozisyonlardaki numuneler bu enerji seviyelerinde üretilmiş ve SEM, EDS, EBSD analizleri yoluyla detaylı şekilde incelenmiştir.

SEM görüntüleri, düşük enerji yoğunluğunda ($54,54 \text{ J/mm}^2$) eriyik havuzunun daha sığ ve dar olduğunu; buna bağlı olarak daha eşeksenli ve yönsüz küçük tanelerin oluştuğunu göstermiştir. Bu durum, düşük termal gradyan etkisiyle düşük yönlenme ve daha homojen mikro yapı ile sonuçlanmıştır. Orta enerji yoğunluğunda ($65,45 \text{ J/mm}^2$), eriyik havuzu dengeli bir boyuta ulaşmış, bu da sütunsu dendritik yapılar, net tane yönelmesi ve düşük deformasyon bölgeleri ile kendini göstermiştir. En yüksek enerji yoğunluğunda ise ($76,36 \text{ J/mm}^2$), derin ve geniş bir eriyik havuzu oluşmuş; bu durum, aşırı yönelmiş dendritik büyüme, element segregasyonu ve faz ayrışmaları ile sonuçlanmıştır.

EDS analizlerinde yüksek enerji yoğunluğu altında laves fazı ve karbür çökeltilerine zemin hazırlayan Nb, Mo, Cr, C ve O gibi elementlerin segregasyonu daha belirgin hâle gelmiştir. Orta enerji yoğunluğunda bu tip segregasyonlar daha sınırlı düzeyde kalırken, düşük enerji yoğunluğunda ise tam ergime sağlanamadığı için kararlı çökelti oluşumları gözlemlenmemiştir.

EBSD analizleri, özellikle IPF ve KAM haritaları üzerinden değerlendirildiğinde, enerji yoğunluğundaki artışla birlikte tane yönelmesinin arttığı, ancak buna paralel olarak deformasyon birikimi ve misoryantasyon alanlarının da büyüdüğü görülmüştür. Düşük enerji yoğunluğunda daha yönsüz ve eşeksenli yapılar hâkimken, yüksek enerji yoğunluğunda lazer yönüne paralel büyüyen baskın sütunsu taneler, yüksek dislokasyon bölgeleri ve çatlak başlangıç noktaları oluşmuştur.

Sonuç olarak, enerji yoğunluğu sadece eriyik havuzu morfolojisini değil, aynı zamanda faz oluşumu, mikro yapı kararlılığı ve mekanik zayıflık alanlarının gelişimini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, $65,45 \text{ J/mm}^2$ enerji yoğunluğunun çoğu kompozisyonda daha kararlı katılaşma ve homojen mikroyapı sunduğunu; buna karşın $76,36 \text{ J/mm}^2$ seviyesinin, özellikle IN718 içeriği yüksek numunelerde çatlak oluşumu ve faz ayrışması riskini artırdığını ortaya koymuştur.

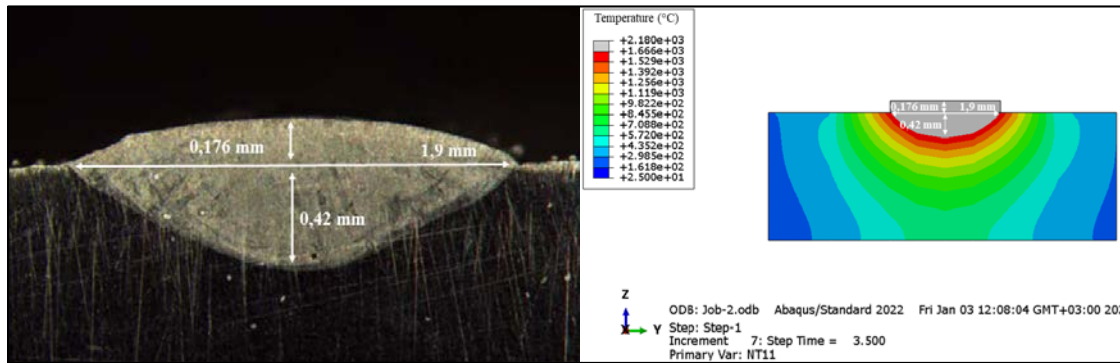
5.1.5. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Bu bölümde, %100 SS316L'den %100 IN718'e kadar %25'lik bileşim adımlarıyla üretilmiş beş farklı kompozisyonda ve üç farklı lazer gücü (1500 W, 1800 W ve 2100 W) kullanılarak elde edilen toplam 15 adet tek dikiş numuneye ait eriyik havuz genişliği ve derinliği ölçümleri, Abaqus yazılımında gerçekleştirilen termal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu tek dikişli üretimlerde yalnızca lazer gücü değiştirilmiş, tarama hızı sabit tutulmuştur (11 mm/s). Lazer gücü değişimine bağlı olarak elde edilen enerji yoğunluğu değerleri sırasıyla 54,54 J/mm² (1500 W), 65,45 J/mm² (1800 W) ve 76,36 J/mm² (2100 W) olarak hesaplanmıştır.

Deneysel eriyik havuz ölçümleri, her bir numunenin SEM kesit görüntüleri üzerinden alınmıştır. Resim 5.19. hem deneysel SEM görüntülerinden hem de sayısal modelden elde edilen eriyik havuz genişlik ve derinlik ölçümlerinin nasıl gerçekleştirildiğini görsel olarak açıklamaktadır. Genişlik ve derinlik ölçümleri, altlık başlangıç düzlemi olan $z = 0$ referansına göre yapılmış, eriyik havuz sınırları yığılmış malzeme ile altlık arasındaki geçiş doğrultusunda belirlenmiştir. Simülasyon tarafında ise, her bir kompozisyonun kimyasal bileşimine özel olarak yeniden hesaplanan sıvılaşma sıcaklıkları kullanılmıştır. Bu sıcaklıklar, daha önce 2.2. Fonksiyonel Geçişli Malzemeler başlığı altında detaylandırıldığı üzere, SS316L (sıvılaşma sıcaklığı: 1723 K) ve IN718 (sıvılaşma sıcaklığı: 1666 K) alaşımları için ayrı ayrı belirlenmiş ve ara kompozisyonlar için Voigt ortalama materyal modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler, simülasyonlarda eriyik havuzu sınırlarını tanımlayan izoterm limitleri olarak atanmıştır. Böylece, kompozisyon bazlı termofiziksel özellikler göz önünde bulundurularak, daha doğru ve gerçeğe yakın bir modelleme sağlanmıştır.

Mesh bağımsızlık analizi, %100 IN718 alaşımı ve 1500 W lazer gücü için gerçekleştirilmiştir ve Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Farklı ağ yoğunluklarında (0,5 mm → 0,02 mm) elde edilen eriyik havuzu derinlikleri 0,2 mm - 0,23 mm aralığında değişim göstermiştir. Bu fark, toplamda %10'un altında olup, çözümün ağ boyutuna duyarlılığının düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Mesh boyutunun küçülmesiyle sonuçlarda belirgin bir değişim eğilimi gözlenmemiş; dolayısıyla çözüm, mesh boyutuna karşı kararlı (stabil) bir hale gelmiştir. Ağ incelidikçe (özellikle 0,08 mm ve daha küçük boyutlarda) hesaplanan eriyik havuzu derinliği neredeyse sabitlenmiş ve 0,22 mm - 0,23 mm değerlerinde plato

davranışı göstermiştir. Bu durum, sayısal çözümün konverjans sınırına ulaştığını ve ek ağ inceltmenin sonuçlar üzerinde anlamlı bir etki yaratmadığını doğrulamaktadır ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Deneysel olarak ölçülen eriyik havuzu derinliği 0,2 mm olup, bu değere en yakın sonuç 0,1 mm ağ boyutunda elde edilmiştir. Dolayısıyla, 0,1 mm çözünürlük hem doğruluk hem de hesaplama verimliliği açısından optimum ağ aralığı olarak belirlenmiştir. En ince ağda (0,02 mm) elde edilen değer ile fark yalnızca $\sim 10\%$ ’dur, bu da klasik literatürde mesh bağımsızlığı için kabul gören tolerans aralığı ($< 10\%$) içerisinde. Bu küçük farklılıkların, özellikle eriyik havuzu sınırının izoterm konturlarına dayalı olarak belirlenmesinden ve yüksek sıcaklık gradyanlarının olduğu bölgelerde elemanlar arası interpolasyon hatalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Genişlik parametresindeki değişimlerin ise, modelde sıvı metal akışını temsil eden Marangoni taşınımı, geri tepme basıncı ve keyhole etkilerinin dâhil edilmemiş olmasından ileri geldiği değerlendirilmiştir. Bu nedenle, mesh bağımsızlığı analizi yalnızca derinlik parametresi üzerinden yapılmış ve bu parametrede kararlı çözüm davranışı elde edilmiştir. Sonuç olarak, ağ boyutunun 0,1 mm’den daha da inceltilmesinin eriyik havuzu derinliğinde anlamlı bir fark oluşturmadığı görülmüş ve 0,1 mm ağ çözünürlüğü modelin mesh bağımsızlığı koşulunu sağladığı kabul edilmiştir.



(a)

(b)

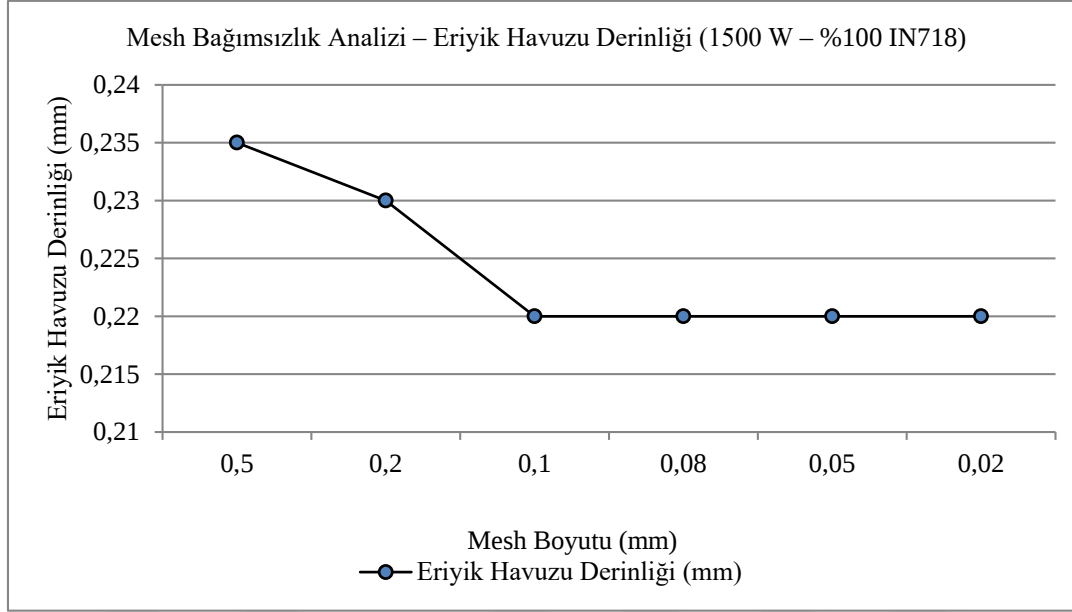
Resim 5.19. Tek dikişlerde eriyik havuz boyutları: (a) optik mikroskop görüntüsü, (b) sonlu elemanlar analizinden elde edilen sıcaklık dağılımı

Elde edilen tüm bu bulgular, geliştirilen sayısal modelin deneysel verilerle ne ölçüde örtüştüğünü ortaya koymaktadır. Bu uyumu nicel olarak değerlendirebilmek amacıyla, her kompozisyon ve lazer gücü kombinasyonu için elde edilen deneysel ve simülasyon kaynaklı eriyik havuz genişliği ve derinliği değerleri ile bu parametrelere ait yüzde (%) hata oranları Çizelge 5.1’de detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca, farklı kompozisyon ve lazer gücü

kombinasyonlarında elde edilen deneysel ve sayısal eriyik havuz profillerinin görsel karşılaştırması Resim 5.20’de sunulmuştur. Şekilde, %100 SS316L’den %100 IN718’e kadar olan bileşimlerde 1500 W, 1800 W ve 2100 W lazer güçleri için hem deneysel kesit görüntüleri hem de Abaqus tabanlı termal analizlerden elde edilen sıcaklık konturları yan yana verilmiştir. Artan lazer gücüyle birlikte eriyik havuzunun genişlik ve derinliğinde belirgin artış gözlenmiş, havuz geometrisi daha simetrik bir forma dönüşmüştür. Ayrıca IN718 oranının artmasıyla birlikte eriyik havuz derinliğinde sınırlı bir artış, genişlikte ise hafif bir daralma eğilimi belirlenmiştir. Bu sonuçlar, geliştirilen sayısal modelin enerji girdisi ve bileşim etkilerini başarılı bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

Çizelge 5.1. Deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırması

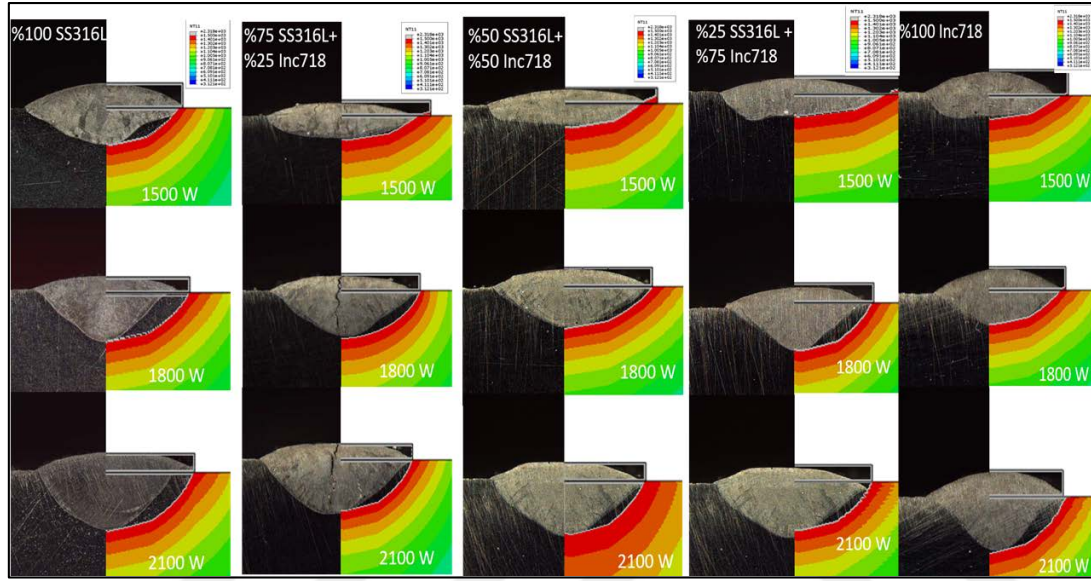
		Eriyik Havuz Derinliği D [mm]			Eriyik Havuz Genişliği W [mm]		
Kompozisyon	Lazer Gücü [W]	Deneysel	Simülasyon	Hata (%)	Deneysel	Simülasyon	Hata (%)
%100 SS316L	1500	0,408	0,4	1,96	2,015	1,9	5,71
	1800	0,579	0,55	1,66	1,797	1,8	1,67
	2100	0,57	0,55	3,51	1,911	1,9	0,58
%75 SS316L + %25 Inc718	1500	0,237	0,23	2,95	1,92	1,8	6,17
	1800	0,466	0,46	1,29	1,869	1,88	1,63
	2100	0,587	0,56	4,82	1,961	1,96	0,51
%50 SS316L + %50 Inc718	1500	0,203	0,2	1,48	1,961	1,85	6
	1800	0,429	0,42	2,14	1,886	1,9	0,32
	2100	0,574	0,55	4,54	1,895	1,89	0,26
%25 SS316L + %75 Inc718	1500	0,235	0,23	2,17	2,023	1,88	7,14
	1800	0,468	0,46	1,71	1,831	1,85	1,07
	2100	0,591	0,56	5,54	1,881	1,9	1,01
%100 Inc718	1500	0,205	0,22	2,44	1,85	1,75	5,71
	1800	0,398	0,39	2,01	1,854	1,85	0,22
	2100	0,584	0,56	4,29	1,9	1,92	1,05



Şekil 5.1. Mesh bağımsızlık analizi kapsamında 1500 W lazer gücü ve %100 IN718 kompozisyonu için elde edilen eriyik havuzu derinliği değişimi.

Lazer gücü arttıkça, hem deneysel hem de simülasyon verilerine göre eriyik havuz genişliği ve derinliği artmaktadır. Artan enerji yoğunluğu ile birlikte eriyik havuzu profili daha yayvan ve simetrik bir form kazanmıştır. Abaqus tabanlı termal analiz sonuçları, genel olarak deneysel ölçümlerle yüksek derecede uyum göstermiştir. Bazı kompozisyonlarda eriyik havuz genişliği için hata oranı %2'nin altına inerken bazı kompozisyonlarda %7'ye çıkmış, derinlikte ise hatalar %1,3-5,5 aralığında kalmıştır. Model, her bir kompozisyon için yeniden hesaplanan sıvılaşma sıcaklıklarını dikkate aldığından, eriyik havuz geometrisinin öngörülmesinde yüksek doğruluk sağlamıştır. Bu durum, sayısal modellemenin FGM tasarımındaki etkinliğini açıkça göstermektedir. Bununla birlikte, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında bazı farklılıklar ortaya çıkmıştır. Deneysel gözlemlerde lazer gücü arttıkça eriyik havuz genişliği daralma eğilimi gösterirken, simülasyonlarda bu değişim sınırlı kalmıştır; buna karşın derinlik artışı her iki yöntemde de tutarlı bulunmuştur. Bu sapmaların temelinde, Abaqus modelinde yalnızca ısı iletimi, taşınım ve radyasyon mekanizmalarının tanımlanmış olması; fakat eriyik havuzu davranışını doğrudan etkileyen Marangoni akışı, kaldırma kuvveti ve geri tepme basıncı gibi akış kaynaklı etkilerin ihmal edilmesi yatmaktadır. Özellikle yüksek lazer güçlerinde ortaya çıkan keyhole davranışı, modelde yeterince temsil edilememiştir. Ayrıca absorpsiyon katsayısının sabit kabul edilmesi, yüksek enerjili işlemlerde enerji girişinin hatalı değerlendirilmesine yol açmıştır. Gelecek çalışmalarda, bu sınırlamaların aşılması amacıyla CFD tabanlı yazılımlar (Ansys Fluent, OpenFOAM vb.) ile ayrıntılı akış analizleri gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Bu

analizlerde yüzey gerilimi gradyanları, Marangoni taşınımı, kaldırma kuvveti ve geri tepme basıncı gibi etkiler doğrudan çözümlenecek; elde edilen sıcaklık ve hız alanları Abaqus ortamına aktarılacaktır. Böylece, eriyik havuzun genişlik ve derinlik tahminlerinde deneysel sayısal uyumun artırılması ve FGM tasarımlarında daha güvenilir bir öngörü mekanizmasının geliştirilmesi hedeflenmektedir.



