



**TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE ISIL ÇEVİRİMLERİN
MİKROYAPI OLUŞUMUNA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Adem KAYADELEN

**DOKTORA TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2026

ETİK BEYAN

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

Adem KAYADELEN

08/01/2026

TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE ISIL ÇEVİRİMLERİN MİKROYAPI OLUŞUMUNA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Adem KAYADELEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2026

ÖZET

Tel-Ark Eklemeli İmalat (WAAM), elektriği ısıya, metalik teli yapıya dönüştürerek metal parçaları katmanlar hâlinde üreten bir teknolojidir. WAAM, özellikle büyük, yoğun ve yapısal parçaların üretiminde yüksek biriktirme hızı ve malzeme verimliliğiyle öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, yüzey pürüzlülüğü, metalurjik bağlanma zorlukları ve artık gerilmeler gibi bazı sınırlılıklar da söz konusudur. WAAM süreçlerinde tekrarlayan ısınma-soğuma döngüleri, mikroyapı ve faz oluşumunu doğrudan etkilemekte; bu nedenle, bu etkilerin hesaplamalı soğuma diyagramları aracılığıyla incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) ER70S-6 çeliği kullanılarak MIG-CMT tabanlı WAAM yöntemiyle farklı ısı girdilerinde numuneler üretilmiş ve mikroyapı ile mekanik özellikler incelenmiştir. Elektron mikroskopisi, EBSD, termal kamera ölçümleri ve Thermo-Calc tabanlı hesaplamalarla elde edilen veriler karşılaştırılarak ısı girdisinin mikroyapı evrimi ve faz dönüşümleri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, farklı ısı girdileriyle üretilen numunelerde ölçülen mikrosertlik değerleri arasında anlamlı bir fark gözlenmemiştir; ortalama mikrosertlik değerleri 235–248 HV aralığında değişmiştir. Elektron mikroskopisi ve CCT diyagramları üzerinden belirlenen poligonal/quasi poligonal ferrit, asiküler ferrit ve beynit fazlarının dağılımı, bu mikrosertlik sonuçlarıyla uyum göstermiştir. On katmanlı üretimlerde, üç farklı ısı girdisinde elde edilen duvar numunelerinin orta bölgelerinde ortalama tane boyutunun 11,8–13,2 μm aralığında, ortalama en-boy oranının ise 1,6–1,8 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler, mikroyapının ağırlıklı olarak eş eksenli karakterde olduğunu göstermektedir. 30 katman şeklinde imal edilen numunelerden alınan EBSD analiz sonuçları neticesinde yapının dipten kepe HMK-Fe fazında olduğu görülmüştür. Deneysel bulguların analizi sonucunda, ısı girdisi ile mikroyapı ve mekanik özellikler arasında doğrudan bir bağıntı kurulmuştur. Katmanlı imalatın doğasında bulunan karmaşık ısı çevrimler nedeniyle klasik soğuma eğrilerinin faz dönüşümlerini doğru yansıtmadığı görülmüş; bu durumu daha doğru modelleyebilmek için hesaplamalı bir yaklaşım önerilmiştir. Katmanlı imalatın karmaşık ısı durumu göz önünde bulundurulduğunda klasik soğuma eğrileri üzerinden faz tahmini yapmanın doğru sonuçlara ulaştırmayacağı tespit edilmiş olup bu durum için bir yaklaşım önerisinde bulunulmuştur. Üretimin ısı kamera ile izlenmesi ve çalışılan malzeme özelinde ICME programı üzerinden elde edilecek TTT diyagramları kullanılarak üretim yapılmadan karşılaşılabilecek fazlara ilişkin öngörülerde bulunmanın deney tekrarlarını azaltma ve araştırma süreçlerine esneklik kazandırma gibi avantajlarıyla eklemeli imalat uygulamaları için umut vadeden bir araç olarak değerlendirilmiştir.

Bilim Kodu : 91533
Anahtar Kelimeler : WAAM, MIG-CMT, ER70S-6, tümleşik hesaplamalı malzeme mühendisliği
Sayfa Adedi : 118
Danışman : Prof. Dr. Hakan ATEŞ
İkinci Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE THERMAL CYCLES ON
MICROSTRUCTURAL EVOLUTION IN WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING
(Ph. D. Thesis)

Adem KAYADELEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE

January 2026

ABSTRACT

Additive manufacturing by wire and arc (WAAM) is a technology that transforms electricity into heat and metallic wire into structure, producing metal components layer by layer. WAAM stands out with its high deposition rate and material efficiency, particularly in the fabrication of large, dense, and structural parts. However, certain limitations—such as surface roughness, metallurgical bonding challenges, and residual stresses—remain present. The cyclic thermal behavior inherent to WAAM processes, characterized by repetitive heating and cooling, directly influences microstructure and phase formation; therefore, investigating these effects through computational cooling diagrams is of significant importance. In this study, high-strength low-alloy (HSLA) ER70S-6 steel was processed using a MIG-CMT-based WAAM system under different heat input conditions to examine the relationships between process parameters, microstructure, and mechanical properties. Data obtained from electron microscopy, EBSD, thermal imaging, and Thermo-Calc-based calculations were compared to reveal the influence of heat input on microstructural evolution and phase transformations. The results showed no statistically significant variation in microhardness among samples produced at different heat inputs, with average values ranging between 235 and 248 HV. The distribution of polygonal/quasi-polygonal ferrite, acicular ferrite, and bainite phases identified through electron microscopy and CCT diagrams was consistent with the hardness findings. In ten-layer builds, the average grain size in the mid-wall region ranged between 11.8 and 13.2 μm , with an aspect ratio of 1.6–1.8, indicating a predominantly equiaxed microstructure. EBSD analyses of thirty-layer samples revealed that the structure from the bottom to the top primarily consisted of the BCC-Fe phase. The analysis of experimental findings demonstrated a direct correlation between heat input, microstructure, and mechanical behavior. Owing to the complex thermal cycles inherent in additive manufacturing, conventional cooling curves were found inadequate for accurately predicting phase transformations; thus, a computational approach was proposed for improved modeling. Monitoring the build process via thermal imaging and employing TTT diagrams generated from ICME-based simulations prior to manufacturing were found to provide predictive insights into possible phase formations. This approach has been evaluated as a promising tool for WAAM applications, offering advantages such as reduced experimental iterations and greater flexibility in research design.

Science Code : 91533
Key Words : WAAM, MIG-CMT, ER70S-6, integrated computational materials engineering
Page Number : 118
Supervisor : Prof. Dr. Hakan ATEŞ
Co-Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Özünde ve işinde merhamet sahibi olan Allah'ın adı ve O'nun gönderdiği alemlere rahmet olan Hz. Muhammed'e (sav) selam ile söze başlarken,

Öncelikle Kıymetli Eşim Banu Hanım'a ve çocuklarım Meryem ve Cihat'a sabırları için teşekkür ederim. Bu yaşıma gelmemde çok büyük emekleri bulunan Elmas Halam'a ve Bilal Amcam ile Anne ve Babama minnettarım. Tez Danışmanlarım Prof. Dr. Hakan ATEŞ ve Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ ile tez izleme komitesi üyelerim Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK ve Doç. Dr. Mete BAKIR'a teşekkür ederim. Tez izleme komitesi üyesi iken vefat eden Doç. Dr. Caner ŞİMŞİR'e Allah'tan rahmet dilerim.

Doktora sürecim, baştan sona bir proje yönetimi çerçevesinde ilerleyen ve birçok ara yüzü bulunan bir macera olarak çok kişiye temas etmemi gerektirdi. Bu gereklilik zaman zaman gergin zaman zaman eğlenceli ve sürekli öğretici biçimde ilerledi. Bu bağlamda;

Gazi Üniversitesi AMTRG Grubuna, Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvar Görevlilerine, AYBÜ MERLAB çalışanlarına, Gazi BAP Birimi Yetkililerine, TÜBİTAK ARDEB Yetkililerine, Intecro Robotic A.Ş.'den Ece Hanım'a, Metalworm Eklemeli İmalat Teknolojileri A.Ş.'den Nevzat Bey'e, Onatus ve Simultura çalışanlarına minnettar olduğumu bildirmek isterim.

Bu çalışmanın Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 124M167 numaralı hibe ve Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü (GAZİ-BAP) tarafından FDK-2023-8477 numaralı hibe kapsamında desteklendiğini ve bu destekleri için ayrı ayrı her iki kuruma minnettar olduğumu belirtmek isterim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Eklemeli İmalat Ekosistemi.....	5
2.2. Kodifikasyon ve Standartlar	7
2.3. Eklemeli İmalat Karakterizasyonu	8
2.4. Tel Beslemeli Ark Ergitmeli İmalat	9
2.5. WAAM’da Isıl Davranış ve Mikroyapı Oluşumu	17
2.6. Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği Yöntemleri.....	21
2.7. Literatür Açığı ve Planlanan Katkıları.....	23
3. MALZEME VE YÖNTEM	29
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Sarflar.....	29
3.2. WAAM İmalatları.....	30
3.3. Optik Mikroskopisi.....	35
3.4. Mekanik Testler	55
3.5. Isıl Kamera Ölçümleri	57
3.6. Elektron Mikroskopisi	61

	Sayfa
3.7. Hesaplamalı Çalışmalar	68
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	75
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	107
KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	117



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kullanılan standart ve kodlar	7
Çizelge 2.2. Eklemeli imalatta kullanılan karakterizasyon yöntemleri.....	8
Çizelge 2.3. WAAM kilometre taşları.....	12
Çizelge 2.4. WAAM’da kullanılan kaynak yöntemleri.....	13
Çizelge 2.5. WAAM’da kullanılan ham maddeler ve uygulama alanları	13
Çizelge 2.6. Proses parametreleri	14
Çizelge 3.1. Üretimde kullanılan kaynak teli ve altlığı ait kimyasal kompozisyon	29
Çizelge 3.2. Üretimlerde kullanılan parametreler	30
Çizelge 3.3. 1,5 ve 10 katman üretimlerden çıkarılan numunelere ait detaylar	36
Çizelge 3.4. 1 katman imalatlardan alınan mikrofotograf sayıları	40
Çizelge 3.5. 5 katman imalatlardan alınan mikrofotograf sayıları	43
Çizelge 3.6. 10 katman imalatlardan alınan mikrofotograf sayıları	46
Çizelge 3.7. LH10V, MH10V ve HH10V kodlu yeniden hazırlanmış numunelerden alınan mikrofotograf sayıları.....	49
Çizelge 3.8. LH10V, MH10V ve HH10V kodlu numunelerden alınan ortalama tane boyutu ve en-boy oranı sonuçları.....	53
Çizelge 3.9. Hesaplamalarda kullanılan Thermocalc girdileri ve girdi ayrıntıları.....	73
Çizelge 3.10. Thermocalc çıktıları ve çıktı ayrıntıları	73
Çizelge 4.1. Yapılan deney ve çalışmaların detayları	75
Çizelge 4.2. Deney ilişki matrisi	76
Çizelge 4.3. Isıl kamera verilerinin yorumları	91

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Eklemeli imalat sınıflandırması	6
Şekil 2.2. Metal eklemeli imalat sınıflandırması	10
Şekil 2.3. WAAM’da ısıнын transferi	19
Şekil 2.4. WAAM’da katman sayısına bağılı olarak ısıнын transferi	20
Şekil 2.5. Hipotez oluşumunda kullanılan bilimsel yöntem	25
Şekil 3.1. Biriktirme metodu	32
Şekil 3.2. Optik mikroskop için numune çıkartma yöntemi	35
Şekil 3.3. LH10V, MH10V ve HH10V kodlu numunelerden alınan tane ölçümlerine ait gösterim.....	53
Şekil 3.4. Şekil 3.3.’de gösterilen a,b ve c noktaları ile gösterilen mikrofotograflar ...	54
Şekil 3.5. LH10V, MH10V ve HH10V numunelerinden alınan mikrosertlik testi sonuçları	56
Şekil 3.6. Isıl kamera ölçümlerinin alındığı bölgeler	59
Şekil 3.7. MH30V ısııl kamera sonuçlarından elde edilen ısınma-soğuma grafiğı.....	60
Şekil 3.8. MH30V kodlu numunenin SEM analizi için hazırlanması.....	62
Şekil 3.9. MH30V kodlu numunenin SEM analizi için işaretlenmesi	63
Şekil 3.10. MH30V koldu numuneden alınan EBSD ölçümleri	67
Şekil 3.11. ER70S-6 çeliğıne ait denge diyagramı (Sıcaklık- %C)	70
Şekil 3.12. Thermocalc’den elde edilen TTT diyagramı	74
Şekil 4.1. Katman sayısı arttıkça oluşan bölgelerin birbirine göre konumu	81
Şekil 4.2. Eş eksenli mikroyapı oluşumuna ilişkin gösterim. (Q: Isı).....	82
Şekil 4.3. Sütunsal mikroyapı oluşumuna ilişkin gösterim (Q:Isı)	83
Şekil 4.4. Dökümde metallerin katılaşması.....	84
Şekil 4.5. MH30V kodlu numunenin dip (yeşil alan) bölgesine ait SEM görüntüsünün analizi	86

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. MH30V kodlu numunenin orta (kırmızı alan) bölgesine ait SEM görüntüsünün analizi	87
Şekil 4.7. MH30V kodlu numunenin kep (mavi alan) bölgesine ait SEM görüntüsünün analizi	88
Şekil 4.8. LH10V, MH10V ve HH10V numunelerinde gerçekleştirilen mikrosertlik analizi	89
Şekil 4.9. MH30V'nin ısı kamera çıktıları.....	90
Şekil 4.10. Soğuma hızı- Katman Sayısı grafiği	91
Şekil 4.11. WAAM'da metallerin katılaşması	93
Şekil 4.12. ER70S-6 için oluşturulan CCT diyagramı	94
Şekil 4.13. Modifiye edilmiş CCT diyagramı	96
Şekil 4.14. Biriktirme parametrelerinin birbiriyle ilişkisi	101
Şekil 4.15. Çalışma sonucunda ortaya çıkan model.....	102
Şekil 4.16. Eş eksenli bölge için karşılaştırılması muhtemel baskın mikroyapı	103
Şekil 4.17. Üretilen parçada alanların adlandırılması	104
Şekil 4.18. Isı girdisine göre çok katmanlı WAAM imalatında öngörülen faz ve mikroyapı görünümleri	105

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Eklemeli imalatta üretim basamakları.....	5
Resim 2.2. İmalat yöntemlerinin gösterimi.....	6
Resim 2.3. WAAM tezgâhı gösterimi.....	11
Resim 2.4. Metallerin katılaşması	18
Resim 2.5. Katılaşma hızı (R) ile ısı gradyan (G) ilişkisine göre mikro yapı türleri ...	20
Resim 2.6. Simülasyon programlarının mikro yapı modelleme görüntüleri.....	22
Resim 3.1. WAAM imalatlarında kullanılan tezgâhın gösterimi.....	31
Resim 3.2. 1,5 ve 10 katman imalata ait üretim resimleri.....	33
Resim 3.3. 30 katman imalata ait resimler	34
Resim 3.4. Çıkarılan numunelerin hazırlama aşamasında çekilen fotoğrafları.....	36
Resim 3.5. Bakalite alınmış numunelere ait görseller.....	37
Resim 3.6. LH1V ve LH1P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotoğraflar	38
Resim 3.7. MH1V ve MH1P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotoğraflar	38
Resim 3.8. HH1V ve HH1P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotoğraflar	39
Resim 3.9. LH5V ve LH5P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotoğraflar	40
Resim 3.10. MH5V ve MH5P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotoğraflar	41
Resim 3.11. HH5V ve HH5P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotoğraflar	42
Resim 3.12. LH10V ve LH10P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotoğraflar ...	43
Resim 3.13. MH10V ve MH10P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotoğraflar ..	44
Resim 3.14. HH10V ve HH10P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotoğraflar ..	45
Resim 3.15. LH10V kodlu numuneden alınan birleştirilmiş mikrofotoğrafın detay gösterimi.....	47
Resim 3.16. MH10V kodlu numuneden alınan birleştirilmiş mikrofotoğrafın detay gösterimi.....	48
Resim 3.17. HH10V kodlu numuneden alınan birleştirilmiş mikrofotoğrafın detay gösterimi.....	49

Resim	Sayfa
Resim 3.18. LH10H-a, MH10H-a ve HH10H- a mikrofotoğraflarının detay görünümü	50
Resim 3.19. LH10H-b, MH10H-b ve HH10H- b mikrofotoğraflarının detay görünümü	51
Resim 3.20. LH10H-c, MH10H-c ve HH10H- c mikrofotoğraflarının detay görünümü	52
Resim 3.21. Mikrosertlik ölçümlerinin alındığı noktalara ait örnek gösterimler	57
Resim 3.22. Isıl kamera konumu	58
Resim 3.23. Isıl kamera yazılımı ekran görüntüsü	59
Resim 3.24. DİP, ORTA ve KEP Bölgesinin ısı geçişinin izlenmesine ilişkin ekran görüntüsü	60
Resim 3.25. MH30V kodlu numunenin 1 numaralı bölgesine ait SEM görüntüleri. (a-f) Resim 3.25 (a-f), Şekil 3.9'de gösterilen 1 numaralı alandan alınan SEM görüntülerini içermektedir.	64
Resim 3.26. MH30V kodlu numunenin 5 numaralı bölgesine ait SEM görüntüleri (a-f)	65
Resim 3.27. MH30V kodlu numunenin 5 numaralı bölgesine ait SEM görüntüleri (a-i)	66
Resim 3.28. Thermocalc açılış ekranı	69
Resim 3.29. Thermocalc'de sistem tanımlama	71
Resim 3.30. Thermocalc'de TTT diyagramı oluşturulması için girdi ekranı	72
Resim 3.31. Thermocalc'de TTT hesaplamaları yaparken verilerin sunulması	72
Resim 4.1. LH1V, MH1V VE HH1V tek katman imalatların görsel kıyası	77
Resim 4.2. LH5V, MH5V ve HH5V imalatlarının görsel kıyası	78
Resim 4.3. LH10V, MH10V ve HH10V imalatlarının görsel kıyası	79
Resim 4.4. Yeniden hazırlanan LH10V, MH10V ve HH10V imalatlarının görsel kıyası	80
Resim 4.5. MH30V üzerinde yapılan bölgelendirme çalışması	85

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

°C

Açıklamalar

Derece santigrat

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASTM

Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu

CA

Cellular Automaton

CALPHAD

Calculatin of Phase Diagram

CCT

Sürekli Soğuma (Continuous Cooling Transformation, CCT) Diyagramları

CMT

Soğuk Metal Trasferi (Cold Metal Transferi)

EBSD

Elektron geri saçınım kırınımı

EDS

Enerji dağılımlı X ışınları spektrometresi

Eİ

Eklemeli İmalat

FME

Sonlu elemanlar analizi (Finite Element Analysis)

HMK

Hacim merkezli kübik

HSLA

Yüksek Mukavemet Düşük Alaşım (High Strenght Low Alloy)

HSLA

Yüksek Mukavemet Düşük Alaşım

ICME

Integrated Computational Materials Science

İH

İlerleme Hızı (Kaynak Hızı)

KMC

Kinetic Monte Carlo

MAG

Metal Active Gas

MEİ

Metal Eklemeli İmalat

MIG

Metal Inert Gas

PAW

Plasma Arc Welding

PF

Phase-Field

SEM

Taramalı elektron mikroskopisi

TAEİ

Tel Ark Eklemeli İmalat

TBH

Tel Besleme Hızı

Kısaltmalar**Açıklamalar****TIG**

Tungsten Inert Gas

TTTZaman-Sıcaklık-Dönüşüm
(Time-Temperature- Transformation, TTT) Diyagramları**TUİM**

Tel Ucunun İşlem Parçasına Mesafesi

WAAM

Wire Arc Additive Manufacturing (Tel Ark Eklemeli İmalat)

YMK

Yüzey merkezli kübik



1. GİRİŞ

Gelişen teknolojik imkanlar halihazırda kullanılan metotların yerine daha yenilikçi metotların kullanılmaya başlanmasını beraberinde getirmektedir. Tıp sektöründe yüz yıl evvel yapılmasına imkân olmayan cerrahi operasyonlar bugün robot kollarla dahi kolaylıkla yapılabilmektedir. Otomotiv sektöründe bir grup insanın yapabileceği bir iş bir robot tarafından kolaylıkla yapılabilir hale gelmiştir ve bu durum sektörde her gün daha fazla robot yatırımları yapılmasıyla sonuçlanmaktadır. Teknolojik yatırımlar özellikle uzay, havacılık ve nükleer enerji sektöründe kendine yer bulmuştur. Doğası gereği yüksek malzeme özelliği gereksinimleri ve girift parça imalatı olan bu sektörlerde özel tasarlanmış malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin konvansiyonel yöntemlerle üretilmesi var olan şartlarda çoğunlukla maliyetin yüksek seyretmesiyle sonuçlanmaktadır. Araştırmacılar bu bağlamda maliyeti yüksek bir malzemenin en verimli şekilde kullanılmasına dönük çalışmalarını günden güne artmaktadır. Eklemeli imalat (Eİ) tam olarak böylesi bir mühendislik problemini çözme noktasında araştırmacılara ilham vermektedir. Geline nokta konvansiyonel yöntemlerin Eİ ile bazı alanlarda yarışabilme imkânı kalmamıştır [1-2].

Eİ doğası gereği bir parçanın katman üzerine katman biriktirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu üretim metodu parçanın öncelikle modellenmesi ve üretilen modelin üretime esas olacak şekilde dilimlenmesi şeklinde ilerlemektedir. Bugüne kadar alışılmış üretim metotları hususunda oluşan bilgi birikimi göz önünde bulundurulduğunda, Eİ ile bir parça imal edilirken kullanılan yöntem ve parametrelerde kütüphane oluşturmak için zamana ihtiyacı olduğu aşıkardır. Diğer taraftan özellikle 2010'lu yıllarla birlikte araştırmacılar Eİ üzerine yoğun çalışmaya başlamışlardır. Yoğun çalışmalar beraberinde enerji kaynağı türünü, malzeme çeşidini, çalışılabilen eksenlerin artışını, parametre kütüphanesinin oluşmasını beraberinde getirmiştir. Bu gelişim beraberinde çeşitlenmeyi getirmiş ve çeşitlenmeden kaynaklı olarak kategorik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Uluslararası standart kuruluşları tarafından geliştirilen kategorizasyonlar bu çalışmada detaylı aktarılmıştır. [3].

Metalik telin hammadde, elektrik arkının ise enerji kaynağı olarak kullanıldığı eklemeli imalat yöntemi Tel-Ark Eklemeli İmalat (WAAM) olarak tanımlanır. Bu yöntem, bilgisayar destekli tasarım yazılımlarında oluşturulan modelin üretim geometrisine uygun şekilde dilimlenmesinden sonra, robotik kola entegre edilmiş kaynak torcu ve tel besleme sistemi aracılığıyla katmanlı olarak üretilmesine dayanır. WAAM büyük ebatlı bileşenleri üretmeye

elverişli olması, düşük yatırım gerektirmesi, hızlı ve esnek üretim sağlaması, ayrıca yüksek malzeme kullanım verimliliği nedeniyle son dönemde hem sanayide hem de akademide yoğun ilgi görmektedir. Yöntemin ekonomikliği, uzun yıllardır bilinen kaynak teknolojilerinin modern otomasyon ve yazılım uygulamalarıyla birleştirilmesinden ileri geldiği söylenebilir. Bu özellikler, WAAM'ın diğer metal imalat tekniklerine kıyasla oldukça yüksek biriktirme hızına sahip olmasını sağlamaktadır [3-16].

WAAM üzerine gerçekleştirilen önceki araştırmalar, proses parametreleri, mikroyapı evrimi ve mekanik özellikler arasında güçlü ilişkiler kurulduğunu göstermektedir. Ancak, tekrarlı ısınma-soğuma döngülerinin WAAM sürecinde mikroyapı ve faz oluşumuna etkisini sistematik biçimde değerlendiren çalışmalar sınırlıdır. Bu tez çalışmasının amacı, WAAM sürecinde ısı girdisi ve ısı çevrimlerin mikroyapı ve faz dönüşümlerine etkisini deneysel ve hesaplamalı yaklaşımlar kullanarak ortaya koymak ve bu sayede malzeme özelinde öngörücü bir model geliştirmektir. Çalışmanın temel motivasyonu, WAAM'ın doğası gereği tekrarlayan ısıl döngülerin, diğer üretim yöntemlerinden farklı olarak mikroyapı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olmasıdır. Bu bağlamda araştırmanın hipotezi, tekrarlayan ısınma ve soğuma koşullarında, ısı girdisinden bağımsız olarak belirli katman bölgelerinde benzer faz ve mikroyapı formasyonlarının oluşacağıdır.

Tezin hedefleri aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

1. Farklı ısı girdilerinde WAAM üretimleri gerçekleştirerek proses–mikroyapı–faz oluşumu ilişkilerini deneysel olarak incelemek,
2. Elde edilen deneysel verileri hesaplamalı malzeme mühendisliği (ICME) veri tabanları ile bütünleştirerek karşılaştırmalı analiz yapmak,
3. Üretim öncesinde malzeme-spesifik öngörüler sağlayabilecek bir modelin temelini oluşturmak.
4. Elde edilen sonuçların literatür verisiyle uyumunu değerlendirerek tekrarlanabilir ve genellenebilir bir metodoloji ortaya koymak.

Çalışma öncelikle bilimsel bir altlık oluşturmak için literatür taraması ile başlatılmıştır. Literatür çalışmasında elde edilen verilerden literatür açığı tespit edilmiştir. Tespit edilen açık üzerinden araştırma soruları ile hipotez kurgusuna gidilerek bilimsel temel oluşturulmuştur. Hipotezin sorgulanabilmesi için deney ve kontrol grupları belirlenmiştir.

Belirlenen deney ve kontrol grupları ile hipotez sorgusu yapılmıştır. Yapılan hipotez sorgusu neticesinde hipotez doğrulanmış ve neticede bir tez oluşturulmuştur. Yapılan çalışmaların tümü bir araya getirildiğinde başka malzemelerle de aynı bilimsel yoldan gidilerek aynı kurgunun yapılabileceği değerlendirilmektedir. Bu bağlamda araştırmacılar için bilimsel bir metodun geliştirildiği değerlendirilmektedir.

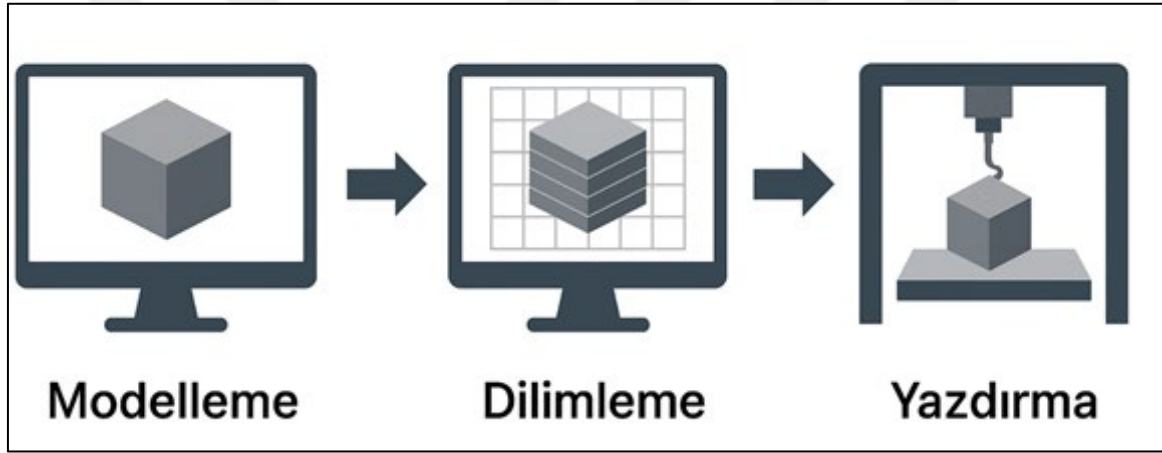
Çalışma beş ana başlıkta kurgulanmıştır. İlk bölüm giriş kısmı olarak ele alınmış ve genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde literatür taraması yapılmıştır. Literatür taraması Yüksek Öğrenim Kurulu tez kütüphanesi, ulusal dergi veri tabanları ile uluslararası veri tabanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte çalışma kapsamında takip edilecek kodifikasyon ve standartlar da tanıtılmıştır. Eİ ekosistemi uluslararası kabul görmüş standartlar kapsamında ele alınmıştır. Doğrudan çalışmamızı ilgilendirmeyen çalışmalar kapsam dışında bırakılarak kaynak verimi artırılmaya çalışılmıştır. Üçüncü bölümde literatür araştırması neticesinde elde edilen parametreler üzerinden ve yine araştırmalar neticesinde kurgulanan deneyler üzerinden imalatlar yapılmıştır. İmalatlardan standartlara uygun numuneler çıkarılmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylere ek olarak hesaplamalı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Dördüncü bölümde tüm deneyler sistematik bakış açısı ile öncül-ardıl ilişkisi göz önünde bulundurularak tartışılmıştır. Tartışmalar hipotez ekseninde ilerletilmiştir. Beşinci bölüm ise toplam sonucun bir özeti mahiyetinde tasarlanmıştır ve bu bölümde sonuç derlenmiştir. Son olarak bu bölümde çalışma kapsamına alınmamış ama bu çalışmanın bilimsel olarak devam ettirilebileceği noktalara değinilmiştir. Kaynaklar kısmında kaynaklar bilimsel sistemlere uygun şekilde verilmiştir. Çalışmanın tamamı resimler, çizelgeler ve şekillerle izah edilmeye çalışılmıştır.



2. LİTERATÜR TARAMASI

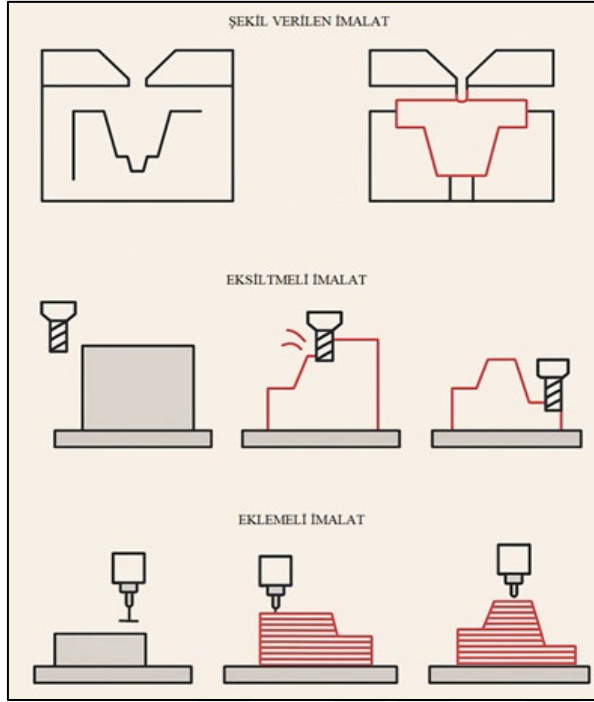
2.1. Eklemeli İmalat Ekosistemi

Eklemeli İmalat (Eİ) toz veya tel halindeki malzemeyi ergiterek veya sinterleyerek birbiri üzerine katman katman yığarak istenilen parçanın elde edilmesidir. Bu yöntemde öncelikle imalatı yapılacak parça bilgisayar ortamında yardımcı yazılımlar kullanılarak tasarlanır. İkincil işlem olarak bu çizim katman katman imalat esasına uygun olarak yine yazılım vasıtasıyla dilimlenir [1]. Bu dilimlerden her biri bir katmanı oluşturmaktadır. Bu işlemin şematize edilmiş hali Resim 2.1’de gösterilmiştir.



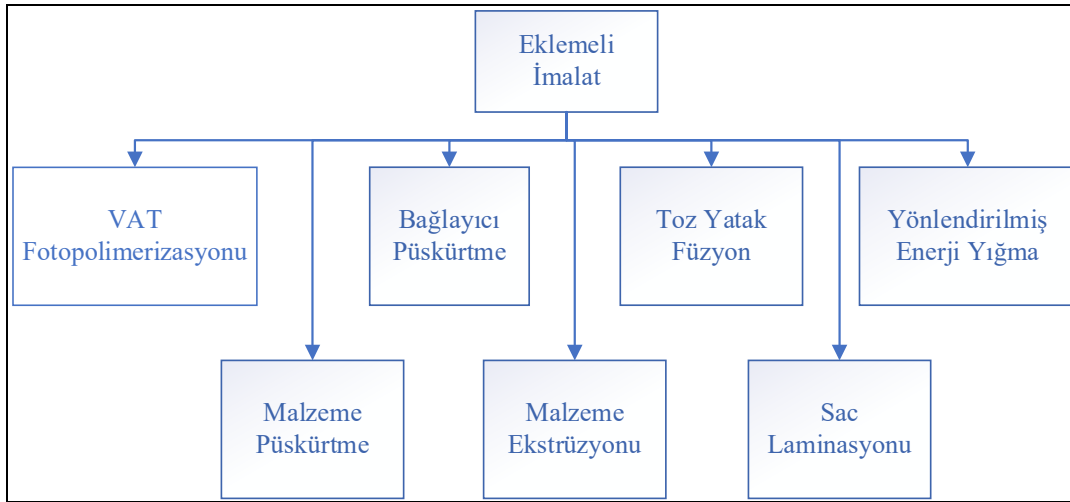
Resim 2.1. Eklemeli imalatta üretim basamakları

Eİ teknolojisi geleneksel imalat yöntemlerine göre henüz yeni bir üretim metodu iken üzerine yapılan yoğun çalışmalar sonucunda rekabetçi bir üretim metodu haline gelmeye başlamıştır [1-3,15]. Öncelikle geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi pahalı olan parçaların imalatında kullanılmaktayken süreç içerisinde çok karmaşık parçaların, endüstride kullanılan parçaların veya yeni geliştirilen parçaların imalatı için kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle karmaşık parçaların imalatında etkin bir yöntemdir. Geleneksel üretim metotlarını kalıp vasıtasıyla yapılan imalatlar (şekil verilen imalatlar) ve eksiltmeli imalat olarak sınıflandırırsak bu iki yöntemde imal edilecek her bir parça için farklı ekipmanlara ihtiyaç vardır. Eİ yönteminde bu iş için üretilmiş özel makinalarda farklı farklı parçalar üretilmektedir. Resim 2.2’de döküm veya toz metalürjisi ile eksiltmeli imalat ve eklemeli imalat gösterilmiştir.



Resim 2.2. İmalat yöntemlerinin gösterimi

Resim 2.2’de görülebildiği üzere “şekil verilen imalat” kısmında bir kalıp kullanılarak oluşturulan imalat şematize edilmiştir. Bu alanda verilebilecek örneklerden bir tanesi döküm ile imalat diğeri ise toz metalurjisi yöntemidir. Eksiltmeli imalat ise bir yığından arzu edilen bir parçanın talaş kaldırarak imal edilmesidir [3,4]. Her bir üretim metodunun avantaj ve dezavantajları bulunmakla birlikte eklemeli imalat diğerlerine göre daha güncel üretim metodudur.



Şekil 2.1. Eklemeli imalat sınıflandırması

Şekil 2.1’de Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu’nun (ASTM) eklemeli imalat (Eİ) sınıflandırması görülmektedir. Bu sınıflandırma tüm Eİ ekosistemini içeren bir genel sınıflandırmadır. Ekosistem büyüdükçe her bir başlık kendi içerisinde daha da detaylı olarak sınıflandırılmaya devam etmektedir [5]. Bu çizelge tüm eklemeli imalat ekosistemi yerine eklemeli imalat ekosisteminin hangi başlıklarda oluşturulabileceği temelinde hazırlanmıştır. Tüm eklemeli imalat ekosistemlerine ilişkin çeşitli mecralarda sınıflandırma yapılmaya çalışılsa da metal eklemeli imalat üzerine yapılan çalışmaların hızı sebebiyle tabloya her gün yeni alanlar eklenmek zorunda kalınmaktadır [4].

2.2. Kodifikasyon ve Standartlar

Eklemeli imalat tüm yönleriyle geliştirildikçe standardizasyon süreçleri de geliştirilmektedir. Özellikle ASTM Eİ üzerine yoğun çalışarak standartlar yayınlanmıştır. Bunun yanında Uluslararası Standart Organizasyonu (ISO) da Eİ’ye ilişkin standartları yayınlanmıştır. Her iki organizasyonun yayınlarına bakıldığında Eİ’ye ilişkin genel terminolojinin yanında gereklilikler, rehber bilgiler, ham madde satın almalarına ilişkin bilgiler göze çarpmaktadır. ASTM Eİ’ye ilişkin yayınlarını uygulamalar, tasarım, malzeme ve proses, terminoloji, test yöntemleri çatısı altında toplamıştır [7]. Diğer taraftan ISO ise TC (technical committes) 261 kodu altında ASTM’nin standartları göz önünde bulundurularak Eİ’ye ilişkin standardizasyon yayınlanmıştır [14].

ASTM, Eİ altında konumlanmış üretim metotlarına ilişkin spesifik standartlar da yayınlamaktadır. Bu spesifik standartlar toz yataklı imalatlar, lazer ışını temelli imalatlar veya Ti4Al6V ve AlMg10Si gibi özel alaşımlara odaklanmıştır. Çalışmamız kapsamında faydalanan bu standartlar ile Eİ haricinde çalışmamızda kullanmak zorunda kalınan standartlar Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Özellikle imalat sonrası metalografik incelemeler için numune hazırlama sürecinde faydalanan standartlar çizelgede verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kullanılan standart ve kodlar

Standart ve Kodu	Açıklama
ASTM F2792	Eklemeli Üretim Teknolojileri için Standart Terminoloji [4]
ASTM ISO/ASTM52900	Eklemeli İmalat- Genel ilkeler- Temel bilgiler ve kelime bilgisi [8]
ASTM E3 – 11	Metalografik Numunelerin Hazırlanmasına İlişkin Standart Kılavuz [9]
ASTM E407 – 07	Metal ve Alaşımların Mikrodağlanması İçin Standart Uygulama [10]
ASTM E7 – 17	Metalografi için Standart Terminoloji [11]

Çizelge 2.1. (devam) Kullanılan standart ve kodlar

Standart ve Kodu	Açıklama
ASTM E112 – 13	Ortalama Tane Boyutu Tespiti için Standart Test Yöntemi [12]
ASTM E8/E8M-24	Metalik Malzemelerin Çekme Testleri için Standart Test Yöntemleri [13]
ISO/TC 261	Eklemeli İmalat [14]
ASTM E384	Malzemelerin Mikrosertlik Tayini için Standart Test Yöntemi [7]

2.3. Eklemeli İmalat Karakterizasyonu

Karakterizasyon zaman zaman sadece mikro ve makro boyutta görüntüleme olarak algılansa da malzemenin karakteristik özelliklerinin tespiti olarak tanımlanması daha doğru görünmektedir. Zira doğal halde olsun üretim sonucu olsun bir malzemeyi karakterize etmenin çeşitli yolları bulunmaktadır. WAAM’da ham maddenin (telin) spektral analiz yöntemi ile kimyasal kompozisyonunun doğrulanması, kalite kontrol kapsamında boyutsal ölçümler, üretim esnasında ısı kamera ile süreci izleme ve ortaya çıkan verinin çeşitli yöntemlerle işlenmesi ve bu veriden çeşitli yeni veriler elde edilmesi, üretim sonrasında metalografi için kesme ve numune hazırlama işlemleri, tüm metalografik süreçler, XRD, SEM, EDS ve EBSD analizleri karakterizasyon kapsamında örnek verilebilir. Eİ genelinde ve WAAM özelinde genel olarak kullanılan karakterizasyon yöntemleri Çizelge 2.2’de açıklamaları ile verilmiştir [4,15,22,37,43,51]. WAAM kapsamında yapılacak karakterizasyon çalışmalarında dikkate değer diğer nokta kaynaklı imalat parçalarına/numunelerine yapılan karakterizasyon işlemlerinin uygulanabilir olmasıdır.

Çizelge 2.2. Eklemeli imalatta kullanılan karakterizasyon yöntemleri

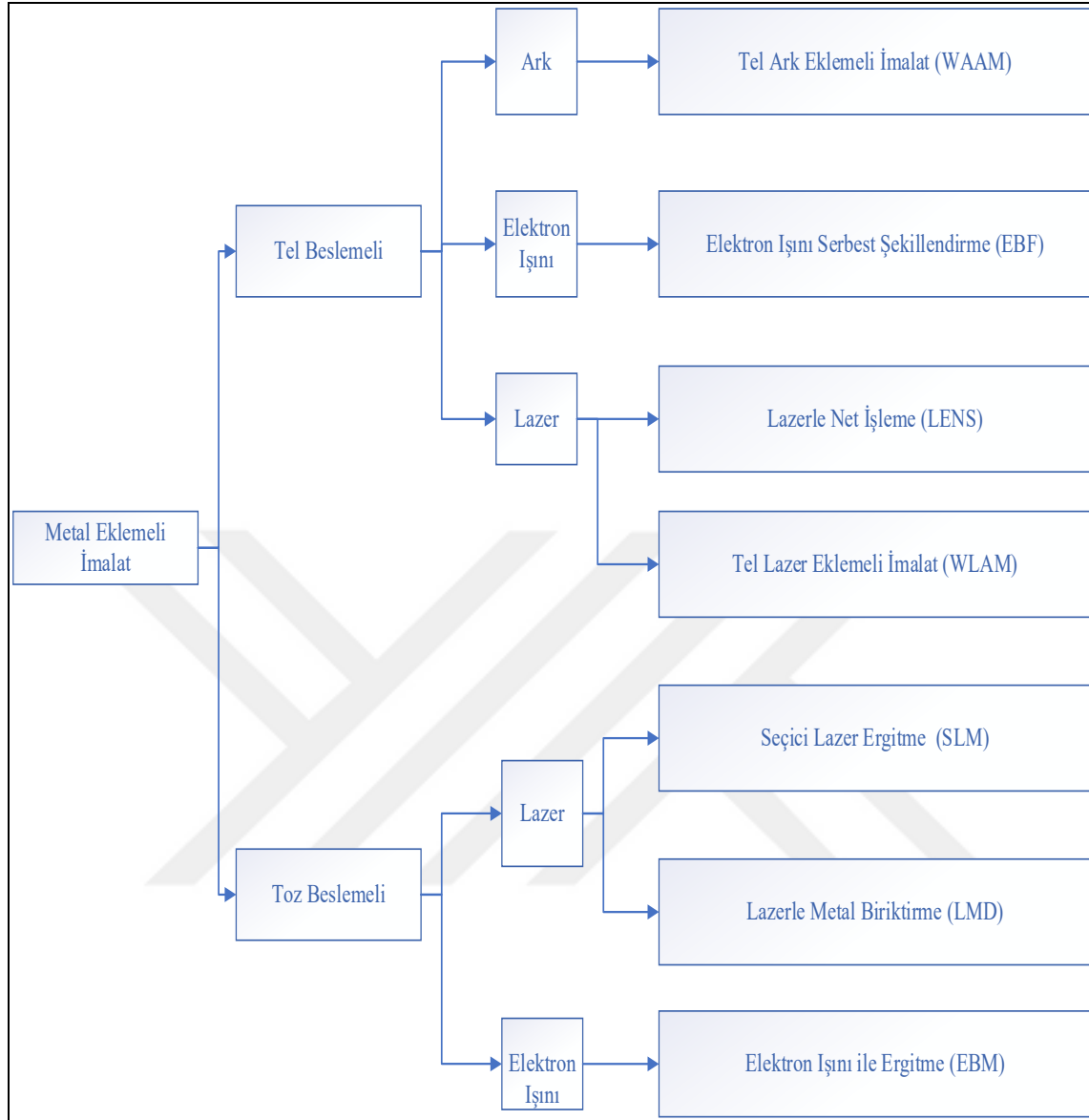
Yöntem	Açıklama
Spektral Analiz	Bir malzemenin kimyasal kompozisyonunu tayin için kullanılan yöntemdir.
Isıl Ölçümler	Isıl çift kullanılarak belirli bir noktadaki ölçümün yapılabileceği gibi, ısı kamera ile bir alanın ısı geçmişi izlenebilir. Isıl kamerada emissivite değeri hayati bir öneme sahiptir.
Metalografi	Üretilen parçadan kesit alınarak makro ve mikro boyutta incelemeler yapmak üzere kullanılmaktadır. Numune hazırlama süreci incelemeler kadar önem arz etmekte olup standarda uygun hazırlanmayan yüzeyler yanlış analizlere sebebiyet vermektedir. Optik mikroskopları günümüzde yazılımlarla desteklenmiştir. Belirli bir bölgede ortalama tane boyutu ve çok iyi hazırlanmış yüzeylerde faz oranları (fazların tayini için daha teknolojik yöntemler gerekebilmektedir) dahi belirlenebilmektedir.

Çizelge 2.2. (devam) Eklemeli imalatla kullanılan karakterizasyon yöntemleri

Yöntem	Açıklama
XRD	X Işınları Difraksiyonu, malzemelerin kristalografik özelliklerini tespit ve ve faz analizlerini ortaya koymak için yapılmaktadır.
XRF	X Işınları Floresansı, malzemenin elementel bileşimine ilişkin veri sağlamaktadır.
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopisi yüzey topografyasını, yüzeyin kimyasal kompozisyonunu, faz geçişlerini, yabancı maddelerin tortulaşmasını belirlemek için kullanılmaktadır. İncelenecek numunenin elektrik iletkenliğini olması gerekmektedir.
EBSA	Elektron geri saçılım kırınımı mikroyapı analizinde kullanılan bir yöntemdir. SEM'e entegre olarak çalışmaktadır.
EDS	Malzemelerin kimyasal kompozisyonlarını analiz etmek için kullanılmaktadır. SEM'e entegre olarak çalışmaktadır.
Mekanik Deneyler	WAAM'da mekanik özelliklerin tespiti kapsamında sıklıkla çekme deneyi ve mikro sertlik deneyleri gerçekleştirilmektedir.
Kalıntı Gerilme	WAAM imalat yönteminin doğası gereği oluşan tekrarlı ısı geçmiştten kaynaklı olan kalıntı gerilmelerin tespiti için manyetik barkenhausem gürültüsü yöntemi kullanılmaktadır.
Boyutsal Ölçümler	Üretimden sonra parametre seçimine göre dikış kalınlığı, yüksekliği gibi geometrik özellikler WAAM'da raporlanmaktadır.

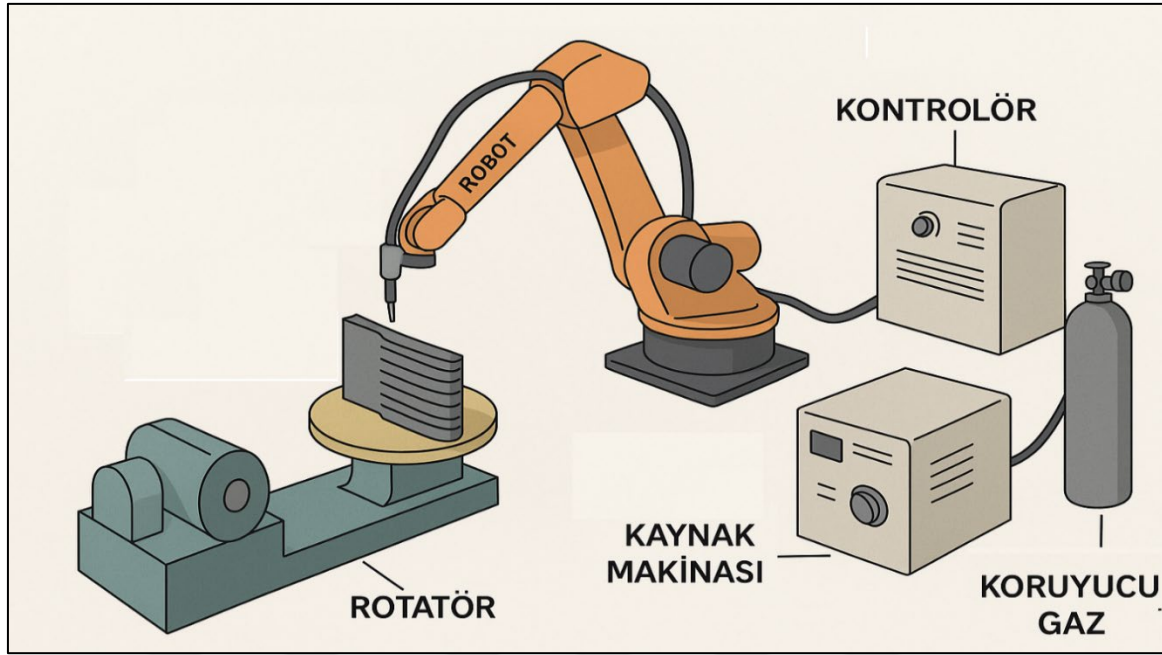
2.4. Tel Beslemeli Ark Ergitmeli İmalat

Metal eklemeli imalat, metal tozlarının veya tellerinin bir ısı kaynağı ile sinterlenmesi/ergitilmesi yöntemiyle 3B çizime uygun olarak katman katman üretilmesi esasına dayanan ve son 20 yılda gelişimi hızlanmış yenilikçi bir imalat metodudur [16]. Katmanlı İmalat, ASTM F2792 standardında, "eksiltmeli imalatın aksine, genellikle katman katman 3B model verilerinden nesneler yapmak için malzemeleri birleştirme süreci olarak tanımlanır [8].



