



**TEL ARK ERGİTMELİ EKLEMELİ İMALATTA HARİCİ ISITICI
KULLANIMININ MEKANİK VE METALURJİK ÖZELLİKLERE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Ebubekir DOĞAN

DOKTORA TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2024

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.

Ebubekir DOĞAN

24/07/2024

TEL ARK ERGİTMELİ EKLEMELİ İMALATTA HARİCİ ISITICI KULLANIMININ MEKANİK VE METALURJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Ebubekir DOĞAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Bu çalışmada, tel ark ergitmeli eklemeli imalat (WAAM) yöntemi ile üretilen parçaların kalıntı gerilme ve çarpılma kontrolü ele alınmıştır. WAAM, yüksek üretim hızına sahip olup büyük ve yoğun parçalar üretme kapasitesi sunan bir katmanlı imalat teknolojisidir. Bununla birlikte, WAAM sürecinde, ergitme sırasında oluşan yüksek ısı girdisi, termal şoklara neden olmakta ve bu durum çarpılmalar, kalıntı gerilmeler, yüzey morfolojisi kusurları ile düzensiz makro ve mikro yapılar gibi çeşitli sorunlara yol açabilmektedir. Bu çalışma, harici ısıtıcıların WAAM üretiminde kullanımını önermekte ve bu yöntemi uygulamaktadır. Harici ısıtıcıların kullanımı, termal davranışın daha etkin kontrolünü sağlayarak üretilen parçaların kalitesini artırmayı amaçlayan yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu bağlamda, harici ısıtıcıların parça kalitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ER70S-6 kaynak teli kullanılarak beş farklı geometri üretilmiş ve geleneksel WAAM ile harici ısıtıcılı WAAM yöntemleri karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalara paralel olarak sayısal analizler de referans amaçlı yapılmıştır. Sonuçlar, harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen parçaların daha düzenli geometrilere, rafine edilmiş iç yapılara ve daha kararlı mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Optik ve SEM görüntüleri, harici ısıtıcılı WAAM yönteminin asiküler ve poligonal ferrit yapılarını azalttığını, beynit oluşumunu ise engellediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, gözenekler, füzyon eksikliği ve katmanlar arası süreksizlikler gibi kusurların oluşumunda azalma tespit edilmiştir. Geleneksel WAAM yönteminde mikrosertlik değişimi %30 seviyesindeyken, harici ısıtıcılı WAAM yönteminde bu değişim %12'ye düşmüştür. Bu bulgu, harici ısıtıcıların mikroyapısal homojenliği artırarak malzemenin sertlik dağılımını daha tutarlı hale getirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, harici ısıtıcı kullanılan numuneler, standart WAAM numunelerine kıyasla yaklaşık %17 daha yüksek çekme mukavemeti sergilemiştir. Harici ısıtıcı kullanımının, kalıntı gerilme ölçümlerinde belirgin bir azalma sağladığı ve üretilen parçaların CAD verisi ile uyumunun ortalama %20 oranında arttığını göstermiştir. Bu bulgular, harici ısıtıcıların WAAM süreçlerinde termal kontrolü sağlayarak malzeme kalitesini ve mekanik performansı artırmada etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, tel beslemeli imalat, kalıntı gerilme, çarpılma
mikro yapı, sayısal modelleme
Sayfa Adedi : 166
Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF EXTERNAL HEATER USE ON
MECHANICAL AND METALLURGICAL PROPERTIES IN WIRE ARC ADDITIVE
MANUFACTURING

(Ph. D. Thesis)

Ebubekir DOĞAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

This study addresses the control of residual stress and distortion in parts produced using the Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) method. Due to the high heat input during the melting process in WAAM, the produced parts are subjected to thermal shocks, which can lead to various issues such as distortions, residual stresses, surface morphology defects, and irregular macro and microstructures. This research proposes and applies the use of external heaters in WAAM production as an innovative approach aimed at improving the quality of the produced parts by controlling thermal behavior more effectively. In this context, experimental studies were conducted to evaluate the effects of external heaters on part quality. Five different geometries were fabricated using ER70S-6 welding wire, and conventional WAAM and externally heated WAAM methods were compared. In parallel, numerical simulations were performed to provide reference data for the experimental studies. The results demonstrated that parts produced with externally heated WAAM exhibited more regular geometries, refined internal structures, and more stable mechanical properties. Optical and SEM images revealed that the externally heated WAAM method reduced the formation of acicular and polygonal ferrite structures and inhibited bainite formation. Additionally, a decrease in defects such as pores, lack of fusion, and interlayer discontinuities was observed. In the conventional WAAM process, the variation in microhardness was around 30%, while this variation decreased to 12% in the externally heated WAAM process. This finding indicates that the use of external heaters enhances microstructural homogeneity, resulting in a more consistent hardness distribution within the material. Furthermore, samples produced with external heaters exhibited approximately 17% higher tensile strength compared to standard WAAM samples. The use of external heaters also resulted in a significant reduction in residual stress measurements, and the alignment of the produced parts with CAD data improved by an average of 20%. These findings highlight the effectiveness of external heaters in controlling thermal behavior in WAAM processes, thereby improving material quality and mechanical performance.

Science Code : 91438

Key Words : Additive manufacturing, wire arc additive manufacturing, residual stress, distortion, microstructure, numerical modelling

Page Number : 166

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Bu teşekkürü yazabilmek için çok büyük emek ile çok uzun süre beklemem gerekse de bu aşamaya gelebilmek güzel bir duygu. Bu tez çalışması başta olmak üzere diğer akademik çalışmalarım da bilgi, ilgi ve deneyimiyle bana daima yol gösteren ve desteğini esirgemeyen, cesaret ve ilham veren danışmanım Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a teşekkürlerimi sunuyorum. Tez çalışması süresince, tez izleme komitesi üyelerim Prof. Dr. Rahmi ÜNAL'a ve Doç. Dr. Ulaş YAMAN'a verdikleri değerli katkı ve geri bildirimler için ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım. Doktora eğitimimi, 100/2000 YÖK Doktora Bursları kapsamında destekleyen Yükseköğretim Kurulu'na ve süreçteki desteklerinden dolayı Gazi Üniversitesi YÖK Bursları Birimine teşekkür ederim. Bu çalışmayı FBG-2022-7936 kod numaralı Gündümlü Proje kapsamında destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine teşekkür ederim. Çalışma kapsamında fikri mülkiyet hakları konusunda desteklerini esirgemeyen Gazi Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisi'ne teşekkürlerimi sunuyorum. Yine bu çalışmayı "1002-A Hızlı Destek Modülü" kapsamında 222M419 numaralı proje olarak destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Destekleri ile güç veren değerli arkadaşlarım dostça elin sahibi Dr. Mehmet MOLLAMAHMUTOĞLU'na, öncümüz Dr. Şafak NESLİ'ye, yaşam enerjisi ile Mustafa KAŞ'a, kodlama bilgisi ile Dr. Mohammed Mazen ALHAKEEM'e, samimiyetleri ile İbrahim ÜLKE'ye ve ayrıca tüm AMTRG grubu üyelerine ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte samimi arkadaşlıkları için Özge GENÇ'e, destekleri için Doç. Dr. Tunç APATAY'a teşekkür ederim. Tez çalışması kapsamında üretimler için gerekli olan altyapı, malzeme ve bilgiyi sağlayan METALWORM A.Ş. yönetim kadrosuna ve özellikle Ar-Ge birimi direktörü Özge Ece KARA'ya, Ar-Ge mühendisleri başta Nevzor BOL, Masoud Abbaszadeh ve Mehmet Oğuz KÜÇÜKÇAKIR'a teşekkür ederim. Sadece eğitim değil, tüm hayatım boyunca varlık ve desteğini sürekli hissettiğim, kıymetli eşim Dr. Şenay ARAS DOĞAN'a ve beni sabırla bekleyen biricik kızım Eylül DOĞAN'a fedakârlıkları için ne kadar teşekkür etsem azdır. Son olarak da beni her zaman destekleyen annem, babam ve kardeşlerime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Metal Eklemeli İmalat.....	5
2.2. Tel Ark Ergitmeli Eklemeli İmalat	8
2.3. Tel Ark Ergitmeli Eklemeli İmalatta Isıl Davranış	13
2.4. Tel Ark Ergitmeli Eklemeli İmalatta Modelleme	14
2.5. Termal Modelleme	15
2.5.1. Isı kaynağı modeli	20
2.5.2. Ağ oluşturma	23
2.5.3. Element doğum ve ölüm.....	24
2.5.4. Malzeme özellikleri	25
2.5.5. Termal sınır koşulları.....	26
2.6. Mekanik Modelleme	27
2.6.1. Temel denklemler	27
2.6.2. Mekanik sınır koşulları.....	28

	Sayfa
2.7. Tel Ark Ergitmeli Eklemeli İmalatta Zorluklar	29
2.7.1. Termal zorluklar	29
2.7.2. Mekanik zorluklar.....	34
2.8. Tel Ark Ergitmeli Eklemeli İmalatta Literatürde Bulunan Boşluklar.....	38
3. SAYISAL YÖNTEM	41
3.1. WAAM İşleminin Sayısal Modellenmesi	41
3.1.1. Temel denklemler ve sınır koşulları	41
3.1.2. Kaynak teli (dolgu) malzemesi ve altlığın modellenmesi	46
3.1.3. Üretimin modellenmesi	47
3.2. Kalıntı Gerilme ve Çarpılma Kontrolü için Geliştirilen Yeni Model	53
3.3. Kalıntı Gerilme ve Çarpılma Kontrolü için Geliştirilen Yeni Modelin Sayısal Modellenmesi.....	57
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	61
4.1. WAAM için Deneysel Çalışmalar	61
4.1.1. WAAM ile duvar üretimi	61
4.1.2. WAAM ile farklı geometrilerin üretimi	66
4.2. Harici Isı Kaynaklı WAAM için Deneysel Çalışmalar.....	70
4.2.1. Harici ısı kaynaklı WAAM için altyapı kurulu	71
4.2.2. Harici ısı kaynaklı WAAM ile duvar üretimi	71
4.2.3 Harici ısı kaynaklı WAAM ile farklı geometrilerin üretimi.....	75
4.3. Duvar Geometrilerine Yapılan Testler.....	77
4.4. Farklı Geometrilere Yapılan Testler	79
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	83
5.1. Duvar Numuneleri için Deneysel Çalışma Sonuçları	83
5.1.1. Üretim döngüsü için termal davranış.....	83

	Sayfa
5.1.2. Boyutsal doğruluk ve yüzey morfolojisi	86
5.1.3. Makro yapı ve mikroyapı analizi.....	90
5.1.4. EBSD analizi	104
5.1.5. Mikrosertlik analizi.....	110
5.1.6. XRD analizi	112
5.2. Farklı Geometrilere Deneysel Çalışma Sonuçları.....	113
5.2.1. Üretim sürecince termal davranış ve yüzey morfoloji.....	113
5.2.2. WAAM ve harici ısı kaynaklı WAAM üretiminin boyutsal karşılaştırılması.....	122
5.2.3. Kalıntı gerilme ölçümü	127
5.2.4. Manyetik Barkhausen gürültüsü ölçümü	133
5.2.5. Çekme testi	140
5.2.6. Mikrosertlik testleri	149
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	151
KAYNAKLAR.....	155
ÖZGEÇMİŞ.....	165

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Termo-mekanik analiz için sonlu elemanlar proses akışı.....	15
Çizelge 3.1. Isı kaynağının karakteristik parametreleri	46
Çizelge 4.1. Üretimi yapılan duvar geometrisi ve geometri boyutları.....	62
Çizelge 4.2. WAAM üretim parametreleri	63
Çizelge 4.3. Alt tabakanın ve biriktirilen malzemenin mekanik malzemenin özellikleri	63
Çizelge 4.4. Biriktirilen malzemenin kimyasal bileşimi.....	64
Çizelge 4.5. Üretimi yapılan geometriler ve geometrilerin boyutları.....	69
Çizelge 5.1. Üretilen duvarların boyutları	88
Çizelge 5.2. Geometriler için 3B lazer tarama sonuçları (mm).....	125
Çizelge 5.3. Kalıntı gerilme ölçümü için kullanılan deneysel parametreler.....	128
Çizelge 5.4. 6 farklı geometri için kalıntı gerilme ölçüm sonuçları	131
Çizelge 5.5. WAAM numunelerinin çekme testi sonuçları	143
Çizelge 5.6. Harici ısıtıcılı WAAM numunelerinin çekme testi sonuçları	146
Çizelge 5.7. WAAM (W-2-1) ve harici ısıtıcılı WAAM (H-W-2-1) için çekme testi sonuçları.....	147

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal Eİ süreçlerinin tipik sınıflandırması	6
Şekil 2.2. Toz yataklı Eİ sisteminin şematik gösterimi	6
Şekil 2.3. Toz beslemeli Eİ sisteminin genel gösterimi.....	7
Şekil 2.4. Tel beslemeli Eİ sisteminin genel gösterimi.....	8
Şekil 2.5. WAAM yönteminin şematik gösterimi	8
Şekil 2.6. Isı kaynaklarının şematik gösterimi a) GMAW b) GTAW ve c) PAW	9
Şekil 2.7. Deneysel robotik WAAM sisteminin şematik diyagramı.....	10
Şekil 2.8. WAAM işleminde üretim sırasındaki ısı davranış: ısı transferinin yönleri.....	13
Şekil 2.9. WAAM üretiminde bekleme süresindeki ısı davranış: ısı transferinin yönleri.....	14
Şekil 2.10. WAAM işlemindeki termo-fiziksel olaylar	16
Şekil 2.11. Gauss ısı yoğunluğu dağılımı	20
Şekil 2.12. Goldak çift elipsoidal ısı kaynağı parametreleri	22
Şekil 2.13. Ağ oluşturma şemaları.....	24
Şekil 3.1. Termal analiz için sınır koşulları: 1- ısı kaynağı; 2- taşınım ve radyasyon	43
Şekil 3.2. Mekanik analiz için sınır koşullar	43
Şekil 3.3. Isı kaynağının fiziksel yönler	44
Şekil 3.4. Çift elipsoidal ısı kaynağının şeması	45
Şekil 3.5. Katman üretimi işleminin şematik gösterimi.....	46
Şekil 3.6. Kaynak telinin sıcaklığın fonksiyonu olarak a) Termal malzeme b) Mekanik malzeme özellikleri	47
Şekil 3.7. WAAM sayısal analizinde parçada oluşan sıcaklık dağılımı, verilen üretim ısı ile aktif olan elamanlar	48

Şekil	Sayfa
Şekil 3.8. WAAM duvar üretiminin 3. katmandaki sıcaklık dağılımı.....	49
Şekil 3.9. WAAM duvar üretiminin son katmanındaki üretim başlangıcındaki sıcaklık dağılımı	49
Şekil 3.10. WAAM işleminin sayısal yöntem ile üretilen sıcaklık-zaman grafiği	50
Şekil 3.11. WAAM işleminin termo-mekanik analizinin işlem döngüsü.....	51
Şekil 3.12. WAAM üretiminin duvar modeline ait üretim sonu gerilme dağılımı	52
Şekil 3.13. WAAM işleminde duvar üretimi ve sonrasında oluşan gerilme değişimi.	53
Şekil 3.14. WAAM işleminde katman serimi sırasında oluşan ısı dağılımı	54
Şekil 3.15. WAAM işleminde soğuma çevrimi sırasında oluşan ısı dağılımı	54
Şekil 3.16. WAAM işleminde ısı kalkanı modelinin şematik gösterimi	56
Şekil 3.17. Harici ısı kaynaklı WAAM işleminde harici ısı kaynağı modeli	56
Şekil 3.18. Harici ısı kaynaklı WAAM işleminin termo-mekanik analizinin işlem döngüsü.....	58
Şekil 3.19. Harici ısı kaynaklı WAAM modeli için termal analiz görseli.....	59
Şekil 3.20. Harici ısı kaynaklı WAAM işlemine ait termal analiz sonucu	59
Şekil 3.21. Harici ısı kaynaklı WAAM üretime ait üretim sonu mekanik analiz görseli	60
Şekil 3.22. Harici ısı kaynaklı WAAM duvar üretimi ve sonrasında oluşan gerilme değişimi	60
Şekil 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan WAAM altyapısı.....	62
Şekil 4.2. Otomatik WAAM tezgahında duvar üretimi	64
Şekil 4.3. WAAM ile üretilen duvara ait görseller	65
Şekil 4.4. Altlıktan ayrılmış duvar geometrisi	66
Şekil 4.5. Termal kamera entegreli WAAM altyapısı	67
Şekil 4.6. Termal veri kayıt altyapısı	68
Şekil 4.7. WAAM ile üretilen farklı geometrilere ait görseller a) Geometri 1 b) Geometri 2 c) Geometri 3 d) Geometri 4	70

Şekil	Sayfa
Şekil 4.8. Harici ısı kaynakları ve otomatik WAAM tezgahına yerleşimi	72
Şekil 4.9. Harici ısı kaynağı modeli için deneysel altyapı kurulumu; seramik ısıtıcılar, ısı çift ve kontrol cihazı	73
Şekil 4.10. Harici ısı kaynağı ile yapılan üretime ait görseller a) üretim bölgesi ve üretim b) bekleme süresi boyunca son katman sıcaklığı ölçüm noktası....	73
Şekil 4.11. Harici ısı kaynağı ile üretilen duvara ait görseller.....	74
Şekil 4.12. Harici ısı kaynaklı WAAM üretimi için altyapı kurulumu a) harici ısıtıcılar, termal kamera ve torç konumu gösterimi b) kayıt bilgisayarı, kontrol cihazı ve ısı çift yerleşimi	76
Şekil 4.13. Harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen farklı geometrilere ait görseller a) Geometri 1 b) Geometri 2 c) Geometri 3 d) Geometri 4.....	77
Şekil 4.14. (a) Mekanik ve metalurjik testlerde kullanılacak numunelerin duvarlarından kesim yerleri. (b) Mikrosertlik ölçüm bölgeleri.	78
Şekil 4.15. Çekme testi numuneleri için kesilen geometriler	82
Şekil 4.16. Çekme testi numunesi ölçüleri (mm).....	82
Şekil 5.1. Harici ısıtıcılı WAAM ve WAAM için katmanlar arası bekleme süresi boyunca gerçekleşen sıcaklık geçmişi, (a) 1-7 katman	85
Şekil 5.2. Harici ısıtıcılı WAAM ve WAAM için katmanlar arası bekleme süresi boyunca gerçekleşen sıcaklık geçmişi, (b) 8-14 katman	85
Şekil 5.3. Harici ısıtıcılı WAAM ve WAAM için katmanlar arası bekleme süresi boyunca gerçekleşen sıcaklık geçmişi, (c) 15-20 katman	86
Şekil 5.4. WAAM işlemi ile üretilen duvara ait görseller a – b) üretilen duvarın genel görüntüleri c1- c2) duvarın detay görüntüleri, kaba yüzey ve nodüller.....	87
Şekil 5.5. Harici ısıtıcılı WAAM işlemi ile üretilen duvara ait görseller a – b) üretilen duvarın genel görüntüleri c1- c2) duvarın detay görüntüleri, kaba yüzey	88
Şekil 5.6. WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen duvarların detay fotoğrafları, (a) duvar iç yüzeyleri, hızlı soğuma etkisiyle son katmanlarda deforme olmuş WAAM duvarı (b) üretilen duvarların genişlik ölçümleri	90
Şekil 5.7. Duvar numunelerinin alt, orta ve üst bölgelerine ait makro görüntüler a) WAAM b) Harici ısıtıcılı WAAM	91

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. WAAM duvarının mikroyapı görüntüleri a) birleştirilmiş görüntü; gözenekler, birleşme eksikliği ve katmanlar arası süreksizlikler b) inşa yönüne göre ısı etkisinin görüntüsü c-d) kaba taneli bölge e) kaba taneden ince taneye geçiş bölgesi	92
Şekil 5.9. Harici ısıtıcılı WAAM duvarının mikroyapı görüntüleri a) birleştirilmiş görüntü, b) inşa yönüne göre sınırlı üretim ısısının etkisinin görüntüsü, c-d) ince taneli bölge, e) yüksek büyütme ince taneli bölge görseli	94
Şekil 5.10. X yönünde test edilen numunelerin optik mikrograflar.....	98
Şekil 5.11. (a) WAAM, (b) harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen duvarların en üst iki katmanın mikroyapı görüntüleri	99
Şekil 5.12. İnşa yönüne göre WAAM duvarının orta bölümünden alınan SEM ve optik mikroskop görüntüleri: a) SEM görüntüsü için referans optik mikroskop görüntüsü, b) 1000x SEM görüntüsü, b1-b2) SEM görüntüsünün ayrıntıları, c) WAAM duvarının EDS analizi.....	101
Şekil 5.13. İnşa yönüne göre harici ısıtıcılı WAAM duvarının orta bölümünden alınan SEM ve optik mikroskop görüntüleri, a) SEM görüntüsü için referans optik mikroskop görüntüsü, b) 1000x SEM görüntüsü, b1-b2) SEM görüntüsünün ayrıntıları, c) harici ısıtıcılı WAAM için EDS analizi	103
Şekil 5.14. WAAM için EBSD analiz görüntüsü: (a) IQ haritası, (b) IPF haritası ve ayrıntılar.....	105
Şekil 5.15. Harici ısıtıcılı WAAM için EBSD analiz görüntüsü: (a) IQ haritası, (b) IPF haritası ve ayrıntılar.....	107
Şekil 5.16. Duvarların faz haritaları (a) WAAM (b) Harici ısıtıcılı WAAM	109
Şekil 5.17. Duvarların GOS analiz haritaları (a) WAAM (b) Harici ısıtıcılı WAAM.....	109
Şekil 5.18. WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen duvarlar için ortalama Vicker's mikrosertliği	111
Şekil 5.19. WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen duvarların orta bölgesindeki XRD analiz sonuçları	112
Şekil 5.20. Geometri 1 için WAAM üretiminin termal geçmişi.....	114
Şekil 5.21. WAAM işleminde katman üretimi sırasında parçada oluşan anlık sıcaklık.....	115
Şekil 5.22. WAAM işleminde bekleme süresi sonunda parçada oluşan sıcaklık	116

Şekil	Sayfa
Şekil 5.23. WAAM işleminde parçada oluşan farklı soğuma rejimleri.....	117
Şekil 5.24. WAAM üretimine ait numunenin (Geo.4) yüzey kusurları.....	117
Şekil 5.25. Harici ısı kaynaklarının üretim öncesi devreye alınması.....	119
Şekil 5.26. Geometri 1 için harici ısı kaynaklı WAAM üretiminin termal geçmişi	120
Şekil 5.27. Harici ısı kaynaklı WAAM için katman üretimi sonrası termal geçmiş ...	120
Şekil 5.28. Harici ısı kaynaklı WAAM için bekleme süresi sonunda parçada oluşan termal geçmişi.....	121
Şekil 5.29. Harici ısı kaynaklı WAAM parçasının yüzey görünümü: yüzeydeki katman profili ve katmanlı yapının detayları.....	122
Şekil 5.30. Lazer tarama işlemi; silindirik (Geo.4) parça üzerindeki lazer ışınları ve tarama cihazının gösterimi.....	123
Şekil 5.31. 3B lazer tarama sonucu elde edilen ve analiz de kullanılacak geometri görseli	124
Şekil 5.32. 3B tarama sonuçlarına ait analiz görseli	124
Şekil 5.33. Kalıntı gerilme ölçümü; XRD cihazı, deney numunesi (Geo.2) ve ölçüm alanının detayları.....	128
Şekil 5.34. Kalıntı gerilme işlemi için ölçüm noktası ve ölçüm yönleri	129
Şekil 5.35. MBG için ölçüm noktaları ve ölçüm doğrultusunun şematik gösterimi ...	134
Şekil 5.36. WAAM parçasının Barkhausen gürültüsü değerleri; maksimum, minimum ve ortalama değerlerin 20 ölçüm noktasındaki dağılımı.....	134
Şekil 5.37. WAAM numunesinde mikro yapısal SEM incelemesi:(a) 1000x büyütme ile çökeltme fazlarının genel görünümü, (b) 10000x büyütme ile düzensiz tane sınırları ve çökelmelerin detaylı incelemesi	136
Şekil 5.38. Harici ısı kaynaklı WAAM parçasının Barkhausen gürültüsü değerleri; maksimum, minimum ve ortalama değerlerin 20 ölçüm noktasındaki dağılımı	138
Şekil 5.39. Harici ısıtıcılı WAAM numunesinin SEM incelemesi:(a) 1000x büyütme ile mikro yapı ve çökeltme fazları, (b) 10000x büyütme ile tane sınırlarının ve çökelmelerin detaylı görünümü.....	139
Şekil 5.40. Çekme numunesine ait görsel.....	140

Şekil	Sayfa
Şekil 5.41. WAAM numunelerinin çekme testi sonucuna ait görseller.....	141
Şekil 5.42. Harici ısıtıcılı WAAM numunelerinin çekme testi sonucuna ait görseller	145
Şekil 5.43. WAAM (W-2-1) ve harici ısıtıcılı WAAM (H-W-2-1) için gerilme-gerinim mühendislik eğrilerinin karşılaştırılması.....	148



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

%	Yüzde
μm	Mikrometre
2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
Al	Alüminyum
Ar	Argon
°C	Santigrat derece
CO ₂	Karbondioksit
g	Gram
GPa	Giga Pascal
K	Kelvin
kN	Kilo Newton
mm	Milimetre
MPa	Mega Pascal
Ni	Nikel
SiC	Silisyum Karbür
sn	Saniye
Ti	Titanyum
α	Ferrit

Kısaltmalar

Açıklamalar

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
AMR	Adaptive Mesh Refinement
APDL	Ansys Parametric Design Language
ASTM	American Society for Testing and Materials
CMT	Soğuk Metal Transferi
EBSD	Elektron Geri Saçılım Kırınımı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

EDS	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
Eİ	Eklemeli İmalat
FE	Finite Element
FWHM	Full Width at Half Maximum
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GOS	Grain Orientation Spread
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HSLA	Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşım
ITAB	Isıdan Tesiri Altındaki Bölge
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
MDG	Manyetik Barkhausen Gürültüsü
OM	Optik Mikroskop
Ort.	Ortalama
PAW	Plasma Arc Welding
SEA	Sonlu Eleman Analizi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopi
Std. Sap.	Standart Sapma
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
XRD	X Işını Kristalografisi/Kırınımı
YMK	Yüzey Merkezli Küb

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) giderek artan bir önemle yapısal ve fonksiyonel parça üretimi için kullanılan bir teknolojidir. Bu teknoloji, geleneksel imalat yöntemleri olan döküm, dövme ve dolu malzemeden işleme tekniklerine göre daha az malzeme kaybı ve maliyetle karmaşık geometrilerin üretilmesine olanak tanır. Eİ, uygulama alanları ve kullanımı her geçen gün hızla artmakta ve başlangıçta prototipleme ve tamir amacıyla kullanılan yöntem, geldiği son aşamada havacılık, otomotiv, tıp ve ilaç sektörü gibi birçok alanda talep görmeye başlamıştır. Yöntemi tercih sebebi kılan hususlar arasında kompleks geometriye sahip parçaların tek kademede üretilabilirliği, üretimdeki esnekliği, enerji ve malzeme tasarrufu gibi üstünlükleri sıralanabilir. Bu üstünlüklerle beraber bazı sınırları ve zayıflıkları da mevcuttur. Örneğin üretim boyutu ve malzeme çeşitliliği sınırlarını oluştururken üretim hızı, yüzey kalitesi, tercih edilen yöntemde oluşan kusurlar ve arzu edilmeyen mekanik özellikler zayıflıkları arasında sayılabilir.

Eİ yöntemleri kullanılan malzeme ve enerji türüne göre çeşitli isimlerle anılmakta ve tanımlanmaktadır. Yöntemler arasında büyük bir hacme sahip olan metal eklemeli imalat sistemleri toz yataklı sistemler ve toz/tel beslemeli sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Tel beslemeli sistem olan tel ark ergitmeli eklemeli imalat (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) büyük boyutlu parça imalatına olan yatkınlığı, ilk yatırım maliyet avantajı, üretim hızı ve esnekliği, malzeme verimliliği ve diğer metal sistemlere kıyasla oldukça yüksek biriktirme hızı gibi avantajları sayesinde akademide ve imalat sanayisinde son yıllarda popülaritesi artmaktadır. WAAM'ın maliyet avantajı imalat sektöründe uzun yıllardır kullanılan kaynak tekniklerinin ve ekipmanlarının yenilikçi teknolojiler ile birleştirilmesinden gelmektedir. WAAM üretiminde kaynak torcunun hareketi robotik sistemler veya kartezyen sistemler sağlanmaktadır.

WAAM üretiminin yukarıdaki üstünlükleri yanında üretimi zorlayan sınırları ve üretilen malzemeyi son kullanıcı tarafında kabulünü zorlayan zayıflıkları da vardır. Her türlü kaynak telinin teorik olarak kullanıldığı sistemde bazı alaşımların (ör. Ti alaşımları) kaynak edilebilirliği ve vakum ortamı isteri, yüksek enerji girdisinin sebep olduğu malzeme akmaları üretimi zorlayan sınırlara birkaç örnektir. Yine üretilen parçaların yüzey dalgalanması, gözenek, mikro yapı kusurları, makro yapı hataları, çarpılma, kalıntı gerilme,

birleşme kusurları gibi son kullanıcı tarafındaki zayıflıkları da sistemin olumsuz yönlerindedir. Özellikle üretilen parçalarda meydana gelen çarpılma ve üretim doğası gereği üretilen kalıntı gerilme araştırmacıların oldukça ilgisini çekmekte ve bu konuda yeni ve yenilikçi yaklaşımlara olan ihtiyacın sürekli gündemde olmasını desteklemektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, tel ark ergitmeli eklemeli imalat yönteminde üretim aşamasında sürekli ısıya maruz kalıp tekrar tekrar ısınıp soğuyan üretim parçasında oluşan ısıl davranışı kontrol altına alarak kalıntı gerilme ve çarpılmaların en aza indirilmesine yönelik olarak bilimsel çözümler üretmek ve bu çözümlerin analitik ve sayısal yöntemlerle geliştirerek, deneysel doğrulamalarını yapmaktır.

Bu amaç doğrultusunda tez çalışmasında, öncelikle WAAM prosesinin termal ve mekanik davranışının sayısal olarak modellenmesi, modelin deneysel olarak doğrulanarak sürecin daha yakından anlaşılması hedeflenmiştir. Böylelikle tel ark ergitmeli sisteminin ısıl davranışı makro ve mikro düzeyde daha net anlaşılmış olacaktır. Sistemin ısıl davranışının anlaşılması, ürünleri olan çarpılma ve kalıntı gerilme gibi mekanik özelliklerin oluşma sürecine müdahil olmayı sağlayacaktır. Bu aşamadan sonra sistemin ısıl davranışını kontrol altına alacak yeni yaklaşım tez sürecinin ikinci önemli adımını oluşturacaktır. Yeni yaklaşımın WAAM sürecinin ısıl davranışı üzerindeki etkisi için matematiksel, sayısal ve deneysel olarak çalışmalar yapılacaktır. Geliştirilecek modeller ile deneysel çıktılar arasında kurulacak ilişkiler mevcut literatür çalışmaları ile güçlendirilecektir. Sürecin devamında WAAM ve yeni yaklaşım ile aynı parametrelerde üretilen parçalara aynı şartlar altında çarpılma, kalıntı gerilme testleri yapılacaktır. Daha sonra üretilen parçalara çekme testi, mikrosertlik ölçümleri gibi mekanik testler ile metalografik analizleri yapılacaktır. Son olarak da sonuçlar arasında kurulacak bağlar ile yeni yaklaşımın çarpılma, kalıntı gerilme sorunları ve mikroyapı terziliği gibi süreçlere etkisinin tartışılması hedeflenmiştir.

Yukarıda verilen amaç ve hedefler doğrultusunda bu tez çalışması 6 bölüm olarak oluşturulmuştur. Bunlardan ilki tezin konusu ve yapısı hakkında bilgi veren giriş bölümüdür. İkinci bölümde ise literatür araştırması gelmektedir. Bu bölümde ilk olarak genel bir özet halinde eklemeli imalat teknolojileri, metal eklemeli imalat teknolojileri ve tel-toz beslemeli sistemler, tel beslemeli sistemlerin termo-fiziksel doğası, avantajları ve zorlukları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Daha sonra termal ve mekanik modellemeleri, ilgili literatür ışığında incelenmiş ve tartışılmıştır. Üçüncü bölümde tel ark ergitmeli eklemeli imalatın termal ve

mekanik modellemesi üzerinde durulmuştur. Tel ark ergitmeli eklemeli imalat modellemesi yapılmış ve alınan sonuçlar deneysel çalışmalara öncü olarak kullanılmıştır. Yine bu bölümde geliştirilen yeni modelin termal ve mekanik modellemesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında bir sonraki bölüm olan deneysel çalışma aşamasına geçilmiştir. Dördüncü bölüm ise deneysel çalışmalar hakkında bilgi vermektedir. Deney altyapısı ve parçaların üretiminin gerçekleştiği altyapılar, harici ısı kaynakları ve altyapıya kurulumu hakkında özet bilginin yanı sıra üretim geometrileri, üretim stratejisi ve parametreleri üzerinde durulmuştur. Ayrıca bu bölüm üretilen parçalara yapılan testleri de içermektedir. Beşinci bölüm elde edilen sonuçların iki ayrı üretim açısından tartışılması ve değerlendirilmesine kapsamaktadır. Bu bölümde üretilen geometrilerin ayrıntılı mikroskobik ve makroskobik analizleri mevcuttur. Yine üretilen numunelerin tersine mühendislik çalışmaları, kalıntı gerilme ölçümleri de bu bölümde tartışılmıştır. Son bölüm olan altıncı bölüm ise sonuç bölümü olup tezde yapılan faaliyetler ve varılan hedefler özetlenmiş, gelecek çalışmalar için bir yol haritası hedefi verilmiştir.

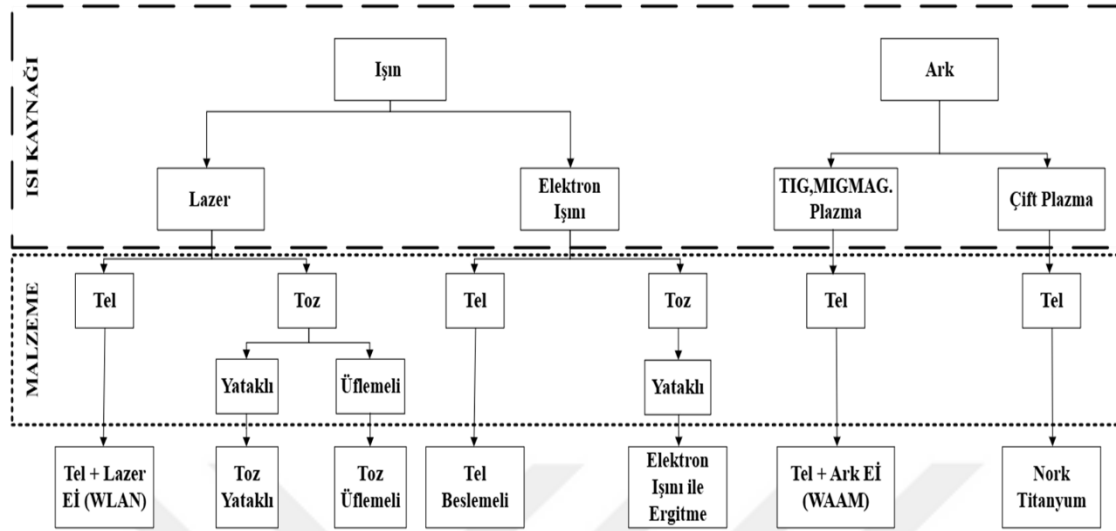
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Eklemeli imalat başlangıçta prototipleme ihtiyaçları karşılamak için gelişen bir teknoloji olsa da günümüz yaklaşımında başta havacılık, uzay ve savunma sanayisi olmak üzere otomobil, medikal, kuyum, tasarım, kalıpcılık gibi birçok alanda karşılık bulmaktadır [1]. Eklemeli imalat teknolojileri üretim maliyeti ve süresi, kullanılan malzeme ve enerji tüketimi, ürün karmaşıklığı, üretim sonrası ihtiyaçlar, malzeme kalitesi açısından kullanıcıya büyük avantajlar sunmaktadır [2]. Teknoloji bünyesinde birçok üretim yöntemini barındırmasının yanında malzeme çeşitliliği de oldukça fazladır. Isıya duyarlı termoplastik malzemelerin kullanıldığı ergiyik yığılma modelleme, sıvı fotopolimer reçinelerin kullanıldığı stereolitografi, kâğıt, karton veya plastik gibi malzemeler ile üretimin yapıldığı ultrasonik tabaka laminasyonu, metal tozlarının elektron ışını kullanılarak eritildiği elektron ışığı ile toz yatağında füzyon, ince bir toz tabaka malzemenin bir lazerle taranmasıyla gerçekleştirilen seçici lazer ergitme ve seçici lazer sinterleme bunlara ilaveten tel formunda malzemelerin elektrik arkı kullanılarak üretimin yapıldığı tel ark ergitmeli eklemeli imalat teknolojinin önemli alt başlıklarındandır [3].

2.1. Metal Eklemeli İmalat

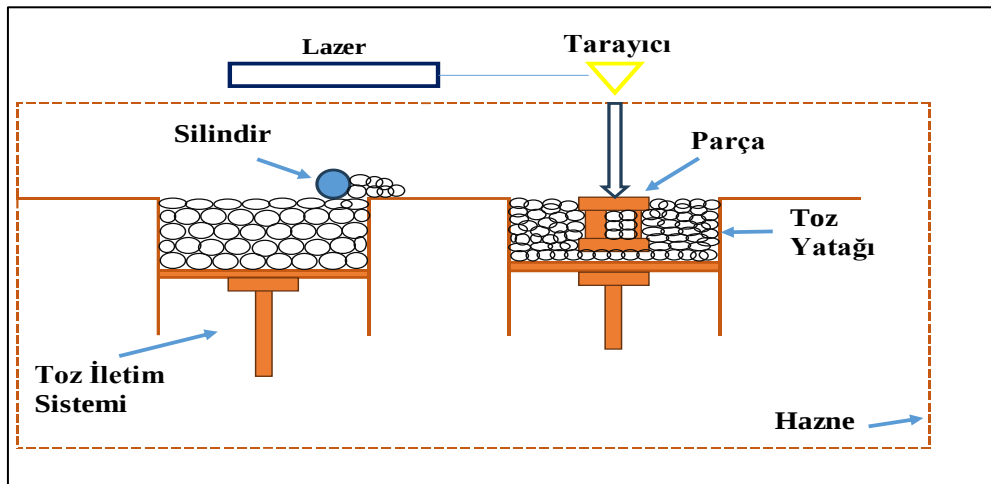
Eklemeli imalat (Eİ), ASTM'ye göre "malzeme çıkartmalı üretim yöntemlerinin aksine, 3B model verilerinden, genellikle katman katman nesneler üretmek için malzemeleri birleştirme süreci" olarak tanımlanmıştır. Eş anlamlıları: eklemeli üretim, eklemeli süreçler, eklemeli teknikler, eklemeli katman imalatı, katman imalatı ve serbest biçimli imalat" olarak kabul etmektedir [4]. Bu tanım metaller, seramikler, polimerler, kompozitler ve biyolojik sistemler dâhil olmak üzere tüm malzeme grupları için geniş bir şekilde kabul edilebilir ve uygulanabilir. Eİ, yirmi yılı aşkın bir süredir malzemelerin işlenmesi için kullanılıyor olsa da günümüzde önemli bir ticari üretim teknolojisi olarak kullanılmaya ve kabul görmeye başlamıştır. Metal eklemeli imalat, Eİ süreçlerinde önemli bir alanı temsil etmekle beraber akademide ve sanayide hızla artan oranlarda çalışma alanı bulmaktadır. Metal eklemeli imalat, kullanılan ısı kaynağı ve kullanılan malzeme türüne göre kategorilere ayrılmaktadır. Bu kategoriler, tel ve toz malzemelerin kullanıldığı, toz beslemeli, toz üflemleri ve tel beslemeli alt sistemlerdir [5]. Metal eklemeli imalat süreçlerinin sınıflandırması, çeşitli teknikler ve yöntemleri kapsayan geniş bir yelpazeyi içermektedir. Şekil 2.1'de bu sınıflamanın detayları kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. Bu süreçler, üretim ihtiyaçlarına ve

uygulama gereksinimlerine göre farklı kategorilere ayrılabilir.



Şekil 2.1. Metal Eİ süreçlerinin tipik sınıflandırması [6]

Toz yataklı sistemler, çalışma alanı tozun bir merdane/silindir aracılığıyla serilmesiyle oluşturulur. Şekil 2.2 genel bir toz yatağı sisteminin basit şemasıdır. Enerji kaynağı olan elektron veya lazer ışını, toza istenen şekle vermek için ergiterek veya sinterleyerek toz yatağının yüzeyine enerji vermek üzere programlanır. Çalışma alanı boyunca yeni katmanlar için toz serilir ve taranır. İstenilen üç boyutlu yapı üretilene kadar işlem tekrarlanır. Bu sistemin avantajları arasında yüksek çözünürlüklü, iç geçişler üretme ve boyut kontrolünü sürdürme yeteneği bulunmaktadır [7].



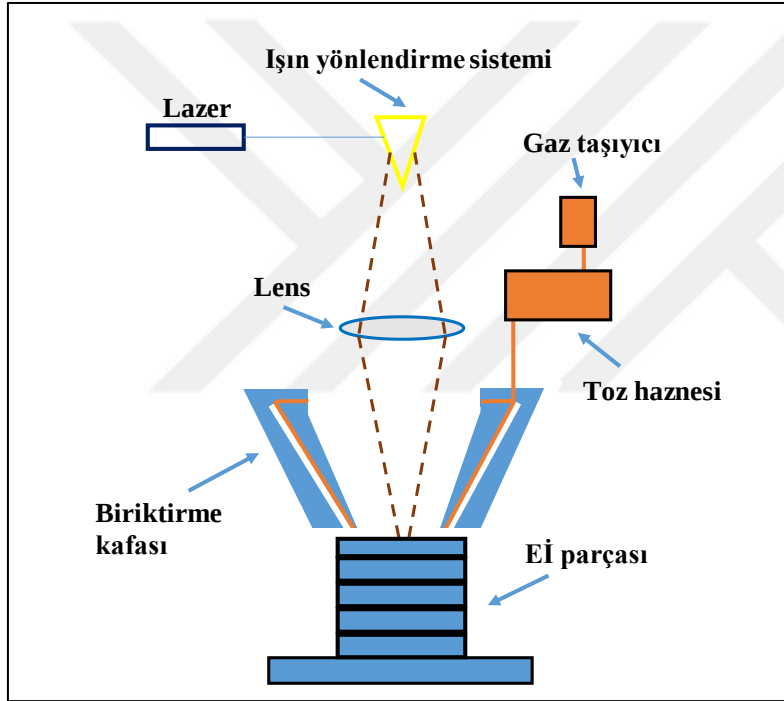
Şekil 2.2. Toz yataklı Eİ sisteminin şematik gösterimi

Toz beslemeli Eİ sistemlerinin genel bir gösterimi Şekil 2.3'te verilmektedir. Bu sistemlerin yapı hacimleri toz yataklı sistemlere göre genellikle daha büyüktür. Ayrıca, toz besleme sistemleri, toz yataklı sistemlere kıyasla yapı hacmini büyütme daha elverişlidir. Bu

sistemlerde tozlar bir nozul aracılığıyla yapı yüzeyine aktarılır. Tozun tek bir katmanını veya daha fazlasını istenen şekle eritmek için bir lazer kullanılır. Bu işlem üç boyutlu katı bir bileşen oluşturmak için tekrarlanır. Piyasada iki hâkim sistem türü vardır;

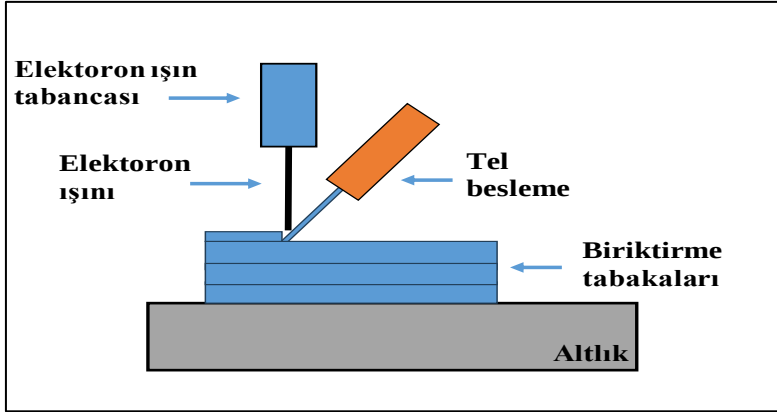
1. İş parçası sabit kalır ve biriktirme kafası hareket eder.
2. Biriktirme kafası sabit kalır ve iş parçası hareket ettirilir.

Bu tip sistemin avantajları arasında daha büyük yapı hacmi ve aşınmış ve/veya hasarlı bileşenleri yenilemek için kullanılabilmesi yer alır [8].