Resim 5.20. Farklı kompozisyon ve lazer gücü kombinasyonlarında deneysel (sol) ve sayısal (sağ) eriyik havuz profillerinin karşılaştırılması

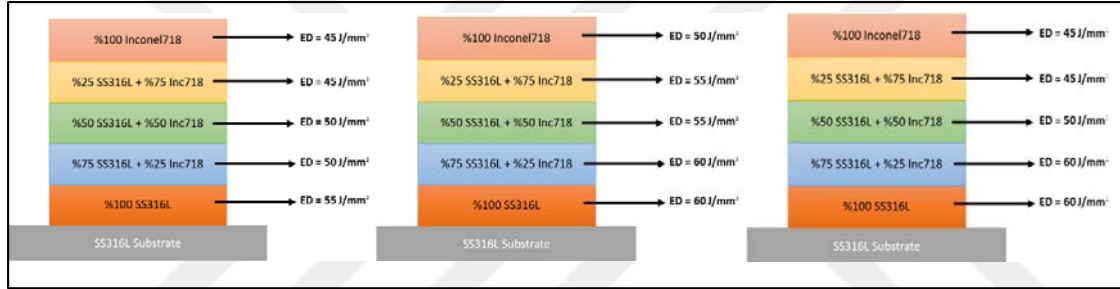
5.1.6. Uygun enerji yoğunluğu seçimi

Bu bölümde, deneysel ve sayısal analizlerin birlikte değerlendirilmesiyle, her bir kompozisyon için optimum enerji yoğunluğu aralıkları belirlenmiştir. Eriyik havuz geometrisi, mikroyapısal homojenlik, faz oluşum eğilimleri, çatlak ve porozite oluşumu gibi kriterler dikkate alınarak yapılan bu değerlendirme, hem üretim kalitesini artırmaya yönelik öneriler sunmakta hem de ileride yapılacak FGM üretimleri için yol gösterici nitelik taşımaktadır. Enerji yoğunluğu, lazer gücü ve tarama hızının birleşik etkisini yansıttığı için, üretim parametrelerinin kontrolü açısından kritik bir değişkendir.

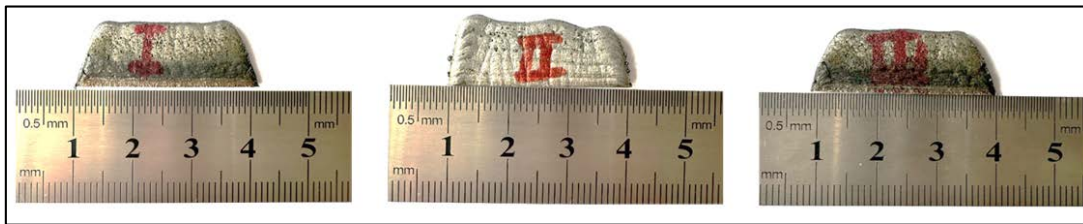
Şekil 5.2 ve Resim 5.21’de sunulan görsellerde, üç farklı FGM duvar numunesine ait katman kompozisyon dağılımları ve üretim sonrası elde edilen fiziksel yapılar gösterilmektedir. Her bir FGM yapısı, farklı enerji yoğunluğu stratejileriyle üretilmiş olup, her katmana uygulanan ED değerleri ilgili görseller üzerinde belirtilmiştir. Bu enerji yoğunlukları, kompozisyona

bağlı olarak optimize edilmiştir. Buna göre, IN718 içeriği %100 olduğunda 45-50 J/mm², %75 olduğunda 45-55 J/mm², %50 olduğunda 50-55 J/mm², %25 olduğunda 50-60 J/mm² ve %0 (yani %100 SS316L) olduğunda 55-60 J/mm² enerji yoğunluğu uygulanmıştır.

Görseller, enerji yoğunluğundaki artışın katman kalınlığı ve genel yapı yüksekliği üzerindeki etkisini doğrudan ortaya koymakta; bu sayede üretim sırasında uygulanan parametrelerin nihai yapı üzerindeki sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmektedir. Bu farklı enerji stratejileri, her bileşimin termofiziksel özelliklerine uygun bir üretim ortamı sağlamak ve mikroyapısal sürekliliği korumak amacıyla belirlenmiştir. Böylece çatlak oluşumu, porozite ve delaminasyon gibi üretim kusurlarının önüne geçilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 5.2. Her bir FGM numunesine ait katman bileşimleri ve katmanlara uygulanan enerji yoğunluğu değerlerini gösteren üretim şemaları



Resim 5.21. Her bir FGM numunesine ait üretim sonrası elde edilen makro görünüm

Bu strateji, her bileşimin farklı termofiziksel özelliklerine uygun enerji girişini sağlayarak, üretim sırasında eriyik havuzu stabilitesini korumayı, katmanlar arası yapışmayı iyileştirmeyi ve mikroyapısal sürekliliği sağlamayı hedeflemiştir. Ayrıca çatlak oluşumu ve delaminasyon gibi üretim kusurlarının önlenmesi açısından da etkili olmuştur.

Söz konusu görseller, enerji yoğunluğundaki artışın yalnızca katman kalınlığına değil, aynı zamanda genel yapı yüksekliğine olan etkisini de açıkça göstermektedir. Bu bağlamda,

Abaqus yazılımı ile daha önce gerçekleştirilen tek dikiş termal simülasyonlarında elde edilen eriyik havuz derinliği ve genişliği verileriyle de tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle enerji yoğunluğunun artışıyla birlikte eriyik havuz derinliğinde belirgin bir artış gözlemlenirken, genişlikteki artışın daha sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, çok katmanlı üretimde optimum enerji yoğunluğu belirlemenin geometrik ve mikroyapısal bütünlük açısından ne denli kritik olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır.

5.2. FGM Duvar Yapılarının İncelenmesi

Bu bölümde, tek dikişli üretimler sırasında elde edilen deneysel ve sayısal bulgular doğrultusunda oluşturulan enerji yoğunluğu stratejileri kullanılarak üretilen FGM duvar yapılarının karakterizasyonu sunulmaktadır. Farklı kompozisyonlara sahip katmanların ardışık biçimde birleştirilmesiyle elde edilen bu yapıların katmanlar arası geçişlerinin mikro yapı üzerindeki etkilerini değerlendirme açısından kritik öneme sahiptir.

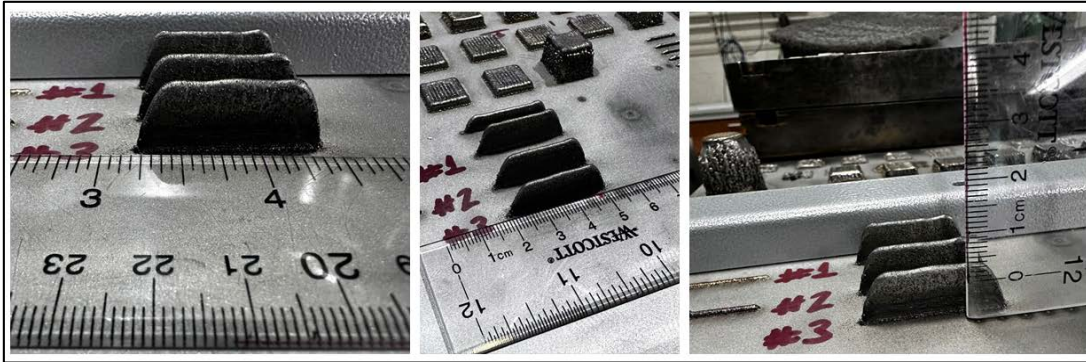
Her bir duvar numunesi, farklı bir bileşim geçiş stratejisini temsil edecek şekilde üretilmiştir. Karışım oranlarına göre uygulanan enerji yoğunluğu değerleri, her bir bileşimin termofiziksel özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu strateji ile hedeflenen temel amaç; eriyik havuzu stabilitesini korumak, katmanlar arası yapışmayı iyileştirmek ve mikroyapısal sürekliliği sağlamaktır. Aynı zamanda bu yaklaşım, çok katmanlı üretimlerde karşılaşılan olası üretim kusurlarının (çatlak, porozite, yapışma hataları) önlenmesi açısından da önem taşımaktadır. Bu kapsamda gerçekleştirilen analizler, üretim stratejisi ve geometrik gözlemler, mikro yapı ve kimyasal bileşim dağılımları, kristal yapı ve yönelme analizleri, mikro sertlik dağılımları ile fiziksel yoğunluk ve gözeneklilik ölçümleri olmak üzere beş temel başlık altında toplanmaktadır. Her bir analiz başlığı, FGM duvar yapılarının üretim kalitesi, yapısal sürekliliği ve fonksiyonel geçiş başarımını çok yönlü olarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

5.2.1. Makro yapı gözlemleri ve boyutsal karşılaştırmalar

FGM duvar yapılarına ait üretim sonrası makro görünüm, uygulanan enerji yoğunluğu stratejilerinin yapı geometrisi üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir. Her bir numune, kompozisyon geçiş sırası aynı kalacak şekilde ancak farklı enerji

yoğunluğu stratejileriyle üretilmiştir. Bu sayede, enerji yoğunluğunun toplam yapı yüksekliği ve katman kalınlığı üzerindeki etkileri doğrudan gözlemlenebilmiştir.

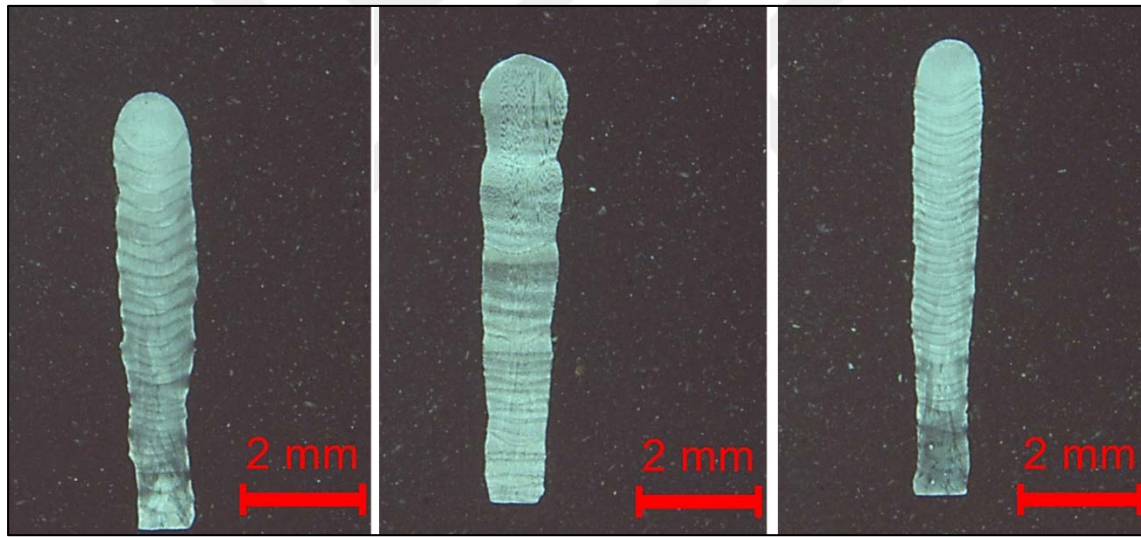
Şekil 5.2’de, daha önce Bölüm 5.1.6’da detaylı olarak açıklanan uygun enerji yoğunluğu aralıkları doğrultusunda üretilmiş üç farklı FGM numunesine ait katman kompozisyon geçiş şeması ve her katmana uygulanan enerji yoğunluğu değerleri şematik olarak sunulmaktadır. Bu stratejiler, her bir bileşimin termofiziksel özelliklerine göre optimize edilmiş ve çok katmanlı üretimde çatlak, porozite ve delaminasyon gibi kusurların önlenmesi amacıyla uygulanmıştır. Resim 5.22’de FGM numunelerinin üretim sonrası elde edilen fiziksel makro görünümeleri sunulmakta; cetvel yardımıyla yapı yükseklikleri ve uzunlukları görsel olarak karşılaştırılmaktadır. Bu görseller, enerji yoğunluğunun yalnızca mikroyapı üzerinde değil, aynı zamanda yapı geometrisi üzerinde de belirleyici bir rol oynadığını açıkça göstermektedir.



Resim 5.22. Üç farklı FGM numunesine ait üretim sonrası makro görünüm ve boyutsal karşılaştırmalar

Makro ölçümler ve Resim 5.23’de verilen optik mikroskop kesit görüntüleri birlikte değerlendirildiğinde; FGM numune 1’de alt katmanlar başlangıçta yüksek enerjiyle daha geniş ve kalın oluşmuş, ancak üst katmanlara çıkıldıkça enerji yetersizliği nedeniyle daralmış ve düzensizlikler ortaya çıkmıştır. FGM numune 2’de katman kalınlıkları genel olarak dengeli seyretmiş olsa da, özellikle kompozisyon geçiş bölgelerinde dalgalanmalar ve süreksizlikler gözlenmiştir. Bu durum, SS316L ve IN718 alaşımlarının farklı termofiziksel özelliklerinin eriyik havuzu davranışlarını etkilemesinden kaynaklanmıştır. Alt katmanlarda homojenlik korunurken, orta bölgelerde özellikle %50 ve %75 IN718 içerikli katmanlarda kalınlık farklılıkları ve yerel yükseklik dalgalanmaları belirginleşmiştir. FGM numune 3’te ise enerji yoğunluğunun kompozisyon geçişlerine uyumlu şekilde

kademeli artırılması sayesinde katman kalınlıkları daha dengeli korunmuş, arayüzler daha net oluşmuş ve yapı bütünlüğü kompakt biçimde sağlanmıştır. Bu durum, FGM numune 3'ün yalnızca kalınlık sürekliliği açısından değil, aynı zamanda makro yapısal bütünlük bakımından da en kararlı yapıyı sunduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, makro gözlemler ve Resim 5.23'de sunulan optik incelemeler, enerji yoğunluğu stratejisinin FGM üretiminde kritik bir parametre olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Orta enerji yoğunluğu ile üretilen yapılarda üst katmanlarda düzensizlikler gözlenirken, orta yüksek olarak kademeli enerji yoğunluğu stratejisiyle üretilen FGM numune 3, daha kararlı katman kalınlıkları, net arayüzler ve homojen bir geometri sergileyerek diğer numunelere kıyasla daha üstün bir yapı performansı göstermiştir. Bu bulgular, enerji yoğunluğunun optimize edilmesinin çok katmanlı FGM üretiminde mikroyapısal süreklilik ve üretim kalitesi açısından zorunlu bir koşul olduğunu doğrulamaktadır.



(a)

(b)

(c)

Resim 5.23. Optik mikroskop kesit görüntüleri: (a) FGM 1; düşük enerji yoğunluğu, (b) FGM 2; yüksek/sabit enerji yoğunluğu, (c) FGM 3; orta/gradyan enerji yoğunluğu

5.2.2. Yoğunluk ve gözeneklilik ölçümleri (Arşimet prensibi)

FGM duvar yapılarına ait yoğunluk ve gözeneklilik oranları, arşimet prensibine dayalı süspansiyon yöntemiyle belirlenmiştir. Bu yöntem, sıvı içerisinde askıya alınan numunenin kaldırma kuvveti etkisinden yararlanılarak hacminin ve dolayısıyla gerçek yoğunluğunun hesaplanmasına olanak tanır. Numunelerin hava ortamındaki kütleleri (M_h) ve saf su

içerisindeki askıda kütleleri (M_s) hassas terazide ayrı ayrı ölçülmüş ve her bir FGM duvar numunesine ait tartım süreci Resim 5.24 (a-c)'de detaylı biçimde gösterilmektedir. Suyun yoğunluğu 21 °C sıcaklıkta 0,9980 g/cm³ kabul edilerek hacim hesaplanmıştır. Gerçek yoğunluk, kütlenin hacme oranı ile belirlenmiş ve teorik yoğunlukla karşılaştırılarak gözeneklilik oranı elde edilmiştir.

Bu çalışmada her üç FGM numunesi, %100 IN718'den başlayarak %100 SS316L'ye doğru ardışık geçiş gösteren beş farklı katmandan oluşmaktadır. Gözeneklilik analizleri, sabit bileşim yapısındaki enerji yoğunluğu etkisini izole biçimde değerlendirmek üzere gerçekleştirilmiştir.

Arşimet prensibine göre numunenin hacmi Eş.5.1 formda hesaplanır:

$$V = \frac{M_h - M_s}{\rho_s} \quad (5.1)$$

Burada ρ_s kullanılan sıvının (saf su) yoğunluğunu ifade eder. Hesaplanan hacim değeri ile ölçülen kütle oranlanarak gerçek yoğunluk (ρ^*) Eş.5.2 de ki gibi elde edilir:

$$\rho^* = \frac{M_h}{V} \quad (5.2)$$

Ardından, teorik yoğunluk ile karşılaştırılarak gözeneklilik oranı hesaplanır. Eş.5.3 de verilmiştir [121, 122].