Şekil 2.2. Metal eklemeli imalat sınıflandırması

Tel-Ark Eklemeli İmalat (WAAM), Metal Eklemeli İmalat (MEİ) yönteminin altında konumlanan bir üretim metodudur. Şekil 2.2’de gösterilen sınıflandırmaya göre WAAM tel beslemeli ve ark enerjisi kullanımı olan bir metal eklemeli imalat yöntemidir [6]. WAAM genel gösterimi Resim 2.3’de mevcuttur. Şekil 2.2 dikkatli incelendiğinde ilk olarak ham maddenin formuna göre sınıflandırma yapıldığı sonrasında kullanılan enerji kaynağına göre sınıflandırma yapıldığı görülmektedir. MEİ altındaki isimlendirmelerin yapılan işlem, ham madde ve enerji kaynağının birleşimi olduğu görülmektedir.



Resim 2.3. WAAM tezgâhı gösterimi

Resim 2.3’de görülebileceği üzere koruyucu gaz sistemi ile donatılmış kaynak makinası torcu bir robot kola bağlıdır [16-20]. Robot kol Resim 2.1’de görülen sistematığe uygun olarak çalışmaktadır. Döner tabla (rotatör) robot kol ile eş güdümde çalışarak parçanın çok eksenli (multi axis) oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

WAAM “toplam kullanılan hammaddenin” üretilmiş parçanın toplam ağırlığına oranının düşük olduğu bir üretim metodudur. Nitekim bu oran literatüre Buy-to-Fly (BTF) oranı olarak girmiştir. BTF oranı 1’e yaklaştıkça artık madde miktarı azalmaktadır ve hammadde o derecede verimli şekilde kullanılmaktadır [6]. WAAM bu yönüyle yenilikçi bir üretim metodu olmuştur. MIG (Metal Inert Gas), MAG (Metal Active Gas), TIG (Tungsten Inert Gas) ve PAW (Plasma Arc Welding) kaynak yöntemleri ve farklı kaynak telleri kullanılarak WAAM’da parça üretilir. WAAM, diğer AM yöntemlerine göre düşük ekipman maliyeti ve yüksek biriktirme oranları nedeniyle tercih edilmektedir [21,22]. Bunun yanında porozite sorunları, yüzey özelliklerinin istenen seviyelerde olmaması, ısı girdisinin karmaşık ısıl koşullar oluşturması gibi dezavantajları da mevcuttur. Çalışmaların bu dezavantajları anlama ve ortadan kaldırma üzerine yoğunlaştığı ’de görülebilmektedir.

WAAM üzerine yapılan çalışmalara ait kilometre taşları Çizelge 2.3’de verilmiştir.Çizelge 2.3’de belirtilen kilometre taşları WAAM gelişiminde araştırmacıların hangi konulara bir

süreç dahilinde odaklandıklarının gösterimi olarak verilmiştir. Her bir başlık o çalışmaların o yıldan sonra daha yoğun çalışılıyor olduğu ile ilgili okunabilir [4].

Çizelge 2.3. WAAM kilometre taşları

Yıl	Açıklama
2010	Havacılık uygulamalarına ilişkin, WAAM ile üretilen parçaların mekanik özelliklerin incelendiği ilk çalışmalar yapılmıştır [23]
2011	WAALM (Wire and Arc Additive Layer Manufacturing) ile üretilmiş parçaların termomekanik özellikleri incelenmiştir [24]
2012	WAAM imalatları için parametre geliştirme çalışmalarına başlanmıştır. Biriktirme modelleri için çeşitli parametreler geliştirilmeye başlanmıştır [25]
2013	Kalıntı gerilme WAAM'ın endüstriyel olarak daha uygulanabilir olması için geliştirilmesi gereken ana sorunlardan birisidir. Üretim sonrası kalıntı gerilmelerin indirgenmesi için mekanik yöntemler geliştirilmeye başlanmıştır [26]
2014	PAW kaynak yöntemi ile WAAM çalışmaları bu zaman diliminde başlamıştır. Meso ölçekte imalatların yapılması üzerine çalışmalar yürütülmüştür [27]
2015	Fe-Al gibi intermetalik bileşenlerin üretimi başlamıştır [28]
2016	Sonlu elemanlar analizi (Finite Element Analysis, FME) üzerine çalışmalar distorsiyon ve kalıntı gerilmelerden korunma için popüler hale gelmiştir [29]
2017	Endüstriyel uygulamalar için optimum üretim parametreleri üzerine yoğun çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [30]
2018	Üretilen parçaların geometrilerinin ve mikro yapı özelliklerinin geliştirilmesi için tabakalar arası soğutma teknikleri ve kusur tespiti gibi kalite geliştirme teknikleri çalışmaya başlanmıştır [31]
2019	Sıcak WAAM (HOT WAAM) ve TOP-TIG tipi üretim metotları Alüminyum malzemede poroziteyi azaltmak amacıyla çalışmaya başlanmıştır [32]
2020	WAAM kullanılarak ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik alanlarında performanslar göstergeleri hakkında derinlikli araştırmalar yoğunlaşmıştır [33]
2021	XCT (X-Ray Computed Tomography) tarama ile toplam kalitede gelişimler sağlanmıştır. Bu yöntemle sadece WAAM değil tüm eklemeli imalat ekosisteminde gelişimlerin yaşanabileceği öngörülmektedir [34]
2022	Demir dışı alaşımlar üzerine çalışmalar yaygınlaşmıştır [35]
2023	WAAM imalatlarında yapay zeka çalışmaları yapılmıştır [36]
2024	Mikroyapıyı arzu edilen biçimde elde etmek için harici ısıtıcı çalışmalar yapılmıştır [37]

WAAM'da enerji kaynağı olarak üretilen kaynak yöntemleri kullanılan ham maddeye göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu değişimin ana sebebinin her bir kaynak metodunun kullanılan ham maddeye göre avantaj ve dezavantajlarından kaynaklandığı rapor edilmiştir [15]. Bu temelde kullanılan kaynak metotlarına ilişkin bilgiler Çizelge 2.4'de verilmiştir. Bu çizelgede verilen bilgiler o kaynak türüne ait öz bilgiler olup araştırmacılar süreç içerisinde bu kaynak türlerinin kıyaslamaları üzerinden avantaj ve dezavantajlara ilişkin çeşitli bilgileri raporlamışlardır. Bu raporlamalar kendinden sonra yapılan çalışmalara ışık tutmuştur.

Çizelge 2.4. WAAM’da kullanılan kaynak yöntemleri

Kaynak Yöntemi	Açıklama
Gas Metal Arc Welding - GMAW	Sıklıkla MIG adıyla da anılan GMAW, koruyucu gaz altında yapılan kaynak türüdür. WAAM’da robot kola akuple edilen torç, kaynak teli besleme mekanizması ve koruyucu gaz nozülleri ile karakterize edilmektedir. Bu tabloda anılan kaynak türleri arasında en fazla biriktirme oranları GMAW’da yakalanabilmektedir. Koruyucu gaz olarak O ₂ ve CO ₂ kullanılmaktadır [38,39]
Gas Tungsten Arc Welding – GTAW	Sıklıkla TIG olarak anılan GTAW, tükenmez bir tungsten elektrot ile çalışma parçası arasında oluşan ark enerjisini enerji kaynağı olarak kullanan kaynak türüdür. Argon ve helyum koruyucu gaz örtüsü altında yapılmaktadır. Yüksek kaynak hızı ve iyi kaynak penetrasyonu ile karakteriz edilmektedir [40,41]
Plasma Arc Welding-PAW	PAW, yüksek sıcaklık ve hızda plazma akışı oluşturarak metal yüzeyleri birleştiren gelişmiş bir kaynak yöntemidir. Elektrotun torcun içinde yer alması sayesinde arkın koruyucu gazdan ayrılmasını sağlayarak daha dar ve yoğun bir plazma sütunu elde eder [42]
Cold Metal Transfer-CMT	CMT, ısı girdisinin düşük olması avantajı haricinde GMAW kaynak yöntemine benzerdir. Kaynak teli dakikada 70 kez salınım yaparak ısı girdisinin düşük olmasını sağlamaktadır. Diğer kaynak yöntemlerine göre görece daha yeni bir kaynak metodu olup müstakil bir kaynak türü olmaktan ziyade MIG kaynağının geliştirilmiş hali olarak tanımlanabilir [44,45]

WAAM’ın gelişimine ilişkin kilometre taşları ve kullanılan ark enerjisi özelinde kaynak türlerinden sonra WAAM’da kullanılan ham maddelere ilişkin öz veriler Çizelge 2.5’de verilmiştir. Ham maddeler çeşitli sektörlerin ihtiyaçlarının giderilmesi özelinde çalışılmıştır. Bu çizelge sektörlerin WAAM özelinde hangi ham maddeler ile ilgilendiğine de ışık tutmaktadır [46-50]. Bunların dışında özel alaşım (AZ31 kodlu magnezyum- alüminyum-çinko alaşımları, Fe-Al bimetal alaşımları, Al-Ti intermetalik alaşımları vb.) tel ham maddeler de kullanılmaktadır.

Çizelge 2.5. WAAM’da kullanılan ham maddeler ve uygulama alanları

Uygulama Alanları	Alaşımlar				
	Çelikler	Alüminyum	Titanyum	Nikel	Diğer /Bimetal
Otomotiv	✓	✓			✓
Havacılık		✓	✓	✓	✓
Kalıplar ve takımlar	✓				
Korozif Ortam			✓	✓	✓
Yüksek Sıcaklık			✓	✓	✓
Denizcilik	✓	✓	✓		

Çizelge 2.5’de verilen uygulama alanlarında kullanılan bir ekipmanın üretileceği alaşım ve bu alaşımın WAAM ile üretimi için kullanılacak Çizelge 2.4’de verilen bir kaynak yönteminden sonra bu ekipmanın imalatı için parametre çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Bazı durumlarda WAAM tezgâh sağlayıcısının alaşım gruplarının çalışılabileceği bir parametre seti tanımladığı durumlar olsa da ekipmanın geometrisine göre parametre geliştirilmesi kaçınılmaz olmaktadır [15]. Bu gerçekliğe uygun olarak WAAM’da yapılan ilk çalışmalar Çizelge 2.3’de görülebileceği gibi parametre optimizasyonu alanındadır. Diğer taraftan “Yüksek Mukavemet Düşük Alaşım” (İng. High Strenght Low Alloy) (HSLA) grubunda bulunan çelikler gerek kullanım alanının genişliği gerek ekonomik oluşları sebebiyle WAAM’da geniş bir araştırma alanı bulmuştur. HSLA grubunda bulunan çelikler üzerine çeşitli zaman aralıklarında yapılan çalışmalar Çizelge 2.6’de özetlenmiştir [37,51-59].

Çizelge 2.6. Proses parametreleri

Kaynak Yöntemi	Ham Madde	Parametreler	Çalışma Özeti
GMAW [51]	ER110S-G (HSLA)	V:21 V A:95 A TBH: 3 m/dk İH:0,54 m/dk IG: 221 J/mm	Tel ve ark eklemeli imalat (WAAM) yöntemi, yapısal uygulamalarda kullanılan büyük ve karmaşık parçaların üretimi için uygun bir tekniktir. Bu çalışmada, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çeliklerle yapılan WAAM üretiminde ısı çevrimlerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Isı girdisinin soğuma hızlarını, katmanlar arası sıcaklıkları ve 800–500 °C aralığında bekleme sürelerini etkilediği bulunmuş; mikroyapı analizleri, ferrit, beynit, martensit ve kalıntı östenit fazlarının tüm ısı girdilerinde korunduğunu göstermiştir. (EBSD) analizleri, numunelerde belirgin bir doku oluşmadığını ve mekanik özelliklerin izotropik olduğunu ortaya koymuştur. Mekanik test sonuçları, üretilen parçaların yüksek süneklik ve mekanik mukavemet gösterdiğini doğrulamış ve bu çalışma, WAAM yöntemi ile HSLA çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki ısı çevrim etkisini açıklayan ilk çalışma olarak literatüre katkı sağlamıştır.
MIG-CMT [37]	ER70S-6 (HSLA)	V:15,3 V A:166 A TBH: 4,7 m/dk İH:0,45 m/dk IG: 221 J/mm	Tel ve ark eklemeli imalat (WAAM), büyük ve yoğun parçaların yüksek hızda üretimini sağlayan bir metal eklemeli imalat teknolojisidir. Bu çalışmada, WAAM sürecinde harici kızılötesi ısıtıcıların kullanımının üretilen parçaların kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kızılötesi ısıtıcı kullanılan WAAM yöntemiyle üretilen parçaların daha düzenli geometrilere, rafine iç yapılara ve stabil mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir; ayrıca çekme mukavemeti %17 daha yüksek bulunmuş ve mikroyapıdaki sertlik değişimleri %12 oranında azalmıştır.

Çizelge 2.6. (devam) Proses parametreleri

Kaynak Yöntemi	Ham Madde	Parametreler	Çalışma Özeti
MIG-CMT [52]	ER120S-G (HSLA)	V:N/A A: N/A TBH: 6 m/dk İH:0,6 m/dk IG:N/A	Bu çalışmada, yüksek biriktirme oranıyla büyük bileşenlerin üretimine olanak tanıdığı için üretim endüstrisinde büyük ilgi gören Tel-Ark Eklemeli İmalat (WAAM) sürecinin ısıl davranış analizi yapılmıştır. WAAM sürecindeki yüksek enerji girdisi, karmaşık ısı transferi ve ısıl döngülere yol açarak süreci karmaşık hale getirmektedir. Yapılan 3 boyutlu ısıl geçici sayısal simülasyon, ısı girişinin etkisini, sıcaklık gradyanını ve farklı soğuma sürelerinin ara katman sıcaklıklarına etkisini analiz etmiş; sonuçlar, deneysel ölçümlerle uyumlu bulunmuş ve artan ısı girdisinin ısı dağılımını zorlaştırdığı gözlemlenmiştir.
GMAW [53]	ER110S-G (HSLA)	V:21 V A: 95 A TBH: 3 m/dk İH:0,54 m/dk IG:221 J/mm	Bu çalışmada, WAAM ile üretilen ince duvarlı yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik parçaların mikro yapısı incelenmiş ve yapısal uygulamalarda kullanılmak üzere en önemli son işlem yöntemlerinden biri olan frezeleme stratejisi uygulanmıştır. Sonuçlar, üretilen parçaların mekanik davranışının frezeleme sürecine önemli bir etkisi olmadığını gösterirken, kesme hızının artması ve diş başına ilerlemenin azalması ile frezelenmiş yüzey kalitesinin iyileştiği gözlemlenmiştir.
MIG-CMT [54]	ER110S-G (HSLA)	V:20,1 V A: 114 A TBH: 4 m/dk İH:0,4 m/dk IG:277 J/mm	Bu çalışmada, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çelik kullanılarak WAAM sürecinde mikroyapı gelişimi incelenmiş ve ER110S-G tel kullanılarak fonksiyonel derecelendirilmiş numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Soğuma hızı ve temperleme süresinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki güçlü etkisi belirlenmiş; soğuma hızına bağlı olarak mikrosertlik değerinin 283 ila 411 HV arasında değiştiği tespit edilmiştir. CMT ve C-GMAW kaynak modları ile üretilen numunelerin hem yatay hem dikey doğrultuda uzama değerleri %5 ila %10 arasında değişirken, her iki yöntemle de yüksek çekme mukavemeti (CMT: 807 MPa, C-GMAW: 759 MPa) elde edilmiştir.
MIG-CMT [55]	ER70S-6 (HSLA)	V:18-18-18-21-21 V A: 170-170-170-181-181 A TBH: 5,5-6,5-7,5-5,5-6,5 m/dk İH:0,5-0,4-0,3-0,5-0,4 m/dk IG:N/A J/mm	Bu çalışmada, Tel-Ark Eklemeli İmalat (WAAM) yöntemi kullanılarak ince duvarların düzgün yüzeyle üretilmesi için en uygun kaynak koşulları belirlenmiştir. ER70S-6 çelik kaynak telinden oluşan kaynak dikişlerinin ardışık bir şekilde biriktirilmesi sırasında, nihai numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla AWS standartlarına uygun parametreler seçilmiştir. Mekanik özellik testlerinin sonuçları, işlem parametrelerinin değiştirilmesinin numuneler arasındaki farklılıklar üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir.
MIG-CMT [43]	ER70S-6 (HSLA)	V:15,7 V A: 155 A TBH: 6 m/dk İH:0,6 m/dk IG:N/A J/mm	Bu çalışmada, CMT-WAAM yöntemiyle üretilen karbon çelik numunelerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Farklı yönlerde (0°, 45°, 90°) alınan numuneler üzerinde yapılan çekme testleri, malzemenin izotropik çekme özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. İşlenmiş numunelerin dayanım ve süneklik değerleri, ham numunelere göre daha yüksek bulunmuş ve her iki numunenin de sünek kırılma yüzeyine sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 2.6. (devam) Proses parametreleri

Kaynak Yöntemi	Ham Madde	Parametreler	Çalışma Özeti
Sub-Merged [57]	MH80SD	V:28 V A: 600 A TBH: N/A İH:0,39 m/dk IG:N/A	Düşük karbonlu yüksek mukavemetli çelik, daldırma ark eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş ve imalat yönü boyunca mikroyapı değişimleri ile farklı açılardaki (0°, 45°, 90°) mekanik özellikler incelenmiştir. İmalat yönü boyunca mikroyapı, pro-eutektoid ferrit ve granüler beynit fazları tarafından domine edilmiş olup, katmanlar arası farklı tane boyutlarından kaynaklanan iç-katman, katmanlar arası ve ısıdan etkilenen bölge gibi periyodik bir yapı gözlemlenmiştir. Numunelerin çekme ve darbe testlerinde, 45° yönündeki numunelerin en iyi mukavemet ve tokluk özelliklerine sahip olduğu belirlenmiş, buna karşın 90° yönündeki numunelerin daha düşük mukavemet ve tokluk değerlerine sahip olduğu görülmüştür, ancak tüm yönlerde sünek kırılma modu gözlenmiştir.
GMAW [58]	ER70S-6 (HSLA)	V:14,8-16 V A: 125-159 A TBH: 4,5-6,5 m/dk İH:N/A IG:N/A	Bu çalışma, ER70S-6 tek hatlı tel ark eklemeli imalat (WAAM) yönteminin bir robot kullanılarak kusursuz numuneler üretmek üzere üretim ve karakterizasyonunu araştırmaktadır. Tel besleme hızını ayarlamak, yapı çelik çerçevelerinin verimli bir şekilde üretilmesini amaçlamaktadır ve bu doğrultuda, 1 mm çapındaki ER70S-6 tel numuneleri 4,5 ila 6,5 m/dak arasında besleme hızlarıyla üretilmiştir. Mikroyapı ve mekanik özelliklerin incelenmesi sonucunda, soğuma süreci ve tanelerin kristalografik yönelimlerinin Widmanstatten ferrit oluşumunu etkilediği ve tanecik boyutunun ortalama 3-11,6 µm aralığında değiştiği belirlenmiş, mikrosertlik değerlerinin ise yaklaşık 300±15 HV olduğu gözlemlenmiştir.
MIG [59]	ER70S-6 (HSLA)	V:28 V A: 320 A TBH: 6,24 m/dk İH:0,3 m/dk IG: N/A	Bu çalışma, ER70S kaynak teli kullanarak yeni bir tel ark eklemeli imalat (WAAM) teknolojisi ile geleneksel olarak haddelenmiş düşük karbonlu düşük alaşımlı gemi yapım çeliği plakası (EH36) üretilebilirliğini araştırmayı amaçlamaktadır. Üretim sürecinin ardından hem haddelenmiş hem de WAAM ile üretilmiş gemi plakalarına hava ile soğutma ve su verme gibi farklı ısıtım işlem döngüleri uygulanmıştır. Sonuçlar, haddelenmiş plakada sert martenzit-östenit (MA) yapıları oluşurken, WAAM plakada su verme işlemi ile asiküler ferrit ve intergranüler perlit oluştuğunu göstermiştir; bu durum WAAM ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini iyileştirerek geleneksel haddelenmiş parçalara göre daha yüksek mekanik bütünlük sağladığını doğrulamaktadır.

(Tabloda kullanılan kısaltmalar: V: Voltaj (V); A: Akım (A) , TBH: Tel Besleme Hızı (m/dk) ; İH: İlerleme Hızı (mm/dk) ; IG: Isı Girdisi (Joule/mm), N/A: Veri yok)

Biriktirme parametrelerinin optimizasyonu WAAM’da başlıca araştırma konularından biri olarak öne çıkmaktadır. Biriktirme parametrelerinin optimizasyonu gerek mekanik özellikleri gerek mikro yapıyı doğrudan etkilediğinden araştırmacılar tarafından sıklıkla çalışılmıştır [51,59]. Gelinecek noktada ürün-spesifik parametreler üzerine çalışmalar devam

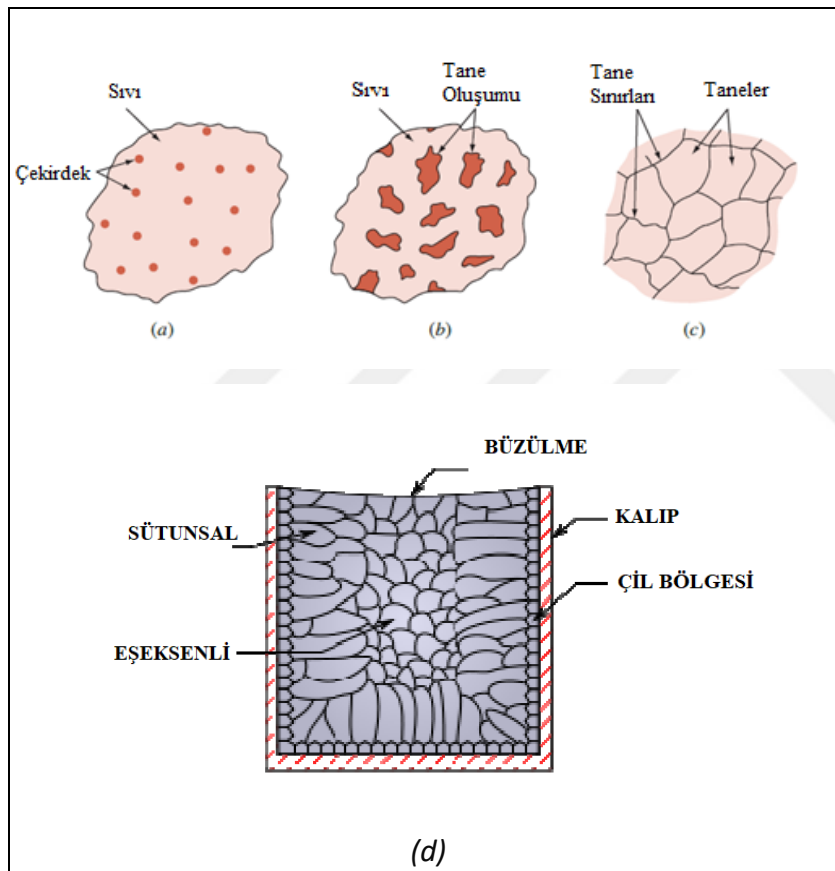
etmektedir [15]. WAAM'da üretim parametresi belirleme aşamasında belirlenen ilk parametre tel besleme hızıdır. Robotik kaynak makinaları girilen TBH değerine göre bir ilerleme hızı (İH) önermektedir. Buna ek olarak ısı girdisi değeri TBH ile doğrudan ilgilidir [6]. Mikro yapı ve dolayısı ile mekanik özellikler böylelikle, seçilen TBH oranından doğrudan etkilenmektedir [60]. Burada üretim sonrası herhangi bir ekstra işlem (post-process) tesis edilmediği varsayılmalıdır. Çizelge 2.6'da TBH'nın 4,5 ile 6,5 m/dk arasında sıklıkla tercih edildiği görülmektedir. Buna bağlı olarak aynı çalışmalarda İH'nın 0,3 ile 0,6 m/dk arasında değişim gösterdiği görülmektedir. Örnek olarak aynı çizelgede değişik TBH/İH oranlarında çalışarak farklı ısı girdilerinde üretilen duvarlardaki mekanik ve mikro yapı özelliklerini nasıl değişeceğini araştırmak isteyen Shukla vd.,2023 TBH değerini sırasıyla 5,5-6,5-7,5-5,5-6,5 m/dk olarak 5 farklı değerde seçmiştir. Buna karşılık gelen İH değerleri ise 0,5-0,4-0,3-0,5-0,4 m/dk olarak kaydedilmiştir. Sonuç olarak TBH/İH oranı sırasıyla 11-16,25-25-11-16,25 değerlerini almaktadır [55]. WAAM'da TBH, İH ve bu parametrelerin bir sonucu olan akım (I), voltaj (V) gibi parametrelerin yanı sıra koruyucu gaz türü ve akısı, biriktirme stratejisi, ısı kaynak modellemesi, tel açısı, tel çapı, tel ucunun işlem parçasına mesafesi (TUİM) gibi parametreler de mevcuttur ve araştırmacılar bu parametrelerin optimizasyonu kapsamında da çalışmalar yapmıştır [4,6,15].

2.5. WAAM'da Isıl Davranış ve Mikroyapı Oluşumu

WAAM tipik bir Eİ metodu olarak bir nesneyi katman katman üretmeye dayanmaktadır. Bunu yaparken metalik telin ergitilmesi gerekmektedir. Bu ergime önceki katman üzerine metalurjik bağlanmayı sağlamak için yeterli miktar ısı girdisi ile gerçekleşmelidir. Bu durumda arzu edilen parçanın tamamının üretimi boyunca ya tüm üretilen kısmın ya da bir kısmının tekrarlı ısıya maruz kalacağı doğal sonuçtur. Bu sonuca uygun olarak WAAM özelinde Eİ; döküm, toz metalürjisi gibi üretim metotlarından farklılaşmaktadır. Zira dökümde sıvı fazdaki metal bir kalıba dökülür ve soğuması beklenerek parça imal edilir. Toz metalürjisinde ise bir kalıba doldurulan metalik toz sinterlenir veya ergitilir ve üretim sonrası işleme tabi tutulur [37].

Sıvı halden katı hale geçmek olarak tanımlanabilecek katılaşma, sıvı fazdan ısıнын çıkışı ile birlikte çekirdeklenmenin oluşumu, bu çekirdeklenme etrafında diğer çekirdeklerin oluşumu ve kristal büyümesi ile tetiklenen ve devam eden bir süreçtir. Metallerin katılaşmasının anlaşılabilmesi için verilen Resim 2.4'de (a,b ve c sırasıyla) sıvı fazdan ilk çekirdeklerin

oluşması, çekirdeklerden taneler oluşması ve tanelerin büyüyerek tane sınırlarının teşekkül etmesi görülebilmektedir. Yine Resim 2.4 d’de döküm işleminde katılaşma gösterilmiştir. Katılaşan metalde mevcut olan çekirdeklenme alanlarının sayısı, üretilen katı metalin tane yapısını etkiler. Katılaşma sırasında nispeten az sayıda çekirdeklenme alanı mevcutsa, kaba veya büyük taneli bir yapı oluşur. Eğer katılaşma sırasında birçok çekirdeklenme alanı varsa, ince taneli bir yapı ortaya çıkar. Neredeyse tüm mühendislik metallerinin ve alaşımlarının ince taneli bir yapı ile katılaştığı görülür, çünkü bu, dayanıklılık ve bitmiş metal ürünlerinin homojenliği açısından en istenilen türdür.



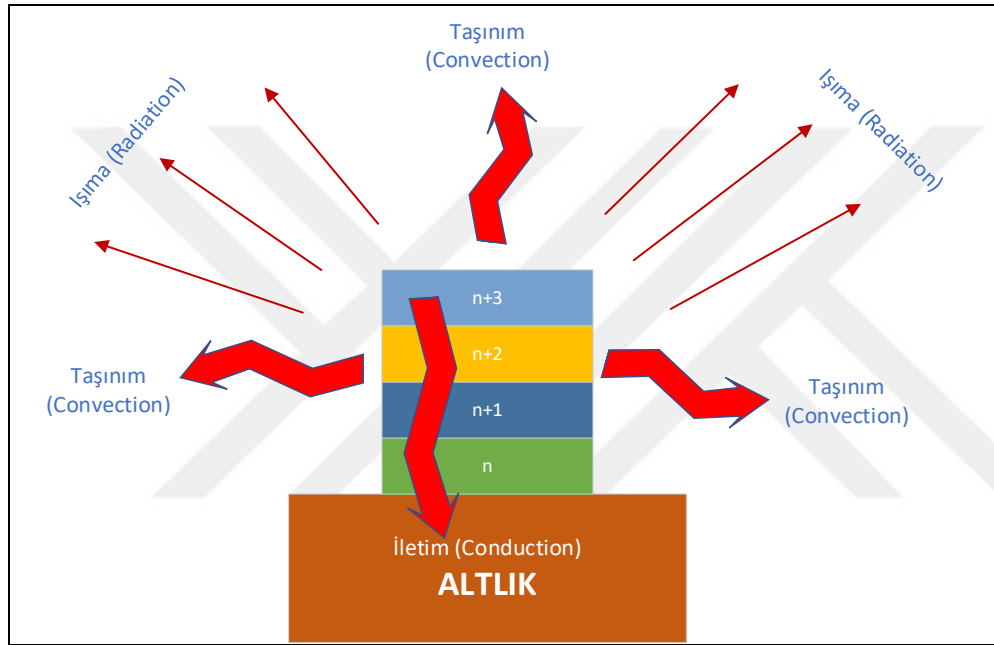
Resim 2.4. Metallerin katılaşması [56]

Genellikle iki ana tane yapısı türü gözlemlenir:

- Eş eksenli taneler
- Sütunlu taneler

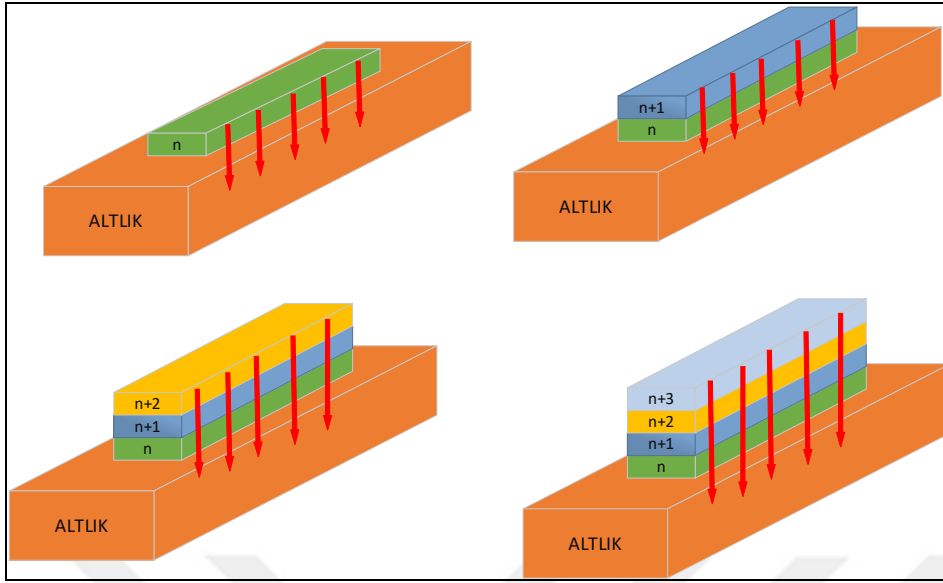
Eğer katılaşma sırasında sıvı metaldeki çekirdeklenme ve büyüme koşulları, kristallerin her yönde eşit büyüebilmesini sağlarsa, eş eksenli taneler oluşur. Eş eksenli taneler, genellikle

soğuk kalıp duvarına yakın bölgelerde bulunur, Duvara yakın büyük miktarda soğuma, katılma sırasında yüksek bir çekirdek yoğunluğu oluşturur. Bu durum Resim 2.4’de resmedilmiştir. WAAM’da imalatlar katman üzerine katman biriktirme metoduna dayanmaktadır. Bu sebeple ortaya çıkan ısı iletim, taşınım ve ışıma ile iletilir. Şekil 2.3’de gösterildiği üzere iletim katmanların temas halinde olduğu altlığa doğru olmaktadır. Taşınım serbest ve her yönde gerçekleşmektedir. Işıma ise yine taşınım da olduğu gibi her yöne doğru gerçekleşebilmektedir [56].



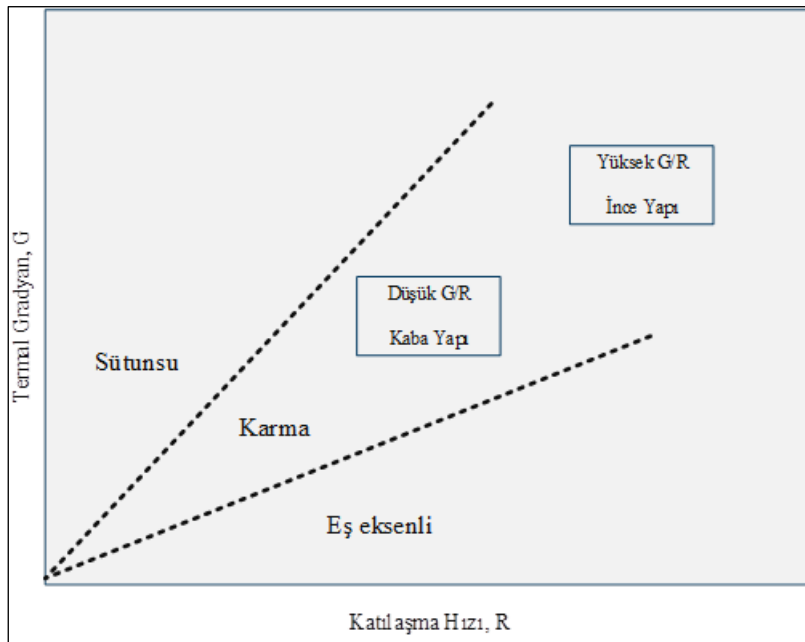
Şekil 2.3. WAAM’da ısıнын transferi

Bu durumda özellikle belirtilmesi gereken konu katman sayıları arttıkça altlığa iletim yoluyla akan ısıнын biriktirilmiş katmanlar üzerinden sürekli ve sürekli akmaya devam etmesidir. Mikro yapı oluşumunda ısıнын hareket yönü Resim 2.4’de anlatıldığı üzere mikro yapı oluşumun eş eksenli ve sütunlu tane oluşumu sebebiyle önem taşımaktadır.



Şekil 2.4. WAAM'da katman sayısına bağlı olarak ısı transferi

Şekil 2.4'te katman kalınlığı arttıkça iletim ile gerçekleşen ısı transferinin yönü gösterilmiştir. Görüldüğü üzere üretilmekte olan katmanda oluşan ısı üretilen katmanlardan altlığa ulaşmaktadır. WAAM'da bir parametre olan tabakalar arası üretim bekleme süresi boyunca oluşan mikro yapılar, üzerinden geçen yeni ısıdan kaynaklı olarak değişime uğrayabilmektedir [51].

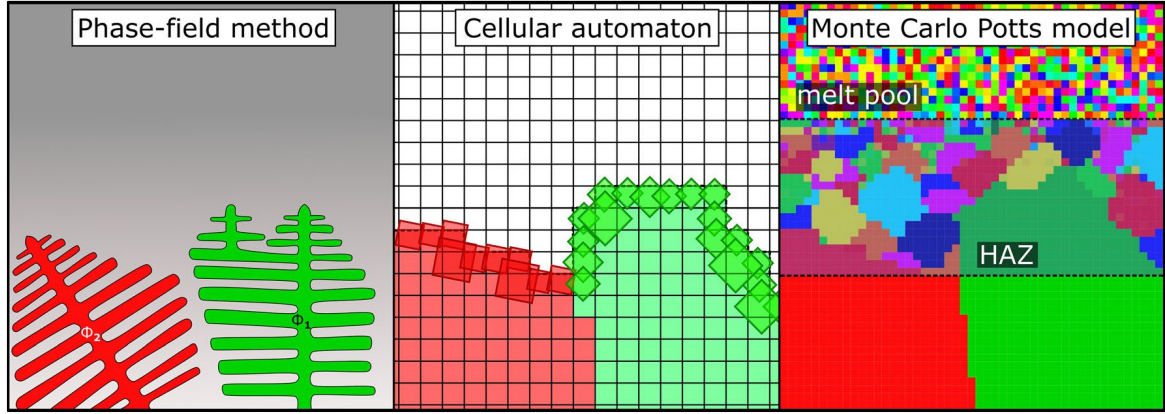


Resim 2.5. Katılma hızı (R) ile ısı gradyan (G) ilişkisine göre mikro yapı türleri [15]

Katılma hızı (R) ile ısı gradyan (G) oluşacak tane yapısını etkileyen iki temel faktördür. Resim 2.5’de G ’nin R ’ye göre düşük, eşit veya büyük olması oluşabilecek yapının sütunsal, karma veya eş eksenli olmasını desteklemektedir. Isıl gradyanın katılma hızından büyük olması ($G/R > 1$) sütunsal tane yapısını desteklemektedir. Isıl gradyanın katılma hızından küçük olması ($G/R < 1$) durumunda ise eş eksenli tane yapısı desteklenmektedir [15]. Buradan çıkışla WAAM’da üretim yapılırken üretime başlandığı anda altlığa ilk biriktirilen katmanda G ’nin yüksek olmasından kaynaklı olarak sütunsal yapının desteklenmesi beklenebilir. Aynı mantıkla ısıнын birikmeye başladığı G ’nin düşük seyrettiği durumlarda ise eş eksenli yapının desteklenmesi beklenebilir. Hunt, 1984’e göre büyüme türü, kolonlu cephe geçerken mevcut olan eş eksenli kristallerin hacim fraksiyonuna bağlıdır. Eğer hacim fraksiyonu 0.49’dan büyükse, tamamen eş eksenli büyümenin meydana geldiği kabul edilir. Eğer hacim fraksiyonu 0.49’un %1’i kadar küçükse, yapı tamamen kolonlu olarak kabul edilir [61,62].

2.6. Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği Yöntemleri

Katılma sırasında mikro yapı evrimini simüle etmek için farklı fiziksel ve sayısal modeller mevcuttur. Bu modeller arasında Phase-Field (PF), Cellular Automaton (CA) ve Kinetic Monte Carlo (KMC) modelleri yer almaktadır. Her bir model, fiziksel doğrulukları ve gerekli hesaplama gücü açısından birbirinden farklılık gösterir. PF modelleri, sağlam termodinamik temellere dayanan ve alaşımın karmaşık katılma desenlerinin oluşumu ile ayrışmasını dikkate alan bir yaklaşımı benimser. Ancak bu modellerin yüksek hesaplama gücü gereksinimi, genellikle sadece birkaç bileşenli alaşımlar (çoğunlukla iki veya üç element) için kullanılmalarına ve sınırlı sayıda hücre ya da dendritin simülasyonuna yol açmaktadır. Ayrıca, bilgisayar işlemcilerini yoğun bir şekilde kullanan bu modelleme yöntemi, veri sunumunu sınırlı hale getirmektedir. Yön bağımlı ara yüzey enerjisi gibi güvenilir malzeme özelliklerinin eksikliği ise durumu daha karmaşık hale getirmektedir. PF modelleri, mikro yapının fiziksel gerçekçiliğini artırmak için gerçekçi termodinamik veriler gerektirir. İşte bu noktada, faz diyagramlarının hesaplanması (Calculation of Phase Diagrams, CALPHAD) yöntemi tarafından sağlanan termodinamik veriler PF modellerine entegre edilerek, daha doğru ve gerçekçi mikro yapı simülasyonları yapılabilir. CA yaklaşımları, hücresel veya dendritik mikro yapıya daha kaba bir bakış açısı sunar ve içsel ayrışma yapıları hakkında bilgi vermez. KMC modelleri, faz sınırlarının eğrilik ile yönlendirilen büyümesine dayanır [63].



Resim 2.6. Simülasyon programlarının mikro yapı modelleme görüntüleri [63]

Büyük boyutlu problemleri (örneğin, bir bileşen ölçeğinde) çözme potansiyeline sahip olsalar da bu sayısal modelin, tane büyümesi ve tane seçimi arkasındaki fiziksel ilişkiyi tam olarak açıklaması mümkün olmamaktadır. Bu üç yöntemin de kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Ancak tüm bu modellerin ortak bir zorluğu, yeni tane çekirdeklenmesinin modellenmesidir. Literatürde mevcut olan çekirdeklenme modelleri, çok sayıda serbest parametre içermektedir. Bu parametreler, sayısal sonuçları önemli ölçüde etkileyerek, deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu hale getirilmesine yardımcı olmak için kullanılmaktadır. Bu modelleme yöntemlerine ilişkin ekran görüntüleri Resim 2.6’de görülmektedir [64]. WAAM ile üretilen parçaların karmaşık ısı etkisi altında olduğu aktarılmıştı. WAAM’a göre daha düzenli ısı girdisi ve soğuma durumu altında olan döküm gibi üretim metotlarında dahi verimli ve geniş ölçüde sonuç ortaya koyamadığı raporlanan çeşitli mikro yapı simülasyon programlarının WAAM’da sağlıklı sonuç vermesi henüz gerçekçi görünmemektedir [63].

1970’li yıllardan itibaren yoğun bir şekilde geliştirilen CALPHAD yöntemi, malzeme sistemlerinin faz dengesini ve termodinamik özelliklerini modellemek için termodinamik verileri bir araya getirir ve çeşitli hesaplamalar yaparak bu sistemlerin faz diyagramlarını oluşturur [66]. Termodinamik veriler ve modellemeler sayesinde, faz diyagramlarının doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlayabilen CALPHAD hem basit hem de karmaşık çok bileşenli sistemler için uygundur. CALPHAD metodolojisi yıllar boyunca deneysel verilerden elde edilen veri tabanlarını kullanarak çeşitli alaşım ve bileşimlere ilişkin hesaplamalar yaparak sonuç vermektedir. Bu yönüyle CALPHAD’da elde edilen veriler malzeme kinetiği, malzeme termodinamiği ilkelerine tam uygunluk sergiler. Diğer taraftan anılan modelleme programları gibi bir mikro yapı modellemesi CALPHAD’da

bulunmamaktadır. Çeşitli araştırmacılar diğer simülasyon programlarını CALPHAD metodolojisi ile birleştirerek katılasmada mikro yapı oluşumuna ilişkin modellemelerin yapılabileceğini raporlamışlardır [67]. CALPHAD bir metodoloji olarak araştırmacılara hızlı ve güvenilir veri sunmaktadır. Ek olarak yeni veriler türetilen grafikler oluşturarak araştırmacılara destek verebilmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeden bağımsız olarak ısıma ve soğuma durumlarında ne tür fazlarla karşılaşabileceğini bilmek araştırmacılara büyük hız kazandırabilmektedir. CALPHAD açık kaynak kodu ile tüm araştırmacılara hizmet etmektedir. Hesaplamalı malzeme mühendisliği (ICME) bağlamında ele alınan CALPHAD termodinamik kuramları hızlı ve net hesaplayarak araştırmacılara hızlı ve güvenilir veriler oluşturabilmektedir [66-67]. CALPHAD metodolojisi temelinde çalışan ticari programlar yaygınlıkla kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında Thermocalc isimli İsveç merkezli bir şirketin programı kullanılmıştır.

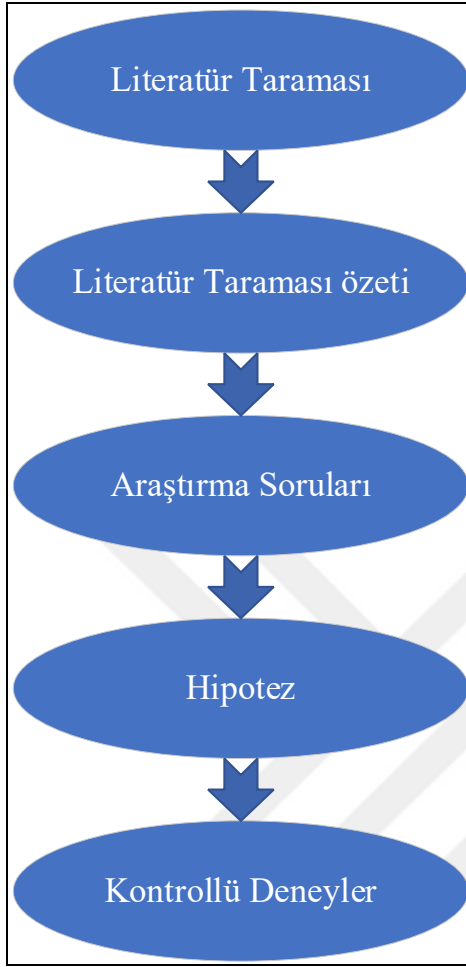
2.7. Literatür Açığı ve Planlanan Katkılar

2015 yılından sonra WAAM üzerine yapılan çalışmaların yoğunlaştığı görülmektedir. Bu yoğun çalışmalar WAAM'ın geleneksel üretim metotları karşısında üretim esnekliği, ham madde ve zaman verimliliği gibi sebeplerle tercih edilebileceği kanaatine dayandığı görülmektedir. WAAM'da oluşan mikro yapı oluşumları doğrudan mekanik özellikleri etkilediği için sıklıkla araştırma konusu olmuş durumdadır. Isınma ve soğuma davranışının mikro yapının oluşumu ve faz oluşumları üzerinde belirleyici etkisi bilindiğinden WAAM'da ısı girdisini etkileyen parametreler üzerine çalışmalar yapılmıştır. Diğer taraftan Eİ kapsamında yapılan mikro yapı modellemeleri çok kısıtlı alanda yapılabildiğinden olayı efektif olmadığı raporlanmıştır [64]. Bununla birlikte WAAM üzerine ısı ve mikro yapı modelleme çalışmaları devam etmektedir.

WAAM'da ham madde olarak kullanılabilen çelik, alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları arasında parametre- mikro yapı, parametre- faz morfolojisi, parametre- mekanik özellik ilişkileri alanında yapılan çalışmalarda gerek erişim kolaylığı gerek bugüne kadar birikmiş literatür bilgisi, gerek kullanım yaygınlığı gibi sebeplerle çelik malzemeler büyük ilgi görmüştür. Isınma soğuma durumunda zaman sıcaklık ve dönüşüm (TTT) diyagramları ile TTT'den türetilen sürekli soğuma diyagramları (CCT) çok kullanışlı diyagramlardır. Çeliklerin WAAM'da geniş çalışma alanı bulmasında bu diyagramların çelikler özelinde geniş spektrumda çalışılmış olmasının da payı olduğu değerlendirilmektedir. Nitekim

eliklere zel TTT ve CCT atlasları yayınlanmıştır [68]. Bu atlaslar çeşitli elik türlerine ilişkin geniş bilgiler içermektedir. Çelikler zerine geniş bilgiler içerse de malzeme spesifik çalışmalar yapmak isteyen araştırmacılar için ICME programları büyük kolaylık sağlamaktadır. Örneğin atlaslarda bulunmayan bir çeliğe ait TTT diyagramı çeliğin kimyasal kompozisyonunun bilinmesi durumunda saat mertebesinde bir sürede Thermocalc isimli programda oluşturulabilmektedir.

Katman zerine katman imalatı doğası gereği ısı dnė oluşturmaktadır. Bir metalin sıvı fazdan katı faza soğutulması suretiyle ilerleyen ve katılaşma tamamlandıktan sonra üretimi tamamlanan üretim metotları aksine katman üzerine katman biriktirme esnasında ısı karmaşanın izah edilmesi gerekmektedir. Birçok çalışmada bu ısı karmaşadan bahsedilmiş, ısı modeller geliştirilmiştir. Katmanlar ısı kamera ile izlenerek soğuma hızları incelenmiştir. Tüm bunlara rağmen bu karmaşık ısı koşulların mikroyapı ve faz biçimlenmesi bağlamı net verilmemiştir. Diğer taraftan gerçek parçalar bir katmandan yüzlerce katmana kadar giden bir üretim sürecine sahiptir. Tek katman imalatın karakterizasyonu görece basit iken yüzlerce katmadan oluşan bir parçada hangi bölgeden hangi karakterizasyon yöntemi ile karakterize edileceği girift bir durumdur.



Şekil 2.5. Hipotez oluşumunda kullanılan bilimsel yöntem

Çalışmanın bilimsel düzlemde ilerlemesi Şekil 2.5’de gösterilen sıraya göre gerçekleştirilmiştir. Literatür taraması neticesinde elde edilen özet, araştırma soruları ve hipotez kurgusuna aşağıda yer verilmiştir. Hipotez kurgusu “Literatür Taraması” başlığında verilmiş olup; malzeme, yöntem ve deneyler diğer bölümlerde aktarılacaktır.

Literatür taraması neticesinde;

1. Araştırmacılar WAAM hususunda 2015 yılından sonra yoğun çalışmaya başlamıştır.
2. Çelik ve Alüminyum alaşımları ile Titanyum alaşımları üzerinde dikkate değer çalışmalar yapılmıştır.
3. Üretim parametrelerinin araştırılması çalışmaları sıklıkla yapılmıştır.
4. Parametre esaslı çalışmalar sıklıkla proses- mikro yapı -mekanik özellik ilişkisine odaklanmıştır.

5. Tane yapısı ve faz biçimlenmesi çeliklerde diğer alaşımlara göre daha rahat incelenebilmektedir.
6. Tane yapısı ve fazların ICME’de oluşturulan bilgilerle çapraz-kontrol edilebilmesi için ICME kütüphanesi uygun olmalıdır.

Bu özet, literatür boşluğu anlamında aşağıdaki sonuçlara götürmektedir.