Şekil 2.3. Toz beslemeli Eİ sisteminin genel gösterimi

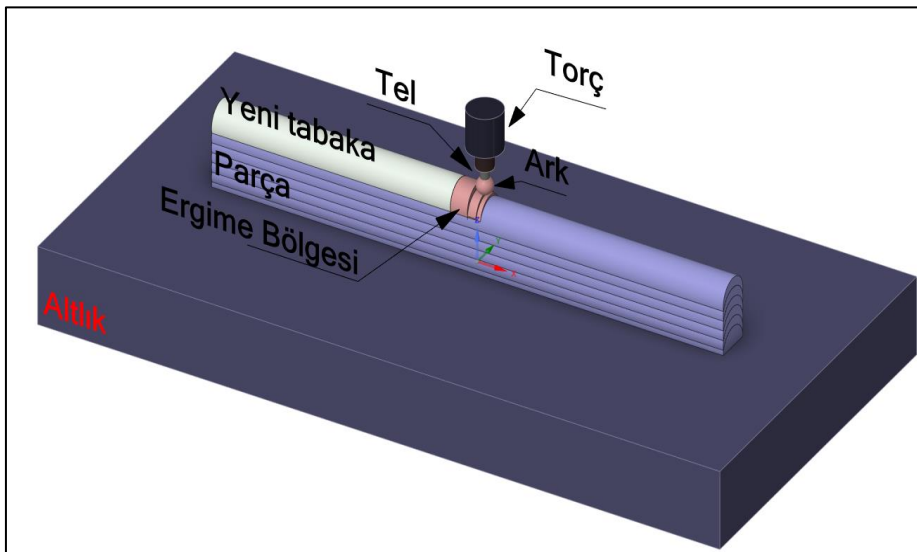
Tel beslemeli Eİ sisteminde malzeme teldir ve bu sistemlerin enerji kaynağı elektron ışını, lazer ışını ve plazma arkını içerebilir. Bir tel beslemeli Eİ sisteminin şeması Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Başlangıçta, tek bir malzeme katmanı biriktirilir ve sonraki geçişlerde üç boyutlu bir yapı üretmek için ilk katmanın üzerine inşa edilir. Genel olarak, tel besleme sistemleri yüksek biriktirme hızı ile işleme için çok uygundur ve büyük yapı hacimlerine sahiptir; ancak, üretilen ürün genellikle toz yatağı veya toz beslemeli sistemlere göre daha kapsamlı ardıl işlem gerektirir [9].



Şekil 2.4. Tel beslemeli Eİ sisteminin genel gösterimi

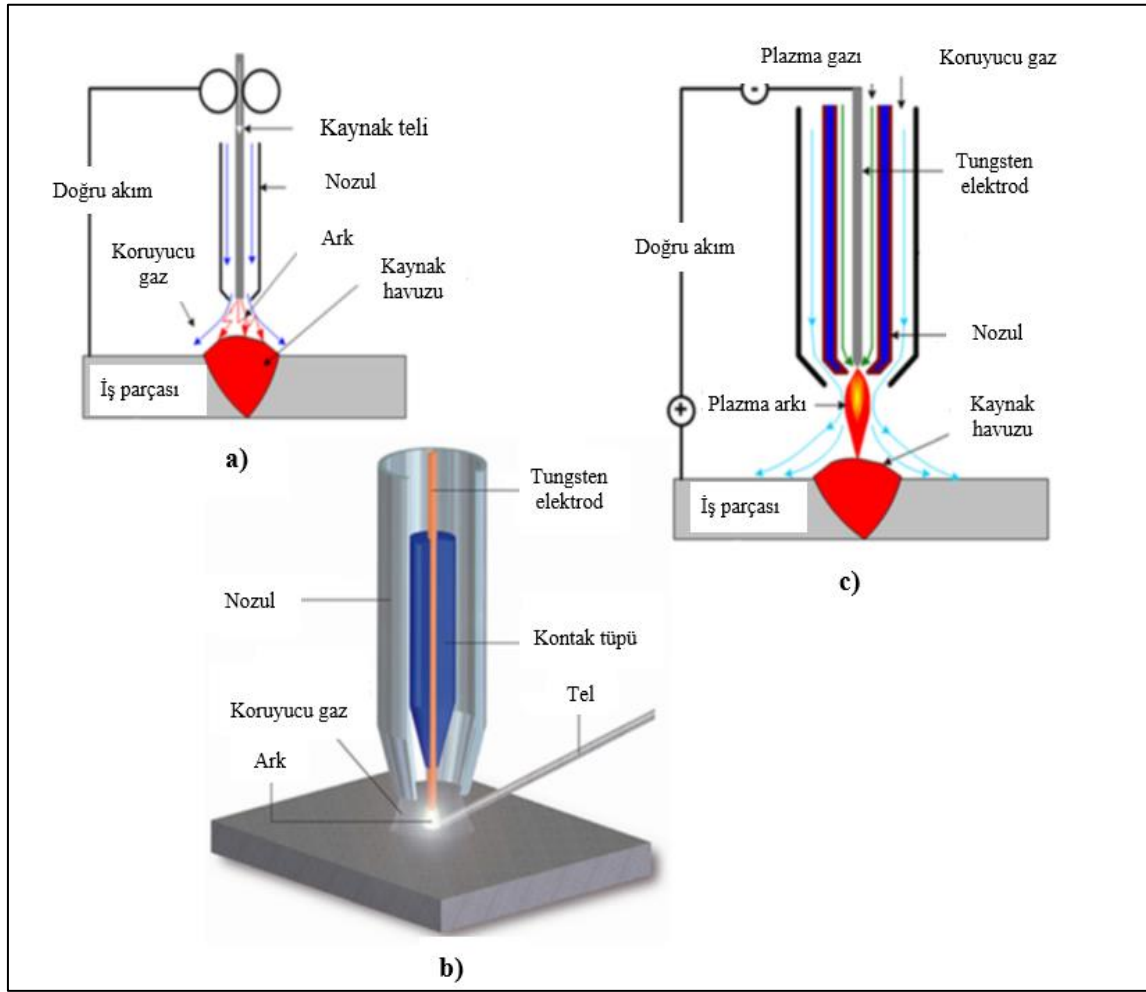
2.2. Tel Ark Ergitmeli Eklemeli İmalat

Tel ark ergitmeli eklemeli imalat, ASTM F2792-12a [10] 'ye göre doğrudan enerji biriktirme kategorisinde sınıflandırılır ve bir ısı kaynağı olarak kullanılan elektrik arkı ile besleme malzemesi olarak kullanılan telin kombinasyonu olarak tanımlanır. Süreç şematik olarak Şekil 2.5'te gösterilmektedir. WAAM işleminin kökeni, Baker'in [11] metal süsleri biriktirmek için besleme malzemesi olarak dolgu telleriyle birlikte ısı kaynağı olarak bir elektrik arkını kullanmayı önerdiği 1925'lere kadar uzanmaktadır. Özellikle son 10 yılda teknolojinin ilerlemesinde çok fazla yol kaydedilmiştir. Günümüzde WAAM, titanyum, alüminyum, nikel alaşımı ve çelik gibi çeşitli mühendislik malzemeleri için umut verici bir üretim süreci haline gelmiştir.



Şekil 2.5. WAAM yönteminin şematik gösterimi [12]

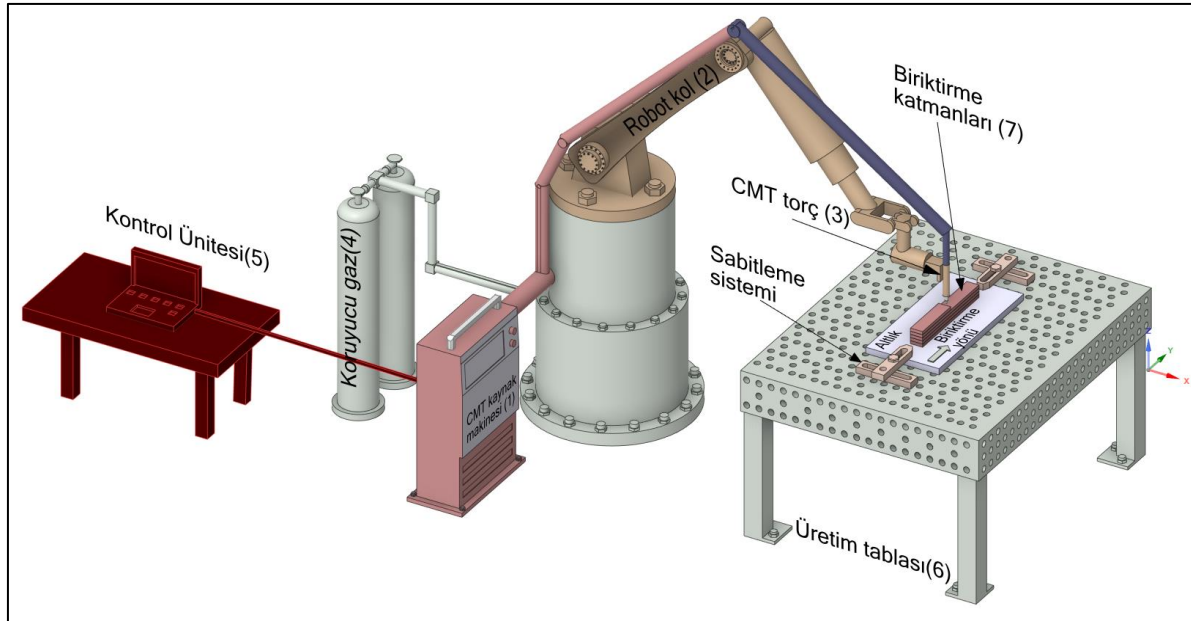
Geleneksel eksiltmeli üretime kıyasla WAAM sistemi, bileşen boyutuna bağlı olarak üretim süresini %40 - 60 ve üretim sonrası işleme zamanını %15 - 20 azaltabilir [13]. Örneğin, WAAM teknolojisindeki son gelişmeler, geleneksel eksiltmeli üretim sürecine kıyasla hammadde kullanımında yaklaşık %78'lik bir tasarrufla uçak iniş takımı nervürlerinin imal edilmesini mümkün kılmıştır [14]. WAAM, gaz metal ark kaynağı (GMAW), plazma ark kaynağı (PAW) ve gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) gibi otomatikleştirilmiş kaynak işlemlerinin temel kavramlarına dayanmaktadır [15]. Şekil 2.6'da bu üç ısı kaynağının şematik gösterimidir.



Şekil 2.6. Isı kaynaklarının şematik gösterimi a) GMAW b) GTAW ve c) PAW [9]

WAAM sistemleri, temel olarak kaynak makinesi, kaynak torcu, torcun hareketini sağlayan kartezyen veya robotik temelli hareket sistemi, atlık, altlığın monte edildiği sabit veya hareketli pozisyoner/üretim tablası gibi alt sistemlerinden oluşmaktadır. Robotik WAAM sisteminin tipik bir diyagramı Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Kontrol sistemi (5) hem robot hareketlerini hem de kaynak işlemlerini koordine etmek için kullanılır. Kaynak işlemini

kontrol etmek için programlanabilir bir GMAW güç kaynağı (1) kullanılır. Büyük bir endüstriyel robot (2), metal biriktirme için kaynak torçunu (3) parçayı üretmek için biriktirme katmanları (7) için uygun hareketi üretim tablası (6) üzerinde uygular. Koruyucu gaz (4) kaynak banyosunu ve ergime bölgesini atmosferden korur [9].



Şekil 2.7. Deneysel robotik WAAM sisteminin şematik diyagramı [12]

Genel olarak, kaynak teli şeklinde mevcut olan herhangi bir malzeme WAAM için kullanılabilir. En çok kullanılanlar malzemeler, çelik, alüminyum (Al), titanyum (Ti), nikel (Ni) alaşımlardır. Ti ve Ni alaşımları, havacılık ve uzay endüstrisi tarafından kullanılmalari nedeniyle giderek daha fazla incelenmektedir. Dolayısıyla, bu sürecin havacılık ve uzay bileşenlerinin seri üretimine uyarlanması için olgunlaştırılması arzusu, düşük bir satın alma-
uçuş (BTF) oranıyla büyük parçalar üretme yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Diğer mekanik ve metalurjik özellikler arasında yüksek özgül mukavemet, gelişmiş kompozit malzemelerle termal ve elektrokimyasal uyumluluk ve bu malzemelere eksiltici yöntemlerin uygulanmasıyla ilişkili maliyet yer almaktadır [16].

WAAM sisteminin diğer Eİ sistemlerine göre üstünlükleri olmakla birlikte üretimin doğası gereği üretim sırasında oluşan bazı negatif yanları da bulunmaktadır. İmalat yönteminin üstünlükleri ve zayıflıkları başlıklar halinde detaylandırılmıştır.

Maliyet

İlk yatırım maliyeti diğer metal Eİ sistemlerine kıyasla oldukça düşüktür. Teknolojisi gereği yüksek teknoloji gerektiren alt yapı sistemlerine ihtiyaç duymamaktadır. Hammadde maliyetlerindeki önemli fark nedeniyle, tel bazlı teknoloji toz bazlı teknolojiye göre 2 ile 50 kat daha uygun maliyetlidir. WAAM, geleneksel yöntemlere kıyasla titanyum bileşen üretiminde %7-69 oranında tasarruf sağlamaktadır [14, 17].

BTF oranı

Karmaşık uçak motoru parçaları üretirken ham madde kullanım oranının 30 olması alışılmadık bir durum değildir. Aynı parçaları üretmek için WAAM kullanıldığında, önemli miktarda malzeme tasarrufu sağlanabilir. Yüksek maliyetli titanyum alaşımları için ham madde kullanım oranı 1,2'dir [13].

Yüksek biriktirme oranı

WAAM, 10 kg/saat yakın bir çelik biriktirme hızına ulaşabilir, bu da toz biriktirme işleminin maksimum hızı olan 600 g/saat'ten yaklaşık 16 kat daha hızlıdır. Bunun açıklaması, tek bir kaynak boncuğun şeklinin büyük olmasıdır. Toz bazlı işlem birkaç mikrondan 1 mm'ye kadar değişen kalınlıkta boncuklar üretirken, WAAM işlemi 1-2 mm yüksekliğinde boncuklar üretir ve bu da biriktirme hızını orantılı olarak artabilir [14]. Ancak, daha hızlı üretim temposu, parça geometrisinde ve istenilen özelliklerde bazı bozulmalara neden olabilir. Bu sebeple, üretim sürecinde optimum hızın belirlenmesi büyük önem taşır. Üretim hızı hem geometrik hassasiyet hem de malzemenin mekanik özellikleri açısından denge sağlanacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu denge, parça kalitesini korurken üretim verimliliğini artırmaya olanak sağlar.

Orta ve büyük ölçekli üretim

Üretim haznesinin boyutu nedeniyle nesnelerin toplam boyutunu kısıtlayan lazer ve elektron ışın tabanlı yöntemlerin aksine, WAAM her boyutta parça üretilebilir. Bu nedenle WAAM, yüksek biriktirme hızı ve potansiyel olarak sınırsız malzeme biriktirme kapasitesi nedeniyle orta ve büyük boyutlu parçaların üretimi için idealdir. Bununla birlikte, daha büyük boncuk

hacmi ve daha yüksek yüzey pürüzlülüğü, toz bazlı yönteme kıyasla düşük yüzey pürüzlülüğü ve orta karmaşık parçaların geliştirilmesini sınırlamaktadır [18].

Termal döngü etkisi

Katılaşmış metal ve altlık, bir elektrik arkı kullanılarak malzeme katman katman eklenirken termal döngüye tabi tutulur. Ekzotermik etki, daha önce biriktirilen katmanın kısmi erimesini ve ısı işlemini indüklemenin yanı sıra izotermal olmayan ısı işlem etkisini veya biriktirilen kaynak boncuğunun altındaki üç ila dört katmanı genişletir. Değişim miktarı, uygulanan ısı miktarı ve malzemenin termofiziksel özelliklerine göre belirlenir. Termal döngü, biriktirilen metalin genişlemesine ve büzülmesine neden olarak ana malzemede ve şekillendirilen bileşenlerde önemli miktarda kalıntı gerilmeye ve çarpılmalara neden olur [19, 20].

Mekanik özellikler

WAAM ile üretilen parçaların mekanik dayanımı, üretimde kullanılan tel ile aynı kimyasal özelliklere sahip dövme ürünlerin dayanımının gerisinde kalmaktadır. WAAM parçaları, parçanın üretimi sırasında kullanılan biriktirme modeline göre yüksek derecede yönlü gerilme özelliklerine sahiptir. WAAM parçaları güçlü gerilme özellikleri nedeniyle belirli bir yöne doğru hareket ederler [17, 21].

Eİ ile üretilen bileşenlerin içinde kusur oluşumu, yapı ve uygulanabilirlik açısından önemli bir zorluktur. Kusurlar düzeltilmediği takdirde, bir Eİ bileşenin hizmet boyunca performansını olumsuz bir şekilde etkileyebilir. Katmanlı olarak üretilen parçaların hızlı ısıtma, soğutma ve katılaştırma süreçleri karmaşık mikro yapısal özelliklere neden olur. WAAM işleminde damlacık transferi, metal malzemelerin biriktirilmesini gerçekleştirmek için kullanılır. Ancak, damlacık enerjisini hassas bir şekilde yönetmek zordur. Ek olarak, WAAM işlemi çoklu fizik ara yüzü bir süreç olduğundan, karmaşık, geçici, dengesiz fiziksel, kimyasal ve metalürjik özellikler uygun olmayan süreç faktörlerinden kolayca etkilenebilir. Ayrıca, biriktirmenin bütünlüğünü de etkileyebilir [22]. Bir bileşenin imalatı sırasında, proses koşullarındaki değişimler genellikle iç kusurların gelişmesine yol açabilir. Katmanlı üretim süreci sırasında, safsızlıklar bileşen içinde sıkışıp kalabilir ve bu da

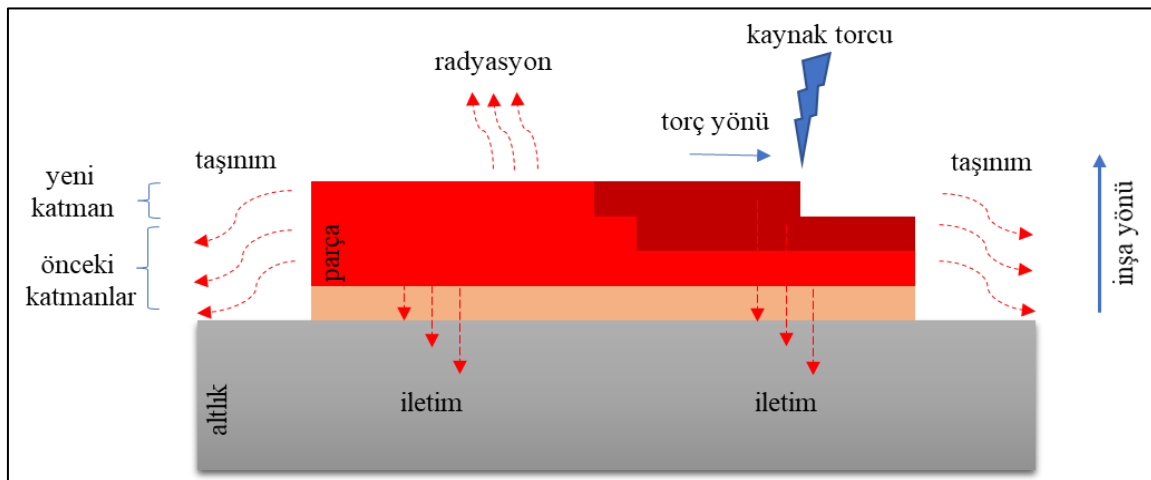
kusurlara yol açabilir. Bu kusurlar nedeniyle, bileşenin mekanik özellikleri tehlikeye girebilir [23].

Tekrarlanan aşırı ısı girdisi, üretilen yapılarda önemli kalıntı gerilmelere neden olur ve bu da WAAM tabanlı üretim teknikleri için endişe verici bir konudur. Aşırı ısı girdisinin neden olduğu düşük yüzey kalitesi WAAM ile üretilen bileşenlerin geometrik uyumluluk ve erken yapısal hasar için temel bir sorundur [9].

WAAM üretiminde tekrarlan aşırı ısı girdisinin sebep olduğu çarpılma, kalıntı gerilme, anizotropi, değişken içyapı gibi kusurların üstesinden gelmek için araştırmacılar birçok çalışma yapmış ve sonuçlarını yayınlamıştır.

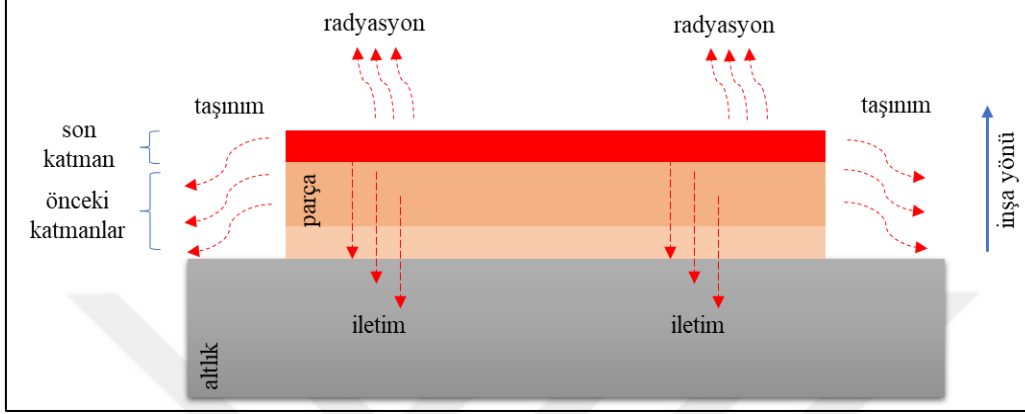
2.3. Tel Ark Ergitmeli Eklemeli İmalatta Isıl Davranış

WAAM üretimindeki en büyük sorun yüksek ısı girdisidir [24]. Üretim için gerekli olan ısı çok yüksek olduğundan, demir esaslı malzemeler için ~ 1600 °C, her yeni katman üretiminde önceki katmanlar tekrar yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır, ortaya çıkan termal davranış Şekil 2.8'de verilmiştir. Yeni katman üretimi sırasında önceki katmanlar ile yeni katman arasında hızlı bir ısı transferi gerçekleşmektedir. Daha düşük sıcaklığa sahip önceki katmanlara çok hızlı bir ısı akışı olur ve önceki katmanların sıcaklıkları hızla artar. Bu sırada çevre ile iş parçası arasında da taşınım ve radyasyon yoluyla ısı transferi gerçekleşmektedir.



Şekil 2.8. WAAM işleminde üretim sırasındaki ısı davranış: ısı transferinin yönleri

Katman üretimi tamamlandı ve parça üretim parametresi olarak tanımlanan bekleme süresi boyunca soğuma döngüsüne girdiğinde termal hareketlilik sürer ve parça soğuma döngüsündeyken ısı akışı daha düşük sıcaklıklara sahip önceki katmanlara doğru devam eder. Termal süreç Şekil 2.9'da detaylandırılmıştır.



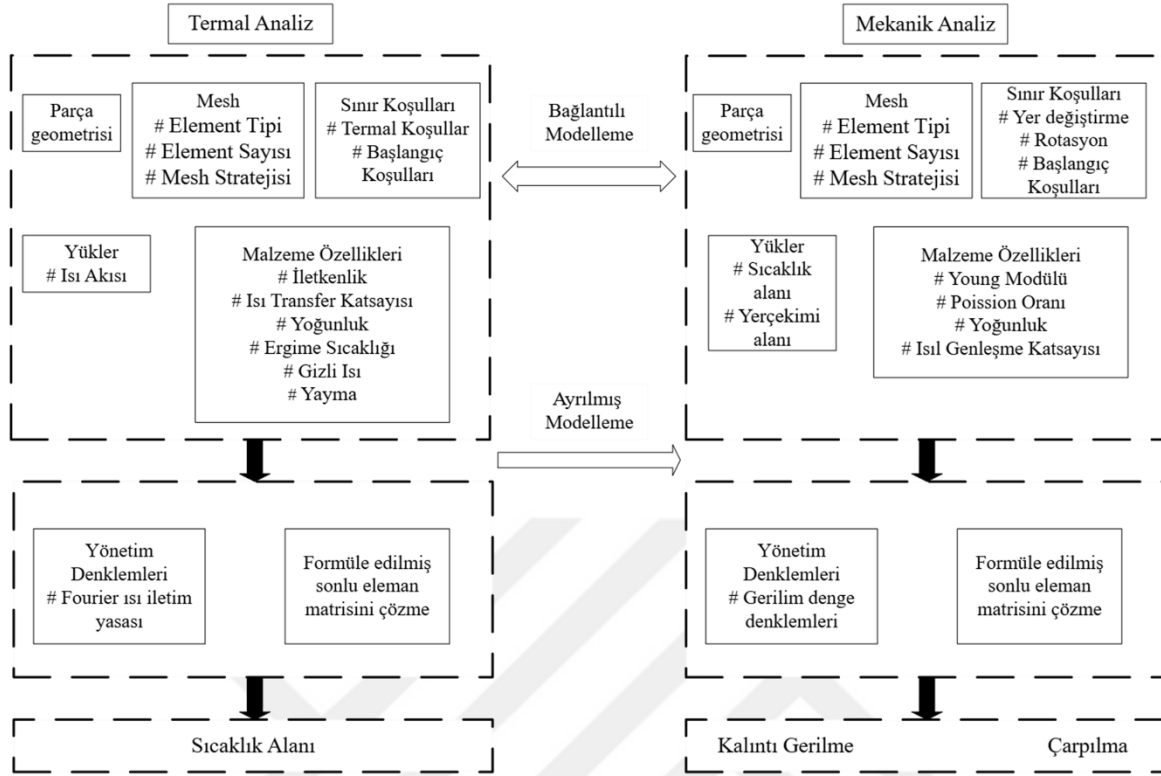
Şekil 2.9. WAAM üretiminde bekleme süresindeki ısı transferinin yönleri

Isı kaynağından gelen yüksek enerji girişi, önceden katılmış katmanların üretilen her yeni katmanla birlikte yeniden ısıtma-soğutma döngüsüne girmesine neden olur [25]. Bu kontrolsüz termal döngü, üretilen parçada termal gerilime neden olarak kalıntı gerilmeler üretir [26], [27], [28], [29]. Soğutma aşaması sırasında dış yüzey daha hızlı soğur. Bu durum dıştan içe doğru sıkışmaya neden olur. Merkez büzölmeye çalıştıkça, daha soğuk olan dış yüzey malzemesi tarafından kısıtlanır, bu da iç kısımda kalıntı çekme gerilmesi ve bileşenin dış kısmında kalıntı basma gerilmesi ile sonuçlanır. Bu kalıntı gerilmeler mekanik özellikleri ve yorulma ömrünü bozabilir, anizotropiye neden olabilir, mikro çatlaklar gibi kusurlar oluşturabilir ve sonuçta parça arızasına yol açabilir [30].

2.4. Tel Ark Ergitmeli Eklemeli İmalatta Modelleme

WAAM parçalarının üretim parametreleri ve malzeme özellikleri kullanılarak üretim modellemesi için sonlu elemanlar tabanlı termo-mekanik modeller kullanılır [27]. Bu modeller ile üretimin termal ve mekanik davranışı simüle edilmektedir. Çizelge 2.1, üretilen bileşendeki boncuk geometrisi, sıcaklık alanları, gerilme ve çarpılmanın simülasyonu için bir sonlu elemanlar işlem akışını göstermektedir.

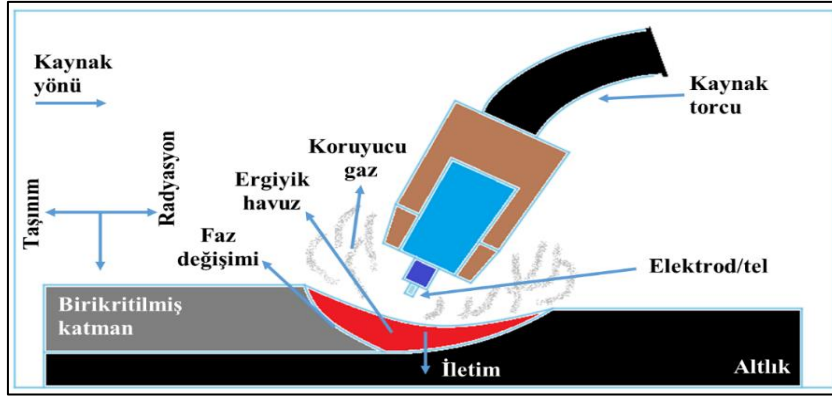
Çizelge 2.1. Termo-mekanik analiz için sonlu elemanlar proses akışı [27]



Çizelgede belirtildiği gibi, iki teori seti farklı doğrusal olmayan denklem setlerinin çözümünü gerektirdiğinden, WAAM işlemi sırasındaki termal davranış mekanik bir tepkiye neden olmaktadır. Termal model ve mekanik model, termo-mekanik modelin temelidir. İki model arasındaki etkileşime dayanarak çözüm, birleştirilmiş ve ayrıştırılmış veya zayıf bir şekilde bağlanmış veya birleştirilmemiş çözüm modelleri olarak sınıflandırılır [30].

2.5. Termal Modelleme

WAAM işleminde, bileşenler, parçanın CAD modeline uygun olarak katman katman malzeme (tel) bırakılarak üretilir. Kaynak arkından eklenen ısı, teli kaynak havuza eritir. İletim altlık ve varsa önceki katmanlar arasında, taşınım ve radyasyon parçanın serbest yüzeyinden çevreye ısı kaybı modlarıdır. Şekil 2.10, WAAM üretiminde iletim, taşınım ve radyasyon olarak ısı kaybı modlarını göstermektedir. WAAM'daki sürecin termal kontrolünden sorumlu olan fiziksel fenomen, ark/lazer/elektron ışını tabanlı kaynak işlemlerine çok benzerdir [27, 31-35].



Şekil 2.10. WAAM işlemindeki termo-fiziksel olaylar [36]

Kaynaklı bileşenlerde kalıntı gerilme ve çarpılmanın modellenmesi, 1970'lerin başında akademik çevrede çok fazla ilgi görmüştür. Ayrıca, kalıntı gerilmeleri ölçmek için sayısal modeller Argyris ve arkadaşları [37] ve Papazoglou ve arkadaşları [38] tarafından 1980 başlarında geliştirilmiştir. Ayrıca Goldak ve arkadaşları'nın [39] çift elipsoid ısı girdisi modeli, kaynak bölgesindeki faz dönüşüm modelleri, kaynaklı bileşenlerde çarpılma nedeniyle karşılaşılan zorluklar için önemli bir aşamadır. Yukarıdaki referanslarda alıntılanan modeller, 2B ölçeğinin alanıdır, 1990'lar ve 2000'ler kaynak işlemleri için termal gerilimler ve çarpılmaları en aza indirilmesi ve azaltılması için 3B modellemenin geliştirilmesine tanık olmuştur.

Bu gelişmeler ışığında, termodinamiğin birinci yasasına göre genel enerji dengesi denklemi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$Q_L = Q_C + Q_{CV} + Q_R \quad (2.1)$$

Q_L : toplam ısı kaybı,

Q_C : iletim ısı kaybı,

Q_{CV} : taşınım ısı kaybı,

Q_R : radyasyon ısı kaybı

Fourier'in ısı iletimi yasası, sistemdeki bir sürekliliği dikkate alırken bu durumda ısı transferi olayını açıklamak için kullanılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

k : ısı iletkenlik,

T : sıcaklık,

ρ : malzemenin yoğunluğu,

$\dot{q}$: sisteme ısı giriş oranı,

C_p : sabit basınçta özgül ısı kapasitesi,

t : arkin etkileşim zaman

Eritme ve katılaşma sürecinde katı-sıvı-katı dönüşümünü yakalamak için sisteme entalpi değişikliği eklenmelidir. Sistemdeki entalpi değişimi şu şekilde verilmektedir.

$$\partial H = C_p \partial T \quad (2.3)$$

Böylece (2) nolu eşitlik;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.4)$$

Sistemin başlangıç koşulu ise;

$$T(x, y, z, 0) = T_a \quad (2.5)$$

Sistemin başlangıç sıcaklığı T_a ortam sıcaklığına eşit kabul edilebilir. Genel bir durumda, erimiş havuza sağlanan ısı, modeldeki ısı akışı olarak düşünülebilir ve sistemin serbest yüzeyindeki kayıplar, taşınım ve radyasyondan kaynaklanır.

Bu nedenle, süreklilikteki serbest yüzey için sınır koşulu Denklem 2.6'da verilmektedir.

$$k \frac{\partial T}{\partial \hat{n}} - \dot{q}_s + h(T - T_a) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4) = 0 \quad (2.6)$$

$\hat{n}$: yüzeye normal vektör,

$\dot{q}_s$: elektrik arkından erimiş havuza ısı girdisi oranı,

h : ısı transfer katsayısı,

σ : Stefan-Boltzmann sabiti ve ε : ısı yayılım katsayısı [40].

Mikro ölçekli modelleme, eriyik havuzu fiziksel olayları hakkında fikir verir. Isının tel ve baz metal ile etkileşimini, ısı transferini, faz değişimini, eriyik havuzunun yüzey gerilimini ve Marangoni kuvvetine yol açan termal gradyanları içerir. Bu modelleme uygulamaları, Navier-Stokes denklemlerini çözerek hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) algoritmalarına dayanmaktadır [36].

Bu denklemler;

Kütlenin korunumu,

Momentumun korunumu,

Yerçekimsel cisim kuvvetini dikkate alan enerji,

Geri tepme kuvveti,

Momentum koruma denklemindeki yüzey gerilimi,

Faz değişimi sırasında açığa çıkan / gereken gizil ısı,

Buharlaşma ve yoğunlaşma etkisi,

Enerjinin korunumundaki radyasyon etkisi,

Bu nedenle, genelleştirilmiş koruma denklemleri formu içinde;

Kütlenin korunumu eşitliği

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (2.7)$$

ρ : akışkan karışım yoğunluğu,

t: zaman,

$\vec{v}$: ortalama kütle hız vektörüdür.

Momentumun korunumu eşitliği

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau - \frac{C_1(1-f_L)^2}{f_L^3 + 10^{-10}} \vec{v} + \left[\gamma \kappa \vec{n} + \frac{d\sigma}{dT} (\nabla T - \vec{n}(\vec{n} \cdot \nabla T)) \right] \cdot \vec{n} + P_R \cdot \vec{n} + \rho \vec{g} \quad (2.8)$$

ρ : hidrodinamik basınç,

τ : deviatorik gerilim tensörü (karışım etkisi dinamik viskozite kullanılarak hesaplanır),

C_1 : sabittir,

f_L : sıvı fraksiyonudur,
 γ : yüzey gerilimidir,
 κ : yüzey eğriliğidir,
 $\vec{n}$: yüzey normalidir,
 T : sıcaklık,
 P_R : geri tepme basıncı,
 $\vec{g}$: yerçekimi vektöründen kaynaklanan ivmedir.

Üçüncü terim, lapa (katı+sıvı) bölgedeki (gözenekli ortam) momentum kayıplarının hesap verebilirliği için eklenmiştir. Dördüncü terim, yüzey gerilimi kuvvetleri ve erimiş malzeme yüzeyindeki sıcaklığa bağlı yüzey geriliminden kaynaklanan Marangoni etkisi için dikkate alınır.

Enerjinin korunumu eşitliği

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} H = \nabla \cdot (k \nabla T + \sum_i h_i \vec{j}_i) + \frac{\partial p}{\partial t} + \tau \cdot \nabla \vec{v} - \frac{\partial \rho f_L L_f}{\partial t} - \nabla (\rho \vec{v} f_L L_f) - \frac{\rho \partial (1-f_v) L_v}{\partial t} + \vec{S}_R \cdot \vec{n} \quad (2.9)$$

H : toplam entalpi,
 k : termal iletkenlik katsayısı,
 h_i : i türlerinin özgül entalpisi;
 j : tür kütle akısı,
 L_f ve L_v : füzyon ve buharlaşmanın gizli ısısı,
 f_L ve f_v : ise lapa bölgenin sıvı ve buhar fraksiyonu ve
 S_R : enerji denkleminde radyasyonun hesap verebilirliği için kaynak terimidir.

Türlerin (alaşımların) korunması

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{v} Y_i = \nabla \cdot \vec{j}_i \quad (2.10)$$

Y_i : türlerin kütle oranıdır.

Burada, Denklem 2.10, bileşen yapımı sırasında buhar emisyonunu izlemek için kullanılır. Erime işlemi sırasında buharlaşan alaşım elementlerini takip etmenin yanı sıra, gaz ekstraksiyonunun ayrıntılarını sunar. Erimiş havuzun serbest yüzeyini izlemek için skaler

bir işlev kullanılır. Bu skaler fonksiyon, sıvı halin (veya diğer herhangi bir malzeme durumunun) sıvı hacim fraksiyonu olarak skaler bir miktara sahiptir:

$$\frac{\partial \alpha_L}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_L \vec{v} = \frac{m_L}{\rho_L} - \frac{m_v}{\rho_L} \quad (2.11)$$

α_L : sıvı hacim bölümü,

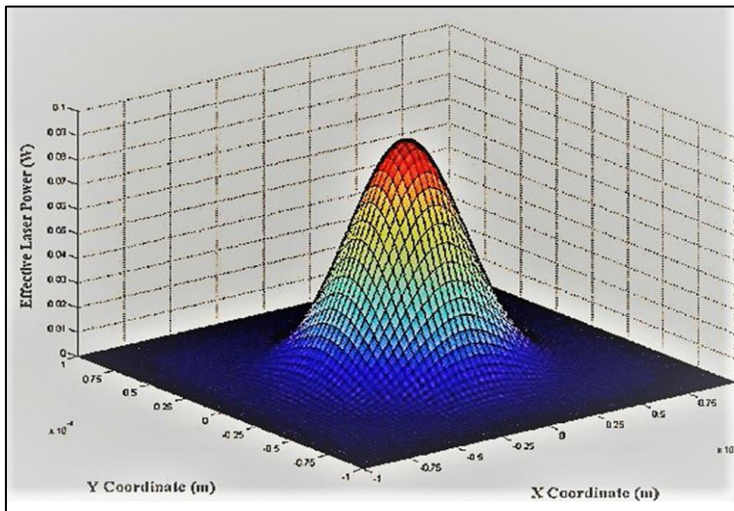
m_L ve m_v : sırasıyla faz değişiminden kaynaklanan sıvı ve buhar kütle miktarı,

ρ_L : malzemenin sıvı haldeki yoğunluğudur.

2.7 – 2.11'de belirtilen koruma denklemlerini çözmek için benimsenen sayısal yöntemler kafes Boltzmann yöntemi [41] ve sonlu hacim yöntemidir [42].

2.5.1. Isı kaynağı modeli

WAAM üretimi modellemesinde kullanılan ısı kaynağının etkisi, ısı akısı veya sıcaklık yükü olarak düşünülerek modellenebilir. Gauss yoğunluk dağılımına dayanan ısı kaynağı, bir ısı akısı yükünün kullanıldığı her yerde araştırmacılar arasında önemli bir seçimdir. Gauss ısı yoğunluğu dağılımının bir örneği Şekil 2.11'de gösterilmektedir ve bir ısı akısının ısı akısı yoğunluğu q_{arc} ile yay merkezinden r_Q radyal mesafe arasındaki matematiksel ilişki şu şekilde verilmiştir [43]:



Şekil 2.11. Gauss ısı yoğunluğu dağılımı [39]

$$q_{arc} = \frac{3Q_{arc}}{\pi r_Q^2} e^{\frac{-r^2}{r_Q^2}} \quad (2.12)$$

Q : tabana ısı transferinin miktarı,

r : yayın merkez yarıçapıdır.

Pavelic ve arkadaşları [44], termal akının $z - z$ düzleminde bir Gauss veya normal dağılımı vardır ve aşağıdaki gibi vermişlerdir [36].

$$q(r) = q(0)e^{-C_2 r^2} \quad (2.13)$$

$q(r)$: r yarıçapındaki yüzey akısı,

$q(0)$: ısı kaynağının merkezindeki maksimum ısı akısı,

C_2 : konsantrasyon katsayısı,

r : ısı kaynağının merkezinden radyal mesafedir.

Dahası, Friedman [45], Pavelic'in disk modeli için, ısı kaynağı ile birlikte hareket eden bir koordinat sisteminde belirtilen bir ikame önermiştir. Matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir [36];

$$q(x, \xi) = \frac{3Q}{\pi c^2} e^{\frac{-3x^2}{c^2}} \cdot e^{\frac{-3\xi^2}{c^2}} \quad (2.14)$$

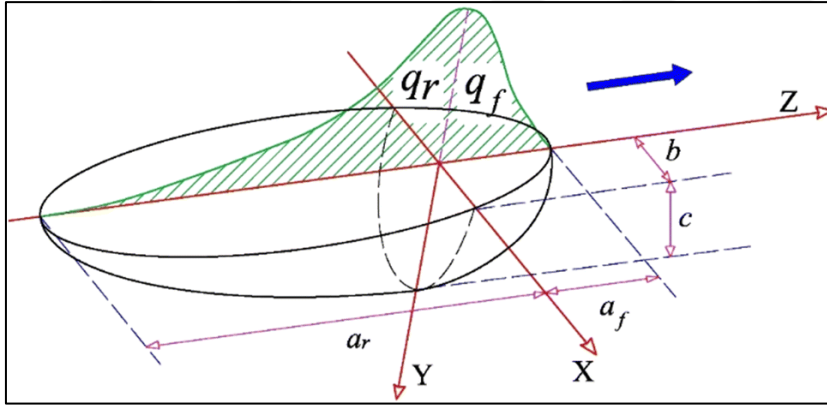
Q : enerji girdi oranı,

c : akı dağılımının karakteristik yarıçapıdır ve;

$$\xi = z + v(\tau - t) \quad (2.15)$$

v : kaynak hızıdır.

Pavelic, Friedman, Krutz ve Segerlind tarafından verilen yüzey ısı kaynağı modeli için daha küçük bir penetrasyon derinliği ile kaynak yapıldığı kabul edilebilir. Ancak bu modeller lazer ve elektron ışın gücü gibi yüksek enerji yoğunluklu kaynaklar için yeterli değildir. Bu kaynaklar, kırıların kazma hareketini görmezden geldiğinden, önemli ölçüde daha büyük bir penetrasyon derinliğine sahiptir. Bu eksikliğe alternatif olarak Goldak ve arkadaşları [39], aynı zamanda yüksek güç yoğunluklu kırıların eyleminden sorumlu olan Şekil 2.12’de verilen çift elipsoidal güç yoğunluğu dağılımını önermiştir. Sıcaklık gradyanı deneysel olarak hesaplanırken, ısı kaynağının önünde ve arkasında gradyanın her iki taraf için eşit olmadığı görülmüştür. Bu nedenle Goldak tarafından ergimiş havuzun ön ve arka tarafı için önerdiği iki ayrı formül vardır.



Şekil 2.12. Goldak çift elipsoidal ısı kaynağı parametreleri [39]

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3[z+v(\tau-t)]^2}{c^2}} \quad (2.16)$$

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3[z+v(\tau-t)]^2}{c^2}} \quad (2.17)$$

Bu modelde, Q : biriken gerçek ısı miktarıdır. WAAM işleminde,

$$Q = \eta VI \quad (2.18)$$

olarak ifade edilir,

η : ark verimliliği,

V : ark voltajı,

I : ark amperidir.

a, b, c : kaynak boncuğunun üç uzunluğudur,

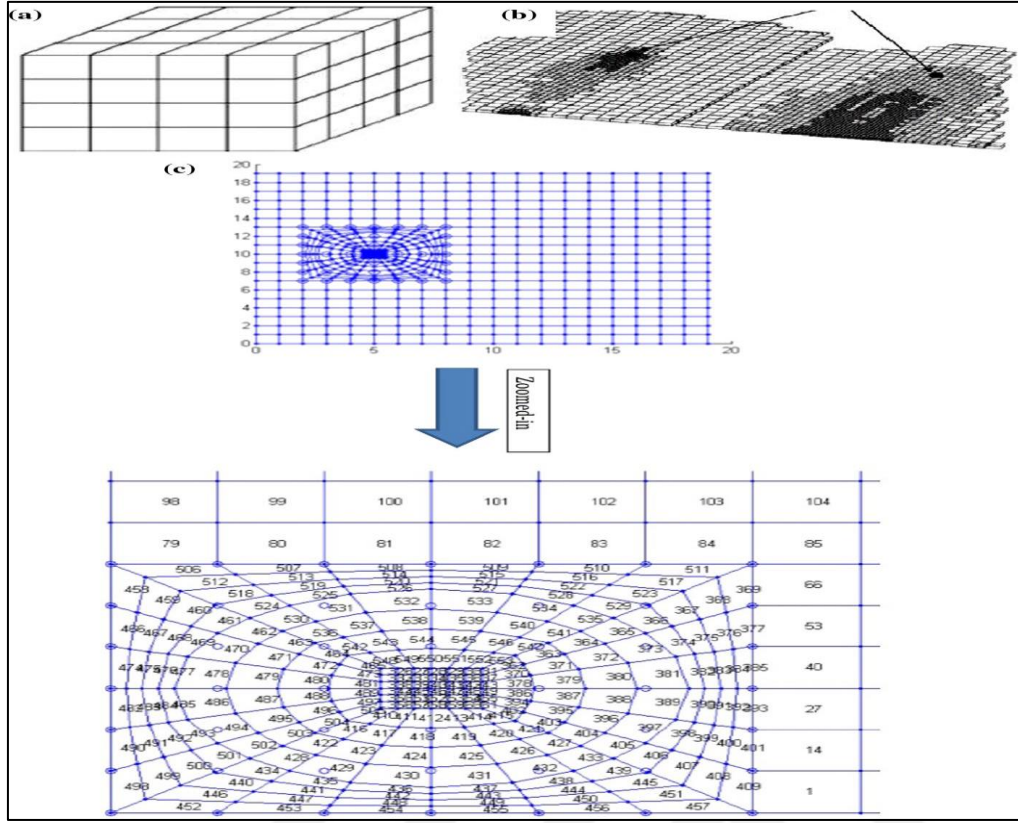
x, y, z : kartezyen koordinatlarıdır,

f_f ve f_r : ön ve arka çeyrekte biriken ısıнын fraksiyonu $f_f + f_r = 2$ olarak düşünülebilir.