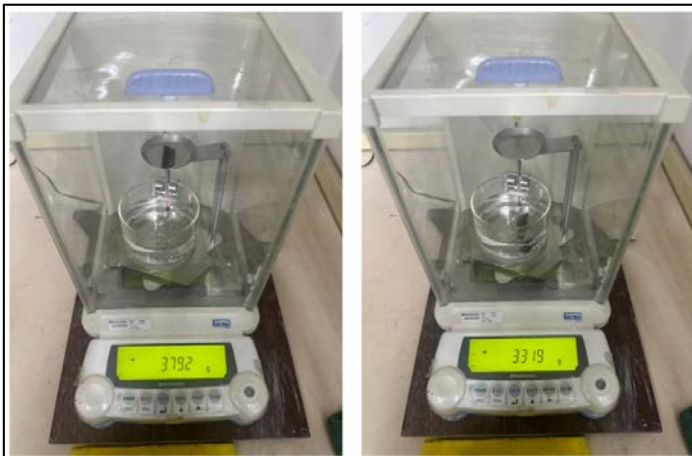
$$Porozite (\%) = \frac{\rho_{teorik} - \rho_{ölçülen}}{\rho_{teorik}} \cdot 100 \quad (5.3)$$



(a)



(b)



(c)

Resim 5.24. Hava ve sıvı içi kütle ölçüm görselleri: (a) FGM 1, (b) FGM 2, (c) FGM 3

Numunelerin teorik yoğunlukları, her bir FGM katmanındaki bileşim oranlarına göre SS316L (7,98 g/cm³) ve IN718 (8,19 g/cm³) alaşımlarının yoğunluklarının ağırlıklı ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada, daha önce Bölüm 2.2. Fonksiyonel Geçişli Malzemeler (FGM) başlığı altında detaylandırıldığı üzere, Voigt yaklaşımı temel alınmıştır. Her bölgenin eşit hacme sahip olduğu varsayımıyla yapılan bu değerlendirmede, teorik yoğunluk değerleri kompozisyon geçişindeki beş ana katmanın ortalaması üzerinden elde edilmiştir. Böylece karşılaştırmalı gözeneklilik analizi, her numune için yapısal olarak karşılaştırılabilir bir referans yoğunluk üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu teorik yoğunluk değerleri referans alınarak, her bir numunenin deneysel olarak elde edilen gerçek yoğunluklarıyla karşılaştırılmış ve bu farklar üzerinden hacimsel gözeneklilik oranları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, farklı enerji yoğunluğu stratejilerinin üretim bütünlüğü ve porozite oluşumu üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirme imkânı sunmaktadır. Aşağıdaki Çizelge 5.2’de elde edilen ölçüm sonuçları sunulmuştur:

Çizelge 5.2. FGM duvar yapılarının arşimet yöntemi ile yoğunluk ve gözeneklilik karşılaştırması

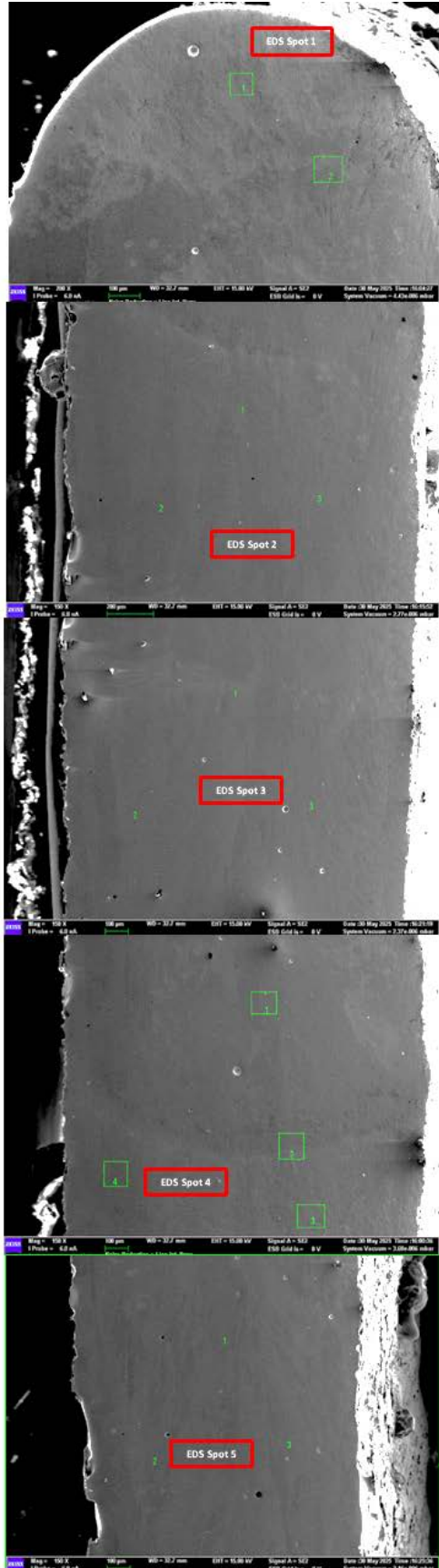
Numune Adı	Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Gözeneklilik (%)
FGM Numune 1	7,89	8,09	2,47
FGM Numune 2	8,09	8,09	0,00
FGM Numune 3	8,00	8,09	1,11

Sonuçlara göre, en yüksek gözeneklilik oranı %2,47 ile FGM numune 1’de gözlemlenmiştir. Bu numunede, düşük enerji yoğunlukları nedeniyle bazı katmanlarda yeterli ergime sağlanamamış ve eksik bağlanma nedeniyle boşluk oluşumu artmıştır. FGM numune 2’de yüksek/sabit enerji yoğunluğu kullanılması sayesinde, ölçüm hassasiyetimiz dâhilinde herhangi bir porozite tespit edilmemiş ve yoğunluk değeri teorik değere eşit çıkmıştır. FGM numune 3’te ise orta enerji bölgeleri içeren kademeli bir enerji stratejisi uygulandığından, gözeneklilik %1,11 seviyesinde ölçülmüştür. Bu veriler, sadece alaşım kompozisyonunun değil, uygulanan enerji yoğunluğunun da porozite oluşumu üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Arşimet yöntemiyle yapılan bu sistematik değerlendirme, enerji yoğunluğunun FGM üretimlerinde mikroyapısal süreklilik ve bütünlük sağlanması açısından kritik bir kontrol parametresi olduğunu kanıtlamaktadır.

5.2.3. Mikro yapı ve kimyasal bileşim analizleri

FGM duvar yapılarının mikro yapısal karakterizasyonu, üretim sırasında uygulanan enerji yoğunluğu stratejilerinin katmanlar arası geçiş kalitesi ve yapısal bütünlük üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla, taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Üç farklı FGM numunesine ait hem çapraz kesit görüntüleri hem de her bir bileşim katmanına karşılık gelen yüzey morfolojileri incelenmiştir. Aynı zamanda kimyasal bileşenlerin dağılımını değerlendirmek üzere enerji saçılmalı x ışını spektroskopisi analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, elde edilen SEM ve EDS bulguları, üretim kalitesi, katmanlar arası ergitme bütünlüğü, geçiş bölgelerindeki morfolojik farklılıklar ve kompozisyonel süreklilik açısından değerlendirilmiştir.

FGM numune 1’de, SEM incelemelerine göre en problemli yapı gözlemlenmiştir. Resim 5.25’de gösterildiği üzere, özellikle orta ve üst katmanlarda (%50 SS316L - %50 IN718 ve %25 SS316L - %75 IN718) gözle görülür düzeyde boşluklar, ergime eksiklikleri ve katmanlar arası yapışma sorunları tespit edilmiştir. Yüzey SEM görüntülerinde, geçiş bölgelerinde belirgin bir granüler yapı, matlaşmış alanlar ve homojenlikten sapmalar dikkat çekmektedir. %100 IN718 bölgesinde ise dendritik yapıya benzer yüzey formları ve yoğun yüzey pürüzlülüğü gözlemlenmiştir. EDS analizleri, bu geçiş bölgelerinde elementel dağılımın düzensizleştiğini ve lokal segregasyonların oluştuğunu göstermektedir. Özellikle Nb (niyobyum) oranı, %50-50 geçişinde 3,67 at.% seviyesine kadar yükselerek diğer bölgelerden anlamlı şekilde ayrılmıştır. Benzer şekilde Mo oranı da tüm bölgelerde %1,05–1,24 aralığında stabil kalmakla birlikte, geçiş kompozisyonlarında daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum, özellikle orta katmanlarda kimyasal kararsızlık ve faz ayrışması olasılığını gündeme getirmektedir. Söz konusu bulgular, SEM’de gözlemlenen mikroyapısal bozulmalarla ilişkili olup, ilerleyen bölümlerde sunulacak EBSD ve mikrosertlik analizleriyle bu durumun nicel olarak doğrulandığı görülecektir. İlgili EDS ölçüm sonuçları Çizelge 5.3’te sunulmuştur.



Resim 5.25. FGM numune 1'nin çapraz kesitine ait SEM görüntüsü

Çizelge 5.3. FGM numune 1'e ait beş farklı kompozisyon bölgesinden alınan EDS spektrumları

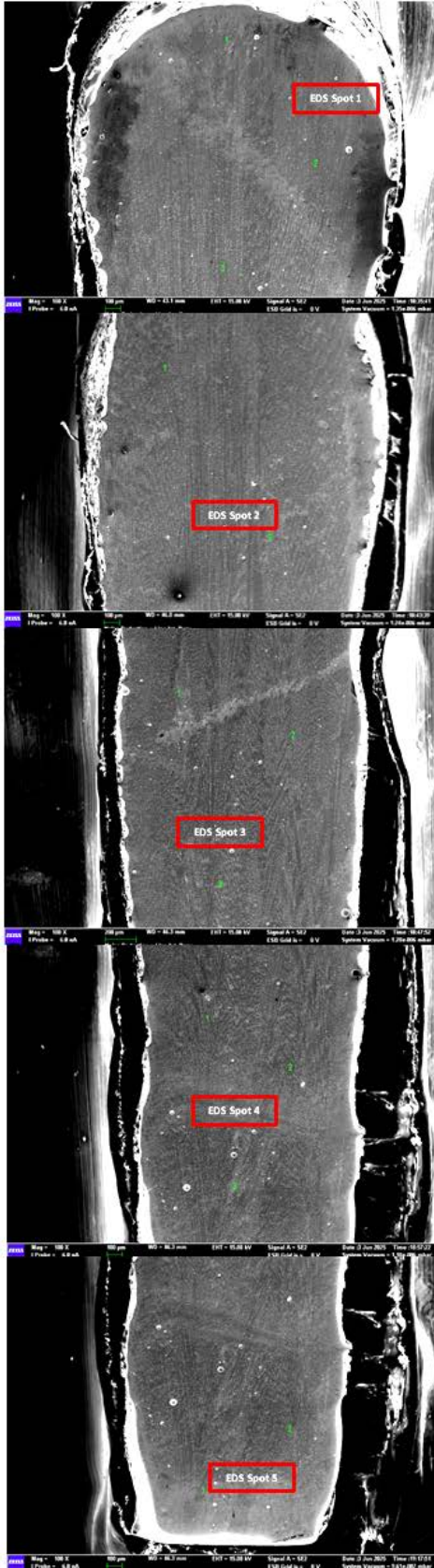
Kompozisyon Bölgesi	Fe (at.%)	Cr (at.%)	Ni (at.%)	Mo (at.%)	Nb (at.%)
%100 SS316L	58,45	16,88	10,47	1,09	-
%75 SS316L + %25 IN718	46,14	17,21	19	1,22	0,73
%50 SS316L + %50 IN718	25,61	17,85	34,65	1,24	3,67
%25 SS316L + %75 IN718	21,42	19,22	40,57	1,08	1,54
%100 IN718	17,8	18,8	43,01	1,05	1,22

FGM numune 2'de, üretim kalitesinin en yüksek olduğu yapı elde edilmiştir. Resim 5.26'da sunulan SEM görüntülerinde, katmanlar arası geçişlerin oldukça düzgün olduğu ve bağlanma problemi gözlemlenmediği görülmektedir. Bununla birlikte, bazı lokal bölgelerde gözenek benzeri yapılar tespit edilmiştir. Bu gözeneklerin, üretim sırasında yetersiz ergime ya da gaz sıkışması gibi nedenlerle oluştuğu düşünülmektedir. Arşimet prensibiyle yapılan yoğunluk ölçümlerinde %0,00 porozite sonucu elde edilmiş olsa da, bu yöntem mikroskobik düzeydeki küçük boşlukları tespit edememektedir. Dolayısıyla, FGM numune 2 makroskobik olarak gözeneksiz görünmekle birlikte, mikroskobik düzeyde sınırlı porozite içermektedir. Yüzey morfolojileri incelendiğinde, tüm kompozisyon bölgelerinde paralel çizgisel izler ve yönlü büyümeyi destekleyen mikromorfolojiler gözlemlenmiştir. Bu yönlü yapılar, yüksek enerji yoğunluğu koşullarında ısı akısının kontrollü olduğunu ve soğuma hızının görece düşük gerçekleştiğini; bunun da kristal büyümesinin yönlendirilmiş biçimde ilerlemesini sağladığını göstermektedir. Yüzey dokusu homojen, kompakt ve düzenli olup, belirgin faz ayrışması ya da partikül birikimi bulunmamaktadır. Bu gözlemler, ilerleyen bölümde sunulacak EBSD analizleriyle de desteklenecektir. EDS analizleri, kompozisyon geçişi boyunca elementlerin nispeten düzenli ve dengeli şekilde dağıldığını ortaya koymuştur (Çizelge 5.4). Özellikle Ni içeriği, %100 SS316L bölgesindeki %13,41 at.% seviyesinden başlayarak, %100 IN718 bölgesinde %47,51 at.%'e kadar kademeli bir artış göstermiştir. Bu durum, geçişin kontrollü gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Cr ve Mo elementleri de benzer şekilde gradyan bir davranış sergilemiş ve kimyasal geçişin sürekliliğine katkı sağlamıştır. Segregasyona eğilimli Nb elementi ise, %100 SS316L bölgesinde beklenildiği şekilde tespit edilmemiştir. Ancak, geçiş bölgelerinde kademeli bir artış göstererek %25 SS316L - %75 IN718 bileşiminde %2,66 at.% ve %100 IN718

bölgesinde %1,93 at.% seviyelerinde ölçülmüştür. Bu artış, Nb'nin yapıya IN718 katkısıyla birlikte düzenli biçimde dâhil olduğunu göstermektedir. Söz konusu davranış, lokal segregasyon veya istenmeyen faz oluşumu riskini minimuma indirmekte ve üretim kalitesini desteklemektedir. Son olarak, Fe içeriği, IN718 oranı arttıkça beklendiği üzere azalmıştır. Bu düşüş eğilimi, hedeflenen kompozisyonel geçişin başarıyla gerçekleştiğini doğrulayan bir diğer göstergedir.

Çizelge 5.4. FGM numune 2'ye ait beş farklı kompozisyon bölgesinden alınan EDS spektrumları

Kompozisyon Bölgesi	Fe (at.%)	Cr (at.%)	Ni (at.%)	Mo (at.%)	Nb (at.%)
%100 SS316L	50,81	15,55	13,41	1,67	-
%75 SS316L + %25 IN718	40,05	20,16	24,63	1,1	0,63
%50 SS316L + %50 IN718	28,43	20,52	33,1	1,12	1,15
%25 SS316L + %75 IN718	17,38	19,76	40,81	1,23	2,66
%100 IN718	15,42	17,46	47,51	1,16	1,93

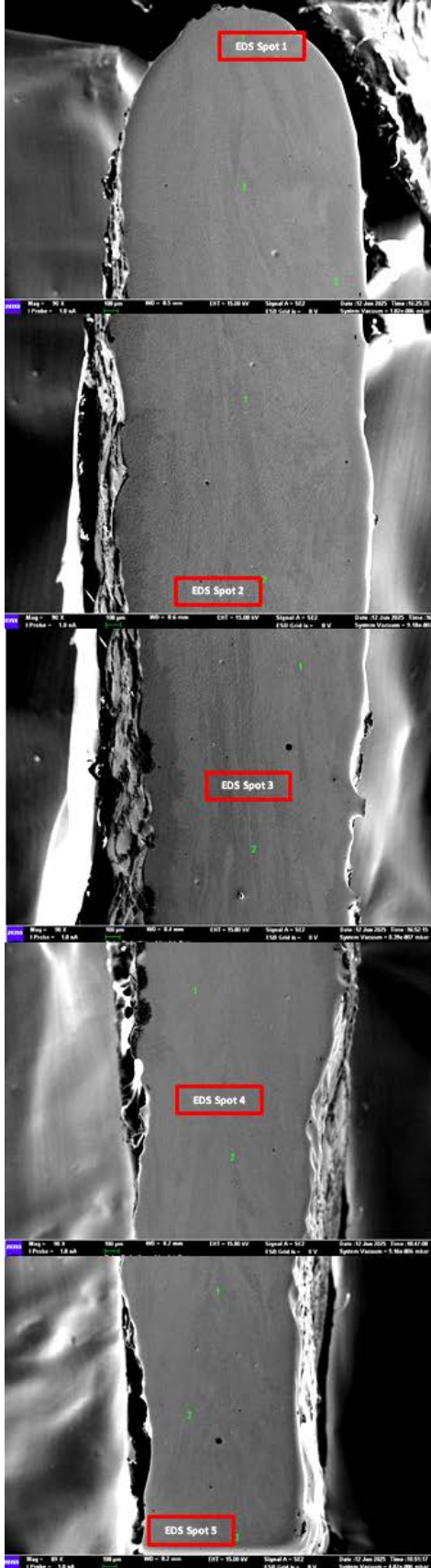


Resim 5.26. FGM numune 2'nin çapraz kesitine ait SEM görüntüsü

FGM numune 3’de, genel olarak kabul edilebilir bir yapı elde edilmekle birlikte, özellikle geçiş bölgelerinde bazı mikroyapısal kararsızlıklar dikkat çekmiştir. Resim 5.27’de sunulan SEM görüntülerinde, bazı katmanlarda hafif bağlanma problemleri ve mikro boşluklar gözlemlenmiştir. Yüzey SEM analizlerinde, %25 SS316L - %75 IN718 ve %100 IN718 bölgelerinde yüzey granülasyonu ve dendritik izlere benzer bozulmuş morfolojik yapılar tespit edilmiştir. Bu yapı bozulmalarına ilişkin nicel değerlendirmeler, ilerleyen bölümde sunulacak EBSD analizleri ile desteklenecektir. EDS analizleri, geçiş bölgelerinde sınırlı düzeyde elementel dengesizlik sinyalleri vermektedir (Çizelge 5.5). Özellikle Nb içeriği, %50 IN718’den başlayarak kademeli bir artışla %100 IN718 bölgesinde %2,10 at.% seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, lokal segregasyon veya Nb zengin faz oluşumu (örneğin laves fazı ya da karbürler) ihtimalini gündeme getirmektedir. İlgili SEM görüntülerinde gözlemlenen koyu renkli partikül benzeri yapılar, bu yorumu desteklemektedir. Buna ek olarak, Mo içeriği de geçiş bölgelerinde genel olarak sabit kalmakla birlikte, %50 IN718 bölgesinde 1,31 at.% seviyesine yükselerek diğer katmanlara göre hafif bir artış göstermiştir. Bu durum, kimyasal homojenlik açısından sınırlı düzeyde bölgesel sapmalara işaret edebilir. Öte yandan, Ni ve Cr oranları kompozisyon geçişine paralel olarak düzenli bir artış göstermiş, Fe içeriği ise IN718 kompozisyonuna geçişle birlikte beklendiği şekilde azalmıştır.