1. Mikroyapı oluşumları birbirini tekrarlamaktadır. (Parametre değişse dahi oluşan fazlar ve mikroyapı biçimlenmesine dair bir genelleme oluşturulabilir.)
2. Çelik, alüminyum ve titanyum alaşımlarında parametre değiştirilse dahi oluşan fazlar değişmemekle birlikte tane yapısı (alaşıma göre eş eksenli, dendritik, sütunsal) çeşitli çalışmalarda aynı bulunmuştur.
3. Tekrarlı ısınma ve soğumanın WAAM’da sebep olduğu mekanizma, parametre seçimi-mikroyapı ilişkisi esas alınarak net ortaya konmamıştır.
4. Tekrarlı ısınma ve soğumanın WAAM’da sebep olduğu mekanizma, mikroyapı- mekanik özellik ilişkisi esas alınarak net ortaya konmamıştır.
5. Modelleme programları yapıda çok kısıtlı bir alanda öngöründe bulunmak maksadıyla ve pilot olarak ele alınmıştır. (Monte Carlo Potts, Cellular Automata)

Literatür taraması sonucu oluşturulan literatür özeti neticesinde ortaya şu sorular çıkmaktadır:

1. Tekrarlı ısınma-soğuma mekanizması mikro yapı ve faz oluşumunu nasıl etkilemektedir?
2. Eş eksenli yapı oluşumunu destekleyen mekanizmalar nelerdir?
3. Tekrarlı ısınma-soğuma mekanizması neticesinde ortaya bir model çıkarılabilir mi?
4. Katman üzerine katman biriktirmede karakteristik bir CCT diyagramı öngörülebilir mi?

Bilimsel akışa uygun olarak tüm literatür taraması sonucu ortaya çıkan araştırma soruları doğrultusunda sınanması planlanan hipotez aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Tekrarlı ısıtma şartlarında ısı girdisi değişse dahi;

1. Altlığa yakın bölgeler ve en üst katmanlar iletim ve taşınma sebebiyle tekrarlı ısınma ve soğumadan dolayı orta katmanlardan farklı olacaktır.

2. Katman sayısı yüksek olan üretimlerde orta bölgenin (üretimdeki katman sayısına göre) tekrarlı ısınma-soğumadan dolayı mikro yapı ve faz oluşumu dip ve kepe göre farklı olacaktır.





3. MALZEME VE YÖNTEM

WAAM yöntemiyle üretilen parçalarda ısı çevrimin; işlem parametreleri, proses, iç yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla duvar üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim planı, literatürde olumlu metalurjik bağlanma sağladığı bildirilen TBH/İH oranına dayandırılmış; bu orana karşılık gelen ısı girdisinin yanı sıra, daha düşük ve daha yüksek ısı girdisi sağlayan parametreler de karşılaştırmalı olarak kullanılmıştır. Bu kurgunun ana sebebi ısı girdisi değiştiğinde ısı döngünün yapıdaki mikro yapı ve faz oluşumunu etkisini inceleyebilmektir. Diğer taraftan yine aynı kümeler esas alınarak katman sayılarının da değiştirilmesi planlanmıştır. Tüm imalatlar aynı altlık ve aynı kaynak teli ile üretilmiştir. Üretimlerde bir diğer sabit parametre ise biriktirme stratejisidir. Kontrol ve deney kümesine ilişkin üretim parametreleri ve sabit tutulan parametreler ile üretimde kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonları bu bölüm altında detaylı olarak raporlanmıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Sarflar

WAAM’da çeliklerin kullanımı yaygındır. Bu çalışma kapsamında kaynaklanabilirliğinin yüksek olması, erişim kolaylığı ve özellikle mikro yapı ve faz yapılarının oluşturulan literatüre atfen mikro yapı ve faz oluşumlarının tanımına ilişkin literatür kıyasının daha kolay yapılabilceği düşünülmesi sebebiyle ER70S-6 (AWS A5.18) kaynak teli tercih edilmiştir. Bu kaynak teli bazı araştırmacılar tarafından yüksek mukavemet düşük alaşım (HSLA) grubu çelikler olarak da anılmaktadır [51]. Üretimde kullanılan ER70S-6 kaynak teli ve S355JR kalite çeliğe ait altlık malzemeye ait kimyasal kompozisyon Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Üretimde kullanılan kaynak teli ve altlığa ait kimyasal kompozisyon

Element	Fe	C	Mn	Cu	Si	Cr	Ni	S	P
ER70S-6 Ağ. %	Kalan	0,081	1,46	0,13	0,82	0,041	0,021	0,008	0,015
S355JR Ağ. %	Kalan	0,22	1,50		0,55			0,035	0,035

3.2. WAAM İmalatları

İmalatlar WAAM tezgâhı üreticisi Metalworm Eklemeli İmalat Teknolojileri A.Ş.'nin Akyurt/ANKARA tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Üretimde kullanılan parametreler her bir küme için detaylı olarak Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Üretimlerde kullanılan parametreler

	Biriktirme 1			Biriktirme 2			Biriktirme 3			Biriktirme 4
TBH (m/dk)	6	6	6	9	9	9	10	10	10	9
İH (m/dk)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6
TBH/İH	10	10	10	15	15	15	20	20	20	15
Tabakalararası Bekleme Süresi (saniye)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Katman Sayısı	1	5	10	1	5	10	1	5	10	30
Koruyucu Gaz	Ar 82% + CO ₂ 18%									
Malzeme	ER70S-6 (Çizelge 3.1) 1,20 mm çap									
Altlık	S355JR (Çizelge 3.1) (altlık boyutu: 300x200x30 mm)									

Çizelge 3.2 tüm üretim parametrelerini tek seferde görülebilmesi için hazırlanmıştır ve her bir biriktirme, hipotez kurgusunun kontrollü deneylerle sınanabilmesi için tasarlanmıştır. Bu durum ayrıntılı olarak aşağıda izah edilmiştir.

TBH: Tel besleme hızı ısı girdisine doğrudan etki eden bir parametre olarak 3 farklı değerde ayarlanmıştır. Bu ayarlama Bölüm 2.4'de ayrıntılı anlatılan WAAM'da metalurjik bağlanmanın olumlu olarak raporlandığı parametre seti esas alınarak bu değerden yine literatürde kullanılmış daha düşük bir değer ve daha büyük bir değer seçilerek tanzim edilmiştir. TBH değeri WAAM'da kaynak makinasından ayarlanabilen bir parametredir.

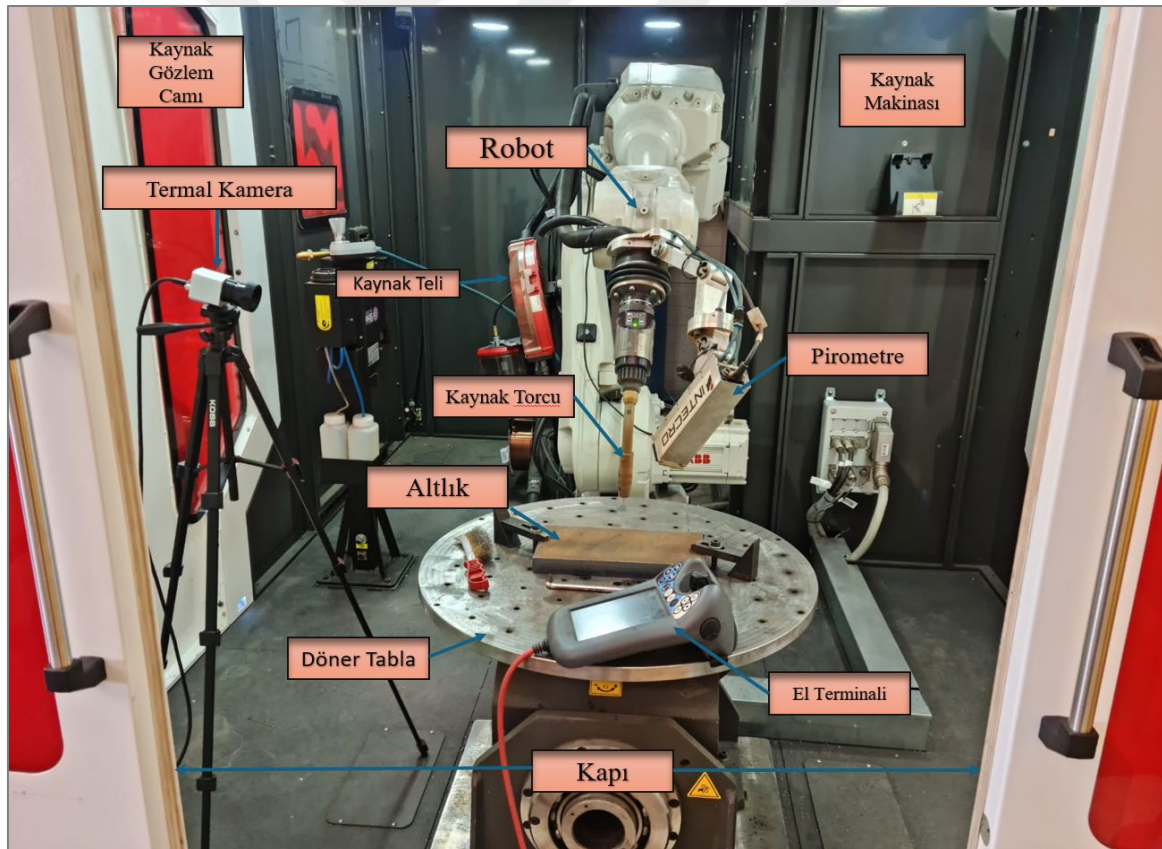
İH: İlerleme hızı, kaynak hızı olarak da kullanılmaktadır ve robotik kolun kaynak hızını tanımlamaktadır. WAAM'da ısı girdisi nihayetinde TBH/İH oranının bir sonucudur [69]. TBH'de olduğu gibi İH'de Bölüm 2.4'de ayrıntılı anlatıldığı üzere kontrollü deney yapabilmek üzere seçilmiştir.

Tabakalar arası Bekleme Süresi: WAAM'da bir katman imalatından sonra diğer katman imalatına kadar beklenen süreye verilen teknik tabir olup kullanıcı seçimli bir parametredir.

Literatürde Bölüm 2.4’de aktarıldığı üzere çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada ticari Metalworm WAAM tezgahında sık kullanılan 60 saniye süre seçilmiştir.

Katman Sayısı: Toplam imal edilecek katman sayısı tekrarlı ısıya maruz kalacak katman sayısını doğrudan etkileyeceğinden ve bu etkilemenin farklı ısı girdilerinde gözlemlenebilmesi için her bir ısı girdisi değerinde 3 farklı katman sayısı seçilmiştir. Bunlara ek olarak gerçek parçaların büyük katman sayılarına sahip olabileceğini göz önünde bulundurularak 30 katmanlı imalat yapılması da ayrıca öngörülmüştür. Böylelikle toplamda 4 farklı katman sayısında üretim gerçekleştirilmiştir.

Koruyucu gaz debisi ve karışımı, kullanılan altlık ve kaynak teli tüm imalatlarda aynıdır. Kaynak işlemleri soğuk metal transferi (CMT) modunda gerçekleştirilmiştir [44,45].

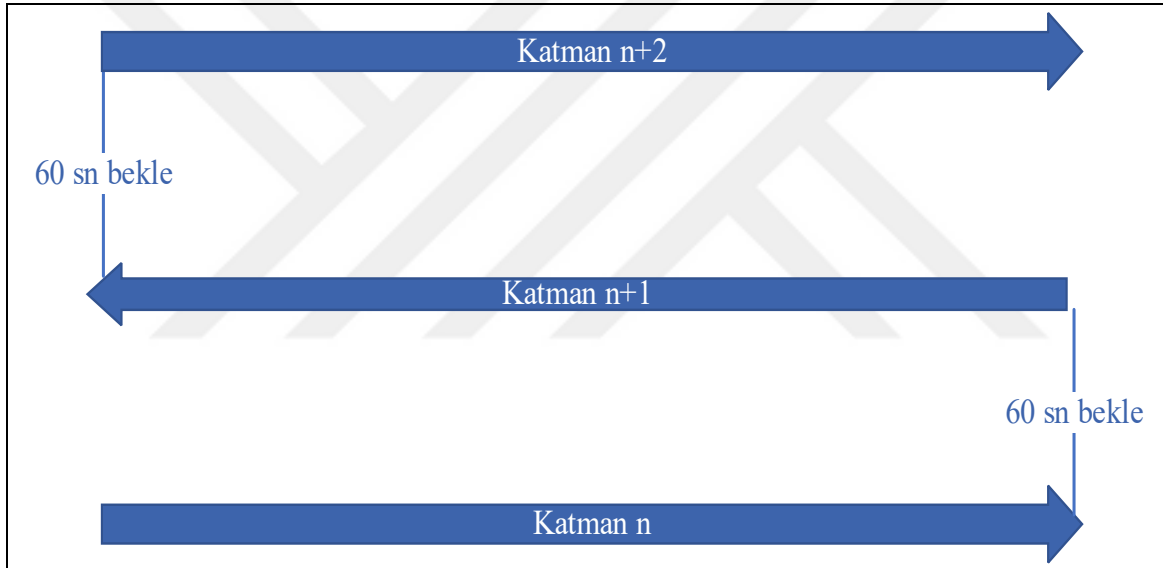


Resim 3.1. WAAM imalatlarında kullanılan tezgâhın gösterimi

Ticari Metalworm WAAM tezgahında yapılan üretimler şirketin Akyurt /ANKARA tesislerinde gerçekleştirilmiştir. MHTTN-1000 kodlu üretim tezgahına ait gösterim Resim 3.1’de gösterilmiştir. Resim 2.3’de şematize edilen gösterime ek olarak MHTTN-1000 kodlu

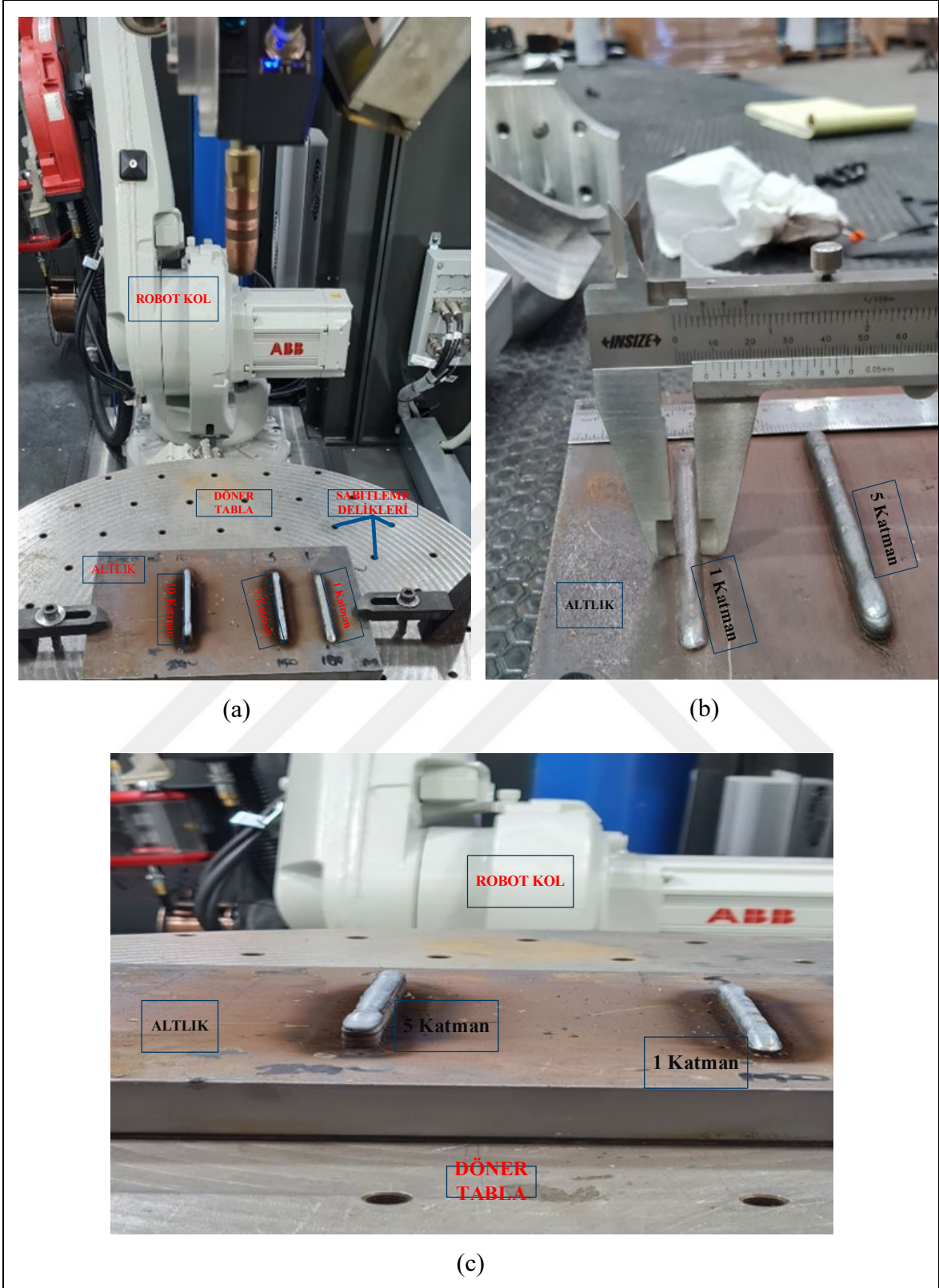
WAAM tezgâhı bir kabin içerisinde bulunmaktadır. Robota erişim bir kapı vasıtası ile sağlanmaktadır ve tüm işlem kaynak gözlem penceresinden izlenebilmektedir. Isıl kamera sadece 30 katman imalat esnasında kullanılmıştır.

İmalatlarda kullanılan biriktirme stratejisi tabaka üzerine tabaka biriktirme esasına göre duvar oluşturma şeklinde seçilmiştir. Bu husus Şekil 3.1’de şematize edilmiştir. Çoklu tabakadan oluşan duvar imalatlarında tabakalar arası bekleme süresi Çizelge 2.6’de verildiği üzere 60 saniyedir. Şekil 3.1’de görüldüğü üzere katman biriktirildikten sonra robot kol bir tabaka kadar yukarıya kalkarak 60 saniye beklemekte ve tersi yönde diğer tabakayı biriktirmektedir.

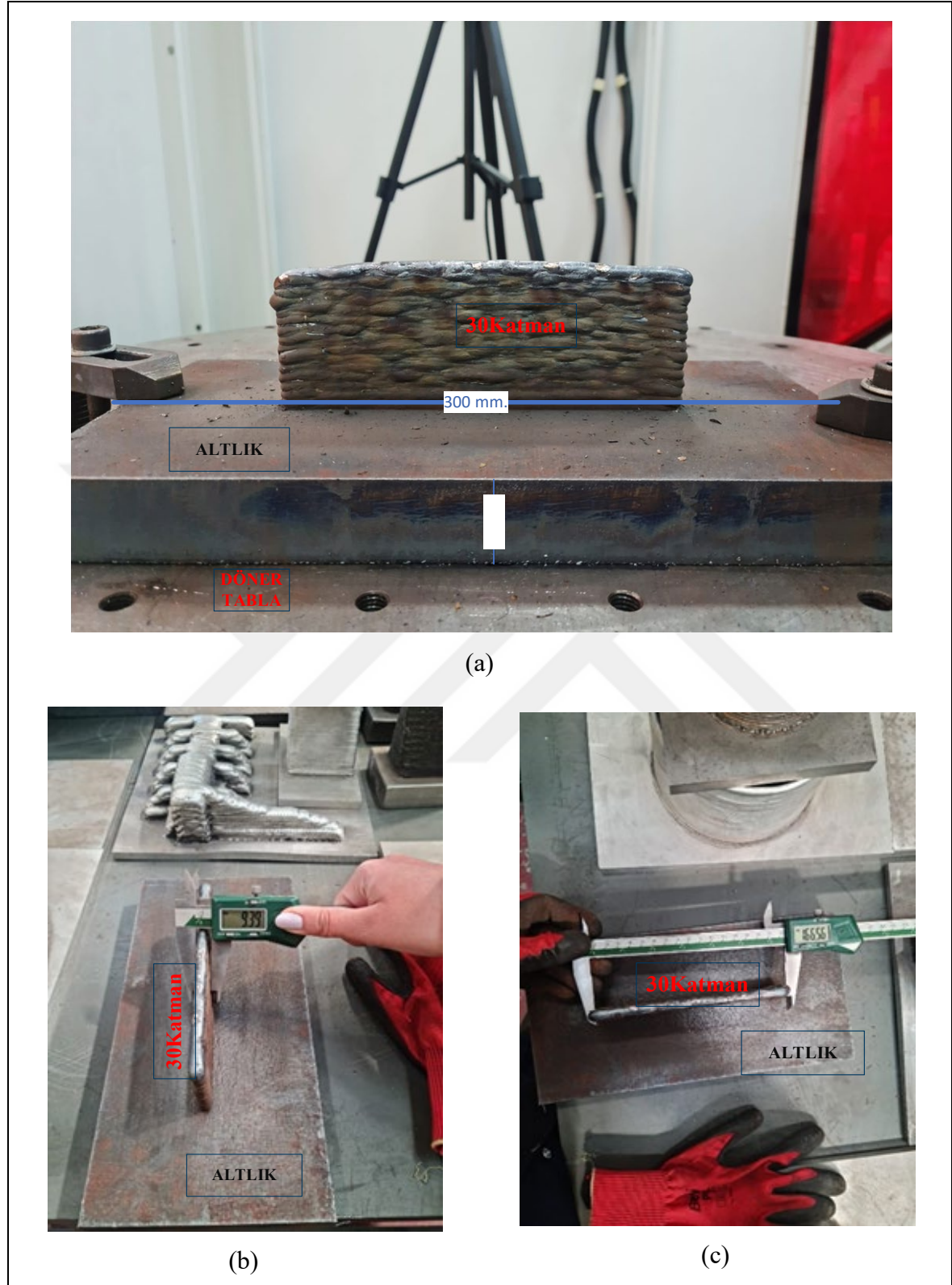


Şekil 3.1. Biriktirme metodu

Çizelge 3.2’de verilen parametrelere yapılan imalatlar neticesinde 4 farklı altlıkta 3 adet 1 katman dikiş, 3 adet 5 katman duvar, 3 adet 10 katman duvar ve 1 adet 30 katman duvar imalatı gerçekleştirilmiştir. Tüm üretimler, 300x200x30 mm ebadında altlıklar kullanılarak yapılmıştır. Resim 3.2 a, b ve c’de üretimlere ait konumlamalar görülmektedir. Her bir üretim parametresinde 3 altlık üzerine 9 biriktirme yapılmış olup konumlamalar ve tabaka boyları aynı tutulmuştur. 10 katman imalatlar ısı birikiminin fazla olacağı düşünülerek diğer katmanlardan uzağa konumlanmıştır.



Resim 3.2. 1,5 ve 10 katman imalata ait üretim resimleri



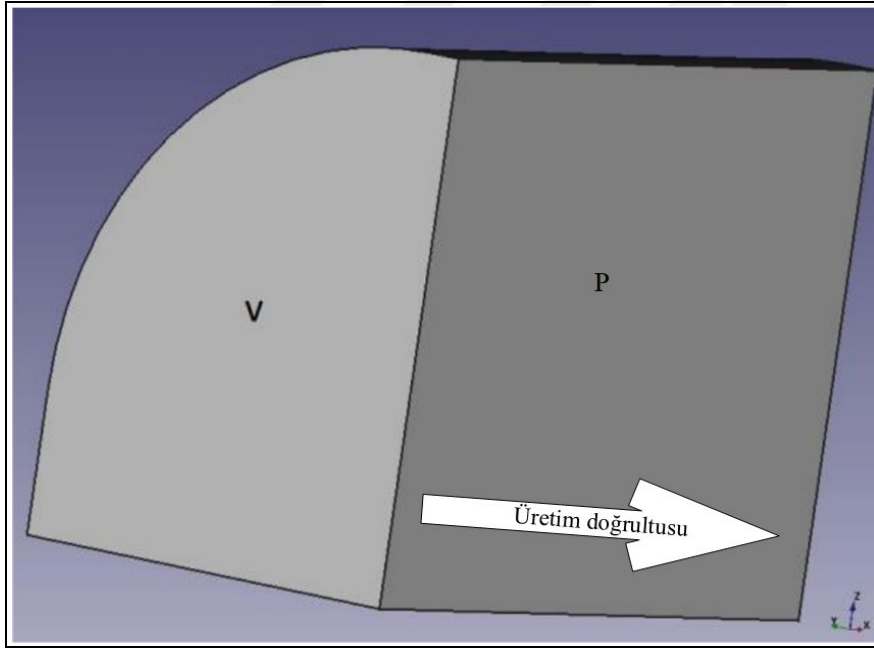
Resim 3.3. 30 katman imalata ait resimler

30 katman imalat ise Çizelge 3.2’de verilen parametreler kullanılarak Resim 3.3 (a-c)’de görüldüğü şekilde biriktirilmiştir. Bu biriktirme Resim 3.1’de konumu verilen ısı kamera

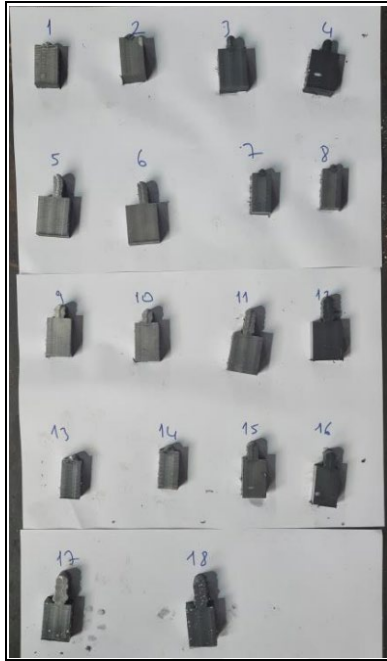
ile baştan sona izlenmiştir. Resim 3.3 a’da 30 katman halinde üretilen duvarın cepheden görünümü verilmiştir. Yine Resim 3.3 b ve c’de 30 katmana sahip duvarın üstten ve yandan görünüşü verilmiştir.

3.3. Optik Mikroskopisi

Optik mikroskopisi WAAM’da üretilen duvarların incelenmesinde sıklıkla kullanılan bir karakterizasyon metodudur. Optik mikroskopisinde karakterize edilen numunelerin dikkatli bir hazırlama süreci bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Leica marka optik mikroskop kullanılmıştır. Üretilen duvarlardan çıkartılan numuneler biriktirme yönüne dik ve biriktirme yönünde olacak şekilde çıkarılmıştır. Şekil 3.2’de görüleceği üzere biriktirme yönünü dik kesen eksenden alınan numuneler V kodu ile biriktirme yönünden çıkarılan numunelere ise P kodu ile etiketleme yapılmıştır.



Şekil 3.2. Optik mikroskop için numune çıkartma yöntemi



Resim 3.4. Çıkarılan numunelerin hazırlama aşamasında çekilen fotoğrafları

Çizelge 3.3. 1,5 ve 10 katman üretimlerden çıkarılan numunelere ait detaylar

Numune No	Kod	Katman Sayısı	Akım (A)	Voltaj (V)	TBH (mm/sn)	İH (mm/sn)	TBH/İH	Isı Girdisi (joule/mm)	Isı Girdisi	Kesme Yönüne Göre Biriktirme
1	LH1V	1	151	16,5	100	10	10	236,693	Düşük	Dik
2	LH1P	1	151	16,5	100	10	10	236,693	Düşük	Paralel
3	LH5V	5	151	16,5	100	10	10	236,693	Düşük	Dik
4	LH5P	5	151	16,5	100	10	10	236,693	Düşük	Paralel
5	LH10V	10	151	16,5	100	10	10	236,693	Düşük	Dik
6	LH10P	10	151	16,5	100	10	10	236,693	Düşük	Paralel
7	MH1V	1	209	17,1	150	10	15	339,521	Orta	Dik
8	MH1P	1	209	17,1	150	10	15	339,521	Orta	Paralel
9	MH5V	5	209	17,1	150	10	15	339,521	Orta	Dik
10	MH5P	5	209	17,1	150	10	15	339,521	Orta	Paralel
11	MH10V	10	209	17,1	150	10	15	339,521	Orta	Dik
12	MH10P	10	209	17,1	150	10	15	339,521	Orta	Paralel
13	HH1V	1	270	16,9	166,66	8,33	20	520,390	Yüksek	Dik
14	HH1P	1	270	16,9	166,66	8,33	20	520,390	Yüksek	Paralel
15	HH5V	5	270	16,9	166,66	8,33	20	520,390	Yüksek	Dik
16	HH5P	5	270	16,9	166,66	8,33	20	520,390	Yüksek	Paralel
17	HH10V	10	270	16,9	166,66	8,33	20	520,390	Yüksek	Dik
18	HH10P	10	270	16,9	166,66	8,33	20	520,390	Yüksek	Paralel

Çıkarılan ve hazırlanan numunelere ait tüm detaylar Çizelge 3.3’de görülebilir. Çizelge 3.3 görüleceği üzere çıkarılan tüm numuneler oluşturulan metoda göre kodlanmıştır. Bu usul hesaplanan ısı girdisine göre isimlendirilen ısı girdisinin düşük, orta ve yüksek olmasının, katman sayısının ve biriktirmeye göre kesme yönünün birer tane kod ile temsil edilmesi ile

oluşturulmuştur. Isı girdisinin düşük, orta ve yüksek olması literatürde tanımlanmış bir durum olmayıp ifade kolaylığı için seçilmiştir.

Çalışmamızda optik mikroskopisi çalışmaları 2 ana başlıkta toplanmaktadır.

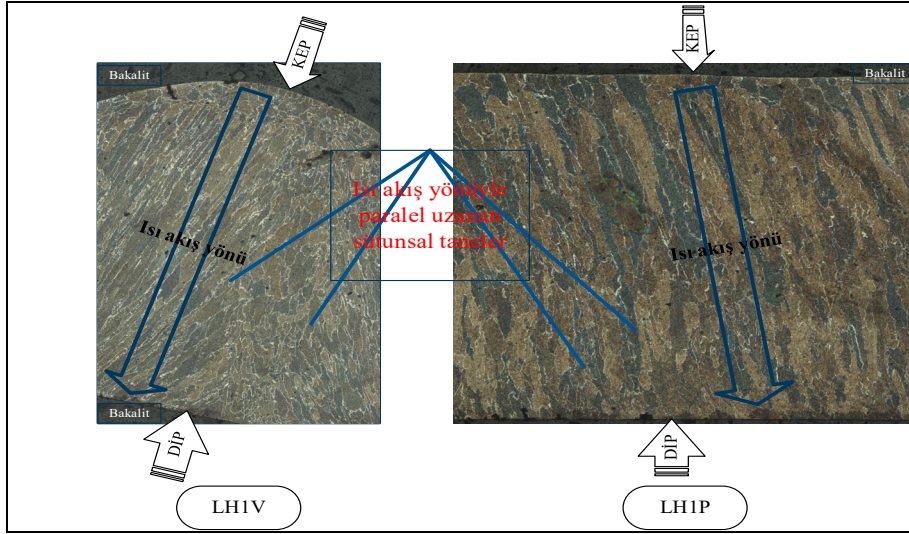
1. 1,5 ve 10 katmanlı imalatların anılan optik mikroskobun “stitch” özelliği kullanılarak elde edilen mikrofotografların dipten kepe kadar bir doğrultuda birleştirilmesiyle gelişimin izlenmesidir. Bunun nedeni ise üretimi yapılan duvarın mikroyapı oluşumun gelişimini görebilmektir. Özellikle yapılan deney kurgusu doğrultusunda 1,5 ve 10 katman ayrı ayrı incelenerek katman sayısı arttıkça gelişimin nasıl olduğunun incelenmesi amaçlanmıştır.
2. 10 katman imatların dikine kesitlerinde “Grain Expert” modülü ile ortalama tane boyutu ve en-boy oranı ölçümlerinin yapılmasıdır.

Numunelerin hazırlanması Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği metalografi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Metalografide Çizelge 2.1’de optik mikroskopisinde numune hazırlama standartları takip edilmiştir.



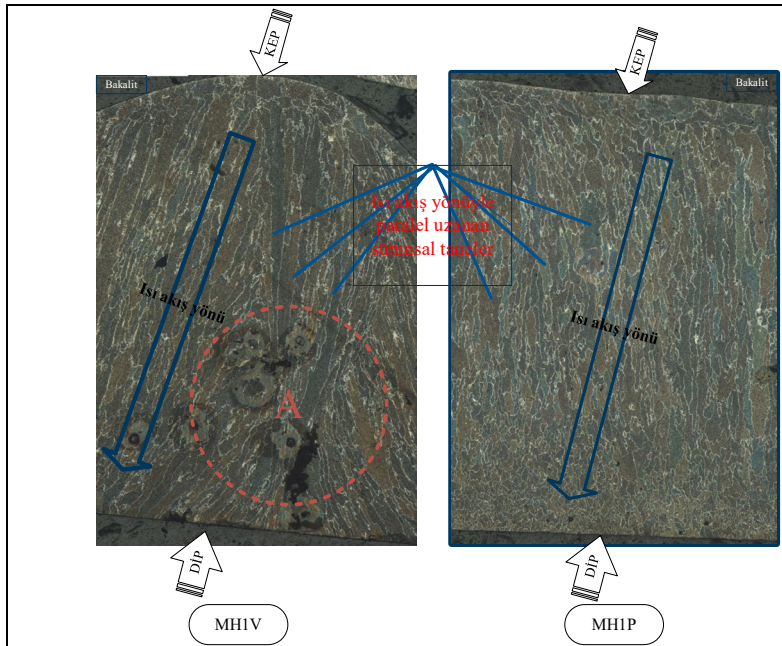
Resim 3.5. Bakalite alınmış numunelere ait görseller

Metalografi kapsamında numuneler çıkarıldıktan sonra sırasıyla kaba zımparalama, ince zımparalama ve parlatma yapılmıştır. Parlatmadan sonra nital çözeltisinde dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Neticede Resim 3.5’de görülen 6 kalıpta 18 numune bakalite alınmıştır.



Resim 3.6. LH1V ve LH1P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotograflar

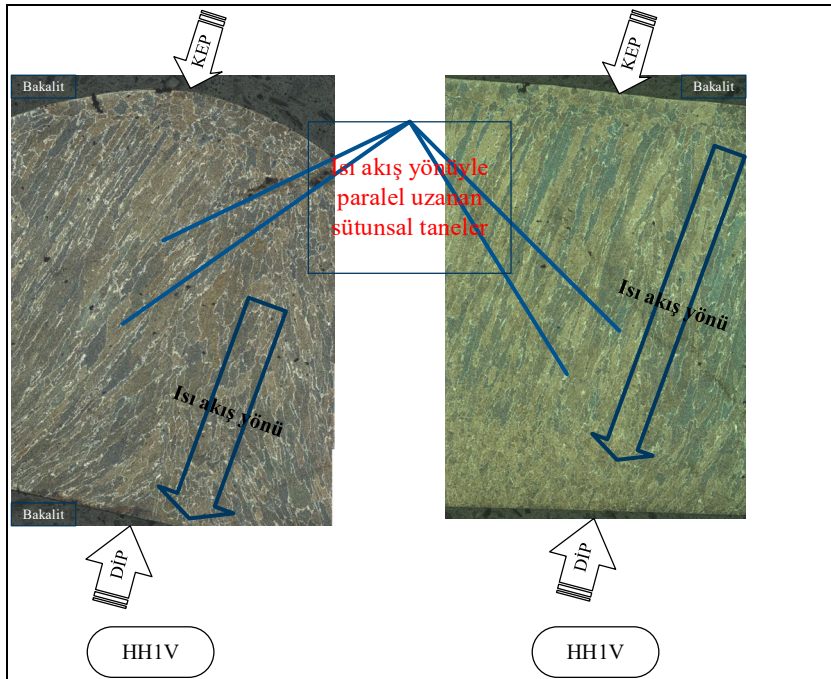
Resim 3.6’da tek katman biriktirme ile elde edilmiş biriktirme yönüne dik LH1V kodlu numuneden optik mikroskop ile alınan görüntülerin birleştirilmesiyle oluşturulan fotoğraf görülmektedir. LH1P ise Şekil 3.2’deki şekilde görüleceği üzere görüntüsü alınan alanın bitişik alanından çıkarılan numunenin fotoğrafı görünmektedir. Şekil 2.3’ ve Şekil 2.4’de aktarılan ısı transfer yönü Resim 3.6’da gösterilmiş olup tanelerin oluşum yönü ile ısı akış yönünün paralel olduğu ve tanelerin sütunsal tane formunda oluştuğu bu resimde net görülebilmektedir.



Resim 3.7. MH1V ve MH1P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotograflar

Resim 3.7’de tek katman biriktirme ile elde edilmiş biriktirme yönüne dik MH1V kodlu numuneden optik mikroskop ile alınan görüntülerin birleştirilmesiyle oluşturulan fotoğraf görülmektedir. MH1P’de ise Şekil 3.2’deki şekilde görüleceği üzere görüntüsü alınan alanın bitişik alanından çıkarılan numunenin fotoğrafı görülmektedir. MH1V kodlu fotoğrafta gösterilen A bölgesinde bulunan kusurların metalografik hazırlama sürecinde dağlamadan önce suyun uzaklaştırılamaması ve zımparalamada bakalitin kaldırılamaması sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir. Resim 3.6 için yapılan yoruma paralel olarak ısı girdisi arttığında da tek katman için tanelerin oluşum yönü ile ısı akış yönünün örtüştüğü ve tanelerin sütunsal tane formunda oluştuğu değerlendirilmektedir.

Çalışmamız kapsamında birleştirilmiş mikroyapı fotoğraflarının gösterimi bu şekilde devam ettirilecektir. Birleştirme işleminde tekil mikrofotografılar üzerinde herhangi bir ölçekleme, yazı veya işaret kabul edilmediğinden dolayı ölçek bu aşamada kullanılmamıştır. 1,5 ve 10 katman biriktirmede bu aşamada sadece tanelerin oluşumu gözlenecektir ve tanelerin üzerindeki ölçeklemeler, ortalama tane boyutu ölçümleri vb. ölçümler hemen sonrasında gerçekleştirilecektir. Birleştirilmiş mikroyapı fotoğraf sunumundan sonra ortalama tane boyutu için kullanılan 10 katman numunelerde birleştirilmiş mikroyapı fotoğrafları ölçekli olarak sunulacaktır.



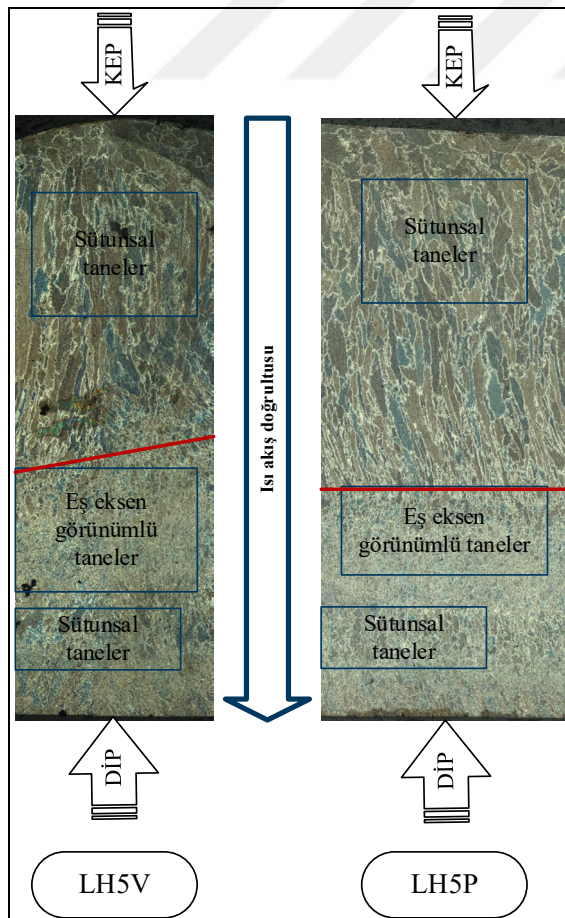
Resim 3.8. HH1V ve HH1P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotografılar

Resim 3.8’de tek katman biriktirme ile elde edilmiş biriktirme yönüne dik HH1V kodlu numuneden optik mikroskop ile alınan görüntülerin birleştirilmesiyle oluşturulan fotoğraf görülmektedir. HH1P’de ise Şekil 3.2’deki şekilde görüleceği üzere görüntüsü alınan alanın bitişik alanından çıkarılan numunenin fotoğrafı görülmektedir. Deney kurgusuna göre en yüksek ısı girdisine sahip H kodlu numunelerin birleştirilmiş fotoğraflarında da düşük ve orta seviye ısı girdisindeki gibi tek katman için tanelerin oluşum yönü ile ısı akış yönünün örtüştüğü ve tanelerin tek katman özelinde sütunsal tane formunda oluştuğu görülmüştür.

Resim 3.6, Resim 3.7, Resim 3.8’de gösterilen birleştirilmiş fotoğrafları oluşturmak için kullanılan mikrofotoğraf sayısı Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. 1 katman imalatlardan alınan mikrofotoğraf sayıları

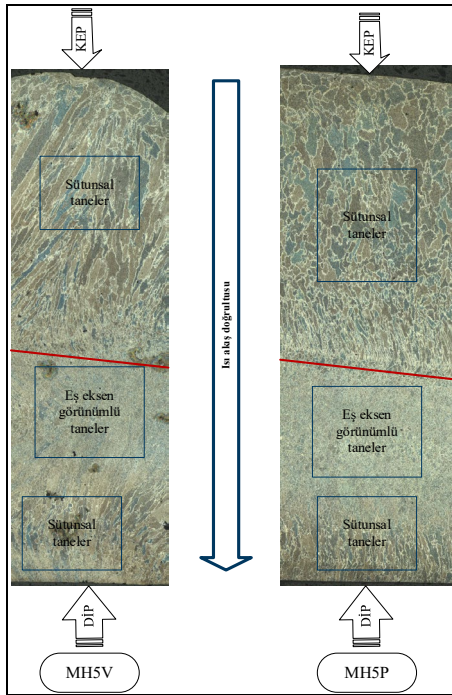
Kod	LH1V	LH1P	MH1V	MH1P	HH1V	HH1P
Adet	15	12	18	21	18	21



Resim 3.9. LH5V ve LH5P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotoğraflar

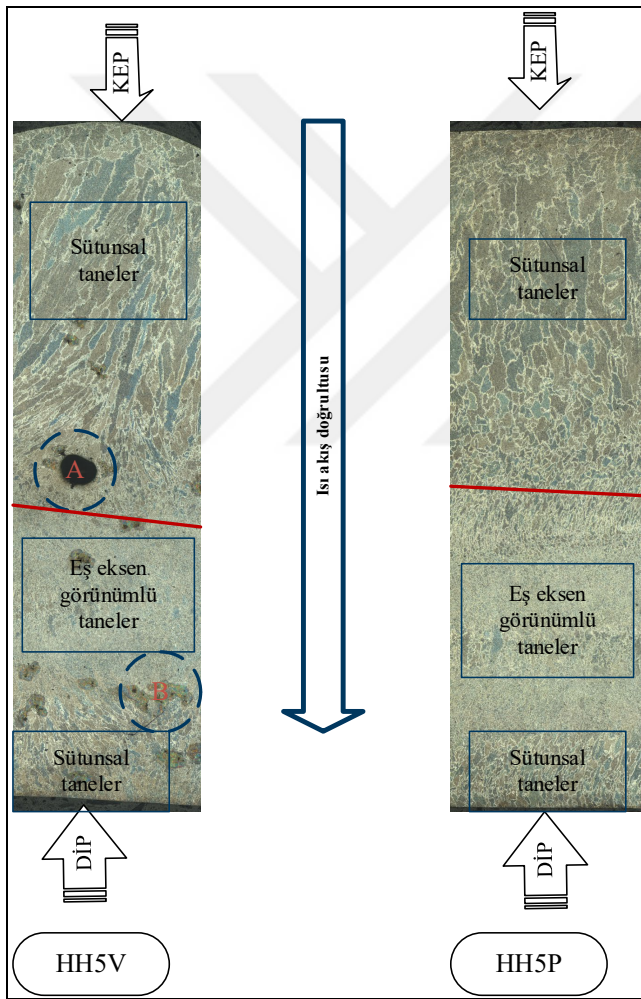
Resim 3.9’da 5 katman biriktirme ile elde edilmiş biriktirme yönüne dik LH5V kodlu numuneden optik mikroskop ile alınan görüntülerin birleştirilmesiyle oluşturulan fotoğraf görülmektedir. LH5P’de ise Şekil 3.2’deki şekilde görüleceği üzere görüntüsü alınan alanın bitişik alanından çıkarılan numunenin fotoğrafı görülmektedir. Düşük ısı girdisinde 5 katman imalatıta üst tarafta sütunsal tanelerin varlığı görülmektedir. Alt kısımda ise eş eksenli olduğu düşünülen taneler görülmektedir ve resimde kırmızı çizgi sütunsal ile eş eksenli tanelerin sınırını belirlemek için çekilmiştir. Bu imalatların altlık hizasından kesildiği unutulmamalıdır.

Resim 3.10’da 5 katman biriktirme ile elde edilmiş biriktirme yönüne dik MH5V kodlu numuneden optik mikroskop ile alınan görüntülerin birleştirilmesiyle oluşturulan fotoğraf görülmektedir. MH5P’de ise Şekil 3.2’deki şekilde görüleceği üzere görüntüsü alınan alanın bitişik alanından çıkarılan numunenin fotoğrafı görülmektedir. Orta ısı girdisinde üst tarafta sütunsal tane oluşumu görülmektedir. Isının akış yönüne doğru sütunsal tanelerin oluşumu tek katman imalatlarda gösterilmişti ve 5 katman imalatıta da bu durumun varlığını koruduğu değerlendirilmiştir. Orta bölgede düşük ısı girdisindeki gibi eş eksenli olarak yorumlanabilecek ama taneler üzerinde ölçüm ile karar verilmesi gereken bir oluşum bulunmaktadır.



Resim 3.10. MH5V ve MH5P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotografılar

Resim 3.11’de 5 katman biriktirme ile elde edilmiş biriktirme yönüne dik HH5V kodlu numuneden optik mikroskop ile alınan görüntülerin birleştirilmesiyle oluşturulan fotoğraf görülmektedir. HH5P’de ise Şekil 3.2’deki şekilde görüleceği üzere görüntüsü alınan alanın bitişik alanından çıkarılan numunenin fotoğrafı görünmektedir. Yüksek ısı girdisinde 5 katman şeklinde oluşturulan duvarlardan alınan birleştirilmiş mikrofotograflar orta ve düşük ısı girdisindeki duruma benzer yorumlar yapmamıza olanak tanımaktadır. Bu durumda 5 katman için ısı girdisi değişse de tane oluşumlarının birbirini tekrar ettiği, aynı bölgelerin oluşma eğiliminde olduğu yorumu yapılabilmektedir.



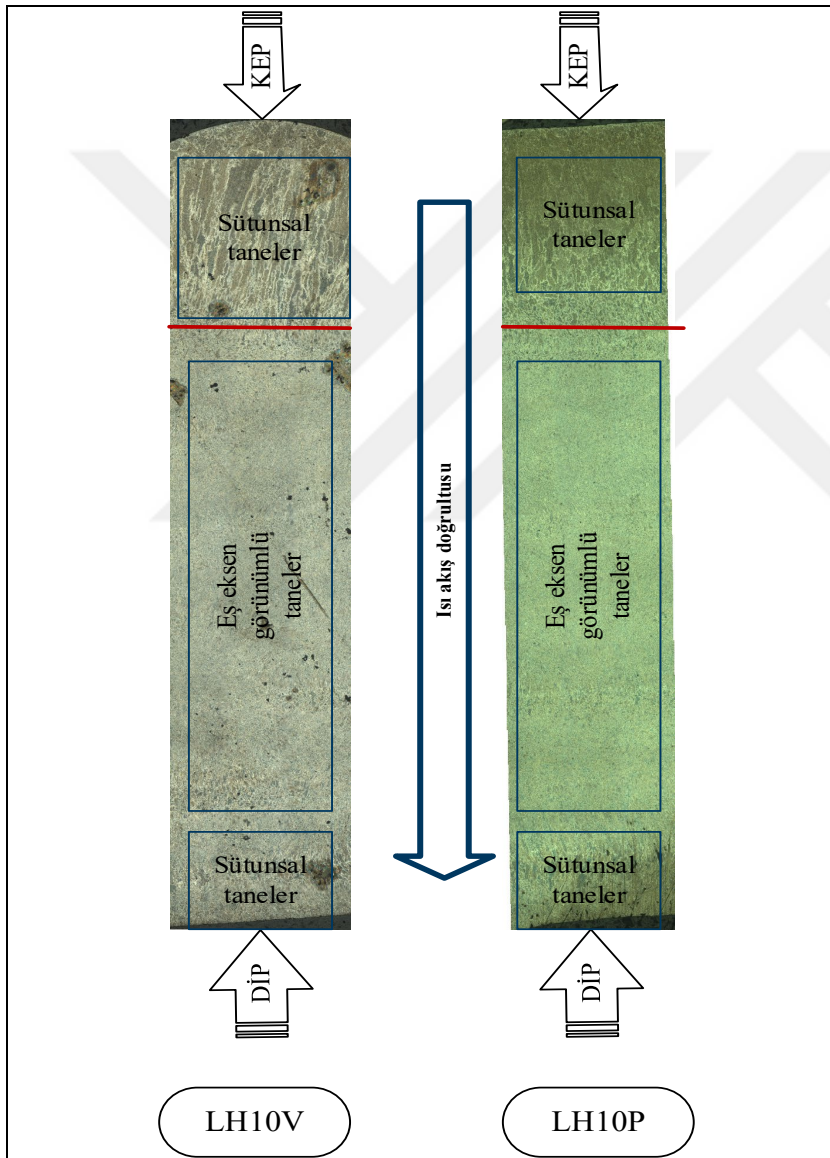
Resim 3.11. HH5V ve HH5P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotograflar

HH5V kodlu fotoğrafta gösterilen A ve B bölgesinde bulunan kusurların metalografik hazırlama sürecinde dağlamadan önce suyun uzaklaştırılamaması ve zımparalamada bakalitin kaldırılamaması sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir.