Gauss ısı kaynağı modelleri çoğunlukla kaynak ve metal Eİ işlemlerinde kullanılmaktadır.

2.5.2. Ağ oluşturma

Sonlu elemanlar analizinin kalitesi, hesaplama verimliliği, hesaplama süresi ve hesaplama sonuçlarının kesinliği için modellenen parçanın ağ oluşturma yapısı güçlü bir etkiye sahiptir. Üniorm ağ oluşturma (Şekil 2.13 (a)) düşünüldüğü her yerde, bunlar kolayca uygulanır ve doğru sonuçlar verir. Ancak, daha iyi sonuçlar elde etmek için, yüksek hesaplama maliyetine neden olan bu kategoride ince ağ oluşturma ve daha fazla eleman gereklidir. Oysa iyi bilinen, benimsenen bir ağ oluşturma tekniği, kısmen farklı bölgelerdeki ağ yoğunluğundaki (uyarlanabilir ağ) varyasyonu kullanır [36].



Şekil 2.13. Ağ oluşturma şemaları [36]

Isı kaynağına nispeten yakın olan bölgeler, dik sıcaklık gradyanları sergilediği için yoğun bir şekilde birbirine geçmiştir. Önemli bölgelerin daha yoğun ağ oluşturma ile ağ oluşturduğu strateji, Uyarlamalı Ağ İyileştirme (UAI) olarak da bilinir. UAI, statik UAI (Şekil 2.13 (b)) ve dinamik UAI (Şekil 2.13 (c)) olmak üzere iki tipte sınıflandırılır. Bu ikisi arasındaki tek fark, termal veya gerinim gradyanı değerleri için dinamik UAI değişikliklerinde ağ oluşturma stratejisidir veya ince ağ, ısı kaynağını takip eder. Mevcut literatüre göre, ANSYS Fluent, sonlu eleman kodu DEAL II, Pan hesaplama sonlu elemanlar yazılımı ve 3DSIM parçaların birbirine bağlanmasında dinamik UAI stratejisini kullanır. Metal Eİ'ta hesaplama süresini azaltmak için çeşitli yöntemler benimsenmiştir. Daha büyük eleman boyutuna sahip alt tabakanın kabalaştırılmasını, alt tabaka ile zaten katılmış tabakaların kalınlaştırılmasını, enerji kaynağı ile hareket eden uyarlanabilir ağ örgüsünü içerir [46].

2.5.3.Element doğum ve ölüm

Malzemenin katı veya sıvı hali, biriktirme sırasında modelin genel sertliğine tamamen katkıda bulunmaz. Genel sertlik, kalıntı gerilme ve çarpılmayı doğru bir şekilde hesaplamak

için malzeme dönüşümü sırasında (katıdan sıvıya, sıvıdan katıya) erime ve katılaşma sürecinde yer alan fiziksel olayları dikkate almalıdır. Amaca hizmet etmek için, çeşitli araştırmacılar ANSYS sonlu eleman paketinde verilen “Element Doğum ve Ölüm” tekniğini kullandılar. Elementler katılaşmaya kadar devre dışı bırakıldığından, analiz dışı bırakılır. Gerçek sertliği yüksek bir indirgeme faktörü ile çarparak, devre dışı bırakılmış elemanların genel sertlik matrisine eklenmesini kısıtlar. Herhangi bir sonlu elemanlar paketinde kullanılan bir kontrol döngüsü, bir ögenin erime sıcaklığına veya bir yük adımı aşıldıktan sonraki sıcaklığa göre yeniden etkinleştirilmesini yönetir. Katılaşmadan sonra, elementlerin rijitliği yeniden ayarlanır [36].

2.5.4. Malzeme özellikleri

Malzemenin sıcaklığa bağlı termo-fiziksel özellikleri, doğru termo-mekanik modelleme için temel bir girdidir. WAAM prosesleri için sıcaklık değişimi ile malzeme özelliklerinin değişimi önemlidir. İşlem, erimiş bölgede onlarca ile binlerce santigrat derece arasında bir çalışma sıcaklığı değişimi yaşar. Bu nedenle, WAAM sürecinin modellenmesinde kritik olarak tabi tutulan malzeme özellikleri yoğunluk, termal iletkenlik ve özgül ısı kapasitesidir [47].

Yoğunluk, termal iletkenlik gibi diğer özellikleri etkileyebileceğinden en önemli parametre olarak kabul edilebilir. Sıcaklığa bağlı bir özellik olarak, malzeme yoğunluğu tabakanın birikmesi sırasında değişir. Yine de birçok çalışma, modelleme yaklaşımlarında sabit yoğunluk değerlerini benimsemiştir. Daha doğru sonuç tahmini için, araştırmacılar zamanla yoğunluk değişimini dikkate almışlardır. Yoğunluğun sıcaklıkla doğrusal bir ilişkisi Yin ve arkadaşları [48] tarafından benimsenmiştir.

Malzemenin termal iletkenliği, içinden geçen ısı transfer oranını tanımlar. Malzemenin sıcaklığa bağlı bir özelliğidir. WAAM işlemi üzerinde yapılan birkaç çalışmada sabit termal iletkenlik kullanılmıştır. Buna karşılık, az sayıda çalışma sıcaklığa göre değişken termal iletkenliği dikkate almıştır. Isı kapasitesi, bileşen ısıtılırken bir cismin birim sıcaklığını yükseltmek için gereken sayısal enerji gereksinimidir. Genellikle özgül ısı kapasitesi sıcaklık değişimi ve faz dönüşümü ile doğrusal olmayan bir ilişkiye sahiptir. Bazı araştırmacılar, özgül ısı kapasitesinin sabit değerlerini benimsemiştir. Buna karşılık, birkaç kişi farklı sıcaklık noktalarındaki farklı özgül ısıyı, sıcaklığın doğrusal bir interpolasyon fonksiyonu olarak benimsemiştir. Yoğunlukla, araştırmacılar ya sabit değerler ya da başka

bir malzeme temelli makalede bulunan doğrusal olarak değişen termo-fiziksel özellikleri benimsemişlerdir [36].

2.5.5. Termal sınır koşulları

WAAM işlemi sırasındaki ısı transfer mekanizması, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi çok geçişli kaynak işlemine çok benzerdir. Eİ işleminde yer alan fiziksel olayların başlangıç koşulu, ortam sıcaklığıdır, çalışmalarda 20 °C (293 K) ile 30 °C (303 K) arasında tahmin edilmektedir. Ark açığa çıkmadan önce yüzey boyunca tek tip veya tek tip olmayan sıcaklık ile başlangıç koşulu şu şekilde ifade edilebilir [36];

$$t = 0\text{'daki tüm alan için } T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (2.19)$$

Burada T_0 , işlem sırasında veya işlemten sonra atmosfere maruz kalan tüm yüzeye uygulanan ilk ortam sıcaklığıdır. Oysa bileşene uygulanan sınır koşulları, yani, altlık ve önceden biriktirilmiş katmanlar boyunca iletim, koruyucu gaz ve ortam havası yoluyla konveksiyon ve üst ve yan yüzeyler ile çevreleyen hava arasındaki termal modellere radyasyon, Denklem 2.2'de verildiği gibidir [36].

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T - T_0) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \text{ (tüm } t \text{ için açıkta kalan yüzeyler)} \quad (2.20)$$

k ; termal iletkenlik,

h_c ; ısı transfer katsayısı,

ε ; radyasyon katsayısı,

σ ; Stefan–Boltzmann sabitidir.

WAAM süreçlerinin modellenmesi için birçok araştırmacı sınır koşullarının değerini bir sabit olarak kullanmıştır [36].

2.6. Mekanik Modelleme

Mekanik modelleme hem doğrusal olmayan geçici termal modelden hem de yarı statik elastoplastik mekanik modelden oluşur. Termal modelin bir sonucu olarak sıcaklık geçmişi, kalıntı gerilme ve çarpılmanın nicelleştirilmesi için mekanik modele bir girdi olarak kabul edilir. Çizelge 1’de gösterildiği gibi, termo-mekanik simülasyonlar iki yaklaşımla gerçekleştirilebilir, yani birleştirilmiş ve birleştirilmemiş veya zayıf bir şekilde birleştirilmiş veya ayrılmış bir yaklaşımdır.

Birleştirilmiş termo-mekanik analizde, sıcaklığa bağlı genleşme yapının mekanik özelliklerini etkilerken, termal gradyanlar nedeniyle gözlenen çarpılma, termal özellikleri de etkiler. Sonuç olarak, termal ve mekanik analiz her zaman çözüm adımı için aynı anda yapılmalıdır. Bunun yerine, zayıf bağlı analiz için, çarpılmanın neden olduğu ısı, termal enerjiden çok daha küçüktür, termal ve gerilim alanlarının etkileşiminin bağlanmadığını gösterir. Bu nedenle, termal ve mekanik analiz, daha az hesaplama maliyeti sağlamak için sırayla gerçekleştirilebilir [36].

2.6.1. Temel denklemler

Doğrusal olmayan elastik-plastik mekanik analiz, yarı statik bir artımlı analiz olarak da düşünülebilir. Analiz için ana denklem, stres dengesi denklemdir:

$$\nabla \cdot S + F = 0 \quad (2.21)$$

S; malzeme davranış yasasıyla ilişkili 2. derece stres tensörü olduğunda, F; kütle kuvvetleridir. Elastik-plastik malzeme dikkate alındığından, gerilme-gerinme ilişkisi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma = C_3 \varepsilon^e \quad (2.22)$$

Burada,

C_3 ; dördüncü dereceden malzeme sertlik tensörü,

ε^e ; 2. dereceden elastik gerinim tensörüdür.

Bununla birlikte, toplam gerinim tensörü, elastik gerinim (ε^e), plastik gerinim (ε^p) ve termal gerinimden (ε^{th}) oluşur ve şu şekilde verilir:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{th} = \frac{1}{2} [\nabla u + (\nabla u)^T] \quad (2.23)$$

İlaveten, ayrı olarak,

$$\varepsilon^e = \frac{1+v}{E} \sigma - \frac{v}{E} tr(\sigma) I \quad (2.24)$$

$$\varepsilon^p = f(\sigma_Y) \quad (2.25)$$

$$\varepsilon^{th} = [\varepsilon^{th} \varepsilon^{th} \varepsilon^{th} 0 0 0]^T = \alpha(T - T_0) \quad (2.26)$$

Burada,

E : Young modülü,

v : Poisson oranı,

α : termal genleşme katsayısı

u : yer değiştirme vektörü

$f(\sigma_Y)$: akma mukavemeti ile ilgili fonksiyon,

T : düğüm sıcaklığı,

T_0 : ortam sıcaklığıdır.

Yapısal ve termal analiz ε_{th} ile bağlantılıdır [36].

2.6.2. Mekanik sınır koşulları

Mekanik sınır koşulları esas olarak düğümsel kısıtlamalardan oluşur. Alt tabaka bölgesi ile ilişkili düğümler katı bir şekilde kısıtlanmıştır. Yapı parçasının alt kısmına hiçbir deformasyon yaşanmayacak şekilde analize katıldıkları varsayılır. Bununla birlikte,

kelepçelerin ve fikstürlerin esnekliğini modellemek için alt tabakaya bazı yay kısıtlamaları da uygulanır [27].

2.7. Tel Ark Ergitmeli Eklemeli İmalatta Zorluklar

Tel ark ergitmeli eklemeli imalat tekrarlanan yüksek ısı girdisinin ürettiği zorluklar üretim sürecinin temel sorunlarıdır. Bu sorunlar WAAM parçalarının üretim sonrası kabul kriterlerini sağlamasında büyük engellerdir. Üretimin temel zorlukları; yüksek ısı girdisi sonucunda oluşan termal zorluklar ve çarpılma, kalıntı gerilme, değişken iç yapı, mikro çatlaklar, porozite, değişken sertlik gibi tekrarlanan yüksek ısı girdisinin ürettiği mekanik zorluklardır.

2.7.1. Termal zorluklar

WAAM imalatı ark tabanlı olarak oluşan yüksek ısı, üretilen parçalar üzerinde birçok olumsuzluklara sebep olmaktadır. Yeni katman üretimi sırasında oluşan yüksek ısı önceki katmanları etkileyerek katmanların tekrar erimesine, ısıtılma işlemi döngüsüne girmesine, katmanların genişlemesi gibi sebeplerle katman geometrisinin bozulmasına, katman yüksekliklerinde değişiklikler olması gibi çeşitli kusurların oluşmasına sebep olmaktadır. Katmanlar da meydana gelen bu ısıtılma dalgalanmaları metalin farklı bölgelerinde farklı termal davranışlar üreterek ana parçada kalıntı gerilme üretimi ve çarpılma oluşumuna öncülük etmektedir. WAAM işleminde imalat sırasında kullanılan yüksek ısı girdisi ve sebep olduğu termal davranış üretimde başa çıkılması gereken temel zorluktur. Üretimin termal davranışını araştırmacılar için temel alan olmuştur. Bu konuda yaptıkları birçok çalışmalar ile üretimin ısıtılma davranışını incelemiş, bu konuda çeşitli yeni yaklaşımlar ile bu zorluğun üstesinden gelme gayretinde bulunmuşlardır.

Scotti ve arkadaşları [49], termal yönetimin WAAM’da önemli bir konu olduğunu belirttikleri çalışmalarında, termal yönetimin WAAM prosesinde ısı birikimini azaltmanın biriktirme döngüsü, geometri sorunları ve mekanik özellik anizotropileri gibi sınırlamaları ele alma açısından kritik bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Süreç açısından değerlendirildiğinde, gaz metal ark kaynağı biriktirme sürecinin bir çeşidi olan değişken polariteli soğuk metal transferi süreci, biriktirme hızını düşürmeden biriktirme sırasında aktarılan ısıyı azaltmak için önemli bir seçenek olarak öne çıkarmaktadırlar. Aynı zamanda,

bileşeni termal olarak yönetmenin, yapı aşamasındaki parçadan ısıyı uzaklaştırmak için umut veren bir araç olduğu gösterilmişlerdir. Bu nedenle, bu çalışmalarında, WAAM için CMT Advanced sürecinin yanı sıra Yakın Daldırma Aktif Soğutma (NIAC) tekniğini değerlendirmektedirler. Al alaşımlı duvar benzeri formların biriktirilmesi için EP/EN ve LEWD parametrelerinin değiştirildiği CMT Advanced işlemi ile NIAC tekniğinin karşılaştırmalı bir analizi sunmuşlardır. Elektrik sinyalleri ve gözeneklilik ölçümleri ile sürecin istikrarı doğrulamışlardır. Ayrıca, EP/EN ve LEWD parametrelerinin termal yönetim performansı üzerindeki etkisini incelemek için duvarların sabit bir noktasının ve bazı geometrik özelliklerinin termal döngüleri ölçmüşlerdir. Uygulanan biriktirme koşulları altında, katmanlar arasında sınırlı bir birleşme eksikliği ve duvarların dalgalanma vadilerinde bazı süreksizlikler gözlemlenmiş, bu oluşumlar, optik ve taramalı elektron mikroskobu incelemeleri ile doğrulandığından, tamamlayıcı analizler sunulmuştur. Bununla birlikte, sonuçlar EP/EN parametresinin katman boyutlarını ve form yüzey dalgalılığını daha etkili bir şekilde kontrol ettiğini açıkça göstermektedir. LEWD parametresinin ise ısı birikimini azaltmada daha büyük bir etkiye sahip olduğu ve bu sayede biriktirilen katman sayısı arttıkça duvar genişlemesinin önüne geçtiği görülmüştür. Sonuç olarak, WAAM'da optimum biriktirme parametrelerini bulma pencerelerini genişletme potansiyeline sahip iki bağımsız termal yönetim aracının ortaya çıkan formların termal döngülerini ve geometrilerini etkilediği sonucuna varmışlardır.

Rodrigues ve arkadaşları [50], yeni bir tel ark ergitmeli Eİ yöntemi olan Ultracold-Wire and Arc Additive Manufacturing (UC-WAAM) üzerinde çalışmışlardır. Bu yöntem, elektrik arkının tel besleme malzemesi ile sarf malzemesi olmayan bir tungsten elektrot arasında oluşturulduğu bir süreci tanımlar. Çalışma, HSLA çeliği üzerinde gerçekleştirilen bir fizibilite çalışmasına odaklanmaktadır. Geleneksel gaz metal ark kaynağı tabanlı WAAM ile karşılaştırmalar yapılmıştır. UC-WAAM, elektrik akımını alt tabakadan uzaklaştırarak ve elektrik arkını erimiş havuzdan uzaklaştırarak işlem sıcaklıklarını azaltabilir ve soğutma oranlarını artırabilir. Mekanik testler, UC-WAAM ile üretilen HSLA çelik parçalarının yüksek mekanik mukavemet ve süneklilik seviyelerini koruduğunu göstermiştir. Bu yeni yöntemin özelliklerinden biri de iletken/metalik olmayan bir bloğun kullanılmasıyla çıkıntı yapıları üretebilme yeteneğidir. UC-WAAM, iyi ark stabilitesi sağlar, estetik bir görünüm sunar ve sıçrama oluşumunu önler, bu nedenle ark tabanlı Eİ için önemli bir alternatif olabilir. Ayrıca, UC-WAAM'ın biriktirme oranları GMAW tabanlı WAAM ile benzerdir, ancak katmanlar daha dar ve daha yüksektir ve önceki katmanın küçük bir seyrelmesi ile

üretir. İşlem sıcaklıkları aynı olmasına rağmen, termal analiz sonuçları UC-WAAM sırasında daha yüksek soğutma hızları ve ≈ 400 °C'ye kadar pik sıcaklık farkı elde edildiğini göstermektedir. Bu, proses termal döngüsünün malzemeler üzerinde önemli bir mikro yapısal etkiye sahip olabileceğini düşündürmektedir. Hem UC-WAAM hem de GMAW tabanlı WAAM yöntemleri ile ince tane boyutlu yapılar üretilebilmiş ve sonuçta elde edilen parçalar yüksek mekanik mukavemet ve süneklilik göstermiştir. İletken olmayan/metalik olmayan bir blok kullanarak çıkıntı yapıları oluşturulması, UC-WAAM'ın karmaşık şekilli 3B yapılar için kullanım potansiyelini daha da vurgulamışlardır.

Silva ve arkadaşları [51], tel ark ergitmeli Eİ ısı birikimini azaltmak amacıyla kullanılan bir termal yönetim tekniği olan daldırmaya yakın aktif soğutma (NIAC) yönteminin potansiyelini tanıtmayı ve incelemeyi hedeflemektedir. NIAC tekniğinin temel konseptine göre, metal katmanlar biriktirilirken önceki katmanlar, yükselen su seviyesi içeren bir çalışma tankında biriktirilir. NIAC tekniğinin etkinliğini doğrulamak amacıyla, Al5Mg malzemesi kullanılarak çok katmanlı doğrusal duvarlar tek geçişli olarak CMT® işlemi altında üretilmiştir. Biriktirme işlemi sırasında önceki katmanların sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Ayrıca, NIAC tekniği tarafından uygulanan su soğutmanın gözeneklilik üzerindeki potansiyel etkisi de değerlendirilmiştir. Katmanların geometrisi ve mekanik özellikleri de incelenmiştir. Sonuçlar, NIAC tekniğinin alüminyum WAAM işleminde ısı birikimini etkili bir şekilde azalttığını göstermektedir. Katmanların sıcaklığı, yükseklik fark etmeksizin düşük tutulmuştur ve su soğutması sonucunda gözeneklilik de belirgin bir artış gözlenmemiştir. Ayrıca, duvar genişliği neredeyse sabit kalmış ve mekanik özelliklerin anizotropisi azalmıştır, bu da performans iyileştirmesini işaret etmektedir. Dolayısıyla, NIAC tekniği WAAM işleminde ısı birikimini azaltmak için etkili ve maliyeti düşük bir termal yönetim yaklaşımı sunmaktadır. Bu da yeni katmanlı üretim alternatifleriyle ilgili sorunları çözmeye yardımcı olabileceğini ifade etmişlerdir.

Li ve arkadaşları [52], tel ark ergitmeli Eİ sürecinde meydana gelen yüksek ısı girdisi ve sıcaklık gradyanının, büyük ve iri sütunlu tanelerin oluşmasına neden olduğunu belirtmektedir. Bu tür büyük taneler, parçanın mekanik özelliklerinde anizotropiye yol açarak uygulamalarını sınırlamaktadır. Bu çalışmalarında, ark ısı girdisini azaltmak ve sütunlu taneleri rafine etmek amacıyla Hot-wire arc additive manufacturing (HWAAM) "sıcak tel ark ergitmeli eklemeli üretim" adı verilen bir yöntem kullanılmışlar ve Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si malzemeden dört ince duvarlı numune üretilmiştir. Bu çalışmanın ilginç

sonucu, kaba sütunlu tanelerin büyük ölçüde rafine edildiği ve sonuç olarak, eş eksenli ve kısa sütunlu tanelerden oluşan bir parça elde edildiği şeklindedir. Ayrıca, α -lath genişliğinin de rafine edildiği gözlemlenmiştir. Mekanik özelliklerin bu tane yapılarına uygun olduğu ve anizotropinin neredeyse tamamen ortadan kalktığı belirtilmektedir. Bu nedenle, sıcak tel ark ergitmeli Eİ yöntemi ile kapsamlı mekanik özelliklere sahip parçaların üretilebileceği sonucuna varmışlardır.

Tel ark ergitmeli eklemeli üretim sürecindeki yüksek ısı girdisinden kaynaklanan malzeme işleme zorluklarını ele almak amacıyla Duan ve arkadaşları [53] bu çalışmada darbeli ark plazması (PAP-WAAM) adını verdikleri yeni bir tel ark ergitmeli metal eklemeli, üretim yöntemi geliştirilmiştir. Bu yeni yöntemde, darbeli voltaj ile üretilen darbeli ark plazması, ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. Uygulanan darbeli voltaj, ark plazmasını eklemeli üretim sırasında dönüşümlü olarak tetikleyip kapatarak kullanılmıştır. Tungsten elektrot, dolgu teli ve alt tabakanın göreceli konumları ayarlanarak ark plazması tungsten elektrot ile dolgu teli arasında ateşlenmiştir. Bu, dolgu teline tahsis edilen deşarj enerjisinin oranını artırmış ve böylece malzeme birikimi için gereken toplam ısı girdisini azaltmıştır. Ayrıca, ark plazması deşarj aralığı sırasında söndürüldüğü için biriktirilen malzemeye ısı aktarılmamış ve bu sayede önceden biriktirilen malzeme hızla soğutulmuştur. İlk deneysel sonuçlar, yeni geliştirilen PAP-WAAM işleminin, geleneksel gaz tungsten ark kaynağı tabanlı WAAM (GT-WAAM) işlemine göre aynı tel besleme hızında %37 daha az ısı girdisi kullandığını göstermektedir. PAP-WAAM işlemi, GT-WAAM işlemine kıyasla daha küçük eriyik havuzları, daha hızlı soğuma hızları ve daha az ısı birikimi sağlamıştır. Bu başarı, temel olarak düşük ısı girdisi ile PAP-WAAM sırasında darbeli deşarjın etkin ısı dağılımının birleşik etkilerine bağlanmıştır. Sonuç olarak, PAP-WAAM işlemi, daha ince geometrik özellikler ve mikroyapılar yanı sıra daha yüksek gerilme mukavemeti sağlayarak GT-WAAM'a kıyasla önemli avantajlar sunduğunu kaydetmişlerdir.

Tel ark ergitmeli eklemeli imalat yöntemi, nispeten büyük metal parçaların üretilmesine imkan veren minimum hammadde kullanımı sağladığını belirten Alhakeem ve arkadaşları [54] ancak, üretim sırasında uygulanan yüksek ısı girdisinin, ısı birikimine ve sıcaklık değişimine neden olduğunu ifade etmişlerdir. Bu iki faktör, çeşitli sorunlara, örneğin çarpılma, taşma ve kalıntı gerilme gibi sorunlara yol açabilir. Isı birikimi, ısının parçadan uzaklaştırılamaması sonucu oluşan sıcaklık artışını ifade eder. Sıcaklık değişimi ise genellikle parça kesitinin geometrik şekline bağlı olarak belirlenen biriktirme yolu

planlamasının bir sonucudur. Geleneksel biriktirme yolu planlama yaklaşımları, sıcaklık değişimini dikkate almamıştır, çünkü bu, yüksek hesaplama maliyeti ve birden fazla araç kullanma gerekliliği gibi nedenlerle zor bir sorundur. Bu çalışma, yol bazında sıcaklık değişimini minimize etmek için termal analiz kullanarak biriktirme yollarını tek adımda planlayan bir algoritma sunar. Bu algoritma, en uygun biriktirme açısını belirler ve en düşük sıcaklık değişimine sahip biriktirme alanına atlamak için iz sırasını hesaplar. Bu sayede sıcaklık değişimi önemli ölçüde azaltılmış olur. Algoritmanın performansını değerlendirmek amacıyla, bir bileşen yığını ve ince cidarlı bir parça, önerilen algoritma ve geleneksel sıralı tarama stratejisi kullanılarak atölyede üretilmiştir. Sonuçlar, geliştirilen stratejinin yüzey deformasyonunu %37 oranında azalttığını ve ince cidarlı taşımayı %21 oranında azalttığını ifade etmişlerdir.

Wu ve arkadaşları [55] bu çalışmada, geliştirilmiş mikroyapı ve mekanik özellikler elde etmek amacıyla, Ti-6Al-4V ince duvarlı yapıların üretimi için sıkıştırılmış CO₂ kullanılarak zorunlu geçiş soğutmalı yenilikçi bir tel ark ergitmeli Eİ süreci benimsenmiştir. Farklı geçiş sıcaklıklarının ve hızlı zorlamalı soğutmanın biriktirme geometrisi, yüzey oksidasyonu, mikroyapısal değişimler ve imal edilen parçanın mekanik özellikleri üzerindeki etkileri, lazer profilometre, optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), sertlik testi ve mekanik çekme testi kullanılarak araştırılmıştır. Sonuçlar, biriktirilen metalin mikroyapısal evriminin ve mekanik özelliklerinin artan geçiş sıcaklığından büyük ölçüde etkilenmediğini, ancak biriktirilen duvarın genişlemesi, düzleşmesi ve görünür renk değiştirmesi gibi artan yüzey oksidasyonu belirtileri gösterdiğini göstermektedir. CO₂ kullanılarak hızlı zorlamalı soğutma ile biriktirilen katmanlar arasında, biraz daha yüksek sertlik değerleri ve artan mukavemet elde edilebilir. Bu durumun temel nedeni, mikroyapı içinde büyük miktarlarda ince taneli asiküler α oluşumunun neden olduğu daha az yüzey oksidasyonu ve yüksek yoğunluklu dislokasyonların birleşik etkileridir. Ayrıca, zorunlu geçiş soğutma sadece biriktirme özelliklerini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda geometrik tekrarlanabilirliği destekler ve biriktirilen katmanlar arasındaki bekleme süresini azaltarak üretim verimliliğini artırdığını belirtmişlerdir.

Bu bölümde araştırmacıların WAAM işlemindeki termal zorlukların üstesinden gelmek için yaptıkları çalışmalarından bahsedilmiştir. Araştırmacılar, yüksek ısı girdisinden oluşan ısı dalgalanma, yüksek sıcaklık gibi zorlukları aşmak için çeşitli ısı temelli yaklaşımlarda

bulunmuşlardır. Bu çalışmalarda, ısıyı kontrol etmek için imalat sürecine farklı eklemeler veya farklı tarama stratejileri ile müdahale etmişlerdir.

2.7.2. Mekanik zorluklar

WAAM yönteminde başa çıkılması gerekli olan zorluklar kalıntı gerilme, çarpılma, yüzey bütünlüğü gibi mekanik sonuçları olan zorluklardır. Yine yüksek ısı girdisi ve termal geçmiş kaynaklı olan bu zorluklar için araştırmacılar çeşitli yaklaşımlar önermişlerdir.

Yang ve arkadaşları [56] ultrasonik darbe işlemi (Ultrasonic Impact Treatment; UIT) destekli tel ark ergitmeli eklemeli imalatta üretilen Ti-6Al-4V alaşımlarının kalıntı gerilme, tane morfolojisi ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Sonuç olarak, ultrasonik darbe işleminin kalıntı gerilmelerin azalmasında önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Numuneler üzerindeki kalıntı gerilmeyi incelendiklerinde, tek katmanlı ultrasonik darbe işlemi sonrası örnekler, WAAM örneklerine kıyasla %43'lük bir azalma sergilerken, yedi katmanlı örnekler için azalma %77,3'ten çok daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Numunelerin tane yapısındaki değişimi ise, önceki β -fazı tanesinin makro yapısı, iri sütunlu tanecikten, eş eksenli tanecik ve kısa sütunlu taneciklerin değişen bir dağılımına dönüştüğünü ve bambu benzeri bir yapı oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Ortalama tane boyutu 785 μm 'den 371 μm 'ye düşmüş ve biriktirilen örneklerin ultrasonik darbe işlemi sonrası β -fazı tanesinin en boy oranı sırasıyla 3.42 ve 2.16 olarak ölçmüşlerdir. Eş eksenli tane boyutu ultrasonik darbe işlemi sonrası örneklerin en boy oranı 186 μm ve 1.33 μm 'dir. Ultrasonik darbe işlemi, WAAM ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerini geliştirmiştir. Ultrasonik darbe işlemi sonrası numunelerin (934 MPa) gerilme mukavemeti, yapılmayan numunelerinkinden (870 MPa) daha yüksekti. Bununla birlikte, ultrasonik darbe işlemi sonrası numunelerin sünekliliğinin (%10.29), yapılmayan numunelerin ki (% 11.95) kadar yüksek olmadığını sonucuna varmışlardır.

Sun ve arkadaşları [57] lazer darbeli çekiçleme destekli tel ark ergitmeli eklemeli imalat ile üretilen 2319 alüminyum alaşımının mikroyapı, kalıntı gerilme ve çekme özelliklerini incelemişlerdir. Lazer darbeli çekiçleme işleminden sonra ortalama tane boyutu 59.7 mm'den 46.7 mm'ye düşmüş ve düşük açılı sınırlarına sahip tane yüzdesi %34'ten %70'e yükselmiştir. Yüksek yoğunluklu dislokasyonlar ve mekanik ikizler oluşmuş ve mikro sertliğin artmasıyla sonuçlanmıştır. Kalıntı gerilimler, maksimum değeri yaklaşık 100 MPa

olan çekme durumundan sıkıştırma durumuna geçmiş ve akma mukavemeti belirgin şekilde %72 oranında artırıldığı tespit etmişlerdir.

Kalıntı gerilme ve çarpılmanın kontrolü için bir başka yenilikçi çalışma Hönnige ve arkadaşları [58] tarafından yapılmıştır. Kalıntı gerilme ve çarpılmanın kontrolü için iki farklı haddeleme tekniği kullanmışlardır. Bunlarda birincisi dikey haddeleme ve ikincisi ise duvarın yan yüzüne yapılan yan haddeleme işlemidir. Dikey haddeleme, her katmanı yığdıktan sonra her katmanı deforme etmek için duvarın üstüne ara geçiş olarak uygulanmıştır. Bu teknik, çarpılmayı neredeyse ortadan kaldırmış, ancak karakteristik bir kalıntı gerilim profili oluşturmuştur. Dikey haddeleme, alüminyumdaki kalıntı gerilimi değiştirmiş ek olarak Ti-6Al-4V ve yumuşak çelik duvarlarda önceki araştırmalardan farklı olarak bozulmayı ortadan kaldırılabilmektedir. Dikey haddeleme malzemeyi sertleştirmiş bu da çalışma sertleşmesi ile daha iyi verim ve çekme mukavemeti sağlamıştır. Duvarın yan yüzeyine yapılan yan haddeleme tekniği daha etkili olmuş ve hatta çarpılmayı tersine çevirmiştir. Gerilimsiz referansın nötron kırınım ölçümlerinden inşa halindeki duruma kıyasla geçişler arası haddelenmiş duvarlarda önemli ölçüde daha büyük yüzey merkezli kübik alüminyum birim hücre boyutu elde etmişlerdir. Bu, alüminyum ile katı çözelti içinde daha az bakırın bir sonucu olduğunu, daha fazla çökelme gösterdiğini ve bu nedenle potansiyel olarak malzemenin mukavemetini arttırmaya katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir. Biriktirme sonrası yan haddeleme, WAAM ile üretilen alüminyum parçalardaki kalıntı gerilmeleri ve çarpılmayı kontrol etmede çok etkili olduğunu ve çalışma sertleşmesi ile sertliği artıracağı sonuçlarına ulaşmışlardır.

Hönnige ve arkadaşları [59] yürüttüğü başka bir çalışma, Ti-6Al-4V parçaların üretiminde tel beslemeli Eİ yöntemi kullanılarak üretilen parçalarda dikey geçişler arası haddeleme ve ısı gerilme azaltmanın kesit kesişimleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Tel beslemeli Eİ ile üretilen parçalarda kesitler arasındaki gerilmeler, tek geçişli duvarlara göre daha düşüktür, sürekli duvarlarda bu gerilmeler, aynı geometriye sahip kesintili duvarlara göre daha yüksektir. Araştırmacılar, ısı gerilme azaltmanın bu farkları neredeyse tamamen ortadan kaldırdığını gözlemlenmiştir. Ayrıca, katmanlar arası haddeleme işleminin istenilen tane inceltme işlemini gerçekleştirebileceğini ve kalıntı gerilmelerin gelişimine kayda değer bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Hidrostatik çekme gerilmeleri, kesit kesişim noktalarında bulunmamıştır, bu nedenle ısı gerilme azaltmanın kalıntı gerilmeleri önemli ölçüde azalttığını ifade etmişlerdir. Geçişler arası haddeleme, son haddeleme adımının plastik

olarak deforme olmuş bölgesinin altında düşük hidrostatik stres içerdiği gözlemlenmiştir, ancak bu durumda ısıl gerilme azaltmanın sınırlayıcı bir etkisi olmamıştır. Ancak, geçişler arası haddeleme, kesişimlerdeki kalıntı gerilmeleri üzerinde başka bir etkiye sahip olmamıştır. Kesişimlerdeki kalıntı gerilim, her iki duvar boyunca uzanan gerilimlerdir ve yükseklikle sabittir. Kesintili duvardaki biriktirilen gerilim, kesintisiz duvardakinin üzerindedir. İlk ve sürekli çökelmeyi takip eden enine çökeltme, önceki çökeltinin kalıntı gerilmesini azaltır. Normal gerilmeler, duvar yüksekliği boyunca nispeten sabit olup sıkıştırıcıdır. Kontur yöntemi için sıfır gerilim varsayımı, bu dengesiz gerilim alanında geçerli değildir ve daha sonraki işlemler gerektirir. Ancak, kontur yöntemi sonuçları, çökelmiş kesimlerdeki büyük gerilmelerin ve gradyanlarının bölgelerini niteliksel olarak ortaya koymakta ve ayrıca ısıl gerilme azaltmanın katmanlı imalat kesişimlerindeki kalıntı gerilmelerini tamamen ortadan kaldırabileceği öne sürmüşlerdir.

Martina ve arkadaşları [60] çalışmasında, tel ark ergitmeli eklemeli imalat parçalarında ortaya çıkan önemli kalıntı gerilmelerinin, Ti-6Al-4V malzemesi ile üretilen parçalardaki katmanlar arasında doğrusal olarak yayıldığını belirttikleri görülmektedir. Bu sorunu çözmek amacıyla, yüksek basınçlı haddeleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem, her katmandaki çarpılma ve kalıntı gerilimi önlemeye yönelik bir çözüm sunmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlar, haddeleme işleminin pasolar arasındaki uzunlamasına kalıntı gerilmeleri başarılı bir şekilde ortadan kaldırdığını göstermektedir. Ancak, haddeleme işlemi duvarın üst kısmına yakın bölgelerde daha yüksek sıkıştırma gerilmelerine neden olmuştur. Ayrıca, işlem sonucunda parça geometrisinde değişiklikler meydana gelmiş, duvar genişlemişken katman yüksekliğinde bir miktar azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, katman yüksekliği standart sapmasının belirgin bir şekilde azaldığı bir sonuç vermiştir. Bu durum, tel ark ergitmeli eklemeli imalat sürecini otomatikleştirmeyi ve işlem tekrarlanabilirliğini artırmayı kolaylaştırabilir. Öte yandan, haddeleme işlemi çarpılmayı tamamen ortadan kaldırmamış, ancak işlenmemiş seviyenin yarısından daha düşük bir seviyeye indirdiğini belirtmişlerdir.

Tel ark ergitmeli eklemeli imalat ile üretilen parçalar, genellikle büyük tane boyutlarına ve önemli kalıntı gerilme ile bozulmalara sahip olabileceğini belirten Colegrove ve arkadaşları [61] bu tür sorunları çözmek amacıyla, düzgün bir şekilde biriktirilmiş çelik WAAM parçasının her katmanı, ya “profil şekilli” bir silindir veya yan deformasyonu engelleyen bir oluk içeren bir “yivli” silindirle haddelemişlerdir. Her iki silindir de şekil bozukluğunu ve

yüzey pürüzlülüğünü azaltmış, ancak yivli silindir daha etkili olmuş ve şekil bozukluğunu ortadan kaldırmıştır. Haddelenmiş WAAM parçalarındaki kalıntı gerilmeler ölçülmüş ve haddelenmemiş kontrol numunesine göre özellikle tabakaya yakın bölgelerde daha düşük bulunmuştur. Haddelme ayrıca haddelenmiş malzemede sonraki birikim geçişlerinde ısıtıldığında ek tane incelemesi sağlamıştır. Haddelenmenin uygulanması, WAAM'ın büyük ölçekli yapılar üzerinde uygulanmasını mümkün kılacak önemli bir teknoloji olabilir. Bu çalışmada gösterilmiştir ki: haddelme, uzunlamasına yöndeki zirve kalıntı gerilimi ve düz bir Eİ duvarındaki şekil bozukluğunu önemli ölçüde azaltabilir. Yivli bir silindir, yan deformasyon miktarını sınırlayarak kalıntı gerilimi ve şekil bozukluğunu azaltmada daha etkili olabilir. Ayrıca, yivli silindirle birlikte biriktirme verimliliği artmış, son bileşenin çok az veya hiç işleme gerektirmemesi sağlanmıştır. Numunenin her dördüncü katmanından sonra haddelme, her katmandan sonra haddelenmenin şekil bozukluğu üzerinde benzer bir etkisi olmuş; ancak biriktirme verimliliği azalmıştır. Biriktirme işleminden sonraki haddelme, şekil bozukluğu üzerinde hiçbir etki yapmamış, bunun kontrol numunesi ile aynı olduğunu belirtmişlerdir.

Martina ve arkadaşları [62] tel ark ergitmeli eklemeli imalat bileşenlerinin, birçok ardışık biriktirme geçişi nedeniyle yüksek kalıntı gerilme ile karakterize edildiğini ifade etmişlerdir. Kalıntı gerilmenin, parça kelepçelendikten sonra distorsiyona neden olmaktadır. Bu sorunun çözülmesi için Ti-6Al-4V lineer parçalarda yüksek basınçlı haddelme yöntemi araştırılmışlardır. 50 kN ve 75 kN haddelme yüklerini incelenmişlerdir. Kontur yöntemiyle yapılan kalıntı gerilim ölçümleri, özellikle parça ile taban plakası arasındaki ara yüzde kalıntı gerilimin önemli ölçüde azaltıldığını göstermiştir. Yüksek basınçlı geçişler arası haddelenenin, yapısal havacılık bileşenlerinin üretimi için WAAM işleminin uygulanmasını kolaylaştırması muhtemeldir. Haddelme bu gerilmeleri azaltmış ancak tamamen ortadan kaldırmamıştır; sonuç olarak haddelenmiş parçaların çarpılma gösterdiğini açıklamışlardır.

Bu kısımda araştırmacıların WAAM işleminin mekanik eksiklerini gidermek için yaptığı mekanik temelli çözümlerden bahsedilmiştir. Bu işlemler ile zaten karmaşık olan süreci daha da karmaşık hale getirmiş ve üretimin önemli bir avantajı olan işlem süresine de olumsuz etki etmişlerdir. Yine, yapılan işlemler katman genişliği ve yüksekliğini olumsuz etkileyerek parça geometrisini bozmuştur. Ayrıca, birkaç yöntemde parça geometrisine uygun haddelme parçası imalatı ihtiyacı da gerekmektedir.

2.8. Tel Ark Ergitmeli Eklemeli İmalatta Literatürde Bulunan Boşluklar

Literatür incelendiğinde tel ark ergitmeli Eİ üretiminde temel gereklilik olan yüksek ısı girdisi imalatın zorluluklarının temel sebebidir. Yüksek ısı girdisi, üretimde var olduğu sürece her yeni katman üretiminde var olan katmanlar tekrar bu yüksek ısıya maruz kalmaktadır. Bu ısı üretim sırasında soğuma döngüsünde olan önceki katmanları tekrar ısıtmakta ve katmanların kontrolsüz bir termal salınımına girmesine sebep olmaktadır. Kontrolsüz termal hareket katmanların, katman iç ve dış yüzey sıcaklıklarının sürekli değişmesine yol açmaktadır. Bu termal hareket mikro ve makro yapıda hasarlar oluştururken kalıntı gerilme, çarpılma ve akma gibi sorunlarda oluşturmaktadır.

Literatür taraması sonucunda araştırmacıların çoğunlukla proses parametreleri, yığma şekli modellemesi, imalat sürecinde yapılan ek işlemler, imalat sonrası yapılan işlemler ve tüm bu işlemlerin malzemelerin mekanik ve mikro yapı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yine literatür araştırması ile kalıntı gerilme, çarpılma ve bu yapısal kusurların malzeme davranışı üzerine etkilerini, ayrıca makro ve mikro yapıdaki değişikliklerin kalıntı gerilme ve çarpılmadaki etkilerinin de incelendiği görülmüştür. Literatürde kalıntı gerilme ve çarpılmanın kontrolü için çeşitli yöntemler mevcuttur, yapılan bu işlemler süreci yavaşlatmakta, katman kalınlığı ve genişliği üzerinde olumsuz etkileri bulunmakta olduğu için kalıntı gerilme ve çarpılma kontrolü için yeni yöntem ve yaklaşımların geliştirilmesine ihtiyaç olduğu anlaşılmıştır.

Literatürde incelendiğinde bütün kusurların temelinde olan ve imalatın temel girdisi olan yüksek ısının kontrolü ile ilgili yaklaşımların genelde tek katman üzerinde yapılan ve sınırlı etkisi olan çalışmalar olduğu gözlemlenmiştir. Üretilen parçanın bütün olarak bir termal kontrolünü sağlamaya yönelik yaklaşımlar sınırlıdır. Yine bu yaklaşımlar ısı girdisi üzerine yoğunlaşırken üretilen parçanın önceki katmanlar ve çevre ile olan termal davranışı üzerine yapılan çalışmalar yeterli seviye değildir.

Üretim temelli ısı girdisi sonucunda oluşan termal ve mekanik davranışları kontrol altına almak üzere yapılan çalışmalar, genellikle WAAM sürecini yavaşlatmakta, sürecin karmaşık doğasına yeni proses parametreleri ekleyerek süreci daha da karmaşık hale getirmektedir. Yapılan ilave işlemler üretilmesi planlanan geometriyi bozmakta, katman yüksekliğini ve genişliğini etkilemektedir. Değişen üretim geometrisi işlem süresini, kullanılan sarf

malzeme miktarını, enerji tüketimini artıran çalışmalar aksine bu gibi olumsuz yönleri olmayan, işlem süresi ve girdilerine etkisi olmayan çalışmaların çok fazla yer almadığı gözlenmiştir.





3. SAYISAL YÖNTEM

Bu bölümde ilk olarak standart WAAM üretiminin sonlu elemanlar analiz çalışmaları yapılarak deneysel çalışmalar öncesinde sürecin termal ve mekanik davranışı araştırılmıştır. Sonlu elemanlar verileri ışığında deneysel çalışmalar yapılarak mekanik ve metalurjik testler için numuneler elde edilmiştir. İlerleyen aşamada üretimin termal davranışını kontrol etmek için kullanılan yenilikçi yaklaşımın deneysel altyapı çalışmaları yapılmıştır. Yenilikçi modelin sonlu elemanlar analiz çalışmaları neticelendirilmiştir.

3.1. WAAM İşleminin Sayısal Modellenmesi

Çalışmanın bu aşamasında WAAM işleminin sayısal olarak modellenmesinde kullanılan adımlardan, elde edilen sonuçlardan bahsedilmiştir.

3.1.1. Temel denklemler ve sınır koşulları

Sonlu elemanlar analizi (SEA) yöntemi, özellikle kaynak uygulamalarında, karmaşık fiziksel süreçlerin modellenmesi ve analiz edilmesi için oldukça etkili bir araçtır. Kaynak işlemi sırasında oluşan sıcaklık dağılımı ve bunun sonucunda ortaya çıkan mekanik gerilmelerin doğru bir şekilde tahmin edilmesi, iş parçasının son özelliklerinin anlaşılması açısından kritiktir. Bu bağlamda, termo-mekanik analiz, kaynak işleminin hem termal hem de mekanik etkilerini dikkate alarak, malzemenin davranışını daha iyi anlamayı sağlar. Pasif olarak eşleştirilmiş termo-mekanik yaklaşımda, öncelikle kaynak sırasında meydana gelen ısı transferi problemi çözülür. Bu aşamada, genellikle hareketli bir ısı kaynağı kullanılır ve ısı transfer analizi gerçekleştirilir. Bu analiz, malzemenin zaman-sıcaklık profiline odaklanır ve sıvılaşma sıcaklığının oldukça üzerinde başlatılır. Bu aşamada, malzemenin non-lineer (doğrusal olmayan) ısı transfer özellikleri dikkate alınır. Isı transfer analizi tamamlandıktan sonra, elde edilen sıcaklık dağılımı, mekanik analizde termal bir yük olarak kullanılır. Bu adımda, termal genleşme ve diğer termal etkilerin neden olduğu gerilmeler ve deformasyonlar hesaplanır. Non-lineer mekanik analiz kullanılarak, sıcaklık alanının iş parçası üzerindeki etkileri değerlendirilir ve bu sayede kaynak sonrası oluşabilecek deformasyonlar, çatlaklar veya diğer yapısal problemler tahmin edilir [63].