Çizelge 5.5. FGM numune 3’e ait beş farklı kompozisyon bölgesinden alınan EDS spektrumları

Kompozisyon Bölgesi	Fe (at.%)	Cr (at.%)	Ni (at.%)	Mo (at.%)	Nb (at.%)
%100 SS316L	54,81	17,31	11,2	1,2	-
%75 SS316L + %25 IN718	47,05	16,94	20,28	1,2	-
%50 SS316L + %50 IN718	32,43	18,13	29,36	1,31	1,45
%25 SS316L + %75 IN718	27,44	17,7	33,35	1,11	2,03
%100 IN718	16,77	18,04	40,59	1,13	2,1

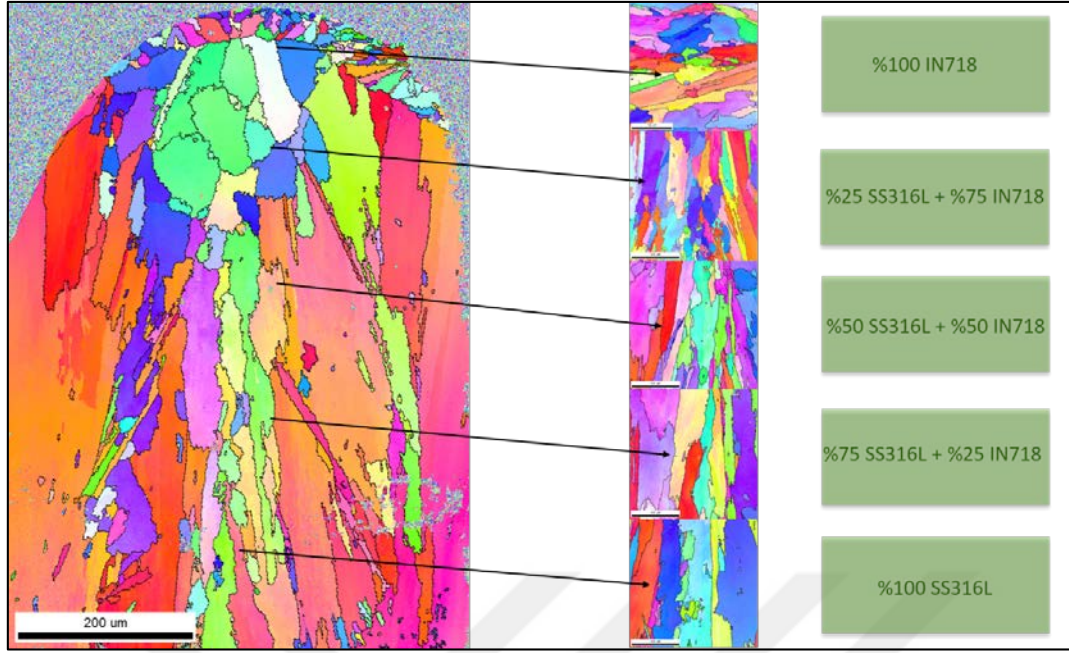


Resim 5.27. FGM numune 3'ün çapraz kesitine ait SEM görüntüsü

Genel olarak, gerçekleştirilen SEM ve EDS analizleri, uygulanan enerji yoğunluğu stratejilerinin üretim kalitesi üzerinde belirleyici etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Numuneler arasında yapılan karşılaştırmada, FGM 2 numunesi mikroyapısal süreklilik, yoğunluk ve üretim bütünlüğü açısından en başarılı yapı olarak öne çıkmıştır. Bu numunede katmanlar arası geçişler net, yüzey yapısı düzenli ve makroskobik porozite tespit edilmemiştir. Ancak EDS analizlerinde, özellikle %100 SS316L bölgesinde Ni ve Nb oranlarının beklenenden yüksek çıkması, katmanlar arası yeniden ergime ve difüzyon etkilerinin kimyasal geçişi bulanıklaştırdığını göstermektedir. Bu nedenle FGM 2, yapısal açıdan en stabil, fakat kimyasal homojenlik açısından sınırlı sapmalar içeren bir yapı sergilemiştir. FGM 3 numunesi, genel yapısal bütünlüğünü korumakla birlikte, geçiş bölgelerinde sınırlı mikroyapısal kararsızlıklar ve Nb-Mo zenginleşmesine bağlı lokal faz ayrışmaları göstermiştir. Buna rağmen elementel geçiş profili FGM 2'ye kıyasla daha düzenli olmuş, difüzyon kaynaklı karışma daha sınırlı kalmıştır. Bu nedenle FGM 3, kimyasal geçişin en homojen gerçekleştiği numune olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık, FGM 1 numunesi hem mikroyapı hem de kimyasal geçiş açısından en zayıf performansı sergilemiştir. Geçiş katmanlarında görülen ergime eksiklikleri, bağlanma problemleri ve yüzey granülasyonu ile birlikte EDS verilerindeki düzensizlikler, üretim sırasında kontrolsüz karışım ve lokal segregasyonlara işaret etmiştir. Bu durum, düşük enerji yoğunluğu stratejisinin yetersizliğini ve üretim parametrelerinin optimize edilmesinin gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

5.2.4. Kristal yapı ve yönlenme analizleri

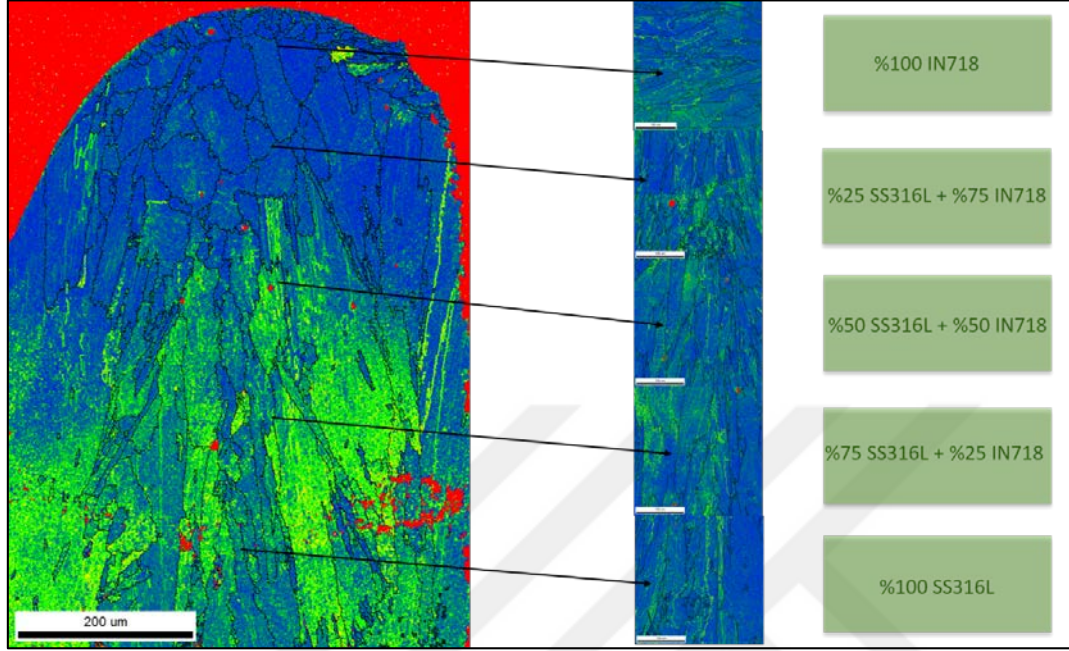
Bu bölümde, LYEY yöntemiyle üretilen FGM duvar yapılarının kristal yapısı ve tane yönlenmeleri, EBSD tekniği ile analiz edilmiştir. Üretim yönü boyunca alınan kesitlerden elde edilen IPF, KAM, faz ve tane sınırı haritaları kullanılarak kristal büyüme yönelimi, iç gerilme dağılımı, dislokasyon birikimi ve intermetalik faz oluşumu gibi parametreler incelenmiştir.



Resim 5.28. FGM numune 1'in %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait IPF haritaları

FGM numune 1, %100 SS316L'den başlayarak %100 IN718'ye kadar beş kompozisyondan oluşmaktadır. Her bir kompozisyon, ilgili bileşim oranına özel belirlenmiş enerji yoğunluğu ile üretilmiş olup, numunenin üretim yönü aşağıdan yukarıya doğrudur. Resim 5.28'de görülen IPF haritasına göre kristal büyüme davranışı ve tane yönlenmeleri, bileşim geçişleri ve enerji yoğunluğu kombinasyonlarının etkisini açık şekilde yansıtmaktadır. Alt katmanda yer alan %100 SS316L bölgesi, yüksek enerji yoğunluğu (60 J/mm^2) altında üretilmiş olup, üretim yönüne paralel uzanan belirgin kolonsu tanelerle karakterizedir. Yüzeye doğru çıkıldıkça SS316L oranı azalmakta, IN718 içeriği artmaktadır. Bu geçiş sürecinde özellikle %50 IN718 -%75 IN718 içeren orta katmanlarda, kolonsu büyümenin yön kararlılığı azalmış, kristal yönlenmeleri daha karmaşık hale gelmiştir. Bu bölgelerde bazı tanelerin aksel kaymalar gösterdiği, yönlenme sapmalarının arttığı ve tane sınırlarının daha keskin tanımlanmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, termal gradyanların dalgalanması ve kararsız ergime/katılma koşullarına işaret etmektedir. Üst katmanda yer alan %100 IN718 bölgesinde ise, düşük enerji yoğunluğu (45 J/mm^2) ve yüksek termal iletkenlik farkı nedeniyle kristaller daha küçük boyutlu ve yönlenme göstermeyen eş eksenli bir yapıda katılmıştır. Bu yapı morfolojisi, IN718'nin hızlı katılma eğilimi ile uyumludur. Kristal büyüme yönlerinin bu şekilde katmanlar arasında farklılık göstermesi, her bir bileşimin kendine özgü termofiziksel özelliklerine ve uygulanan enerji yoğunluğu seviyelerine

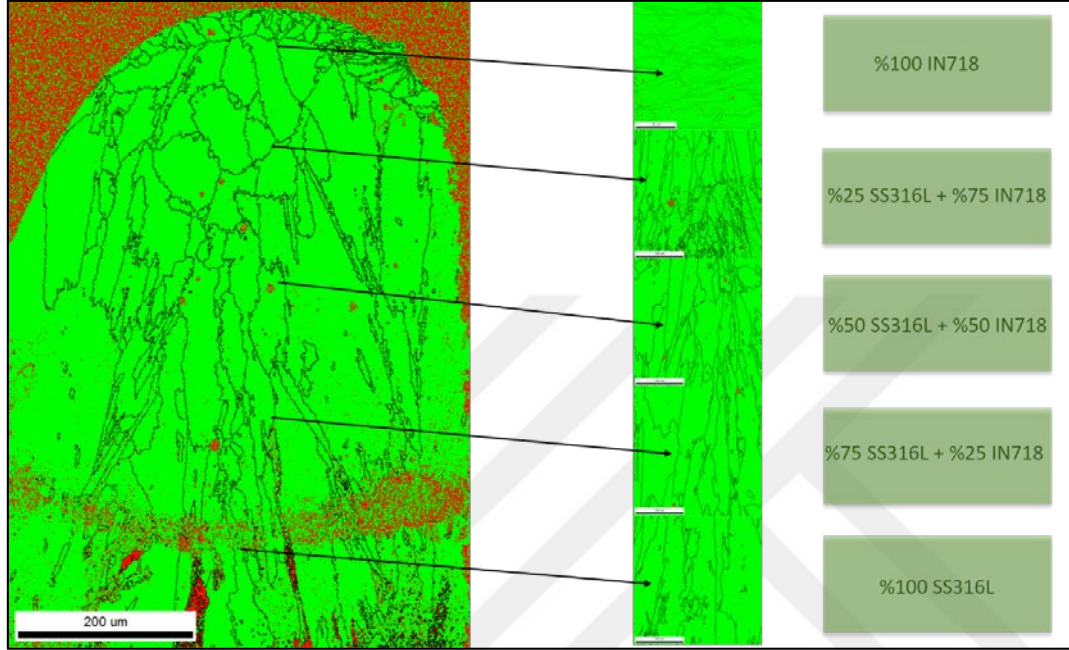
bağlanmaktadır. IPF haritaları genel olarak, bu numunede kristal yönlenmenin geçiş bölgelerinde kararsızlaştığını göstermektedir.



Resim 5.29. FGM numune 1'in %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait KAM haritaları

Resim 5.29 'da FGM numune 1'e ait KAM haritası kristal yapıdaki yerel yönelme farklılıklarını ve buna bağlı iç gerilme durumlarını bölgesel olarak ortaya koymaktadır. Haritada mavi tonlar kristal kafesinin homojen olduğunu, yeşil bölgeler orta seviyede yönelme sapmalarını, kırmızı noktalar ise yerel dislokasyon birikimlerini ve yüksek iç gerilme alanlarını göstermektedir. Alt katmanda yer alan %100 SS316L bölgesi, homojen kolonsu büyümenin etkisiyle düşük iç gerilmeye sahip olup, büyük oranda mavi yeşil renklerle karakterizedir. Bu bölgedeki dislokasyon yoğunluğu düşüktür ve yapısal süreklilik yüksektir. Bir üst katmanda, %75 SS316L - %25 IN718 kompozisyonunda yönelme kararsızlığı ve dislokasyon birikimi belirgindir. Bu bölge, hem bileşim geçişinin hem de enerji yoğunluğu değişiminin etkisiyle en kararsız mikro yapıyı temsil etmektedir. Haritada bu alanlar, yeşil sarı geçişleri ve bazı kırmızı noktalarla öne çıkmaktadır. Bu durum, bu bölgede plastik deformasyon ve artık gerilme birikiminin yüksek olduğunu göstermektedir. Orta bölgede yer alan %50 SS316L - %50 IN718 katmanında, yönlenmiş dislokasyon izleri gözlenmekle birlikte, yapı düzenlidir. Yüzeye doğru ilerledikçe, IN718 içeriği %75'e ve ardından %100'e ulaştığında, KAM değerleri tekrar düşmektedir. Ancak %100 IN718 bölgesinde yer yer dislokasyon kümelenmelerine (kırmızı noktalar) rastlanmaktadır. Bu

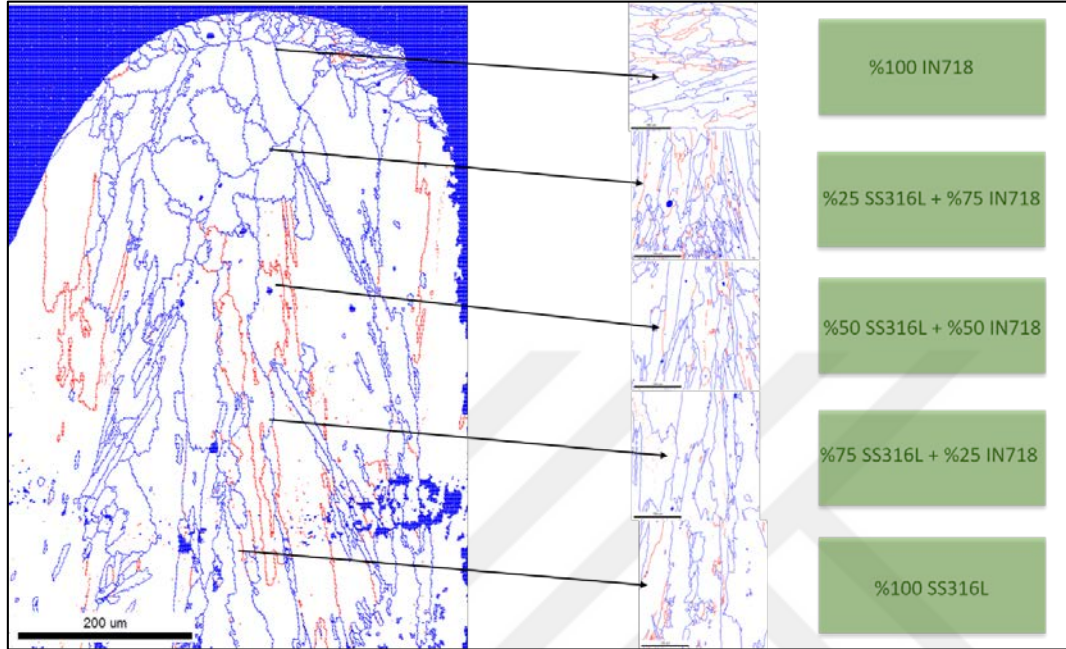
durum, hızlı soğuma ve düşük enerji yoğunluğunun (45 J/mm^2) oluşturduğu mikroyapısal gerilmelere işaret etmektedir. KAM haritası genel olarak, FGM numune 1'in orta katmanlarında (özellikle %25 IN718 bölgesinde) yüksek iç gerilme ve dislokasyon birikimiyle karakterize olduğunu ortaya koymaktadır.



Resim 5.30. FGM numune 1'in %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait faz haritaları

Resim 5.30'da FGM numune 1'e ait faz haritası, üretim boyunca farklı bileşim bölgelerinde oluşan matris ve ikinci faz dağılımını gözlemlemeye olanak tanımaktadır. Haritada büyük ölçüde yeşil renkle temsil edilen alanlar temel matris fazını, kırmızı bölgeler ise ikinci faz oluşumunu veya çözünememiş lokal bölgeleri göstermektedir. Alt ve orta katmanlarda bulunan %100 SS316L ve %50 SS316L - %50 IN718 bölgelerinde, faz yapısı oldukça homojen olup kırmızı alanların miktarı son derece sınırlıdır. Bu durum, bu bölgelerde kristalleşmenin dengeli gerçekleştiğini ve intermetalik faz oluşumunun minimum düzeyde kaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, %75 SS316L - %25 IN718 bölgesinde kırmızı bölgelerin sayıca ve boyutça artış gösterdiği açıkça görülmektedir. Bu bölge aynı zamanda KAM ve tane sınırı analizlerinde iç gerilmenin ve dislokasyonların en yoğun olduğu katman olarak öne çıkmaktadır. Faz haritasında gözlenen bu ikinci faz birikimleri, laves fazı gibi düşük erime sıcaklığına sahip kırılgan fazları temsil etmektedir. Bu fazların varlığı, katılma sırasında kompozisyon ayrışmasına ve sonrasında porozite oluşumuna katkıda bulunabilir. Üst katmanlardaki %75 IN718 - %25 SS316L ve %100 IN718 bölgelerinde ise

kırmızı alanlar yüzeyde yaygınlaşmakta, ancak genel olarak matris fazı baskınlığını korumaktadır. Bu alanlardaki ikinci fazlar, özellikle IN718'in Nb ve Mo gibi segregasyona eğilimli alaşım elementleri içermesiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir.