Resim 3.9, Resim 3.10, Resim 3.11’de gösterilen birleştirilmiş fotoğrafları oluşturmak için kullanılan mikrofotoğraf sayısı Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. 5 katman imalatlardan alınan mikrofotoğraf sayıları

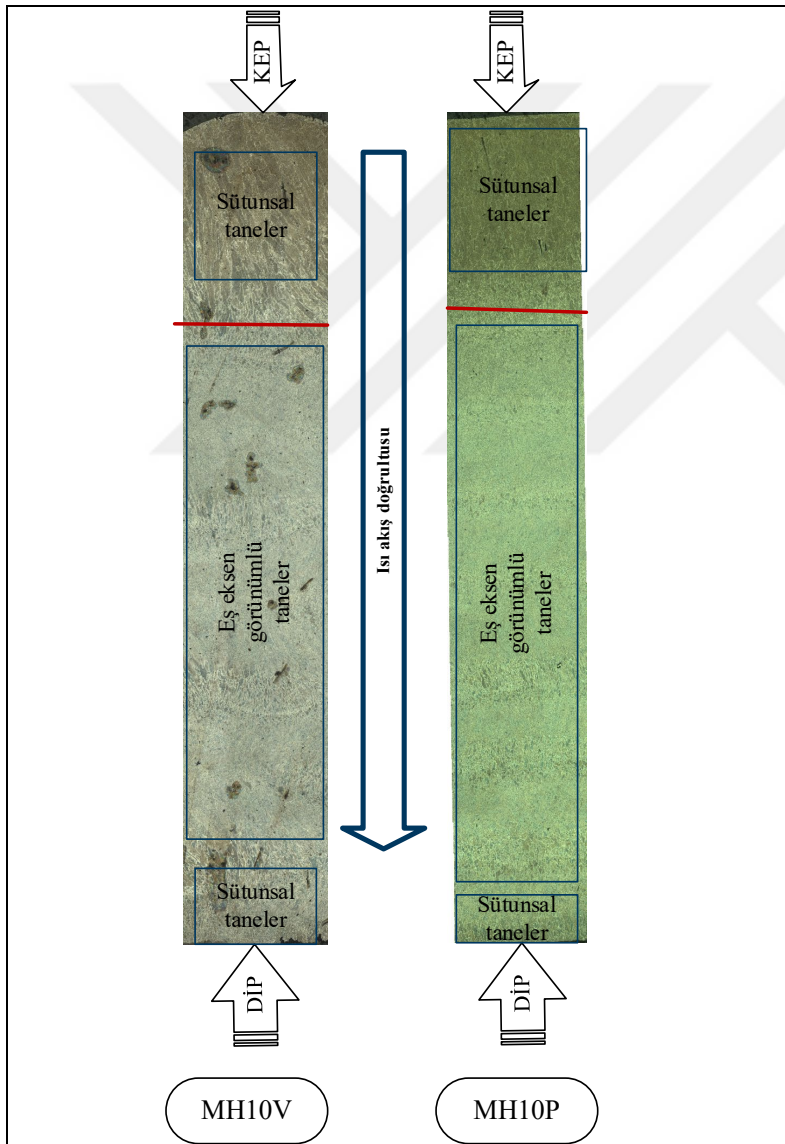
Kod	LH5V	LH5P	MH5V	MH5P	HH5V	HH5P
Adet	27	33	36	42	51	48



Resim 3.12. LH10V ve LH10P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotoğraflar

Resim 3.12’de 10 katman biriktirme ile elde edilmiş biriktirme yönüne dik LH10V kodlu numuneden optik mikroskop ile alınan görüntülerin birleştirilmesiyle oluşturulan fotoğraf görülmektedir. LH10P’de ise Şekil 3.2’deki şekilde görüleceği üzere görüntüsü alınan alanın

bitişik alanından çıkarılan numunenin fotoğrafı görünmektedir. Düşük ısı girdisinde üretilen 10 katman imalattan alınan birleştirilmiş mikrofotograf görüntüsünde 5 katmanda tüm ısı girdilerinde tanımlanan alanlar aynen tanımlanmıştır. En üstte belirli bir alanda sütunsal taneler, ortada genişçe bir alanda eş eksenli olduğu düşünülen alan ve altta çok dar bir alanda yine sütunsal taneler görülmektedir. 5 katmadan farklı olarak 10 katmanda eş eksenli olduğu değerlendirilen alanın genişlediği görülmektedir. 10 katman biriktirme ile elde edilmiş birleştirilmiş mikrofotograf lar ileriki bölümlerde ölçekli olarak yorumlanmıştır. Isı akış doğrultusu ile ısı akışını baz alarak işaretlenmiştir.



Resim 3.13. MH10V ve MH10P kodlu numunelere ait birleştirilmiş mikrofotograf lar

Resim 3.13’de 10 katman biriktirme ile elde edilmiş biriktirme yönüne dik MH10V kodlu numuneden optik mikroskop ile alınan görüntülerin birleştirilmesiyle oluşturulan fotoğraf

görülmektedir. HH10P’de ise Şekil 3.2’deki şekilde görüleceği üzere görüntüsü alınan alanın bitişik alanından çıkarılan numunenin fotoğrafı görünmektedir. Yüksek ısı girdisinde üretilen 10 katman numunelerden alınan mikrofotografaların birleştirilmesi ile oluşan birleştirilmiş mikrofotograf görüntüsünde de aynı durum ortaya çıkmıştır. Tek katman haricinde 5 ve 10 katmanda ortaya çıkan durum çalışmamızda katman sayısı arttıkça yapıyı 3 ana bölgeye ayırabileceğimizi ve bu üç alan özelinde çalışmaların ilerletilmesinin gerekli olduğu değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.6. 10 katman imalatlardan alınan mikrofotograf sayıları

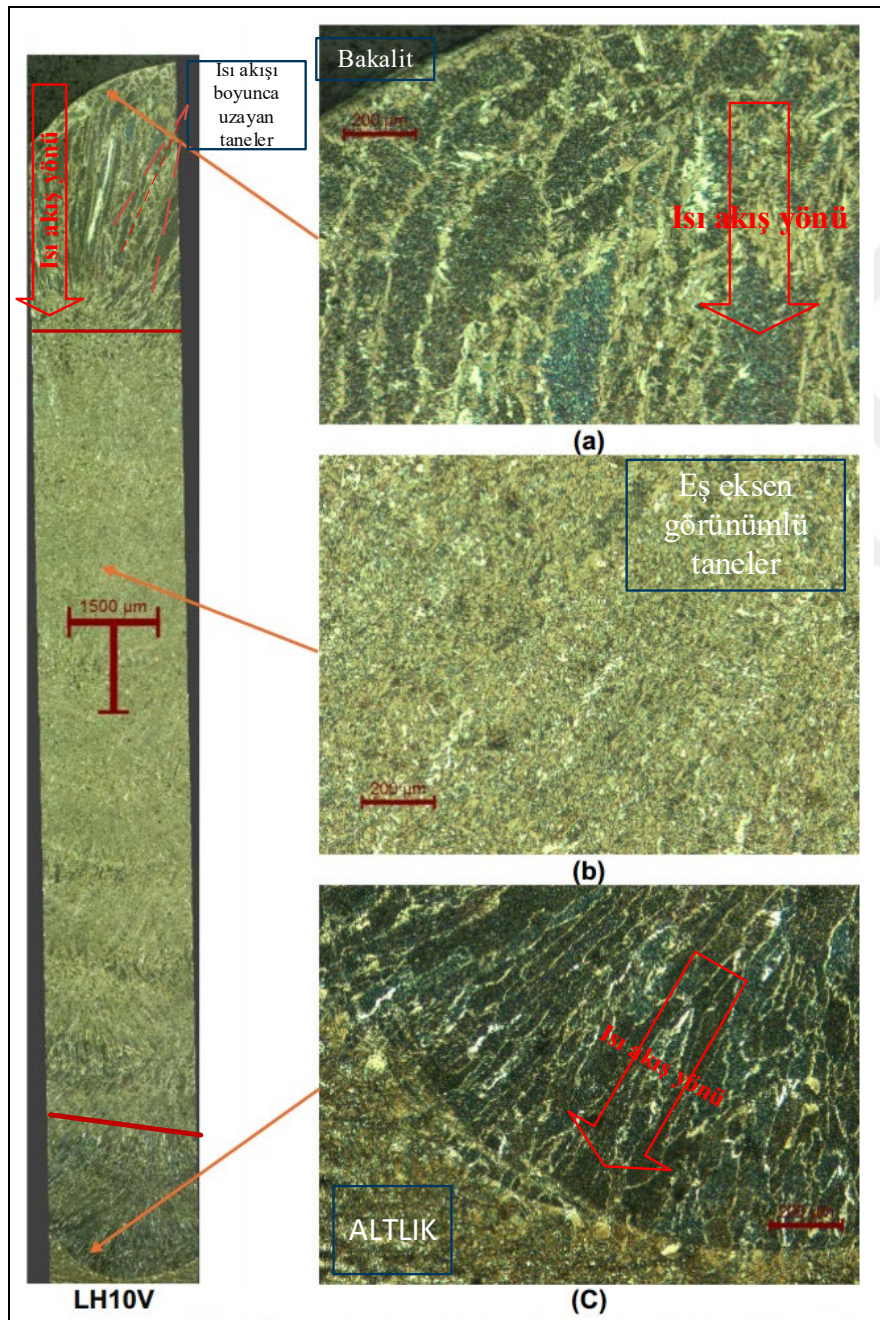
Kod	LH10V	LH10P	MH10V	MH10P	HH10V	HH10P
Adet	84	69	96	78	70	90

Resim 3.12, Resim 3.13 ve Resim 3.14’de gösterilen birleştirilmiş fotoğrafları oluşturmak için kullanılan mikrofotograf sayısı Çizelge 3.6’de verilmiştir.

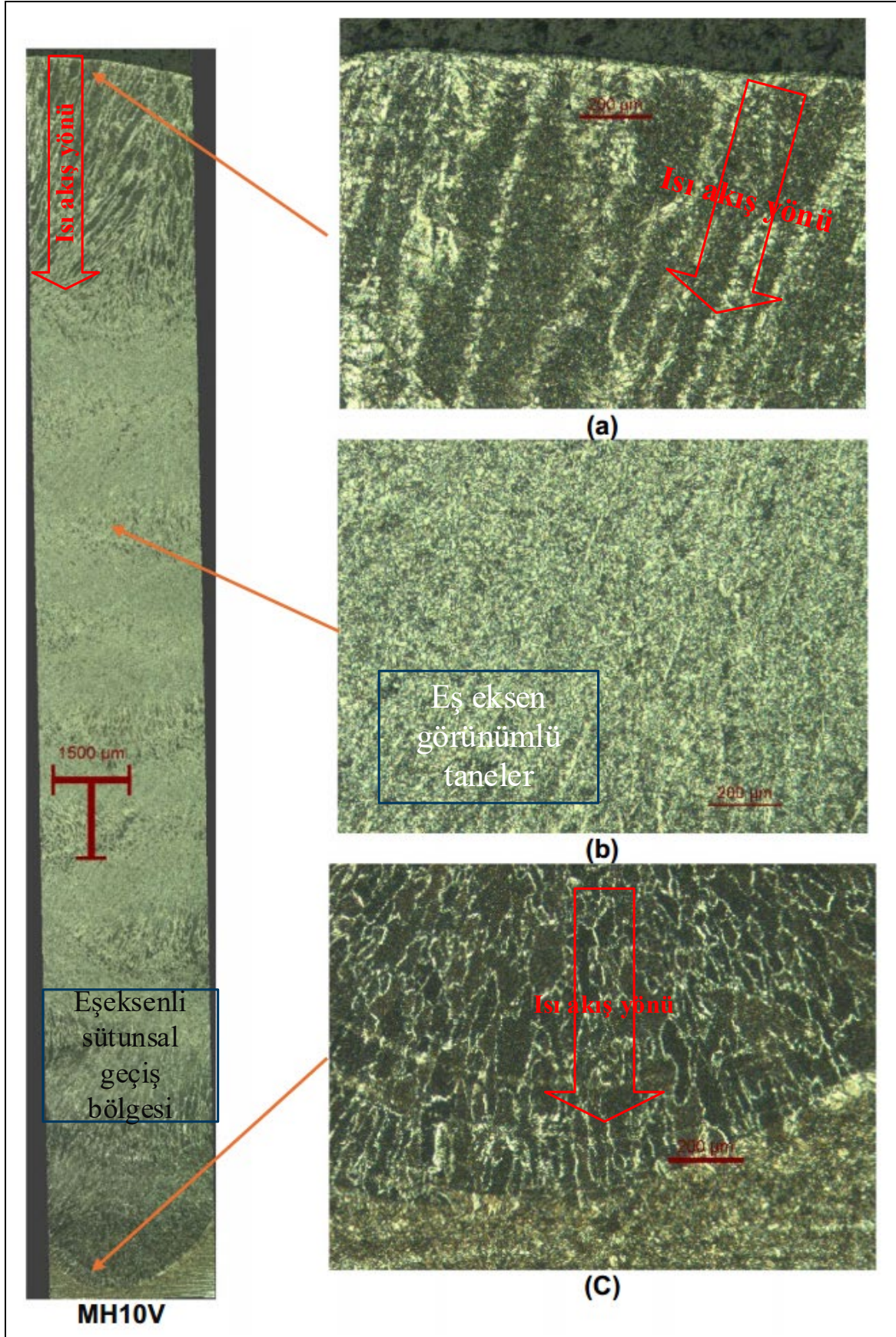
Resim 3.6 ile Resim 3.14 arasında verilen tüm birleştirilmiş fotoğraflar Çizelge 3.4, Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6’da belirtilen sayılarda mikrofotografaların birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Tüm metalografik süreçler Çizelge 2.1’de atfı yapılan ASTM standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. ASTM E3 – 11, ASTM E407 – 07, ASTM E7 – 17 standartlarına göre kesilen, bakalite alınan, kaba ve ince zımparalamadan geçirilen ve parlatılan yüzeyler yine standartta belirtilen dağlama sürelerinde dağlanmıştır. Özellikle kaba ve ince zımparalama ile parlatmanın insan faktörünün ortadan kaldırmak üzere otomatik makinada yapıldığı göz önünde bulundurularak yeterli oranda yapılmadığı verilen mikroyapı fotoğraflarından bazılarında bulunan bakalit kalıntılarından görülebilmektedir. Yüzeylerin kullanıcı tercihiye göre yeniden hazırlanması gerektiği kanaatinden dolayı 10 katman imalata sahip LH10V, MH10V ve HH10V kodlu numuneler kesme dahil olmak üzere tüm metalografik süreçlerden tekrar geçirilmiştir. Metalografik süreçler ASTM standartlarında belirtilen süreler en az olacak şekilde seçilmiş ve yüzey belirli aşamalarda tekrar ve tekrar kontrol edilerek ilerlenmiştir. Bu durumun yan faydası olarak daha sonra anlatılacak olan elektron mikroskopisi incelemelerinde kolaylık sağlanması da amaçlanmıştır.

Mikrofotograf birleştirme işlemi “stitch” özelliğinin bir kısıtlaması olarak üzerinde herhangi bir işaretleme olmaksızın mikrofotografaların birleştirmesini gerektirdiğinden ölçekleme işlemleri kapsamında 10 katman numunelerin mikrofotografaları ikincil bir işleme alınmıştır.

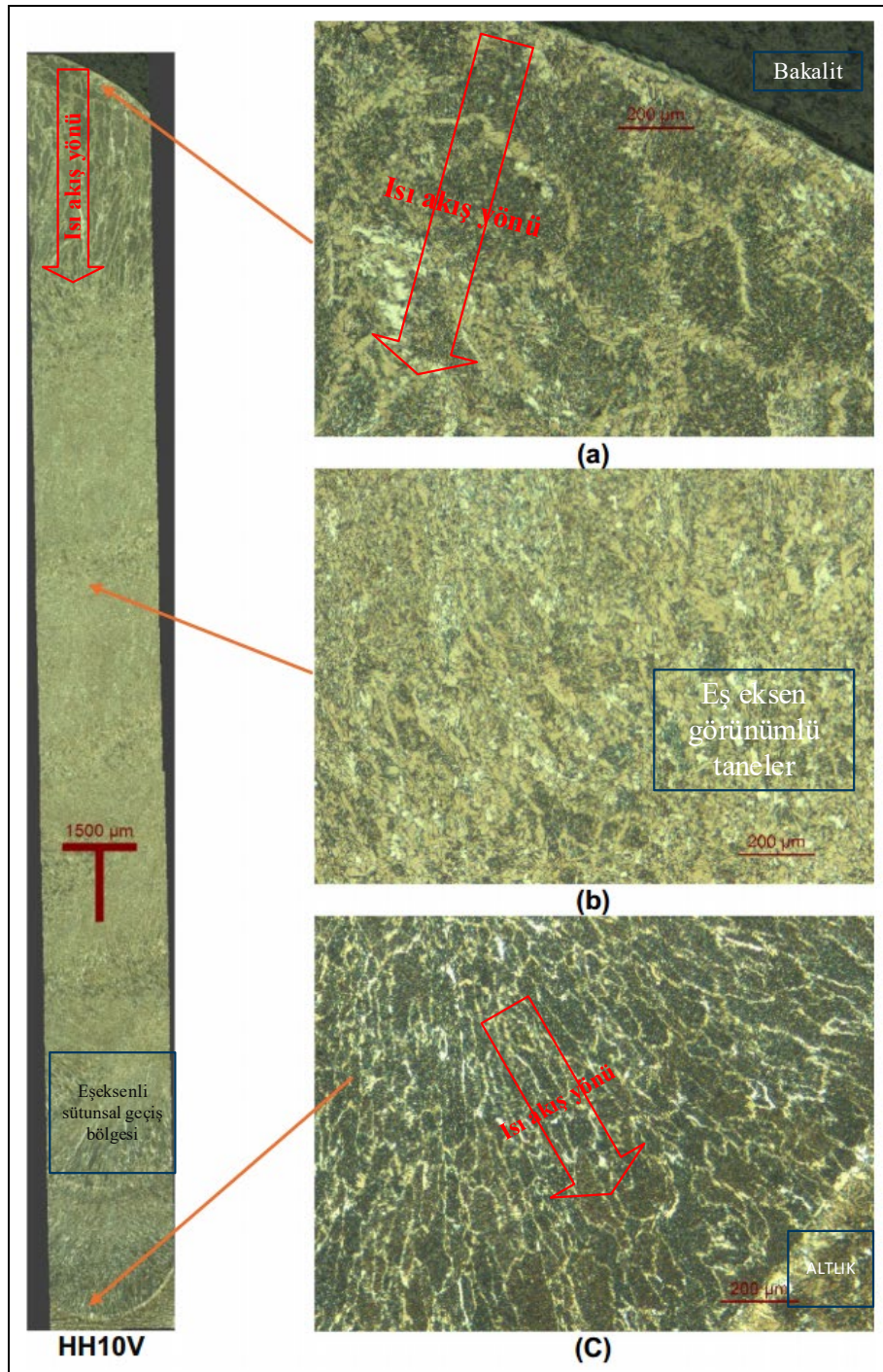
Bu işlemler bazı bölgelerin tekil mikrofotograflarının da ölçeklenmesi biçiminde Resim 3.15, Resim 3.16, Resim 3.17’de gösterilmiştir. Bu gösterimlerde her 3 ısı girdisinde tanımlanabilecek alanlar Resim 3.12-14’de detaylı aktarıldığından her bir alana ait ölçekli tekil mikrofotograflar Resim 3.15-17 a, b ve c’de verilmiştir. Tekil mikrofotografların detaylı izahından önce 10 katman imalatlarda bu alanları tanımlamak için verilen birleştirilmiş mikrofotograflar ve detayları birleştirilmiş mikrofotograflardan sonra verilmiştir.



Resim 3.15. LH10V kodlu numuneden alınan birleştirilmiş mikrofotografin detay gösterimi



Resim 3.16. MH10V kodlu numuneden alınan birleştirilmiş mikrofotografın detay gösterimi



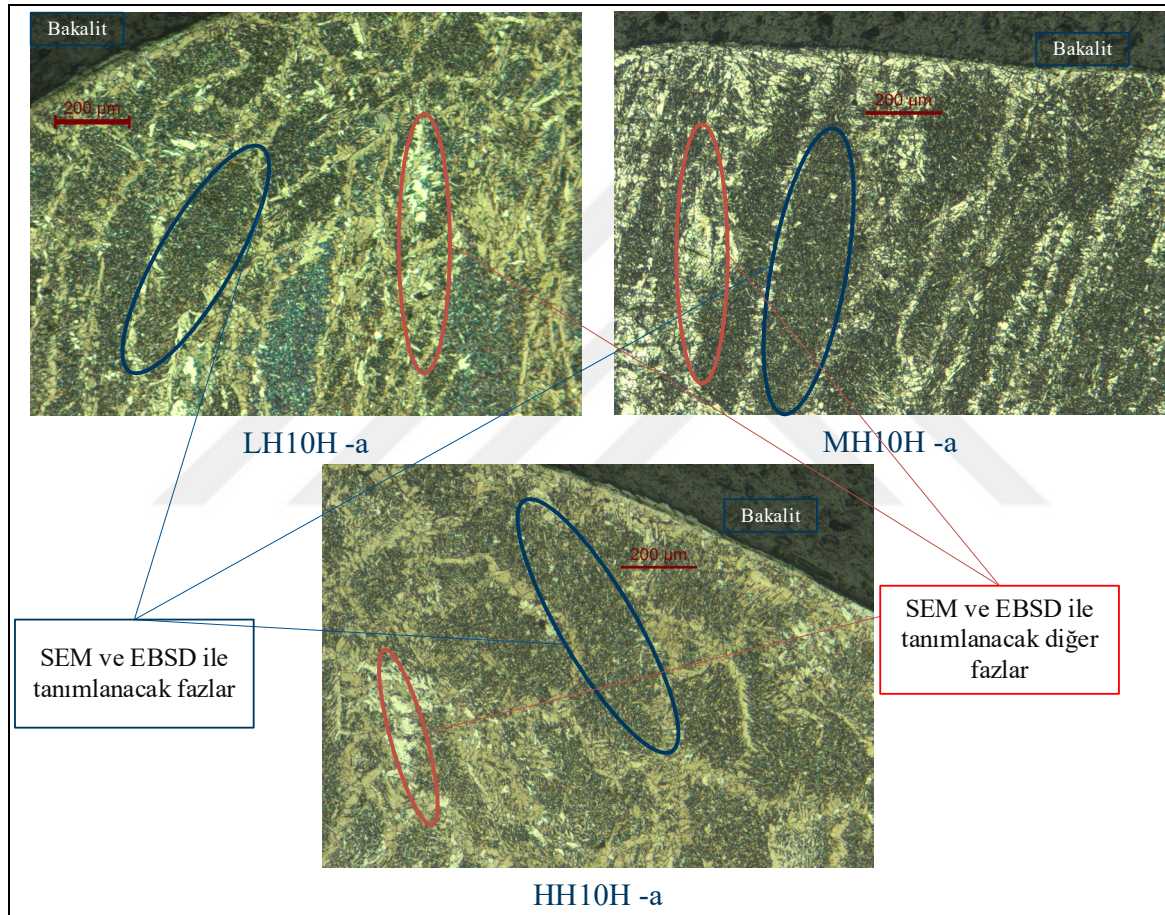
Resim 3.17. HH10V kodlu numuneden alınan birleştirilmiş mikrofotografın detay gösterimi

Çizelge 3.7. LH10V, MH10V ve HH10V kodlu yeniden hazırlanmış numunelerden alınan mikrofotograf sayıları

Kod	LH10V	MH10V	HH10V
Adet	84	96	73

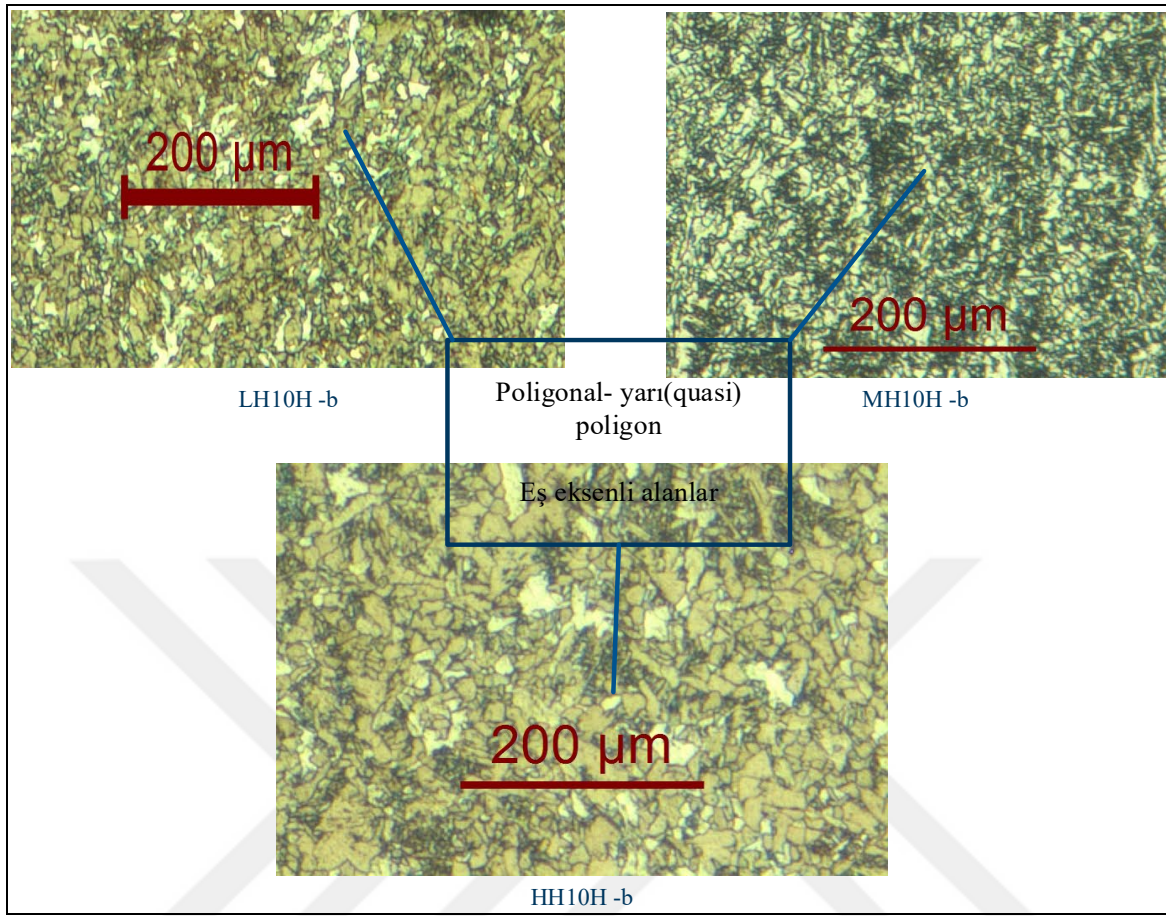
10 katman biriktirme yönüne dik kesit alınarak elde edilen numunelerden birleştirilmiş mikrofotoğraflarda kullanılan tekil mikrofotoğraf sayıları Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Resim 3.15, Resim 3.16 ve Resim 3.17’de birleştirilmiş (stitched) mikrofotoğraflarda oklarla gösterilen a,b ve c alanlarının tekil mikrofotoğrafları da ölçekli olarak yanlarında gösterilmiştir. Bu 3 resimde (a) olarak tanımlanan resimler kep tarafını göstermektedir. (a) bölgelerine ait detay görünüm Resim 3.18’de gösterilmiştir.



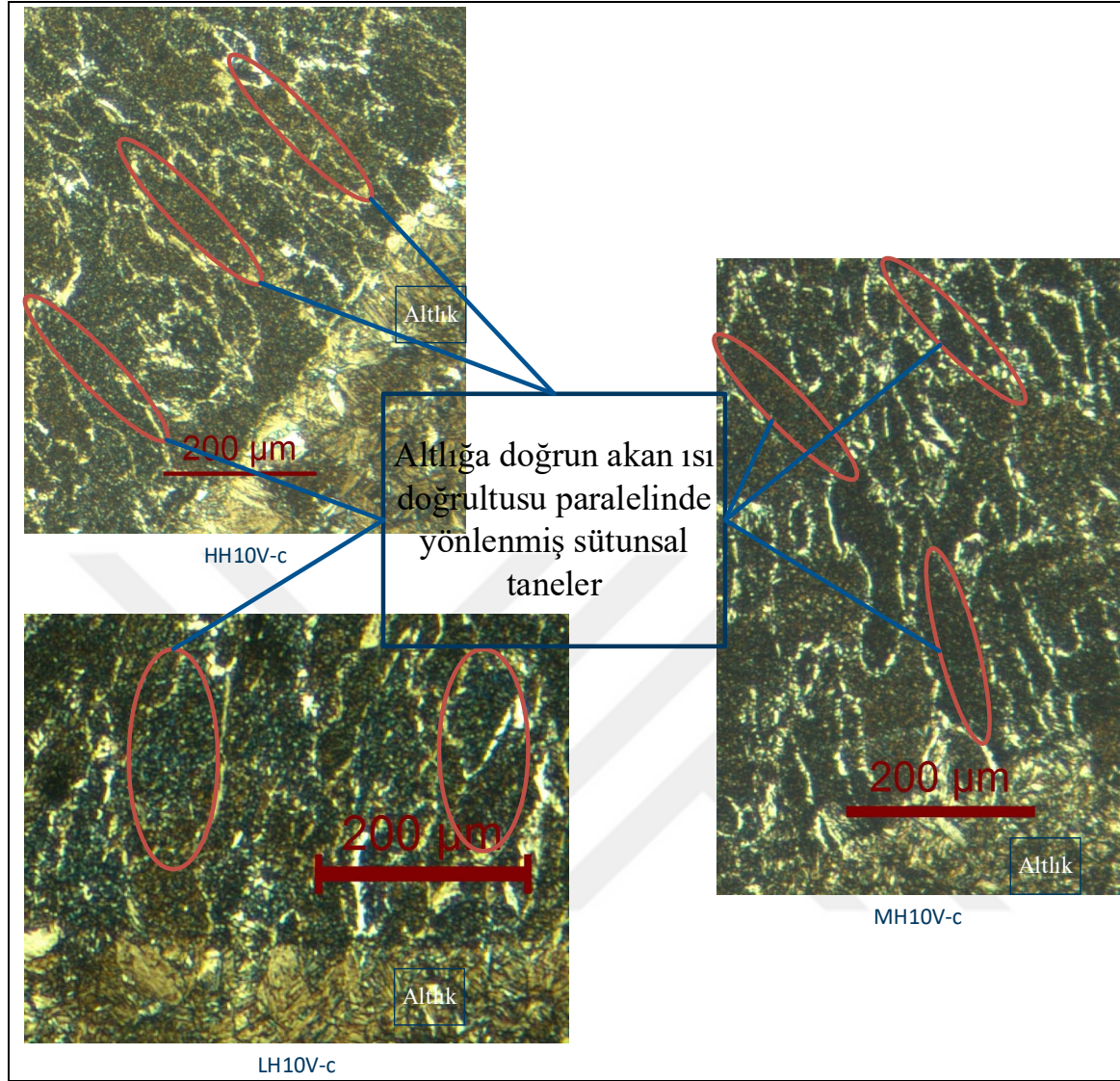
Resim 3.18. LH10H-a, MH10H-a ve HH10H- a mikrofotoğraflarının detay görünümü

Her bir biriktirme için en üst bölgeden alınmış mikrofotoğraflarda mavi alanların ve kırmızı alanların görünüm olarak birbirine benzer görünümde olduğundan dolayı bu elips şekillerle işaretlenen alanları tanımlamak için ileri karakterizasyon metotları kullanılması düşünülmüştür.



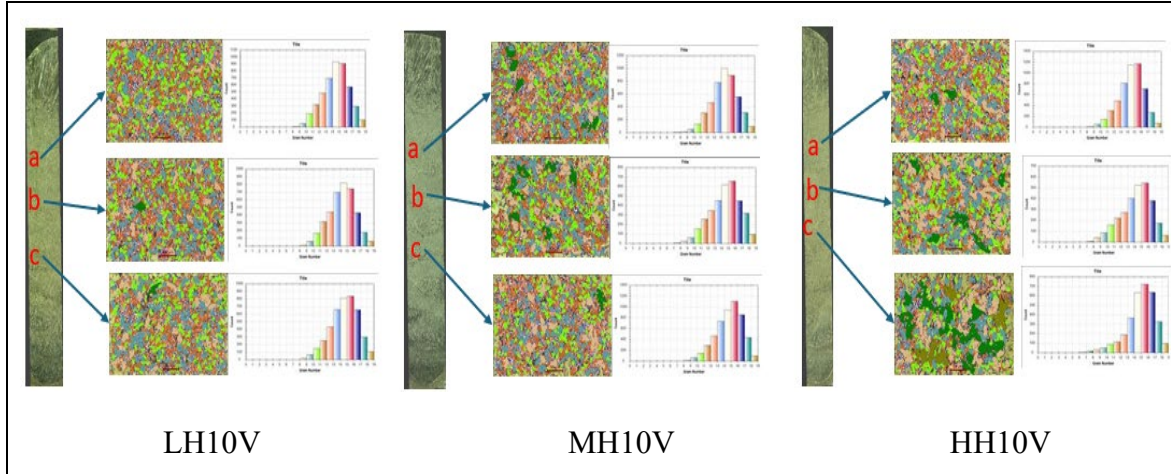
Resim 3.19. LH10H-b, MH10H-b ve HH10H- b mikrofotografalarının detay görünümü

Resim 3.15-17’de verilen 10 katman biriktirmeye ait birleştirilmiş mikrofotograf görünümünde (b) ile gösterilen alanların detay mikrofotografaları Resim 3.19’da görülmektedir. Buna göre her 3 ısı girdisinde yapıda poligonal veya yarı (quasi) poligonal mikroyapıların oluştuğu görülmektedir. Aynı şekilde Resim 3.15-17’de verilen 10 katman biriktirmeye ait birleştirilmiş mikrofotograf görünümünde (c) ile gösterilen alanların detay mikrofotografaları Resim 3.20’de görülebilmektedir. Resim 3.20’de altlığa doğru akan ısıdan dolayı yönelen sütunsal taneler görülmekle birlikte sütunsal tanelerden başka oluşan fazlar ve bu fazların masif görünümünün TTT diyagramları üzerinden tanımlanması için ilave çalışmaların ilerleyen bölümlerde gerçekleştirilmesi planlanmıştır.



Resim 3.20. LH10H-c, MH10H-c ve HH10H- c mikrofotoğraflarının detay görünümü

Mikrofotoğraf çalışmalarından başka optik mikroskopisi kapsamında 10 katman imalatların ortalama tane boyutu ve en-boy oranı ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler 10 katman imalatların orta noktalarından alınmıştır. Dip ve kep kısmında Resim 3.15, Resim 3.16 ve Resim 3.17’de birleştirilmiş (stitched) mikrofotoğraflarda görüleceği üzere sütunsal yapı veya masif yapı oluştuğu değerlendirildiğinden bu ölçümler sadece poligonal veya yarı poligonal görünümde olan (eş eksenli olduğu öngörülen) bölgelerin varlığıdır. Leica optik mikroskopunda bulunan “Grain Expert” modülünde gerçekleştirilen ölçümler ölçüm yapılan noktadaki ortalama tane boyutunu, en-boy oranının tespiti için yapılmıştır. Deney sonuçları tartışma kısmında detaylı irdelenecektir. Ayrıca ileri karakterizasyon teknikleri ile diğer alanlarda ölçüm yapılması değerlendirilecektir.

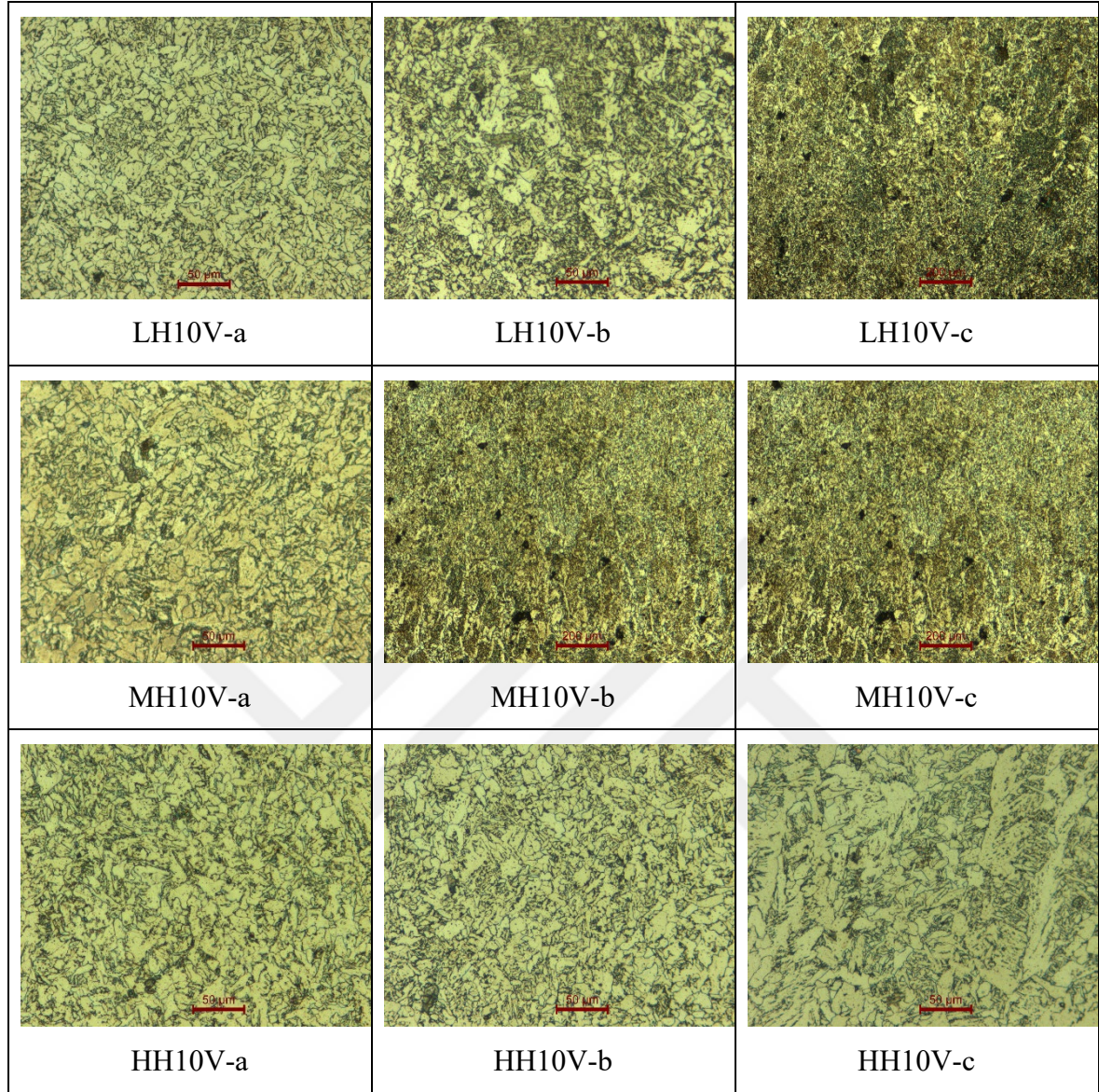


Şekil 3.3. LH10V, MH10V ve HH10V kodlu numunelerden alınan tane ölçümlerine ait gösterim

Tane ölçümleri Şekil 3.3’de görülebileceği üzere ilgili mikroyapıların a,b ve c ile gösterilen noktalarından alınmıştır. Şekil 3.3’de görülen tane ölçüm sonuçlarında tane ölçümünün doğrulaması kabul edilen “log normal” grafikleri ön plana çıkmaktadır. Her üç ölçümde de şekillerde görülebileceği üzere “log normal” dağılımına uygun sonuç gözlemlenmiştir. Log normal dağılımı uygun olarak değerlendirilen ortalama tane boyutu ölçüm sonuçları ile en-boy oranları Çizelge 3.8’de görülebilir.

Çizelge 3.8. LH10V, MH10V ve HH10V kodlu numunelerden alınan ortalama tane boyutu ve en-boy oranı sonuçları

	LH10V			MH10V			HH10V		
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
Ortalama tane boyutu (µm.)	11,80	12,59	12,35	12,72	12,32	12,57	12,54	11,46	11,80
En-boy oranı (en/boy)	1,784	1,778	1,729	1,758	1,804	1,744	1,716	1,736	1,772



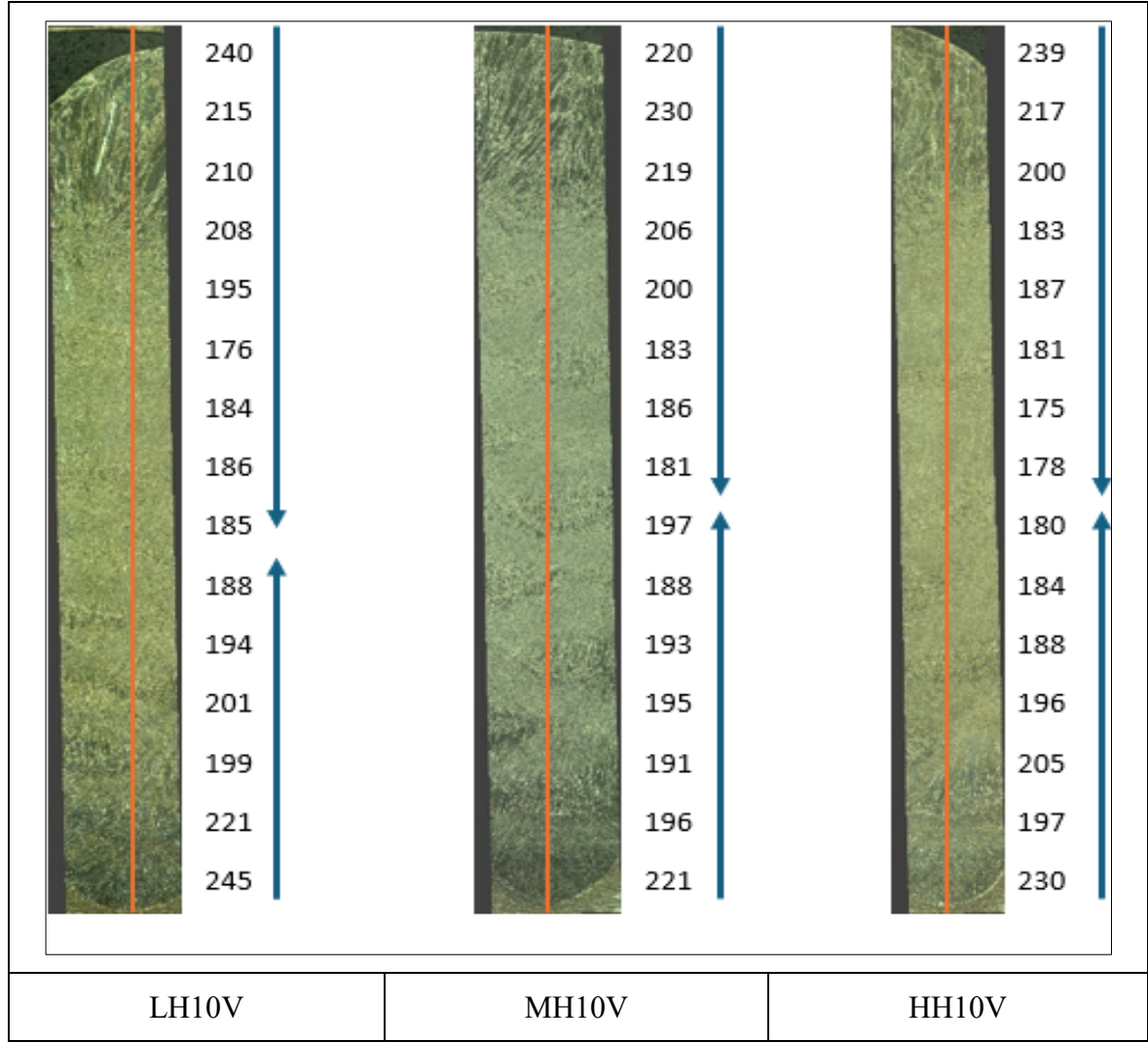
Şekil 3.4. Şekil 3.3.'de gösterilen a,b ve c noktaları ile gösterilen mikrofotografılar

LEICA Grain Expert modülünde ortalama tane boyutları hesaplanan alanlara ait detay mikrofotografılar Şekil 3.4'de verilmiştir. Toplamda 9 mikrofotograf 3 farklı ısı girdisinde üretilen 10 katman numunelerin eş eksenli olarak tanımlanan alanlarından üretilmiştir. Çizelge 3.8'de ortaya çıkan sonuçlarda en-boy oranlarından tanelerin eş eksenli olarak oluştuğu ve ortalama tane boyutlarının her bir ısı girdisinde birbirine yakın boyutlarda olduğu görülmektedir. Ortalama tane boyutlarının validasyonunun ilerleyen bölümlerde gerçekleştirilmesi düşünülmektedir.

3.4. Mekanik Testler

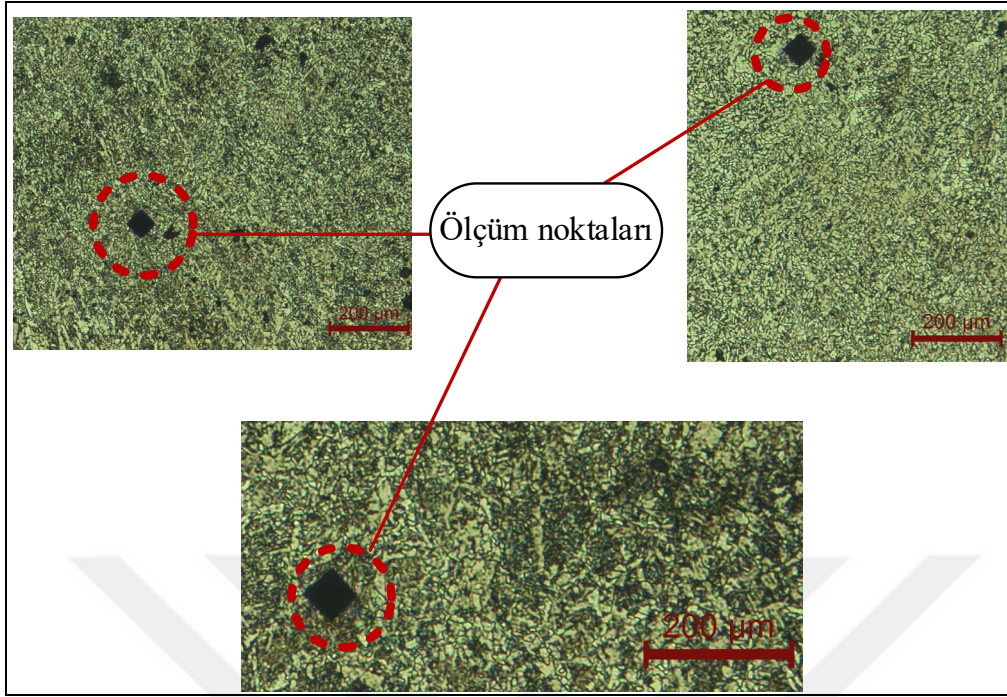
Katman üzerine katman biriktirme Şekil 2.4’de şematize edildiği üzere altlıktan başlayarak yukarıya doğru üretimin devam etmesini gerektirmektedir. Bu gereklilik bir parçanın üretimini kademe kademe görmeyi beraberinde getirmektedir. Bu parçanın optik mikroskopisi yöntemleri kullanılarak belirli miktarlarda büyütüldüğünde oluşan gelişim ise Bölüm 3.3’de detaylı verilmiştir. Mikroyapı fotoğrafları ile elde edilen görüntüler üzerindeki analizlerin mekanik test yöntemleri ile birleştirilerek yorumlanması sıklıkla kullanılmakla birlikte bu durum deney sonuçlarının bilimsel yorumlardaki doğruluğunu da pekiştirmektedir. Mekanik test kapsamında bu sebeple mikrosertlik ölçümleri kullanılmıştır. Mikrosertlik yöntemi, olarak mikrovickers sertlik deneylerinin yapılması planlanmıştır. Bu bağlamda Gazi Üniversitesi Kaynak ve Birleştirme Teknolojileri Uygulama Ve Araştırma Merkezi Müdürlüğü’nde (KABTEM) bulunan Shimadzu HMT-2 marka mikrosertlik cihazı kullanılmıştır.

Mikrovickers testi tüm sertlik testlerinde olduğu üzere batıcı ucun sertlik ölçümü yapılacak önceden hazırlanmış malzeme yüzeyine batırılması ve malzemenin bu batıcı uca gösterdiği direncin bir metodolojiye göre hesaplanıp sertlik değerinin belirlenmesi aşamalarından oluşmaktadır. Mikrovickers testi 1 kg’ın altındaki yüklerde yapılabilmektedir. Deneyde seçilen yük 500 gr olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte tekil mikrofotografların birleştirilmesi metodundan mülhem olarak sertlik ölçümleri dipten kepe eşit aralıklarla yapılmıştır. 10 katmanda tüm ısı girdilerinde üretilen ve biriktirme yönüne dik alınan numuneler üzerinde yapılan mikrosertlik deney sonucunda elde edilen tekil mikrofotograflar birleştirilmeye çalışılmış lakin odaklama problemlerinden dolayı birleştirme sağlanamamıştır.