Soğuk metal transferi (CMT) tabanlı WAAM prosesi ile üretilen parçanın termal geçmişini doğrulamak için ısı transferinin sayısal bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Simülasyon için, ticari bir yazılım paketi olan ANSYS Workbench 2022 kullanılarak bir 3B geçici ısı transferi analizi yapılmıştır. Isıl analiz için Fourier'in temel ısı iletimi denklemi ve mekanik analiz için kuvvet dengesinin aşağıda verilen üç kısmi diferansiyel denklemi, ana denklemler olarak kullanılır:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v \quad (3.1)$$

$$\sigma_{ij,i} + p_j = 0 \quad (3.2)$$

Burada,

T ; malzemenin sıcaklığı,

ρ ; malzeme yoğunluğu,

C_p ; özgül ısı,

k ; ısı iletkenliği,

Q_v ; harici hacimsel ısı (ark enerjisi),

p_j ; herhangi bir noktadaki kuvvet,

σ_{ij} ; gerilme tensörüdür.

Ortam sıcaklığında, taşınım ve radyasyonda çok önemlidir. Yüzey taşınımıyla ısı kaybı için Newton Yasası ve radyasyonla ısı kaybı için Stefan-Boltzmann yasası, termal analiz için sınır koşulları olarak kabul edilir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 sırasıyla termal ve mekanik analiz için sınır koşullarının ayrıntılarını göstermektedir.

Newton'un yüzey taşınımı yasasına göre, ısı kaybı q_{con} şu şekilde verilir:

$$q_{con} = h_{con} \cdot (T - T_0) \quad (3.3)$$

Burada,

h_{con} ; taşınım ısı transfer katsayısı,

T_0 ; ortam sıcaklığıdır.

Stefan-Boltzmann yasasına göre, radyasyon ısı kaybı q_{rad} şu şekilde verilir:

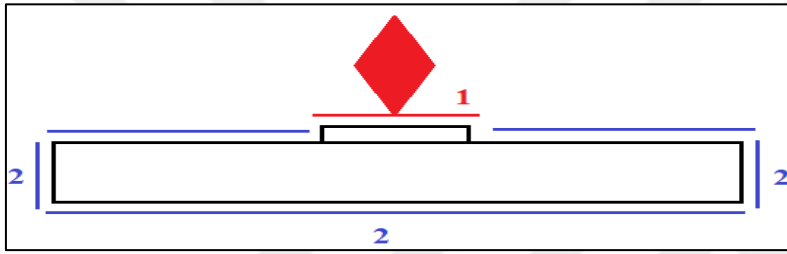
$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot ((T - T_z)^4) - ((T_0 - T_z)^4) \quad (3.4)$$

Burada,

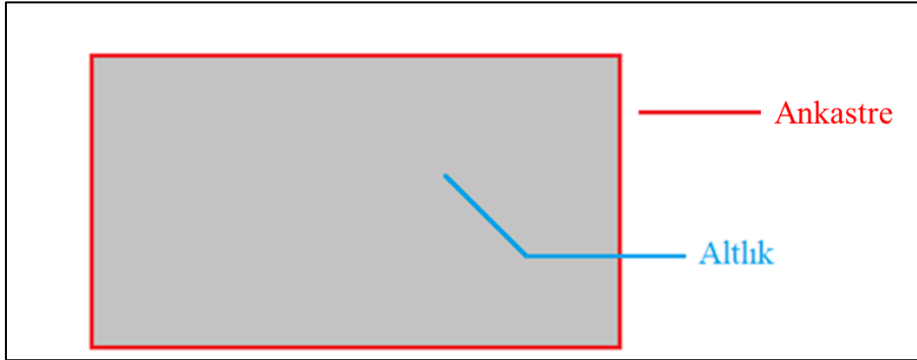
ε ; emistivite sabiti,

σ ; Stefan-Boltzmann sabiti,

T_z ; gerçek sıcaklık ölçüğünde mutlak sıfırdır.



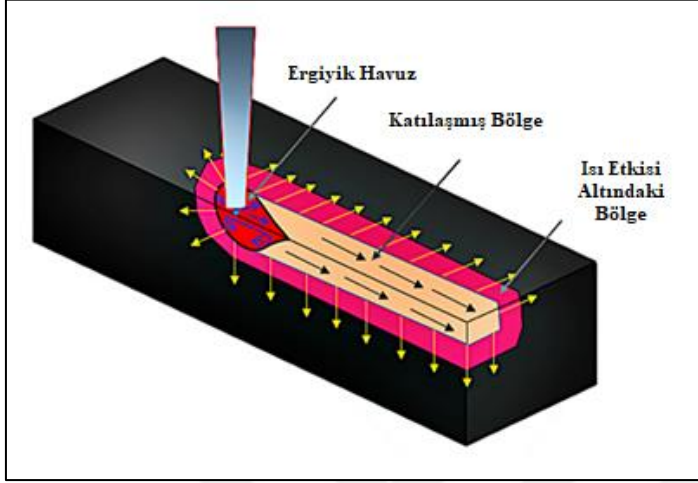
Şekil 3.1. Termal analiz için sınır koşulları: 1- ısı kaynağı; 2- taşınım ve radyasyon [63]



Şekil 3.2. Mekanik analiz için sınır koşulları[63]

Isı kaynağı, katman biriktirme sırasında sonlu elemanlar analizine önemli bir aşamadır. Isı kaynağı, katmanın biriktiği elemanlar üzerinde hareket eder. Isı kaynağının etkisinin eriyik havuzu geometrisinde ve parçanın mekanik uygulamasında önemli bir rol oynadığı için simülasyonda ısı dağıtan ısı kaynağı modeli oluşturmak önemlidir. Hareketli ısı kaynağıyla ilişkili ısı iletimi sorunları, kaynak, eklemeli imalat, yüzey sertleştirme, lazer işlemleri vb. gibi birçok mühendislik alanında kullanılmıştır. Isı akısı bir ısı kaynağı biçimidir. Herhangi

bir eklemeli imalat modelinin önemli bir bölümü, bir ısı kaynağı modelidir. Isı kaynağının rolü, bileşeni imal etmek için teli veya tozu eritmektir. Isı kaynağı modelinin fiziksel özellikleri Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Isı kaynağının fiziksel yönleri [63]

Malzemeler eşit olarak ısıtıldığında (katinın erime noktasının yarısından daha düşük ılıman sıcaklıklarda), düzgün soğutmadan sonra orijinal şekillerini yeniden kazanırlar. Kaynaklı biriktirme işleminde, hareketli ısı kaynağı nedeniyle, en son kaynak parçasına bitişik alan, diğerlerinden daha yüksek bir sıcaklığa sahip olacaktır ve bu nedenle bileşen, homojen olmayan ısıtma ve soğutmaya maruz kalacaktır. Kaynaklı birikimindeki kalıntı gerilmeler, ilk olarak düzgün olmayan ısı dağılımından ve ikinci olarak bitişik yapılardan gelen kısıtlayıcı mekanik etkilerden kaynaklanmaktadır. Kısıtlayıcı etkiler ayrıca elastik ve plastik kısıtlamalara ayrılabilir. Altılıklarda, kaynaklı biriktirme sırasında, ortalama sıcaklığın katinın erime noktasının üçte birinden daha az olduğu bulunmuştur. Bu nedenle, mekanik ana katkılar elastik kısıtlamalardandır ve simülasyonda sadece bunlar dikkate alınmıştır [63].

Bir elektrik arkı olan kaynak, ısı enerjisinin yaklaşık %60-70'ini anotta ve geri kalanını ise katotta üretir. Net ısı girdi oranı, temel bir kaynak işlemi için denklem (30) ile verilir:

$$Q = \eta VI \quad (3.5)$$

Burada,

Q ; Isı giriş oranı (W),

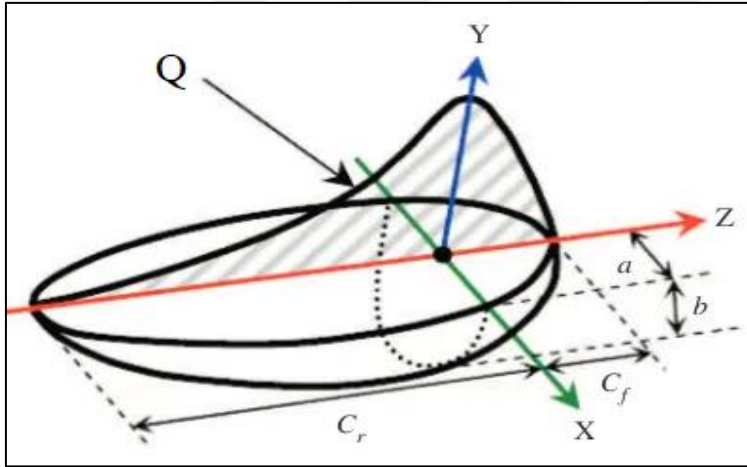
η ; ark verimliliği (%),

V ; Voltaj (V),

A ; Akım (A)'dır.

Sayısal modelleme de CMT kaynak yöntemi için ark verimliliği 0,9 olarak alınmıştır [64].

Bu temel ısı girdi denklemi, tüm ark üretimi ve dağıtımını sürecini tam olarak kapsamaz. Bu nedenle, kaynak işlemine gerçekçi bir şekilde uyması için ısı kaynağı denklemini betimlemek için literatürde bir dizi ısı kaynağı modeli ortaya atılmıştır. Goldak ve arkadaşları [39] tarafından sunulan çift elipsoidal ısı kaynağı modeli Gauss dağılımından oluşan kaynak havuzu ve ısı tesiri altında kalan bölge için mükemmel bir güç yoğunluğu dağıtım kontrolü özelliğine sahiptir. Isı girdi oranı, iki elipsoidal bölge üzerinden ayrı ayrı tanımlanır; bir bölge yay merkezinin önünde ve diğeri arkadadır (Şekil 3.4). Kaynak arkının ısı kaynağının ön ve arka kadrantlarının güç dağılımı şu şekilde ifade edilebilir:



Şekil 3.4. Çift elipsoidal ısı kaynağının şeması [63]

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}Qf_f}{\pi\sqrt{\pi}a_fbc} e^{-3\left\{\left(\frac{x^2}{a_f^2}\right) + \left(\frac{y^2}{b^2}\right) + \left(\frac{z^2}{c}\right)\right\}} \quad (3.6)$$

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}Qf_r}{\pi\sqrt{\pi}a_rbc} e^{-3\left\{\left(\frac{x^2}{a_r^2}\right) + \left(\frac{y^2}{b^2}\right) + \left(\frac{z^2}{c}\right)\right\}} \quad (3.7)$$

a_f, a_r, f_f, f_r, b, c ısı kaynağının karakteristik parametreleridir. Goldak ve arkadaşlarına göre a_f, a_r, b ve c değerleri kaynak dikişinin ve ergimiş bölgenin şeklinden elde edilebilir. b ve c parametreleri için önerilen tahmin, kaynak dikişinin genişliği ve nüfuzu olurken, a_f ve

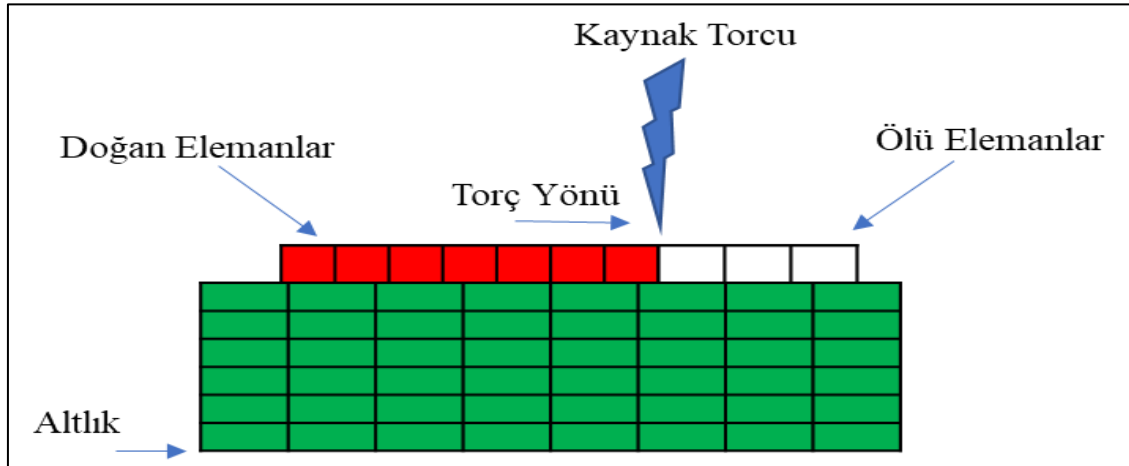
a_r için kaynak dikişi genişliğinin yaklaşık yarısı ve iki katı olacaktır. f_f ve f_r , sırasıyla ön ve arka ısıtma faktörüdür. Bu önerileri dikkate alarak ve kaynak dikişi geometrisi üzerine önceki çalışmalara dayanarak, parametreler için Çizelge 3.1’de ki değerler seçilir [63]:

Çizelge 3.1. Isı kaynağının karakteristik parametreleri

Parametre	a_f	a_r	b	c
Değer [mm]	3	9	5	4
Parametre	f_f		f_r	
Değer	0.6		1.4	

3.1.2. Kaynak teli (dolgu) malzemesi ve altlığın modellenmesi

Daha önce, kaynak işleminin 2B ve 3B sonlu elemanlar analizinde, malzeme ilavesini göz ardı ederken yalnızca ısı girdisini dikkate alan çok sayıda girişim vardı [63]. WAAM işleminde imalatın tamamı katman katman üretildiğinden, eklenen malzeme miktarı oldukça fazladır ve ihmal edilemez. Bu sebeple, malzeme ilavesinde analiz için eleman ölüm ve doğum yöntemi (element death-and-birth) benimsenmiştir. Analiz başlangıcında altlık haricindeki diğer elemanlar “eleman ölüm” seçeneği ile etkisiz hale getirilirler. Belirli bir kaynak parçasına ait elemanlar, ilgili kaynak parçasının başlangıcında veya bir kaynak torçunun etkisi altına girdiklerinde “eleman doğum” seçeneği ile yeniden etkinleştirilir. Bu işlemin şematik gösterimi Şekil 3.5’te verilmiştir.

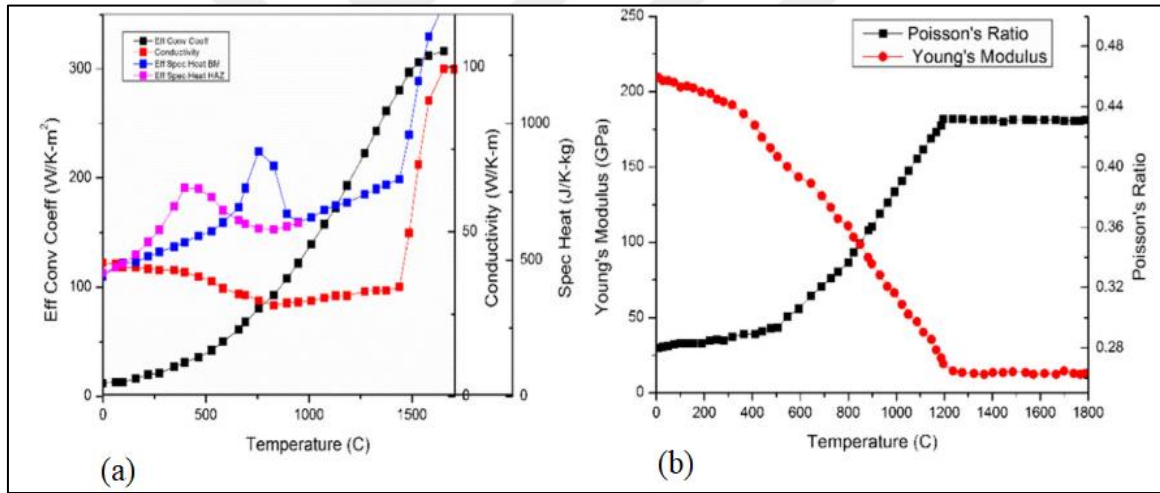


Şekil 3.5. Katman üretimi işleminin şematik gösterimi

Tipik olarak, WAAM imalatı bir makine tablasına rijit bir şekilde kenetlenmiş bir altlık (bkz. Şekil 2.7) üzerinde gerçekleştirilir. Bu simülasyonlarda, altlık ve katmanlar, ANSYS'te katı-70 3B elemanlar kullanılarak deforme olabilen gövdeler olarak modellenir ve biriktirme, yukarıda bahsedilen eleman ölüm-doğum işlevselliği kullanılarak modellenir.

3.1.3. Üretimin modellenmesi

Mevcut adımın amacı, CMT yöntemini kullanan WAAM'a uygun sonlu elemanlar yöntemini kullanarak metal birikimini katman katman simüle etmektir. Deneylerde kullanılan dolgu teli ve altlık plakasının malzemesi, düşük karbonlu çelik ailesine ait olan ER70S-6 ve orta karbonlu çelik ailesine AISI 1045'tir. ER70S-6 malzemesine ait özellikler Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Kaynak telinin sıcaklığın fonksiyonu olarak a) Termal malzeme b) Mekanik malzeme özellikleri [63]

Modellemenin başlangıcında, tüm altlık ve biriktirme elemanları aktiftir. İmalat için oluşturulan elemanlar daha sonra EKILL komutu kullanılarak devre dışı bırakılır. Bu ölü elemanlar daha sonra ilgili zaman adımında EALIVE komutu kullanılarak kademeli olarak yeniden etkinleştirilir. Yukarıda tartışılan çift elipsoit ısı denklemi, aktive olan her elemanın merkezinde ısı üretmek için kullanılır. Her bir elemanda ısı üretimi için süre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$t = \frac{LD}{TS} \quad (3.8)$$

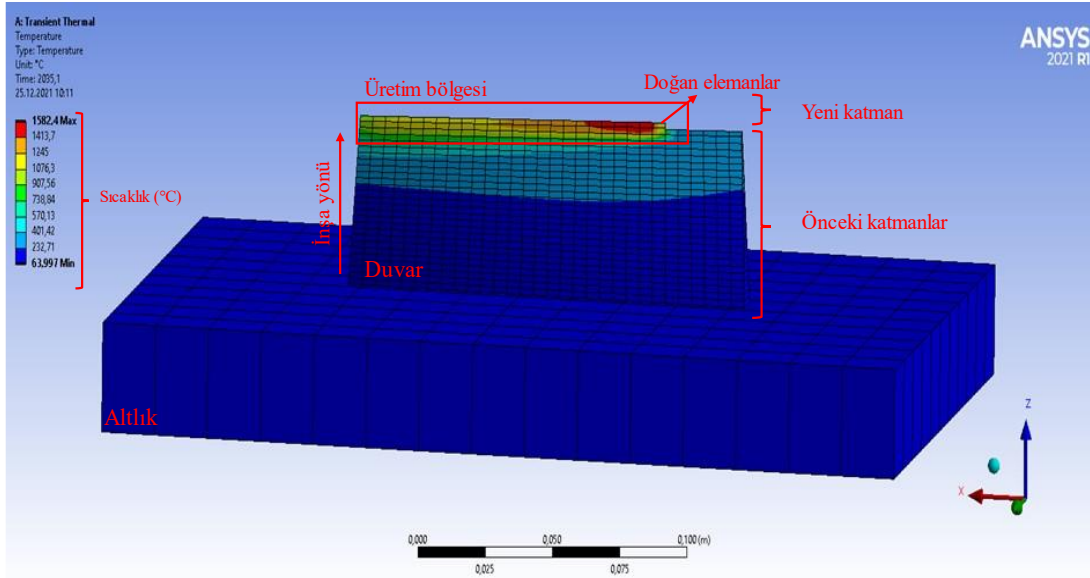
Burada,

t ; ısı üretim süresi (dak),

LD ; biriktirme uzunluğu (m),

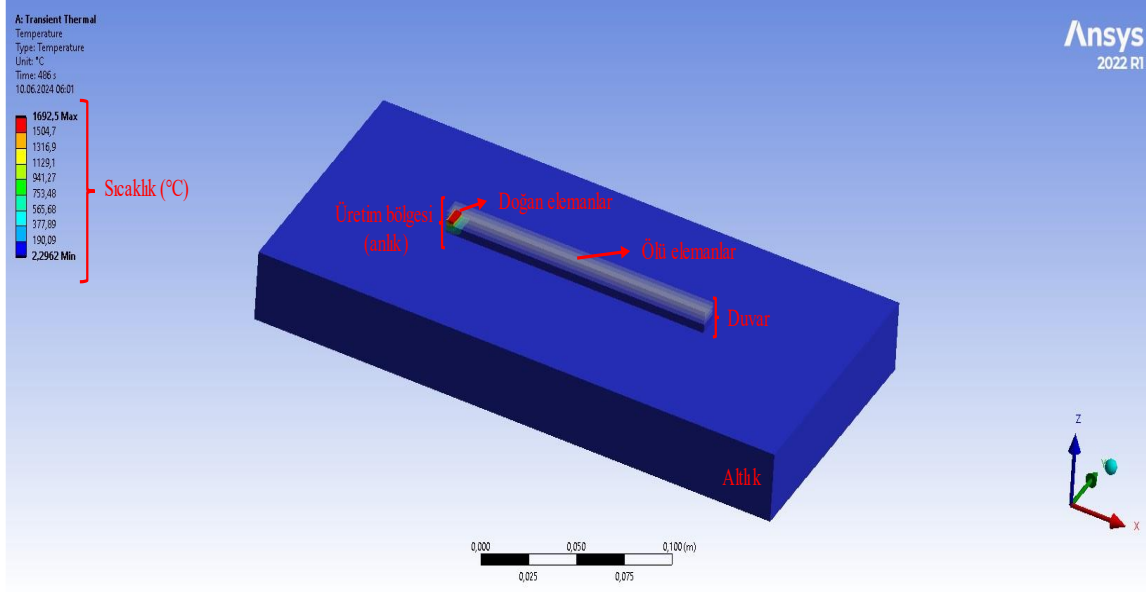
TS ; kaynak biriktirme torçunun hızı (m/dak)'dır [63].

Isı kaynağı olarak kullanılan kaynak arkı, model üzerinde ilerledikçe elamanlar aktif hale gelir, Eİ yöntemi bu şekilde modellenmektedir. Üretilen ısıнын katmanlar ve altlık üzerindeki dağılımı çeşitli parça yüksekliğinde ve çeşitli katman ilerlemesindeki davranışı Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



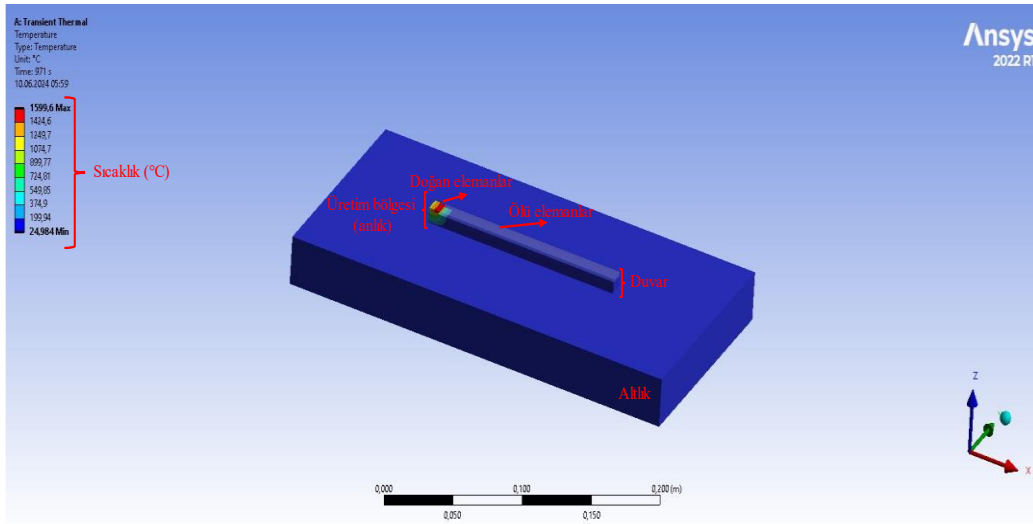
Şekil 3.7. WAAM sayısal analizinde parçada oluşan sıcaklık dağılımı, verilen üretim ısısı ile aktif olan elamanlar

Şekil 3.8 ve 3.9'da 5 katmanlı duvar üretimine ait modellemede iki farklı katmanın üretimi görselleştirilmiştir. Şekil 3.8, duvar üretiminin üçüncü katmanındaki sıcaklık dağılımını, katman üretiminin başlangıcını göstermektedir.



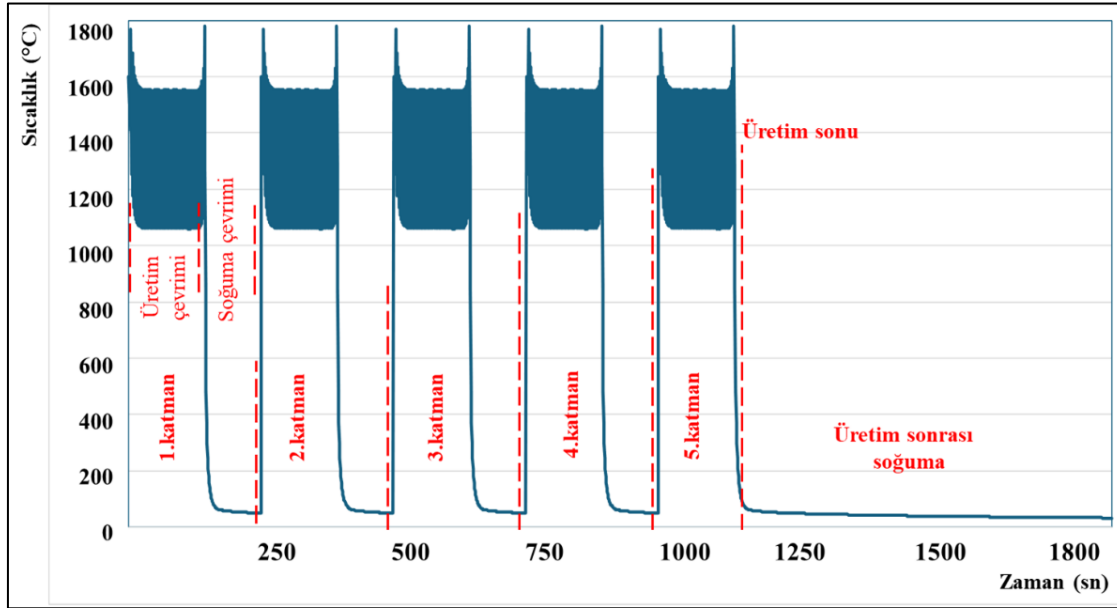
Şekil 3.8. WAAM duvar üretiminin 3. katmandaki sıcaklık dağılımı

Şekil 3.9 ise son katmandaki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Üretim için gerekli olan ısı ilgili bölgeye uygulandığında oluşan yüksek ısı önceki katmanları da etkilemektedir. Bu fenomen sayısal çözümlerde açıkça görülmektedir. Üretim bölgesinin önceki katmanlara uzaklığına bağlı olarak ısı etkisi önceki katmanlarda termal süreci etkilemektedir. Bu etki katmanların sıcaklığını etkilerken mekanik özellikler üzerinde istenmeyen süreçlerin oluşmasına sebebiyet vermektedir.



Şekil 3.9. WAAM duvar üretiminin son katmanındaki üretim başlangıcındaki sıcaklık dağılımı

5 katmanlı düz duvar modeline ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 3.10'da sunulmuştur. Katmanlar arası süre boyunca, sıcaklık hızla düşmektedir. Sıcaklık katmanlar arası bekleme süresi sonunda metalin ergime sıcaklığı olan 1500-1600 °C sıcaklık aralığından 50 °C seviyelerine inmektedir. Her yeni katman üretildiğinde, önceki katmanlar kontrolsüz bir sıcaklık döngüsüne girerek tekrar tekrar ısınmakta ve soğumaktadır. Bu süreçte, her yeni katman eklendiğinde, önceki katmanlar metalin ergime sıcaklığına kademeli olarak maruz kalmaktadır.

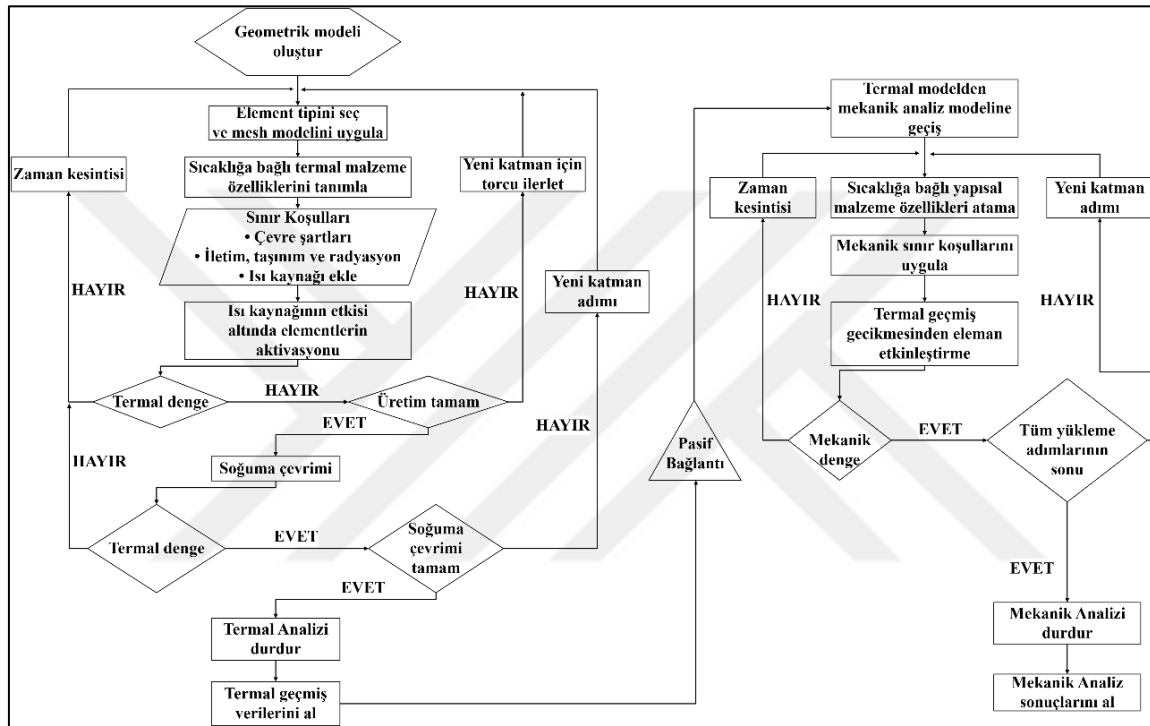


Şekil 3.10. WAAM işleminin sayısal yöntem ile üretilen sıcaklık-zaman grafiği

ANSYS Parametrik Tasarım Dili (APDL), WAAM üretim sürecinde karşılaşılan problemleri çözmek amacıyla özel bir alt program geliştirmek için etkili bir araç olarak kullanılmıştır. Bu dilin sunduğu esneklik, parametrik modelleme yetenekleri ve özelleştirilebilir komutları sayesinde, üretim sürecindeki çeşitli senaryolar detaylı bir şekilde simüle edilmiş ve analiz edilmiştir. Bu yaklaşımla, WAAM sürecindeki karmaşık termal ve mekanik etkilerin anlaşılması ve optimize edilmesi mümkün olmuştur.

Bu kapsamda geliştirilen alt program, farklı malzeme davranışlarının modellenmesi, ısı ve mekanik yüklemelerin etkilerinin incelenmesi ve bu etkilerin minimize edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Sonuç olarak, WAAM yöntemiyle üretilen parçaların yapısal bütünlüğünü artırmak ve üretim sürecinin verimliliğini optimize etmek adına önemli ilerlemeler kaydedilmiştir.

Şekil 3.11'de detaylı olarak sunulan çalışmada, pasif olarak eşleştirilmiş termo-mekanik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, WAAM sürecinde meydana gelen termal ve mekanik etkilerin, malzeme üzerinde yarattığı gerilme ve deformasyonları anlamak için kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, ısı döngüleri ve kaynak sırasında oluşan termal gradyanların malzeme üzerindeki etkileri incelenmiş, bu etkilerin optimizasyonu için APDL ile geliştirilen alt program kullanılmıştır.

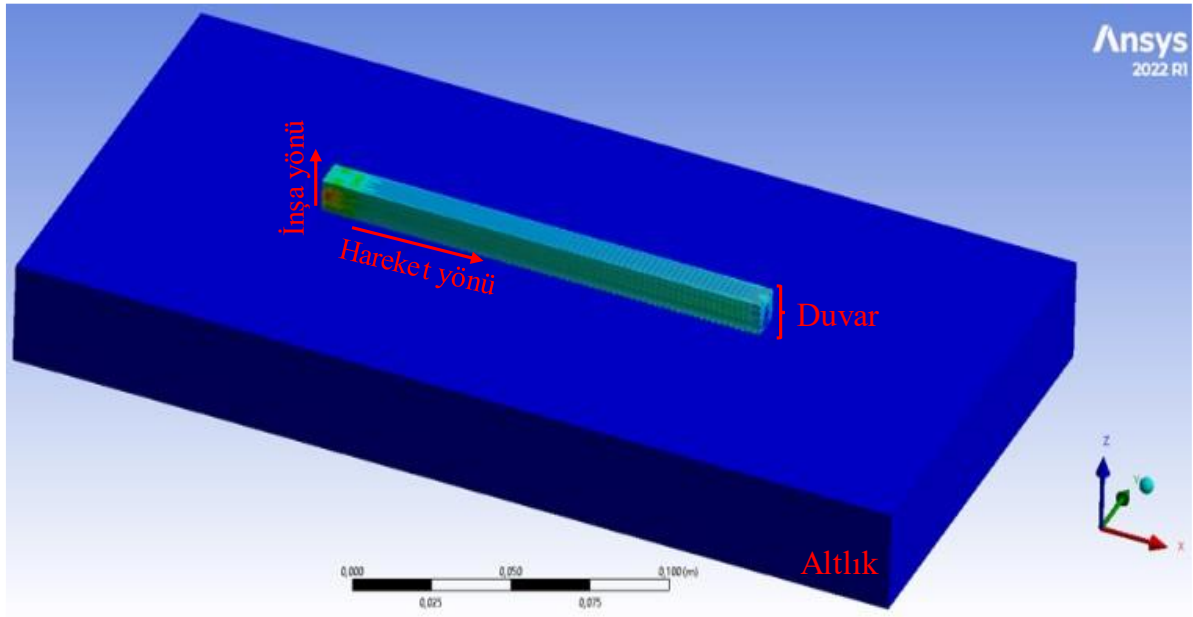


Şekil 3.11. WAAM işleminin termo-mekanik analizinin işlem döngüsü

Termal analizin mekanik deformasyonlar üzerindeki etkisi, mekanik deformasyonlar sonucu oluşan ısı dağılımına kıyasla önemlidir. Bu nedenle, Şekil 3.11'de gösterildiği gibi tek yönlü pasif bağlantı yeterlidir.

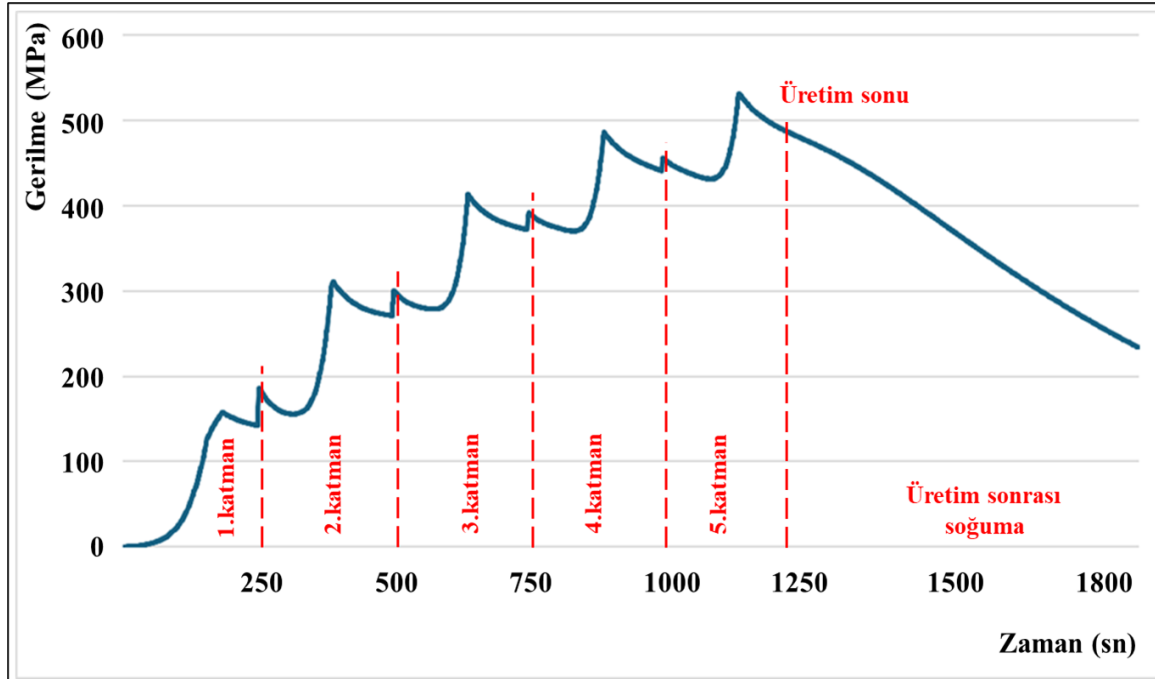
Biriktirme sırasında oluşan gerilmelerin tahmini için, ilk önce termal analiz ve daha sonra mekanik analiz yapılır. Termal analizde, harici yükleme kaynağı olarak hareketli ısı kaynağından gelen ısı dağılımı dikkate alınarak, sıcaklık dağılımı biriktirmenin her aşamasında elde edilir. Mekanik analizde dış yükleme yoktur. Bununla birlikte, sıcaklık dağılımı uygulanan kuvvet gibi davranır ve biriktirmenin her aşamasında tek yükleme kaynağıdır. Örnek olarak 5 katmanlı düz duvar modeline ait mekanik analiz görseli Şekil 3.12'de verilmiştir. Görsel üretim bittiğinde parçada oluşan gerilme dağılımını vermektedir.

Duvar geometrisinin üretim yönü ve inşa yönü boyunca değişken gerilme dağılımı oluşmaktadır. Termal tabanlı oluşan bu gerilme kontrol edilemeyen bir durumdur ve WAAM işleminin temel sorunlarından biridir. Her yeni katman üretiminde önceki katmanları da etkileyen üretim kaynaklı ısı parçada, kalıntı gerilme ve çarpılma üretmekte ve bunların kalıcı olmasına sebep olmaktadır. Üretilen bu kalıntı gerilme ve çarpılma parçanın üretim sonrası ardıl işlemlere girmesine sebep olmakta ve parçanın kabul şartlarını doğrudan etkilemektedir.



Şekil 3.12. WAAM üretiminin duvar modeline ait üretim sonu gerilme dağılımı

Modelin üretim sürecince ürettiği termal kaynaklı gerilme değişimi ise Şekil 3.13'te verilmiştir. Grafikte görülen salınım termal kaynaklı olup, üretimin sonunda parçadaki kalıntı gerilme açıkça görülmektedir. Katmanlı imalat süreçlerinde, her yeni katmanın eklenmesiyle bir ısı birikimi oluşur. Her yeni katman üretiminde oluşan ana pik, bir katmanın imalatı sırasında oluşan gerilmeyi gösterirken, ikinci pik genellikle bu katman soğurken ya da bir sonraki katman eklenirken oluşan termal etkilerden kaynaklanabilir. Isıl genleşme ve büzülme nedeniyle bu ikinci pik meydana gelebilir. Diğer etki ise her katmanın eklenmesiyle malzemede mikro-yapısal değişiklikler oluşabilir. Bu durum, gerilme dağılımını etkileyerek ilk pikin ardından ikinci bir gerilme piki yaratabilir. Örneğin, malzeme soğurken farklı sertleşme bölgeleri oluşabilir.

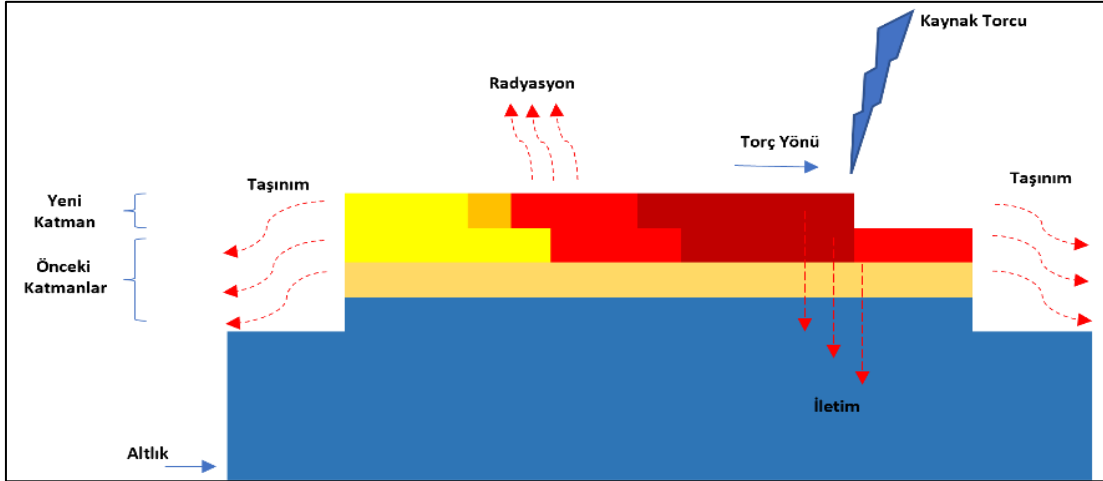


Şekil 3.13. WAAM işleminde duvar üretimi ve sonrasında oluşan gerilme değişimi

Her yeni katman üretiminde artan gerilme miktarı kontrol edilmeyen ve önceki katmanları etkileyen ısının tabii sonucudur. Üretim bittiğinden inşa ve hareket yönünün başlangıç bölgesinde gerilme miktarının yüksek olduğu görülmektedir. Katman üretim başlangıcında soğuk olan bu bölge maruz kaldığı yüksek sıcaklık ile önceki katmanların termal süreçlerini bozmakta ve soğumakta olan bölgenin tekrar ısınmasına sebep olmaktadır. Bu ısınma katılaşma sürecine müdahale ederek katmanların özellikle de üretim bölgesine yakın yüzeylerini tekrardan ısıtarak yüzeylerin genişlemesine sebep olmaktadır. Bu genişlemeye eşlik edemeyen iç bölgeler çekme gerilmesi üretmektedir. Üretilen bu gerimler parçada kalıntı gerilme ve nihayetinde ise çarpılmaya sebep olmaktadır.

3.2. Kalıntı Gerilme ve Çarpılma Kontrolü için Geliştirilen Yeni Model

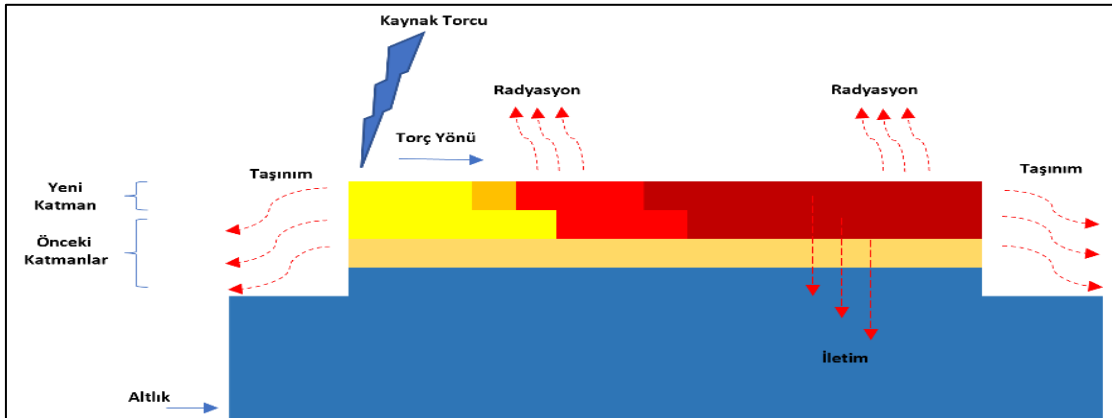
WAAM işleminin sorunlarından birisi yüksek ısı girdisidir. İmalat için gerekli olan ısı çok yüksek olduğu için yeni katman imalatında önceki katmanlar tekrar yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Üretimde oluşan ısıl davranış Şekil 3.14’te verilmiştir. Katman üretimi sırasında önceki katmanlar ile yeni üretilen katmanlar arasında ısı iletimi ile ısı transferi olmaktadır. Daha düşük sıcaklığa sahip önceki katmanlara çok hızlı bir ısı geçişi olmakta ve önceki katmanların sıcaklıkları hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu sırada taşınım ve radyasyon ile de hızlı bir ısı transferi çevre ile üretim parçası arasında gerçekleşmektedir.