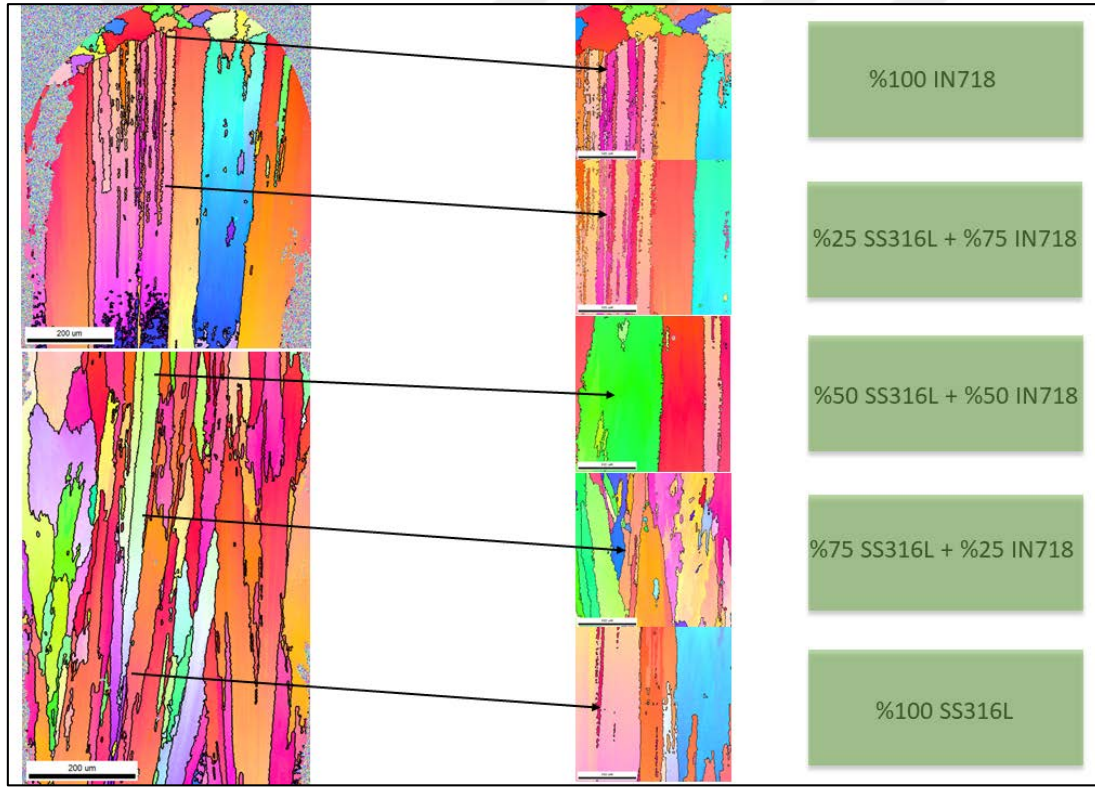


Resim 5.31. FGM numune 1'in %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait tane sınırı haritaları

Resim 5.31'de FGM numune 1'e ait tane sınırı haritası, üretim yönü boyunca kristal yapıdaki dönüşüm davranışını ve deformasyon birikimini daha net gözlemlemeye olanak sağlamaktadır. Haritada mavi ile gösterilen yüksek açılı tane sınırları genellikle yeniden kristalleşmiş ya da yönlü büyümüş taneleri temsil ederken, kırmızı ile gösterilen düşük açılı sınırlar ise plastisite kaynaklı alt taneleri ve dislokasyon birikimlerini ifade etmektedir. Alt ve orta kısımdaki %100 SS316L ve %50 SS316L - %50 IN718 bölgelerinde, kolonsu tanelerin sınırları boyunca daha yoğun mavi çizgiler gözlenmekte olup, bu durum yönlü katılaşmanın yüksek kristal bütünlüğü ile gerçekleştiğini göstermektedir. Ancak bu bölgelerde dahi yer yer kırmızı çizgiler görülmekte olup, üretim yönü boyunca dislokasyon kökenli alt tane oluşumlarının başladığını göstermektedir. Geçiş bölgesi olan %75 SS316L - %25 IN718 katmanında, kırmızı çizgilerin belirgin biçimde arttığı ve LAGB ağlarının daha yoğun hale geldiği dikkat çekmektedir. Bu bölge aynı zamanda KAM haritasında da yüksek iç gerilme ile karakterize olduğundan, burada meydana gelen kristal yönelme sapmaları ve dislokasyon birikimi, mikro yapısal süreksizliğe ve olası gözenek oluşumuna neden olabilecek kritik bir katman olduğunu göstermektedir. %100 IN718 bölgesindeki

HAGB yoğunluğu, hızlı katılaşma koşullarında oluşan küçük eş eksenli tanelerin sınırlarının belirginleştiğini göstermektedir.

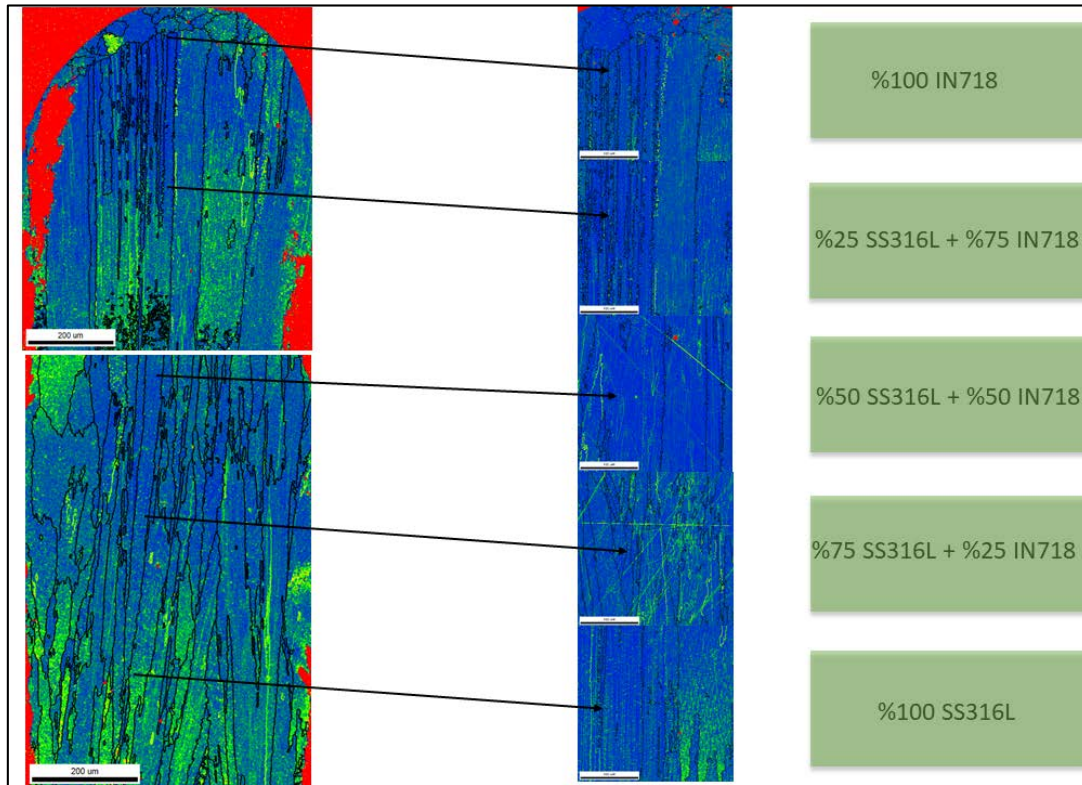
FGM numune 1'in EBSD analizlerinden elde edilen sonuçlar, geçiş bölgelerindeki kristal kararsızlığına ve buna bağlı yoğunluk kayıplarına işaret etmektedir. Bu bulgular ışığında, bir sonraki yapı olan FGM Numune 2'nin kristal özellikleri aşağıda değerlendirilmiştir. Ancak ikinci FGM numunesinde, numune yüzeyinin eğriliği ve cihazın görüş alanı sınırlamaları nedeniyle tüm duvar boyunca tek parça bir EBSD taraması gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle, ilgili numunenin üst (IN718) ve alt (SS316L) bölgeleri ayrı ayrı taranmış, ardından yapının genel yönelim özellikleri birleştirilmiş şekilde sunulmuştur.



Resim 5.32. FGM numune 2'nin %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait IPF haritaları

FGM numune 2, enerji yoğunluğu bakımından kontrollü bir üretim stratejisi ile oluşturulmuştur. Resim 5.32'de sunulan IPF haritaları, tüm katmanlarda üretim yönüne paralel olarak gelişen belirgin kolonsu tanelerin varlığını ortaya koymaktadır. Alt katmandan üst katmana doğru geçildiğinde, tane yönelmesinin korunduğu ve kristallerin yapı boyunca süreklilik gösterdiği açıkça görülmektedir. Tüm bileşim bölgelerinde renk geçişleri

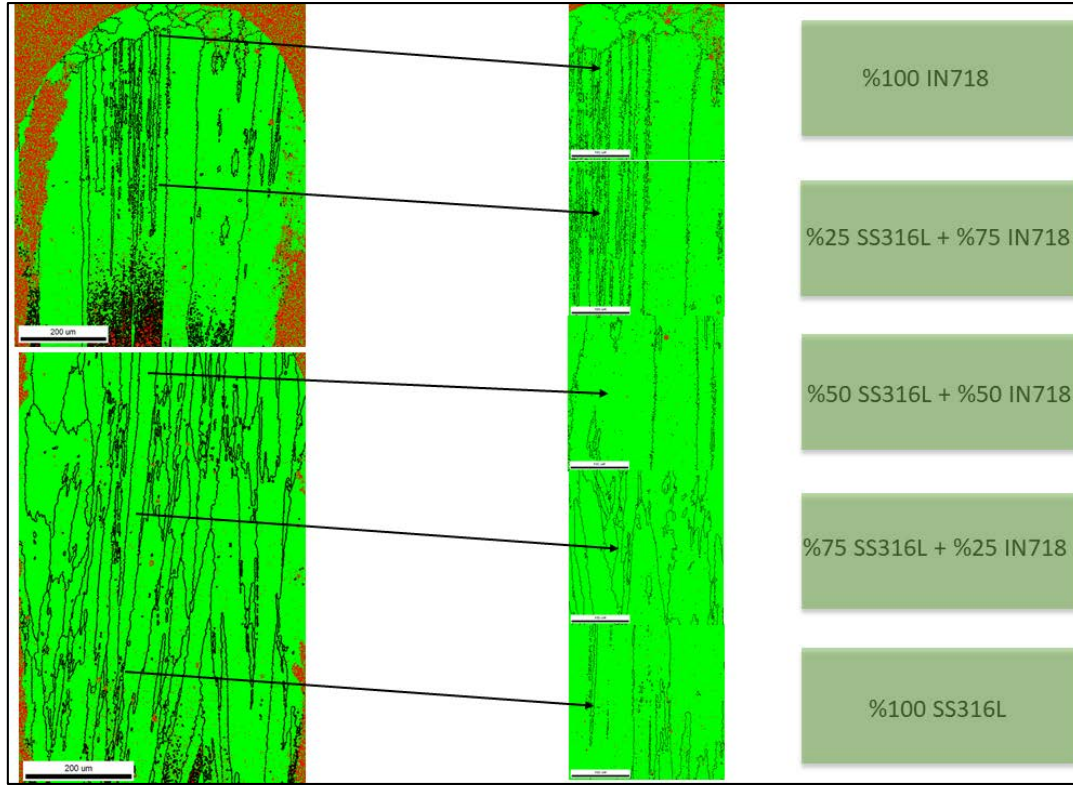
yumuşak, tane sınırları net, oryantasyon kararlılığı ise yüksek düzeydedir. Özellikle %75 SS316L - %25 IN718 geçiş katmanında bile belirgin bir yön kararsızlığı veya kristal düzensizlik gözlenmemektedir. Bu durum, bu yapının üretim sırasında dengeli bir termal gradyan ile kontrol edildiğini ve katılaşma yönünün başarıyla korunduğunu göstermektedir. Bu yapıdaki IPF görüntüleri, kristal büyümenin üretim yönüyle uyumlu olarak yönelmiş, homojen ve düşük defektli bir yapıya işaret etmektedir. Bu yönelme davranışı, yüksek mikroyapısal bütünlük ve düşük iç gerilme potansiyeli anlamına gelmektedir.



Resim 5.33. FGM numune 2'nin %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait KAM haritaları

Resim 5.33'de FGM numune 2'nin KAM haritası, kristal yapıdaki iç gerilme durumunun oldukça düşük olduğunu ve üretim sürecinin termal olarak dengeli gerçekleştiğini göstermektedir. Neredeyse tüm katmanlarda mavi tonların baskın olması, kristallerin düşük yönelme farklarıyla katılaştığını ve dislokasyon birikiminin minimum düzeyde kaldığını ortaya koymaktadır. Alt katmandaki %100 SS316L'den başlayarak üstteki %100 IN718'ye kadar olan tüm bölgelerde, yeşil tonlar oldukça sınırlı olup, kırmızı noktalar neredeyse yok denecek kadar azdır. Özellikle literatürde sıklıkla bahsedilen kritik kompozisyon bölgesi olan %75 SS316L - %25 IN718 bileşiminde bile iç gerilme artışına dair herhangi bir lokal

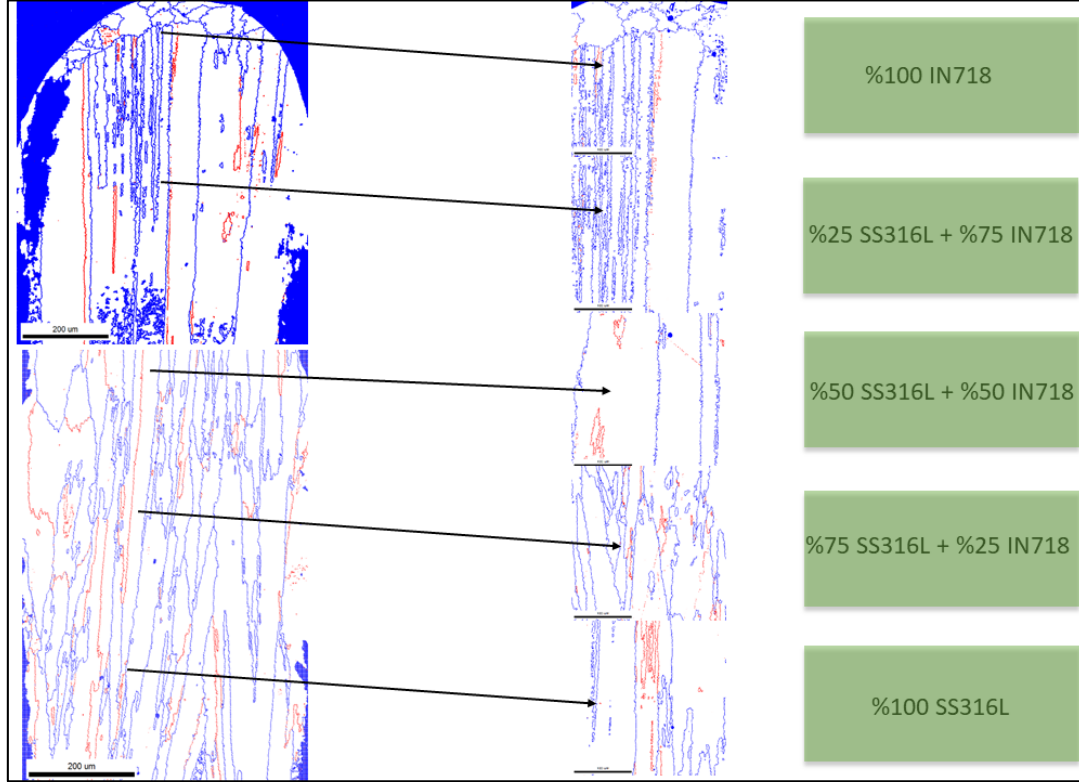
yoğunlaşma görülmemektedir. Bu, hem bileşim geçişinin hem de enerji yoğunluğu kontrolünün başarıyla yönetildiğini göstermektedir. KAM analizine göre, kristal yapının termal gradyanlara karşı oldukça stabil olduğu ve üretim sırasında önemli bir plastik deformasyon birikimi yaşanmadığı anlaşılmaktadır. Bu yönüyle numune 2, dislokasyon içeriği bakımından son derece homojen ve düşük gerilimli bir yapıya sahiptir.



Resim 5.34. FGM numune 2'nin %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait faz haritaları

Resim 5.34'de faz haritası, FGM numune 2'nin mikro yapısal süreklilik ve kimyasal homojenlik açısından oldukça başarılı bir katılaşma sürecinden geçtiğini göstermektedir. Tüm bileşim bölgelerinde yeşil renk hâkim olup, kırmızı renkli ikinci faz birikimlerine yalnızca alt yüzey kenarlarında sınırlı düzeyde rastlanmaktadır. Özellikle %75 SS316L - %25 IN718 katmanlarında bile ikinci faz oluşumuna dair belirgin bir kümelenme görülmemektedir. Bu durum, element segregasyonunun minimize edildiğini, alaşım bileşenlerinin başarıyla çözündüğünü ve üretim sırasında ani termal şokların veya kararsız bölgelerin oluşmadığını işaret etmektedir. Numunenin üst kısmındaki %100 IN718 bölgesinde bile kırmızı sinyaller oldukça zayıf olup, bu alanın da genel olarak kararlı bir şekilde katılaştığı anlaşılmaktadır. Faz sürekliliği, kristal yapıdaki yönelme düzeni ve

düşük dislokasyon yoğunluğu ile birlikte değerlendirildiğinde, Numune 2'nin üretim kalitesinin oldukça yüksek olduğu söylenebilir.

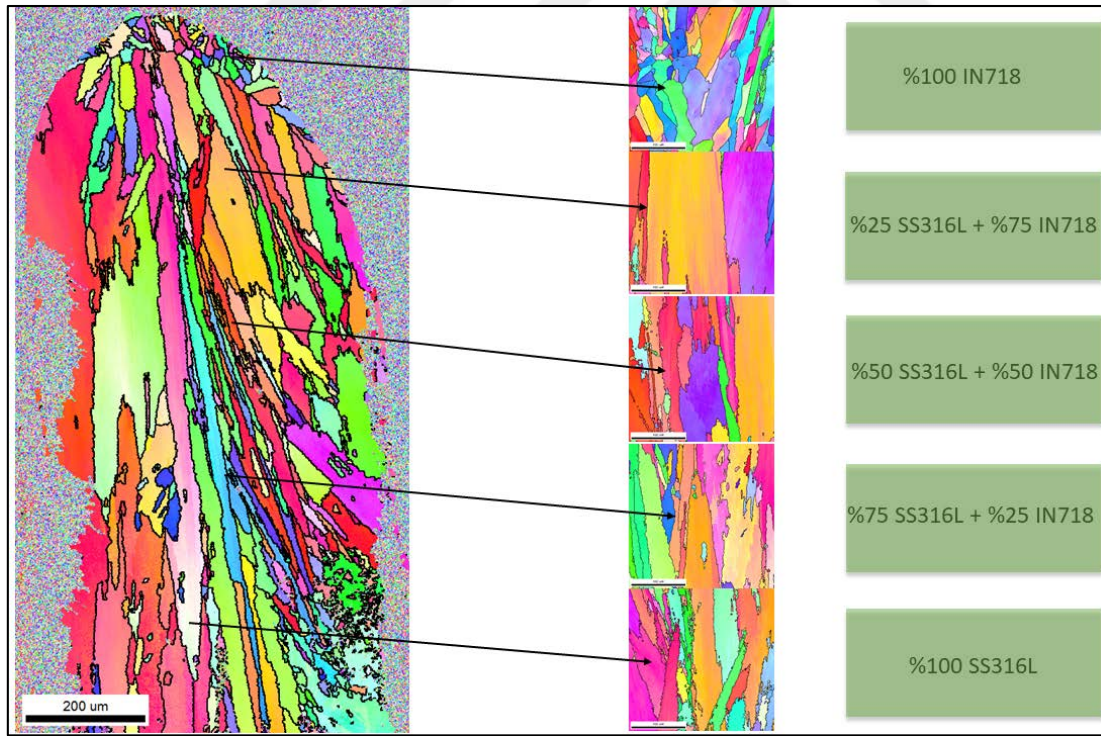


Resim 5.35. FGM numune 2'nin %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait tane sınırı haritaları

Resim 5.35'de tane sınırı haritası, FGM numune 2'nin tüm katmanlarında kristal yapının oldukça düzenli ve yönlenmiş olduğunu ortaya koymaktadır. Üretim yönüne paralel olarak gelişen kolonsu taneler, büyük ölçüde mavi çizgilerle sınırlanmış olup, yapıda yüksek açılı tane sınırlarının baskın olduğunu göstermektedir. Bu durum, kristal sürekliliğin yüksek, taneler arası yönelme farkının ise belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle alt katmanda (%75 SS316L - %25 IN718), düşük açılı sınırların sınırlı sayıda ve dağınık şekilde yer aldığı gözlemlenmektedir. Bu, dislokasyon birikiminin ve plastik deformasyonun oldukça düşük seviyede gerçekleştiğini işaret etmektedir. LAGB'lerin genel olarak azlığı ve düzensizliği, bu yapının iç gerilmeden uzak ve yeniden kristalleşmenin etkin şekilde tamamlandığını düşündürmektedir. Üst katmandaki %100 IN718 bölgesinde eş eksenli tanelerle birlikte hafif LAGB artışı gözlenmekle birlikte, genel yapı stabilitesini bozan bir unsur oluşturmadığı söylenebilir. Tane sınır yoğunluğunun düşük ve HAGB oranının yüksek

olması, yapının yüksek kristal bütünlüğüne ve düşük gözeneklilik potansiyeline sahip olduğunu desteklemektedir.