Şekil 3.5. LH10V, MH10V ve HH10V numunelerinden alınan mikrosertlik testi sonuçları

Şekil 3.5’de görülebileceği üzere 3 farklı ısı girdisinde dipten kepe kadar belirli aralıklarda ve şekilde görülen turuncu eksenlerde mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. Alınan sonuçlar her 3 numune de orta noktaya doğru azalmış ve sonra kepe doğru artış göstermiştir. LH10V kodlu numune de 240-185 vickers aralığında ölçüm alınırken MH10V’de 221-181 ve HH10V’de 239-175 mikrovickers aralığında ölçüm alınmıştır. Resim 3.21’da yapılan ölçümlere ilişkin bazı örnekler verilmiştir. Sertlik ölçümleri kapsamında toplamda 45 tane ölçüm yapılmıştır. Sonuçlar ve mikroyapı oluşumları ile mikrosertlik sonuçları arasındaki ilişki Bölüm 5’de tartışılacaktır.



Resim 3.21. Mikrosertlik ölçümlerinin alındığı noktalara ait örnek gösterimler

3.5. Isıl Kamera Ölçümleri

Isıl kamera ölçümleri, nesne ve yüzeylerin kızılötesi (IR) radyasyon yayılımını algılayarak sıcaklık dağılımlarının temassız şekilde belirlenmesini sağlar. Bu yöntem hem yüksek hem de düşük sıcaklık bölgelerinin hızlı ve güvenilir biçimde tespitine imkân tanır. Ölçüm sırasında, ısıl kamera optik sistem aracılığıyla kızılötesi veriyi toplar ve bu veriyi sıcaklık değerlerine dönüştürerek renk ölçeği üzerinde görselleştirir. Elde edilen ısıl haritalar, malzeme davranışlarının, proses sıcaklıklarının ve enerji kayıplarının analizinde önemli bilgiler sunar. Bu özellikleri sayesinde ısıl kameralar, imalat süreçlerinden yapı denetimine, elektronik devre analizlerinden biyomedikal uygulamalara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Isıl kamera ölçümlerinde KOBİ Pi 640i ısıl kamera kullanılmıştır. Isıl kameralarda yansıtma oranı olarak bilinen emissivite değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Bu oran ölçümlerin doğruluğu açısından önemli bir orandır. Çalışmamızda kullanılan ısıl kamera METALWORM'un kullanımda olan bir doğrulama elemanıdır ve emissivite değeri 0,93'tür. Isıl kamera MH30V kodlu 30 katmanlı imalatın üretilmesinde kullanılmıştır. Kullanıma ilişkin görüntü Resim 3.1'de gösterilmiştir.

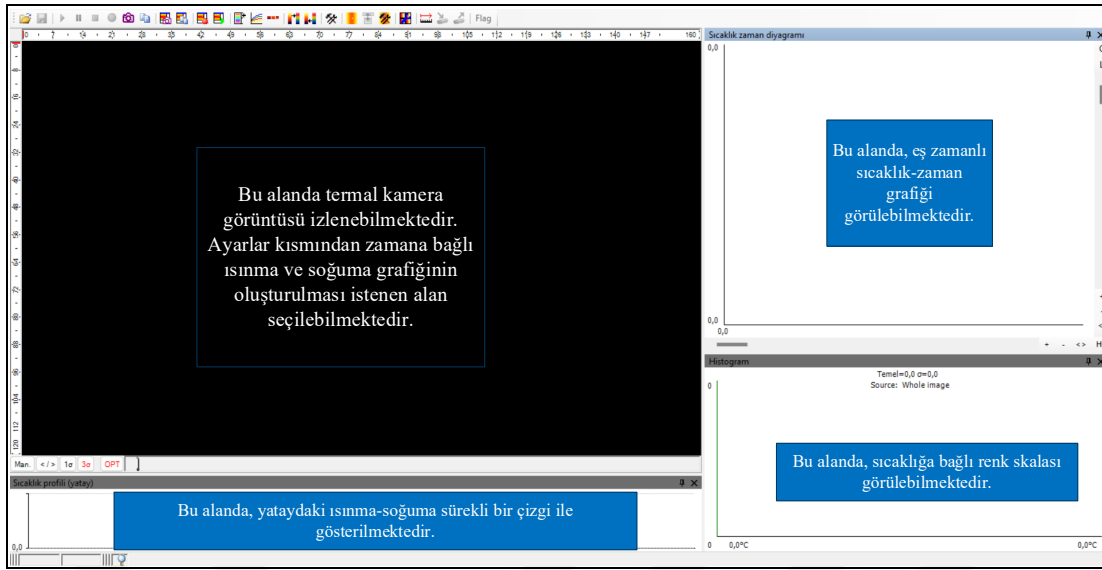


Resim 3.22. Isıl kamera konumu

Isıl kamera, üretimi cepheden izleyebilecek şekilde Resim 3.22’de görüldüğü şekilde konumlandırılmıştır. Böylelikle oluşturulan duvarın istenen her yerinden ısı ölçümleri yapılması amaçlanmıştır.

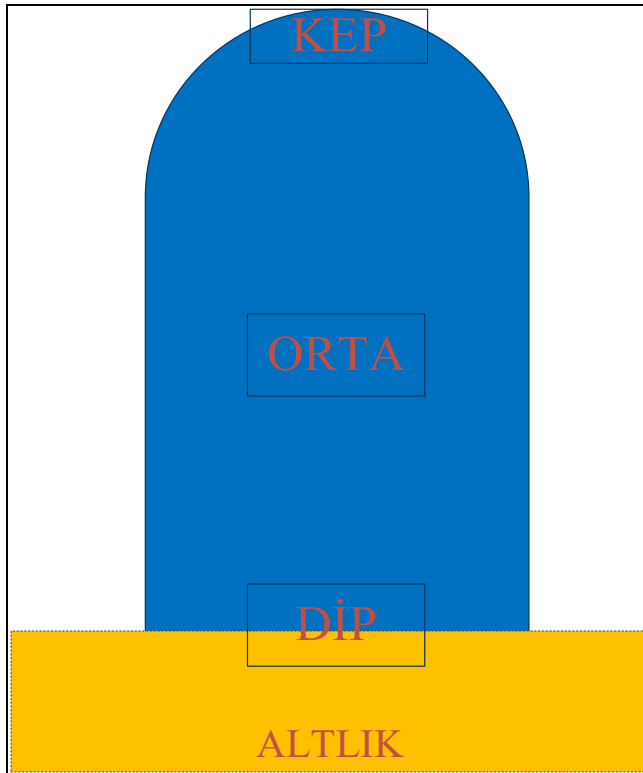
Isıl kamera ölçümlerinin işlenebilmesi için özelleştirilmiş Optris ticari markasına ait PIX Connect uygulaması kullanılmıştır. Bu uygulama ısıl kamera görüntülerinin analiz edilebilmesi hususunda kullanılan yaygın bir uygulamadır. Uygulamanın OPT PIX Connect Rel. 3.18.3103.0 versiyonu kullanılmıştır.

Resim 3.23’de PIX Connect yazılımına ait ekran görüntüsü verilmiştir. Bu yazılım ısıl kamera verilerini izleyebilmeyi, belirli alanları işaretleyebilmeyi ve bu işaretlenen alanların ısı geçmişlerini grafik veya sayısal veri olarak alabilmeyi sağlamaktadır. Diğer bir deyişle zamana göre sıcaklık artış ve azalışlarını belirli alanlar için başarıyla takip edebilmektedir ve arayüz kolaylığı ile raporlayabilmektedir.

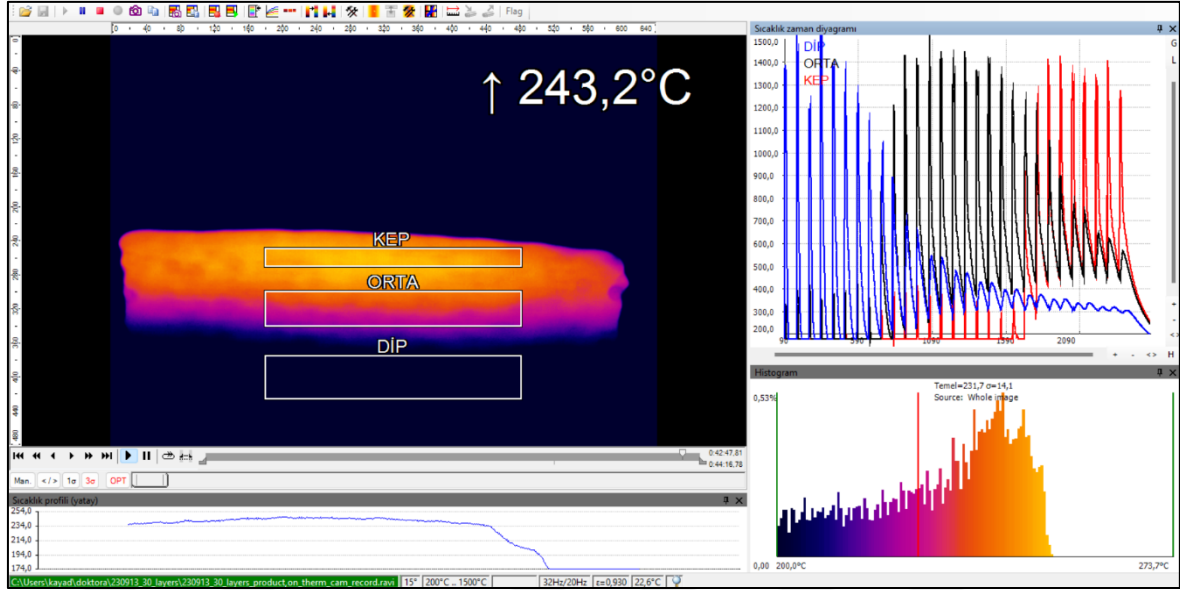


Resim 3.23. Isıl kamera yazılımı ekran görüntüsü

Sıcaklık değişimleri izlenecek alanlar 30 katmanlı imalat için Şekil 3.6'de gösterildiği şekilde belirlenmiştir. DİP, ORTA VE KEP bölgelerinin ısı geçişleri katman biriktirdikçe değişeceğinden DİP bölgenin analizi diğerlerinden daha uzun sürmüş ve daha fazla kayıt alınmıştır.

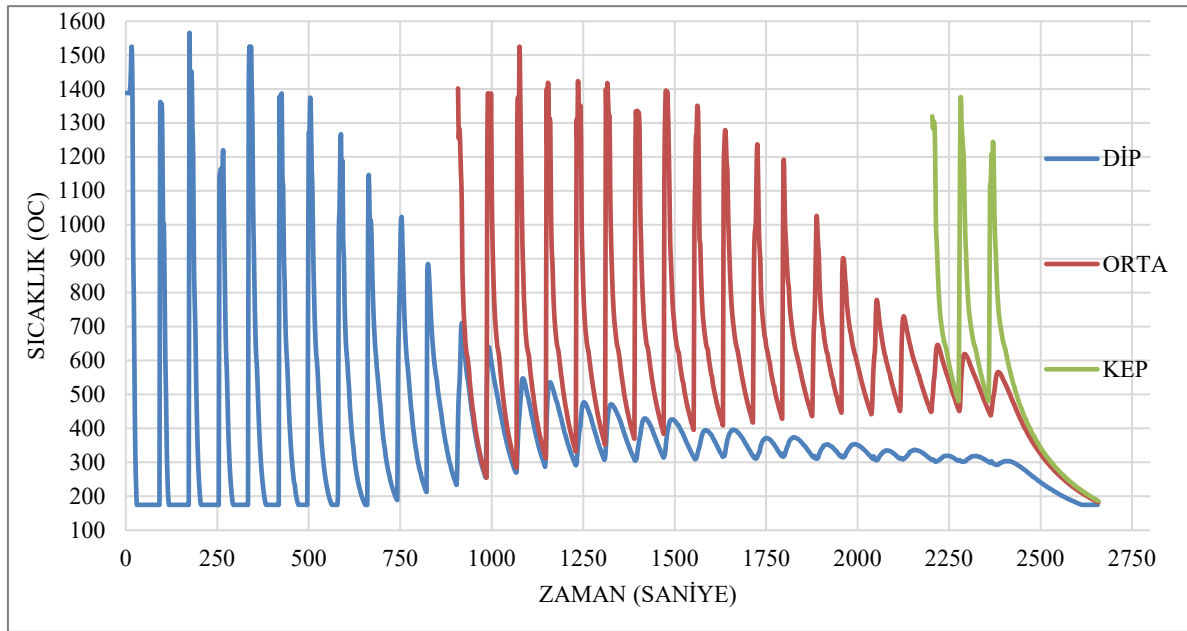


Şekil 3.6. Isıl kamera ölçümlerinin alındığı bölgeler



Resim 3.24. DİP, ORTA ve KEP Bölgesinin ısı geçmişinin izlenmesine ilişkin ekran görüntüsü

Isıl kamera ile izlenen 30 katman üretimin Şekil 3.6’de gösterilen DİP, ORTA ve KEP bölgesinin izlenmesine dair ekran görüntüsü Resim 3.24’de gösterilmiştir. Bu alanın izlenmesinden sonra ortaya çıkan zamana bağlı sıcaklık verileri Şekil 3.7’de aktarılmıştır ve grafik 4.005 satır veri ile oluşturulmuştur.

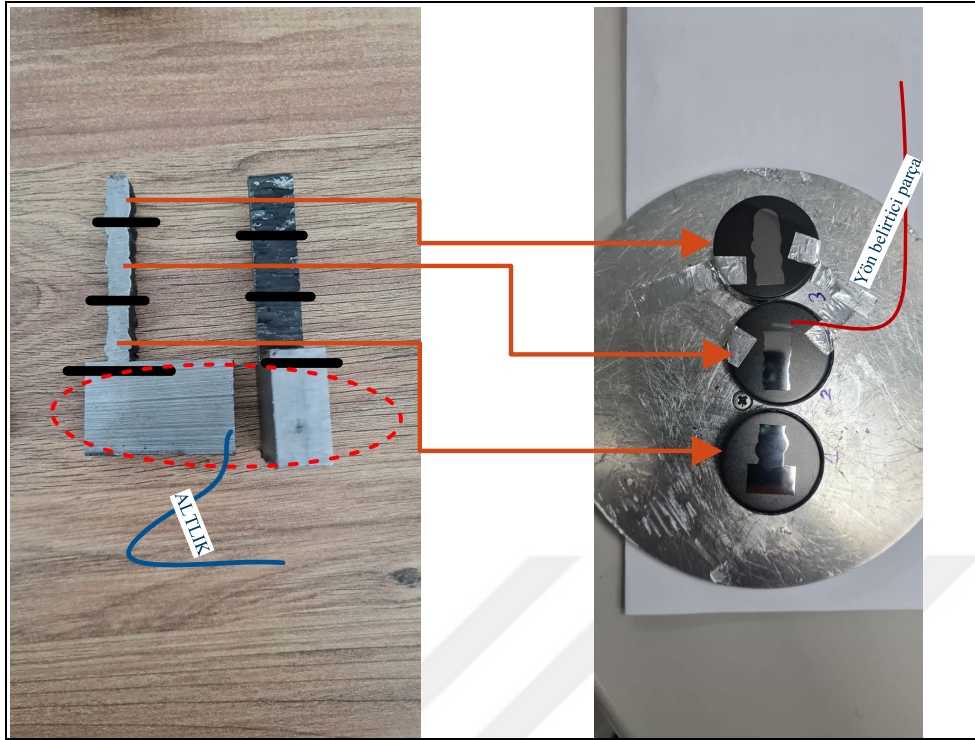


Şekil 3.7. MH30V ısı kamera sonuçlarından elde edilen ısınma-soğuma grafiği

3.6. Elektron Mikroskopisi

Taramalı elektron mikroskopisi (SEM), iletken numunelerin veya yüzeyi iletken malzeme ile kaplanmış iletken olmayan numunelerin yüzeyinden karakteristik X ışınları toplayarak çalışan bir karakterizasyon yöntemidir. SEM, malzeme biliminden biyolojiye kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. SEM analizi yapabilmek için numune yüzeyinin çok dikkatli ve standartlara uygun hazırlanması büyük önem taşır [9,11]. Bu çalışmada 30 katman üretilen numunenin çeşitli bölgelerinden SEM görüntüleri alınması tasarlanmıştır. Sonrasında yine belirli bölgelerden elektron geri saçınım kırınımı (EBSD) ile faz oranlarının tespit edilmesi hedeflenmiştir.

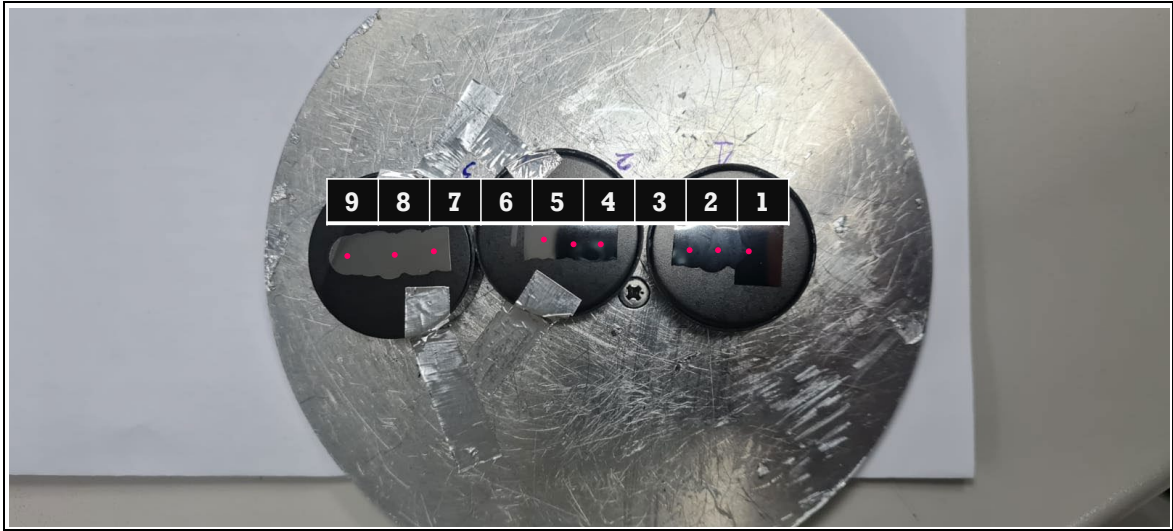
Elektron mikroskopisi çalışmalarına öncelikle yüzeyin uygun şekilde hazırlanması ve sonrasında analizi yapılacak kısımların tespit edilmesi ile başlanmıştır. Numunelerin kesilmesi, kaba ve ince zımparalanması ile parlatma aşamalarının tamamı Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarındaki imkanlar kullanılarak yapılmıştır. Optik mikroskoptan farklı olarak SEM cihazının boyut kısıtı 30 mm olduğundan numuneler 30 mm kalıpta iletken bakalite alınmıştır. SEM’de yüzey kalitesinin üst düzeyde olması istendiğinden dolayı titreşimli parlatma yapılması amacıyla AYBÜ Merkez Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi imkanları kullanılmıştır.



Şekil 3.8. MH30V kodlu numunenin SEM analizi için hazırlanması

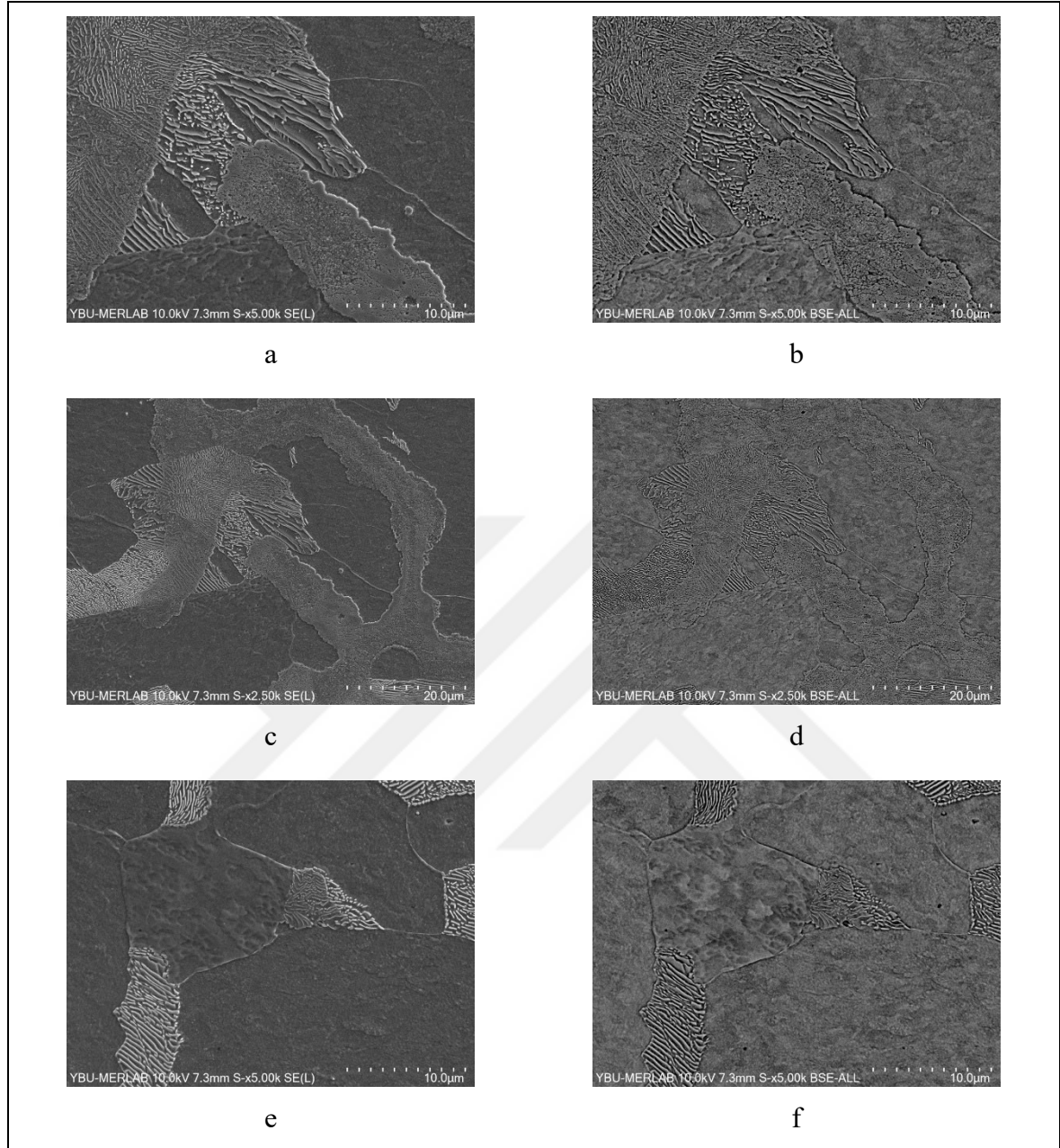
Biriktirilen numuneler Şekil 3.8’de görüldüğü şekilde kesilmiştir. SEM analizi için 30 katman numune üç kesime ayrılmıştır. Orta kesimdeki numunenin yönünü belirleyebilmek amacıyla bir yön belirtici parça bakalite alma aşamasında yerleştirilmiştir. Yön belirtici parça numunenin üst tarafına konumlanmıştır.

SEM ve SEM-EBSD analizlerinin yapılabilmesi hangi alanlardan analiz yapılabileceğini işaretlenmesi gerektirdiğinden dolayı MH30V kodlu numune üzerine Şekil 3.9’de görüldüğü üzere numaralandırma yapılmıştır.

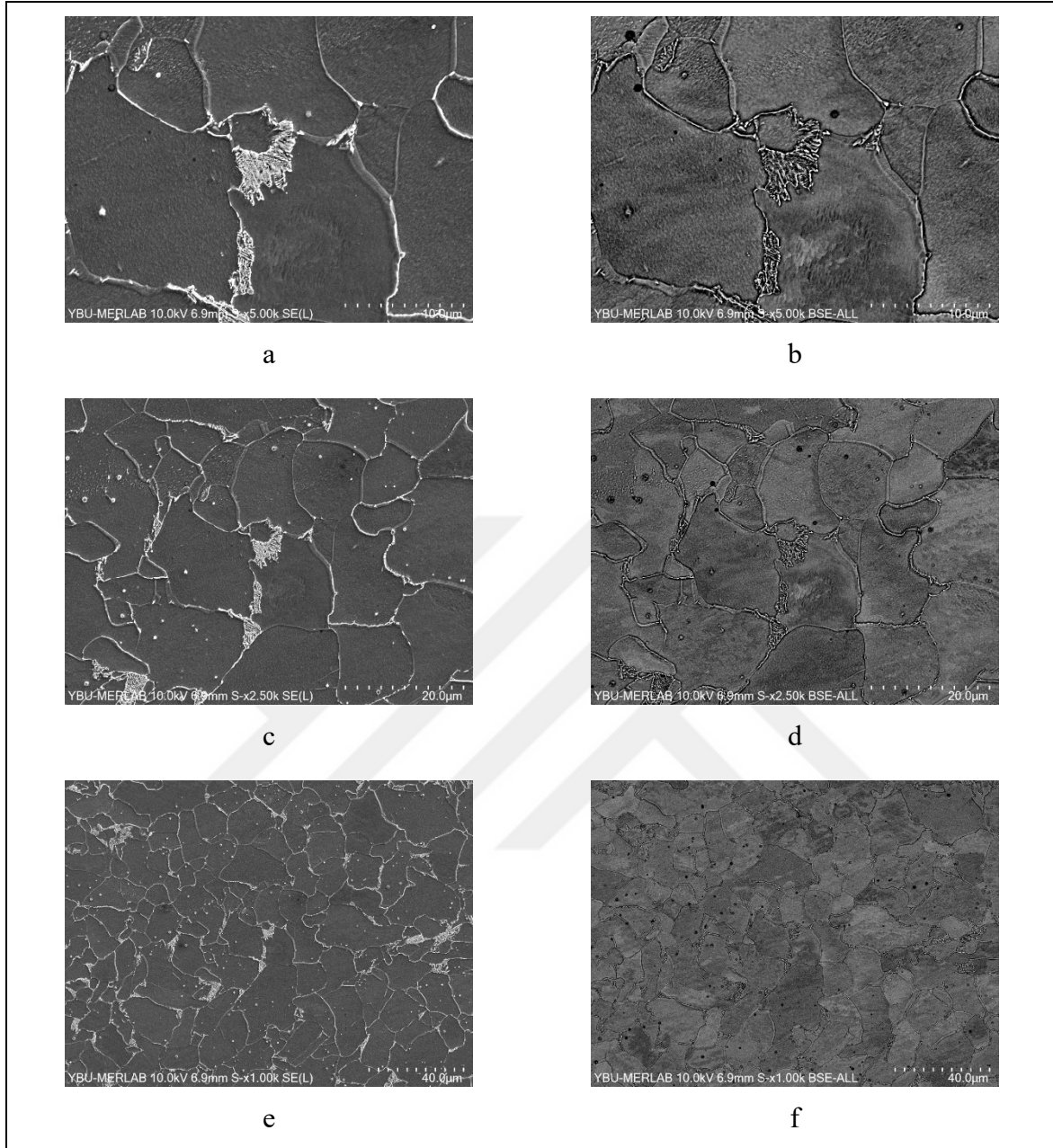


Şekil 3.9. MH30V kodlu numunenin SEM analizi için işaretlenmesi

Şekil 3.9’da 1-9 arasında numaralandıran numunede 1 numara ile gösterilen alan ilk biriktirilen katmandır. Kep’e doğru 9 farklı alan tanımlanmıştır. 1,5 ve 9 numaralı alanlardan SEM görüntüleri alınması, 1,2,5 ve 8 numaralı alanlarda da EBSD analizleri yapılması planlanmıştır. Bu alanlardan alınan SEM görüntülerinin analizleri Bölüm 4’de verilmiştir. Bu alanda sadece alınan görüntüler verilecektir.

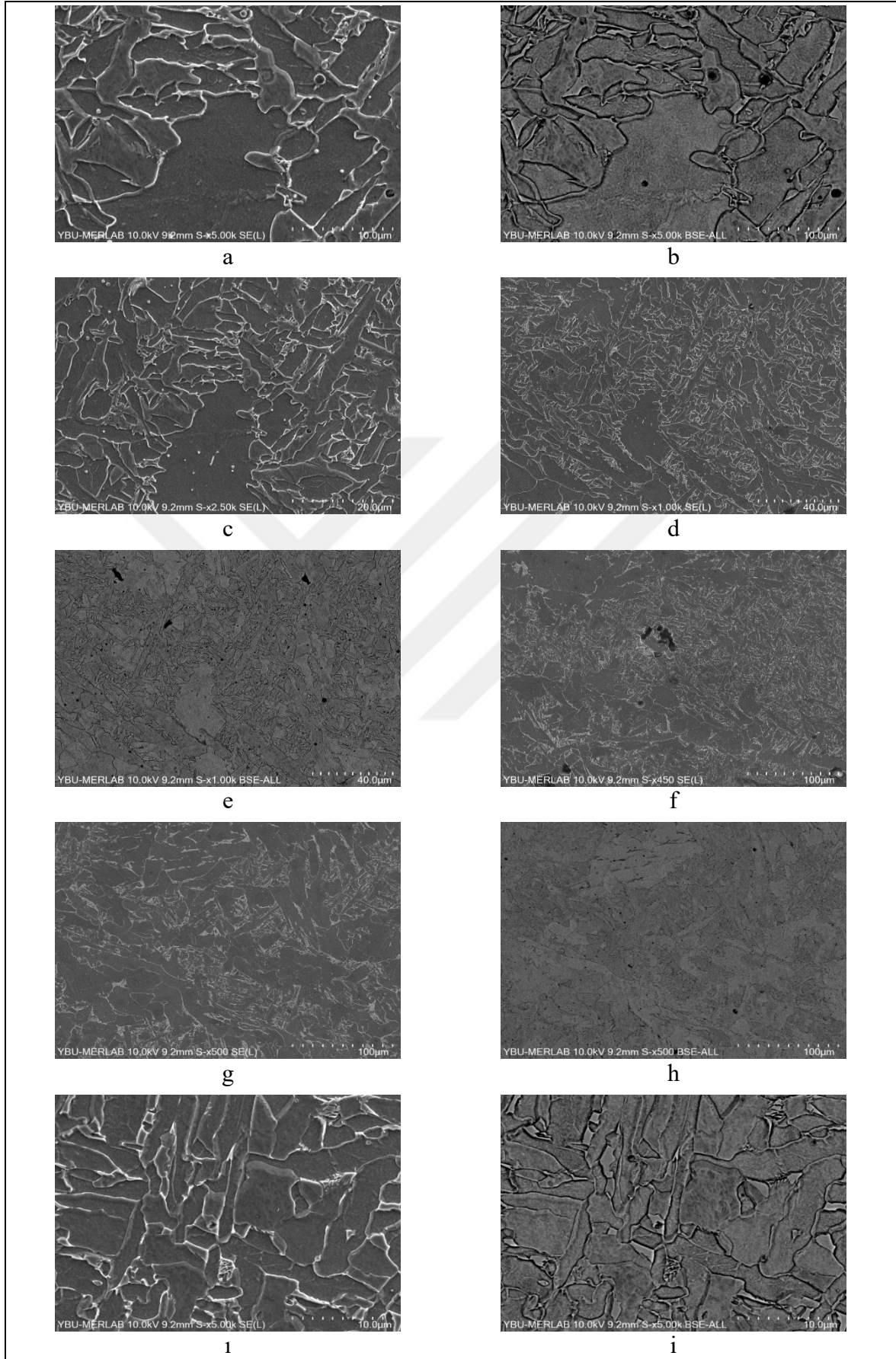


Resim 3.25. MH30V kodlu numunenin 1 numaralı bölgesine ait SEM görüntüleri. (a-f) Resim 3.25 (a-f), Şekil 3.9’de gösterilen 1 numaralı alandan alınan SEM görüntülerini içermektedir.



Resim 3.26. MH30V kodlu numunenin 5 numaralı bölgesine ait SEM görüntüleri. (a-f)

Resim 3.26 (a-f), Şekil 3.9’da gösterilen 5 numaralı alandan alınan SEM görüntülerini içermektedir.

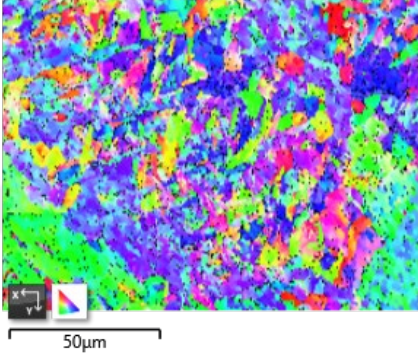
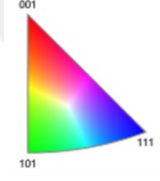
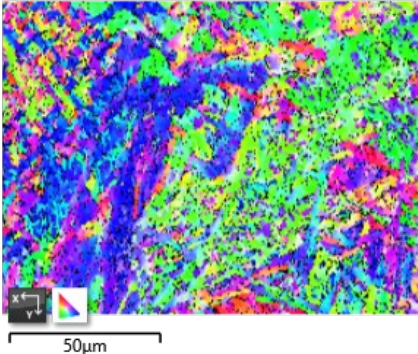
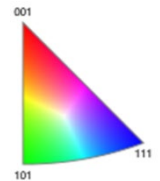


Resim 3.27. MH30V kodlu numunenin 5 numaralı bölgesine ait SEM görüntüleri. (a-i)

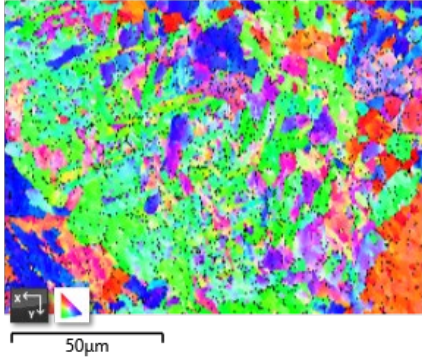
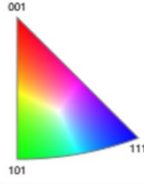
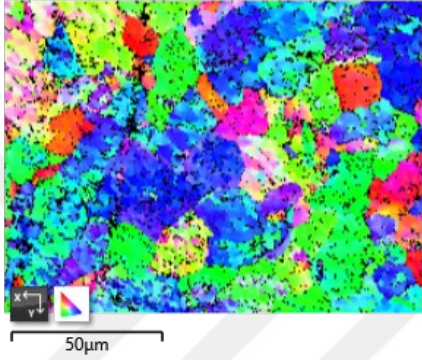
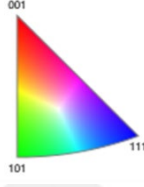
Resim 3.27 (a-i), Şekil 3.6’da gösterilen 9 numaralı alandan alınan SEM görüntülerini içermektedir.

Belirlenmiş alanlardan SEM görüntüleri elde edildikten sonra EBSD analizlerine geçilmiştir. Bu bağlamda Şekil 3.9’da gösterilen resimdeki 1,2,5 ve 8 numaralı alanlardan EBSD analizleri alınmıştır. EBSD analizleri alındıkları noktalardaki faz oranlarının tespiti amacıyla gerçekleştirilmiştir. EBSD analizleri ve analizi alınan noktalarda hesaplanan faz oranları Şekil 3.10’de gösterilmiştir.

SEM görüntüleri ve EBSD analizlerinin birbiriyle ve diğer yapılan çalışmalarla ilişkisi sonraki bölümde detaylı olarak tartışılacaktır.

No	EBSD Ölçümleri		Faz Oranları %
1			Fe-HMK: 94,57 Fe-YMK: 0,08
2			Fe-HMK: 89,39 Fe-FCC: 0,10

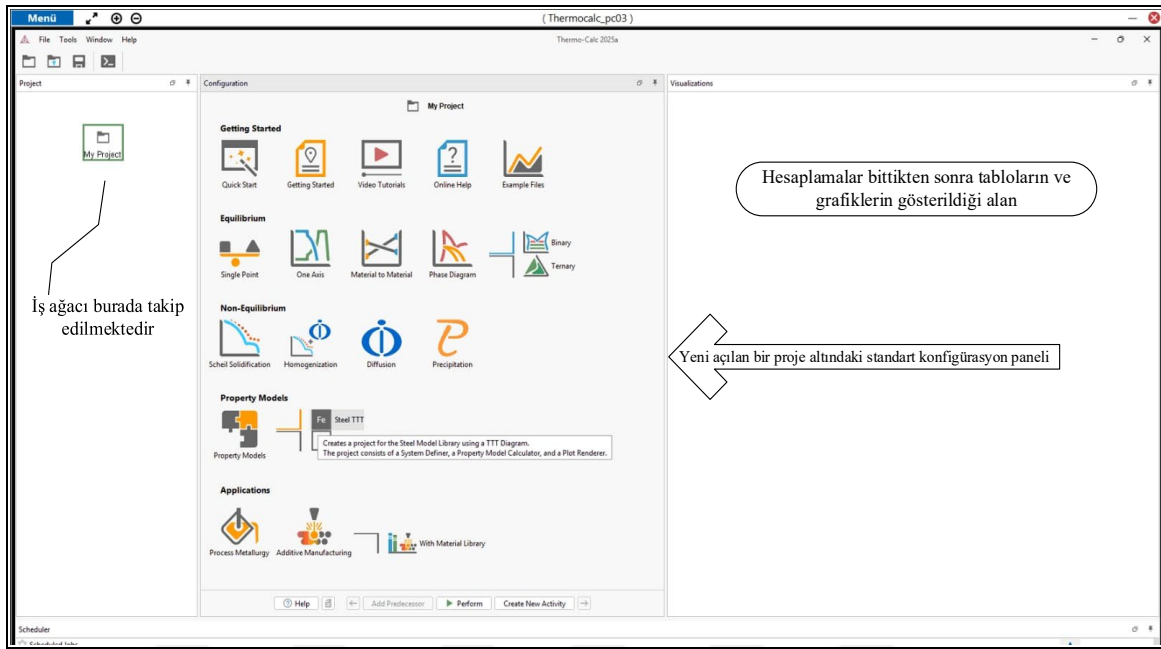
Şekil 3.10. MH30V koldu numuneden alınan EBSD ölçümleri

No	EBSD Ölçümleri		Faz Oranları %
5			Fe-HMK: 98,38 Fe-YMK: 0,02
8	IPF Z Color 10 		Fe-HMK: 95,31 Fe-YMK: 0,09

Şekil 3.10. (devam) MH30V koldu numuneden alınan EBSD ölçümleri

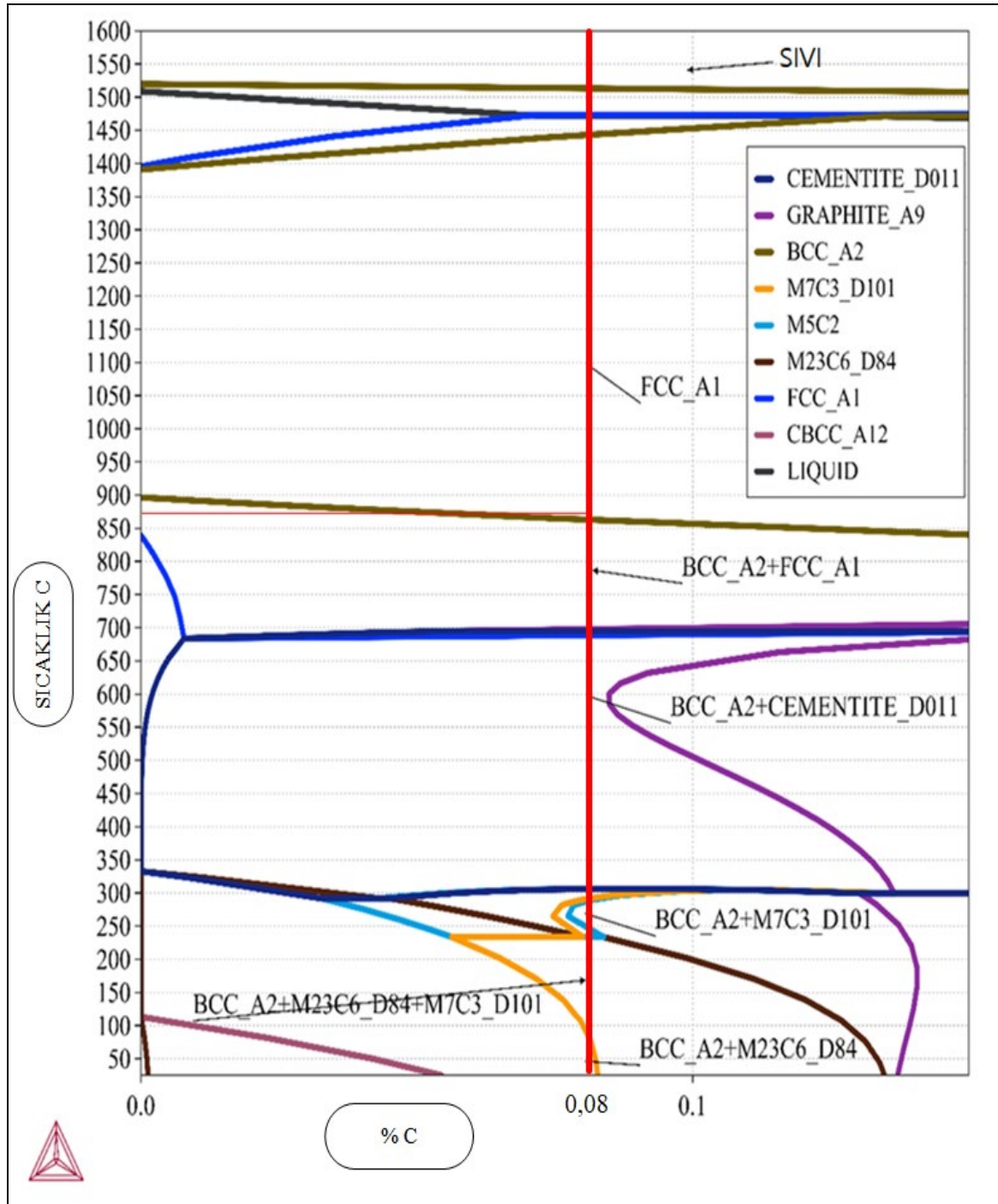
3.7. Hesaplamalı Çalışmalar

Hesaplamalı çalışmalar ICME programı olan ticari Thermocalc'da gerçekleştirilmiştir. Çelik, alüminyum ve titanyum termodinamik ve kinetik veri tabanı sayesinde yıllar içerisinde güçlü bir veritabanına erişen Thermocalc zaman- sıcaklık-dönüşüm (Time-Temperature- Transformation, TTT) diyagramları ile sürekli soğuma (Continous Cooling Transformation, CCT) diyagramları konusunda çok hızlı ve keskin sonuçlar elde edebilmektedir. Thermocalc, termodinamik ve metalurji kinetiği yasalarından gelen formülleri kullanmaktadır. Thermocalc herhangi bir işleme başlarken öncelikle çalışılacak sistemi tanımlamamızı isteyen bir ara yüze sahiptir. Thermocalc lisanslı kullanımı henüz ülkemizde yaygın olmadığı için Thermocalc lisansına sahip olan danışmanlık şirketlerinden uzaktan erişim metodu ile çalışmalar yapılmıştır.



Resim 3.28. Thermocalc açılış ekranı

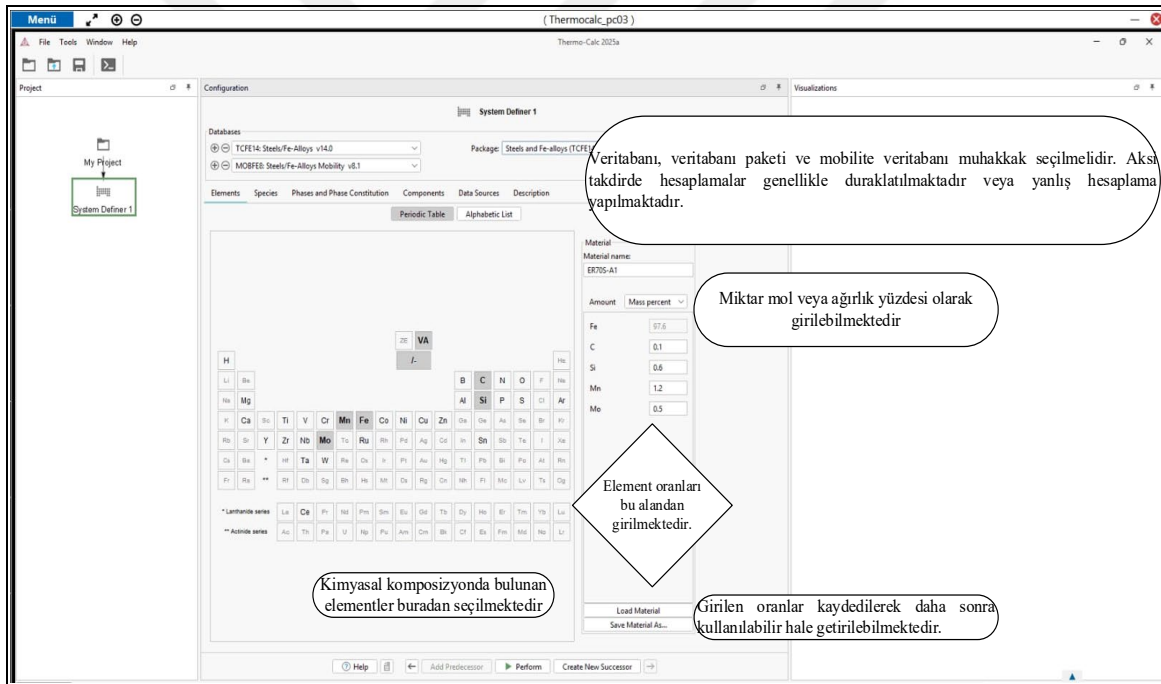
Resim 3.28’de Thermocalc açılış ekranı görülmektedir. Açılış ekranı 3 bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm iş ağacının takip edilebildiği alandır. İkinci bölüm yapılmak istenen faaliyete ilişkin seçimin yapıldığı alandır. Üçüncü bölüm ise tüm girdiler sağlandıktan ve işlemler başlatılıp hesaplamalar bitirildikten sonra gerek grafiklerin gerek tabloların görülebildiği alandır. Çalışmamız öncelikle TTT diyagramlarının oluşturulması üzerine olacağından Çizelge 3.1’de kimyasal kompozisyonu verilen ER70S-6 çeliğine ait sistem tanımlanması ile işlemler başlatılmıştır. Resim 3.29’de sistem tanımlamaya ilişkin detaylar görülebilmektedir. Öncelikle veritabanı seçimi yapılmalıdır. 2025 yılı itibarıyla TCFE14 çelik veritabanı ve MOBF8 mobilite veritabanı kullanılabilir durumdadır. Çalışmamız bu iki veritabanı ile sürdürülmüştür. Periyodik cetveli görünümünden çalışılan çeliğe ait tüm elementler seçilmektedir. Seçim yapıldıkça malzeme sütununda seçilen element ismi belirlemekte olup elementler mol veya ağırlık yüzdesi olarak girilebilmektedir. Son olarak sık çalışılan malzemelerin kullanıcı tarafından kimyasal kompozisyonları girildikten sonra daha sonra kullanılmak üzere kaydedilebilmektedir.