Şekil 3.14. WAAM işleminde katman serimi sırasında oluşan ısı dağılımı

Katman üretim işlemi bitip parça soğuma çevrimine girdiğinde ısı hareketlilik devam etmekte ve parça soğumaya devam ederken daha az sıcaklığa sahip önceki katmanlara ısı akışı hızlı bir akışı olmaktadır. Bu durum Şekil 3.15'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

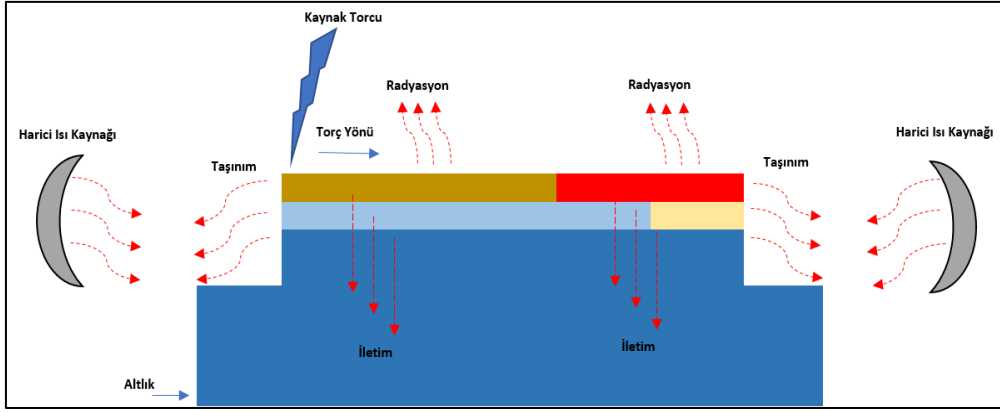
WAAM işleminin termal davranışının modellenmesi sonucunda elde edilen termal sonuçlarda önceki katmanların her yeni katman serimin de tekrar ısınıp soğuduğunu göstermiştir. Şekil 3.10'da da görüldüğü gibi soğuma çevrimi sonrası yaklaşık olarak 60 °C civarına düşen önceki katmanlar yeni katman serimi tekrar ısınmakta katman sıcaklığı ısı kaynağına olan mesafeye göre 200 °C ile 1300 °C tekrar ulaşmaktadır. İmalat yönteminin doğası gereği bu döngü kaçınılmazdır. Her yeni katmanda önceki katmanlar bu ısınma-soğuma çevrimine maruz kalacaktır.



Şekil 3.15. WAAM işleminde soğuma çevrimi sırasında oluşan ısı dağılımı

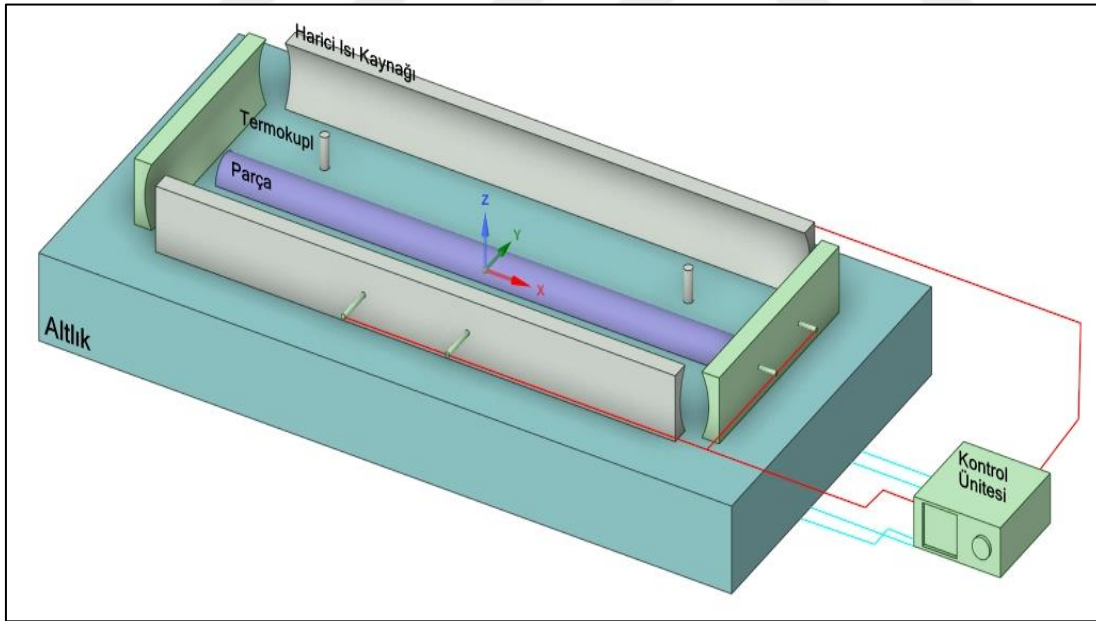
Kalıntı gerilme ve çarpılma oluşumunun en büyük üreticisi olan yüksek ısı, WAAM işleminin temel girdisidir. Bu yüksek enerji girdisi üretilen her yeni katmanda önceki katmanların soğuma döngüsündeyken tekrar ısınma döngüsüne girmesine sebep olmakta ve üretilen parça üzerinde termal bir stres oluşturarak kalıntı gerilme oluşmasına sebep olmaktadır. Farklı termal gerilmeler, tek tip olmayan gerilmeler geliştirir. Soğuma sırasında dış yüzey daha hızlı soğur ve sıcak malzemeyi merkezde sıkıştırır. Merkezdeki malzeme soğumaya çalışırken, daha soğuk olan dış malzeme tarafından kısıtlanır. Sonuç olarak, iç kısım kalıntı çekme gerilmesi sahip olurken ve imalat parçasının dış kısmı basma kalıntı gerilmesi üretecektir.

Yüksek bir sıcaklıktan soğutma sırasında bir metaldeki sıcaklık değişimleri, termal büzülmenin bölgesel varyasyonlarına neden olur. Termal büzülme, metalin yüzeyinin ve iç kısmının farklı soğuma hızlarından dolayı tekdüze olmayan gerilme geliştirir. Soğutma sırasında, önce bir metalin dış kısmı soğur ve metalin bu kısmı büzülerek daha sıcak olan iç metali sıkıştırır. Metalin iç kısmı soğudukça, metal büzülmeye çalışır, ancak hâlihazırda soğutulmuş dış kısım tarafından sınırlandırılır. Sonuç olarak, iç kısım kalıntı çekme gerilimine sahip olacak ve bileşenin dış kısmı kalıntı basma gerilimine sahip olacaktır. Yüksek sıcaklıklardan soğutulan parçalarda, kalıntı gerilimler, soğutma sırasında metaldeki sıcaklık değişimlerinden kaynaklanır. Yüksek sıcaklıklardan soğutma, ısıl işlem, kaynak işlemi ve kaynak tabanlı üretimlerde gerçekleşir. Kaynaklı tabanlı üretim olan WAAM yönteminde üretilen parçanın soğuması kontrol altına alınmadığı için parça kontrolsüz şekilde soğumakta ve soğuma sürecinde üretilen yeni katmanlar parçasının soğuma döngüsünü kırarak parçanın kontrolsüz olarak tekrar ısınmasına sebep olmaktadır. WAAM işleminin termal döngüsünü kontrol altına alarak imalat süresinde oluşan büyük ve kontrolsüz ısıl dalgalanma engellenebilir. Şekil 3.16'da WAAM işleminde ısıl dalgalanmayı kontrol alabilecek bir yaklaşım olan ısı kalkanı modeli şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.16. WAAM işleminde ısı kalkanı modelinin şematik gösterimi

İmalatta ısı dalgalanmayı en aza indirmek için harici ısı kaynakları ile ortam ve/veya imalat parçasının önceki katmanları belirli bir sıcaklıkta tutulacaktır. Böylece önceki katmanlar ile yeni katman arasındaki ısı transferi ve bu bağlı oluşan termal dalgalanma azalacaktır. Şekil 3.17’de harici ısı kaynaklı WAAM işlemi sırasında oluşturulacak ısı kalkanı modeli şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.17. Harici ısı kaynaklı WAAM işleminde harici ısı kaynağı modeli

Bu yaklaşımda, üretim parçasının etrafı harici ısı kaynağı olarak kullanılan infrared teknolojisine sahip seramik ısıtıcılar ile çevrelenerek, üretimin termal davranışı kontrol altına alınacaktır. Harici ısı kaynaklı WAAM işleminde, standart WAAM işlemine ek olarak, üretim sırasında ortam ve parça sıcaklığını kontrol etmek amacıyla bu ısıtıcılar iş parçasının

etrafına yerleştirilecektir. Bu şekilde, üretilen malzemenin termal davranışı daha etkili bir şekilde yönetilecektir.

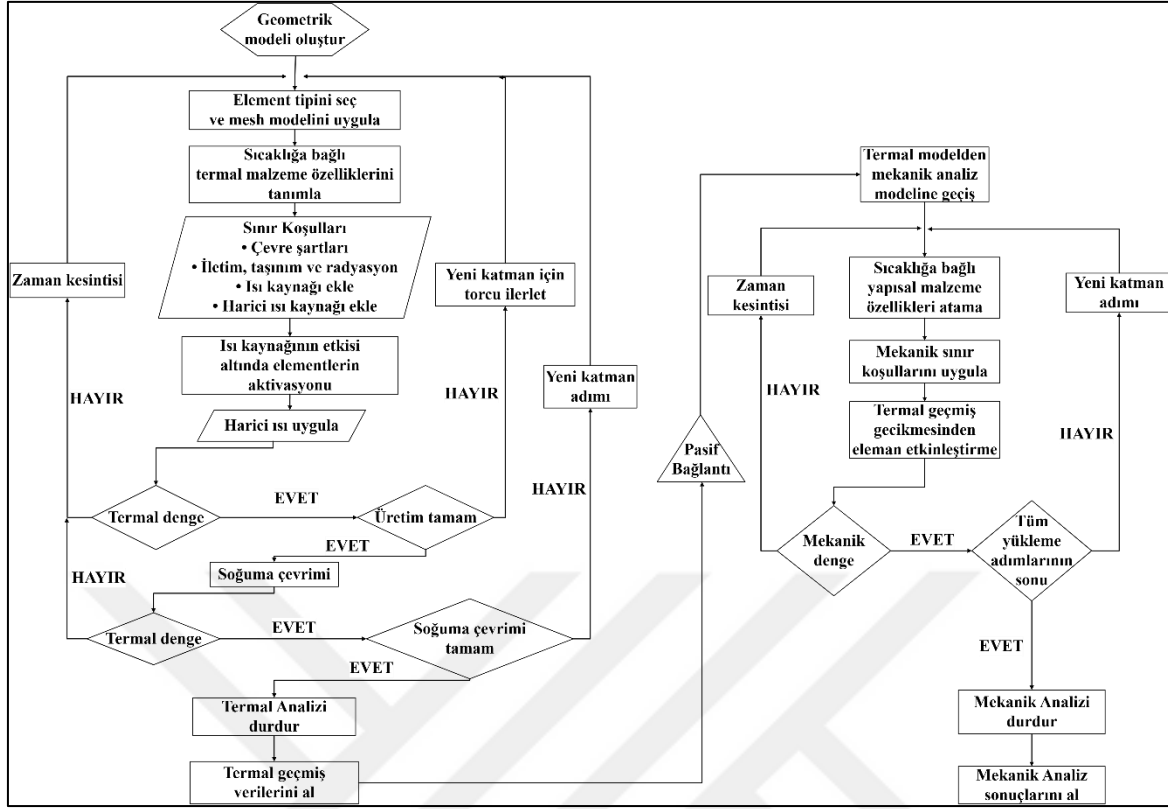
3.3. Kalıntı Gerilme ve Çarpılma Kontrolü için Geliştirilen Yeni Modelin Sayısal Modellenmesi

Harici ısı kaynaklı WAAM işleminde ısı analiz için, Fourier'in temel ısı iletimi denkleminde (Denklem 3.1) ilave ısı ifadesi olarak Q_H eklenerek mevcut denklem güncellenmiştir.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v + Q_H \quad (3.9)$$

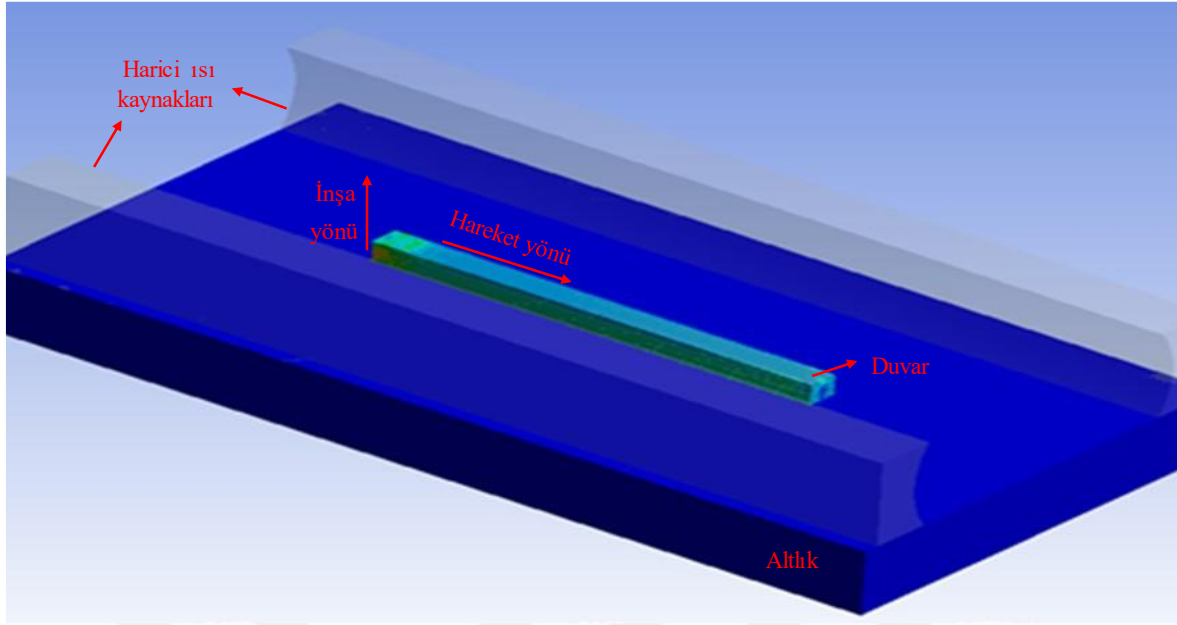
Burada, Denklem 3.1'e ilave olarak, Q_H ; sisteme verilen harici ısıdır.

Deneysel çalışmalar öncesinde, öngörü çalışması için harici ısı kaynaklı WAAM işlemi sayısal olarak modellenecek, modellemede ANSYS paket programı kullanılacak ve klasik WAAM işleminin modellenmesinde kullanılan ve geliştirilen alt model referans alınacaktır. WAAM alt modeline ek olarak termal analiz sırasında modele harici ısı kaynağı girdi olarak eklenecektir. Termal analiz sonuçları mekanik analize WAAM işleminde olduğu gibi girdi olarak eklenecektir. Mekanik çözümde termal kaynaklı gerilme harici bir girdi eklenmeyecektir. Termal ve mekanik analiz arasında pasif bağlantı ile veri transferi sağlanacaktır. Harici ısı kaynaklı WAAM sayısal modelinde geleneksel WAAM işlemine ilaveten termal analiz adımlarında ilave sınır koşulu olarak harici ısı kaynağı eklenmiştir. Malzemenin soğuma çevriminde de harici ısı analize girdi olarak eklenmiştir. Harici ısı kaynaklı WAAM işleminin sayısal modellemesinde kullanılacak işlem adımları Şekil 3.18'de ayrıntılı olarak verilmiştir.



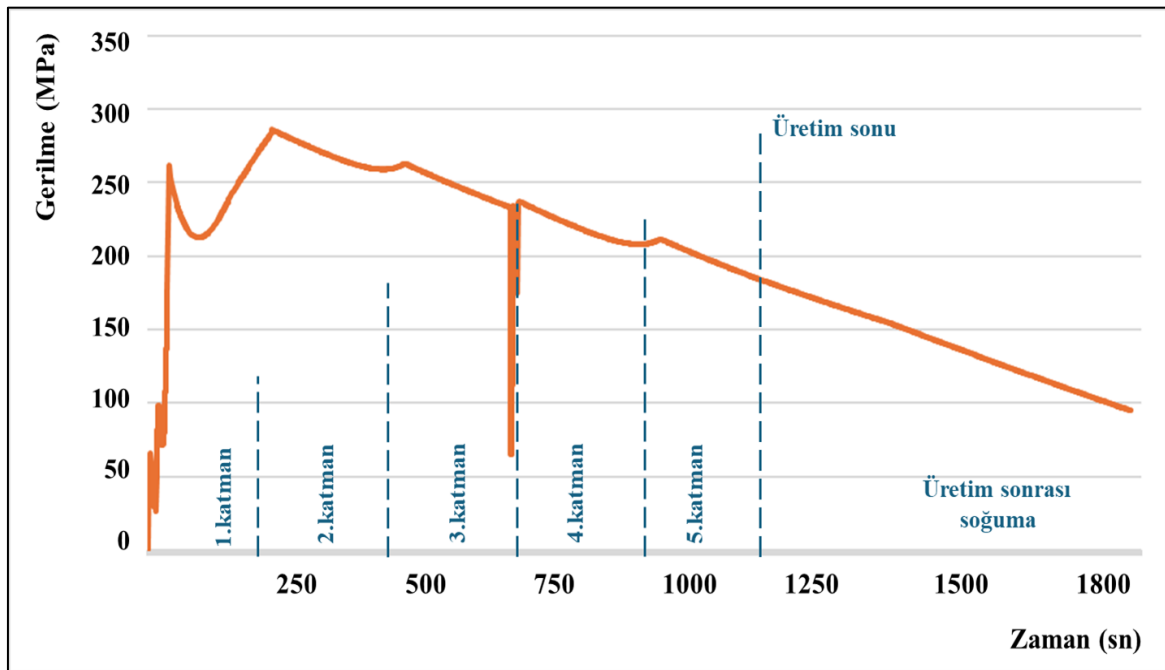
Şekil 3.18. Harici ısı kaynaklı WAAM işleminin termo-mekanik analizinin işlem döngüsü

WAAM üretiminin analizinde kullanılan duvar modeli harici ısı kaynaklı WAAM işlemi modellemesinde de kullanılmıştır. Bu kapsam da beş katmandan oluşan bir parçanın sayısal modellemesi gerçekleştirilmiş ve harici ısı kaynakları, parçanın uzun kenarlarına paralel olarak konumlandırılmıştır. Harici ısı kaynaklarının sistemi etkileyecek şekilde sağladığı sıcaklık değeri 150 °C olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklık değeri, imalat sırasında parçanın homojen bir sıcaklık dağılımına sahip olmasını ve dolayısıyla katmanlar arası termal gerilimlerin minimize edilmesini sağlamak amacıyla seçilmiştir. Modelleme sürecinde, harici ısı kaynakları katman üretimi süreciyle senkronize bir şekilde devreye alınmıştır. Katman üretiminin tamamlanmasının ardından, harici ısı kaynaklarının sıcaklığı belirli aralıklarla kademeli olarak düşürülmüştür. Bu düşüş, önce 100 °C'ye (~200 sn), ardından 75°C'ye (~200 sn) ve son olarak 50°C'ye (~200 sn) gerçekleştirilmiştir. Harici ısı kaynakları, duvar sıcaklığının 50 °C'nin altına düşmesiyle tamamen devre dışı bırakılmıştır. Bu aşamalı soğutma stratejisi, katmanlı üretim sürecinde meydana gelebilecek termal şokların ve buna bağlı deformasyonların önüne geçmek için uygulanmıştır. Üretim sürecinde anlık olarak elde edilen sayısal analiz sonuçları, Şekil 3.19'da sunulan görselde detaylandırılmıştır. Bu görsel hem sıcaklık dağılımını hem de malzeme içindeki termal akışları göstermektedir.



Şekil 3.21. Harici ısı kaynaklı WAAM üretime ait üretim sonu mekanik analiz görseli

Modelin üretim sürecince ürettiği termal kaynaklı gerilme değişimi ise Şekil 3.22’de verilmiştir. Grafikte üretimin sonunda parçadaki kalıntı gerilmenin azaldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3.22. Harici ısı kaynaklı WAAM duvar üretimi ve sonrasında oluşan gerilme değişimi

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez çalışmasının bu aşamasında yapılan deneysel çalışmalar detaylandırılmıştır. Deneysel çalışmalar iki aşamalı olarak planlanmıştır. İlk olarak düz bir duvar geometrisi daha sonra ise 4 farklı geometride çalışmalar yapılmıştır. İlk çalışmada üretimin termal davranışı bekleme süresi boyunca takip edilmiştir. İkinci çalışmada ise termal davranış tüm üretim boyunca termal kamera ile takip edilmiş ve kayıt altına alınmıştır.

4.1. WAAM için Deneysel Çalışmalar

Harici ısı kaynağının üretim sürecine etkisini belirlemek için standart WAAM yöntemi ile kontrol numuneleri üretilmiştir. Bu numuneler harici ısı kaynağı ile aynı parametreler, malzeme, altlık kullanılarak üretilmiştir. Üretimde ilk olarak düz bir duvar daha sonra ise 4 farklı geometri üretilmiştir.

4.1.1. WAAM ile duvar üretimi

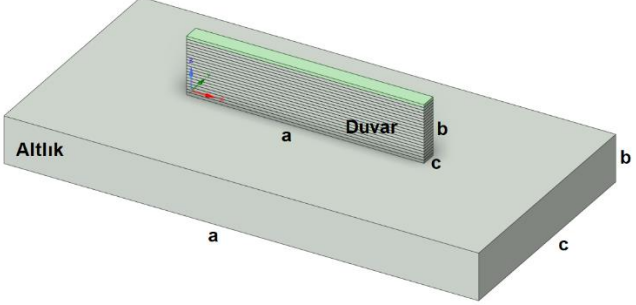
WAAM sürecinde, ilk olarak düz bir geometriye sahip duvar üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu adım, üretim sürecinin termal davranışını gözlemleyerek, bu davranış hakkında bilgi edinmeyi hedeflemektedir. Bu deneysel çalışmada, üretim sürecinde ortaya çıkan termal etkilerin ve malzeme üzerindeki sonuçlarının daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır. Üretim sırasında, Şekil 4.1’de detayları verilen robotik WAAM altyapısı kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan WAAM altyapısı

Üretimi yapılan duvara, kullanılan altığa ait boyutlar ve geometri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Duvar, 1,2 mm çaplı ER70S-6, AWS A5.18 tel kullanılarak AISI 1045 alt tabaka üzerinde tek geçişte 20 katman olarak üretilmiştir.

Çizelge 4.1. Üretimi yapılan duvar geometrisi ve geometri boyutları

	Boyutlar (mm)		
	a	b	c
Duvar	200	38	7
Altık	300	200	30

Deneysel çalışmalarda, üretim için ısı kaynağı olarak TPS/I 500 Fronius CMT kaynak makinesine sahip ticari bir sistem olan METALWORM WAAM altyapısı kullanılarak (Akyurt/Ankara) gerçekleştirilmiştir ve bu sistem diğer ark kaynak makinelerine kıyasla nispeten düşük bir ısı girdisi oluşumuna izin vermektedir. Biriktirme için sinerjik hat ve CMT modu seçilmiştir. Akım ve gerilim sırasıyla 166 A ve 15,3 V idi. Koruyucu gaz olarak

75:25 oranında ve 18,0 L/dak akış hızında argon (Ar) ve karbondioksit (CO₂) karışımı uygulandı. Üretim sırasında katmanlar arası bekleme süresi 90 saniye olarak seçilmiş ve uygulanmıştır. Bekleme süresi boyunca katman sıcaklığı robot kolu üzerine monte edilmiş temassız sıcaklık ölçüm tekniğini kullanan pirometre ile ölçülmüştür. Proses parametrelerinin detayları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. WAAM üretim parametreleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Akım [A]	166	Tel Besleme Hızı [m/dk]	4,7
Voltaj [V]	15,3	Koruyucu Gaz Akış Hızı [L/dk]	18
İlerleme Hızı [m/dk]	0,45	Temas Ucunun Çalışma Alanına Mesafesi [mm]	15-18

Deneyler 30 mm kalınlığında, 300 mm uzunluğunda ve 200 mm genişliğinde bir AISI 1045 çelik plakadan [65]oluşan bir alt tabaka üzerinde gerçekleştirilmiştir. Alt tabakanın iki temel işlevi vardır: üretilen malzemeyi desteklemek ve üretim sırasında oluşan ısının iletim yoluyla dağılmasına yardımcı olmaktır. Alt tabaka olarak kolay erişilebilirlik, üretilen malzeme ile uyumluluk ve kaynak özellikleri gibi nedenlerle AISI 1045 malzemesi seçilmiştir.

Biriktirme malzemesi olarak (AWS ER70S-6) 1,2 mm çapında bakır kaplı yumuşak çelik tel kullanılmıştır. Bu malzeme genel atölye imalatı, tanklar, şaftlar, araba gövdeleri, borular, çelik dökümler, inşaat işleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır [65]. Çizelge 4.3, ana malzemenin (alt tabaka) ve biriktirilen malzemenin mekanik özelliklerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Biriktirilen malzemenin mekanik özellikleri ana malzemeye kıyasla daha üstün olmasına rağmen, her iki malzemenin yoğunluğu neredeyse aynıdır, bu da malzeme seçimi ve uygulama açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca, kullanılan kaynak telinin kimyasal bileşimi Çizelge 4.4’te detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.3. Alt tabakanın ve biriktirilen malzemenin mekanik malzemenin özellikleri

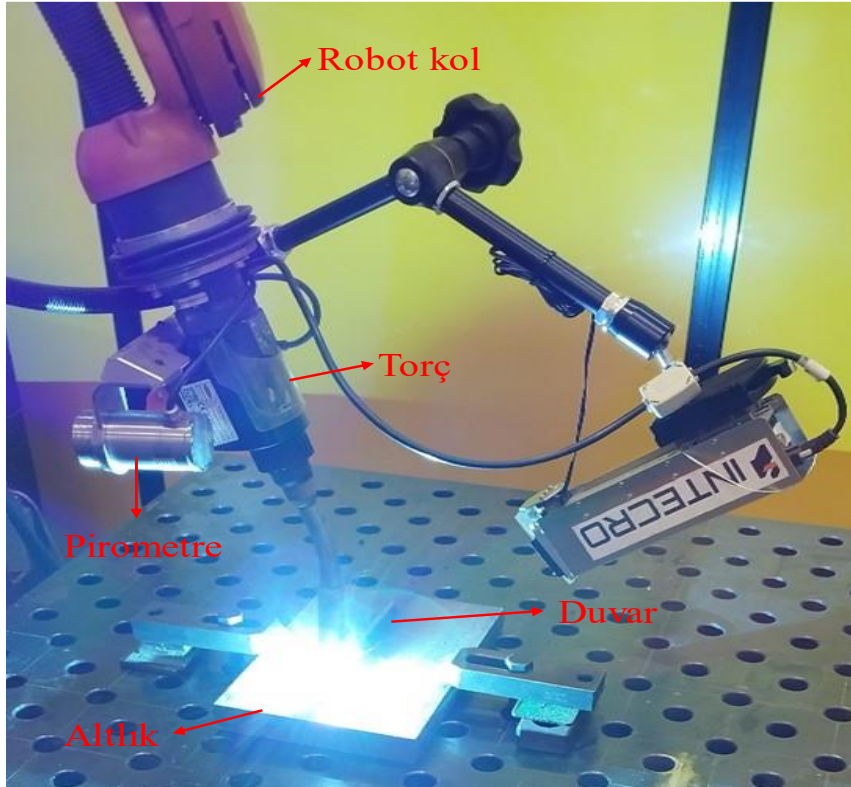
Mekanik Özellikler	AISI 1045	ER70S-6
Yoğunluk (kg/m ³)	7850	7833
Akma Dayanımı (MPa)	310	420
Çekme Dayanımı (MPa)	520	500-640

Çizelge 4.4. Biriktirilen malzemenin kimyasal bileşimi

Element	C	Mn	S (maks.)	Ni (maks.)	V (maks.)	Cr	Cu	Si	P	Mo (maks.)
Ağırlıkça %	0,06- 0,15	1,40- 1,85	0,0035	0,15	0,03	0,15	0,50	0,80- 1,15	0,025	0,15

Yukarıda verilen parametrelerde standart bir WAAM işlemi ile bir adet duvar üretimi yapılmıştır. Üretime ait görseller ve parça görselleri aşağıda verilmiştir. Şekil 4.2, üretim sürecini detaylı bir şekilde gösteren kritik bir görseldir. Bu görselde, katman üretimi esnasında kullanılan robot kolu, torç ve pirometre net bir şekilde görülmektedir. Robot kolu, hassas hareketleriyle torçu istenilen yörüngede yönlendirirken, torç katman katman malzeme biriktirmektedir. Pirometre ise, bekleme süresi sırasında sürekli olarak yüzey sıcaklığını izleyerek ısıl yönetimi sağlamak ve üretim sürecinin istikrarını korumaktadır.

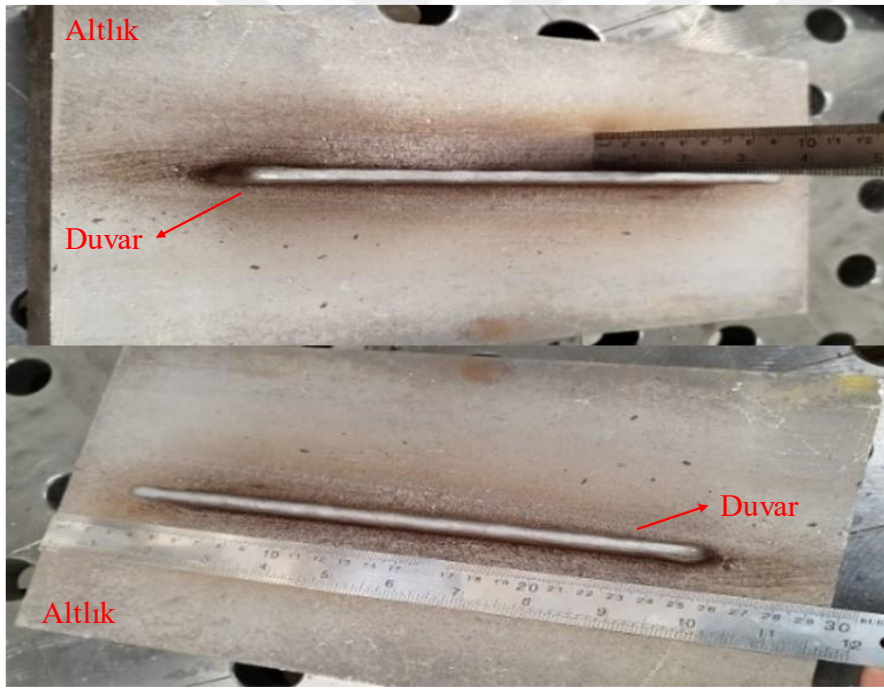
Bu görsel, WAAM sürecindeki temel bileşenlerin birbirleriyle nasıl bütünleşmiş çalıştığını ve üretimin her aşamasının nasıl kontrol edildiğini gösteren önemli bir kanıttır. Üretim süreci ırasında alınan bu görsel, aynı zamanda robot kolunun ve torçun hareket koordinasyonunu, katmanların düzgün bir şekilde oluşturulmasını ve pirometrenin rolünü anlamak açısından da değerlidir.



Şekil 4.2. Otomatik WAAM tezgahında duvar üretimi

Üretim sonrası elde edilen parçanın boyutları ve geometrik özelliklerine ilişkin ayrıntılı bilgiler, Şekil 4.3'te görsel olarak sunulmuştur. Bu görseller, üretilen duvar yapısının tüm kritik ölçümlerini ve boyutsal doğruluğunu detaylı bir şekilde göstermektedir. Yapılan ölçümler, parçanın belirlenen tasarım spesifikasyonlarına uygun olarak üretildiğini ve hedeflenen tolerans aralıklarının başarıyla korunduğunu ortaya koymaktadır.

Detaylı incelemeler sonucunda, duvar yapısında herhangi bir akma, deformasyon ya da gözle görülen bir yüzey kusuruna rastlanmamıştır. Parçanın genel yapısı, katmanların düzgün bir şekilde biriktirildiğini ve üretim sürecinin yüksek bir doğrulukla gerçekleştirildiğini doğrulamaktadır. Ayrıca, yüzey pürüzsüzlüğü ve homojenliği, üretim sırasında kullanılan parametrelerin optimal olduğunu ve başarılı bir şekilde uygulandığını göstermektedir.



Şekil 4.3. WAAM ile üretilen duvara ait görseller

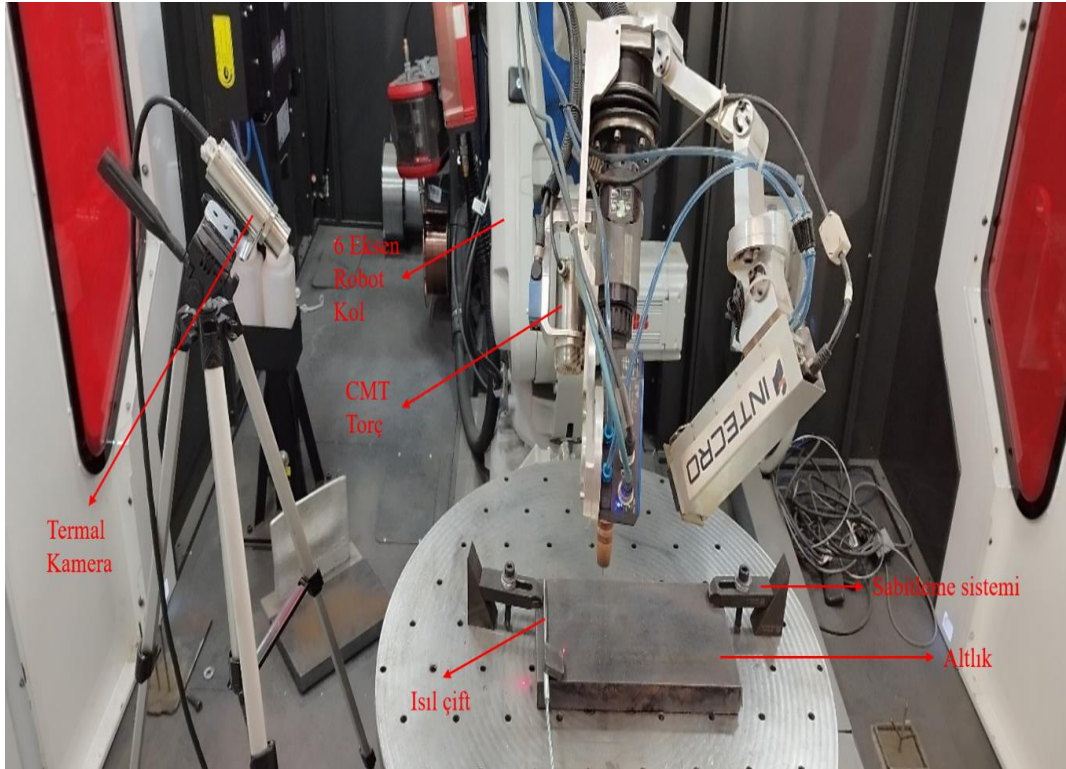
Üretilen duvar geometrisi daha sonra yapılacak olan metalürjik testler için altlıktan ayrılmıştır. Duvar geometrisine ait görsel Şekil 4.4'te verilmiştir. Altlıktan ayırma işlemi yapılırken üretim geometrisine zarar verilmemiş ve malzeme kaldırma işlemi altlık yüzeyinden yapılmıştır.



Şekil 4.4. Altlıktan ayrılmış duvar geometrisi

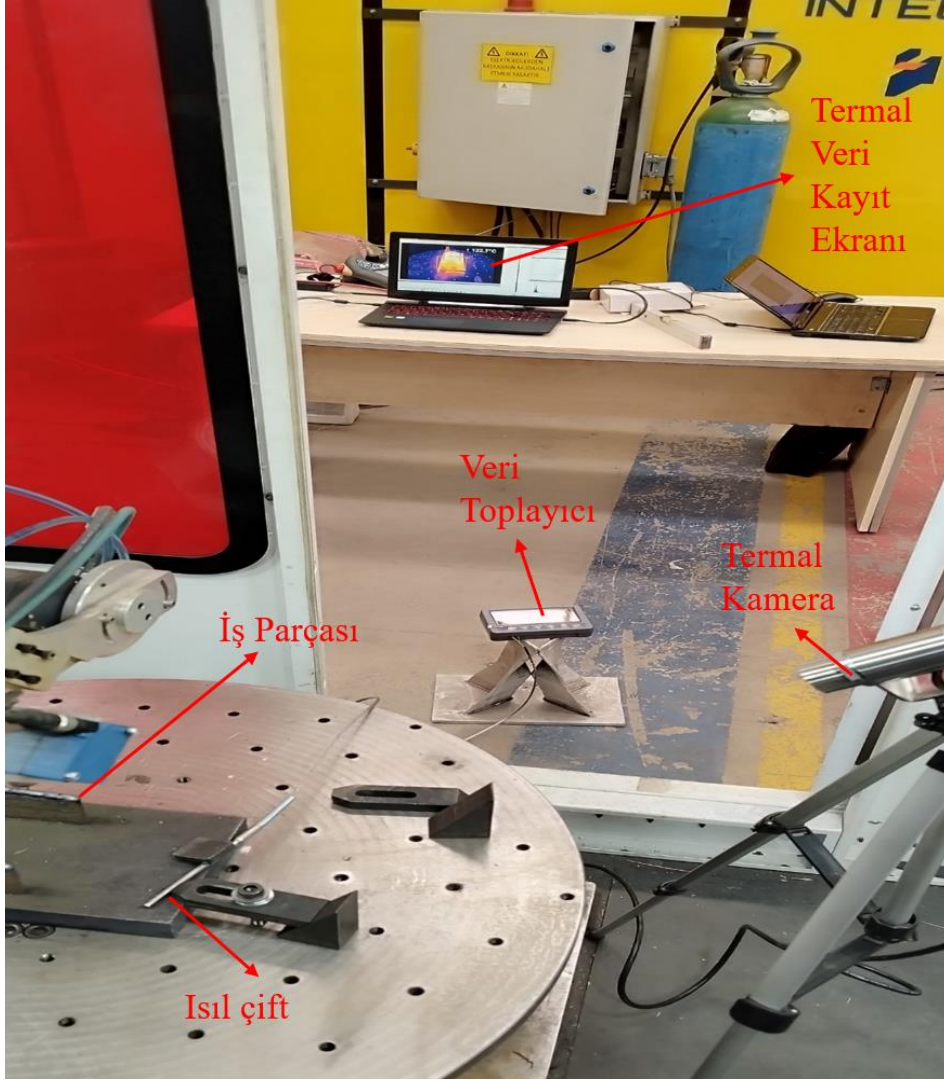
4.1.2. WAAM ile farklı geometrilerin üretimi

Deneysel çalışmanın bu aşamasında 4 farklı geometri için üretim yapılmıştır. Önceki üretimden farklı olarak üretim süreci termal kamera ile kayıt altına alınmıştır. Termal kamera 200 – 1500 °C sıcaklık aralığında, motorlu odaklamalı, hızlı termal süreçlerin izlenmesi için 80 Hz kare hızı ve 382 x 288 piksel optik çözünürlüğe sahip Optris firmasının Xi 400 modelidir. Üretimler, METALWORM firmasının WAAM sistemi için geliştirdiği en üst modeli olan MHTTN1000’de termal kamera sistemi ile güncellenen ve Şekil 4.5’te verilen altyapıda yapılmıştır. Üretim için ısı kaynağı olarak TPS/I 500 Fronius CMT kaynak makinesinde sinerjik hat ve CMT modu seçilmiştir. Üretim sırasında akım ve gerilim değeri sırasıyla 166 A ve 15,3 V olarak belirlenmiştir. Koruyucu gaz olarak 75:25 oranında ve 18,0 L/dak akış hızında argon (Ar) ve karbondioksit (CO₂) karışımı uygulanmıştır.



Şekil 4.5. Termal kamera entegreli WAAM altyapısı

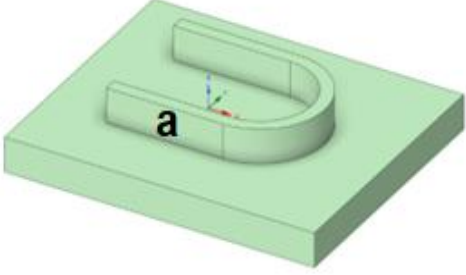
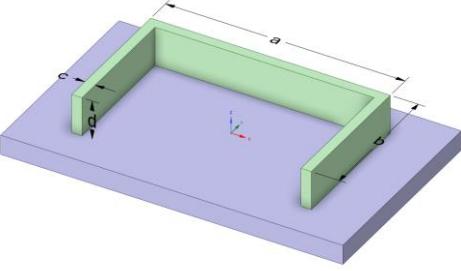
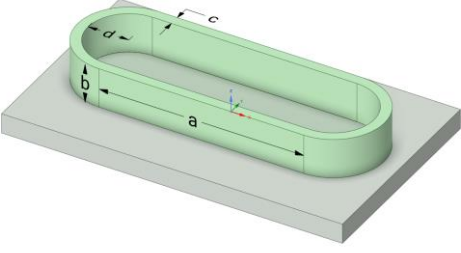
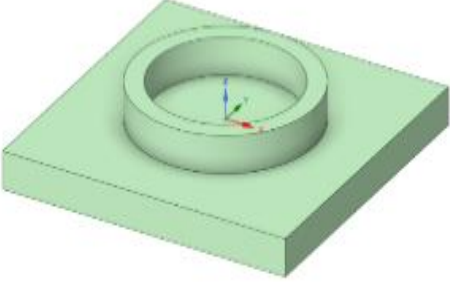
Üretim sırasında oluşan termal geçmiş termal kamera ile kayıt altına alınmıştır. Kamera ile ölçülen sıcaklığın kontrolü için tabla üzerine yerleştirilen ısı çifti ile de termal geçmiş kayıt altına alınmıştır. Isıl çifti ile kameradan elde edilen sıcaklık değerlerinin güvenilirliği artırılmıştır. Kayıt sistemine ait altyapı görseli Şekil 4.6’da detaylandırılmıştır.



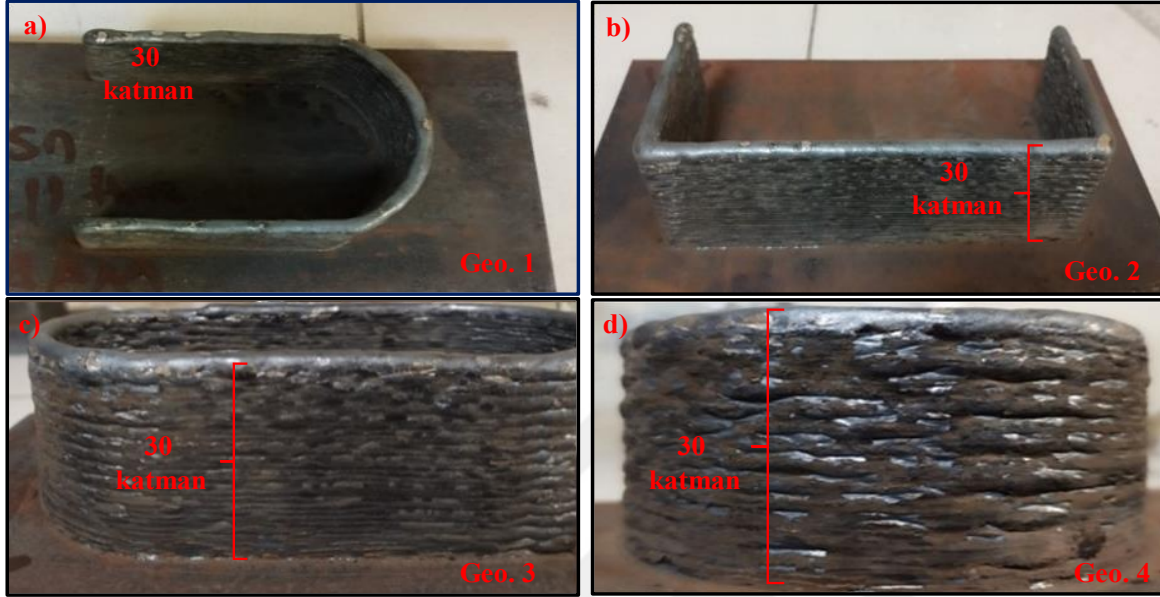
Şekil 4.6. Termal veri kayıt altyapısı

Çizelge 4.5, üretimi gerçekleştirilen geometrilerin ve kullanılan altlığın boyutları verilmiştir. Parçaların tasarımında, sade ve düz duvarlara sahip, karşılıklı paralel yüzeylerden oluşan, üretim açısından kolaylık sağlayan ve tek kaynak dikişi ile yapısal bütünlük sunan geometriler tercih edilmiştir. Bu geometriler için üretim süreci, 1,2 mm çapında ER70S-6 tel kullanılarak, 30 mm kalınlığında, 300 mm uzunluğunda ve 200 mm genişliğinde AISI 1045 alt tabaka üzerinde, tek geçişte 30 katmanlı bir yapı olacak şekilde planlanmıştır.

Çizelge 4.5. Üretimi yapılan geometriler ve geometrilerin boyutları

Geo. No	Geometri	Boyutlar (mm)			Katmanlar arası bekleme	
		r	a	h	Katman sırası	Süre (sn)
Geo. 1		100	100	50	1-30	90
Geo. 2		a	b	h	Katman sırası	Süre (sn)
					1-5	30
		200	80	50	5-15	60
					15-30	90
Geo. 3		a	h	r	Katman sırası	Süre (sn)
					1-5	30
		120	50	100	5-15	60
					15-30	90
Geo. 4		r	t	h	Katman sırası	Süre (sn)
					1-5	30
		100	7	50	5-15	60
					15-30	90

Üretilen geometrilere ait görseller Şekil 4.7’de görülmektedir. Şekilde dört farklı geometriye ait üretim görseli verilmiştir. Üretilen geometrilere yapılan ilk muayenede akma, deformasyon gibi gözle görülen kusurlar bulunmamaktadır.