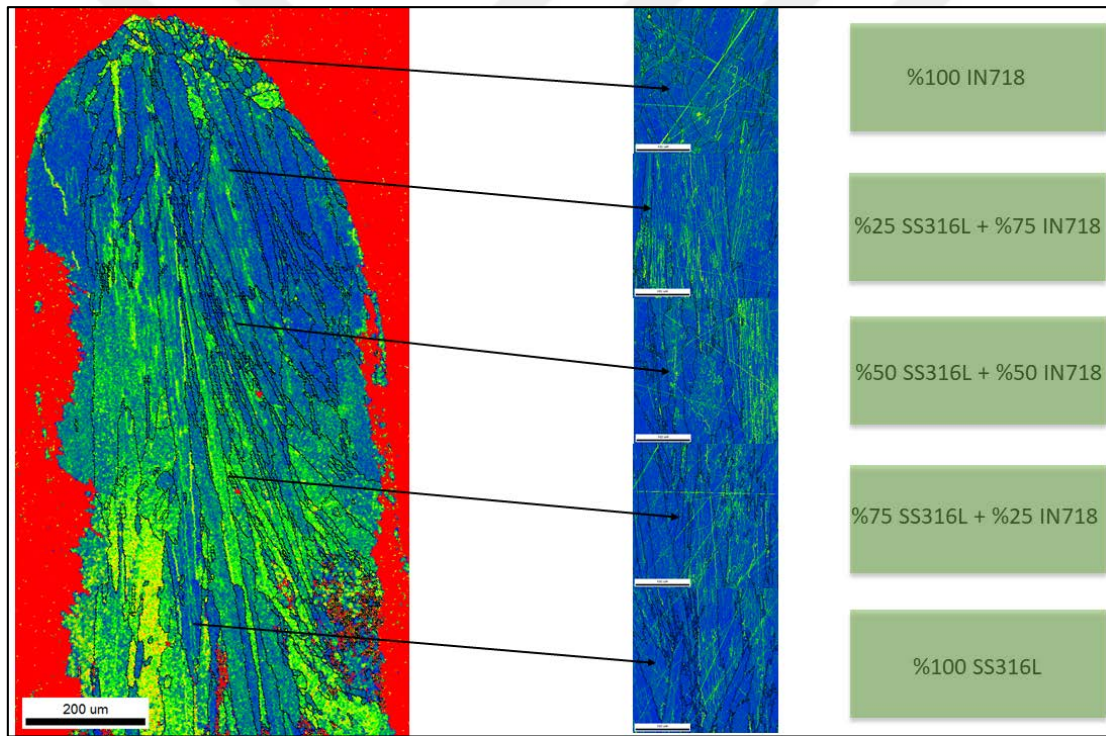
FGM numune 2'nin EBSD analizlerinden elde edilen bulgular, kristal yönlenme sürekliliği, düşük iç gerilme düzeyi ve ikinci faz oluşumunun yok denecek kadar az olmasıyla, oldukça dengeli bir mikro yapı karakterine işaret etmektedir. Bu olumlu sonuçların ardından, bir sonraki yapı olan FGM Numune 3'ün kristal özellikleri aşağıda değerlendirilmiştir. FGM numune 3'e ait EBSD taramasında, tüm yapı tek parça olarak başarıyla analiz edilmiştir. Ancak özellikle orta ve alt bölgelere ait genel görünüm haritasında, bazı alanlarda indeksleme kalitesi düşük çıkmıştır. Bu durumun, numune yüzeyinin lokal eğimi, topoğrafik bozukluklar veya kristal yapının EBSD sinyalini zayıflatacak şekilde yönlenmiş olması gibi nedenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, analiz edilen alanlar genel yönelim eğilimlerini yansıtmakta yeterli olup, geçiş bölgeleri hakkında anlamlı yapısal bilgiler sunmaktadır.



Resim 5.36. FGM numune 3'e %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait IPF haritaları

Resim 5.36'da FGM numune 3'e ait IPF haritaları, genel olarak üretim yönüne paralel kolonsu tane gelişiminin sürdüğünü göstermektedir. %100 SS316L'den başlayarak %100

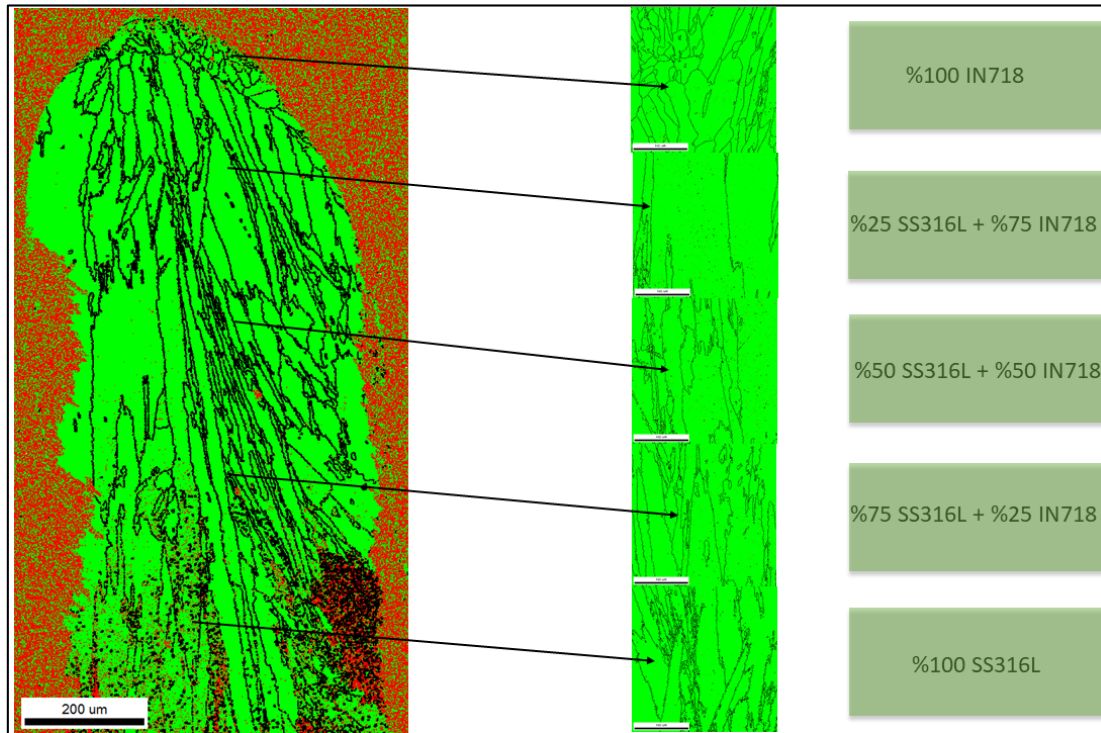
IN718'ye kadar olan geçişte, tanelerin büyük kısmı belirli yönlerde uzanmakta, bu da üretim sırasında belirgin bir termal gradyanın oluştuğunu göstermektedir. Ancak önceki numune olan FGM Numune 2 ile kıyaslandığında, bazı katmanlarda özellikle geçiş bölgelerinde yönelme kararlılığında yerel bozulmalar ve yön karmaşası dikkat çekmektedir. Bu durum özellikle %50 IN718 ve %25 IN718 içeren katmanlarda, renk geçişlerinin homojen olmamasından anlaşılmaktadır. Üst bölgedeki IN718 katmanında eş eksenli tanelerin hâkim olduğu görülmektedir; bu da daha düşük enerji yoğunluğu nedeniyle hızlı katılaşma ve yönlenme kaybıyla ilişkilendirilebilir. Genel olarak kolonsu yapı korunmuş olsa da, kristal oryantasyon sürekliliği önceki numuneye göre daha az düzenlidir. Bu durum mikroyapı kararlılığı açısından orta düzeyde bir başarıya işaret etmektedir.



Resim 5.37. FGM numune 3'e %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait KAM haritaları

Resim 5.37'de FGM numune 3'ün KAM haritalarında, önceki numunelere kıyasla daha belirgin iç gerilme izleri gözlenmektedir. Tüm bileşim bölgelerinde mavi alanlar çoğunlukta olmakla birlikte, yeşil tonların bazı bölgelerde yoğunlaştığı, hatta yer yer kırmızı sinyallerin belirdiği görülmektedir. Bu durum, üretim sürecinde bazı bölgelerde plastik deformasyon ya da hızlı katılaşmaya bağlı lokal stres birikimi oluştuğunu göstermektedir. Özellikle %25 SS316L - %75 IN718 kompozisyon bölgesinde, KAM değerlerinin diğer katmanlara göre

daha fazla olduğu dikkat çekmektedir. Bu geçiş bölgelerinde termal gradyanların ani değişim göstermesi ya da enerji yoğunluğu dengesizliğinin lokal iç gerilmeye neden olduğu düşünülmektedir. Üst bölgedeki %100 IN718 alanında eş eksenli kristallerin yaygınlığına rağmen dislokasyon çizgileri oldukça belirgindir. Bu da numunenin üst kısmında hızlı soğuma kaynaklı yön kararsızlıklarının ve iç gerilmelerin daha fazla biriktiğini göstermektedir. Sonuç olarak, FGM numune 3'ün genel yapısı düşük/orta iç gerilmeli olarak değerlendirilebilir.



Resim 5.38. FGM numune 3'e %100 IN718'den %100 SS316L'e kadar olan kompozisyon bölgelerine ait faz haritaları

Resim 5.38'de FGM numune 3'ün faz haritalarında, tüm katmanlarda yeşil rengin baskın olduğu ve mikro yapı içerisinde ikinci faz oluşumunun oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum, üretim sırasında uygulanan enerji yoğunluğu parametrelerinin alaşım bileşenlerinin çözünmesini büyük ölçüde sağladığını göstermektedir. %100 SS316L'den başlayarak %100 IN718'ye kadar olan geçişlerde, kırmızı renkli ikinci faz birikimlerine yalnızca %25 IN718 içeren katmanda rastlanmıştır. Literatürde de “kritik kompozisyon bölgesi” olarak tanımlanan bu oran, katılaşma sırasında mikrosegregasyon eğiliminin arttığı bir aralık olarak rapor edilmektedir. Ancak bu bölgeler yapının bütünlüğünü bozacak

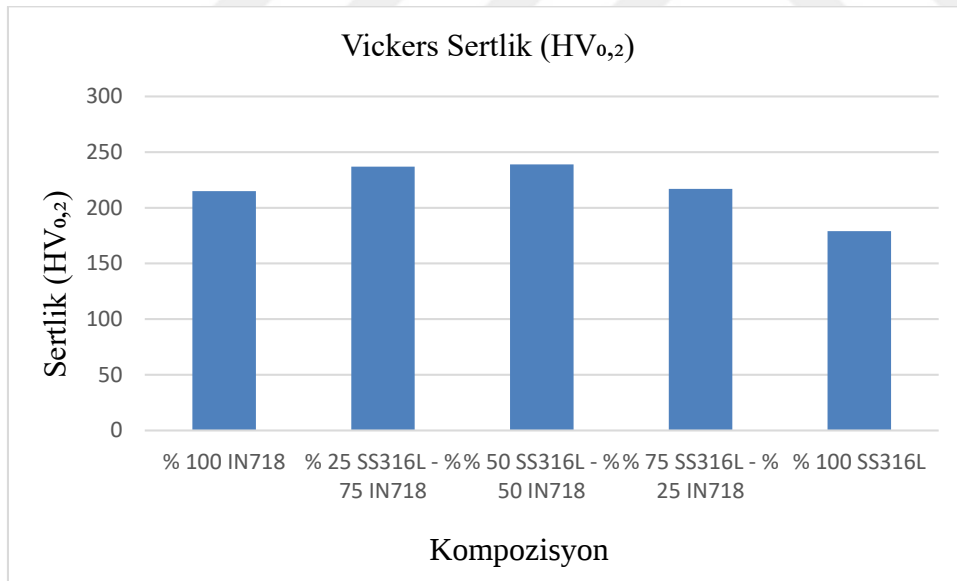
Üç farklı FGM numunesine ait EBSD analizleri karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, uygulanan enerji yoğunluğu stratejisinin kristal yönlenme, iç gerilme dağılımı, faz sürekliliği ve tane sınırı karakteristikleri üzerinde doğrudan belirleyici olduğu görülmüştür. FGM numune 1, farklı enerji yoğunluklarıyla üretildiği için kristal yönlenme sürekliliği zayıf kalmıştır. IPF haritalarında geçiş bölgelerinde kolonsu yönlenme kararsızlaşmış, KAM haritalarında yüksek iç gerilme ve dislokasyon yoğunluğu dikkat çekmiştir. Faz haritalarında ikinci faz birikimleri ve tane sınırı analizlerinde düşük açılı sınır yoğunluğu belirgin hale gelmiştir. Bu durum, numunenin kristal yapısında geçiş bölgelerine bağlı kararsızlıkların baskın olduğunu göstermektedir. FGM numune 2, sabit ve optimize enerji yoğunluğu sayesinde en düzenli kristal yapıyı sunmuştur. IPF haritalarında üretim yönüne paralel sürekliliğini koruyan kolonsu taneler, KAM haritalarında düşük misoryantasyon ve homojen iç gerilme dağılımı, faz haritalarında ise matris sürekliliğiyle karakterize edilmiştir. Tane sınırı analizleri de yüksek açılı sınırların baskınlığını göstermekte olup, bu numune kristal bütünlük ve yapısal kararlılık açısından en başarılı örnek olarak öne çıkmaktadır. FGM numune 3'te ise genel olarak kolonsu tane yapısı korunmakla birlikte, geçiş bölgelerinde yön kararsızlıkları ve lokal iç gerilme alanları gözlenmiştir. KAM haritalarında orta düzeyde misoryantasyon, tane sınırı haritalarında ise düşük açılı sınır yoğunluğunda artış dikkat çekmiştir. Faz haritalarında ikinci faz oluşumu sınırlı kalmakla birlikte, kritik geçiş bölgelerinde yer yer ayrışma izleri tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, numune 3'ün genel olarak kararlı ancak geçiş bölgelerinde numune 2'ye kıyasla daha az stabil bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, EBSD analizleri FGM numune 2'nin kristal yönlenme sürekliliği, düşük iç gerilme ve faz kararlılığı açısından en dengeli yapı olduğunu; numune 1'in geçiş bölgelerinde belirgin kristal kararsızlık sergilediğini; numune 3'ün ise orta düzeyde bir başarıya sahip olduğunu ortaya koymuştur.

5.2.5. Mikro sertlik dağılımları

Yukarıda sunulan mikroyapı, kimyasal bileşim, kristal yönelim ve gözeneklilik analizlerinin ardından, FGM yapılarının mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla vickers mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Üç farklı FGM numunesi üzerinde dik kesit yüzeyleri boyunca yapılan bu ölçümler, her kompozisyon katmanına karşılık gelen lokal sertlik değişimini ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, özellikle geçiş bölgelerinde meydana gelen sertlik dalgalanmalarının, mikroyapısal kararsızlıklar ve termal gradyan kaynaklı içyapı farklılıkları ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir.

FGM numune 1 için elde edilen vickers mikrosertlik değerleri, kompozisyon geçişi boyunca belirgin bir değişim göstermiştir. Sertlik değerleri 179 HV_{0,2} ile 239 HV_{0,2} aralığında ölçülmüş olup, ortalama sertlik 217 HV_{0,2}, standart sapma ise ± 24 olarak belirlenmiştir. Bu dağılım, geçişli yapının mikrosertlik açısından homojen olmadığını ve özellikle ikinci ile üçüncü ölçüm bölgelerinde sertlik artışının, IN718 oranının göreceli olarak yükseldiği kesitlerle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, SS316L içeriğinin baskın olduğu katmanlarda sertlik değerlerinin belirgin biçimde azaldığı tespit edilmiştir.

Mikrosertlik profilindeki bu dalgalanma davranışı, EBSD analizleriyle uyumlu olup, geçiş bölgelerinde görülen kristal yönelim farklılıkları ve tane içi kararsızlıkların mekanik yanıtı doğrudan yansıdığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, sertlik dağılımı yalnızca alaşım oranındaki değişimden değil, aynı zamanda üretim sırasında oluşan termal çevrimlerin mikroyapısal evrim üzerindeki etkisinden de kaynaklanmaktadır. Şekil 5.3’ de FGM numune 1’e ait ölçüm noktalarındaki sertlik değişimi grafiksel olarak sunulmuş olup, geçiş bölgelerinin mekanik bütünlük üzerindeki rolü açıkça görülmektedir.