Şekil 3.11. ER70S-6 çeliğine ait denge diyagramı (Sıcaklık- %C)

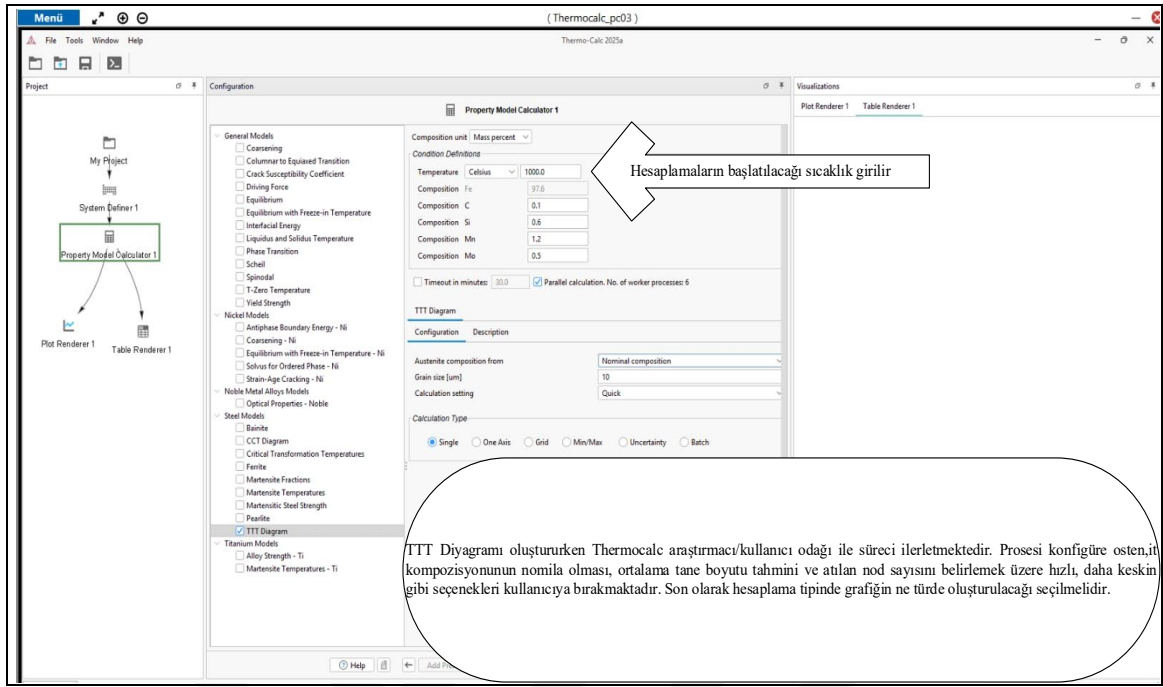
Resim 3.28’de görülen “phase diagram” alanından kimyasala kompozisyonu bilinen bir çeliğe ait binary veya ternary sistemdeki faz diyagramı kolaylıkla çizilebilmektedir. Çeliklerin ısıtma soğutma döngülerinde sıklıkla kullanılan “ $t_{8/5}$ ” kavramı çeliğin 800 °C’den 500 °C’ye ne sürede düşeceğini belirleyen bir metalurji kavramıdır [51]. Bu kavram standart bir aralık olarak kullanılmakla birlikte çeliğin kimyasal kompozisyonuna göre başlangıç ve

bitiş sıcaklıkları değişiklik gösterebilmektedir. Thermocalc'de hesaplamaların hangi sıcaklıktan başlatılacağı ve hangi sıcaklıkta bitirileceği sorusuna yine Thermocalc içerisinde bulunan faz diyagramı oluşturma modülü kullanılarak cevap aranmıştır. Sonuç olarak Thermocalc'de kullanılan çelik tel esas alınarak tanımlanan sisteme ait denge diyagramı oluşturulmuştur. Şekil 3.11'da görülebileceği üzere Yüzey merkezli kübik (YMK) sistemden hacim merkezli kübik (HMK) sisteme geçiş sıcaklığı 900 °C olarak tanımlanması gerektiği belirlenmiştir. Şekle göre takribi 900 °C'dan aşağı doğru inildikçe öncelikle YMK ve HMK fazlarının beraber bulunduğu bir alanın geçilmesi gerekmektedir. Sonrasında HMK ve Fe₃C adı verilen sementit fazının beraber bulunduğu bir alan bulunmaktadır. 400 °C civarına soğuma gerçekleştiğinde bu alanda YMK-HMK fazı dönüşümünün gerçekleşeceği görülmektedir.



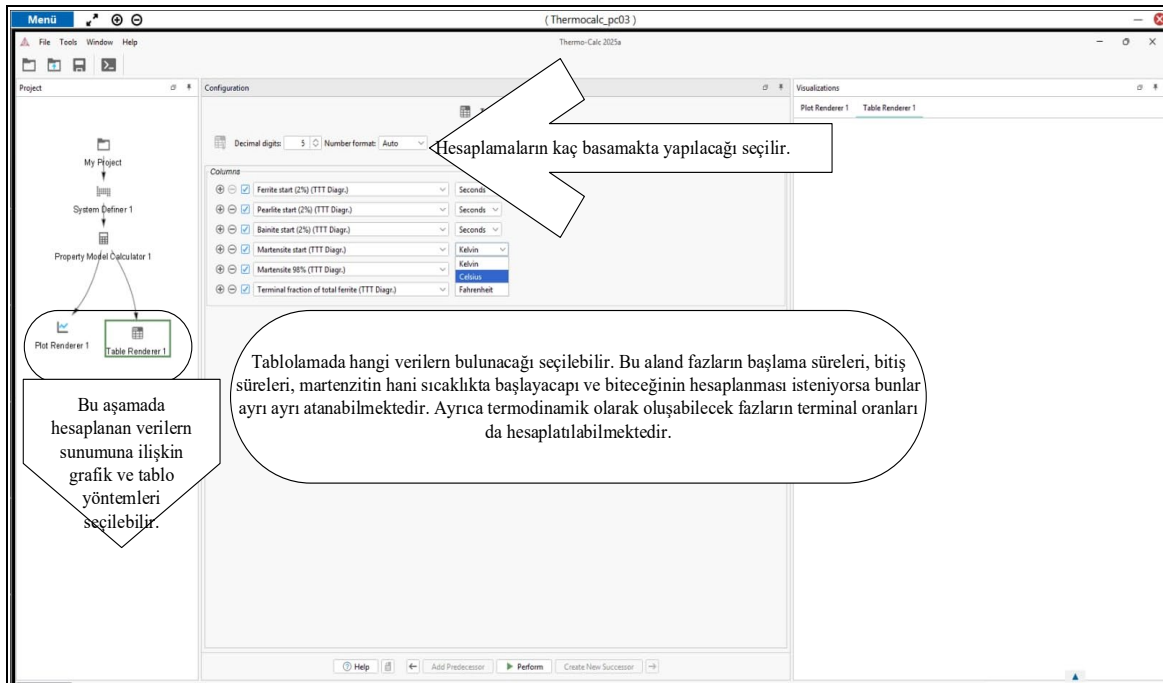
Resim 3.29. Thermocalc'de sistem tanımlama

Thermocalc'de TTT diyagramı oluşturma süreci "property model calculator" başlığı altında bulunan TTT sekmesi tıklandığında TTT diyagramı oluşturma aşamasında girilmesi gereken alanlar karşımıza çıkmaktadır. Bu alanda kompozisyon birimi seçilmeli ve sıcaklıkların başlatılması gereken sıcaklık manuel girilmelidir.



Resim 3.30. Thermocalc’de TTT diyagramı oluşturulması için girdi ekranı

Resim 3.30’de TTT diyagramı oluşturma ekranına ilişkin detayla görülmektedir.



Resim 3.31. Thermocalc’de TTT hesaplamaları yaparken verilerin sunulması

Thermocalc’de verilerin sunulması aşamasında tablo ve grafik biçimleri kullanılmaktadır.

Tablolama ve grafik oluşturma aşamalarında görmek istenen tüm verileri seçip kaldırma

imkânı bulunmaktadır. Verilerin kaç basamakta sunulacağı elle seçilmelidir. TTT kapsamında martenzit başlama ve bitiş sıcaklığı, sıcaklığa bağlı olarak ferrit, perlit ve beynitin hangi sürelerde oluşacağı verilerine ulaşılabilmektedir. Tablo ve grafikte görülmesi istenen kalemelerin birimleri de ayrıca seçilebilmektedir. Bu detayların tamamı Resim 3.31’de görülebilmektedir. Sonuç olarak çalışmamızda Çizelge 3.9’da detayları verilen ayarlamalar kullanılarak TTT diyagramı yukarıdaki anlatılagelen esaslar doğrultusunda oluşturulmuştur.

Çizelge 3.9. Hesaplamalarda kullanılan Thermocalc girdileri ve girdi ayrıntıları

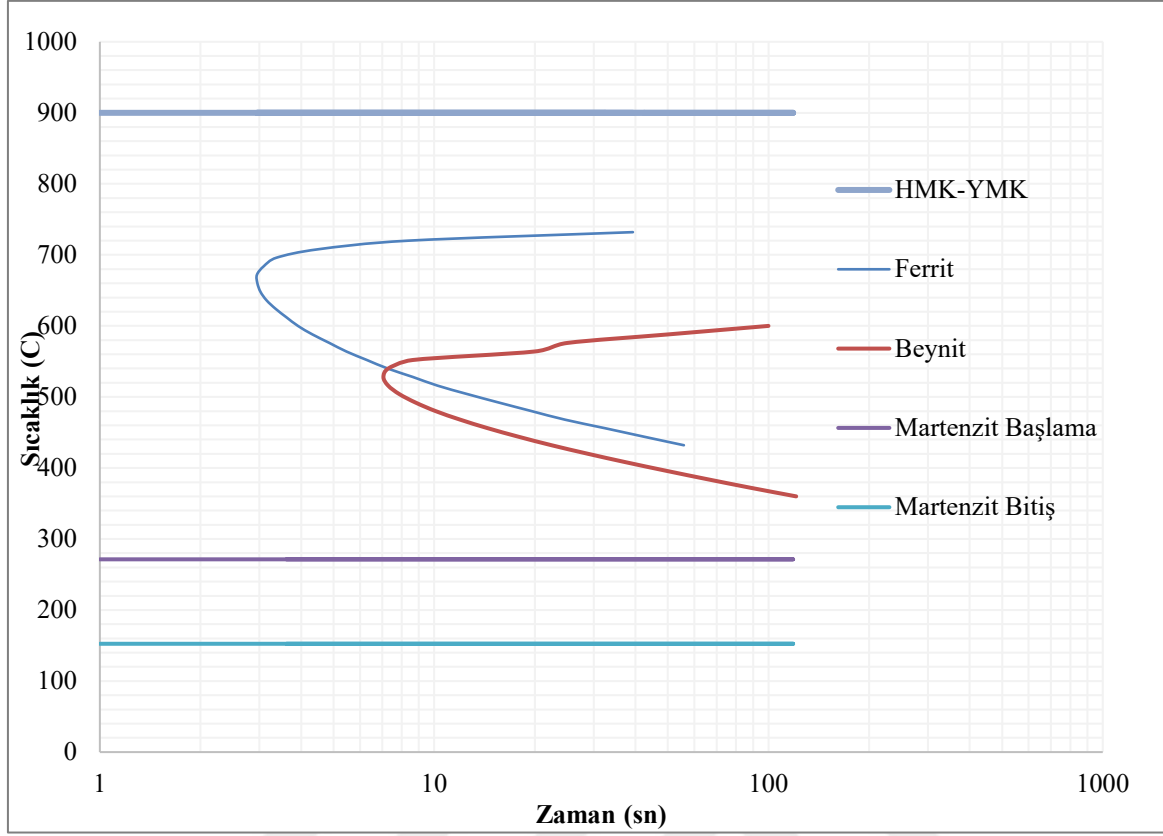
Girdi	Girdi Ayrıntısı
Sistem tanımlama	Bknz. Çizelge 3.1 , Ağırlıkça
Veri tabanı	TCFE14, MOBFE8
Ostenit kompozisyonu	Nominal kompozisyon
Başlangıç Sıcaklığı	900 °C (bknz. Şekil 3.11)
Tane boyutu	12 mikron (bknz. Çizelge 3.8)
Hesaplama	Hızlı
Hesaplama Metodu	Tek eksen
Derleme	Tablo düzeni, 5 basamak, °C - saniye

Çizelge 3.9’da bulunan girdileri kullanılarak Çizelge 3.10’de gösterilen çıktılar elde edilmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 3.10. Thermocalc çıktıları ve çıktı ayrıntıları

Çıktı	Çıktı Ayrıntısı
Ferrit	Sıcaklık- Süre (°C – saniye)
Beynit	Sıcaklık- Süre (°C – saniye)
Martenzit	Başlama ve bitiş sıcaklıkları

Thermocalc’den elde edilen hesaplamalarda perlit fazı teorik olarak hesaplınsa da kullanılan çelikte bulunan ağırlıkça %0,08 karbon oranında pratikte perlit oluşması beklenmediğinden perlit fazı hesaplamalara dahil edilmemiştir [70]. Sonuç olarak Thermocalc hesaplamalarından elde edilen verilerden oluşturulan grafik Şekil 3.12’de görülebilmektedir.



Şekil 3.12. Thermocalc'dan elde edilen TTT diyagramı

Şekil 3.12; bir sonraki bölümde üzerinde hesaplamalar yapılarak detaylı izah edilecektir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Proses, mikroyapı ve mekanik özellik ilişkileri alanında yapılan literatür taramasının (WAAM’da kullanılan çeşitli kaynak türlerinin birbiriyle mukayesesi dahil) ve WAAM’da faz ve mikroyapı oluşumuna dair yapılan çalışmalardan elde edilen verilerin analizi neticesinde ortaya çıkan hipotezin kontrollü deneyler ile sınanması için Bölüm 3’de detaylı şekilde aktarılan çalışmalara ait özet Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Yapılan deney ve çalışmaların detayları

Deney veya Çalışma	Açıklama
Üretim	3 adet tek katman tek dikiş, 3 adet 5 katman, 3 adet 10 katman ve 1 adet 30 katman duvar imalatı
Numune Hazırlama ve Metalografi	Metalografi kapsamında kesme, tel erezyon, bakalite alma, kaba zımparalama, ince zımparalama, parlatma, titreşimli parlatma, dağlama işlemleri yapılmıştır. Bu alanda takribi 10 adam.saat harcanmıştır.
Optik mikroskopisi	Mikroyapı oluşumlarını incelemek amacıyla 1000’in üzerinde tekil mikrofotograf çekilmiştir. 9 farklı birleştirilmiş (stitch) fotoğraf oluşturulmuştur. 10 katman imatlardan ortalama tane boyutu ölçümleri alınmış ve aynı noktalarda en-boy oranı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.
SEM	30 katman imalatın 4 farklı bölgesinden toplam 22 tane SEM görüntüsü elde edilmiştir.
EBSD	30 katman imalatın 3 farklı bölgesindeki faz analizleri yapılmıştır.
Sertlik	3 farklı ısı girdisinde oluşturulan 10 katman imalatların dipten kepe kadar eşit aralıklarla toplamda 45 adet mikrosertlik ölçümü alınmıştır.
ICME	Hesaplamalı malzeme mühendisliği programı olan Thermocalc’da üzerine çalışmalar yürütülen ER70S-6 çelik teline ait Fe-C faz diyagramı oluşturulmuştur. Sonrasında malzeme spesifik TTT diyagramı ve CCT diyagramı elde edilmiştir. Bu çalışmalar için 4 adam.saat harcanmış olup bu çalışmaları yapabilmek maksadıyla 15 adam.saat’e yakın eğitim alınmıştır. Çalışılan malzeme haricinde yapılan çalışmaların amacı Bölüm 5’de aktarılmıştır.
Isıl Kamera	Isıl kamera ile kayıtlar üretim esnasında alınmıştır. 42 dakikalık kamera kaydı elde edilmiştir. Bu kamera kaydı 0,93 emissivite oranı ile Bölüm 3.5’de anlatılan yazılıma aktarılmıştır. Yapılan tüm incelemeler takribi 10 adam.saat tutmuştur. Sonuç olarak 30 katmanlı imalatın arzu edilen yerlerinden zamana bağlı ısınma soğuma diyagramları oluşturulmuştur. Zaman çözünürlüğü 2 saniye iken sıcaklık çözünürlüğü sistem tanımlı olarak alınmıştır. Sonuç olarak 4005 satır veri elde edilmiştir.

Bu alanda Bölüm 3’de yapılan tüm deneysel çalışmaların sonuçlarının irdelenmesi amaçlanmaktadır. Şekil 2.5’de verilen akışa uygun olarak;

1. Katman sayısı yüksek olan üretimlerde orta bölgenin mikro yapı ve faz oluşumu, metalurjik bağlanmanın gerçekleştiği durumda ısı girdisinden bağımsız olarak benzer olacaktır.
2. Altlığa yakın bölgeler ve en üst katmanların mikro yapı ve faz oluşumu orta alanlardan farklı olacaktır.

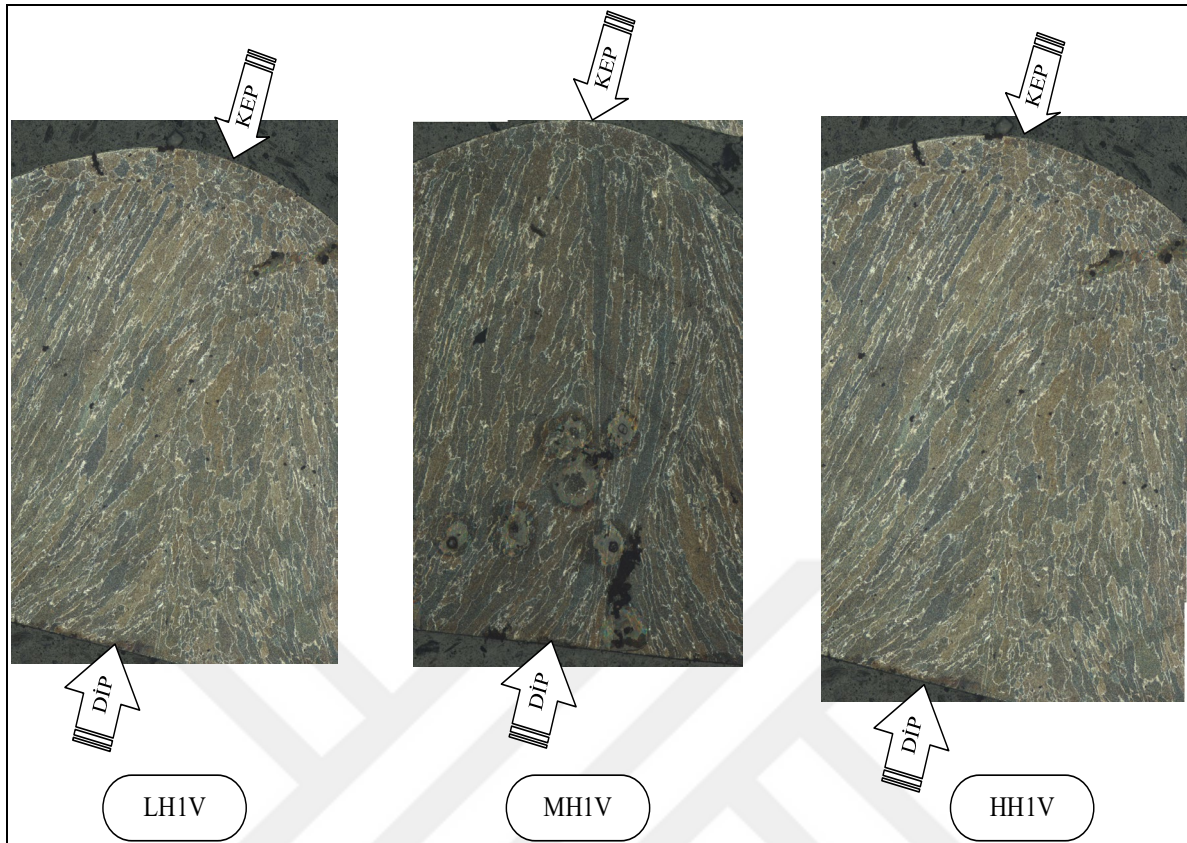
Hipotezinin sınanması için yapılan deneylerin birbiriyle ilişkisi Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deney ilişki matrisi

	Optik Mikroskopisi	SEM	EBS	Sertlik	ICME	Isıl Kamera Ölçümleri
Optik Mikroskopisi	X	Doğrulama	Doğrulama	İlişkilendirme	X	X
SEM	Doğrulama	X	X	X	İlişkilendirme	X
EBS	Doğrulama	X	X	X	Sınama	X
Sertlik	İlişkilendirme	X	X	X	İlişkilendirme	X
ICME	X	İlişkilendirme	İlişkilendirme	İlişkilendirme	X	Girdi Sağlama
Isıl Kamera Ölçümleri	X	X	X	X	Girdi Sağlama	X

WAAM’ın endüstriyel anlamda kullanılabilmesi üretilecek parça üzerinde parametre optimizasyonu gerektirmektedir [30,53,69]. Nitekim METALWORM gibi ticari WAAM tezgâhı üreten firmalar proses parametreleri üzerine kütüphaneler oluşturmaktadırlar [71].

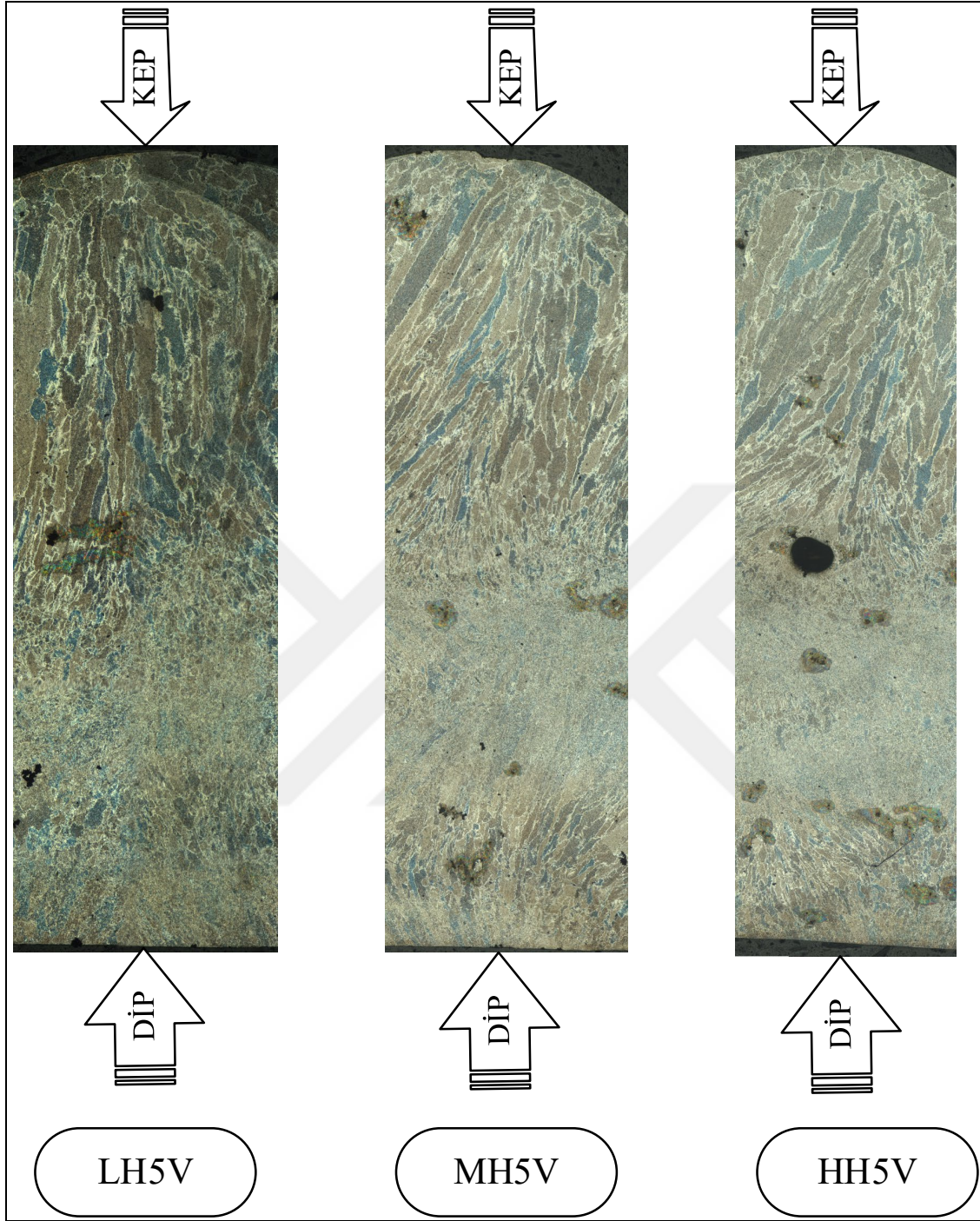
Çalışmamızda farklı ısı girdileri kullanılarak oluşturulan duvarların faz ve mikroyapı oluşumlarının araştırılması bu temele dayanmaktadır. 3 farklı ısı girdisinde oluşturulan numunelerin aynı katman kalınlığına sahip olan ve biriktirme yönüne dik kesitte numune alınanları arasındaki ilişki Resim 4.1, Resim 4.2, Resim 4.3 ve Resim 4.4’de gösterilmiştir. 1, 5 ve 10 katman imalatları tamamlanıp numune hazırlama aşamasında altlıktan üst katmanlarla çalışmanın gerçeğe yakın olacağı düşünüldüğünden dolayı altlık ile birleşme yerinden numuneler kesilmiştir. Bu sebeple Resim 4.1, Resim 4.2 ve Resim 4.3’de dip tarafta düz bir çizgi ve hemen üzerinden başlayan biriktirme görünmektedir. Kıyaslayabilmek adına 10 katman imalatlar bir kez daha hazırlanmış ve ikinci hazırlamada altlığın içerisinde kalan katmanda görselleştirilmiştir.



Resim 4.1. LH1V, MH1V VE HH1V tek katman imalatların görsel kıyası

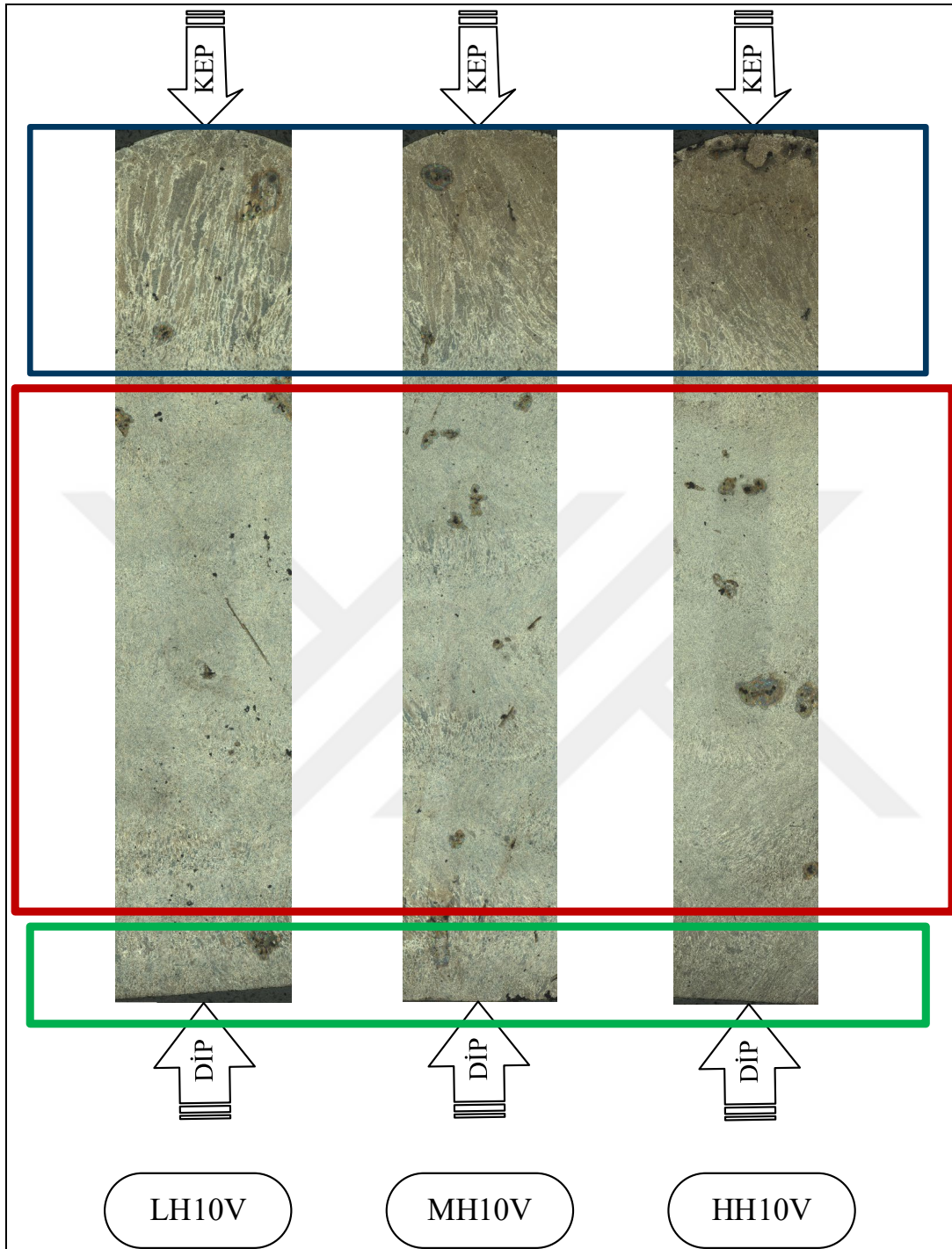
Diğer tüm durumlar sonra açıklanmak üzere sadece görsel olarak bakıldığında her 3 ısı girdisinde tek katman imalatlarda dipten kepe doğru uzanmış mikro yapı oluşumları görülmektedir. Bu mikroyapı oluşumunun katman sayısı arttıkça nasıl değişeceğini anlamak üzere 5 katman imalatların birleştirilmiş mikrofotograflarına başvurulmuştur.

Resim 4.2’de 5 katman imalatlarının birleştirilmiş mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Tek katmandan farklı olarak dipten kepe doğru orta alanda farklı bir mikroyapı oluşumu görülmektedir. Ayrıca dip tarafında bulunan uzunlamasına oluşum orta bölgede değişmekte ve kepe tarafında tekrar oluşmaktadır.



Resim 4.2. LH5V, MH5V ve HH5V imalatlarının görsel kıyası

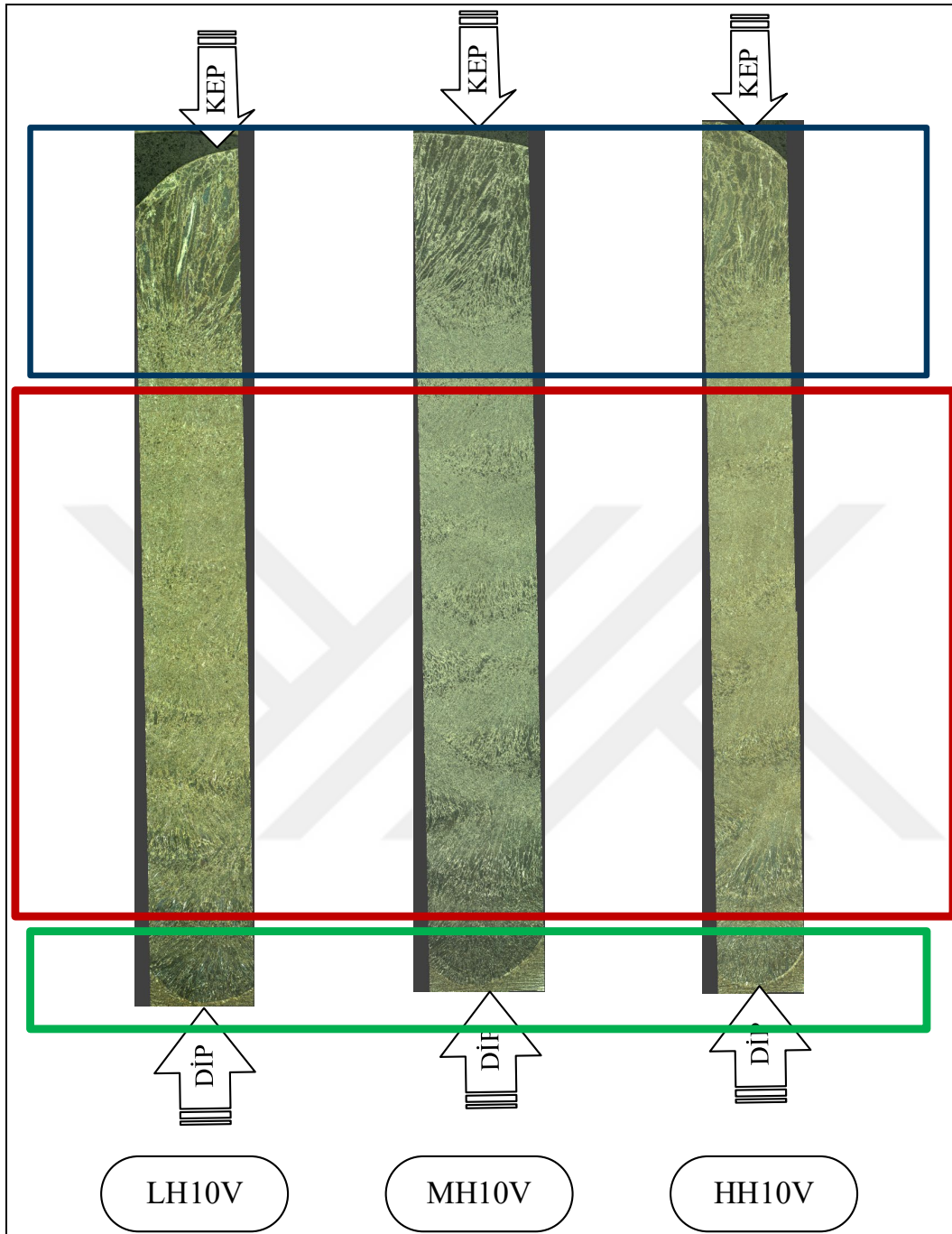
Katman sayısı arttıkça nasıl bir değişim oluşabileceğini görebilmek amacıyla 10 katman imalatların birleştirilmiş mikrofotografaları görselleştirilmiştir. Katman üzerine katman biriktirme usulü ile bir parçanın üretimi hususunda daha gerçek veriler sağlayacağı kanaatinden dolayı daha detaylı izahatlar 10 katman imalatlar üzerinden gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.3. LH10V, MH10V ve HH10V imalatlarının görsel kıyası

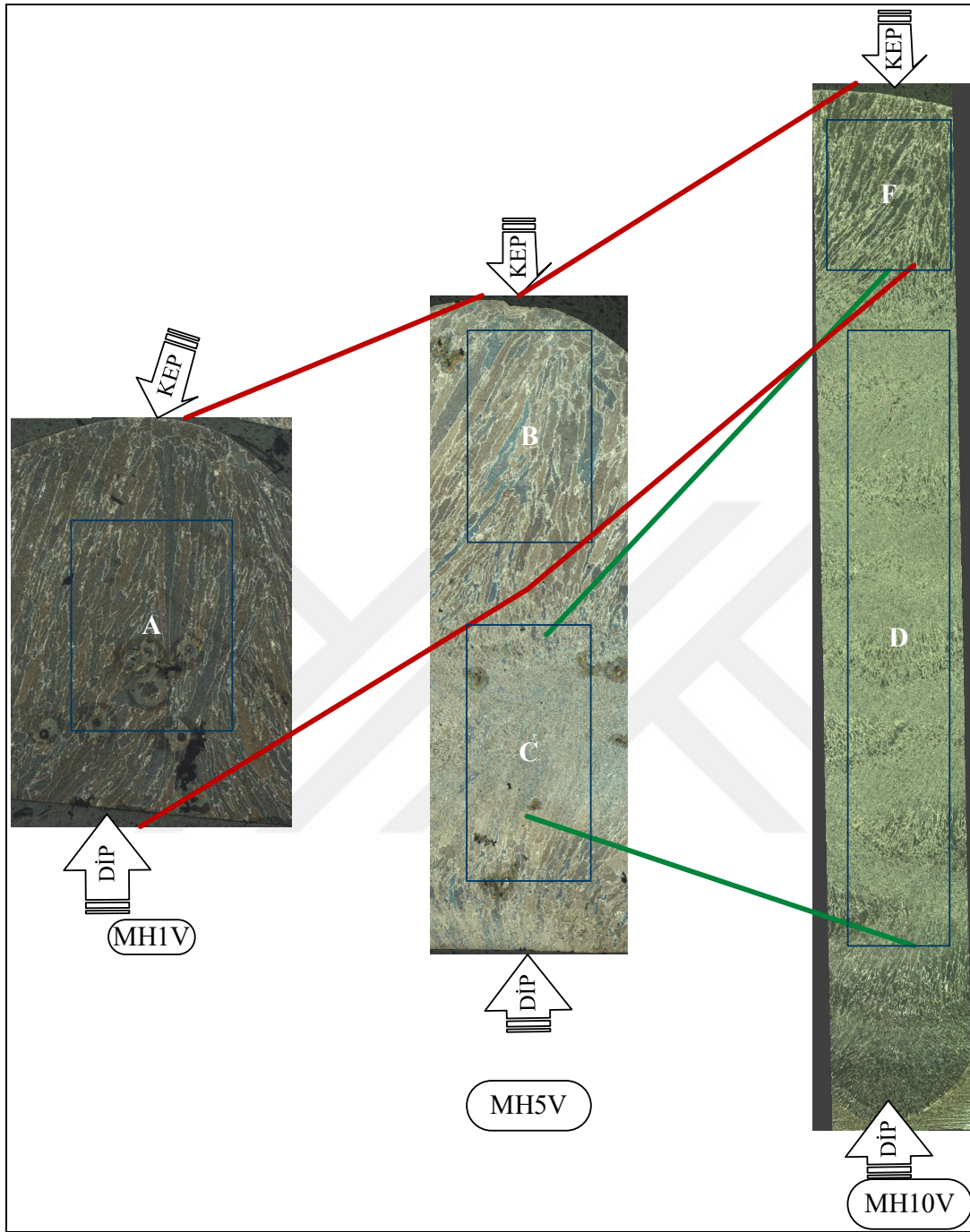
10 katman imalatların birleştirilmiş mikrofotografılarının kıyası Resim 4.3’de görülmektedir.

Bölüm 3.3’de 10 katman imalatların yeniden metalografik süreçlere sokulduğu ve mikrofotografıların alındığı belirtilmişti. Yeniden oluşturulan birleştirilmiş mikrofotografıların kıyasları Resim 4.4’de görülmektedir.



Resim 4.4. Yeniden hazırlanan LH10V, MH10V ve HH10V imalatlarının görsel kıyası

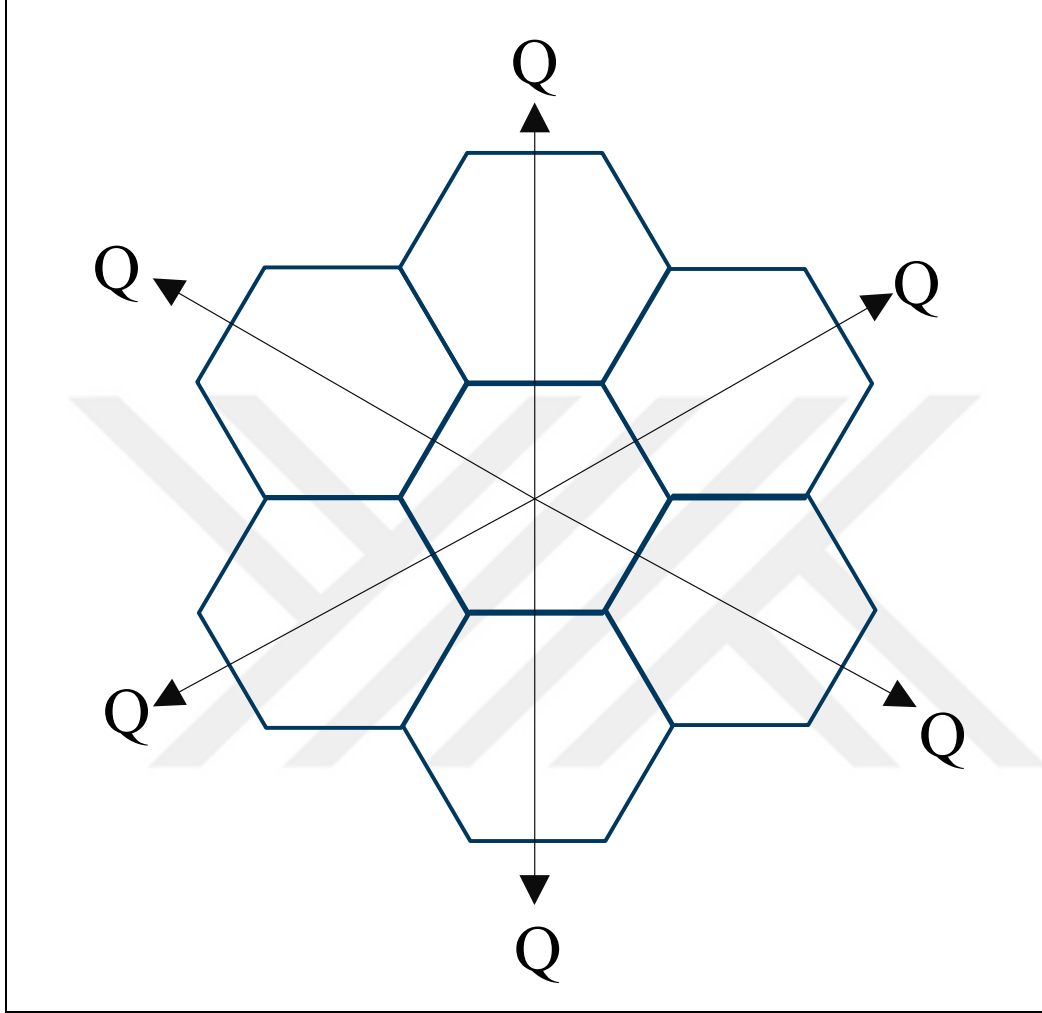
Resim 4.4’de görülen kırmızı alanda dip taraf ve kep tarafa nazaran farklılaşan mikroyapı oluşumunun genişliğinin 5 katmanlı imalata oranla arttığı dikkat çekmektedir. Kep tarafında ise yine orta kesimden farklılık gösteren ve mavi alanla gösterilen mikroyapı oluşumunun gerçekleştiği görülmektedir. Bu bağlamda çok katmanlı olarak yapılan biriktirmede mikroyapı ve faz oluşumunun (dip kısım- yeşil, orta kısım- kırmızı ve kep kısmının- mavi) ayrı ayrı ele alınması gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.1. Katman sayısı arttıkça oluşan bölgelerin birbirine göre konumu

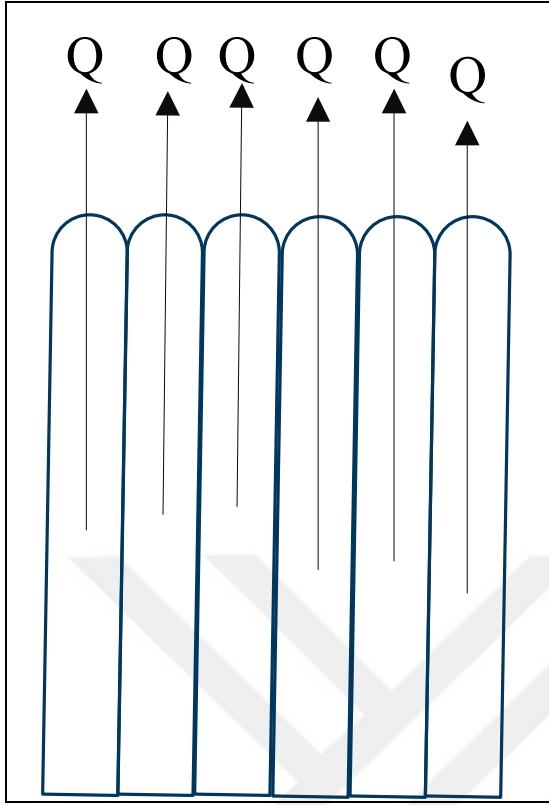
Şekil 4.1’de Resim 4.1-4.3’de verilen resimlerin durumu aktarılmıştır. Buna göre A bölgesi sırasıyla B ve F bölgesi olarak katman sayısı arttıkça karşımıza çıkmaktadır. C bölgesi ise 10 katman imalatta D bölgesi olarak karşımıza çıkmaktadır ve diğer kısımlara göre oranının arttığı görülmektedir. Bu değişim her 3 ısı girdisinde de görülmüştür.

Termal gradyan tanım olarak yapıda iki nokta arasındaki sıcaklık farkını temsil etmektedir. Termal gradyanın büyüklüğü mikroyapı oluşumunda önemlidir.



Şekil 4.2. Eş eksenli mikroyapı oluşumuna ilişkin gösterim. (Q: Isı)

Şekil 4.2 eş eksenli mikroyapı oluşumuna ilişkin gösterime aittir. Termal gradyanın düşük olduğu ve heterojen çekirdeklenmenin gözlemlendiği durumlarda eş eksenli yapı oluşumu desteklenmektedir. Resim 4.4’de orta bölgenin tekrarlı ısı girdileri ile ısı birikimine maruz kaldığı ve ayrıca soğumanın bu ısı birikimiyle yeterince gerçekleşemediği düşünüldüğünde termal gradyan düşmektedir. Bu düşüş her yöne doğru gerçekleştiğinden dolayı da eş eksenli yapı desteklenmektedir. Şekil 4.2 ideal durumu betimlemek üzere gösterilmiş olup tam poligonal bir durumun heterojen çekirdeklenmede ve karmaşık ısı şartlarda kısmi olarak gerçekleşmesi ve dolayısı ile poligonal yapı yerine yarı-poligon yapı oluşumu daha gerçekçi bir yaklaşımdır [72].

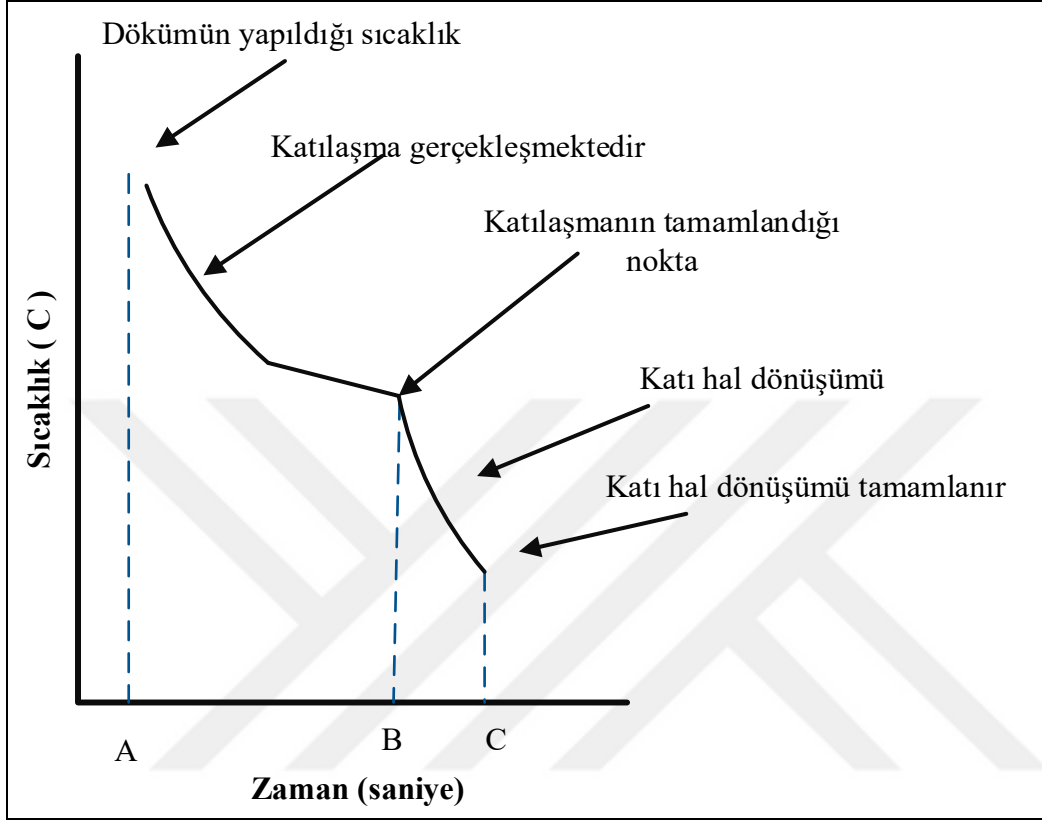


Şekil 4.3. Sütunsal mikroyapı oluşumuna ilişkin gösterim (Q:Isı)

Aynı şekilde termal gradyan heterojen çekirdeklenmede fazla ise bu durumda sütunsal yapı desteklenmektedir. Şekil 4.3 termal gradyanın yüksek olduğu durumda mikroyapı oluşumunu göstermek üzere oluşturulmuştur. Isının aktığı yöne doğru mikro yapının sütun şeklinde olduğu bu durumda yönlenmiş taneler oluşmaktadır. Bu durumun çalışmamızda tek katman imalatı Resim 4.1’de görüldüğü ve 5 katman ve 10 katmanda sütunsal mikroyapı oluşmamasının sebebinin oluşan karmaşık ısı girişi olmasına bağlı olduğu değerlendirilmiştir. Çeliklerde katı hal değişiminde çeşitli soğuma hızlarında çeşitli fazlar ve bu fazlara uygun mikroyapı oluşumu özel bazı durumları beraberinde getirmektedir. Beynitin veya ferritin kendi içinde hangi türlerde olduğu ve bu yapıların masif veya iğnesel olarak oluşması mikroyapıların eş eksenli ve sütunsal olarak sınıflandırılmasından daha önemli hale gelmektedir. [70,72,74]

Geleneksel döküm imalatında sıvı metalin bir kalıba döküldüğü ve üretilen parçanın sürekli soğuyarak katılaştığı bilinmektedir. WAAM’da ise tekrarlı ısınma ve soğumadan kaynaklı olarak üretilen parçanın doğrusal bir soğumaya sahip olmadığı Şekil 2.3, Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’de aktarılmıştır. Bu durumda WAAM teknolojik olarak yenilikçi bir üretim olmasının

yanında üretimde oluşan tekrarlı ısınma ve soğuma durumları ile de geleneksel metotlardan farklılık göstermektedir.