Şekil 4.7. WAAM ile üretilen farklı geometrilere ait görseller a) Geometri 1 b) Geometri 2 c) Geometri 3 d) Geometri 4

4.2. Harici Isı Kaynaklı WAAM için Deneysel Çalışmalar

Bu tez çalışmasında, tel ark ergitmeli eklemeli imalat sürecinde karşılaşılan en önemli problemlerden biri olan termal gradyanın kontrol altına alınmasına yönelik yeni bir hipotez geliştirilmiştir. Bu hipotezin temel amacı, üretim sürecinde meydana gelen dengesiz termal döngülerin etkisini minimize ederek kalıntı gerilmeleri ve çarpılmaları asgari seviyeye indirmektir. Bilindiği üzere, WAAM süreçlerinde katmanlı üretim esnasında oluşan aşırı sıcaklık farkları, iş parçası üzerinde düzensiz termal genişlemelere ve sonuç olarak geometrik deformasyonlara yol açmaktadır. Bu durum hem nihai ürünün boyutsal doğruluğunu hem de mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir.

Geliştirilen hipotez, imalat sırasında meydana gelen termal döngülerin daha kontrollü bir şekilde yönetilmesine odaklanmaktadır. Bu bağlamda, her bir katmanın üretim sürecinde dengeli bir şekilde soğutulması ve bir sonraki katmanın üretimine geçildiğinde önceki katmanların homojen bir şekilde ısınmasını sağlamayı hedeflemektedir. Hipotez, ayrıca iş parçasının, harici ısı kaynakları aracılığıyla oluşturulan termal bir kalkanla çevrelenmesi

fikrine dayanmaktadır. Bu termal kalkanın işlevi, üretim süreci boyunca iş parçasının daha kontrollü bir şekilde ısınmasını ve soğumasını sağlamaktır. Bu şekilde, üretim sırasında meydana gelebilecek termal şoklar engellenerek malzemenin mikro yapısındaki istenmeyen değişikliklerin önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

4.2.1. Harici ısı kaynaklı WAAM için altyapı kurulu

Harici ısı kaynağı altyapı kurulumu, standart WAAM altyapısına ilave olarak ısı kaynaklarının sisteme eklenmesidir. Harici ısıtma sistemi üç alt birimden oluşmaktadır.

Isıtıcı

Harici ısıtıcı olarak kızılötesi ısıtma teknolojisine sahip seramik plakalar kullanılmıştır. Isıtıcılar 2-10 mikron dalga boyu aralığına sahiptir ve 400 W gücündedir. 245 x 60 x 36.5 mm boyutlarına ve Fe-Cr-Al rezistans teline sahiptir.

Seramik tabanlı kızılötesi ısıtıcılar, yüksek ısı transfer yetenekleri, sadece doğrudan görülen en yakın noktayı ısıtmaları ve diğer üretim ekipmanlarına zarar vermemeleri gibi teknolojik avantajları nedeniyle seçilmiştir.

Kontrol ünitesi

Bu sistem, ısıtıcıları kontrol etmek için kullanılan bir kontrolörden oluşur.

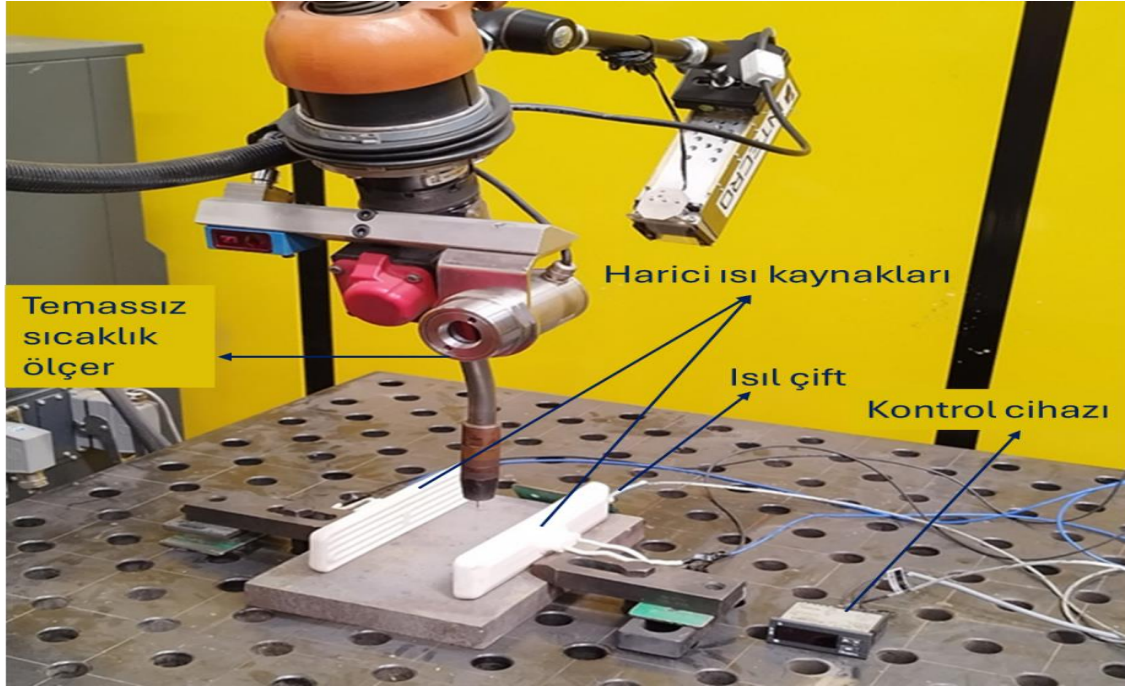
İzleme sistemi

Sistem, sıcaklığı izlemek için kullanılan ısı çiftten oluşmaktadır.

4.2.2. Harici ısı kaynaklı WAAM ile duvar üretimi

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere iki farklı harici ısı kaynaklı sistem altyapısı kurulmuştur. İlk sistem harici ısı kaynaklarının davranışını görmek için yapılan az sayıda ısıtıcının kullanıldığı ve ısı çevrim kayıtlarının sadece katmanlar arası bekleme süresi boyunca temassız sıcaklık ölçer ile kayıt altına alındığı sistemdir. Bu

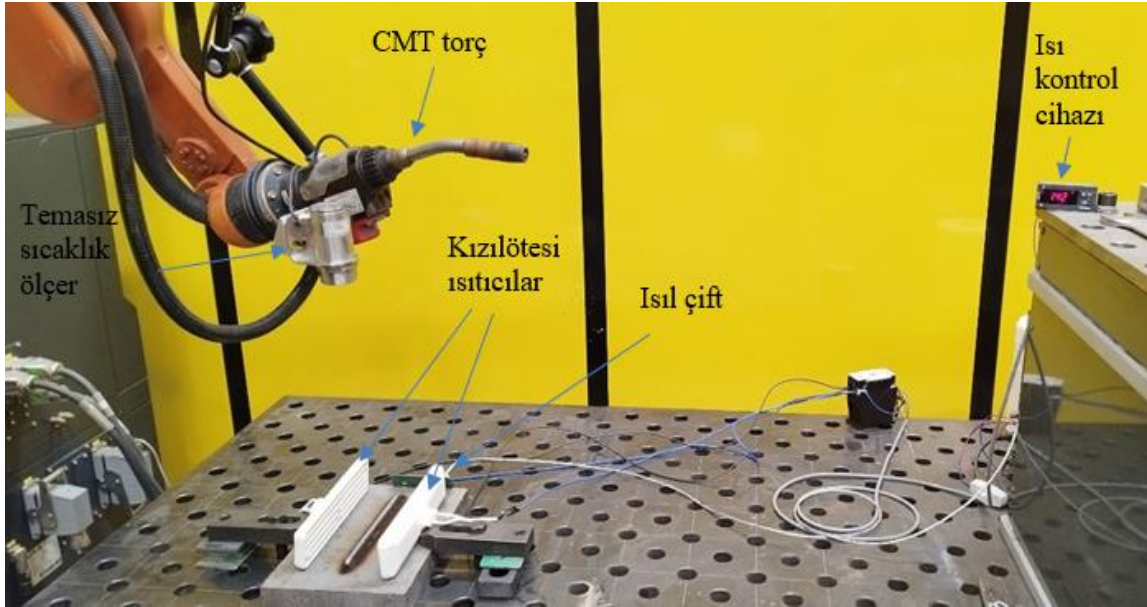
sistemin kuruluş aşaması Şekil 4.8’de verilmiştir. Temassız sıcaklık ölçer robot kol üzerine monte edilmiştir ve katmanlar arası bekleme süresi boyunca üretilen son katmanın geometrik orta noktasındaki sıcaklığı kayıt altına almıştır. Ölçülen sıcaklık verileri, WAAM sistemin yönetim bilgisayarında depolanmış ve sonraki analizlerde kullanılmak üzere organize edilmiştir.



Şekil 4.8. Harici ısı kaynakları ve otomatik WAAM tezgahına yerleşimi

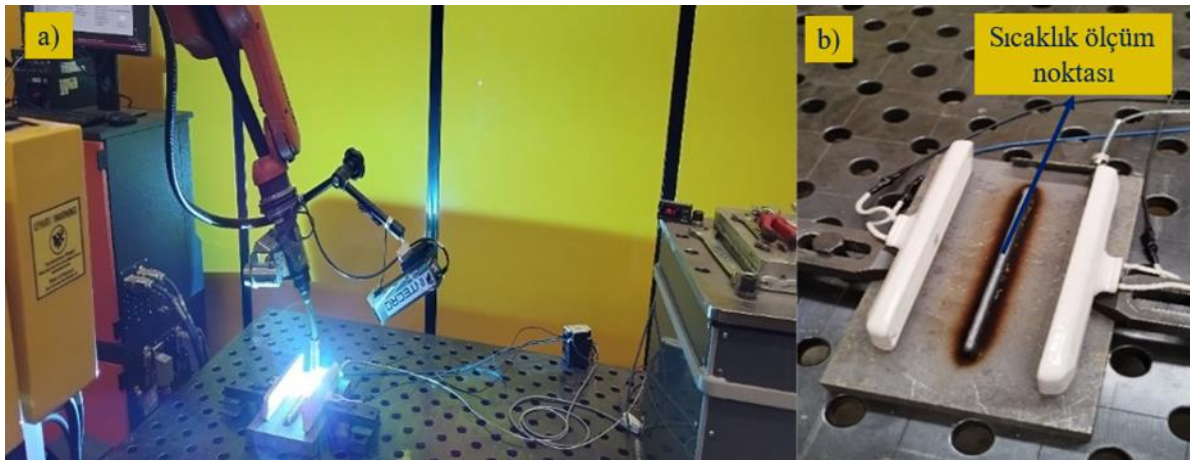
Bu sisteme ait deneysel altyapının görseli, Şekil 4.9’da detaylı olarak sunulmuştur. Bu aşamada, çalışmanın temel hedefi, standart WAAM üretimiyle elde edilen sonuçları doğrulamak ve karşılaştırmak olmuştur. Bu amaçla, Çizelge 3.1’de belirtilen duvar geometrisi, aynı üretim parametreleri, aynı malzeme ve aynı geometri kullanılarak yeniden üretilmiştir.

Üretim sürecinde, daha önce belirlenmiş olan parametreler titizlikle uygulanmış, malzeme seçimi ve süreç kontrolü standartlara uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, üretilen parçaların, orijinal WAAM üretimi ile tutarlı bir şekilde aynı kalite ve özelliklere sahip olması sağlanmıştır. Deneysel altyapının görseli, bu süreçte kullanılan ekipmanların ve üretim ortamının nasıl düzenlendiğini göstererek, çalışma koşullarının tam olarak anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.



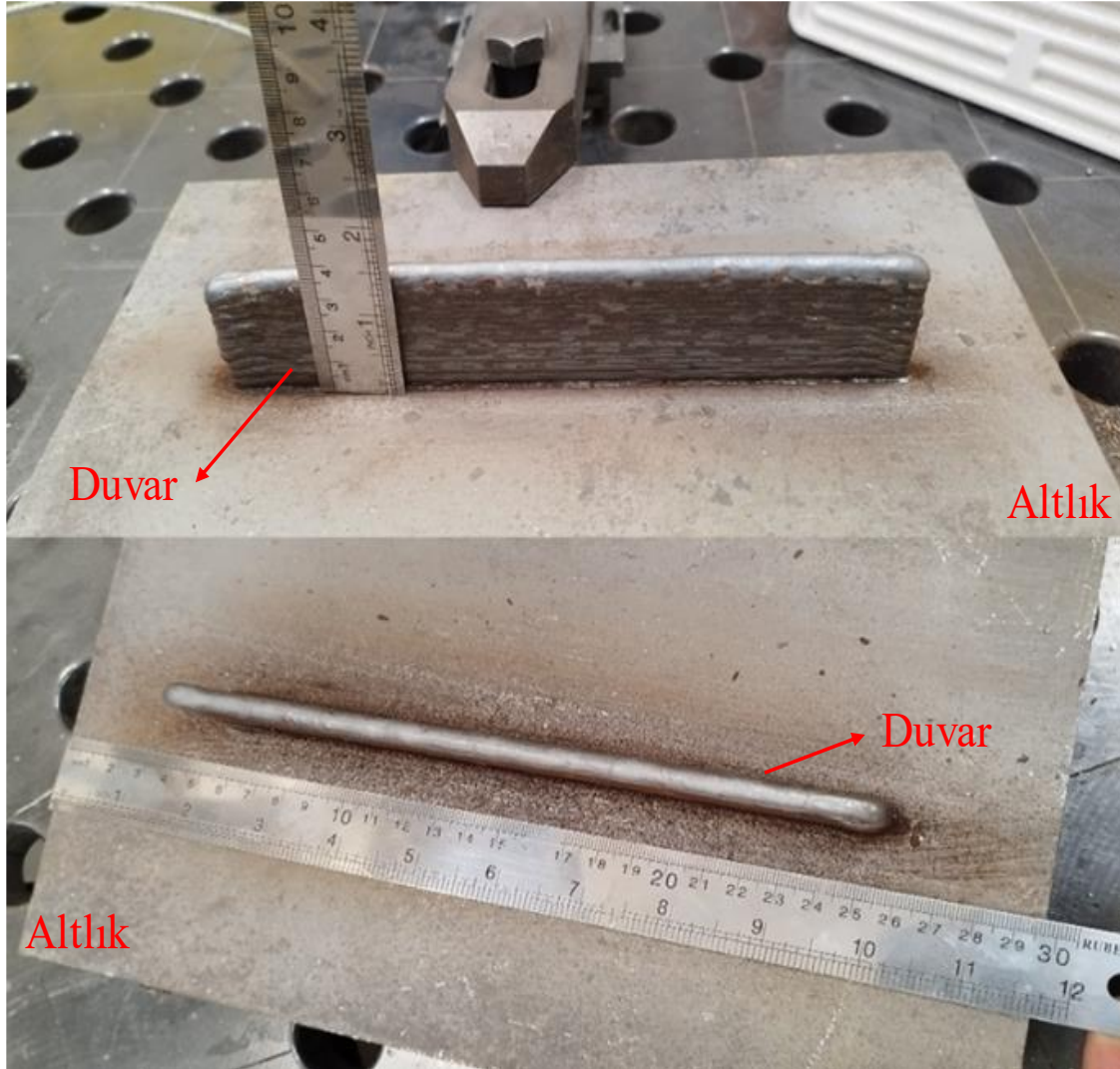
Şekil 4.9. Harici ısı kaynağı modeli için deneysel altyapı kurulumu; seramik ısıtıcılar, ısı çift ve kontrol cihazı

Üretimin bu aşamasında harici ısı kaynakları üretim öncesinde devreye alındı ve üretim sürecince devrede kalmıştır. Harici ısı kaynakları kontrol ünitesi ile 150 °C' ye ayarlandı. Üretim öncesinde çalışmaya başlayan ısıtıcılar sonucunda altlık sıcaklığı 110 °C olarak ölçüldü ve bu sıcaklık ile üretime başlanmıştır. Üretime ait görsel Şekil 4.10'da verilmiştir. Üretim boyunca açık olan ısı kaynakları üretim bitiminde 100 °C ayarlandı ve bu şekilde 10 dakika daha devrede kaldıktan sonra kapatıldı. Daha sonra ısı kaynakları ve duvar soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 4.10. Harici ısı kaynağı ile yapılan üretime ait görseller a) üretim bölgesi ve üretim b) bekleme süresi boyunca son katman sıcaklığı ölçüm noktası

Üretim sonrasında elde edilen parçaya ait görseller Şekil 4.11'de sunulmaktadır. Üretim sürecinde harici ısı kaynaklarının kullanımına rağmen, parçada herhangi bir akma, çarpılma veya yüzeysel kusur gözlenmemiştir. Bu durum, uygulanan üretim parametrelerinin parça üzerinde olumsuz etkiler yaratmadığını ve stabil bir üretim sürecinin elde edildiğini göstermektedir. Üretilen parçanın boyutsal doğruluğu da korunmuş olup, beklenen ölçü ve toleranslar içerisinde kalmıştır. Parçanın genel geometrik bütünlüğü incelendiğinde, herhangi bir deformasyon veya istenmeyen sapma oluşmadığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, kullanılan üretim yöntemi ve malzeme kombinasyonunun başarılı bir şekilde uygulanabileceğini ve hedeflenen kalite seviyesinin sağlandığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.11. Harici ısı kaynağı ile üretilen duvara ait görseller

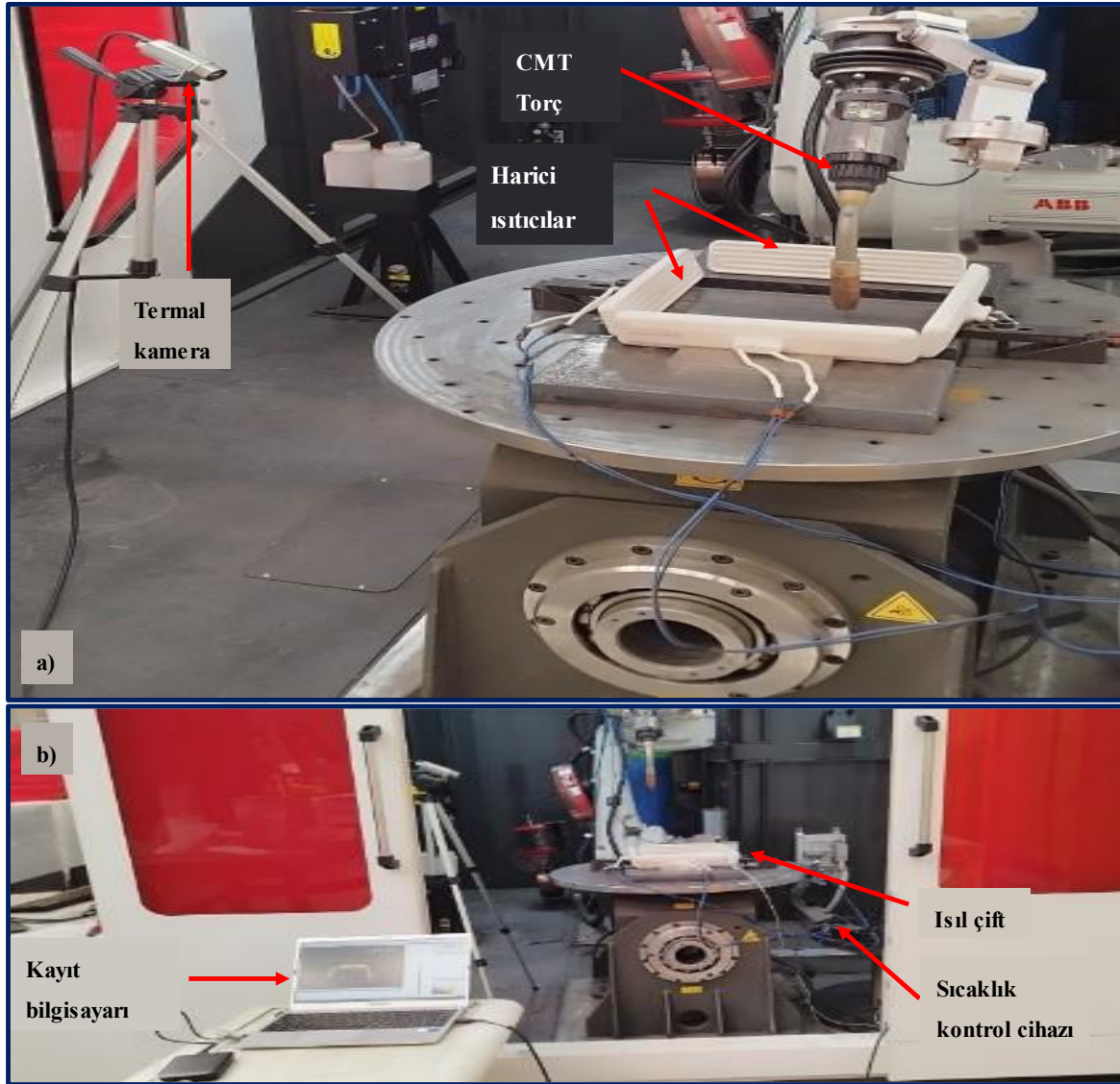
4.2.3. Harici ısı kaynaklı WAAM ile farklı geometrilerin üretimi

Deneysel çalışmanın bu aşamasında, üretim sürecine daha fazla sayıda harici ısıtıcı entegre edilmiştir. Ayrıca, bu aşamada üretim sürecinin termal davranışını daha ayrıntılı bir şekilde izlemek amacıyla, Bölüm 4.2.1’de belirtilen 3 alt birime ek olarak sisteme termal kamera, bilgisayar ve veri kayıt cihazı dahil edilmiştir. İkinci sistemin deneysel altyapısı Şekil 4.12’de detaylı bir şekilde gösterilmektedir.

Kullanılan termal kamera, 200 – 1500 °C sıcaklık aralığında ölçüm yapabilen, motorlu odaklama sistemine sahip, hızlı termal süreçlerin izlenmesine olanak tanıyan 80 Hz kare hızı ve 382 x 288 piksel optik çözünürlüğe sahip Optris Xi 400 modelidir. Bu termal kamera, üretim sürecinin hassas termal takibini sağlamak amacıyla sistemde yer almış ve veri kayıt cihazı ile bütünleşmiş çalışarak anlık verilerin izlenmesini mümkün kılmıştır. Sisteme yapılan bu eklemelerle, süreç boyunca elde edilen verilerin daha yüksek doğruluk ve çözünürlükte kaydedilmesi sağlanmıştır.

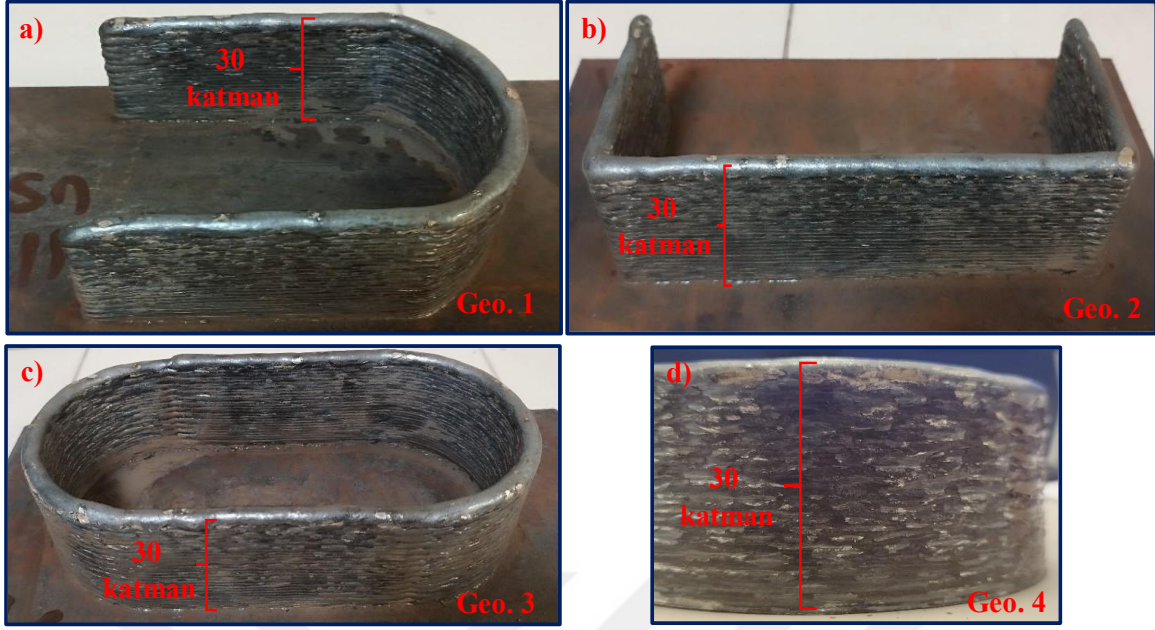
Üretimler, METALWORM firmasının WAAM sistemi için geliştirdiği en üst modeli olan MHTTN1000’de harici ısıtıcılar ile güncellenen tam otomatik tezgâhta yapılmıştır. Termal kameranın kalibrasyonu ve doğruluk kontrolü için üretim tablası üzerine bir adet ısı çift (termokupl) yerleştirilmiş ve sıcaklık kontrolü veri kaydedici ile kayıt altına alınmış, sıcaklık verileri daha sonra karşılaştırılmıştır. Termal kamera sonuçlarının güvenilirliği temin edilmiştir. Üretim sırasında harici ısı kaynakları aktif olarak kullanılmıştır. Üretim başlamadan ısıtıcılar açılmış ve üretim süresinde parçaya ısı verilmiştir. Isıtıcılar 600 °C sıcaklığa ayarlanmış ve bu şekilde üretimler yapılmıştır.

Üretimler de aynı geometriler için verilen standart WAAM üretimindeki aynı altlık ve geometri ölçüleri kullanılmıştır. Yine aynı akım, voltaj ve tel besleme hızlarında yapılmıştır. 4 adet harici ısıtıcı üretim parçasını merkez alacak şekilde, üretim parçasının 4 tarafına yerleştirilmiştir. Bu şekilde iş parçasının koruyucu ısı ile daha efektif korunması hedeflenmiştir.



Şekil 4.12. Harici ısı kaynaklı WAAM üretimi için altyapı kurulumu a) harici ısıtıcılar, termal kamera ve torç konumu gösterimi b) kayıt bilgisayarı, kontrol cihazı ve ısı çift yerleşimi

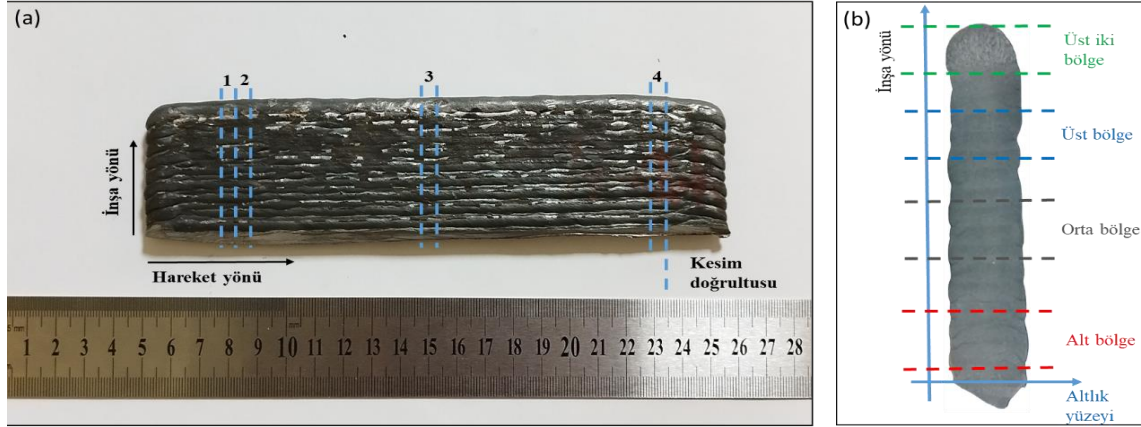
Deneysel verilerin kayıt altına alınması için termal kamera ile bilgisayar bağlantısı sağlanmıştır. Termal kameradan alınan veriler harici bir bilgisayar sisteminde depo edilmiştir. Yine sisteme verilen ısıнын kontrolü, fazla ısı verilmemesi ve sıcaklık kontrolü için ısı çift, kontrol cihazına montajı yapılarak sistem güvenliği sağlanmıştır. Çalışmanın bu aşamasında ise Çizelge 4.5'te verilen geometriler üretilmiştir. Üretilen geometrilere ait görseller Şekil 4.13'te verilmiştir. Üretilen parçaların gözle muayenesinde herhangi bir akma, çarpılma ve bozulma görülmemiştir.



Şekil 4.13. Harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen farklı geometrilere ait görseller a) Geometri 1 b) Geometri 2 c) Geometri 3 d) Geometri 4

4.3. Duvar Geometrilerine Yapılan Testler

WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM süreçleriyle üretilen duvar geometrileri, mekanik ve metalürjik testler için hazırlanmıştır. Test numuneleri, Şekil 4.14'te gösterilen belirli bölgelerden kesilerek, makro-mikro yapı ve mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her numunenin orta eksenine simetrik olarak sağ ve sol bölgelerinden yaklaşık 10 mm kalınlığında parçalar kesilmiştir. Bu numuneler, zımparalama, parlatma ve bakalite alma gibi hazırlık işlemlerine tabi tutulmuştur. Hazırlık aşamasının ardından, parçalar dağlama işlemine tabi tutulmuş ve mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, numunelerin her birinin 3 farklı bölgesinden mikro sertlik değerleri ölçülerek, malzemenin mekanik özellikleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.



Şekil 4.14. (a) Mekanik ve metalurjik testlerde kullanılacak numunelerin duvarlarından kesim yerleri. (b) Mikrosertlik ölçüm bölgeleri.

Elde edilen numunelere aşağıdaki deneyler yapılmıştır.

Makro yapı ve mikroyapı analizi

Test numuneleri öncelikle sıcak kalıplama cihazı kullanılarak bakalite alınmıştır. Daha sonra taşlama ve parlatma cihazında kaba, orta ve ince zımparalama yapılmıştır. Silisyum karbür (SiC) zımpara kağıtları, kaba zımparalama için 200-600 mesh, orta zımparalama için 1200 mesh ve ince zımparalama için 2000 mesh kullanıldı. Zımparalama sonrası parlatma için sırasıyla 6, 3 ve 1 μ parlatma çuhaları yüzey parlatma işlemi yapılmıştır. Dağlama işlemi, %4'lük nital reaktifi [66] örnekler için makro aşındırma için 25-30 sn, mikro aşındırma için 55-60 sn olarak sürtünme işlemi ile uygulandı. WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM duvarlarının üst ve alt bölgelerinin makro yapıları stereo-zoom mikroskop ile incelendi. Duvarların üst ve alt bölgelerinin mikroyapısı ışık optik mikroskobu (OM) (marka ve model: Leica & CTR6000) ve taramalı elektron mikroskobu (marka ve model: FEI & Quanta FEG 450) ile incelendi. Görüntüleri analiz etmek için ImageJ yazılımı kullanıldı. Numunelerin kimyasal elementler içeriği Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) ile doğrulandı. Elde edilen mikroyapı özellikleri ve tane boyutu, WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM duvarlarının termal davranışı ve mekanik özellikleri ile ilişkilendirilmiştir.

EBSD analizi

WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM duvarlarının mikroyapısı ve kristalografik dokusu, Elektron Geri Saçılım Kırınımı (EBSD) karakterizasyonu kullanılarak ayrıca incelendi. EBSD desenlerinin yüzey kusurlarına karşı yüksek hassasiyeti [67] göz önüne alındığında,

incelenen yüzeylerin optik mikroskop altında doğrulandığı gibi görünür çizik veya kontaminasyondan tamamen yoksun olmasını sağlamak için titiz bir numune hazırlığı yapılmıştır [68]. EBSD analizleri, Hikari EBSD kamera ve EDAX/TSL EBSD sistemi ile entegre bir Zeiss Gemin 2 taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir, yeterli sayıda taneyi yakalamak üzere $320\ \mu\text{m} \times 240\ \mu\text{m}$ 'lik alanların örneklenmesini alınmıştır. Elde edilen EBSD verileri daha sonra TSM OIM Analysis v7.2 kullanılarak analiz edilmiştir.

XRD analiz

X-ışını kırınımı (XRD) ölçümleri PANalytical marka ve EMPYREAN model cihaz, Cu kaynağı ile 45 kV ve 40 mA'da, 10° ile 90° kırınım açısı aralığında ve $0,02^\circ$ adım boyutunda kullanılmıştır. Faz karakterizasyonu WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM duvarlarının orta bölgelerinden gerçekleştirilmiştir.

Mikrosertlik

Mikrosertlik ölçümleri HWMMT-X3B HIGHWOOD mikrosertlik cihazı ile yapıldı. Ölçümler 500 gf, 15 s bekleme süresi ve $100\ \mu\text{m}$ [65] aralıklarla numunelerin alt, orta, üst ve üst iki katman bölgelerinde yapıldı.

4.4. Farklı Geometrilere Yapılan Testler

WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen 4 farklı geometriye mekanik ve metalurjik testler yapıldı. Üretilen geometriler öncelikle tahribatsız testler yapıldı daha sonra gerekli hazırlıklar yapılarak çekme testi ve mikrosertlik ölçümleri ile tahribatlı testler uygulandı.

Üretilen geometrilere aşağıda verilen tahribatsız testler yapılmıştır.

3B tarama işlemi

Üretimi tamamlanan 8 adet geometri (4 adet kontrol numunesi ve 4 adet deney numunesi), bilgisayar destekli tasarım verileri ile karşılaştırılmak üzere, temassız ölçüm yöntemi olarak lazer tarama yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu karşılaştırma, üretilen parçaların CAD

modeline ne derece uygun olduğunu ve üretim sürecinde olası sapmaların olup olmadığını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

3B tarama işlemleri, yüksek hassasiyetli KSCAN20 3B lazer tarayıcı cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, çift lazer ışığı kullanarak 10µm çözünürlük sunmakta olup, üretilen geometrilerin ince detaylarını bile algılayacak bir doğruluğa sahiptir. Lazer tarama, CAD modeli ile üretilen parçalar arasında herhangi bir çarpılma, deformasyon veya sapma olup olmadığını tespit etmek için kritik bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin tercih edilmesinin nedeni, temas gerektirmeyen ve son derece hassas ölçümler sunabilen bir teknoloji olmasıdır. Böylece, üretilen parçaların geometrik doğruluğu, imalat sürecinin kalitesi ve üretim verileri ile uyumu güvenilir bir şekilde değerlendirilebilmiştir.

Kalıntı gerilme ölçümü

Üretilen 6 adet geometri (3 adet kontrol numunesi ve 3 adet deney numunesi) üzerinde tahribatsız kalıntı gerilme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, düz yüzeye sahip geometriler olan ve Çizelge 4.5'te belirtilen Geometri 1, 2 ve 3 üzerinde yapılmıştır. Kalıntı gerilmeler, malzeme içinde üretim sırasında oluşan ve genellikle parça performansını ve uzun ömürlülüğünü etkileyebilecek önemli faktörlerdir. Bu nedenle, doğru bir şekilde ölçümleri, parçaların güvenilirliğini ve performansını değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir.

Kalıntı gerilme ölçümleri, Stresstech firmasının XStress G2R model cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, yüksek hassasiyetli X-ışını kırınım teknolojisiyle donatılmış olup, malzemenin iç yapısındaki gerilmeleri yüzey tahribatı olmadan ölçme yeteneğine sahiptir. Ölçümlerde Cr-K α ($\lambda = 0,22106867$ nm) radyasyon kaynağı ve 2 mm kolimatör kullanılmıştır. Bu kaynak, yüksek çözünürlükte ve doğrulukta gerilme verileri elde etmek için idealdir.

Kalibrasyon için demir ferrit tozu kullanılmış ve yüzeyde bulunan kireç/oksidasyon tabakası ile karakterize edilen bir örnek seçilmiştir. Bu kalibrasyon, cihazın hassasiyetini ve doğruluğunu artırmak için yapılmıştır. Ölçüm yönleri, malzemedeki kalıntı gerilmelerin farklı yönlerde nasıl dağıldığını anlamak amacıyla üç eksenli olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, $\phi = 0^\circ, 45^\circ$ ve 90° açılarında ölçümler yapılmıştır. Bu çok yönlü ölçüm yaklaşımı,

kalıntı gerilmelerin malzeme üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etme olanağı sağlamaktadır. Böylece, farklı yönlerde oluşabilecek potansiyel zayıflıklar veya stres yoğunlaşma bölgeleri tespit edilebilmiş ve bu veriler, numunelerin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamıştır.

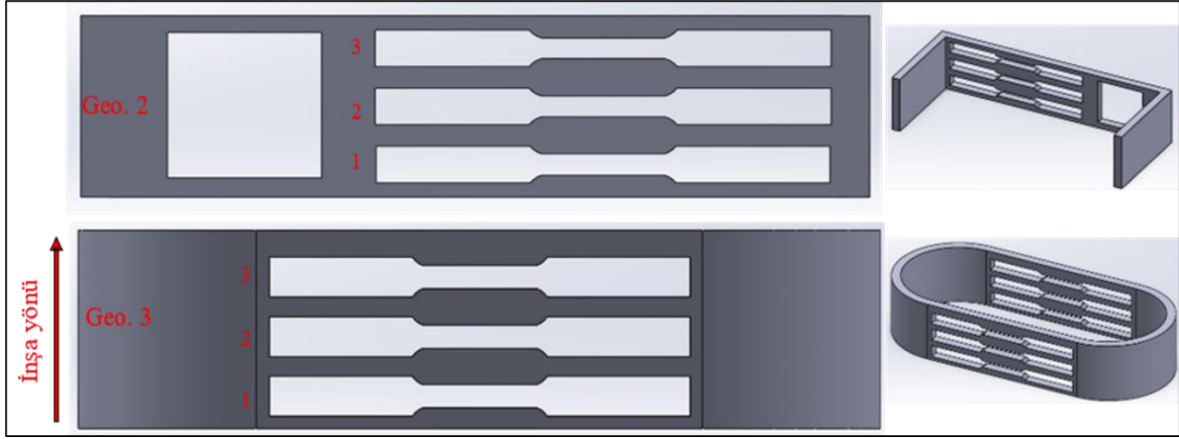
Manyetik Barkhausen Gürültüsü

Bu yöntem, ferromanyetik malzemelerdeki tane sınırları, dislokasyonlar ve kalıntılar gibi mikro yapı unsurlarının tespit edilmesinde etkili bir araç olarak kullanılmaktadır. Özellikle bu içyapı unsurlarının varlığı, malzemenin manyetik özelliklerini etkileyebilir ve bu yöntem, malzemenin genel performansını anlamak için kritik öneme sahiptir. Bu çalışma kapsamında, Stresstech firmasının MicroScan 500-2 model cihazı tercih edilmiştir. Bu cihazın tercih edilme nedeni, yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sağlayan gelişmiş manyetik tarama kabiliyetlerine sahip olmasıdır.

Ölçüm sırasında manyetikleşme frekansı olarak 125 Hz ve manyetikleşme voltajı olarak 10 Vpp (Volt peak-to-peak) kullanılmıştır. Bu parametreler, malzemenin manyetik özelliklerini doğru bir şekilde ölçmek için optimize edilmiştir. 125 Hz'lik frekans, malzemenin iç yapısının ayrıntılı bir analizini sağlayacak bir derinliğe nüfuz etme kapasitesine sahiptir. 10 Vpp'lik voltaj seviyesi ise, malzemenin manyetik tepkisini ideal bir şekilde ölçerek, yanlış pozitiflerden kaçınılmasını sağlar.

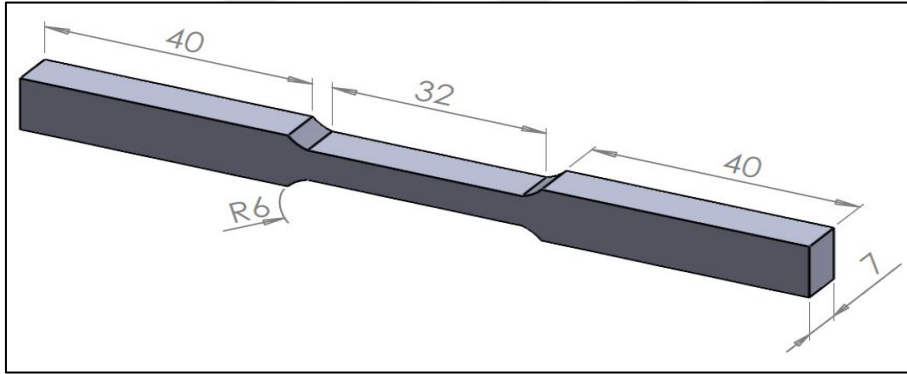
Çekme Testi

Üretilen parçalardan 9 adet deney çekme numunesi, 9 adet kontrol çekme numunesi çıkarılmıştır. Çekme testi numuneleri üretilen parçaların (Geometri 2 ve 3) uzun kenarlarından Şekil 4.18'de gösterildiği gibi su jeti tekniği kullanılarak çıkarılmıştır. Su jeti ile termal kalıntı oluşturulması önlenmiştir.



Şekil 4.15. Çekme testi numuneleri için kesilen geometriler

Çekme numunesine ait ölçüler Şekil 4.15'te verilmiştir. Çekme testleri Shimadzu markasının AGS-X modelinde yapılmıştır.



Şekil 4.16. Çekme testi numunesi ölçüleri (mm)

Sertlik Testleri

Numunelerin sertlik değerlerini belirlemek amacıyla Mikrosertlik (HV) testleri yapılmıştır. Mikrosertlik testleri Metkon markasının DUROLINE M Micro-Vickers cihazında otomatik olarak yapılmıştır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu aşamasında yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar literatür ışığında tartışılmıştır. Sonuçlar düz bir duvar geometrisi ve daha sonra ise 4 farklı geometri için verilmiştir.

5.1. Duvar Numuneleri için Deneysel Çalışma Sonuçları

WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM duvarlarının üretiminde ve duvarlardan elde edilen numunelere yapılan testlerden elde edilen sonuçlar bu bölümde tartışılmıştır. Öncelikle üretimde bekleme süresi boyunca elde edilen termal veriler verilmiştir. Daha sonra ise üretilen duvarlara ve numunelere yapılan testlerin sonuçları tartışılmıştır.