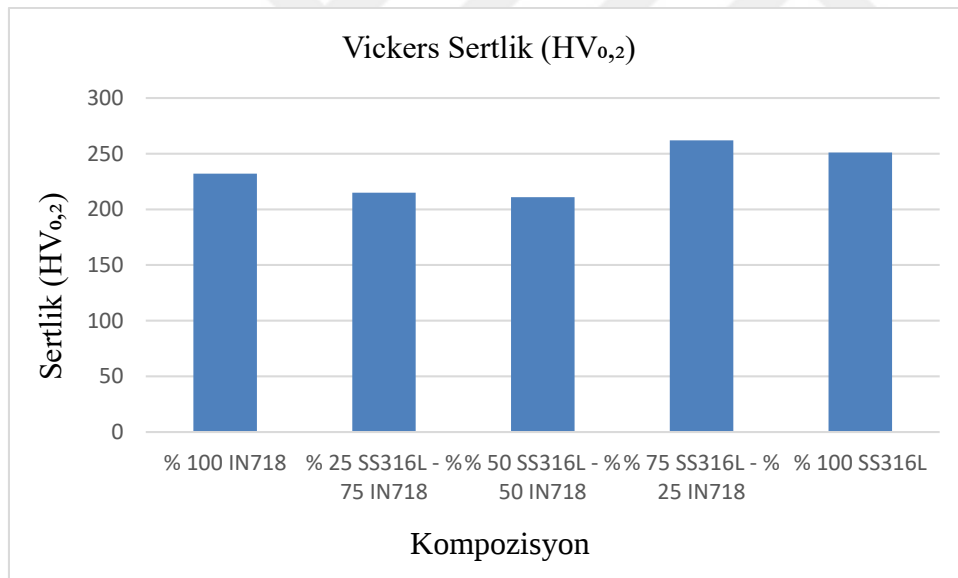


Şekil 5.3. FGM numune 1’in farklı bölgelerinden alınan mikrosertlik ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterimi

FGM numune 2’ye ait mikrosertlik ölçümleri, yapı boyunca beş farklı noktada gerçekleştirilmiştir. Ölçülen vickers HV_{0,2} değerleri 211 ile 262 aralığında değişmekte olup, ortalama sertlik 234 HV_{0,2} olarak hesaplanmıştır. Minimum sertliğin dahi nispeten yüksek olması ve dağılım aralığının daralması, bu numunenin geçiş bölgelerinde daha kararlı bir

mikroyapısal yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, hem alaşım geçişinin daha dengeli gerçekleştiğini hem de termal döngülerin mikro yapısal evrim üzerindeki etkisinin daha kontrollü olduğunu işaret etmektedir.

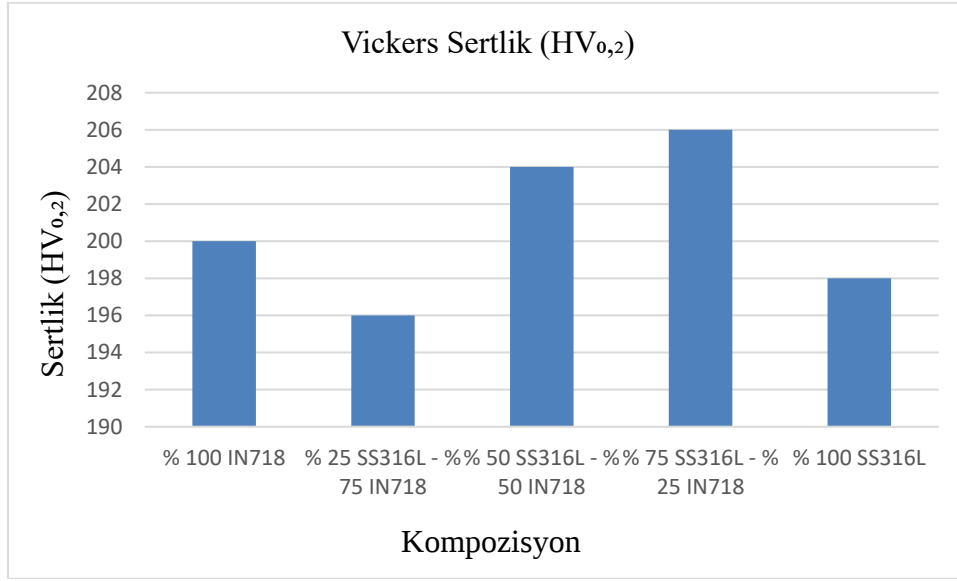
Özellikle dördüncü ve beşinci ölçüm noktalarında gözlenen sertlik artışı, IN718 fazının etkinliğinin bu bölgelerde daha belirgin hale geldiğini ve buna bağlı olarak tane incelmeleri ile yönelim düzenliliğinin sertlik profiline olumlu katkı sağladığını göstermektedir. %9,86 olarak hesaplanan varyasyon katsayısı, FGM numune 1 ile karşılaştırıldığında daha düşük düzeydedir ve bu yapıdaki sertlik dağılımının daha homojen olduğunu doğrulamaktadır. Bu eğilim, kristal yönelme ile mekanik yanıt arasındaki ilişkinin bu numunede daha tutarlı şekilde korunduğunu göstermektedir. Şekil 5.4’de FGM numune 2’ye ait ölçüm noktalarındaki sertlik değişimi grafiksel olarak verilmiş olup, geçiş bölgelerindeki sertlik artışının mikroyapısal düzenlilik ile doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir.



Şekil 5.4. FGM numune 2’nin farklı bölgelerinden alınan mikrosertlik ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterimi

FGM numune 3’ün dik kesit yüzeyinden alınan beş farklı noktada yapılan mikrosertlik ölçümleri, vickers HV_{0,2} değerlerinin 196 ile 206 arasında değiştiğini göstermektedir. Elde edilen ortalama sertlik değeri 201 HV_{0,2} olup, varyasyon katsayısı yalnızca %2,66 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, üç numune arasında en düşük sertlik değişimini ortaya koymakta ve bu numunenin mekanik açıdan en homojen yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Tüm ölçüm noktalarında sertlik değerlerinin birbirine oldukça yakın olması, geçiş bölgelerinde

belirgin bir dalgalanmanın bulunmadığına işaret etmektedir. Bu sonuç, mikroyapı içerisindeki kristal yönelmenin daha düzenli olduğunu ve kompozisyon geçişinin daha kontrollü şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. EBSD analizleri ile birlikte değerlendirildiğinde, FGM numune 3'te gözlenen mikroyapısal sürekliliğin sertlik dağılımına da doğrudan yansıdığı görülmektedir. Şekil 5.5'de numune boyunca elde edilen sertlik profili grafiksel olarak sunulmuş olup, geçiş bölgelerindeki homojenliğin mekanik sürekliliği desteklediği gözlemlenmektedir.



Şekil 5.5. FGM numune 3'ün farklı bölgelerinden alınan mikrosertlik ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterimi

Üç FGM numunesine ait mikrosertlik sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, geçişli yapının mekanik yanıtı üzerinde mikroyapısal sürekliliğin belirleyici rol oynadığı açıkça ortaya çıkmaktadır. FGM numune 1, geçiş bölgelerinde görülen kristal kararsızlıklar ve yönelim düzensizlikleri nedeniyle en yüksek sertlik varyasyonuna (%11,12) sahiptir ve sertlik dağılımındaki dalgalanmalar EBSD'de tespit edilen yapısal süreksizliklerle uyumludur. FGM numune 2, daha dengeli bir geçiş göstermiş olup, IN718 içeriğinin baskın olduğu bölgelerde sertlik artışı belirgindir; varyasyon katsayısı %9,86 ile ilk numuneye kıyasla daha düşüktür. FGM numune 3 ise 196-206 HV aralığında ve yalnızca %2,66'lık varyasyon katsayısı ile üç numune içinde en homojen sertlik profiline sahip yapıdır. Bu durum, mikroyapısal süreklilik ve termal kararlılığın mekanik yanıtla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, LYEY yöntemi ile SS316L-IN718 alaşım çiftinden fonksiyonel geçişli malzemeler üretilmiş ve üretim parametrelerinin mikro yapı, kimyasal homojenlik, kristal yönelim, yoğunluk ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri kapsamlı şekilde incelenmiştir. Çalışma üç temel aşamadan oluşmaktadır: (i) farklı kompozisyonlarda tek dikiş üretimleri ve analizleri, (ii) Abaqus tabanlı termal modelleme ile deneysel sonuçların karşılaştırılması, (iii) belirlenen enerji yoğunluğu stratejileriyle çok katmanlı FGM duvar üretimleri ve bunların mikroyapısal mekanik değerlendirmeleri.

Bu kapsamda ulaşılan genel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Bu çalışma, LYEY yöntemiyle SS316L-IN718 alaşım çiftinden fonksiyonel geçişli malzemelerin üretiminde enerji yoğunluğunun kritik bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. Enerji yoğunluğu, yalnızca eriyik havuzu geometrisini değil, aynı zamanda katılaşma morfolojisini, segregasyon eğilimini, faz oluşumunu ve mekanik özellikleri doğrudan etkilemiştir.
- SS316L zengin kompozisyonlarda ince eş eksenli taneler ve homojen bir mikro yapı baskın olurken, IN718 içeriği arttıkça yönlenmiş dendritik yapılar, laves fazı ve karbür çökeltileri yoğunlaşmış; bu da kimyasal heterojenliği ve kırılabilirlik eğilimini artırmıştır.
- %25 IN718 içeren numune, literatürde de raporlandığı üzere “kritik kompozisyon” davranışı göstermiştir. Bu bölgede Nb zenginleşmesine bağlı laves fazı çökeltileri, yüksek termal gradyanlar ve farklı ısı genleşme katsayıları birleşerek makro çatlakların oluşmasına neden olmuştur. Bu sonuç, geçiş tasarımlarında %20-30 IN718 aralığının özel dikkat gerektirdiğini ortaya koymaktadır.
- %50 IN718 kompozisyonu, hem EBSD sonuçları hem de mikrosertlik analizleriyle en kararlı yapı olarak belirlenmiştir. Bu numunede yönlenmiş sütunsu taneler korunmuş, iç gerilme birikimi sınırlı kalmış ve sertlik dağılımı dengeli olmuştur. Dolayısıyla %50 IN718, geçişli yapıların mekanik kararlılığı açısından optimum bileşim olarak öne çıkmıştır.
- Çok katmanlı FGM duvar üretimlerinde kullanılan enerji stratejileri arasında, yüksek/sabit enerji yoğunluğu stratejisi en başarılı sonuçları vermiştir. Bu stratejiyle üretilen FGM numune 2’de, katmanlar arası geçişler net, porozite ihmal edilebilir

düzeyde ve kristal süreklilik yüksek bulunmuştur. Böylelikle, FGM numune 2, mikroyapısal süreklilik ve mekanik kararlılık açısından en dengeli yapı olmuştur. Buna karşılık, düşük enerji yoğunluğu stratejisi (FGM numune 1) üst katmanlarda ergime yetersizliği ve poroziteye neden olmuş, orta/gradyan enerji yoğunluğu stratejisi (FGM numune 3) ise yapıyı büyük oranda korumuş ve homojen yapı göstermiş ancak geçiş bölgelerinde sınırlı yön kararsızlıkları yaratmıştır.

- Mikrosertlik analizleri, mikroyapıdaki kararlılık ile mekanik homojenlik arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir. FGM numune 1 en yüksek sertlik varyasyonuna sahip olup, bu durum kristal yönelme bozukluklarıyla ilişkilendirilmiştir. FGM numune 2’de sertlik dağılımı dengeli olurken, FGM numune 3 düşük varyasyon katsayısı (%2,66) ile en homojen mekanik yapıyı sunmuştur.
- Sayısal simülasyonlar, deneysel eriyik havuz geometrisi ile yüksek oranda uyum sağlamış ve modelin güvenilirliğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, özellikle yüksek oran da IN718 içeren kompozisyonlarda genişlik değerlerinde deneysel ve sayısal sonuçlar arasında daha yüksek sapmalar (~%6-7) elde edilmiştir. Bu farklılıkların temelinde, modelde Marangoni taşınımı, geri tepme basıncı ve keyhole davranışı gibi akış temelli mekanizmaların tanımlanmamış olması yatmaktadır. Bu sonuç, FGM tasarımlarında sayısal modellerin deneysel doğrulamayla birlikte kullanılmasının önemini vurgulamaktadır.

Genel olarak, bu çalışma FGM üretiminde hem kompozisyon oranlarının hem de enerji yoğunluğu stratejisinin mikro yapısal ve mekanik bütünlüğü belirleyen en kritik değişkenler olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle kritik kompozisyon aralıkları ve uygun enerji yoğunluğu seçiminin, çatlak oluşumu ve faz ayrışmalarının önlenmesinde belirleyici olduğu sonucuna varılmıştır.

Öneriler

- FGM üretiminde enerji yoğunluğu, özellikle kritik kompozisyon %20-30 IN718 aralığı için özel stratejiler uygulanmalıdır.
- Yüksek IN718 içerikli bölgelerde çatlak ve segregasyon riskini azaltmak için ön ısıtma, kontrollü soğutma veya farklı tarama stratejileri kullanılmalıdır.

- Sayısal simülasyonlara ek olarak CFD tabanlı yazılımlarla akış mekanizmaları (Marangoni taşınımı, geri tepme basıncı, keyhole davranışı) modellenmeli ve sayısal modele entegre edilmelidir.
- Gelecek çalışmalarda mikrosertlik ölçümleri, çekme, yorulma ve darbe testleriyle desteklenmeli; FGM yapıların servis koşullarındaki davranışları incelenmelidir.

Farklı tarama stratejilerinin (çift yönlü, spiral, çapraz) mikro yapı sürekliliği ve geçiş bölgelerindeki yönelme üzerindeki etkileri araştırılmalıdır.





KAYNAKLAR

1. Veeman, D., Subramaniyan, M.K., Browne, M.A. ve Muthu Kumar, T.K. (2025). Manufacturing and behavioral analysis of functionally graded material fabricated via wire arc additive manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 239(2), 311-318.
2. İnternet: Birman, V. ve Byrd, L. W., Modeling and Analysis of Functionally Graded Materials and Structures. URL: https://web.mst.edu/~vbirman/papers/Modeling%20and%20Analysis%20of%20FGM_Review_2007.pdf. Son Erişim Tarihi: 12.10.2025.
3. DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Beese, A.M., Wilson Heid, A.d., De, A. ve Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112-224.
4. Amirshami, M., Rohani Raftar, O., Rajabi, S., Hemasian Etefagh, A., Khajehzadeh, M. ve Razfar, M.R. (2025). Effects of re-melting on interfacial morphology of 316L/Inconel 625 functionally graded material via innovative platform integrated in selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*, 1-19.
5. Shang, X., Talbot, A., Li, E., Wen, H., Lyu, T., Zhang, J. ve Zou, Y. (2025). Accurate inverse process optimization framework in laser directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 102, 104736.
6. He, W., Zhu, L., Liu, C. ve Jiang, H. (2025). Metal additive manufacturing and molten pool dynamic characterization monitoring: Advances in Machine Learning for Directed Energy Deposition. *Metals*, 15(2), 106.
7. Coleman, J., Kincaid, K., Knapp, G.L., Stump, B., Reeve, S.T., Rolchigo, M. ve Plotkowski, A. (2025). AdditiveFOAM: a continuum multiphysics code for additive manufacturing. *Journal of Open Source Software*, 10(109), 7770.
8. Biswas, S., Nandi, S., Hussain, M.S., Mandal, A. ve Mukherjee, M. (2025). Influence of heat input on the interfacial characteristics of SS316L-In718 bi-metallic deposition for wire arc additive manufacturing. *Materials Letters*, 394, 138646.
9. Patel, R., Zhang, S., Dong, J., Hansen, M.H., Chen, W. ve Xie, K.Y. (2025). Laser-directed energy deposition as a promising dissimilar joining technique: a case study on SS316L and IN718 with CoCrFeNi-based fillers. *Materialia*, 39, 102381.
10. Chung, S.G., Lee, S.H., Eo, D., Cakmak, O., Kim, E.S., Ahn, S.Y., Kim, H.S., Yeom, H. ve Cho, J.-W. (2025). Crack mitigation at interface between Inconel 718 and stainless steel 316L during directed energy deposition under N₂ atmosphere. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, 4663-4676.

11. İnternet: Su, M., Chu, W., Jiang, F., Sun, P., Liu, Y. ve Wang, C. (2025). Effect of Heat Treatment Regime on Microstructure and Mechanical Properties of 316L/In718 Functionally Graded Materials Prepared by High-Throughput Selective Laser Melting. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5202918. Son Erişim Tarihi: 12.10.2025.
12. Singh, R.K., Arya, S.B. ve Nayak, J. (2025). Meltpool characteristics, microstructure, and corrosion performance of laser directed energy deposition clad 316 L SS/x70 steel for oilfield applications. *Materials Today Communications*, 46, 112898.
13. Ferreira, I.A. (2020). *Fibre reinforced thermoplastic composite parts produced by additive manufacturing*. Doctor of Philosophy, A Comprehensive Characterization Study, Universidade do Porto, Porto.
14. Miedzinski, M. (2017). *Materials for additive manufacturing by direct energy deposition* Master of Science, Department of Materials and Manufacturing Technology, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
15. Milewski, J. O. (2017). Additive manufacturing metal, the art of the possible. *In Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry* 7-33.
16. Thompson, S.M., Bian, L., Shamsaei, N. ve Yadollahi, A. (2015). An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; part i: transport phenomena, modeling and diagnostics. *Additive Manufacturing*, 8, 36-62.
17. Martínez-García, A., Monzón, M. ve Paz, R. (2021). Standards for additive manufacturing technologies: Structure and impact. *Additive manufacturing*, 395-408.
18. Everton, S.K., Hirsch, M., Stravroulakis, P., Leach, R.K. ve Clare, A.T. (2016). Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials & Design*, 95, 431-445.
19. Frazier, W.E. (2014). Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1917-1928.
20. Lewandowski, J.J. ve Seifi, M. (2016). Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties. *Annual Review of Materials Research*, 46(1), 151-186.
21. Jiao, L., Chua, Z.Y., Moon, S.K., Song, J., Bi, G. ve Zheng, H. (2018). Femtosecond laser produced hydrophobic hierarchical structures on additive manufacturing parts. *Nanomaterials*, 8(8), 601.
22. Buj-Corral, I., Tejo-Otero, A. ve Fenollosa-Artés, F. (2020). Development of am technologies for metals in the sector of medical implants. *Metals*, 10(5), 686.
23. Shahrubudin, N., Lee, T.C. ve Ramlan, R. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286-1296.

24. Sun, S., Durandet, Y. ve Brandt, M. (2005). Parametric investigation of pulsed Nd: YAG laser cladding of stellite 6 on stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 194, 225-231.
25. Toyserkani, E., Khajepour, A. ve Corbin, S. (2004). 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process. *Optics and Lasers in Engineering*, 41(6), 849-867.
26. Liu, B., Liu, W., Xia, Y., Huang, Y., Liu, Y., Zhao, Y., Liu, H., Wang, Z., Li, W. ve Song, J. (2024). Real time closed loop control of molten pool transient area in direct laser deposition via PID algorithm with enhanced robustness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 130(9), 4529-4542.
27. Gong, H., Rafi, K., Gu, H., Starr, T. ve Stucker, B. (2014). Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*, 1, 87-98.
28. Li, W., Karnati, S., Kriewall, C., Liou, F., Newkirk, J., Taminger, K.M.B. ve Seufzer, W.J. (2017). Fabrication and characterization of a functionally graded material from Ti-6Al-4V to SS316 by laser metal deposition. *Additive Manufacturing*, 14, 95-104.
29. Azarniya, A., Colera, X.G., Mirzaali, M.J., Sovizi, S., Bartolomeu, F., Wits, W.W., Yap, C.Y., Ahn, J., Miranda, G. ve Silva, F.S. (2019). Additive manufacturing of Ti-6Al-4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 804, 163-191.
30. Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F. ve Mehrpouya, M. (2019). Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry. A review, *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 124-149.
31. Wilson, J.M., Piya, C., Shin, Y.C., Zhao, F. ve Ramani, K. (2014). Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis. *Journal of Cleaner Production*, 80, 170-178.
32. Yamazaki, T. (2016). Development of a hybrid multi tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia Cirp*, 42, 81-86.
33. Zhao, Y. (2019). *A study on building process and microstructure formation of biomedical CoCrMo alloy in electron beam powder bed additive manufacturing*. Doctor of Philosophy, Tohoku University, Sendai.
34. Griffith, M., Keicher, D., Atwood, C.L., Romero, J., Smugeresky, J., Harwell, L. ve Greene, D. (1996). *Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping*. Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Austin, USA.