Şekil 4.4. Dökümde metallerin katılaşması

Şekil 4.4, döküm imalatında parçanın soğumasının gösterimi kapsamında üretilmiştir. Döküm A noktasında yapılmaktadır. Kalıba aktarılan sıvı metal bu aşamadan sonra B noktasına kadar katılaşmaya devam etmektedir ve B noktasında katılaşma tamamlanmaktadır. Soğuma B noktasından C noktasına ilerledikçe bu aşamada katı hal dönüşümleri ile faz dönüşümleri gerçekleşmektedir. Bu çalışmada ele aldığımız ER70S-6 çeliğinin dökümü üzerinden ilerlenecek olursa Şekil 3.11’de görülen faz diyagramına göre önce 1500 °C civarında sıvı fazdan katı faza dönüşen sıvı metal sonrasında faz diyagramında sırayla YMK fazından aşağıya doğru çeşitli katı hal dönüşümlerine uğramaktadır. Katılaşma ve katı hal dönüşümleri zamanın bir fonksiyonu olarak ilerlemektedir. Çelikler özelinde YMK-HMK geçişinde hızlı, yavaş ve bu ikisi arasında gerçekleşen orta düzeyde soğuma hızlarında martenzit, beynit ve ferrit fazının oluşumu özel öneme sahiptir. Hızlı, yavaş ve orta düzeyli soğuma kavramlarının öznel kavramlar oldukları aşikardır. Soğuma oranlarının hangi çeliklerde hangi tür fazları tetiklediği bu durumda önem kazanmaktadır. Burada

dökümün müdahale olmaksızın soğumasında herhangi bir yeniden ısınma veya ısı döngü oluşacak bir durum söz konusu olmadığı önemlidir. Parça büyük olduğunda orta kesimlerin geç soğumasından kaynaklı olarak kaba taneler beklenirken, kalıba temas eden kısımların sütunsal tane biçiminde oluşacağı beklenmektedir. Bu beklenti sadece döküm kalıbına yakın kısımlarda oluşabileceği gibi merkeze kadar uzanan bir şekilde de gerçekleşebilir. Bu durum parça büyüklüğü ve karmaşıklığına bağlı olarak değişebilmektedir [74]. WAAM'da ise ısı döngü oluşmaktadır. Bu ısı döngü dökümle imalattakinin aksine lineer soğumayı engellemektedir. Lineer soğumanın engellenmesi WAAM'da katman üstüne katman biriktirmenin doğal sonucu olarak görülmektedir. WAAM ile imalat sürecinde elde edilen ısınma ve soğuma grafiği ilerleyen bölümde aktarılacaktır.

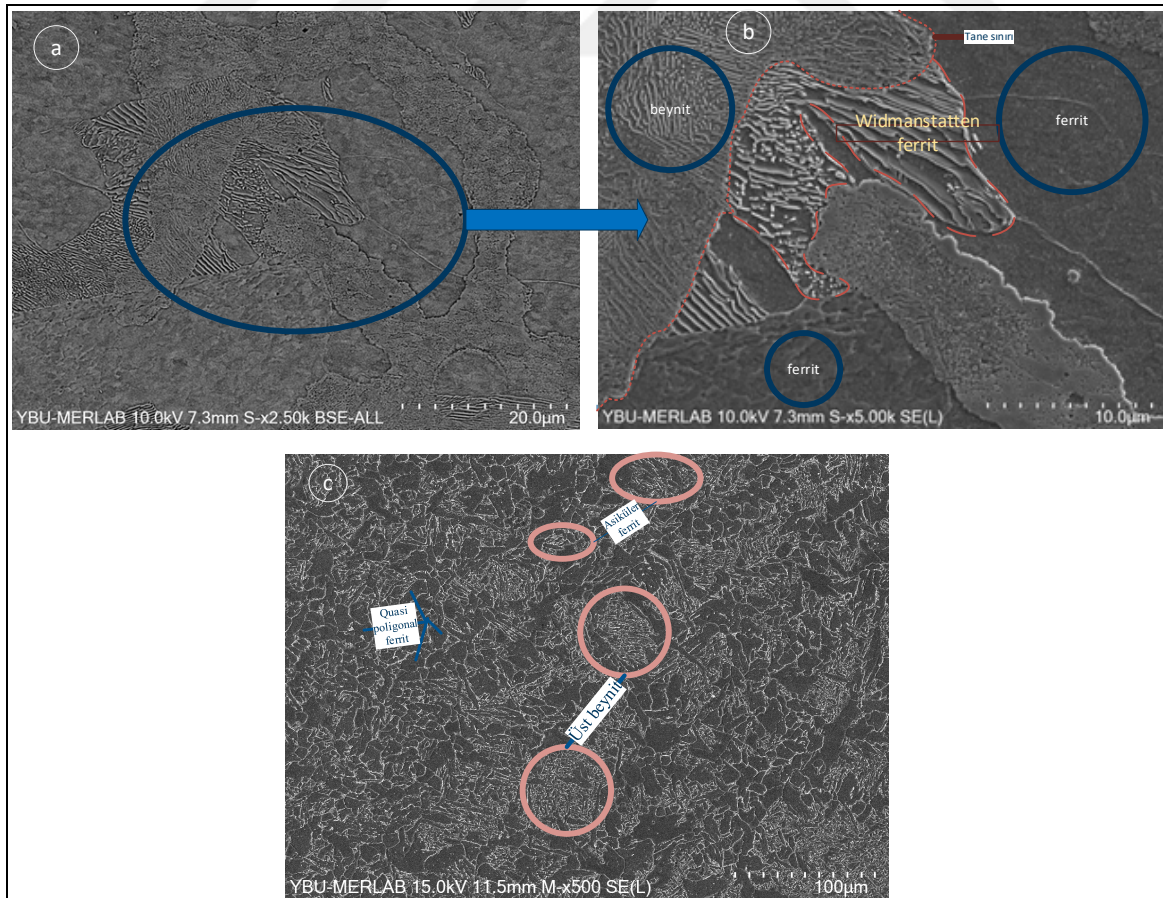
Bu durumda Resim 4.4'de gösterilen birleştirilmiş mikrofotografılarda gösterilen bölgelerde oluşan mikroyapıların ve fazların hangi saiklerle oluştuğu önem kazanmaktadır. Öncelikle bu fazların tespiti ve sonrasında nasıl oluştuğuna dönük çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Katman sayısı arttıkça yapıda bu 3 bölgenin genişliği değişmesine rağmen varlığını koruyacağı sonucuna binaen 30 katman imalatlı MH30V kodlu numune üzerinden alınan SEM görüntüleri ve EBSD analizi ile birleştirilmiş mikrofotografılardan elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2'de belirtildiği üzere ilişkilendirilecektir.



Resim 4.5. MH30V üzerinde yapılan bölgelendirme çalışması

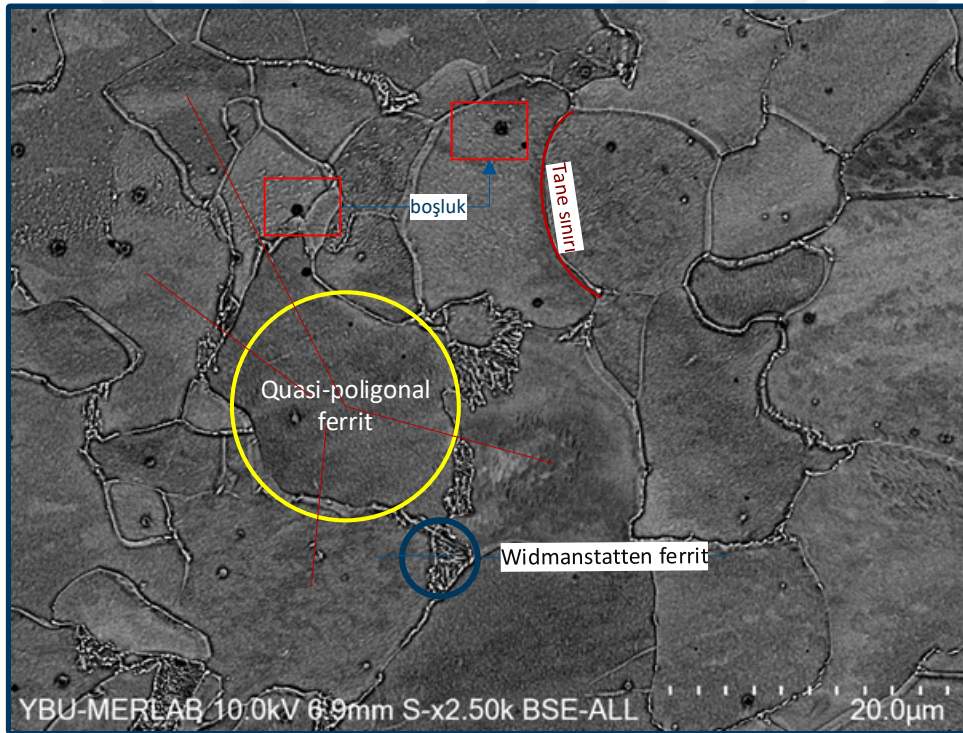
Resim 4.5’de MH30V numunesi yeşil, kırmızı ve mavi bölgelerle ayrılmıştır. Bu alanlara verilen renk kodları Resim 4.4’de verilen renk kodları ile aynı bölgeleri belirtmektedir. Yeşil ile gösterilen alanda bulunan 1 no’lu noktadan alınan ve Şekil 3.10’da verilen EBSD analiz sonucuna göre, HMK yapının baskın olduğu ve bunun ferrit varlığına işaret ettiği değerlendirilmiştir. Ancak EBSD analizlerinde, kristal yapı olarak HMK faza sahip ferrit ile HMK olarak indekslenen beynit ve hacim merkezli tetragonal (HMT) yapıda bulunan martenzit fazları, düşük karbon içeriği ve EBSD çözünürlük sınırlamaları nedeniyle çoğu zaman net olarak ayırt edilememektedir. Bu nedenle söz konusu fazların daha sağlıklı şekilde yorumlanabilmesi için ek bir karar mekanizmasına ihtiyaç duyulmuş, bu bağlamda Thermocalc programı ile elde edilen veriler EBSD verileri ile birlikte değerlendirilerek yorum yapılmıştır [73]. 1 no’lu alanda yapılan analize göre asiküler ferrit, widmanstatten ferrit, quasi-poligonal ferrit ve beynit alanları Şekil 4.5’de detaylı gösterilmiştir. Buna göre şekilde solda görünen ve 2500 büyötmeye sahip görüntünün (a) işaretli alanı 5000 büyötmeye sağdaki (b) gibi görünmektedir. Bu görüntüde tane sınırları kırmızı ile işaretlenmiş ve ferrit tane sınırları gösterilmiştir.



Şekil 4.5. MH30V kodlu numunenin dip (yeşil alan) bölgesine ait SEM görüntüsünün analizi

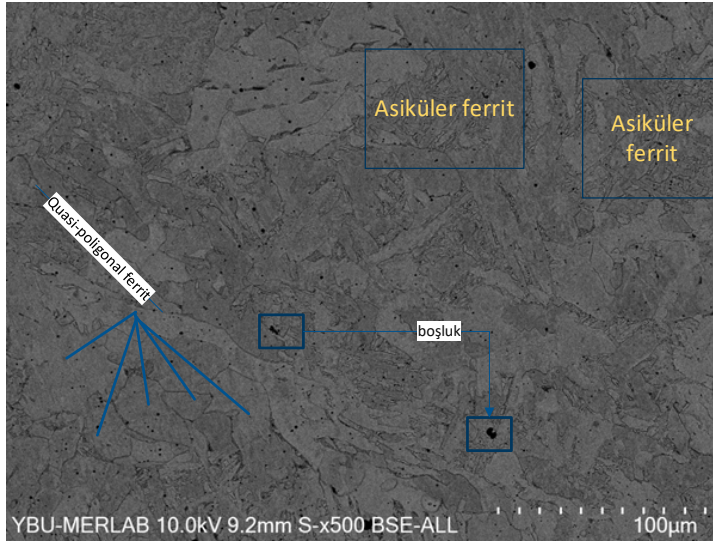
Ferrit haricinde beynit alanları da işaretlenmiştir. Bu görüntü analizlerinde literatürde daha önce analiz edilmiş görüntüler ile bu çalışma kapsamında elde edilen görüntüler incelenmiştir. Ferrit faz içerisinde iğne şeklinde büyüyen widmanstatten ferrit fazı da bu görüntü de işaretlenmiştir. C’de ise daha küçük büyütmede asiküler ferrit, beynit ve quasi poligonal alanları gösterilmiştir.

Kırmızı alanda 5 numara ile, mavi alanda ise 8 numara ile gösterilen noktalarda yapılan EBSD analizlerinde de HMK yapının baskın olduğu görülmüştür. Şekil 3.10’da bu duruma ilişkin oranlar verilmiştir. Bununla birlikte, EBSD analizlerinde YMK yapıya sahip ostenit fazına rastlanmamış olup, ostenitin kalıntı seviyede olabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 4.6. MH30V kodlu numunenin orta (kırmızı alan) bölgesine ait SEM görüntüsünün analizi

Şekil 4.6’de MH30V kodlu 30 katman biriktirme ile elde edilmiş numunenin orta bölgesinden alınan SEM görüntüsünün izahlı şekli görülmektedir. Tane sınırları bariz olarak görülebilen görüntüde ferrit fazı quasi-poligonal denilen poligona yakın şekilde görünmektedir. Widmanstatten oluşum, ferrit taneleri içerisinde görünmektedir ve yapının çeşitli yerlerinde üretimden kaynaklı boşluklar göze çarpmaktadır.

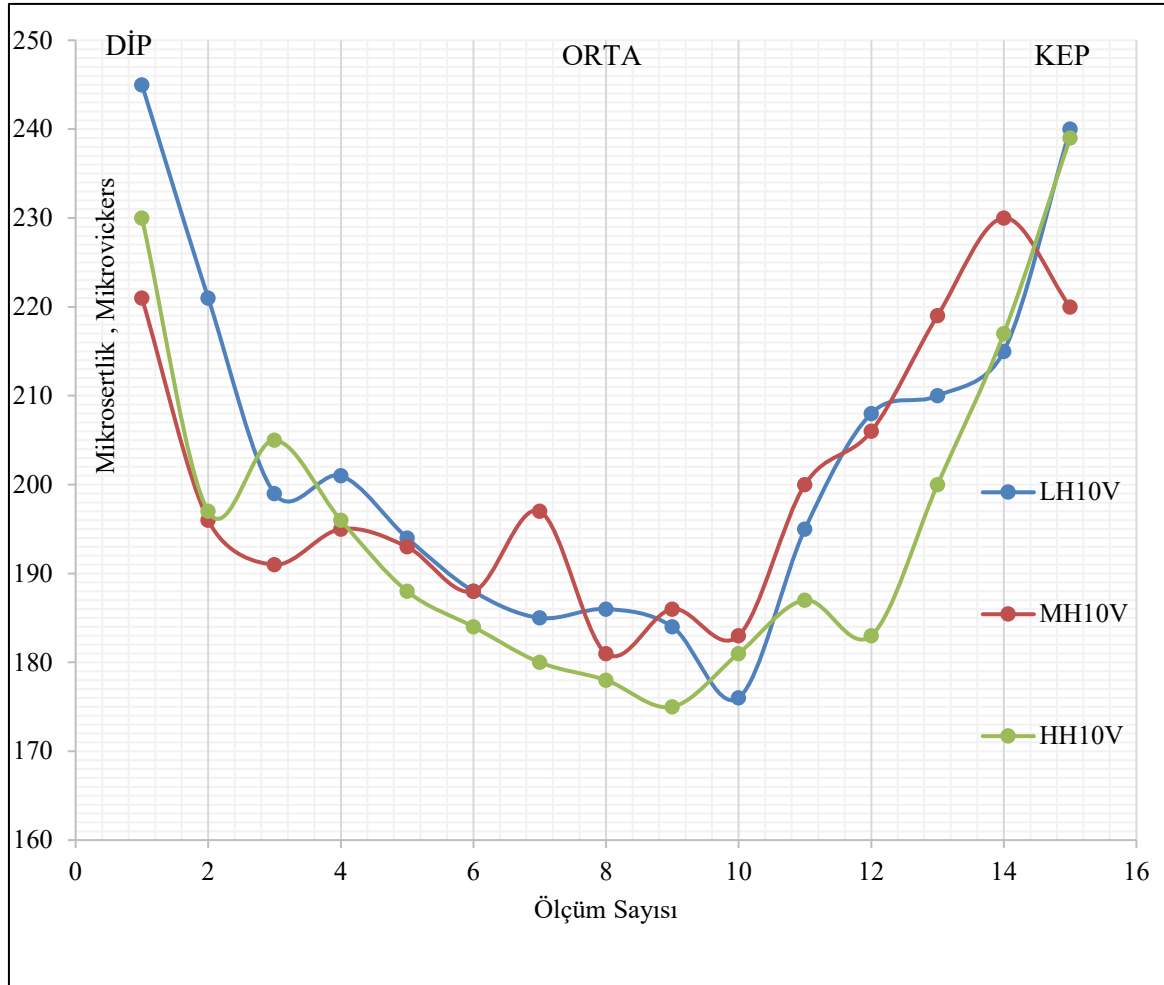


Şekil 4.7. MH30V kodlu numunenin kep (mavi alan) bölgesine ait SEM görüntüsünün analizi

Resim 4.5’de 9 numara ile gösterilen alana ait SEM görüntüsünün irdelenmesi Şekil 4.7’de görülmektedir. Buna göre asiküler ferrit bölgesi ile quasi-poligonal ferrit bölgesi haricinde bir alan tanımlanamamıştır. Bu durumda yukarıda da belirtildiği üzere işaretlenen her alanda SEM görüntüleri ile EBSD analizlerinde neticesinde ortaya çıkan her üç alanda da HMK yapının baskın faz olduğu olgusu paralelinde örtüşme görülmüştür. Optik mikroskopisi ve elektron mikroskopisi çalışmaları neticesinde elde edilen verilerin literatürde sıklıkla mekanik özellikler ile hizalanması beklenmektedir. Bu bağlamda gerçekleştirilen mikrosertlik testlerine ilişkin hazırlanan grafik, Şekil 4.8’de görülmektedir. Şekil 4.5-4.7’de elde edilen fazlar geleneksel metotlarda elde edilen faz tanımlarıyla aynı olmaktadır. Esasen bir döküm işleminden WAAM’ı ayırt eden şey çelikler özelinde oluşan fazlar ve mikroyapı türleri değil bu faz ve mikroyapıların nasıl oluştuğu olarak karşımıza çıkmaktadır. Fazların oluşum dinamikleri de keza aynı şekilde yorumlanabilir.

İster döküm ister WAAM gibi yenilikçi bir üretim metodu olsun çelikler özelinde karbon içeriğine göre oluşabilecek fazlar belirlidir. Bu fazların ne durumda oluşacağı ise tamamen soğuma ile alakalı durumdadır. Su verme işlemi dökümden sonra uygulanan bir uygulama olarak parçanın hızlı soğutulması ile parçanın iç yapısında arzu edilen değişikliklerin oluşmasıdır. Su verme gibi işlemler üretim sonrası yapılan işlerden olduğundan çalışmamız kapsamında ayrıca değerlendirilmemektedir.

Elektron mikroskopisi ile tespit edilen bu fazlar belirlenen alanlarda (mavi, yeşil ve kırmızı) farklı fazlardan müteşekkil olduğunu da ispatlamaktadır. Bu fazların oluşumunun WAAM'a özel bir soğuma deseninin sonucu olduğu değerlendirilmiştir. Bu desenin ortaya çıkarılması için gerçek soğuma hızlarının çalışılan malzemeye özel üretilmiş TTT diyagramları ile izahı gerekmektedir.

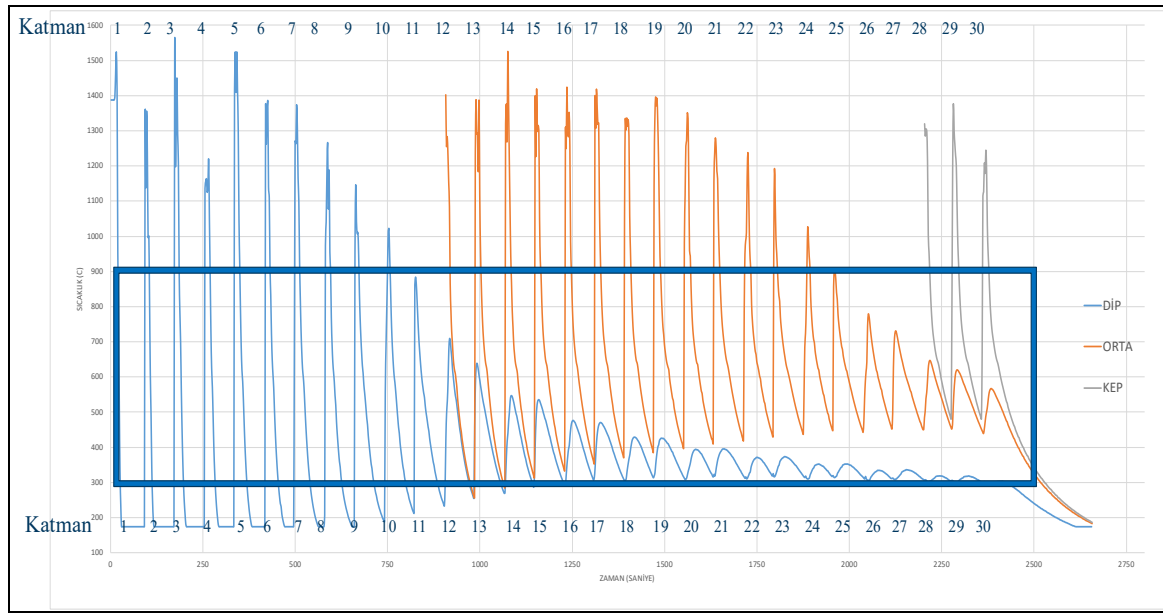


Şekil 4.8. LH10V, MH10V ve HH10V numunelerinde gerçekleştirilen mikrosertlik analizi

Oluşturulan grafikte üç farklı ısı girdisinde elde edilen numunelerin her birinde dipten kepe doğru mikrosertliklerin önce düştüğü sonra yükseldiği görülmüştür (Şekil 4.8). EBSD analizleri ve SEM görüntüleri ile optik mikroskopisi analizleri neticesinde dip kısmında asiküler ferrit, quasi-poligonal ferrit ve üst beynit, orta alanda eş eksenli tane formunda quasi poligonal ve poligonal ferrit ve kepe kısmında asiküler ferrit ile üst beynit fazının olduğu değerlendirilmiştir. Literatürde üst beynit ile asiküler ferritin benzer mekanik özelliklere sahip olduğu ve bu iki fazın poligonal ve quasi- poligonal ferrit fazından daha yüksek sertlik

değerine sahip olduğu göz önüne alındığında mikrosertlik değerleri ile elektron ve optik mikroskopisinden elde edilen ve değerlendirilen verilerin örtüştüğü görülmüştür [74,75].

Bu analizlere ek olarak, üretilen soğuma diyagramları ile Thermocalc vasıtasıyla türetilen TTT diyagramlarının ilişkilendirilmesi çalışmaları ile çalışmamıza derinlik katılması amaçlanmıştır.



Şekil 4.9. MH30V'nin ısı kamera çıktıları

Isıl kamera ölçümleri neticesinde dip, orta ve kep bölgelerine (bkz. Resim 3.24) ait ısınma-soğuma verilerinin zamana bağlı olarak incelenmesi neticesinde Şekil 4.9'de bulunan grafik elde edilmiştir. Bu grafik vasıtasıyla;

1. İmalat aşamasında ilgili katmanın azami ve asgari sıcaklığının belirlenmesi
2. Soğuma hızının ilgili katman nezdinde hesabı
3. 900 °C ile 300 °C arasında kalan katmanların izlenebilmesi

sağlanabilmektedir.

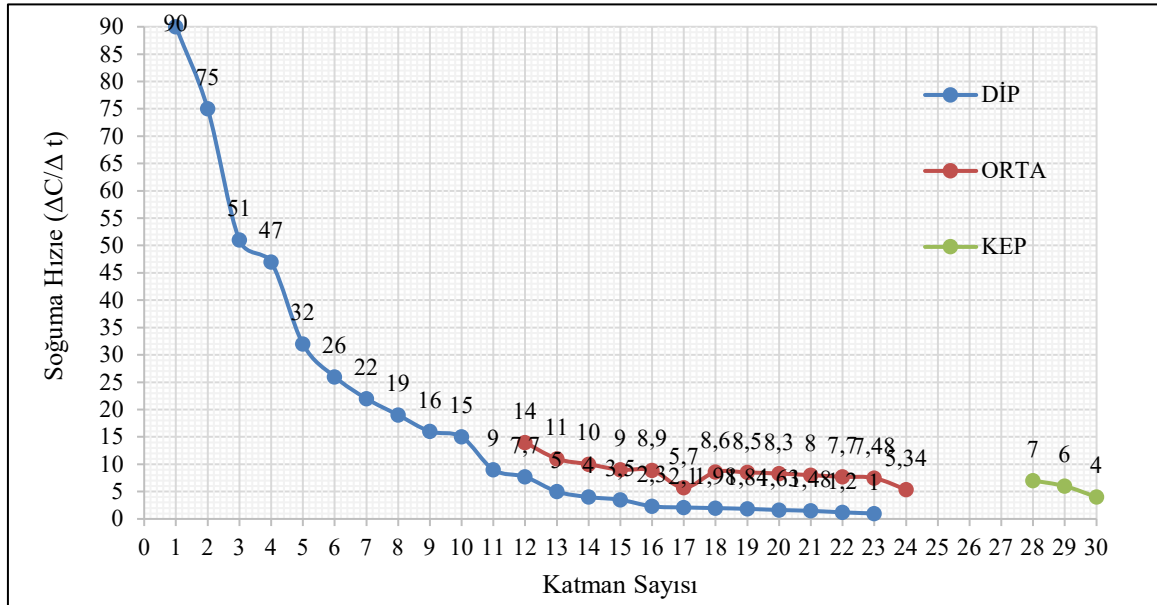
Bu bağlamda dip kısımdaki alanın tüm ısı kamera kaydı (30 katman imalatı boyunca) orta alandaki alanın 19 katman boyunca ve kep alanının 3 katman boyunca ısınma-soğuma döngüsü izlenmiştir. Şekil 4.9'de görünen kalın mavi alan 900 °C ile 300 °C limit değerlerini göstermektedir. Bu sıcaklık aralığı, aktarılan ısı transferi miktarı göz önünde bulundurulması

gereken önemli bir kriter olsa da izlenilen katmanın HMK-YMK değişimine işaret edebileceğinden dolayı değerlendirilmesi gereken bir aralıktır [51]. Nitekim dip taraf izlemesinde 11. katman imal edilirken izleme yapılan dip tarafın sıcaklığının HMK-YMK dönüşüm sıcaklığını aştığı görülmektedir. Dönüşüm için gerekli olan ısının ayrıca hesaplanması gerekse de bu sıcaklığı aşmanın yapıda lokal veya genel olarak faz dönüşümüne sebebiyet vereceği değerlendirilmiştir. Bu durumda soğuma hızlarının ayrıca hesaplanması ve yorumlanması gerekmektedir. Şeklin daha anlaşılır şekilde yorumlanabilmesi için Çizelge 4.3 hazırlanmıştır.

Çizelge 4.3. Isıl kamera verilerinin yorumları

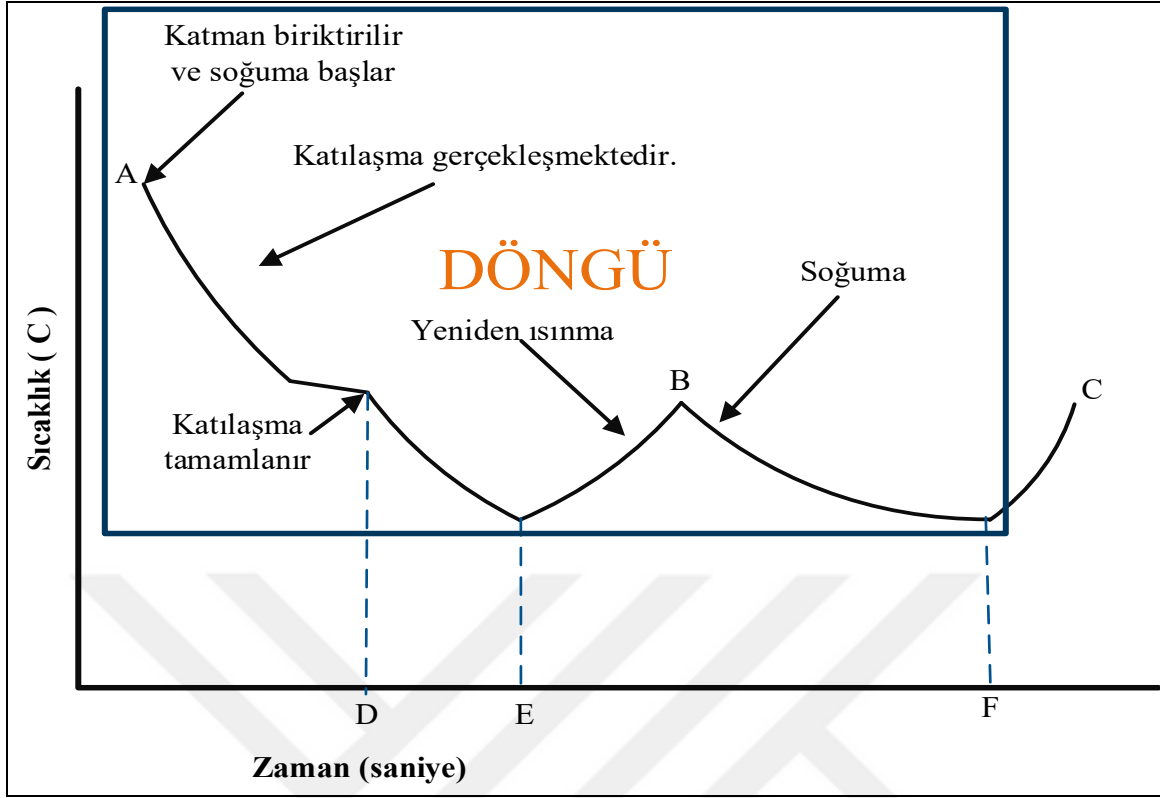
Durum	Bölge	DİP	ORTA	KEP
İzleme		30 katman boyunca	19 katman boyunca	3 katman boyunca
900 °C-300 °C		11 katman boyunca	14 katman boyunca	3 katman boyunca
300 °C'nin üzerinde soğumanın durması		18 katman boyunca	18 katman boyunca	3 katman boyunca

Bu çizelgedeki çıkarılan özete göre katman sayısı arttıkça duvarın her yerinde Çizelge 3.2'de belirtilen ve 60 saniye olan tabakalararası bekleme süresine rağmen soğuma hızı ciddi oranda düşmektedir. Bu durum imalat-spesifik bir durumdur. Bu durumu tam olarak izah edebilmek maksadıyla Şekil 4.6 oluşturulmuştur.



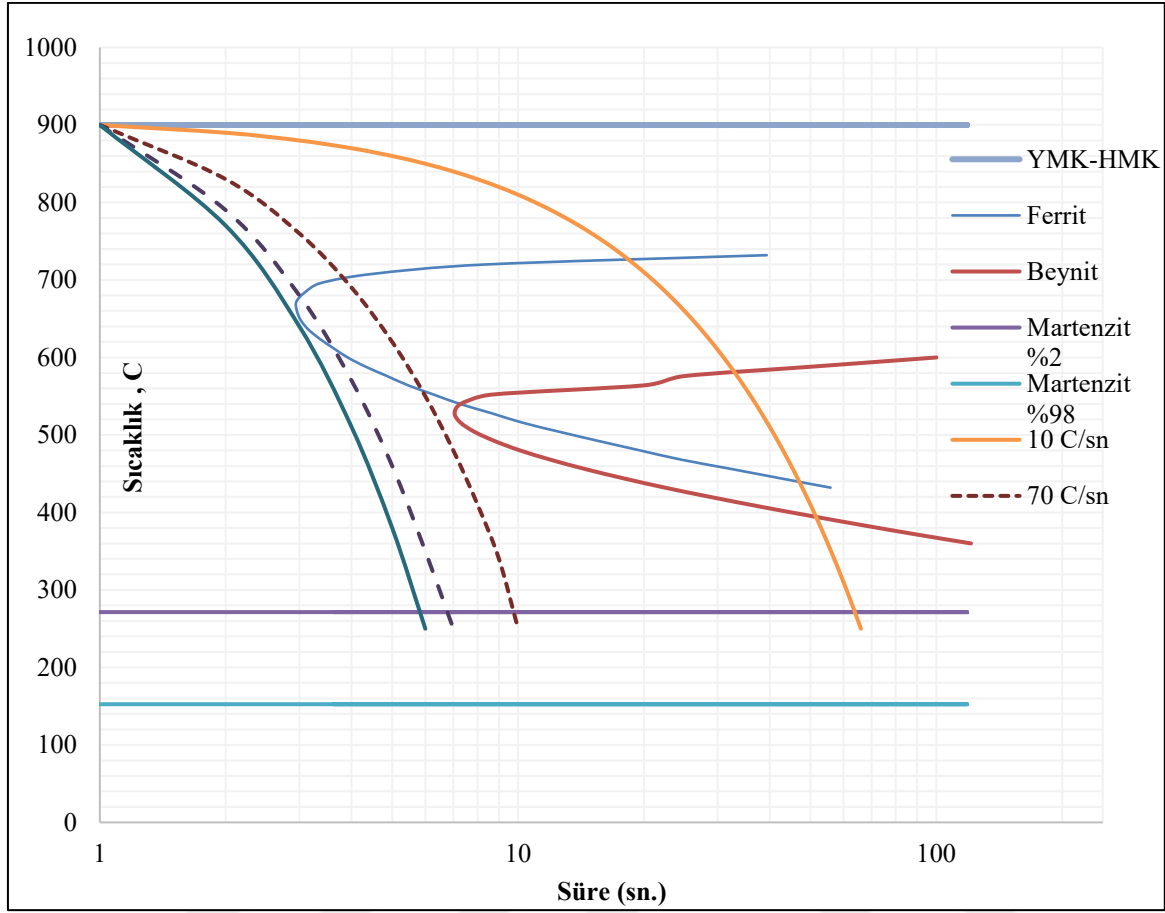
Şekil 4.10. Soğuma hızı- Katman Sayısı grafiği

Bu grafiğe göre dip kısım için soğuma hızı $90\text{ }^{\circ}\text{C /sn}$ 'den $1\text{ }^{\circ}\text{C /sn}$ değerlerine kadar düşmektedir. Ayrıca soğuma hızı eğrisi 11. katmandan sonra asimptot karakterinde ilerlemektedir. Orta kısım için $14\text{ }^{\circ}\text{C/sn}$ ile başlayan soğuma hızı $5\text{ }^{\circ}\text{C /sn}$ değerlerine düşmektedir. Keza kep tarafında da durum aynıdır. Her bir soğuma eğrisi katman sayısı eksenine asimptot karakterinde ilerlemektedir. Bu durum soğuma hızının giderek yavaşlaması olarak yorumlanmıştır. Yavaşlayan soğumanın yapıda ne gibi bir değişim yapacağına dair bir yaklaşıma olan ihtiyaçtan dolayı ICME programı olan Thermocalc çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10'daki veriler Şekil 3.12'deki grafikte çeşitli senaryolarda birleştirilmiş ve Şekil 4.11 elde edilmiştir. Oluşturulan CCT diyagramında çeşitli soğuma hızları çalışılmıştır. Buna göre mavi renkli ferrit burnunu kesmeden gerçekleşecek soğumalar martenzit fazı ile sonuçlanacağından dolayı takribi $130\text{ }^{\circ}\text{C/sn}$ ve üzerindeki soğumaların yapıda martenzite sebebiyet vereceği görülmektedir. Bu sebeple çalışmamızda bu derece yüksek soğuma hızı yakalanmadığından ve katmanlı imalat doğası gereği tekrarlı ısınmaya maruziyetten dolayı martenzit fazının oluşmayacağı değerlendirilmektedir. EBSD çalışmalarında elde edilen baskın fazın HMK- ferrit olacağı ve beynit ile martenzitin ayrıca değerlendirilmesi gerektiği önermesi, elde edilen soğuma oranları göz önünde bulundurulduğunda martenzitin oluşmayacağı değerlendirildiğinden dolayı ferrit ve beynit fazları üzerinden ilerlememiz gerektiği biçiminde revize edilmelidir.



Şekil 4.11. WAAM’da metallerin katılma süreci

Şekil 4.11, WAAM’da bir metalin katılmasını aktarabilmek için hazırlanmıştır. Buna göre bir katman ergime derecesi olan A noktasında biriktirilir ve katılma için soğumaya bırakılır. Belirli bir süre sonunda D noktasına ulaşan sıcaklık ile katılma tamamlanır ve bu katmanda D noktasından E noktasına doğru katı hal dönüşümleri de dahil dönüşümler devam eder. Bu esnada bir sonraki katman E zamanında biriktirmeye başlanır ve ısı ilk üretilen katmana doğru aktarılır. Bu durumda ilgili katmanın sıcaklığı B noktasına gelmiştir. Üstteki katmanın imalatı tamamlandıktan sonra F noktasına doğru katı hal değişimi başlar ve devam eder. F noktasında ilk katmanın üzerine ikinci katmanın biriktirmeye başlandığı noktadır ve C noktasında bu ikinci katmanın üretimi bitmiştir. Şekil 4.9’da görülen döngü kutucuğu ise WAAM’daki ısı döngüyü aktarabilmek için verilmiştir. Bu döngü A noktasında başlayıp F noktasında bitmektedir. Şekil 4.4’de gösterilen dökümde metallerin katılma davranışından farklı olarak bir parçanın karmaşık ısı şartlarında kaldığı görülebilmektedir.



Şekil 4.12. ER70S-6 için oluşturulan CCT diyagramı

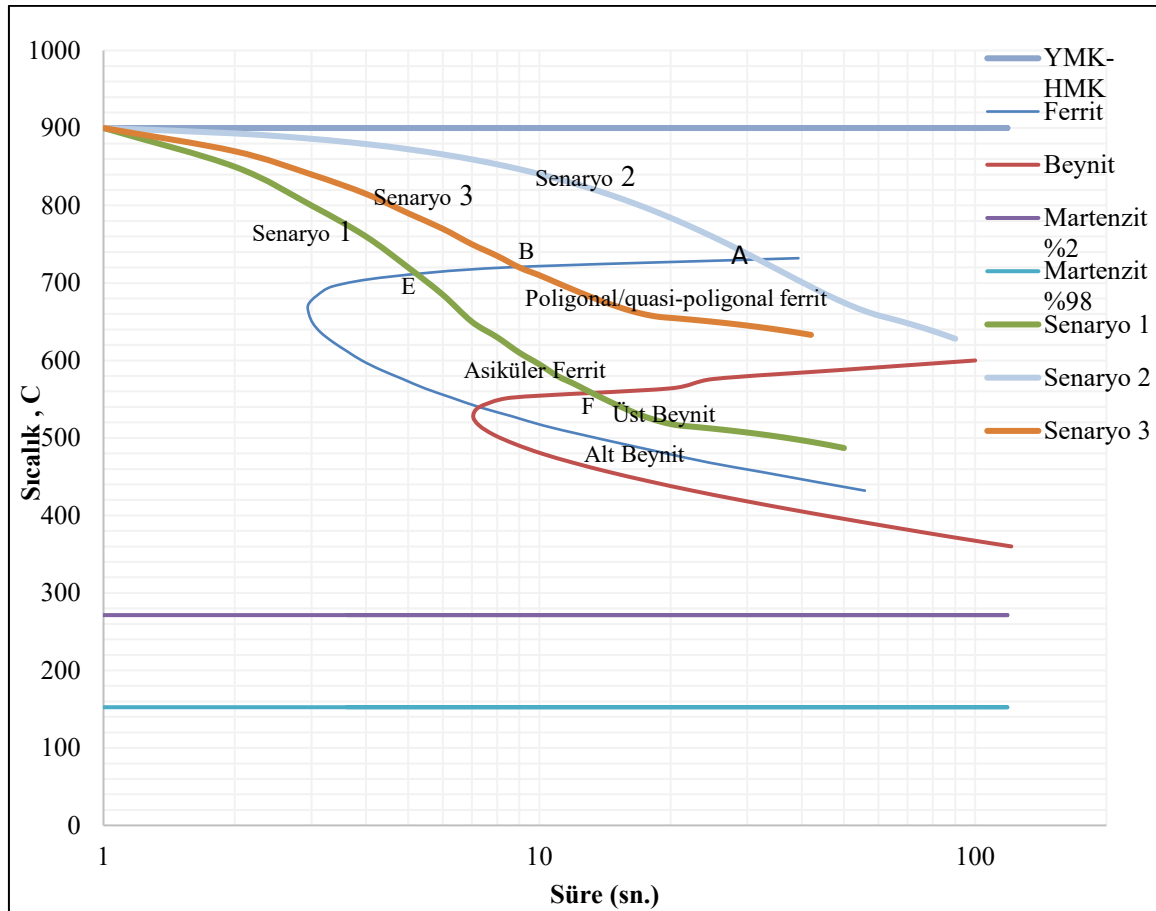
Ferrit ve beynit fazlarının varlığı, soğuma hızına göre çizilen çeşitli soğuma eğrilerinin ferrit ve beynit eğrilerini kesip kesmediğine göre değil tekrar ısınmadan ve katmanlarda biriken ısının da devreye alınmasını gerektiren bir senaryoya göre irdelenmelidir. Bu yönüyle geleneksel TTT ve CCT diyagramları ile tekrarlı ısınma ve soğumaya sahip katmanlı imalatı yorum yapmak mümkün olmamaktadır. Bu bağlamda soğuma hızları üzerinden oluşturulan Şekil 4.10'da görülen gerçekliğe uygun olarak zamana bağlı bir soğuma grafiği elde edilmelidir. Bu sebeple Şekil 4.12'nin katmanlı imalat gerçeğine uygun olarak modifiye edilmesi uygun görünmektedir. Pik sıcaklık değerleri 1400 °C civarında olduğu ve bunun anlık olarak yakalandığı Şekil 4.9'de görülebilmektedir. Tabakalararası bekleme süresinin 60 saniye olduğu ise Bölüm 3.2'de raporlanmıştır. Bu durumda dip, orta ve kep bölgeye ilişkin aşağıdaki şekilde yorum yapılabilir.

•**DİP**: İlk birkaç katman hızlı soğumaktadır. Sonrasında üretilen her katmanla birlikte soğuma yavaşlamakta, katman sayısı arttıkça dip bölgede izotermal bir süreç oluşmaktadır. Bu izotermal süreçte iletim ve taşınım yoluyla soğuma ve yeni üretilen katmanlardan

kaynaklı ısınma arasında kısmi bir denge mevcuttur. 11 katman üretimden sonra dip bölgede YMK-HMK dönüşümünü sağlayacak bir sıcaklık geçişi yoktur. Tüm bunlar neticesinde yapıda asiküler ferrit ve üst beyrit oluşumu desteklenmektedir. Yapıda quasi-poligonal ferrit'de mevcuttur.

- ORTA: Bu bölge, üzerinde biriktiği katmanların sıcaklığından kaynaklı olarak dip bölgedeki başlangıçta yüksek seyreden soğuma hızlarının aksine düşük soğuma hızlarında soğumaktadır. Bu düşük soğuma oranları quasi-poligonal/poligonal ferrit fazı oluşumunu desteklemektedir. Quasi-poligonal ferrit fazında oluşan taneler üzerinde yapılan optik mikroskopisi çalışmalarında tanelerin her ısı girdisi durumunda en boy oranlarının birbirine yakın olduğu ve eş eksenli tanelerin baskın olduğu sonucuna varılmıştır.
- ÜST: Bu bölge, orta bölgede yapılan yorumda olduğu gibi sıcak katmanlar üzerine imalatın yapılması sebebiyle düşük soğuma hızlarında soğumaktadır. Orta bölgeden farklı olarak üretim bitip kep tarafta üzerinde katman bulunmayan serbest uçtan taşıma ile daha fazla soğuma oranı yakalandığı değerlendirilmektedir. Bu durumda asiküler ferrit oluşumu görülmekle birlikte quasi poligonal ferrit oluşumu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.4'de geleneksel imalat yöntemi olan döküm metodunda bir alaşımın katılaşması durumu aktarılmıştı. Eğer ER70S-6 çeliğinden döküm ile bir parça imal edilmek istenseydi bu durumda karşımıza çıkacak soğuma eğrilerinin Şekil 4.12'deki şekilde olmasının bekleneceği değerlendirilmektedir. Dökümden farklı olarak WAAM'ın karmaşık ısı girdisi ve bu sebeple karmaşık soğuma durumu bir parça boyunca farklı mikroyapı ve faz bölgelerinin oluşmasına olanak vermekle geleneksel metotlardan ayrılmaktadır.



Şekil 4.13. Modifiye edilmiş CCT diyagramı

Bu bağlamda tüm veriler bütüncül irdelendiğinde Şekil 4.13’de bulunan CCT diyagramı elde edilmiştir. Bu diyagramda yapılan üretimden elde edilen gerçek soğuma verileri ile reelde olduğu gözlemlenen ve tanımlanan fazların birleştirilmesi ile 3 farklı senaryo elde edilmiştir. Senaryo 1 dip kısımdaki veriler ve fazlar kullanılarak elde edilmiştir E noktasında ferrit eğrisini kesen soğuma hızlı şekilde quasi poligonal ferrit bölgesinden geçerek asiküler ferrit bölgesine ulaşmakta ve burada F noktasında üst beynit bölgesine girmektedir. Bu alanda üst beynit bölgesinde soğuma hızının, katman sayısı artmasıyla iyice azaldığı modellenmiştir. Senaryo 2 ise orta kısımdaki soğuma verilerinden elde edilmiştir. Ferrit eğrisini A noktasında kesen soğuma hızı neticesinde poligonal ve quasi poligonal ferrit ile oluşmaktadır. Senaryo 3 ise üst kısmın soğuma verileri baz alınarak türetilmiştir. Bu senaryoda B noktasında ferrit eğrisini kesen soğuma neticesinde quasi poligonal ferrit oluşurken soğuma hızı asiküler ferrit bölgesinde azalma eğilimindedir. Sonuç olarak yapıda asiküler ferrit ile quasi poligonal ferrit oluşumu gözlemlenmektedir.

Kurgulanan deney sistematiki kapsamında gerçekleştirilen tüm deneylerin sonuçları göz önünde bulundurulduğunda yapılan bilimsel çalışmalar ile karşılaştırma yapmanın deneylerin tartışılması ve validasyonu açısından önem arz ettiği değerlendirilmiştir. Bu bağlamda validasyon için literatürde ER70S-6 kaynak teli ve WAAM kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan güncel olanları taranmış ve bu çalışmalar incelenmiştir.