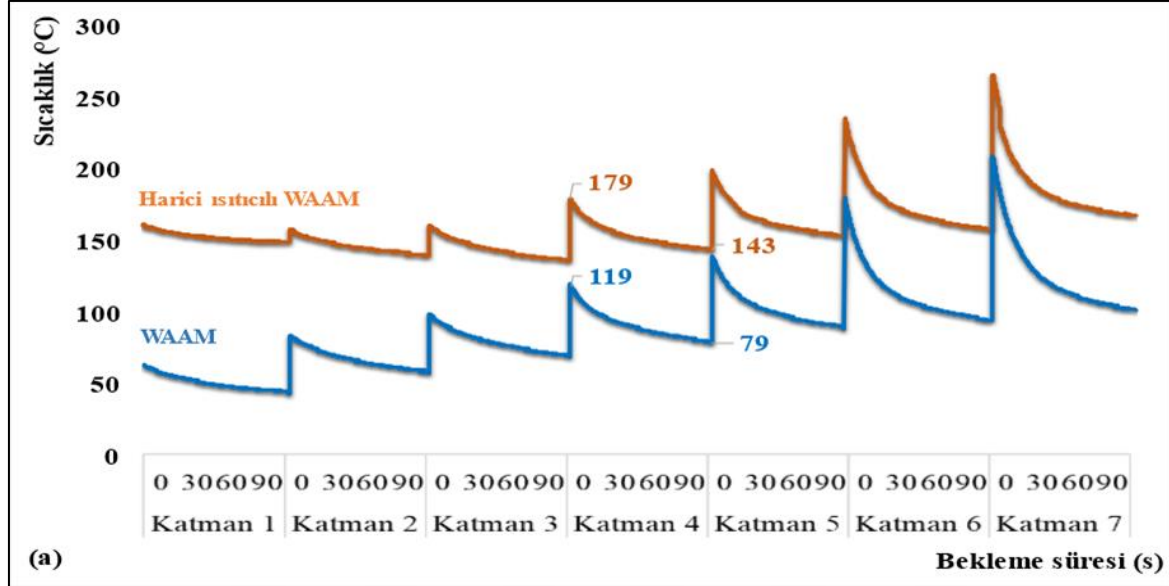
5.1.1. Üretim döngüsü için termal davranış

WAAM işleminde üretilen her yeni katmanda önceki katmanların termal davranışına müdahale edilmektedir. Bu müdahale parçada istenmeyen termal gerilimlerin oluşmasına neden olmaktadır. Termal gerilimler parçada kalıntı gerilme, çarpılma gibi mekanik kusurların oluşmasına öncülük etmekte ve parçanın mekanik dayanımını olumsuz etkilemektedir. Termal kaynaklı kalıntı gerilme parçaların farklı bölgelerinin farklı soğuma ve ısınma davranışı göstermesi, farklı soğuma hızları ve tekrarlanan ısınma sebebiyle oluşan faz değişimlerinden kaynaklanmaktadır [69]. WAAM işlemi ısı kaynağı olarak kaynak arkını kullanmakta ve kaynak işlemleri, lokalize hızlı ısıtma ve soğutma döngüleri oluşturarak kaynak çevresindeki bölgelerde şiddetli termal döngüler ve yerel füzyon meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu şiddetli termal döngüler, malzemede düzgün olmayan ısıtma ve soğutma ile sonuçlanarak, kaynak bölgesinde heterojen genleşme ve büzülme oluşturur. Erimiş bölge katılaştığında, bu bölgenin büzülmesi çevresindeki malzemeye bir çekme kuvveti uygular. Bu çekme kuvveti, çevresindeki malzemenin hareket etmesini engelleyebilecek kısıtlamalar nedeniyle oluşur ve kaynak yapılan parçalarda uyumsuzluk gerilmeleri meydana gelir. Bu uyumsuzluk gerilmeleri makul seviyelerde ise elastik gerilmelerle karşılanabilir. Ancak, bu uyumsuzluk gerilmeleri elastik olarak karşılanamayacak bir seviyeye ulaştığında, lokalize plastik deformasyon oluşur ve bu durum kalıntı gerilmelerin ve parça deformasyonlarının gelişmesine yol açar [70-72]. Bağlantılı uyumsuz gerilmeler genellikle oda sıcaklığında özellikle kaynak yönünde çekme

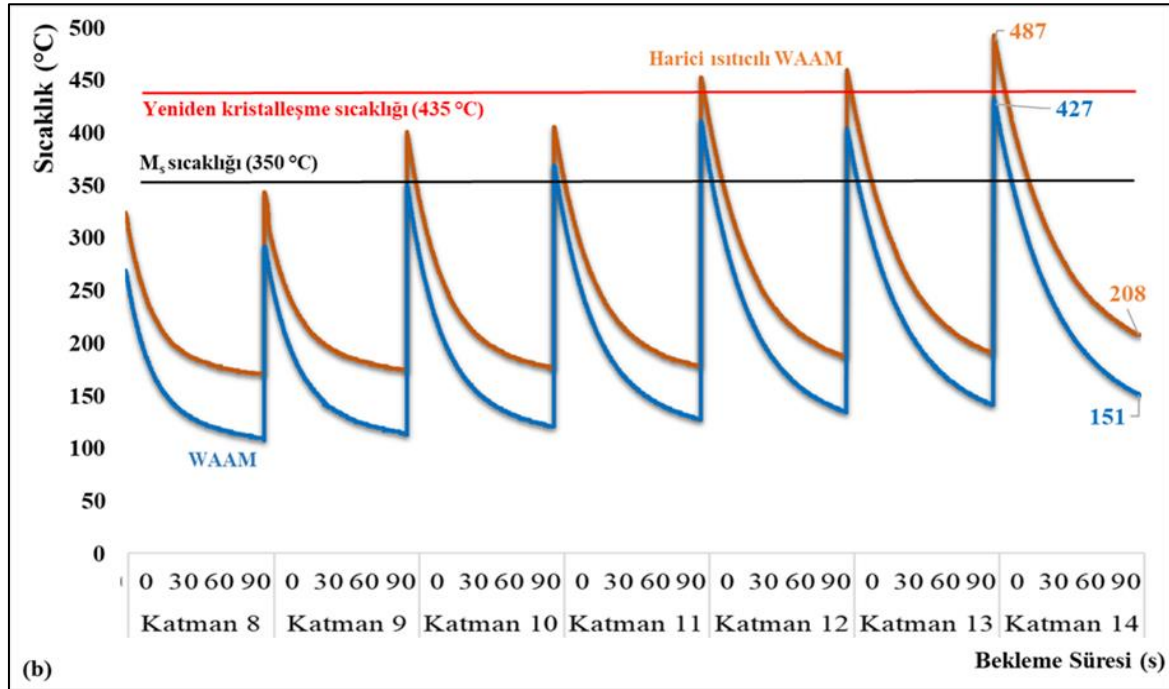
gerilmelerine yol açar. Dönüşüm etkilerinin olmadığı durumlarda, bileşen termal dengeye ulaştıktan sonra kaynak bölgesinin yakınında önemli miktarda çekme gerilmeleri bulunur. Ferritik çelikler gibi faz dönüşümlü çeliklerin durumunda ise, katı haldeki faz dönüşümlerinin kalıntı gerilme dağılımları üzerinde önemli bir etkisi olabileceği bilinmektedir. Kaynaklı birleşimlerde çekme kalıntı gerilmeleri kaynak bölgesi ve ısıdan etkilenen bölgelerinde normdur, ancak kaynak işlemi sırasında katı halde faz dönüşümleri gerçekleştiğinde bazı durumlarda basma gerilmeleri oluşturulabilir. Katı haldeki faz dönüşümlerinden kaynaklanan deformasyonlar basma gerilmelerine dönüşür. Kaynak birleşimindeki kalıntı gerilmelerin varlığı, kaynaklı ürünün performansı için zararlı olabilir. Bu tür gerilmeler, malzemenin dışarıdan uygulanan bir kuvvete toleransını azalttığından zararlı olabilir ki bu kaynak birleşimleri için geçerlidir. Ayrıca, malzemenin performansını veya bir bileşenin ömrünü olumsuz etkileyebilirler. Çekme kalıntı gerilmeleri genellikle zararlıdır, çünkü bir kaynağı yorulma hasarına (basma yüklemesi altında bile) ve gerilim korozyon çatlamasına karşı daha hassas hale getirirler [69]. Kaynak işleminde kalıntı gerilme gelişimi WAAM ile benzerdir. WAAM, her bir katmanın sınırlı soğumasına ve bunun sonucunda termal büzülme engellemesine bağlı olarak oldukça büyük gerilmeler geliştirmeye eğilimlidir. Malzemeye bağlı olarak kalıntı gerilme malzemenin akma değerinin %60'ından neredeyse %100'üne kadar değişebilir. Kalıntı gerilmeler duvar yüksekliği boyunca sabit ve tipik olarak uzunlamasına yönde en büyük olanlardır. Her katman, sınırlı termal büzülme sırasında aynı gerilimi geliştiren ek malzeme ekler [59]. Metalin geometrisi, termal geçmişi, sıcaklığa bağlı akış mukavemeti ve termal özellikleri WAAM'daki kalıntı gerilimlerin ve çarpılmanın büyüklüğünü ve profilini belirler. Termal dengenin önemli bir etken olduğu kalıntı gerilme ve çarpılma kontrolünde harici ısı kaynakları termal dengeyi sağlamada önemli bir etkiye sahiptir. Duvar üretimi sırasında parçanın uzun kenarlarına yerleştirilen ısı kaynakları termal dengeyi ve iş parçasının daha kontrollü ısınma-soğuma çevriminde kalmasını sağlamıştır.

Duvar üretiminde bekleme süresinde ölçülen katman sıcaklıkları WAAM ve harici ısıtıcı WAAM için Şekil 5.1 (a-c)'de verilmiştir. Buradaki sıcaklık değerleri, bekleme süresi (boyunca biriktirilen her katmanın orta noktasından (bakınız; Şekil 4.10) robot kol üzerine monte edilmiş temassız sıcaklık ölçer ile kaydedilmiştir. Üretimde kızılötesi özellikli seramik harici ısıtıcılar minimum seviyede çalıştırılmıştır. Yine de sıcaklık geçmişinde önemli bir fark olduğu görülmüştür. Şekil 5.1'de görüleceği gibi, harici ısı kaynaklarının verdiği ısıdan dolayı parça bekleme süresine daha yüksek sıcaklıklarda girmektedir. Bu fark

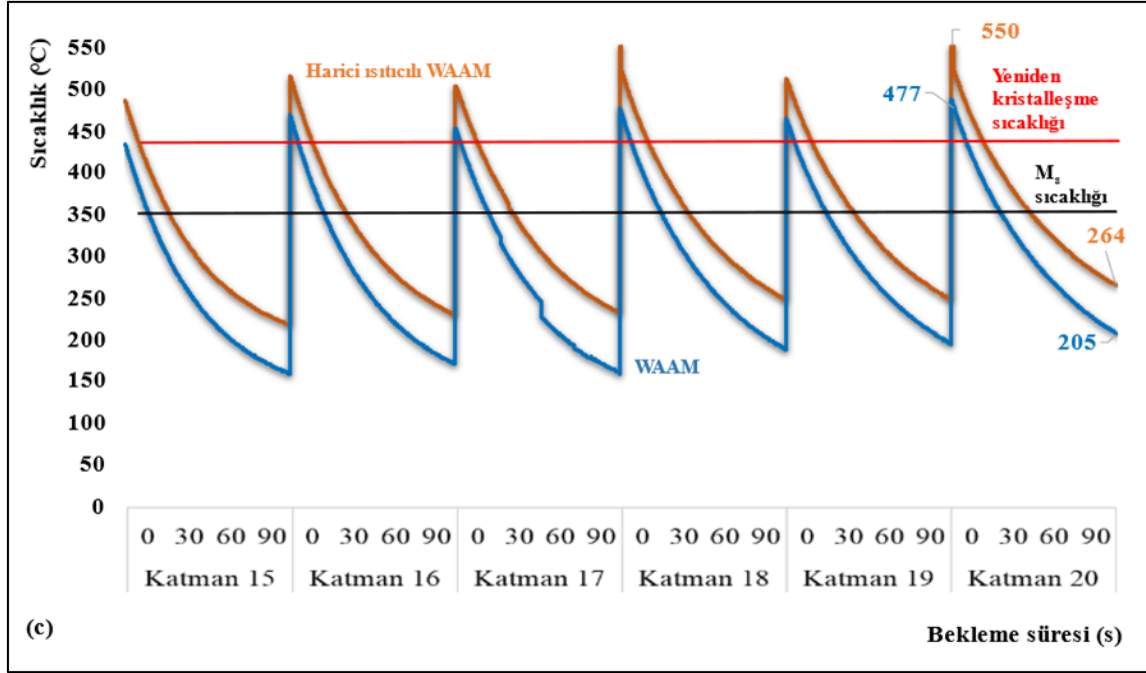
her yeni katman üretiminde istikrarlı bir şekilde devam etmektedir. Burada malzeme özellikleri açısından üst katmanlardaki etkilerin daha belirgin olacağı değerlendirilebilir. Çünkü sıcaklık değerleri martenzit başlangıç ve yeniden kristalleşme sıcaklıklarının üzerinde kalacak şekilde gelişmektedir.



Şekil 5.1. Harici ısıtıcılı WAAM ve WAAM için katmanlar arası bekleme süresi boyunca gerçekleşen sıcaklık geçmişi, (a) 1-7 katman



Şekil 5.2. Harici ısıtıcılı WAAM ve WAAM için katmanlar arası bekleme süresi boyunca gerçekleşen sıcaklık geçmişi, (b) 8-14 katman



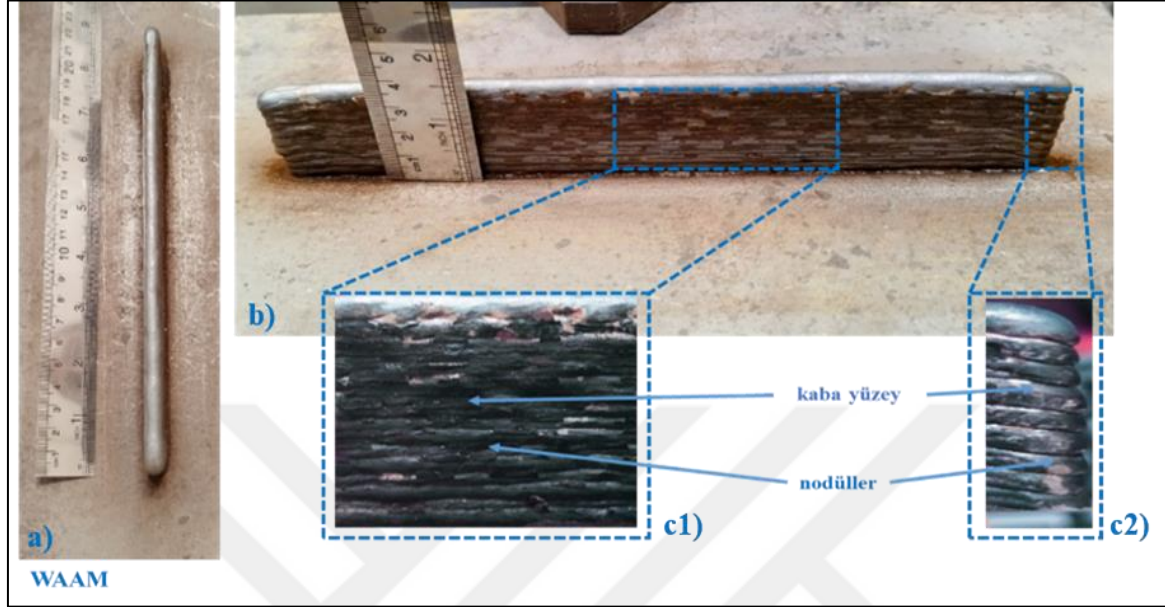
Şekil 5.3. Harici ısıtıcılı WAAM ve WAAM için katmanlar arası bekleme süresi boyunca gerçekleşen sıcaklık geçmişi, (c) 15-20 katman

Üretim sırasında soğuma hızları ve sıcaklık seviyeleri harici ısıtıcılar yardımıyla ayarlanabilir. Böylece deformasyon, çarpılma ve kalıntı gerilme azaltılabilir. Burada önemli olan nokta, ısıtıcıları kullanırken aşırı ısınmadan dolayı akma olmayacak şekilde proses parametrelerini ayarlamaktır.

5.1.2. Boyutsal doğruluk ve yüzey morfolojisi

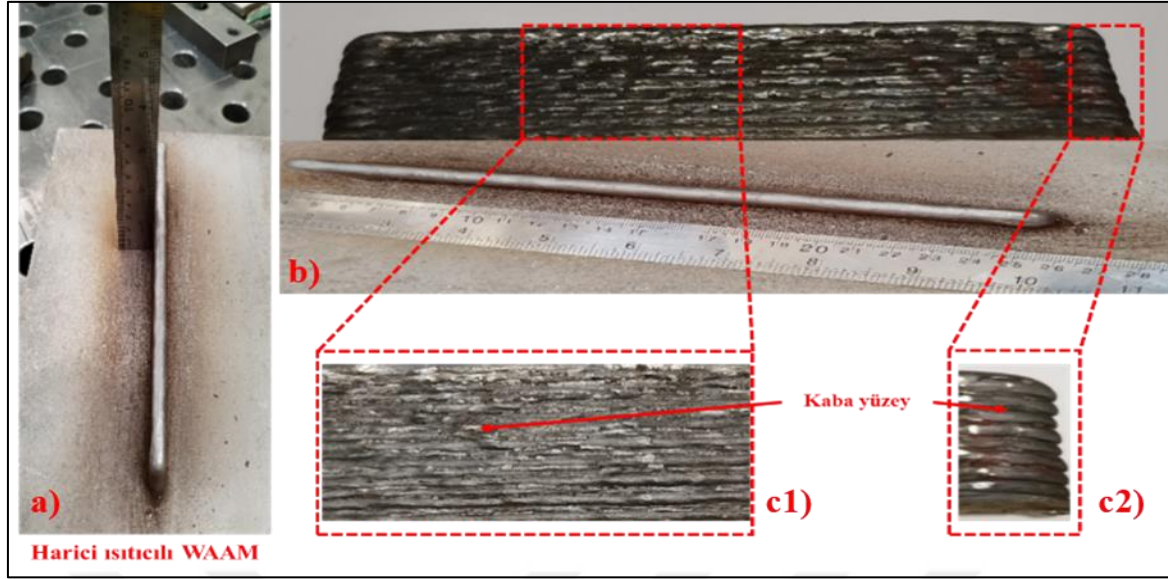
Duvarların yüzey topografisinin fotoğrafları Şekil 5.4 ve 5.5'te ayrıntılı olarak verilmektedir. WAAM duvarının yüzeyi pürüzlüdür ve "nodüller" belirgindir. Hızlı yüzey soğuması ve daha sıcak kalan çekirdek bölgesi bu pürüzlülüğü ortaya çıkarmıştır. WAAM işlemi, üretim sırasında parça yüzeyinin daha hızlı soğumasını sağlayan üç temel ısı transfer mekanizmasını kullanır. Bu mekanizmalar, parça yüzeyindeki erimiş metalin daha hızlı katılaşmasını sağlar, bu da işlemin verimliliğini artırır. Ancak, bu hızlı soğuma süreci parçanın iç bölgesindeki, genellikle çekirdek olarak adlandırılan, malzemenin daha yavaş soğumasına kıyasla oldukça farklıdır. Bu soğuma farkı, iç bölgede ve yüzeyde farklı termal gerilme düzeylerinin oluşmasına yol açar. Özellikle yüzeydeki hızlı soğuma, iç bölgedeki daha yavaş soğumaya kıyasla daha yüksek bir termal gerilim oluşumuna katkıda bulunur. Bu termal gerilimler, istenmeyen nodüllerin ve diğer yüzey kusurlarının oluşmasına neden

olabilir. Bu durum, parça kalitesini ve son ürünün mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir [73].



Şekil 5.4. WAAM işlemi ile üretilen duvara ait görseller a – b) üretilen duvarın genel görüntüleri c1- c2) duvarın detay görüntüleri, kaba yüzey ve nodüller

Termal dengeyi sağlamak ve ısıнын koruyucu etkisinden yararlanmak amacıyla harici ısıtıcı yöntemi kullanılarak inşa edilen duvarın yüzeyi, WAAM ile üretilen duvar yüzeyiyle karşılaştırıldığında, belirgin fark göstermektedir. WAAM ile üretilen duvar yüzeyinde görülen nodül gelişimi ve pürüzlülük, standart üretim sürecinin bir sonucudur ve genellikle hızlı yüzey soğuması ile ilişkilidir. Bununla birlikte, harici ısıtıcı yöntemi kullanılarak inşa edilen duvar yüzeyi, termal dengenin daha etkin bir şekilde sağlanması ve ısıнын homojen bir şekilde dağıtılması sonucunda daha temiz ve homojen bir yapıya sahiptir. Ayrıca, nodül gelişimi gözlenmemiştir, bu da duvar yüzeyinin daha düzgün olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.5. Harici ısıtıcılı WAAM işlemi ile üretilen duvara ait görseller a – b) üretilen duvarın genel görüntüleri c1- c2) duvarın detay görüntüleri, kaba yüzey

Üretilen geometrinin boyutsal özellikleri ile termal davranışı arasındaki yakın ilişki bulunmaktadır ve bu durum literatürde sıkça belirtilmiştir [62, 74-76]. Çizelge 5.1, duvarların ortalama genişliğini, tek kat yüksekliğini ve duvarların toplam yüksekliğini vermektedir.

Çizelge 5.1. Üretilen duvarların boyutları

Geometri	WAAM	Harici ısıtıcılı WAAM
Duvar kalınlığı (ortalama) (mm)	$6,68 \pm 0,5$	$7,00 \pm 0,25$
Tek katman yüksekliği (mm)	1,88	1,89
Duvar uzunluğu (mm)	205 ± 2	206 ± 2
Duvar yüksekliği (mm)	$37,7 \pm 0,8$	$37,8 \pm 0,8$

WAAM ve harici ısıtıcılarla üretilen duvarların boyutsal özellikleri karşılaştırıldığında, WAAM yöntemiyle üretilen duvarların ortalama kalınlığının $6,68 \pm 0,5$ mm olduğu, harici ısıtıcılarla desteklenen WAAM yönteminde ise bu değer $7,00 \pm 0,25$ mm olduğu tespit edilmiştir. Üretime ait CAD verileri ile karşılaştırıldığında harici ısıtıcı kullanımının termal büzülmeyi engellediği görülmektedir. Her iki yöntemle üretilen duvarların ortalama yükseklikleri arasında belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. Harici ısıtıcılar kullanılmasına

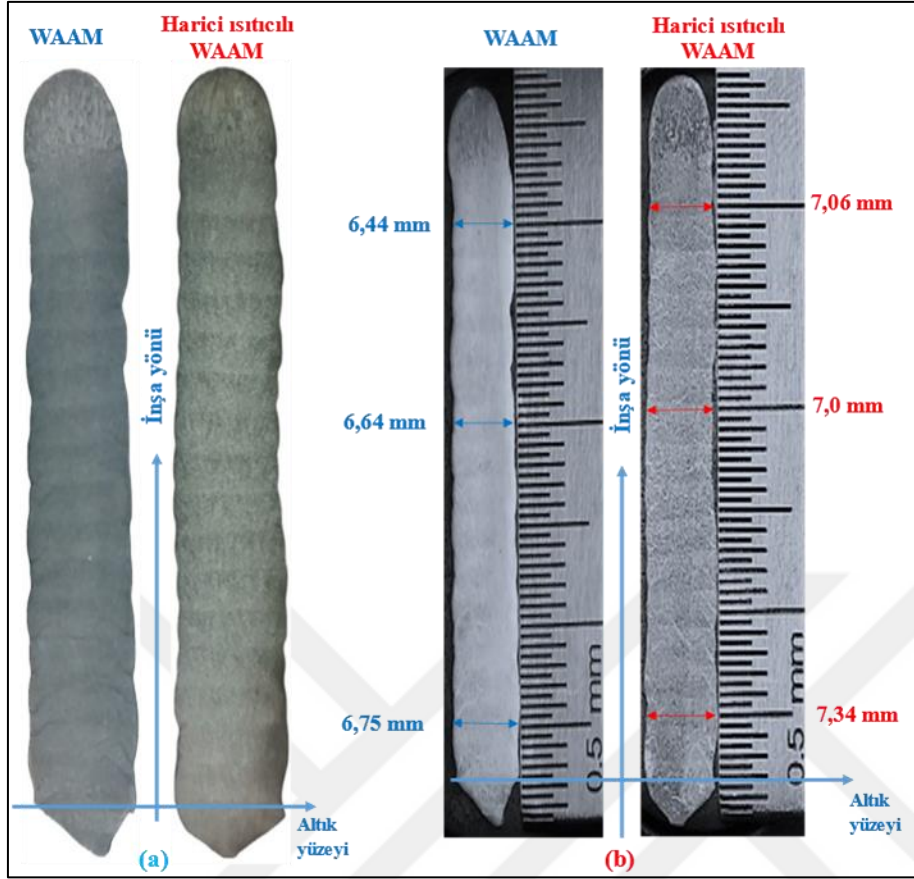
rağmen, parça boyutları üzerinde olumsuz bir etki tespit edilmemiş ve her iki durumda da bekleme soğutma süreleri eşit olmasına rağmen, akma gözlenmemiştir.

Hızlı soğuma, parçanın son katmanlarının yapım yönünde merkezden sapmasına neden olmuştur. Bu sapmanın temelinde, malzemenin yüzey sıcaklığındaki ani değişimlerin, çekirdek bölgedeki tanelerin büyümesi üzerinde yarattığı farklılıklar yatmaktadır. Yüzeydeki hızlı soğuma, tanelerin homojen bir şekilde büyümesini engelleyerek, malzeme içinde iç gerilimlerin oluşmasına neden olmuş ve bu gerilimler inşa yönünde bir sapmaya yol açmıştır. Özellikle, yüzey ile çekirdek bölgesi arasındaki sıcaklık farkları, yapısal bütünlüğü bozarak malzemenin geometrik doğruluğunu etkilemiştir.

Bu bağlamda, üretilen duvar numunelerinin CAD verileriyle karşılaştırılması gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.6'da sunulmuştur. Yapılan karşılaştırma, harici ısıtıcıların kullanımının, inşa yönündeki sapmaları önemli ölçüde azalttığını ve bu sayede daha yüksek geometrik kararlılık sağladığını göstermiştir. Harici ısıtıcılar, yüzey ile çekirdek arasında oluşan sıcaklık farklarını minimize ederek, tanelerin daha homojen bir şekilde büyümesine olanak tanımış ve bu durum, inşa süreci boyunca daha dengeli ve tutarlı bir yapı elde edilmesini sağlamıştır.

Bu yöntem, katmanlar arasında meydana gelen termal gerilimleri azaltarak, son ürünün genel geometrik doğruluğunu ve boyutsal stabilitesini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Özellikle, harici ısıtıcıların kullanımı, inşa edilen parçaların homojenliği ve yapısal bütünlüğü üzerinde önemli derecede olumlu etkiler yaratmıştır. Bu durum, üretim sürecinin tekrarlanabilirliğini ve güvenilirliğini artırarak, üretim sürecinin genel performansını iyileştirmiştir.

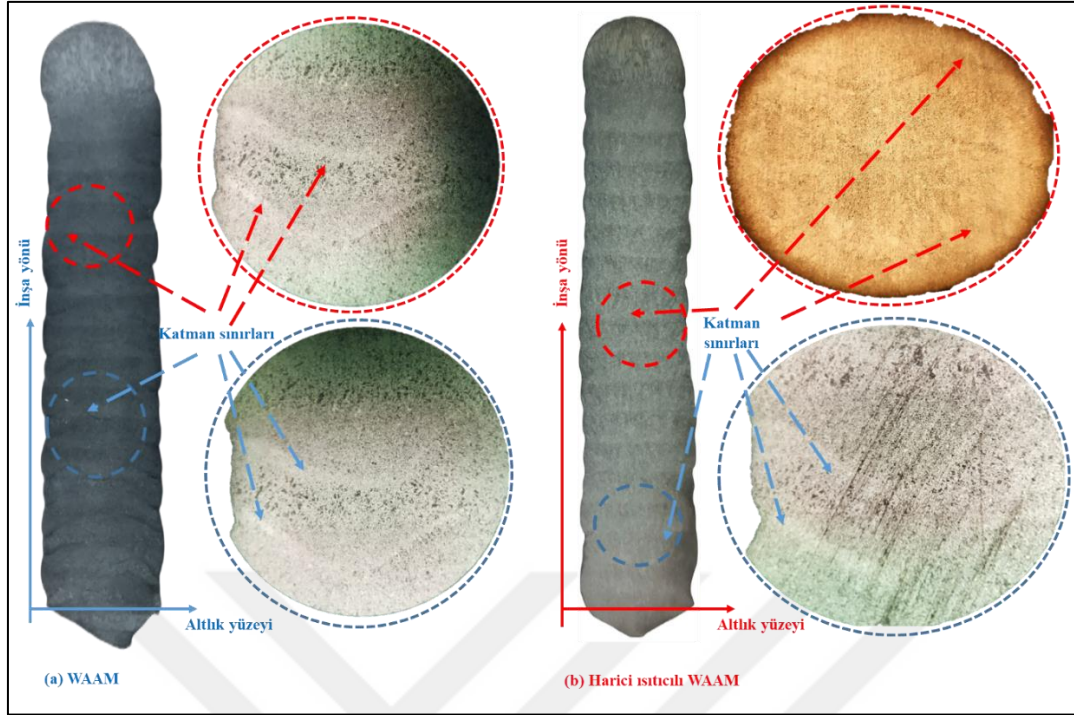
Harici ısıtıcılar, WAAM sürecinde karşılaşılan termal dengesizlikler gibi zorlukların üstesinden gelmede etkili bir çözüm olarak öne çıkmıştır. Bu sayede, gelecekteki üretim süreçlerinde daha yüksek kalite ve verimlilik sağlama potansiyeli taşımaktadır. Bu bulgular, harici ısıtıcıların WAAM süreçlerinde yaygın olarak kullanılmasının hem üretim süreçlerinin optimizasyonunda hem de son ürünlerin kalite kontrolünde önemli katkılar sağlayabileceğini göstermektedir.



Şekil 5.6. WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen duvarların detay fotoğrafları, (a) duvar iç yüzeyleri, hızlı soğuma etkisiyle son katmanlarda deforme olmuş WAAM duvarı (b) üretilen duvarların genişlik ölçümleri

5.1.3. Makro yapı ve mikroyapı analizi

WAAM ve harici ısıtıcılarla desteklenmiş WAAM yöntemi kullanılarak üretilen duvarların makro yapıları Şekil 5.7’de verilmektedir. Her iki üretimde de biriktirilen katmanların belirgin bir şekilde ayırt edilebildiği gözlemlenmiştir [65, 77]. Kaynak dikişlerinin düzgün bir şekilde kaynaştığı ve birleşim bölgelerinin homojen bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Kaynak bölgelerinde yüzey veya iç yapı kusurlarına rastlanmamıştır. Bu durum, uygulanan yöntemlerin malzeme bütünlüğünü koruduğunu ve istenilen yapısal özellikleri sağladığını göstermektedir. Dolayısıyla, her iki yöntemin de ürettiği duvarların makro yapıları incelendiğinde benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Bu benzerlik, harici ısıtıcıların eklenmesinin, makro yapı üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığını ve WAAM işlemine yakın başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.7. Duvar numunelerinin alt, orta ve üst bölgelerine ait makro görüntüler a) WAAM b) Harici ısıtıcılı WAAM

WAAM duvarının mikroyapı görüntüleri Şekil 5.8’de verilmiştir, termal kararsızlığın tane boyutu homojenliği üzerindeki olumsuz etkisini açıkça göstermektedir. Şekil 5.8a ve 5.8b, inşa yönündeki ardışık iki katmanın mikroyapı görüntülerini vermektedir. Bu şekillerde, üç belirgin bölge gözlemlenmektedir: bunlar eriyik havuz merkezi, eriyik havuz sınırı ve ısı tesiri altındaki bölgeden (ITAB) oluşmaktadır. Bölgelerin detayları aşağıda verilmiştir.

Eriyik Havuz Merkezi

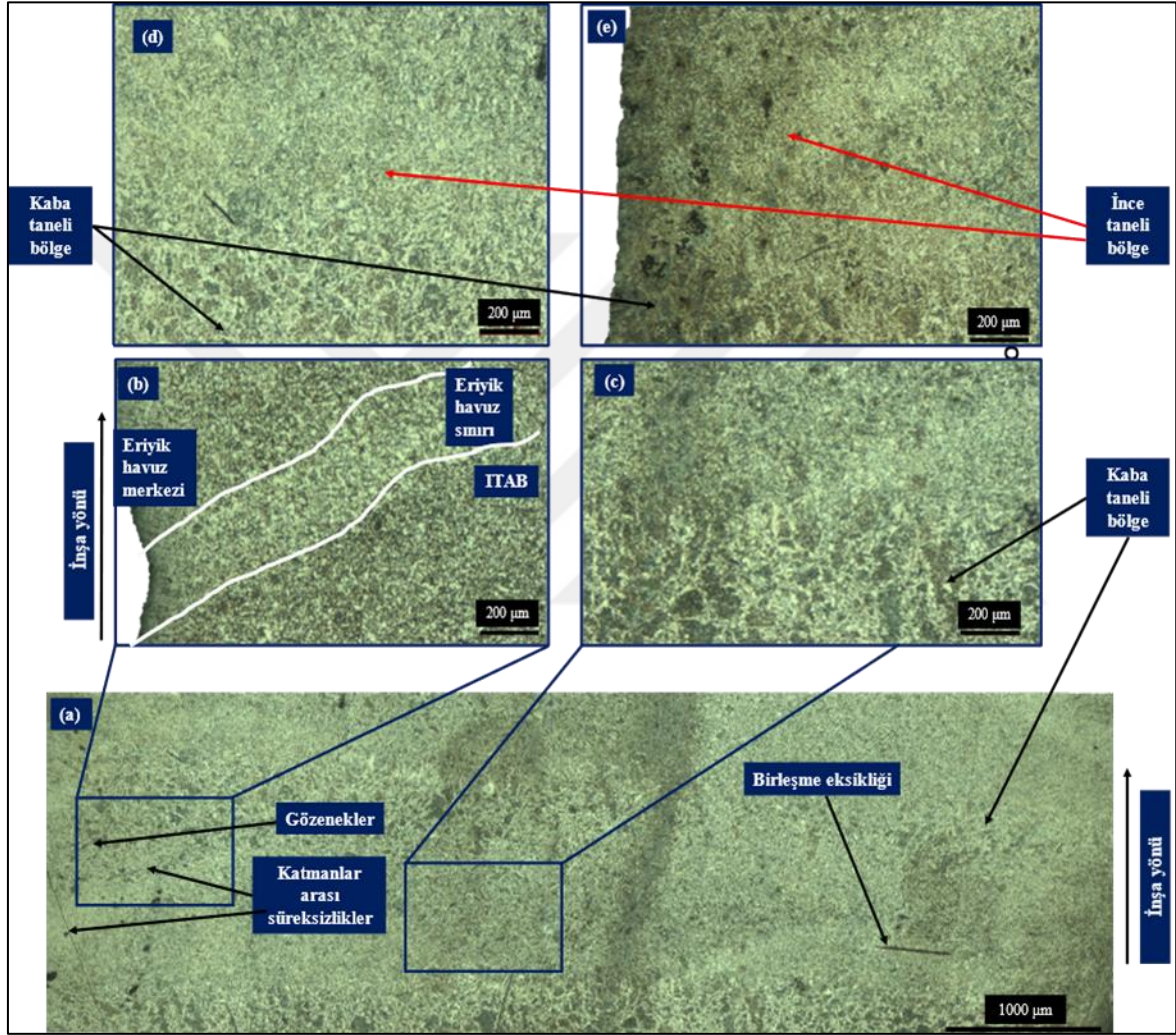
İmalat işlemi sırasında tamamen eriyen ve ardından katılaştıran bölgedir. Bu bölgede tane yapısı genellikle daha homojendir. İnce tanelerden oluşan bu yapı her yeni katmanla birlikte kontrolsüz ısıl döngüler nedeniyle mikro yapı değişiklikleri görülebilir.

Eriyik Havuz Sınırı

Erime ile tam olarak kaynaşmayan ancak yüksek sıcaklıklara maruz kalan bölgedir. Bu bölgede tane boyutu farklılıkları ve bazı mikro yapısal heterojenlikler yaygındır.

Isı Etkisi Altında Kalan Bölge (ITAB)

Sıcaklığın yeterince yüksek olduğu, ancak erimeye neden olmadığı bölgedir. Bu bölgede tane büyümesi ve mikro yapısal değişiklikler belirgindir. Şekil 5.8b, termal çevrimlerin etkisiyle bu bölgelerin daha belirgin şekilde ayrıştığını göstermektedir.

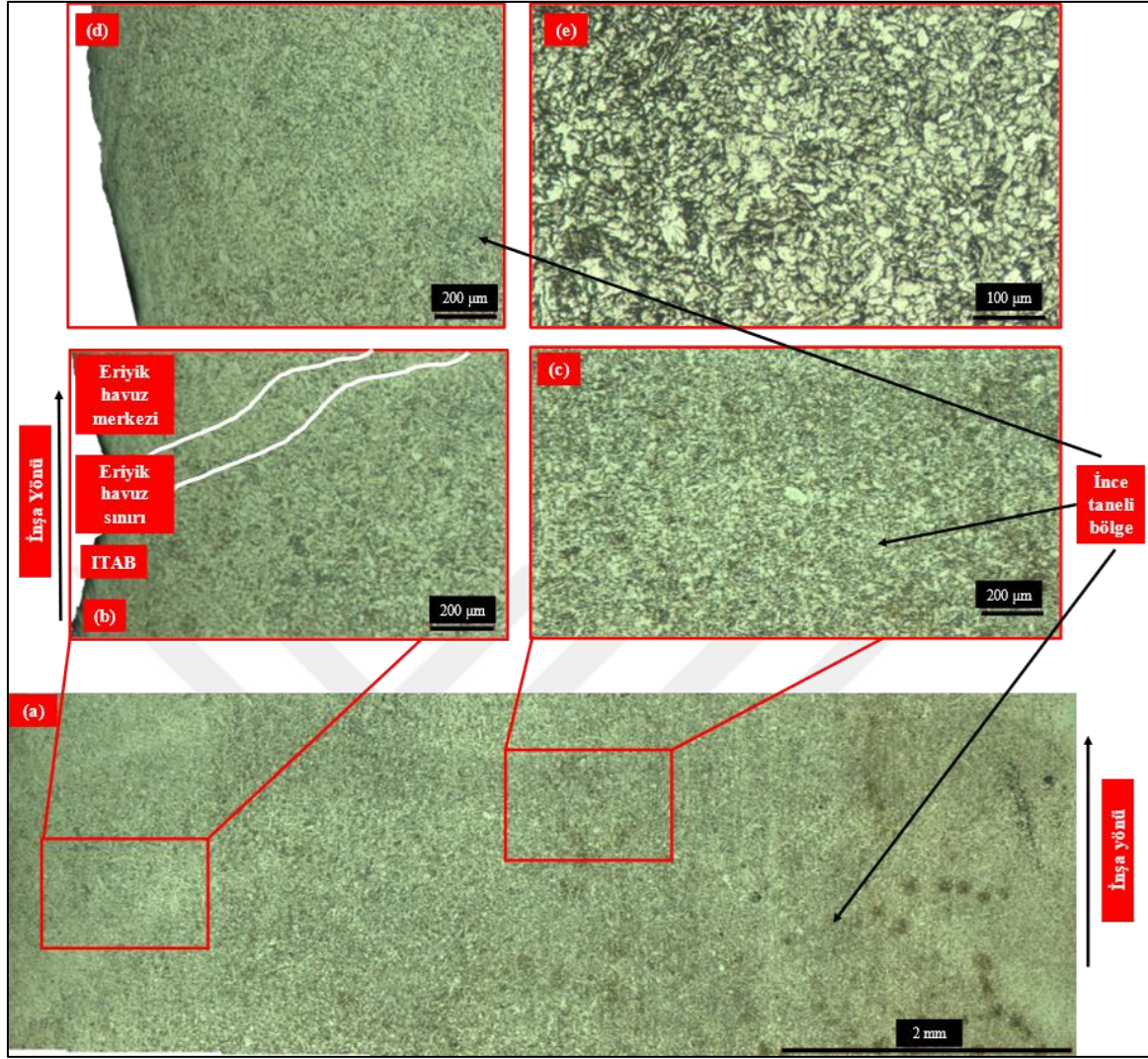


Şekil 5.8. WAAM duvarının mikroyapı görüntüleri a) birleştirilmiş görüntü; gözenekler, birleşme eksikliği ve katmanlar arası süreksizlikler b) inşa yönüne göre ısı etkisinin görüntüsü c-d) kaba taneli bölge e) kaba taneden ince taneye geçiş bölgesi

Her yeni katman üretiminde, önceki katmanın ITAB bölgesinde tane büyümesi meydana gelmiştir. Bu, ardışık ısı döngüleri nedeniyle oluşan bir durumdur ve bu bölgelerde mikro yapının daha az homojen olmasına yol açar [78]. Ayrıca, bu bölgelerde gözenekler ve füzyon eksikliği gibi çeşitli ara katman süreksizlikleri görülmüştür. Bu hatalar, esas olarak yapı

yönüne dik olan ara katman bölgelerinde meydana gelmiştir. Şekil 5.8c, yakın bölgelerin farklı tane yapılarını göstermektedir. Bu şekil, eriyik havuz merkezi, sınırı ve ITAB arasındaki mikro yapısal farklılıkları detaylı bir şekilde ortaya koyar. Her bölgedeki tane yapısı, malzemenin maruz kaldığı termal çevrimlere göre farklılık göstermektedir. Eriyik havuz merkezinde daha homojen bir yapı gözlemlenirken, ITAB bölgesinde daha belirgin tane büyümesi ve farklılıklar görülür. Bu durum, her yeni katman eklendiğinde, önceki katmanın ITAB bölgesinde tane büyümesinin arttığını göstermektedir. Şekil 5.8d, örneğin farklı bölgelerinden alınan tane boyutu değişikliklerinin büyütülmüş bir görüntüsünü sunmaktadır. Bu şekilde, termal çevrimlerin ve ardışık katmanların etkisiyle tane boyutlarındaki değişiklikler net bir şekilde görülmektedir. Her katman eklendiğinde, malzemenin farklı bölgelerinde farklı ısıl gerilmeler ve gradyanlar oluşur, bu da tane boyutunda belirgin değişikliklere yol açar. Kontrolsüz termal davranış nedeniyle meydana gelen iç yapı değişikliklerinin bir başka görüntüsünü Şekil 5.8e’de görülmektedir. Üretim sırasındaki termal kararsızlıkların, mikro yapı düzenini nasıl bozduğu ve çeşitli hatalara neden olduğu görülmektedir. Özellikle, gözenekler ve füzyon eksikliği gibi iç yapı hataları belirgindir.

Bahsedilen mikro yapı özelliklerinin, yapı yönü boyunca tüm duvar katmanlarında gözlemlendiği dolayısıyla, her katmanda belirli bir derecede homojenliksizlik tespit edilmiştir. Metal eklemeli imalat süreçlerinde, çoklu ve karmaşık termal çevrimlerin varlığının, yapı yönü boyunca mikro yapının düzgün olmamasına yol açan ana faktör olduğu iyi bilinmektedir [65, 79-81]. İmalat süreci boyunca, her yeni katman için tekrarlanan ısıtma ve soğutma çevrimleri, malzeme içinde önemli termal gradyanlar oluşturur. Bu termal çevrimler, önceki katmanın ITAB, eriyik havuz sınırı ve eriyik havuz merkezi boyunca termal gerilmeler ve gradyanlar meydana getirir. Şekil 5.8b’de gösterildiği gibi, bu termal çevrimler bu bölgelerin daha belirgin ayrışmasına neden olmuştur. Tane boyutu dağılımı üzerindeki gözle görülür etki özellikle çarpıcıdır: tekrarlanan ısıtma ve soğutma çevrimleri, etkilenen bölgeler boyunca tane boyutunda belirgin bir değişikliğe yol açmıştır. Bu fenomen sadece mikro yapı özelliklerini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda malzemenin mekanik özellikleri üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Bu bölgelerdeki tane boyutu dağılımındaki dalgalanmalar, malzemenin mukavemet, süneklik ve kırılma tokluğunda değişikliklere yol açabilir ve bu da WAAM bileşeninin genel mekanik davranışını etkiler [57, 82-84].



Şekil 5.9. Harici ısıtıcılı WAAM duvarının mikroyapı görüntüleri a) birleştirilmiş görüntü, b) inşa yönüne göre sınırlı üretim ısıısının etkisinin görüntüsü, c-d) ince taneli bölge, e) yüksek büyütmeli ince taneli bölge görseli

Harici ısıtıcı sistemi kullanılan WAAM işlemi sırasında ısının kontrol edilmesi, daha düzenli bir iç yapının oluşmasını sağlamıştır. Şekil 5.9'da görüldüğü gibi, inşa yönünde tane boyutunda daha az varyasyon gözlemlenmiştir. Şekil 5.9a, tane boyutunun homojenliğini göstermektedir. Termal dalgalanmaların azaltılmasıyla, soğutma-ısıtma döngüsünün tane boyutu üzerindeki etkisi daha sınırlı olmuştur. WAAM yöntemi ile üretilen duvarın aksine, harici ısıtıcılar kullanılarak üretilen duvarda katmanlar arası hatalar, birleşme eksiklikleri ve gözeneklilik gibi yapısal kusurlar neredeyse tamamen ortadan kalkmıştır. Şekil 5.9b, harici ısıtıcı kullanılarak üretilen duvarda yapısal kusurların yokluğunu ve mikro yapıdaki sürekliliği vurgulamaktadır. Genel olarak, termal davranışın kontrolü, alt bölgelerden üst bölgelere kadar mikro yapı farklılıklarını en aza indirerek yapısal bütünlüğe katkıda

bulunmaktadır. WAAM sürecine harici ısıtıcı eklenmesi, katman üretimi, bekleme süresi ve üretim sonunda soğuma süresi boyunca kontrolsüz soğumayı önlemiştir. Şekil 5.9c, her bir katmanın üretilmesi sırasında kızılötesi ısıtıcıların kullanımını ve bunun sonucunda katmanlar arası tutarlı termal profilleri göstermektedir. Sonuç olarak, tüm katmanlar yaklaşık olarak tutarlı ısıtma ve soğutma döngülerine maruz kalmış ve üretim yönünde düzenli bir mikro yapı oluşmuştur.

WAAM sürecine harici ısıtıcı eklenmesi, her yeni katmanın biriktirilmesiyle tipik olarak ilişkilendirilen geleneksel ısıtma ve soğutma rejimine bir müdahale olmuştur. Şekil 5.9d ve Şekil 5.9e'de gösterildiği gibi, bu değişiklik, ITAB, eriyik havuz sınırı ve bir önceki katmanın eriyik havuzunun merkezi gibi kritik bölgeler arasındaki belirgin sınırın azalmasıyla kendini göstermiştir. Bu fenomen, bileşenlerin tane yapısını ve mekanik özelliklerini etkilemiştir. Sınır bölgelerinde gözlemlenen bulanıklık, malzemenin biriktirme süreci boyunca maruz kaldığı değişken ve karmaşık termal geçmişin doğrudan bir göstergesidir. Bu termal geçmiş, her bir katman eklenmesi sırasında meydana gelen dinamik ısı değişimlerinden kaynaklanmakta olup, mikro yapı üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Bu süreçteki ani ısı değişimleri, katmanlar arasındaki sıcaklık gradyanlarını artırmakta ve bu durum, malzemenin mikro yapısında heterojenliklere ve potansiyel zayıf bölgelere yol açabilmektedir. Dolayısıyla, termal geçmişin etkileri malzemenin nihai mekanik özelliklerine doğrudan yansıtılabilmekte ve performans üzerinde olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Harici ısıtıcı sistemlerin kullanımı, termal kontrol açısından kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Harici ısıtıcıların kullanılması, katmanlar arasında daha dengeli bir sıcaklık dağılımı sağlayarak termal gradyanları minimize etmekte ve böylelikle mikro yapının homojen kalmasına katkıda bulunmaktadır. Mikro yapıdaki homojenlik hem mekanik dayanımın artırılmasında hem de malzeme performansının sürekliliğinin sağlanmasında temel bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

Sridharan ve arkadaşları [85] düşük alaşımlı C-Mn çelikleri üzerine yaptıkları çalışmalarında, C-Mn çeliklerinde çoklu geçişli kaynakların, özellikle kaynak metalinin tokluğunda mekanik özelliklerde değişkenlik yarattığını iyi bir şekilde belgelemiştirler. Bu değişkenlik, çoklu termal döngüler nedeniyle ortaya çıkar. Her termal döngü, daha önce tortulanmış kaynak metalinin yeniden ısınmasına neden olabilir ve bu durum, ısı hızları, soğuma hızları ve zirve sıcaklıklarına bağlı olarak gradyanlı bir mikroyapıya yol açar. C-Mn çeliklerinde, genellikle ilk katılaştan faz delta ferrittir ve bu faz östenite dönüşür. Ancak,

alaşım elementleri ve soğuma hızlarına bağlı olarak, östenit bazen ilk katılaştan faz olabilir. Östenit, çeşitli dönüşüm ürünlerine ayrışır, bunlar sırası ile;

Tane sınırı ferriti

Genellikle kaynak metal mikroyapılarında gözlemlenen ve tane sınırlarında oluşan bir fazdır. Bu faz, kaynak sırasında hızlı soğuma nedeniyle oluşur ve genellikle düşük karbonlu çeliklerin kaynaklı bölgelerinde rastlanır. Tane sınırı ferriti, malzemenin mukavemeti ve tokluğu üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir, çünkü bu faz, tane sınırlarında bulunan diğer fazlarla birlikte malzemenin genel mekanik özelliklerini belirler. Özellikle kaynak işlemleri sırasında, tane sınırı ferritinin oluşumu ve dağılımı, kaynak bölgesinin performansını ve dayanıklılığını etkileyen kritik bir faktördür.