35. Parthasarathy, J., Starly, B. ve Raman, S. (2011). A design for the additive manufacture of functionally graded porous structures with tailored mechanical properties for biomedical applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 13(2), 160-170.
36. Popovich, V., Borisov, E., Popovich, A., Sufiiarov, V.S., Masaylo, D. ve Alzina, L. (2017). Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties. *Materials and Design*, 114, 441-449.
37. İnternet: Yan, J., Optimal design of process parameters during laser direct metal deposition of multi-material parts. URL: https://open.clemson.edu/all_dissertations/1813/. Son Erişim Tarihi: 12.10.2025.
38. Tabernero, I., Lamikiz, A., Ukar, E., De Lacalle, L.L., Angulo, C. ve Urbikain, G. (2010). Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15), 2125-2134.
39. Lin, J. (2000). Laser attenuation of the focused powder streams in coaxial laser cladding. *Journal of Laser Applications*, 12(1), 28-33.
40. Siva Prasad, H., Brueckner, F. ve Kaplan, A.F. (2019). Powder catchment in laser metal deposition. *Journal of Laser Applications*, 31(2), 292-300.
41. Piscopo, G., Atzeni, E. ve Salmi, A. (2019). A hybrid modeling of the physics driven evolution of material addition and track generation in laser powder directed energy deposition. *Materials*, 12(17), 2819.
42. Ibarra-Medina, J. ve Pinkerton, A.J. (2011). Numerical investigation of powder heating in coaxial laser metal deposition. *Surface Engineering*, 27(10), 754-761.
43. Ansari, M., Martinez-Marchese, A., Huang, Y. ve Toyserkani, E. (2020). A mathematical model of laser directed energy deposition for process mapping and geometry prediction of Ti-5553 single tracks. *Materialia*, 12, 100710.
44. Pinkerton, A.J. (2015). Advances in the modeling of laser direct metal deposition. *Journal of Laser Applications*, 27(1), 15001.
45. Prata, J.L.A. (2019). *Fatigue Behaviour of Miniature Specimens Produced by Additive Manufacturing*. Master of Science, Universidade do Porto, Porto.
46. De Oliveira, U., Ocelík, V. ve De Hosson, J.T.M. (2005). Analysis of coaxial laser cladding processing conditions. *Surface and Coatings Technology*, 197, 2-3, 127-136.
47. Jouvard, J.M., Grevey, D., Lemoine, F. ve Vannes, A. (1997). Continuous wave Nd: YAG laser cladding modeling: a physical study of track creation during low power processing. *Journal of Laser Applications*, 9(1), 43-50.

48. Joshi, R.K., Alwarappan, S., Yoshimura, M., Sahajwalla, V. ve Nishina, Y. (2015). Graphene oxide: the new membrane material. *Applied Materials Today*, 1(1), 1-12.
49. Knoppers, G., Gunnink, J., Van Den Hout, J. ve Van Vliet, W. (2004). *The reality of functionally graded material products*. In Intelligent Production Machines and Systems: First I PROMS Virtual Conference, Amsterdam, 467-474.
50. Long, L., Wang, Z. ve Chen, K. (2015). Analysis of the hollow structure with functionally gradient materials of moso bamboo. *Journal of Wood Science*, 61, 569-577.
51. Zhang, N., Khan, T., Guo, H., Shi, S., Zhong, W. ve Zhang, W. (2019). Functionally graded materials: an overview of stability, buckling, and free vibration analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1, 1354150.
52. Jha, D., Kant, T. ve Singh, R. (2013). A critical review of recent research on functionally graded plates. *Composite Structures*, 96, 833-849.
53. Shen, M. ve Bever, M. (1972). Gradients in polymeric materials. *Journal of Materials Science*, 7, 741-746.
54. Shojaeefard, M.H., Googarchin, H.S., Ghadiri, M. ve Mahinzare, M. (2017). Micro temperature dependent FG porous plate: Free vibration and thermal buckling analysis using modified couple stress theory with CPT and FSDT. *Applied Mathematical Modelling*, 50, 633-655.
55. Schmidt, A., Jensch, F. ve Härtel, S. (2023). Multi material additive manufacturing-functionally graded materials by means of laser remelting during laser powder bed fusion. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 18(4), 49.
56. Domack, M. ve Baughman, J. (2005). Development of nickel titanium graded composition components. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), 41-51.
57. Knoll, H., Ocylok, S., Weisheit, A., Springer, H., Jägle, E. ve Raabe, D. (2017). Combinatorial alloy design by laser additive manufacturing. *Steel Research International*, 88(8), 1600416.
58. Li, Y., Song, P., Wang, W., Lei, M. ve Li, X. (2020). Microstructure and wear resistance of a Ni-WC composite coating on titanium grade 2 obtained by electroplating and electron beam remelting. *Materials Characterization*, 170, 110674.
59. Niendorf, T., Leuders, S., Riemer, A., Brenne, F., Tröster, T., Richard, H.A. ve Schwarze, D. (2014). Functionally Graded Alloys Obtained by Additive Manufacturing. *Advanced Engineering Materials*, 16(7).
60. Voigt, W. (1889). Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper. *Annalen Der Physik*, 274(12), 573-587.
61. Mori, T. ve Tanaka, K. (1973). Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*, 21(5), 571-574.

62. Christensen, R. ve Lo, K. (1979). Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 27(4), 315-330.
63. Gasik, M.M. (1998). Micromechanical modelling of functionally graded materials. *Computational Materials Science*, 13(1), 42-55.
64. Hashin, Z. (1962). The elastic moduli of heterogeneous materials. *Journal of Applied Mechanics*, 29(1), 143-150.
65. Hill, R. (1965). A self-consistent mechanics of composite materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 13(4), 213-222.
66. Reuß, A. (1929). Berechnung der fließgrenze von mischkristallen auf grund der plastizitätsbedingung für einkristalle. *ZAMM Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 9(1), 49-58.
67. Tamura, I. (1973). *Strength and ductility of Fe-Ni-C alloys composed of austenite and martensite with various strength*. Proceedings of the Third International Conference on Strength of Metals and Alloys, 611-615.
68. Wakashima, K. ve Tsukamoto, H. (1991). Mean field micromechanics model and its application to the analysis of thermomechanical behaviour of composite materials. *Materials Science and Engineering: A*, 146, 291-316.
69. Benveniste, Y. (1987). A new approach to the application of Mori Tanaka's theory in composite materials. *Mechanics of Materials*, 6(2), 147-157.
70. Karami, B., Shahsavari, D., Janghorban, M. ve Li, L. (2019). Influence of homogenization schemes on vibration of functionally graded curved microbeams. *Composite Structures*, 216, 67-79.
71. Nemati, A. ve Mahmoodabadi, M. (2020). Effect of micromechanical models on stability of functionally graded conical panels resting on Winkler Pasternak foundation in various thermal environments. *Archive of Applied Mechanics*, 90(5), 883-915.
72. Wakashima, K., Hirano, T. ve Niino, M. (1990). Functionally gradient materials (FGM) architecture: a new type of ceramic metal assemblage designed for hot structural components. *Ceramic Transactions*, 34, 25-32.
73. Delfosse, D. (1998). Fundamentals of functionally graded materials. *Materials Today*, 1(4), 18.
74. Chi, S. ve Chung, Y. (2002). Cracking in sigmoid functionally graded coating. *Journal of Mechanics*, 18, 41-53.
75. Chi, S.-H. ve Chung, Y.-L. (2006). Mechanical behavior of functionally graded material plates under transverse load Part I: Analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 43(13), 3657-3674.

76. Kim, J.H. ve Paulino, G.H. (2002). Finite element evaluation of mixed mode stress intensity factors in functionally graded materials. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 53(8), 1903-1935.
77. Zhang, C., Savaidis, A., Savaidis, G. ve Zhu, H. (2003). Transient dynamic analysis of a cracked functionally graded material by a biem. *Computational Materials Science*, 26, 167-174.
78. Dass, A. (2020). *Fundamentals of solidification in directed energy deposition type additive manufacturing of Inconel 625*. Master of Science, The Pennsylvania State University, Pennsylvania.
79. Rathor, S., Kant, R. ve Singla, E. (2024). Effect of laser energy density on bead characteristics in wire DED. *Sādhanā*, 49(2), 104.
80. Kunieda, M., Suzuki, A., Takata, N., Kato, M. ve Kobashi, M. (2023). Introducing hatch spacing into deposited energy density toward efficient optimization of laser powder bed fusion process parameters. *Materials Transactions*, 64(6), 1099-1106.
81. Kahya, H., Gurun, H. ve Kucukturk, G. (2023). Experimental and analytical investigation of the re-melting effect in the manufacturing of 316l by direct energy deposition (DED) method. *Metals*, 13(6), 1144.
82. Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L. ve Thompson, S.M. (2015). An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; part ii: mechanical behavior, process parameter optimization and control. *Additive Manufacturing*, 8, 12-35.
83. Muslim, T., Karagoz, T., Ozkok, R., Yilmaz, O. ve Kas, M. (2021). Influence of laser energy density on geometrical forms produced by laser metal deposition of PH 13-8 Mo stainless steel. *Journal of Additive Manufacturing Technologies*, 1(3), 591-591.
84. Wolff, S.J., Lin, S., Faierson, E.J., Liu, W.K., Wagner, G.J. ve Cao, J. (2017). A framework to link localized cooling and properties of directed energy deposition (DED) processed Ti-6Al-4V. *Acta Materialia*, 132, 106-117.
85. Zhang, Y. (2024). *Characterizing thermal history, microstructure and defect interactions in additively manufactured nickel superalloys*. Doctor of Philosophy, The University of Arizona, Tucson.
86. Pilagatti, A.N. (2024). *Towards effective production in DED: linking process parameters to the properties of the deposition*. Doctor of Philosophy, Politecnico di Torino, Torino.
87. Lee, Y., Nordin, M., Babu, S.S. ve Farson, D.F. (2014). Effect of fluid convection on dendrite arm spacing in laser deposition. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 45, 1520-1529.
88. Abusalma, H., Eisazadeh, H., Hejripour, F., Bunn, J. ve Aidun, D.K. (2022). Parametric study of residual stress formation in Wire and Arc Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 75, 863-876.

89. Dantin, M. J. (2021). *Thermomechanical modeling predictions of the directed energy deposition process using a dislocation mechanics based internal state variable model*. Doctor of Philosophy, Mississippi State University, Starkville.
90. Folchi, F. (2014). *Weld distortion prediction with virtual analysis for practical applications*. Master of Science, University of Windsor, Ontario.
91. Peyre, P., Aubry, P., Fabbro, R., Neveu, R. ve Longuet, A. (2008). Analytical and numerical modelling of the direct metal deposition laser process. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(2), 025403.
92. Fu, Y., Xie, S., Xu, X., Huang, G., Cheng, L. ve He, Y. (2010). Optimization of processing parameters for laser powder deposition using finite element method. *Journal of Wuhan University of Technology Mater*, 25, 832-837.
93. de La Batut, B., Fergani, O., Brotan, V., Bambach, M. ve El Mansouri, M. (2017). Analytical and numerical temperature prediction in direct metal deposition of Ti6Al4V. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 1(1), 3.
94. Gouge, M.F., Heigel, J.C., Michaleris, P. ve Palmer, T.A. (2015). Modeling forced convection in the thermal simulation of laser cladding processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79, 307-320.
95. Ju, H., Xu, P., Lin, C. ve Sun, D. (2015). Test and temperature field of finite element simulation about the effect of scanning speed on 304 stainless layer's properties by laser cladding. *Materials Research Innovations*, 19(8), S8-9.
96. Jayanath, S. ve Achuthan, A. (2018). A computationally efficient finite element framework to simulate additive manufacturing processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 140(4), 041009.
97. Wang, L. ve Felicelli, S. (2006). Analysis of thermal phenomena in LENS™ deposition. *Materials Science and Engineering: A*, 435, 625-631.
98. Xiong, Y., Hofmeister, W.H., Cheng, Z., Smugeresky, J.E., Lavernia, E.J. ve Schoenung, J.M. (2009). In situ thermal imaging and three dimensional finite element modeling of tungsten carbide cobalt during laser deposition. *Acta Materialia*, 57(18), 5419-5429.
99. Zheng, B., Zhou, Y., Smugeresky, J., Schoenung, J. ve Lavernia, E. (2008). Thermal behavior and microstructural evolution during laser deposition with laser engineered net shaping: Part I. Numerical calculations. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39, 2228-2236.
100. Kiran, A., Hodek, J., Vavřík, J., Urbánek, M. ve Džugan, J. (2020). Numerical simulation development and computational optimization for directed energy deposition additive manufacturing process. *Materials*, 13(11), 2666.
101. Bonifaz, E. A. (2019). *Modelling of thermal transport in wire + arc additive manufacturing process*. Computational Science ICCS 2019: 19th International Conference, Faro, Portugal, 12–14.

102. Zhao, L., Li, Y., Xu, R., Guo, Z., Liu, Y., Feng, S., Niu, F. ve Zheng, K. (2025). Numerical and experimental investigations on the thermomechanical oscillations of additively manufactured stainless steel parts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 240, 126666.
103. Dantin, M. J., Furr, W. M. ve Priddy, M. W. (2018). *Towards an open-source, preprocessing framework for simulating material deposition for a directed energy deposition process*. Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2018), Austin, Texas, 1708–1720.
104. Marion, G., Cailletaud, G., Colin, C. ve Mazière, M. (2014). *A finite element model for the simulation of direct metal deposition*. International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, 834-841: Laser Institute of America.
105. Liang, X., Cheng, L., Chen, Q., Yang, Q. ve To, A.C. (2018). A modified method for estimating inherent strains from detailed process simulation for fast residual distortion prediction of single walled structures fabricated by directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 23, 471-486.
106. Li, W., Kishore, M., Zhang, R., Bian, N., Lu, H., Li, Y., Qian, D. ve Zhang, X. (2023). Comprehensive studies of SS316L/IN718 functionally gradient material fabricated with directed energy deposition: Multi-physics & multi-materials modelling and experimental validation. *Additive Manufacturing*, 61, 103358.
107. Gouge, M., Michaleris, P., Denlinger, E. ve Irwin, J. (2018). The finite element method for the thermo mechanical modeling of additive manufacturing processes. *Thermo Mechanical Modeling of Additive Manufacturing*, 19-38.
108. Song, X., Feih, S., Zhai, W., Sun, C.-N., Li, F., Maiti, R., Wei, J., Yang, Y., Oancea, V. ve Brandt, L.R. (2020). Advances in additive manufacturing process simulation: Residual stresses and distortion predictions in complex metallic components. *Materials and Design*, 193, 108779.
109. Hagen, L., Yu, Z., Clarke, A., Clarke, K., Tate, S., Petrella, A. ve Klemm-Toole, J. (2023). High deposition rate wire-arc directed energy deposition of 316L and 316LSi: Process exploration and modelling. *Materials Science and Engineering: A*, 880, 145044.
110. Kiran, A., Li, Y., Hodek, J., Brázda, M., Urbánek, M. ve Džugan, J. (2022). Heat source modeling and residual stress analysis for metal directed energy deposition additive manufacturing. *Materials*, 15(7), 2545.
111. Sarkar, S., Singh, I.V., Mishra, B., Shedbale, A. ve Poh, L. (2019). A comparative study and ABAQUS implementation of conventional and localizing gradient enhanced damage models. *Finite Elements in Analysis and Design*, 160, 1-31.
112. Bonifaz, E. ve Mena, A. (2021). A directed energy deposition additive manufacturing process simulated with ABAQUS AM modeler. *International Journal of Robotic Engineering*, 6(1), 2-6.

113. An, N., Yang, G., Yang, K., Wang, J., Li, M. ve Zhou, J. (2021). Implementation of Abaqus user subroutines and plugin for thermal analysis of powder-bed electron-beam-melting additive manufacturing process. *Materials Today Communications*, 27, 102307.
114. Zhou, J., Shen, L., Yang, X., Li, R. ve Pan, K. (2025). Tuning pores and mechanical properties for the heterogeneous interface of laser directed energy deposited IN718/316L laminate via in situ laser surface remelting. *Journal of Alloys and Compounds*, 1010, 177872.
115. Ghanavati, R., Naffakh-Moosavy, H. ve Moradi, M. (2021). Additive manufacturing of thin-walled SS316L-IN718 functionally graded materials by direct laser metal deposition. *Journal Of Materials Research and Technology*, 15, 2673-2685.
116. Horak, J., Sikka, V. ve Raske, D. (1985). Review of effects of long-term aging on the mechanical properties and microstructures of types 304 and 316 stainless steel. *Oak Ridge National Laboratory (ORNL) and Argonne National Laboratory (ANL), USA*.
117. Keomoungkhoun, M. (2021). *A comparative analysis of microstructural characterization and mechanical performance of SS316L metal specimens fabricated by directed energy deposition and fused deposition modeling*. Master of Science, State University of New York at Binghamton, Binghamton.
118. Main, S. (1935). The properties, characteristics and uses of stainless steel. *Journal of the Royal Society of Arts*, 83(4307), 672-700.
119. Abu-Lebdeh, T.M., Leon, G.P.-d., Hamoush, S.A., Seals, R.D. ve Lamberti, V.E. (2016). Gas atomization of molten metal: part II. Applications. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(2), 384-401.
120. Dortkasli, K., Isik, M. ve Demir, E. (2022). A thermal finite element model with efficient computation of surface heat fluxes for directed energy deposition process and application to laser metal deposition of IN718. *Journal of Manufacturing Processes*, 79, 369-382.
121. Bassoli, E. ve Denti, L. (2018). Assay of secondary anisotropy in additively manufactured alloys for dental applications. *Materials*, 11(10), 1831.
122. Guo, S., Zhao, R., Huang, Z., Yang, D., Yue, X., Guo, X., Tang, H., Yang, L. ve Zhang, F. (2025). Optimizing porous Ti-6Al-4V alloys: Gradients disordered cell enhance mechanical properties and energy absorption. *Journal of Manufacturing Processes*, 137, 342-362.



Gazili olmak ayrıcalıktır