Rodrigues vd.'nin 2019 yılında yaptığı çalışmada ER110S-G kaynak teli kullanmıştır. Her ne kadar ER70S-6 kaynak teli kullanmış olmasa da içerik ve kapsam açısından çalışmamızla çakışan yönleri olduğundan dolayı bu çalışmanın ele alınmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Üretimlerde 221 J/mm ve 511 J/mm olarak 2 farklı ısı girdisi değeri ile çalışıldığı raporlanmıştır. Mikrosertlik deneylerinin ortalama değer olarak düşük ısı girdisinde üretilen numunelerde dipten kepe doğru azalmakla birlikte 300-230 mikrovickers aralığında gözlemlendiği raporlanmıştır. Yüksek ısı girdisinde ise bu değişim 300-265 arasındadır. Isı girdisinden bağımsız olarak bölgesel çakışan sertlik değerleri göze çarpmaktadır ve ayrıca Rodrigues vd. bu sertlik değişiminin CCT grafikleri üzerinden tanımlanan fazlarla örtüştüğünü belirtmektedir. SEM görüntülerinin tek noktadan yapıldığı ve bu alanda martenzit fazının tanımlandığı görülse de çalışmada raporlanan gerçek soğuma hızlarında martenzit oluşmayacağı bildirilmiştir. Bu bağlamda martenzitin ve martenzitle birlikte kalıntı ostenitin adacık halinde ve noktasal olabileceği değerlendirilmiştir. Rodrigues vd.'nin yaptığı çalışma, çalışmamızla oluşan fazların yaygın olarak beynit ve poligonal ve quasi-poligonal ferrit olarak raporlanması yönüyle örtüşmektedir. Ayrıca ısı girdisi değiştirilerek üretilen duvarlarda faz oluşumlarının değişmediği de diğer örtüşen nokta olarak görülmüştür. Özel olarak ortalama tane boyutu verisi bulunmasa da SEM analizleri ölçeklerinde oluşan ferritin tane boyutunun 15 mikron civarında olduğu ölçekten hesaplanmıştır. Bu değer çalışmamızda elde ettiğimiz değerle örtüşmektedir lakin Rodrigues vd.'nin elde ettiği değer malzeme farklılığından dolayı referans olamayacağı değerlendirilmektedir [51]. Farshchi vd.'nin 2024 yılında yaptığı çalışmada St37 kalite altlık üzerine ER70S-6 türünde çelik teli WAAM-MIG yöntemini kullanarak biriktirmiştir. Biriktirme neticesinde 382-5562 J/mm ısı girdisi aralığında değişen parametre setleri tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimler duvarların katman sayısı arttıkça farklı ısı girdilerinde gerçekleşmesi üzerine kurgulanmış ve sonuçta çalışmamızda farklı ısı girdilerinde elde edilen sonuçlarla paralel sonuçlar ortaya çıktığı belirlenmiştir. Farshchi vd., 2024 ile çalışmamız kapsamındaki belirgin fark aynı duvarda farklı ısı girdilerinde üretilen katmanlarda oluşan ortalama tane boyutu ölçümleridir. Bunun sebebinin bu deneylerin

duvarların farklı noktalarında oluşan sütunlu taneler üzerine yapıldığıdır. Çalışmamızda ortalama tane boyutları orta bölgelerde ve poligonal-quasi poligonal olduğu görülen bölgelerden alınmıştır. Farklı bir deney kurgusu ile araştırmacılar çalışmalarını gerçekleştirmiş olsa da çalışmada asiküler ferrit ve poligonal ferrit oluşumu raporlanmıştır. Diğer taraftan Farshchi vd.'nin yaptığı çalışmada TTT diyagramları çalışılan çelik için Jmat PRO isimli ICME programında hesaplatılmış ve çeşitli soğuma hızlarında oluşabilecek fazlar raporlanmıştır. Bu fazlar dilatometre deneyi ile korele edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada sürekli soğuma durumu göz önünde bulundurularak devam edildiğinden çalışmamızla ayrılmaktadır. Üretimin sabit parametre ile gerçekleştirildiği 2. Durumda üretilen duvar üzerinde yapılan mikrosertlik ölçümlerinde kepten dipe doğru ölçülen en düşük mikrosertlik değerinin 70 mikrovickers ve en yüksek de 320 mikrovickers olduğu görülmektedir. Bu ölçümler çalışmamızda elde ettiğimiz mikrovickers değerleriyle aynı değildir. Altılığa yakın bölgeden alınan sertlik sonuçlarının her 3 durumda da en yüksek değerde olması ile kepten alınan sertlik değerlerinin en düşük değerde olması mikroyapı oluşumları ile detaylı körele edilmediğinden yorum yapılamamıştır [77]. Ayan'ın 2024 yılında yaptığı çalışmada ER70S-6 teli ile 316LSi paslanmaz çelik teli belirli oranlarda karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yapıda martenzit ve beynit türünde fazların oluştuğu raporlanmıştır. Bu rapora göre malzeme spesifik olarak bir TTT diyagramı çizilemeyeceğinden dolayı her bir oranda alaşım elementleri tespit edilerek TTT diyagramını Thermocalc programında oluşturma yoluna gidilmesi çalışmanın geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Kaldı ki Ayan da çalışmasında biriktirilen duvarların çeşitli kısımlarından XRD ölçümleri alarak kimyasal kompozisyon tespiti yaptığını raporlamıştır. Üretimi ısıl kamera ile ölçmek ve her bir kompozisyon için bir TTT diyagramı oluşturup karakterize etme yoluna gitmek uygun görünmektedir. Yaptığımız çalışmanın bu tarz hibrit malzeme kullanımlarında da kullanılabileceğine ilişkin çalışmaların yapılabileceği değerlendirilmiştir [78]. Mendez-Morales vd.'nin yaptığı çalışma detaylı incelendiğinde üretim parametrelerinin, çalışmamızda seçilen LH kodlu parametre seti ile çok benzerlik gösterdiği görülmüştür. Çalışmada WAAM MIG-CMT ile üretilen duvarlardan elde edilen numuneler üzerinde yapılan mikroyapı incelemeleri neticesinde ortalama tane boyutlarının 3 µm ile 18 µm arasında değiştiği ve oluşumun eş eksenli olduğu raporlanmıştır. Bu sonuçlar çalışmamızdaki sonuçlar ile örtüşmektedir. Diğer taraftan mikroyapının çoğunlukla poligonal ferrit ve tane sınırlarında yer alan lameller perlit şeklinde oluştuğu raporlanmıştır. Raporlanan sertlik değerleri çalışmamızda elde edilen sertlik değerleri ile uyumsuz görünmektedir. Çalışma detaylı incelendiğinde sertlik değerlerinin numunelerin hangi

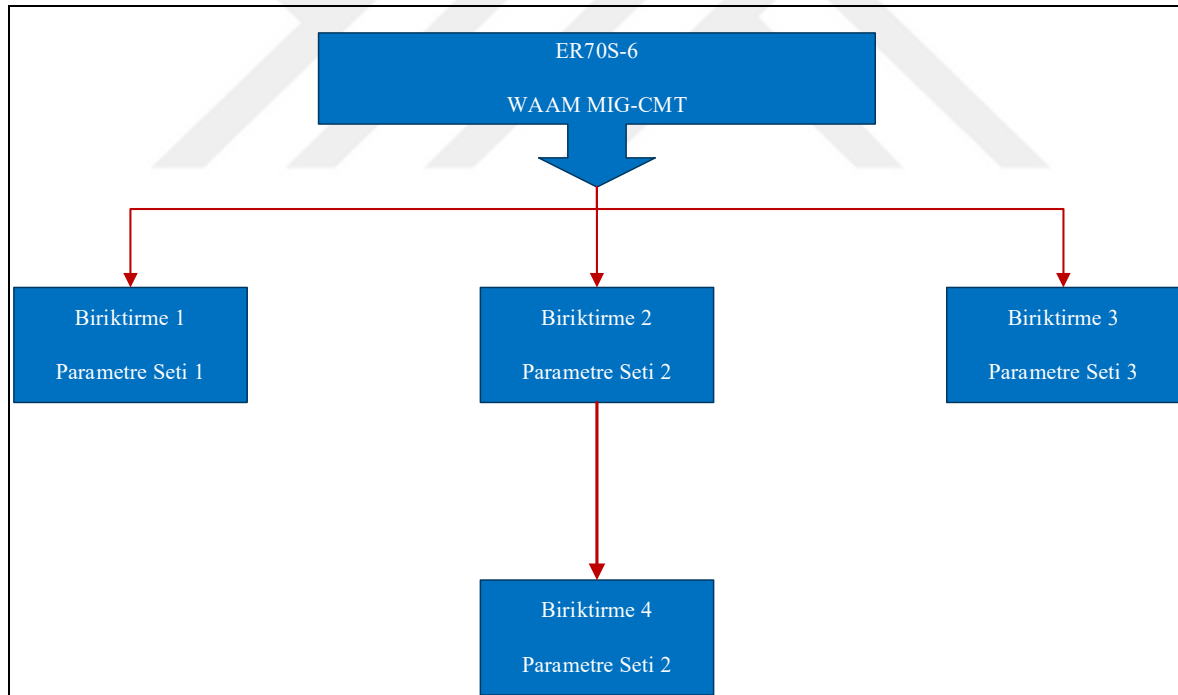
bölgelerinden alındığı belirtilmediğinden bir karşılaştırmada bulunulamamıştır [79]. Yadav vd.'nin 2025 yılında yaptığı çalışma fonksiyonel derecelendirilmiş biriktirme üzerinedir ve kullanılan malzemelerden bir tanesi çalışmamızda kullanılan ER70S-6 çeliğidir. Parametre kurgusuna bakıldığında çalışmamızda MH kodlu parametre seti ile benzer parametre ile üretim yapıldığı görülmüştür. Isı girdisini bilahare hesaplamadığı için ortalama kaynak makinası verimi 0,9 alındığında Yadav vd.'nin 2025 yılında yaptığı çalışmadaki ısı girdisinin ortalama 360 J/mm. civarında gerçekleştiği hesaplanabilir. Bu da MH kodlu imalatlarındaki ısı girdisine yakın bir değer olarak görülmüştür. Yaptıkları çalışmada ER70S-6 biriktirmelerinde yapıda iğnemsiz (asiküler) ve poligonal taneler ferrit gözlemlendiği raporlanmıştır ayrıca yine aynı malzeme tarafında sertlik değerlerinin 175-220 mikrovickers seviyesinde gözlemlendiği belirtilmiştir. Bu değerlerin ve mikroyapı oluşumlarının çalışmamızdaki verilerle örtüştüğü gözlemlenmiştir. Diğer taraftan 2 farklı çelik türü ile yapılan üretimde çalışmamızda kullanılan ER70S-6 çelik teli ile üretilen kısımda mekanik özellik ve mikroyapı oluşumlarının belirgin benzerlik göstermesi ısı girdisi konusunda yapılan yorumların doğrulaması olarak değerlendirilmektedir. Çalışmada EBSD analizi ve tane boyutu ölçümleri bulunmadığından kıyaslama yapılamamıştır [80]. Bir diğer çalışma 2025 yılında Lee vd. tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ER70S-6 malzemeden WAAM- MIG yöntemiyle üretilen duvarlardaki malzemelerde yorulma ve kırılma davranışlarını incelemek üzere gerçekleştirilmiştir. Çalışmada mekanik özellik tespiti kapsamında sertlik testleri yapılmamış olup mikroyapı oluşumlarının üretim sonrası çıkarılan üretimlerde asiküler ferrit ve ısıl işleminden sonra tespit edilen mikroyapıların ise poligonal ferrit ve lamelli perlit şeklinde oluştuğu raporlanmıştır [81]. 2023 yılında Fang vd. tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada Fang vd. tarafından HSLA olarak kimyasal kompozisyonu verilmiş ve fakat tam sınıflandırması raporlanmamış bir çelik tel kullanılmış ve L şeklinde bloklar üretilmiştir. 1890, 1340 ve 480 J/mm ısı girdilerinde üretimler gerçekleştirilmiştir. Düşük ısı girdisinde çita tipli martenzit ve granüler beynit raporlanmışken ısı girdisi arttıkça granüler beynitin arttığı raporlanmıştır. HSLA türü çeliklerde yaptığımız çalışmalarda martenzit fazından bahsedebilmek için yüksek soğuma hızlarının gerektiği belirtilmiştir ve sayısal verilerle bu desteklenmiştir. Fang vd.'nin yaptığı çalışmada altlık yüksekliği dahil 140 mm yükseklikte biriktirme yapılmış olup faz oluşumu çalışmalarının 2 mm aralıklarla kepten ortaya doğru 3 farklı alanda olmak üzere 6 mm kısımda gerçekleştirildiği görülmektedir. Ayrıca çalışmada soğuma hızına ilişkin bir veri bulunmamakla birlikte literatürdeki diğer çalışmalara oranla oldukça yüksek bir ısı girdisi kullanılmışken martenzit fazının yapıda nasıl baskın faz olduğu hususunda bir

değerlendirme yapılmamıştır. Bu yüksek ısı girdisinin bir sonucu olarak üretimde boyutsal kararsızlık da ısrarla belirtilmiştir. Ortalama mikrosertlik düşük ısı girdisine sahip numunede 327 mikrovickers, orta ısı girdisinde 299 mikrovickers ve yüksek ısı girdisinde 281 mikrovickers değerine düştüğü raporlanmıştır. Sertlik değerleri çalışmamızda ölçtüğümüz ve yorumladığımız şekliyle altlığa yakın kısımda yüksek orta kısımda daha düşük ve kepe doğru artan bir örüntüdeyken, Fang vd.'nin çalışmasında her üç ısı girdisinde üretim metodu değişmese de birbirine uyumsuz bir sertlik dağılımı ortaya koymuştur. Bunun izahının yapılmadığı görülmüştür [82].

Gerçekleştirdiğimiz çalışmamızın bir örgü içerisinde öncelikle literatür taraması ile başladığı sonrasında örgüye uygun olarak deneysel çalışmalarla desteklendiği ve deneysel çalışmaların da hipotezi doğrulamak veya yanlışlamak üzere icra edildiği belirtilmişti. Ortaya çıkan tüm deney verileri bugüne dek yapılmış ve gözden geçirilmiş verilerle okunduğunda,

1. Metalurjik bağlanmanın sağlandığı ve fakat katmanların mum tarzında erimesine olanak vermeden ve soğuk spreyci tarzı bir üretim gerçekleştirilmeden yapılacak bir imalat için gerekli ısı girdisi aralığında literatürde olduğu belirtilen tüm fazlar çalışmamızda aynen bulunmuştur.
2. Bazı çalışmalarda elektron mikroskopisi kullanılarak martenzit fazının olduğu raporlanmış olsa da bu fazın gerçekleşen soğuma hızlarında var olamayacağı değerlendirilmiştir. Nitekim gerçekleştirilen detaylı çalışmalarda martenzit fazına rastlanmamıştır. Diğer taraftan karmaşık ısı mekanizmalardan dolayı martenzit fazının çok düşük seviyede ve noktasal olarak gerçekleşebileceği değerlendirilmektedir. Martenzitin kalıntı ostenit ile birlikte değerlendirilmesi bilimsel gerçekliğe uygun düşecektir.
3. İlk maddedeki kapsam dahilinde literatürde elde edilen sertlik değerleri çalışmamızla uyumludur.
4. Thermocalc haricinde kullanılan ICME programları neticesinde elde edilen grafikler ile Thermocalc ile elde edilen grafiklerin uyumlu olduğu görülmüştür.
5. Literatürde yapılan çalışmalarda ısı kameraların WAAM özelinde çok işlevsel olduğu görülmüş ve bu işlevsellik çalışmamızda sınanarak işlevselliğin boyutu kanıtlanmıştır.

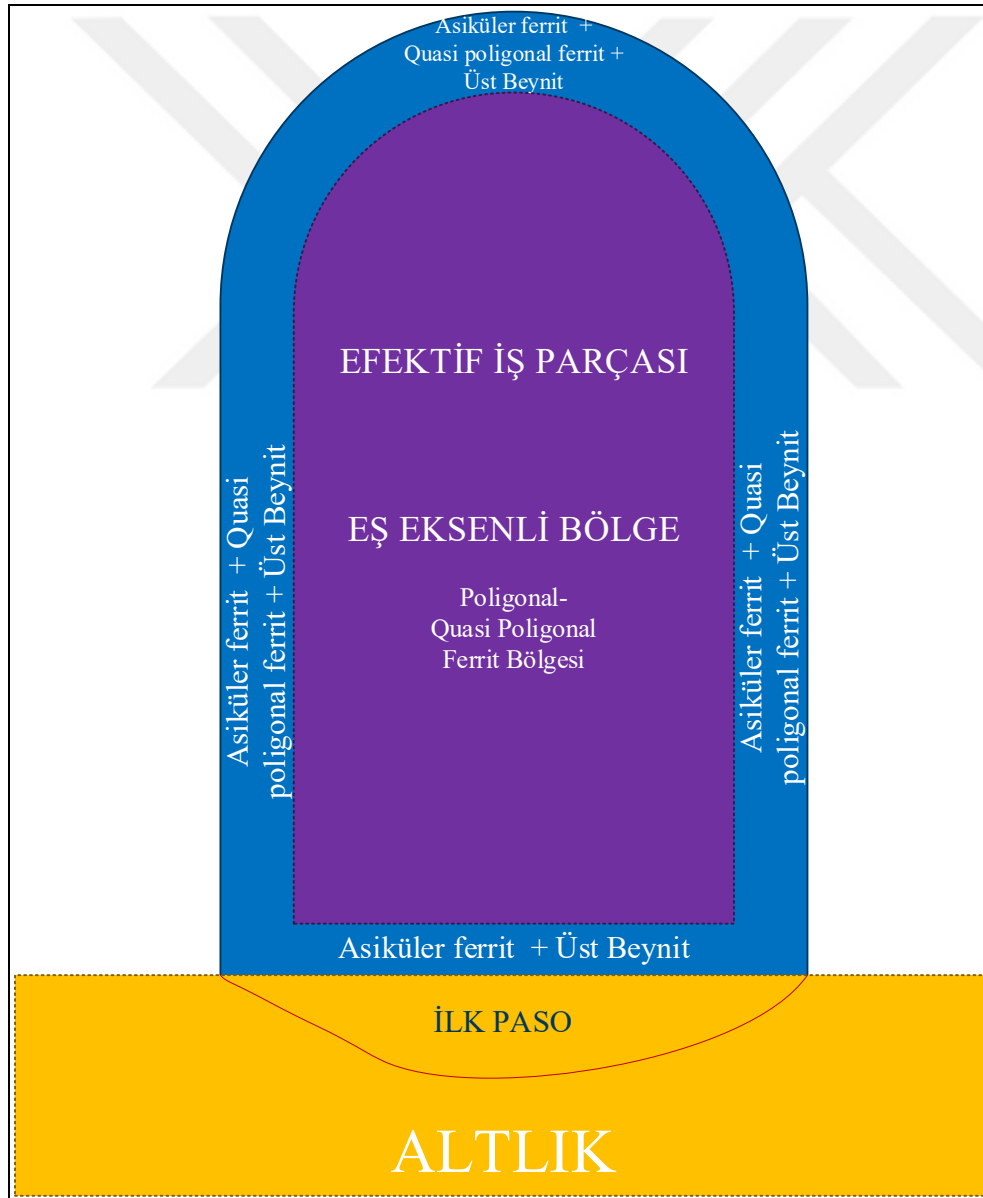
Bu çalışmada tekrarlı ısınmanın sonucunu gözlemlemek adına farklı ısı girdilerinde üretimler yapılmıştır. Bu üretimlerden alınan mikrofotograflar birleştirilmiş ve görünüm olarak çok benzer mikrofotograflarla karşılaşılmıştır. Farklı ısı girdilerindeki üretimlerin mekanik özelliklerinin tespiti noktasında mikrosertlik değerleri ölçülmüş ve kayda değer bir değişim görünmemiştir [77-82]. Bu durum neticesinde metalurjik bağlanmayı sağlaması koşulu ile farklı ısı girdilerinde tekrarlı ısınmanın benzer faz oluşumları ve mikroyapıları ile neticelenebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Burada devreye Thermocalc ile elde edilen TTT diyagramları üzerinden elde edilen CCT diyagramları incelendiğinde ısı girdisinin düşük ve yüksek olması durumunda dahi soğuma karakterinin değişmeyeceği değerlendirilmiştir. Bu kurgu içerisinde bilimsel olarak açıkta kalan durum kıyaslanacak bir soğuma davranışının elde edilmesi olduğundan dolayı katmanlı imalatta soğuma davranışının tespiti için ısı kamera ile biriktirmenin izlenmesi ve ısı kamera verilerinin irdelenmesinin sağlanması gerektiğine karar verilmiştir.



Şekil 4.14. Biriktirme parametrelerinin birbiriyle ilişkisi

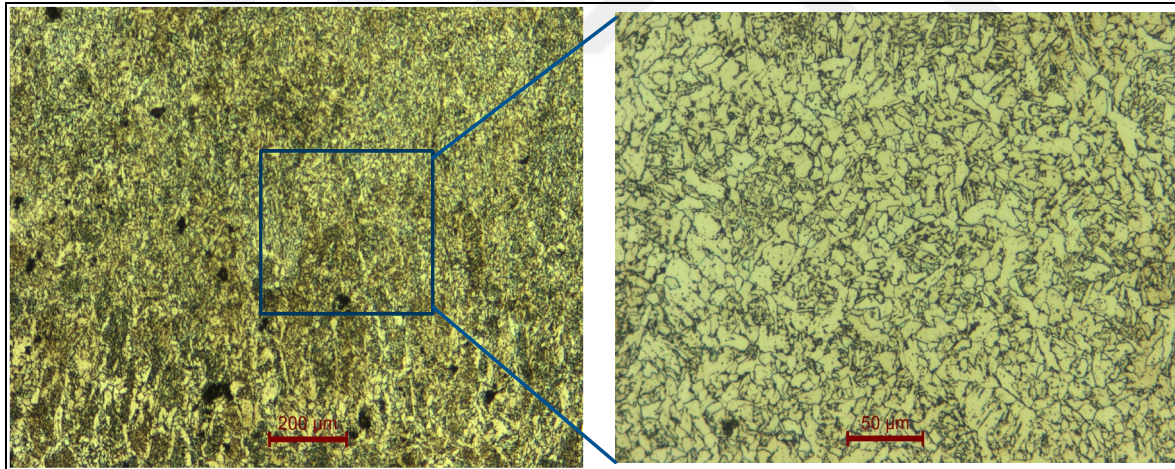
4 farklı seferde 10 farklı imalat yapıldığı, bu imalatlarda 3 tane tek dikiş, 3 tane 5 katman, 3 tane 10 katman ve 1 adet 30 katman imalat yapılmasına ilişkin Çizelge 3.2’de detayları verilen bağlam Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Isıl kamera ile izlenecek biriktirmenin yukarıdaki çıkarsamalar neticesinde parametre seti 2 ile yapılmasına karar verilmiştir.

Parametre seti 2 kullanılarak elde edilen biriktirme 4'e ait dip bölge, orta bölge ve üst bölge ısı kamera ile izlenip ortaya çıkan ısınma ve soğuma diyagramı irdelendiğinde tek bir soğuma hızından bahsedilemeyeceği ve soğumanın her 3 bölge için farklı olduğu görülmüştür. Soğuma hızlarının karakterizasyonu irdelendiğinde ve elektron mikroskopisi neticesinde elde edilen görüntüler ve analizlerle beraber yorumlandığında soğumanın karakterize edilebileceği öngörülmüştür. Bölüm 4'de detaylı irdelenen bu durum WAAM'da MIG-CMT kaynak metoduyla ER70S-6 kodlu HSLA türündeki çelik tipi kullanılarak üretilcek parçaların mikroyapı ve faz oluşumlarına ilişkin genel bir modele varılabileceği değerlendirilmiştir.



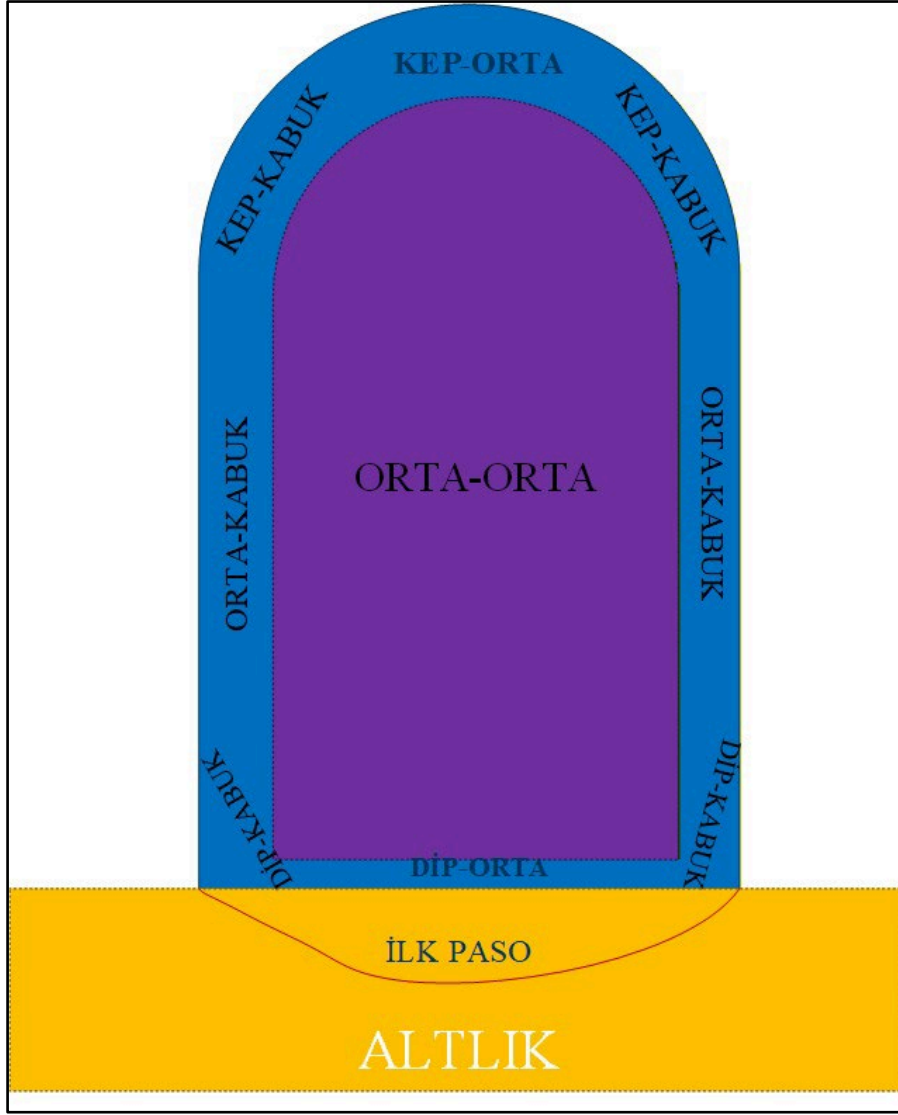
Şekil 4.15. Çalışma sonucunda ortaya çıkan model

Çalışmaya dair tüm veriler bir araya getirilip Şekil 4.15’de görüldüğü üzere tek seferde gösterilmiştir. Bu şekil bir yaklaşım olarak hazırlanmıştır ve henüz üretim gerçekleştirilmeden karşılaşılabilecek fazlar ile mikroyapı oluşumuna ilişkin bir rehber vazifesi göstermesi sebebiyle oluşturulmuştur. Bu gösterim çalışmamızın bir hülasası olarak düşünülebilir. Üretime konu parçalar halihazırda kullanılan ve başka üretim metotları ile üretilen parçalar olsun veya tasarımı yapılmış ve henüz hiçbir başka imalat metodu ile üretilmemiş ve WAAM metodu ile üretilecek olsun kullanılacağı yer göz önünde bulundurulduğunda bir yeniden boyutlama işlemine tabi tutulduğu düşünüldüğünde talaş kaldırma işleminden bahsedilmesi zorunlu olmaktadır. Bu sebeple WAAM’da uygulanabilir parametreler kullanılarak (literatürde “collapse” olarak nitelenen ve üretilen katmanın mum tarzında erimesi veya metalurjik bağlanmanın olamayacağı kadar düşük ısı girdisi) bir parça üretildiği düşünüldüğünde bu parçanın altlık tarafının kesildiği, kep tarafının uygun boyut için hazırlanması gibi işlemler neticesinde eş eksenli olmayan bölgelerin kesilip atılacağı gerçeği neticesinde kullanılacak parçanın (Şekil 4.15 mor bölge) eş eksenli mikroyapıya sahip olacağı ve bu yapının poligonal-quasi poligonal ferrit fazına sahip olduğu görülecektir.



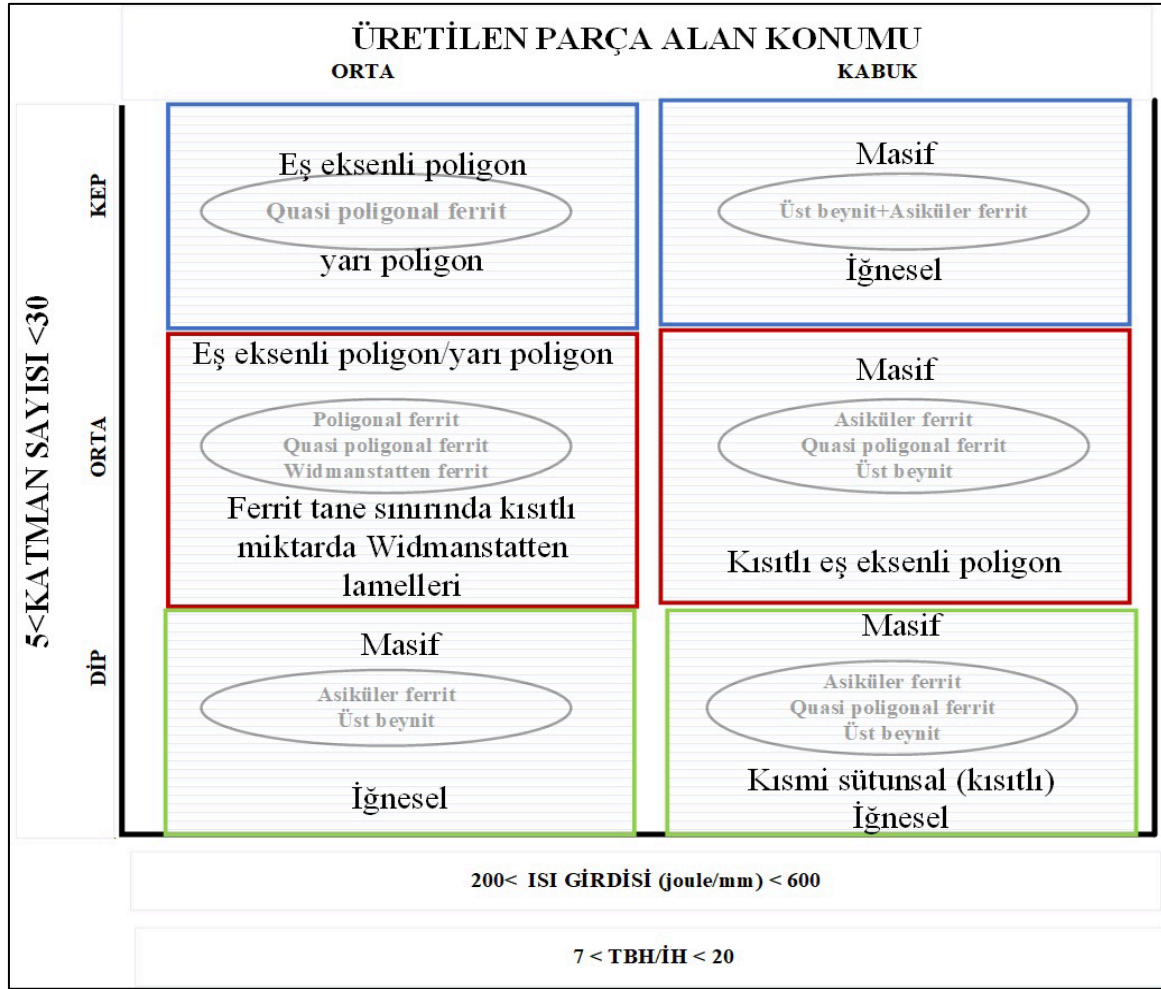
Şekil 4.16. Eş eksenli bölge için karşılaşılabilecek muhtemel baskın mikroyapı

Şekil 4.16’de, Şekil 4.15 mor bölgede karşılaşılabilecek muhtemel mikroyapı oluşumu araştırmacılar için bir referans olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Üretilen parçada alanların adlandırılması

Şekil 4.15'e ek olarak çalışma kapsamında elde edilen verilerin tamamının derlenmesi ile Şekil 4.17 üretilmiştir. Bu şekle göre üretilebilecek çok katmanlı bir parçada dip, kep ve orta isimlendirmelerinin yanında kabuğa yakın bölgeler ile orta bölgelerin de tanımlaması yapılmıştır ve bu bölgelendirmeler neticesinde Şekil 4.18'de gösterilen jenerik model elde edilmiştir.



Şekil 4.18. Isı girdisine göre çok katmanlı WAAM imalatında öngörülen faz ve mikroyapı görünümleri

Şekil 4.18'e göre, WAAM üretim metodunda ER70S-6 kullanılarak elde edilecek çok katman imalatların; akımın, voltajın, kaynak makinası verim oranının ve kaynak hızının bir fonksiyonu olarak ortaya çıkan ısı girdisi değerinin 200-550 joule/mm aralığında olduğu ve Şekil 4.17'de gösterilen bölgelerde ayrı ayrı oluşabilecek fazlar ve mikroyapı görünümleri verilmiştir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, WAAM yöntemiyle farklı ısı girdilerinde üretilen düşük karbonlu HSLA çeliği numunelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiş, deneysel ve hesaplamalı yöntemlerle elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

1. Farklı ısı girdileriyle üretilen numunelerin ortalama mikrosertlik değerleri 235–248 HV aralığında ölçülmüştür.
2. Üç farklı ısı girdisi arasında mikrosertlik değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir.
3. On katmanlı üretimlerde orta bölgede ölçülen ortalama tane boyutu 11,8–13,2 μm , ortalama en-boy oranı ise 1,6–1,8 aralığında bulunmuştur.
4. EBSD analizleri sonucunda, numunelerin dip, orta ve kep bölgelerinde HMK fazının baskın olduğu belirlenmiştir.
5. Elektron mikroskopisi ve CCT diyagramı analizleri, numunelerde poligonal/quasi-poligonal ferrit, asiküler ferrit ve beynit fazların birlikte bulunduğunu göstermiştir.
6. Termal kamera ölçümleri neticesinde dip, kep ve orta bölgenin soğuma hızlarının karmaşık şekilde ilerlediği, soğuma hızının katman sayısı arttıkça zamana bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir.
7. ICME programı olan Thermocalc ile malzeme spesifik TTT verilerinin elde edildiği ve soğuma hızları ile TTT diyagramları kullanılarak üretilen CCT diyagramı ile EBSD analizlerinde elde edilen değerlerin birbiri ile örtüştüğü belirlenmiştir.
8. Katmanlı imalatın çok kademeli ısı çevrimleri nedeniyle klasik soğuma eğrileri, faz dönüşüm davranışını tam olarak yansıtmamıştır. Bu sebeple WAAM'da üretilen bir parçanın tüm kesitinde CCT diyagramından faydalanmak için CCT diyagramlarının WAAM ısı davranışına uygun olarak modifiye edilmesi gerekmektedir.
9. Elde edilen veriler, hesaplamalı yaklaşımların WAAM süreç parametrelerinin belirlenmesinde karar destek aracı olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Sonuç olarak katmanlı imalatın doğasında var olan tekrarlı ısınma ve bu durumdan kaynaklı olan tekrarlı soğuma göz önünde bulundurulduğunda WAAM ile üretilecek her çelik türünde aşağıdaki adımlar izlenerek kullanılacak çelik tele ilişkin faz oluşumu karakterize edilebilir.

1. WAAM'da seçili bir çelik telle metalurjik bağlanmanın sağlandığı ve literatür kullanılarak elde edilecek bir üretim parametre seti ile üretimin yapılması
2. Üretimin cepheden kalibrasyonu yapılmış bir ısıtılma kamera ile izlenmesi
3. Seçili çelik tele ait kimyasal kompozisyon kullanılarak ICME programlarında önce denge diyagramı ve sonra TTT diyagramının oluşturulması
4. Isıl kamera verilerinden her katmana ait soğuma hızının, çelik tel için oluşturulmuş denge diyagramı göz önünde bulundurularak çıkarılması
5. Her katman için elde edilen soğuma hızlarının soğuma hızı-katman sayısı şeklinde grafikleştirilmesi
6. Soğuma davranışının izlenen her bölge için analiz edilmesi,
7. Bu analiz bağlamında TTT diyagramında zamana bağlı soğuma eğrilerinin çizdirilmesi

ER70, ER80, ER90, ER100, ER110 kodlu çelik tellerin HSLA grubunda bulunduğu göz önünde bulundurulduğunda ER70S-6 çelik teli üzerinden yaptığımız çalışmaların gruptaki diğer çelik türleri ile de yukarıda aktardığımız şekilde bir yol izleyerek gerçekleştirilmesi, yapılan çalışmanın genişlemesine katkı sağlayacaktır [82].

KAYNAKLAR

1. Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545–554.
2. Campocasso, S., Chalvin, M., Reichler, A. K., Gerbers, R., Dröder, K., Hugel, V., Dietrich, F. (2018). A framework for future CAM software dedicated to additive manufacturing by multi-axis deposition. *Procedia CIRP*, 78, 79–84.
3. Prado-Cerqueira, J. L., Diéguez, J. L., Camacho, A. M. (2017). Preliminary development of a wire and arc additive manufacturing system (WAAM). *Procedia Manufacturing*, 13, 895–902.
4. Srivastava, M., Rathee, S., Tiwari, A., Dongre, M. (2023). Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour. *Materials Chemistry and Physics*, 294, 126988.
5. İnternet: ASTM. (2012). Standard terminology for additive manufacturing technologies (ASTM F2792-12a). ASTM International. Erişim Tarihi: 01.07.2025
6. Rosli, N. A., Alkahari, M. R., Abdollah, M. F. B., Maidin, S., Ramli, F. R., Herawan, S. G. (2021). Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 2127–2145.
7. İnternet: ASTM International. (n.d.). Additive manufacturing standards. Erişim 8 Mayıs 2025, <https://store.astm.org/products-services/standards-and-publications/standards/additive-manufacturing-standards.html>
8. İnternet: ASTM International. (2021). Terminology for additive manufacturing—General principles—Terminology (ASTM F3177-21). <https://doi.org/10.1520/F3177-21>, Erişim Tarihi: 01.07.2025
9. İnternet: ASTM International. (2017). Guide for preparation of metallographic specimens (ASTM E3-11R17). <https://doi.org/10.1520/E0003-11R17>, Erişim Tarihi: 01.07.2025
10. İnternet: ASTM International. (2015). Practice for microetching metals and alloys (ASTM E407-07R15E01). <https://doi.org/10.1520/E0407-07R15E01>, Erişim Tarihi: 01.07.2025
11. İnternet: ASTM International. (2022). Terminology relating to metallography (ASTM E7-22). <https://doi.org/10.1520/E0007-22>, Erişim Tarihi: 01.07.2025
12. İnternet: ASTM International. (2024). Test methods for determining average grain size (ASTM E112-24). <https://doi.org/10.1520/E0112-24>, Erişim Tarihi: 01.07.2025
13. İnternet: ASTM International. (2024). Test methods for tension testing of metallic materials (ASTM E8/E8M-24). https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-24, Erişim Tarihi: 01.07.2025

14. İnternet: ISO. (n.d.). ISO/ TC 261—Additive manufacturing. Erişim 8 Mayıs 2025, <https://www.iso.org/committee/629086.html>, Erişim Tarihi: 01.07.2025
15. Yasa, E. (Ed.), Yılmaz, O. (Ed.), Kayacan, M. C. (Ed.), Saklakoğlu, İ. E. (Ed.). (2024). A new manufacturing concept that changes design philosophy—*Additive manufacturing*. Nobel Yayın Dağıtım.
16. Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P. (2016). Wire + arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32(7), 641–647.
17. Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S. T. (2018). Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 22, 672–686.
18. Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917–1928.
19. Vimal, K. E. K., Srinivas, M. N., & Rajak, S. (2021). Wire arc additive manufacturing of aluminum alloys: A review. *Materials Today: Proceedings*, 41, 1139–1145.
20. Li, Z., Liu, C., Xu, T., Ji, L., Wang, D., Lu, J., Ma, S., Fan, H. (2019). Reducing arc heat input and obtaining equiaxed grains by hot-wire method during arc additive manufacturing titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 742, 287–294.
21. Nie, Y., Zhang, P., Wu, X., Li, G., Yan, H., Yu, Z. (2018). Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by cold metal transfer., *Science and Technology of Welding and Joining*., 23(6):527-535
22. Selvi, S., Vishvakshenana, A., Rajasekar, E. (2018). Cold metal transfer (CMT) technology—An overview. *Defence Technology*, 14, 28-44
23. Brandl, E., Baufeld, B., Leyens, C., Gault, R. J. P. P. (2010). Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: Comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications. *Physics Procedia*, 5(2), 595–606.
24. Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Almeida, P. S., Wang, F., Williams, S. (2011). Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts. *Computational Materials Science*, 50(12), 3315–3322.
25. Xiong, J., Zhang, G., Gao, H., Wu, L. (2013). Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(2), 417–423.
26. Colegrove, P. A., Coules, H. E., Fairman, J., Martina, F., Kashoob, T., Mamash, H., & Cozzolino, L. D. (2013). Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(10), 1782–1791.

27. Jhavar, S., Jain, N. K., Paul, C. P. (2014). Development of micro-plasma transferred arc (μ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(5), 1102–1110.
28. Shen, C., Pan, Z., Ma, Y., Cuiuri, D., Li, H. (2015). Fabrication of iron-rich Fe–Al intermetallics using the wire-arc additive manufacturing process. *Additive Manufacturing*, 7, 20–26.
29. Montevecchi, F., Venturini, G., Scippa, A., Campatelli, G. (2016). Finite element modelling of wire-arc-additive-manufacturing process. *Procedia CIRP*, 55, 109–114.
30. Liberini, M., Astarita, A., Campatelli, G., Scippa, A., Montevecchi, F., Venturini, G., Squillace, A. (2017). Selection of optimal process parameters for wire arc additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 62, 470–474.
31. Lopez, A., Bacelar, R., Pires, I., Santos, T. G., Sousa, J. P., Quintino, L. (2018). Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 21, 298–306.
32. Zhang, X., Wang, K., Zhou, Q., Ding, J., Ganguly, S., Marzio, G., Williams, S. W. (2019). Microstructure and mechanical properties of TOP-TIG-wire and arc additive manufactured super duplex stainless steel (ER2594). *Materials Science and Engineering: A*, 762, 138097.
33. Priarone, P. C., Pagone, E., Martina, F., Catalano, A. R., Settineri, L. (2020). Multi-criteria environmental and economic impact assessment of wire arc additive manufacturing. *CIRP Annals*, 69(1), 37–40.
34. Al-Nabulsi, Z., Mottram, J. T., Gillie, M., Kourra, N., Williams, M. A. (2021). Mechanical and X ray computed tomography characterisation of a WAAM 3D printed steel plate for structural engineering applications. *Construction and Building Materials*, 274, 121700.
35. Dekis, M., Tawfik, M., Egiza, M., Dewidar, M. (2025). Challenges and developments in wire arc additive manufacturing of steel: A review. *Results in Engineering*, 104657.
36. He, F., Yuan, L., Mu, H., Ros, M., Ding, D., Pan, Z., Li, H. (2023). Research and application of artificial intelligence techniques for wire arc additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 82, 102525.
37. Dogan, E., Yilmaz, O., Mollamahmutoglu, M. (2024). Thermal behavior in wire arc additive manufacturing: A comparative study of the conventional process and infrared heater use. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1–24.
38. Martina, F., Ding, J., Williams, S., Caballero, A., Pardal, G., Quintino, L. (2019). Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel. *Additive Manufacturing*, 25, 545–550.
39. Ogino, Y., Asai, S., Hirata, Y. (2018). Numerical simulation of WAAM process by a GMAW weld pool model. *Welding in the World*, 62, 393–401.

40. Moreira, A. F., Ribeiro, K. S., Mariani, F. E., Coelho, R. T. (2020). An initial investigation of tungsten inert gas (TIG) torch as heat source for additive manufacturing (AM) process. *Procedia Manufacturing*, 48, 671–677.
41. Chen, C., Xiao, R., Chen, H., Lv, N., Chen, S. (2021). Prediction of welding quality characteristics during pulsed GTAW process of aluminum alloy by multisensory fusion and hybrid network model. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 209–224.
42. Rathinasuriyan, C., Elumalai, P. V., Bharani Chandar, J., Karthik, K., Medapati, S. R., Alahmadi, A. A., Shahapurkar, K. (2023). Welding-based additive manufacturing processes for fabrication of metallic parts. *Composites and Advanced Materials*, 32, 26349833231210572.
43. Tankova, T., Andrade, D., Branco, R., Zhu, C., Rodrigues, D., da Silva, L. S. (2022). Characterization of robotized CMT-WAAM carbon steel. *Journal of Constructional Steel Research*, 199, 107624.
44. Lee, S. H. (2020). CMT-based wire arc additive manufacturing using 316L stainless steel: Effect of heat accumulation on the multi-layer deposits. *Metals*, 10(2), 278.
45. İnternet: Fronius. (n.d.). CMT: The cold welding process for the best quality., <https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/fronius-welding-processes/cmt>, Erişim Tarihi: 18.05.2025
46. Li, C., Gu, H., Wang, W., Wang, S., Ren, L., Ming, Z., Wang, Z. (2020). Investigation on high-temperature mechanical properties of Al–7Si–0.6Mg alloy by wire + arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 36(14), 1516–1522.
47. Guo, C., Hu, R., Chen, F. (2021). Microstructure and performances for 15-5 PH stainless steel fabricated through the wire-arc additive manufacturing technology. *Materials Technology*, 36(14), 831–842.
48. Zhou, Y., Lin, X., Kang, N., Huang, W., Wang, J., Wang, Z. (2020). Influence of travel speed on microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured 2219 aluminum alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, 37, 143–153.
49. Ding, D., Wu, B., Pan, Z., Qiu, Z., Li, H. (2020). Wire arc additive manufacturing of Ti6Al4V using active interpass cooling. *Materials and Manufacturing Processes*, 35(7), 845–851.
50. Sujana, G. K., Pan, Z., Li, H., Liang, D., Alam, N. (2021). High-temperature oxidation performance of wire-arc additively manufactured Inconel 718 superalloys. *Materials Science and Technology*, 37(4), 413–423.
51. Rodrigues, T. A., Duarte, V., Avila, J. A., Santos, T. G., Miranda, R. M., Oliveira, J. P. (2019). Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 27, 440–450.
52. Yildiz, A. S., Koc, B., Yilmaz, O. (2021). Thermal behavior determination for wire arc additive manufacturing process. *Procedia Manufacturing*, 54, 233–237.

53. Lopes, J. G., Machado, C. M., Duarte, V. R., Rodrigues, T. A., Santos, T. G., Oliveira, J. P. (2020). Effect of milling parameters on HSLA steel parts produced by wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 739–749.
54. Panchenko, O., Kladov, I., Kurushkin, D., Zhabrev, L., Rylikov, E., Zamozdra, M. (2022). Effect of thermal history on microstructure evolution and mechanical properties in wire arc additive manufacturing of HSLA steel functionally graded components. *Materials Science and Engineering: A*, 851, 143569.
55. Shukla, V., Kumar, V., Dixit, A. (2023). Microstructural characteristics and tensile properties of ER70S-6 manufactured by robotic CMT wire-and-arc additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*.
56. Smith, W. F., Hashemi, J. (2006). Foundations of materials science and engineering. McGraw-Hill., 7, 550
57. Huang, H., Zhang, Z., Jin, X., Zeng, Z., Zhang, L., Sun, J., Zhang, J. (2025). Microstructure and mechanical properties of low-carbon high-strength steel fabricated by submerged arc additive manufacturing. *Materials Today Communications*, 111796.
58. Karamimoghadam, M., Rezayat, M., Contuzzi, N., Denora, V., Mateo, A., Casalino, G. (2025). Effect of wire feed rate on ER70S-6 microstructure of wire arc additive manufacturing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 137(5), 2947–2961.
59. Nemani, A. V., Ghaffari, M., Nasiri, A. (2020). Comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of shipbuilding steel plates fabricated by conventional rolling versus wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 32, 101086.
60. Scotti, F. M., Teixeira, F. R., da Silva, L. J., de Araujo, D. B., Reis, R. P., Scotti, A. (2020). Thermal management in WAAM through the CMT advanced process and an active cooling technique. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 23–35.
61. Hunt, J. D. (1984). Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic. *Materials Science and Engineering*, 65(1), 75–83.
62. Kurz, W., Bezençon, C., Gäumann, M. (2001). Columnar to equiaxed transition in solidification processing. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2(1), 185–191.
63. Li, J., Zhou, X., Brochu, M., Provatas, N., Zhao, Y. F. (2020). Solidification microstructure simulation of Ti-6Al-4V in metal additive manufacturing: A review. *Additive Manufacturing*, 31, 100989.
64. Körner, C., Markl, M., Koepf, J. A. (2020). Modeling and simulation of microstructure evolution for additive manufacturing of metals: A critical review. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51, 4970–4983.
65. Kaufman, L. (Ed.). (1977). CALPHAD—Computer coupling of phase diagrams and thermochemistry. *Pergamon*.

66. Spencer, P. J. (2008). A brief history of CALPHAD. *Calphad*, 32(1), 1–8.
67. Luo, C., Hansson, K., Song, Z., Ågren, D., Persson, E. S., Cederholm, F., Xuan, C. (2023). Modelling microstructure in casting of steel via CALPHAD-based ICME approach. *Alloys*, 2(4), 321–343.
68. Voort, G. F. V. (1991). Atlas of time-temperature diagrams for irons and steels. ASM International., 1, 950
69. Lambiase, F., Yanala, P. B., Pace, F., Andreucci, E., Paoletti, A. (2025). A state of the art review of wire arc additive manufacturing (WAAM)—Part 1: Process fundamentals, parameters and materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–29.
70. Embury, D. (2012). The formation of pearlite in steels. In Phase transformations in steels. *Woodhead Publishing*, 276–310
71. İnternet: MetalWorm., MetalWorm additive manufacturing technologies., <https://www.metalworm.com/process-library/>, Erişim Tarihi: 10.02.2025
72. Bargel, H. J., Hilbrans, H., Hübner, K. H., Krüger, O. (2005). *Materials science*. Springer-Verlag, 450
73. Nowell, M. M., Wright, S. I., Carpenter, J. O., 29.10.2009, *Differentiating ferrite and martensite in steel microstructures using electron backscatter diffraction*. In Proceedings of the Materials Science and Technology Conference and Exhibition.
74. Bhadeshia, H. K. D. H. (2014). Physical metallurgy of steels. In Physical metallurgy Elsevier., 2, 545
75. Costin, W. L., Lavigne, O., Kotousov, A. (2016). A study on the relationship between microstructure and mechanical properties of acicular ferrite and upper bainite. *Materials Science and Engineering: A*, 663, 193–203.
76. Liu, C., Shi, L., Liu, Y., Li, C., Li, H., Guo, Q. (2016). Acicular ferrite formation during isothermal holding in HSLA steel. *Journal of Materials Science*, 51(7), 3555–3563.
77. Farshchi, Y. K., Khodabakhshi, F., Mohri, M., Shirazi, H., Nili-Ahmadabadi, M. (2024). Microstructural engineering in carbon steel walls printed by directed energy deposition to enhance mechanical properties through heat-input control. *Journal of Materials Research and Technology*, 28, 490–499.
78. Ayan, Y. (2024). Fabrication and characterization of a new high-strength alloy via WAAM using GMAW + cold wire feeding. *Materials Chemistry and Physics*, 328, 130038.
79. Mendez-Morales, M., Jesus, J. S., Branco, R., Tankova, T., Rebelo, C. (2025). Fatigue crack growth of untreated and heat-treated WAAM ER70S-6 carbon steel. *International Journal of Fatigue*, 109008.

80. Yadav, A., Srivastava, M., Jain, P. K. (2025). Design and fabrication of wire arc additive manufacturing setup and enhanced tailored properties of dissimilar steel additively deposited by WAAM process. *Structures*, 72, 108228.
81. Lee, J. J. S., Rohail, M., Nguyen, T., Galloway, J., do Rêgo, E. M. F., Araj, M. T., Walbridge, S. (2025). An experimental and analytical study of the fatigue and fracture behaviour of ER70S-6 steel wire arc additively manufactured material. *Engineering Fracture Mechanics*, 111552.
82. Fang, Q., Zhao, L., Chen, C., Zhu, Y., Peng, Y., Yin, F. (2023). Effect of heat input on microstructural and mechanical properties of high strength low alloy steel block parts fabricated by wire arc additive manufacturing. *Materials Today Communications*, 34, 105146.







Gazili olmak ayrıcalıktır