Widmanstätten ferriti

Özellikle iğne benzeri karakteristik görünümüyle tanınan bir fazdır ve genellikle yavaş soğuma koşulları altında oluşur. Bu faz, karbon çeliği ve düşük alaşımlı çeliklerin mikroyapılarında sıkça rastlanır. Widmanstätten ferriti, östenit fazından ferrit fazına dönüşüm sırasında, belirli kristalografik düzlemler boyunca ferrit plakalarının iğne şeklinde büyümesiyle meydana gelir.

Bu fazın oluşumu, çeliğin mekanik özelliklerini etkileyebilir; çünkü iğne benzeri yapı, malzemenin tokluğunu azaltırken sertliğini artırabilir. Widmanstätten ferriti, genellikle kaynak bölgesinde veya kontrollü ısıtma işlem süreçlerinde gözlemlenir ve mikroyapıdaki varlığı, malzemenin nihai performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Dolayısıyla, Widmanstätten ferritinin oluşumu ve kontrolü, çeliklerin istenen mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamak için dikkatle yönetilmelidir.

Beynitik ferrit

İnce, plak benzeri yapısıyla bilinen ve belirli soğuma koşulları altında oluşan bir fazdır. Bu faz, östenit fazından ferrit ve karbürlerin birlikte çökmesi sonucu oluşur ve genellikle orta sıcaklıklarda gerçekleşen hızlı soğuma koşulları altında meydana gelir. Beynitik ferrit, ince tabakalar halinde düzenlenmiş ferrit plakaları ve aralarında yer alan karbürlerden oluşur.

Bu yapı, çeliklerde hem yüksek mukavemet hem de iyi tokluk sağlayabilen bir mikroyapı olarak değerlidir. Beynitik ferritin oluşumu, çeliğin mekanik özelliklerini iyileştirebilir, çünkü bu faz, martenzit kadar sert olmamakla birlikte, daha fazla süneklik ve darbe dayanımı sunar. Özellikle kaynaklı yapıların ve ısıtılma işlem görmüş parçaların performansını optimize etmek için beynitik ferritin kontrollü bir şekilde oluşturulması hedeflenir. Bu nedenle, beynitik ferritin oluşum koşulları, çeliklerin nihai özelliklerini belirleyen önemli bir faktördür.

Martenzit + tutulmuş östenit + sementit

Bu faz kombinasyonu, östenitin dönüşümünün hızlı gerçekleştiği ve martenzit, tutulmuş östenit ve sementitin bir arada bulunduğu durumlarda gözlemlenir. çeliğin hızlı soğuma koşulları altında östenitten martenzite dönüşümü sırasında oluşan karmaşık bir mikroyapıdır. Bu durumda, austenit fazı hızlı bir şekilde martenzite dönüşür, ancak bazı östenit bölgeleri dönüşümü tamamlayamadan tutulmuş östenit olarak kalır. Ayrıca, karbon zengini bölgelerde sementit (Fe_3C) olarak bilinen demir karbür fazı da oluşabilir.

Bu faz kombinasyonu, çeliğin sertliğini ve mukavemetini önemli ölçüde artırabilir, ancak aynı zamanda malzemenin sünekliğini ve tokluğunu da azaltabilir. Martenzit, yüksek sertliği ile bilinirken, tutulmuş östenit, çeliğin işlenebilirliğini ve çatlama direncini artırabilir. Sementit ise sert, kırılabilir bir faz olup, çeliğin aşınma direncini artırır ancak aşırı miktarlarda bulunması halinde kırılabilirliğe neden olabilir.

Bu kombinasyon, özellikle su verilmiş ve temperlenmiş çeliklerde veya hızlı soğuma sonrası ısıtılma işlem uygulanmamış çeliklerde yaygındır. Isıtılma işlem süreçlerinin doğru yönetilmesi, bu fazların dengeli bir şekilde dağılımını sağlayarak, çeliğin istenen mekanik özelliklere ulaşmasına olanak tanır.

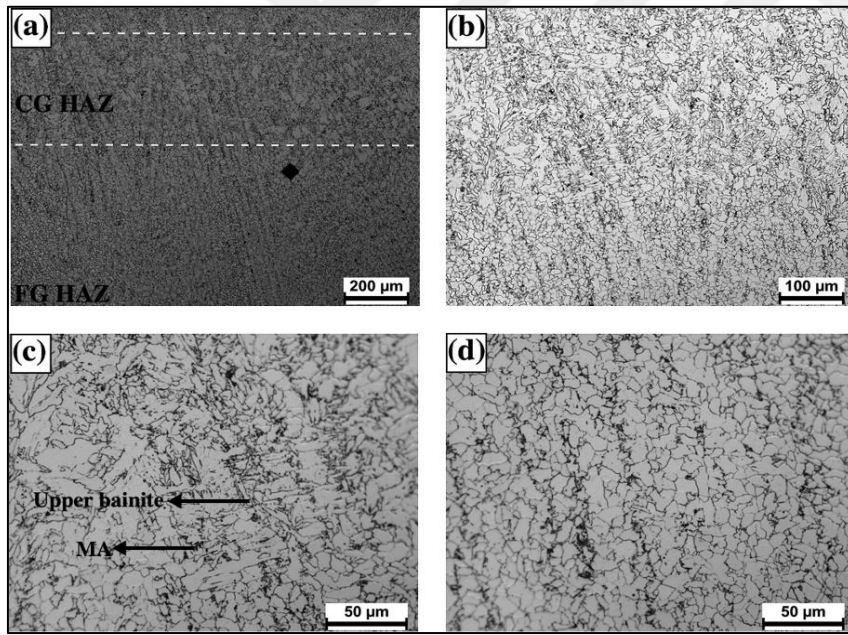
Asiküler ferrit

Son soğuma aşamasında oluşan ve iğne benzeri morfolojisiyle tanınan bir fazdır. Bu faz, özellikle kaynak metalinde sıkça gözlemlenir ve kaynak metalinin tokluğunu artırmada önemli bir rol oynar. Asiküler ferrit, genellikle ince taneli ve düzensiz yapısıyla dikkat çeker, bu da malzemenin darbe dayanımını ve sünekliğini artırır.

Bu faz, kaynak işlemleri sırasında, özellikle soğuma hızı yeterince yavaş olduğunda oluşur ve çeliğin mikroyapısında homojen bir dağılım gösterir. Asiküler ferritin varlığı, kaynak bölgesinde çatlak oluşumunu engellemeye yardımcı olur ve genel olarak malzemenin yapısal bütünlüğünü artırır. Bu özellikler, asiküler ferritin, kaynak işlemleri için tercih edilen bir mikroyapısal faz olmasını sağlar.

Dolayısıyla, asiküler ferritin oluşumunu teşvik eden koşulların sağlanması, yüksek tokluk ve güvenilirlik gerektiren uygulamalarda kritik öneme sahiptir. Bu faz, çeliklerin kaynaklanabilirliğini ve hizmet ömrünü iyileştirmek için dikkatle kontrol edilen bir mikroyapısal bileşen olarak kabul edilir.

Çalışmalarında elde ettikleri görseller Şekil 5.10'da verilmiştir. Şekil 5.10a-d, X yönünde imal edilen numunelerin mikroyapısını göstermektedir.

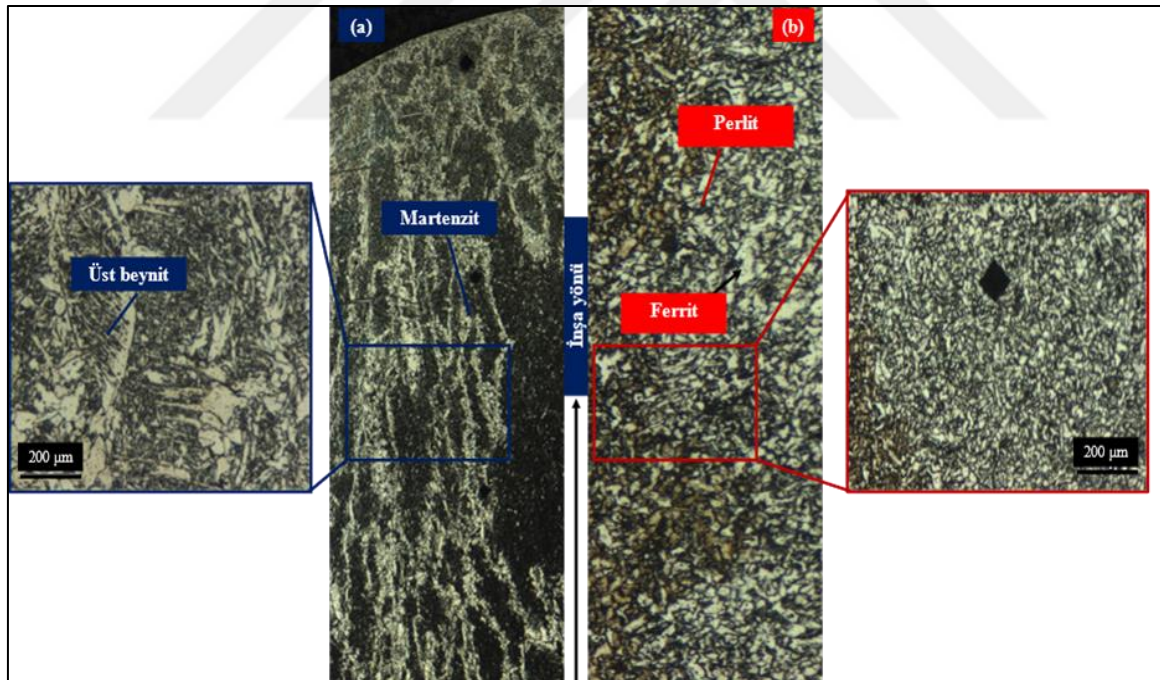


Şekil 5.10. X yönünde test edilen numunelerin optik mikrograflar [86]

Şekil 5.10, kaynaklı mikroyapının yeniden ısıtılmış bir mikroyapı ile değiştirildiğini, yeniden ısıtılmış mikroyapının kaba taneli (östenit) bir bölge ve ince taneli (östenit) bir bölge olarak açıkça bölündüğünü göstermişlerdir. Kaba taneli bölgedeki mikroyapı, Şekil 5.10b-c'de gösterildiği gibi, bir miktar martenzit-östenit bileşeni ile ağırlıklı olarak üst beyrit olduğunu belirtmişlerdir. İnce taneli bölgedeki mikroyapı, Şekil 5.10d'de gösterildiği gibi ağırlıklı olarak ferrit ve perlittir. Kaba taneli ve ince taneli mikroyapıların mikroyapısı tüm

yapı boyunca değiştiğini vurgulamışlardır. Çalışmalarında ek olarak, yatay numuneden dikey numuneye süneklik değerindeki ciddi düşüşlerin, (i) katmanlar arası bölgelerde biriken füzyon veya gözeneklilik eksikliği gibi üretim süreksizlikleri ve kusurlarının varlığına, (ii) HAZ boyunca tane irileşmesi ve/veya (iii) beynit lamel yapıları içinde kırılğan martenzit-östenit bileşeninin oluşumu ile makul bir şekilde açıklanacağını belirtmişlerdir.

Farshchi ve arkadaşları [86] yönlendirilmiş enerji yığma metodolojisine dayalı olarak sistematik bir ısı girişi tasarımı geliştirdikleri çalışmalarında ER70S-6 teli ile ürettikleri duvarların ilk tabakasında gözlemlenen yüksek ısı girişi ve artan soğuma hızının, porozite oluşumuna neden olduğunu bu sürecin, katılaşma sırasında malzeme içinde boşlukların meydana gelmesine yol açtığını belirtmişlerdir. Aynı zamanda östenitleşme sıcaklığından ($>800\text{ }^{\circ}\text{C}$) soğuma, poligonal ferrit matrisinde martenzit-östenit bileşenlerinin oluşumuna neden olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek ısı girişi ve hızlı soğuma ile ilişkili bu etkilerin, mikroyapının belirli özelliklerini ve performansını etkilediğini ifade etmişlerdir.



Şekil 5.11. (a) WAAM, (b) harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen duvarların en üst iki katmanının mikroyapı görüntüleri

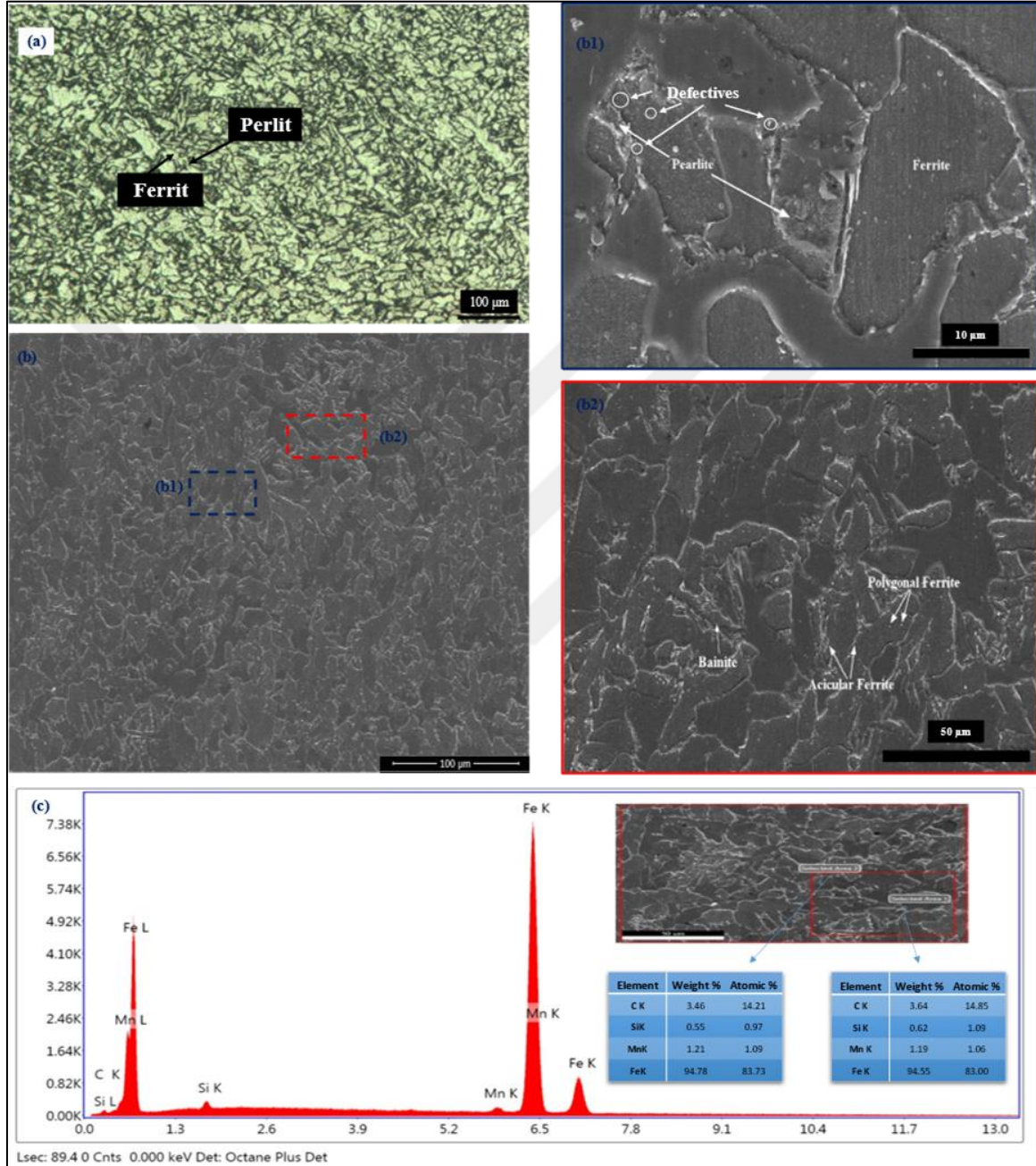
Son katmanların mikroyapı görüntüleri, soğumanın mikroyapı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Şekil 5.11a, WAAM yöntemiyle üretilen duvarın üst iki katmanının mikroyapısını göstermektedir. Klasik dentritik yapı görülmektedir. Yapı martenzit-östenit ve üst beynitten oluşmaktadır. Bu martenzit-östenit bileşeni yapının hızlı soğuma sonucu

oluştugu bilinmektedir. Buna karşılık, Şekil 5.11b'de, harici ısıtıcı kullanılan WAAM yöntemiyle üretilen duvarda ferrit ve perlit yapıları oluşmuştur. Ayrıca, elde edilen mikroyapı deseni katmanlar boyunca daha homojendi. Termal davranışın mikroyapı üzerindeki etkisi, tüm parça boyunca belirgindi. Bu sonucu daha ayrıntılı analiz etmek için, iki parçada ortalama tane boyutları ImageJ açık kaynak programı kullanılarak ölçülmüştür. Burada, WAAM duvarının ortalama tane boyutu $\sim 10.8 \mu\text{m}$ olarak bulunmuş olup, literatür ile uyumludur [65, 77, 87]. Harici ısıtıcı kullanılan WAAM ile üretilen duvarda ise $\sim 12.62 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Daha yüksek soğuma hızlarının ferrit tane boyutunda azalmaya yol açtığı bilinmektedir [88]. Ayrıca, atomik difüzyonu baskıladıkları için dislokasyonlu sert ince fazlar oluşur. Buna karşılık, yavaş soğuma hızları, poligonal ferrit gibi fazların yumuşak, iri ve daha az dislokasyonlu duruma geçmesine neden olur. Nihai mekanik özellikler, mikroyapı içindeki ferrit ve perlitin boyut ve yüzde dağılımından etkilenmektedir [89, 90].

Optik mikroskop incelemesine ek olarak, duvarların ayrıntılı mikroyapısal karakterizasyonu amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizleri de uygulanmıştır. SEM analizi, yüksek çözünürlükte yüzey morfolojisini detaylı bir şekilde incelememize olanak sağlarken, EDS analizi ise malzemenin kimyasal bileşiminin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemler, malzemenin mikro yapısal özelliklerini ve bileşimini daha derinlemesine analiz ederek kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Yapılan analizlerden elde edilen görüntü ve sonuçlar Şekil 5.12 ve Şekil 5.13 de verilmiştir. Şekil 5.12 WAAM duvarının detaylarını verirken, Şekil 5.13 ise harici ısıtıcı duvarların detaylarını vermektedir.

Şekil 5.12'de sunulan EDS sonuçları, duvarların kimyasal bileşiminin kullanılan kaynak teliyle uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu durum, üretim sürecinde kullanılan hammaddenin tamamen entegre olduğunu ve hedeflenen bileşime ulaşıldığını doğrulamaktadır. Şekil 5.12'deki mikrograflar, ferrit matrisi içinde perlit varlığını doğrulamaktadır. Ferrit fazının beyaz alanlarla, tane sınırlarında oluşan perlit fazının ise koyu alanlarla temsil edildiği bu mikro yapı, malzemenin mekanik özellikleri ve performansı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Ferrit ve perlit fazlarının varlığı, malzemenin dayanıklılığı, sertliği ve diğer mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etki yaratır. Ferrit fazı, genellikle daha yumuşak ve sünek bir yapıya sahipken, perlit fazı daha sert ve mukavemetli bir yapı sunar [65]. Dolayısıyla, bu fazların mikro yapı içerisindeki dağılımı ve oranı,

malzemenin performansını doğrudan etkileyen kritik parametreler arasında yer alır. Şekil 5.12b1’de, tane sınırlarında gözlenen perlitik yapı ve ferrit fazı ile, iç yapıda bulunan eksik ve kusurlu bölgeler sunulmaktadır.



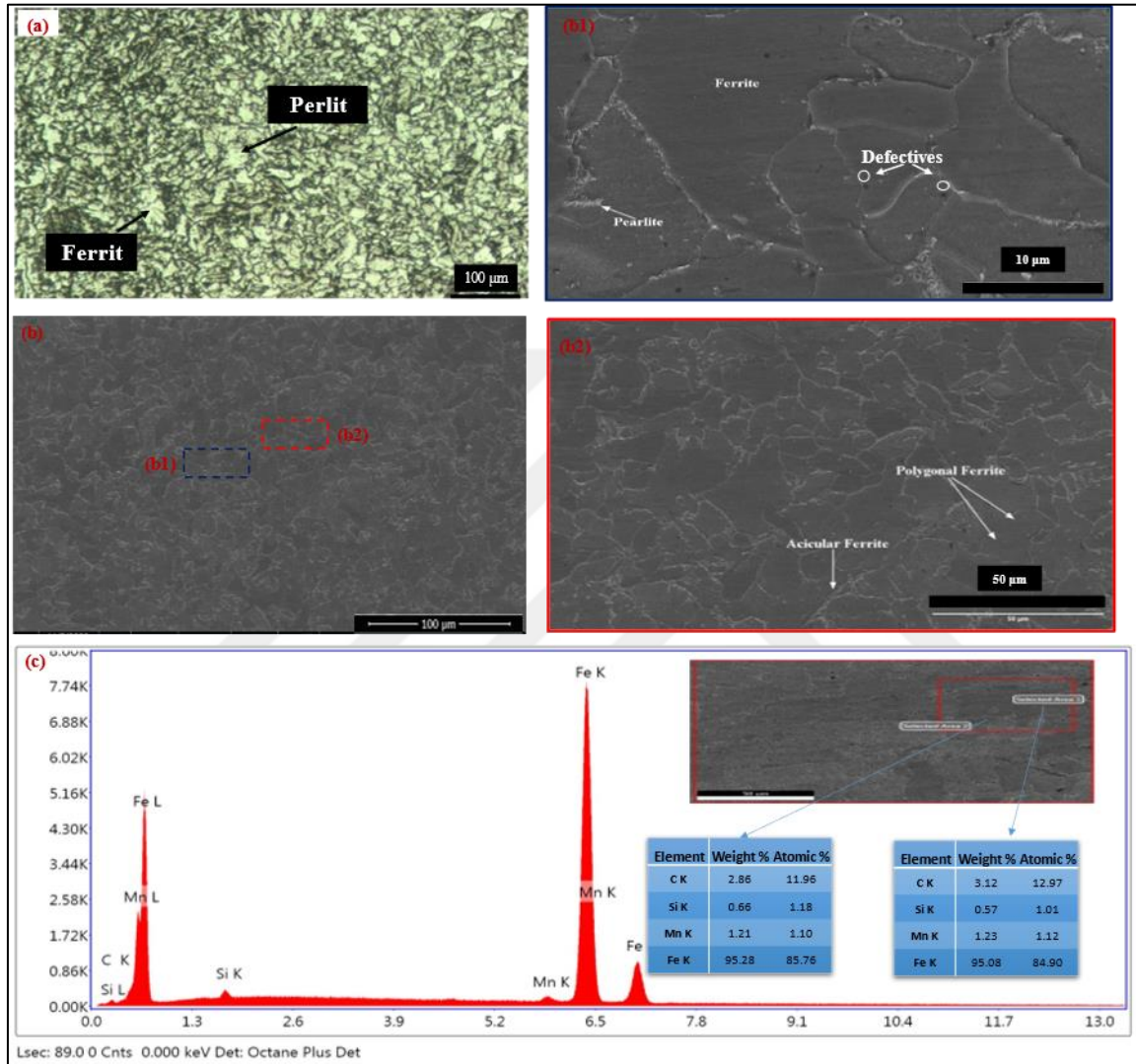
Şekil 5.12. İnşa yönüne göre WAAM duvarının orta bölümünden alınan SEM ve optik mikroskop görüntüleri: a) SEM görüntüsü için referans optik mikroskop görüntüsü, b) 1000x SEM görüntüsü, b1-b2) SEM görüntüsünün ayrıntıları, c) WAAM duvarının EDS analizi

Malzemede oluşan bu tür iç yapısal kusurlar, malzemenin dayanıklılığını ve mukavemetini olumsuz etkileyebilir. Yüksek soğuma nedeniyle oluşan poligonal ve iğne benzeri ferrit yapıları Şekil 5.12b2'de gösterilmiştir. Bu tür yapıların oluşumu, soğuma hızının mikroyapı üzerindeki etkisini göstermektedir [91]. Ayrıca, beynit (bainite) oluşumu gözlemlenmiştir. Beynit oluşumu, soğuma hızından etkilendiği için kontrolsüz soğumanın önemli bir kanıtıdır. Beynit oluşumu, malzemenin soğuma sırasında karşılaştığı sıcaklık değişimlerinin ve soğuma hızlarının bir sonucudur [65]. ER70S-6 malzemesi için termodinamik simülasyon kullanılarak üretilen sürekli soğuma dönüşüm (CCT) diyagramında belirtildiği gibi, 0.1 ile 1°C/s arasındaki orta soğuma hızları ferritik-perlitik bir mikroyapı oluştururken, 10-100°C/s aralığındaki şiddetli soğuma hızları, beynit gibi denge dışı fazlara yol açmaktadır. Bu bilgi, üretimin ve soğutma rejimlerinin optimize edilmesi açısından kritiktir [66, 92]. Beynit, perlit ve ferritten daha düşük sıcaklıklarda oluşan bir mikroyapısal fazdır. Genellikle, ferritten daha yüksek sertlik ve tokluk gösterirken, perlitten daha düşük veya yüksek olabilir [93]. Beynitin sertliği perlitten daha yüksek olabilir, ancak bu durum oluşum sıcaklığına bağlıdır. Alt beynit (daha düşük sıcaklıklarda oluşan) perlitten daha sert ve tok olabilir. Üst beynit (daha yüksek sıcaklıklarda oluşan) ise sertlik ve tokluk açısından perlitte yakın değerlere sahiptir.

Harici ısı kaynaklı üretime ait SEM ve EDS sonuçları ise Şekil 5.13 de detaylandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, harici ısı kaynaklarının malzemenin mikro yapısını nasıl etkilediğini anlamak açısından oldukça önemlidir. Harici ısı kaynakları kullanıldığında, malzemenin iç yapısında değişiklikler gözlenmiştir. Ferrit fazının yapısı ve dağılımı üzerinde harici ısıtıcıların etkisi oldukça belirgindir. Harici ısıtıcılar kullanıldığında, ferrit tanelerinin büyümesi teşvik edilmekte ve bunun sonucunda daha homojen bir taneli yapı elde edilmektedir.

Ferrit fazının homojen dağılımı, malzemenin mikro yapısında oluşabilecek lokal gerilim birikimlerini minimize etmekte ve buna bağlı olarak çatlak oluşumunun önüne geçmektedir. Homojen yapının sağlanması, malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan iyileştirir; çünkü gerilim yoğunlaşmasının olmadığı bir yapı, mekanik yük altında daha dirençli bir davranış sergiler. Bu da malzemenin sünekliğini ve darbe dayanımını artıran önemli bir faktördür. Harici ısıtıcıların etkisiyle elde edilen yapılar, tane sınırlarında daha az perlit fazı ve mikroyapısal kusurlar içermektedir. Perlit miktarının azalması, malzemenin soğuma sürecinin daha kontrollü bir şekilde yönetildiğini göstermektedir. Kontrollü soğuma,

malzeme içerisinde dengesiz fazların oluşumunu engelleyerek, istenmeyen yapısal heterojenliklerin önüne geçer. Ayrıca, bu yapılar içerisinde beynit oluşumuna rastlanmamıştır.



Şekil 5.13. İnşa yönüne göre harici ısıtıcılı WAAM duvarının orta bölümünden alınan SEM ve optik mikroskop görüntüleri, a) SEM görüntüsü için referans optik mikroskop görüntüsü, b) 1000x SEM görüntüsü, b1-b2) SEM görüntüsünün ayrıntıları, c) harici ısıtıcılı WAAM için EDS analizi

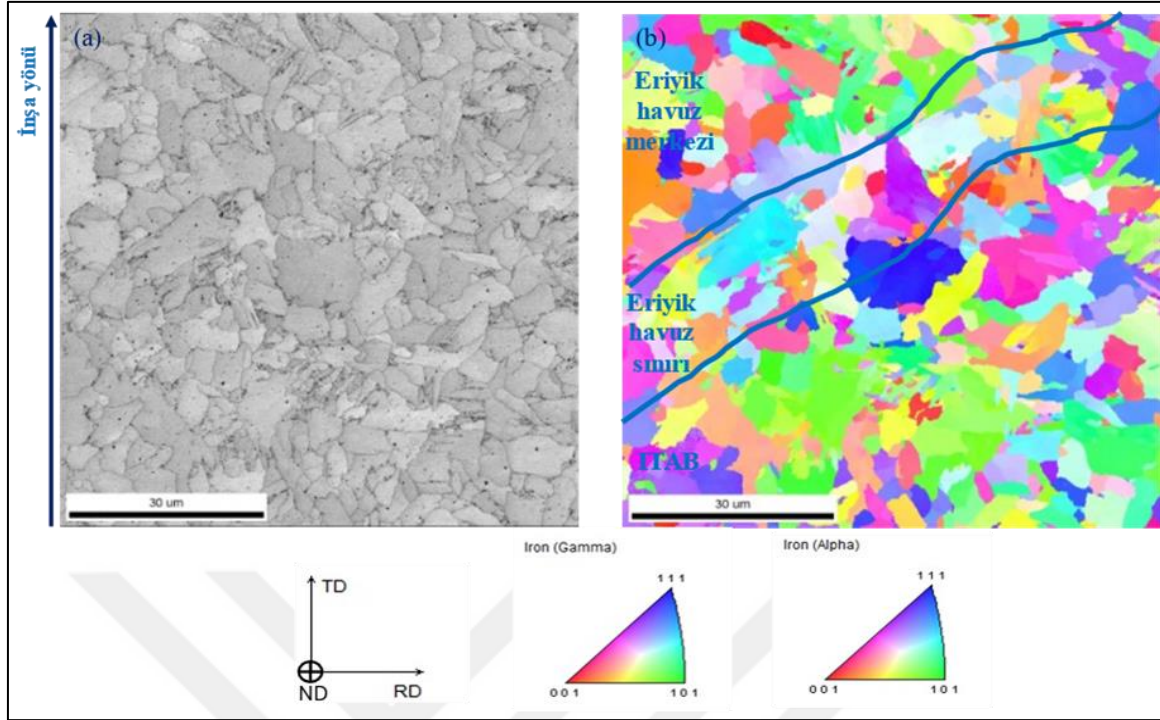
Beynit oluşumunun engellenmesi, malzemenin kırılganlığını azaltarak, malzemenin genel mekanik dayanıklılığını artırmaktadır. Beynit gibi sert ve kırılgan fazların ortadan kalkması, malzemenin sünekliliğini ve enerji yutma kapasitesini iyileştirir.

Harici ısıtıcıların sağladığı diğer bir avantaj, tane sınırlarının daha temiz ve düzgün oluşmasıdır. Tane sınırlarında biriken safsızlıklar ve diğer fazlar, genellikle malzemenin kırılma noktalarıdır. Ancak, daha temiz tane sınırları, malzemenin genel mukavemetini artırmakta ve yorulma dayanımını iyileştirmektedir. Tane sınırlarının bu şekilde kontrol edilmesi, aynı zamanda tane sınırında oluşabilecek gerilim yığılmalarının da önüne geçer, bu da malzemenin ömrünü uzatır.

5.1.4.EBSD analizi

SEM analizinden elde edilen bulguları daha fazla desteklemek amacıyla, üretilen duvarların kristalografik dokusu ve yönelim özellikleri hakkında daha ayrıntılı bilgi edinmek için ek bir Elektron Geri Saçılım Kırınımı (EBSD) analizi yapılmıştır. EBSD tekniği, numunelerin farklı bölgelerindeki kristalografik yönelimdeki değişimleri yakalamak ve mikroyapısal morfolojiyi yüksek hassasiyetle görselleştirmek için özel olarak kullanılmıştır. EBSD analizi sırasında, numune yüzeyindeki çeşitli noktalardan elde edilen EBSD desenlerini ve mikroyapısal özellikleri görselleştirmek için Görüntü Kalitesi (IQ) haritalaması kullanılmıştır. IQ haritası, analiz edilen bölgelerdeki mikroyapısal bütünlük ve faz dağılımı ile ilişkili olan kırınım desenlerinin kalitesi hakkında önemli bilgiler sağlar.

Şekil 5.14 ve 5.15'te hem geleneksel WAAM hem de harici olarak ısıtılan WAAM süreçlerine ait temsili Görüntü Kalitesi (IQ) haritaları ve bunlara karşılık gelen Ters Kutup Şekli (IPF) haritaları sunulmaktadır. Bu haritalar, iki farklı işlem arasında kristalografik yönelim ve doku gelişimi bakımından kapsamlı bir karşılaştırma yapılmasına olanak tanımaktadır. IQ haritaları, mikroyapıdaki tanelerin kalite ve bütünlüğünü vurgularken, IPF haritalarındaki renkler belirli kristalografik yönelimlerin görselleştirilmesini sağlar. Özellikle IPF haritaları, biriktirilen katmanlar boyunca tane yapısının ve tercih edilen kristalografik yönelimin açık bir şekilde ortaya konmasına imkân verir. Bu tür ayrıntılı analizler, harici ısıtmanın mikroyapısal evrimi ve dolayısıyla WAAM ile üretilen bileşenlerin mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini anlamak için gereklidir.



Şekil 5.14. WAAM için EBSD analiz görüntüsü: (a) IQ haritası, (b) IPF haritası ve ayrıntılar

Şekil 5.14, Şekil 4.14a'da 3. bölge olarak tanımlanan numuneden alınan EBSD görüntülerini sunmaktadır. Görüntüler, ara katman bölgesindeki numunenin orta kısmından alınmıştır. Ortalama tane boyutu $\sim 10,8 \mu\text{m}$ olan rastgele yönlendirilmiş koaksiyel taneler görülmüştür. Bu nedenle, Şekil 5.8-11 ve 12'deki OM ve SEM gözlemleriyle elde edilen mikroyapı ile iyi bir uyum içinde görünmektedir. Şekil 5.8'de gösterildiği gibi, önceden üretilmiş tabakanın ITAB bölgesindeki tane irileşmesi, ortalama tane boyutu $11,41 \pm 2,16 \mu\text{m}$ olan iri taneli bir bölgenin varlığıyla gösterilen IPF haritasında belirgin bir şekilde görünmektedir. ITAB da taneler, ısının etkisiyle yeniden yönlendirilmiştir. Bu yönlendirme, kristalografik olarak belirli düzlemlerle ilişkilendirilmiştir. (111) yönü, malzemenin yeniden ısı gördüğü bölgelerde sıklıkla gözlenen bir yönlendirme olup, tanelerin yüksek sıcaklık etkisi altında büyüyerek bu düzleme doğru yönlendiğini ifade eder. ITAB'da bu yönelmenin, malzemenin erime sıcaklığına yakın bölgelerde oluştuğu anlaşılmaktadır. (101) yönü, Önceki katmanın daha düşük sıcaklıklarda ısı korunması sonucunda, taneler bu yönde yeniden kristallenmiştir. Bu durum, önceki katmanın bir yalıtım etkisi göstererek ITAB içindeki tanelerin (101) yönüne yönlendirilmesine neden olmuştur.

Buna karşılık, eriyik havuzu içindeki bölgenin, $8,72 \pm 1,24 \mu\text{m}$ 'lik önemli ölçüde daha küçük bir tane boyutuna sahip olduğunu göstermektedir. Bu daha küçük tane boyutu, hızlı

katılma ve üretim sürecindeki termal döngülerden kaynaklanmaktadır. Eriyik havuzunun içindeki tanelerin yönlenmesi, üretim ısısının etkisi altında ve ısı kaynağının hareket yönüne bağlı olarak şekillenmiştir. (111) yönü, eriyik havuzunun içindeki taneler, ısısının etkisiyle çoğunlukla bu kristalografik düzleme doğru yönelmiştir. Bu yön, eriyik havuzunun merkezi ve çevresindeki tanelerde gözlenen baskın yönlenme olarak karşımıza çıkar. Malzemenin yüksek sıcaklık altındaki katılma sürecinde, bu yönelme eğilimi yaygın olarak görülür. (001) yönü, taneler, ısı kaynağının hareket yönü olan (001) yönüne doğru yönelmiştir. Bu yönelme, WAAM sırasında ısı kaynağının hareket ettiği doğrultuya paralel bir şekilde tanelerin uzamasına neden olmuştur. Isı kaynağı hareket ederken, soğuma ve katılma işlemi boyunca taneler (001) eksenini boyunca büyür ve bu doğrultuda yönelme gösterir.

WAAM yönteminin temelinde yer alan katman katman biriktirme süreci, her yeni katmanın bir önceki katmanı yeniden ısıtmasıyla sonuçlanır. Bu süreç, önceki katmanda katılmış yapının tekrar yüksek sıcaklıklara maruz kalmasına neden olur. Bunun bazı önemli mikro yapısal etkileri vardır [16]. Bunlar;

Tane Sınırı Göçü: Isı etkisiyle, daha önce katılmış olan tanelerin sınırları yer değiştirir ve tane sınırı göçü meydana gelir. Bu, malzemenin yeniden düzenlenmesine yol açarak tane yapısını etkiler. Tane sınırı göçü, genellikle daha düşük enerji konfigürasyonlarına ulaşma eğilimindedir ve tanelerin yeniden büyümesine yol açar.

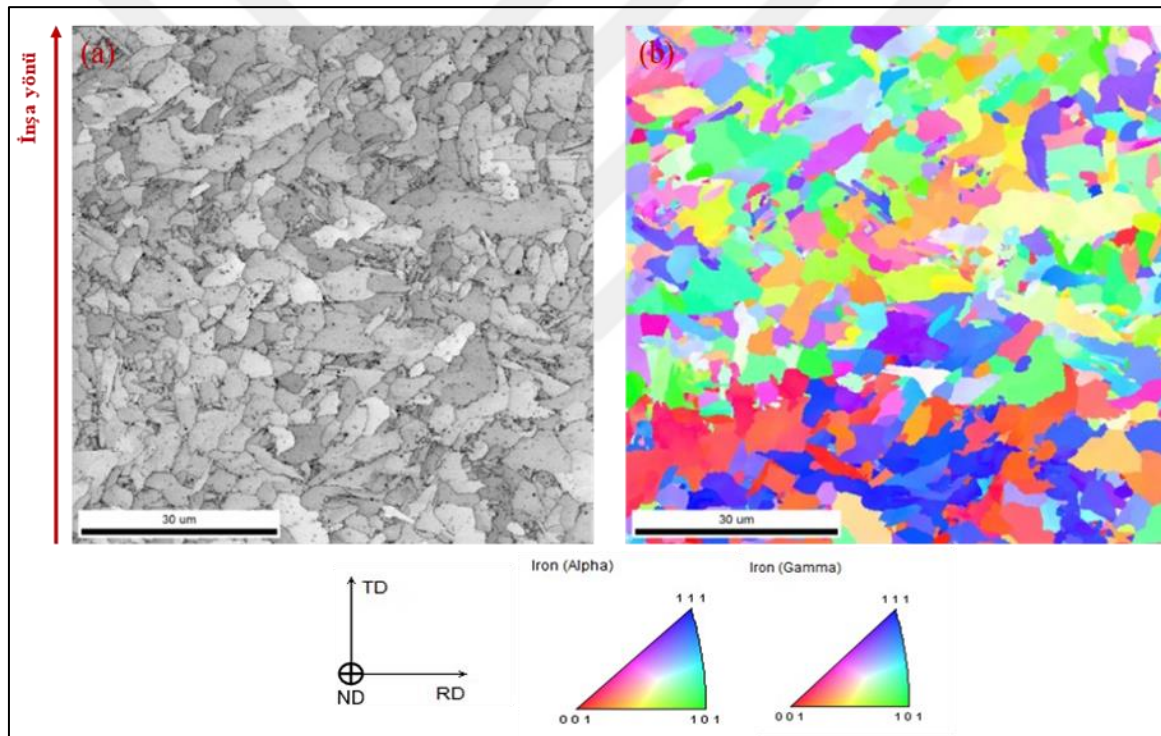
Tane Büyümesi: Her bir yeni eriyik havuzu sınırı yakınında, ısısının etkisiyle taneler büyümeye başlar. Bu büyüme, özellikle ITAB belirgin bir şekilde görülmüştür. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan bu bölgelerde, tane büyümesi kaçınılmaz olarak malzeme yapısını değiştirir. Daha büyük taneler genellikle malzemenin mukavemetini düşürebilir ve kırılganlığı artırabilir.

Mikroyapısal Düzensizlikler: WAAM yönteminde katman katman biriktirme sürecinin bir sonucu olarak, her katman arasında termal geçmişin farklı olması nedeniyle mikroyapısal düzensizlikler ortaya çıkar. Eriyik havuzu sınırlarında ve ITAB'larda tane boyutunda ve yönelmesinde farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu düzensizlikler, malzemenin genel mikro yapısında heterojen bir yapıya yol açar.

Anizotropik Mekanik Davranış: Bu tür düzensizlikler, malzemenin farklı yönlerinde farklı mekanik özellikler sergilemesine, yani anizotropik mekanik davranışa yol açar. Tane boyutu

ve yönlenmesindeki bu çeşitlilik, bileşenin belirli doğrultularda farklı dayanım, tokluk veya kırılma davranışı göstermesine neden olabilir. Anizotropi, genellikle istenmeyen bir özelliktir, çünkü bileşenin çeşitli mekanik yüklemeler altında öngörülemez davranmasına neden olmaktadır.

Şekil 5.15, harici ısıtıcılar kullanılarak üretilen WAAM duvarının EBSD görüntülerini sunmakta ve bu görüntüler, Şekil 4.14a'daki 3. bölgeye karşılık gelmektedir. Görüntüler, numunenin tam katman bölgesinden, yani merkezinden alınmıştır. Harici ısıtıcılarla yapılan bu üretimde, elde edilen ortalama tane boyutu $12,62\ \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür ve bu sonuç, OM görüntüleriyle tutarlılık göstermektedir.



Şekil 5.15. Harici ısıtıcılı WAAM için EBSD analiz görüntüsü: (a) IQ haritası, (b) IPF haritası ve ayrıntılar

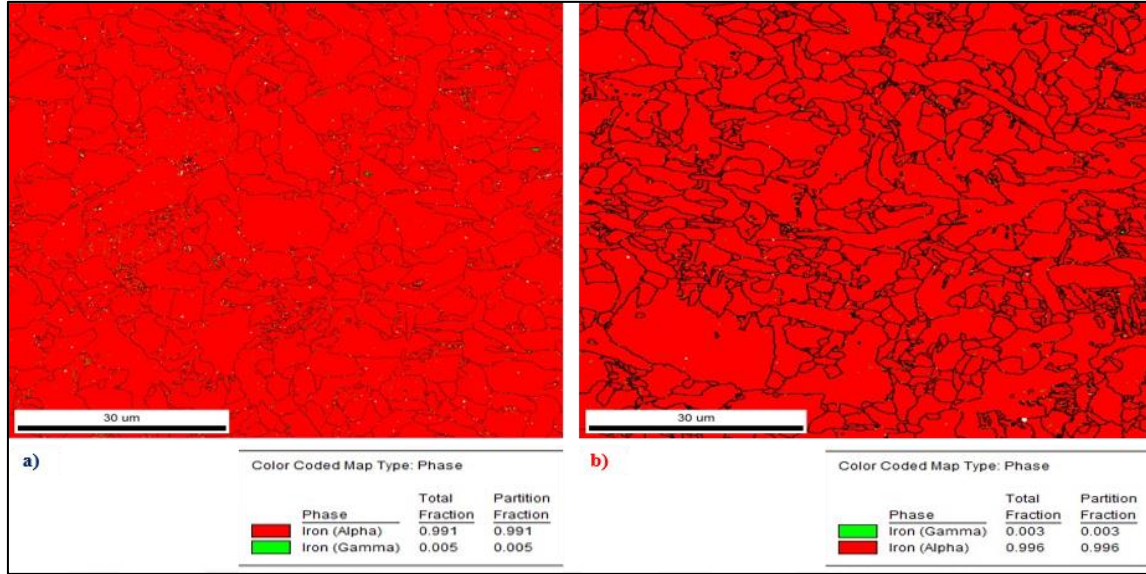
Harici ısıtıcıların kullanımı, katmanlar arası termal dengelenmeyi sağlayarak tanelerin büyümesi ve yönlenmesi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmuştur. Tanelerin yönlenmesi incelendiğinde, harici ısıtıcıların etkisi altında tanelerin (111), (101) ve (001) kristalografik yönlerinde neredeyse eşit bir yönlenme gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu, tanelerin belirli bir kristal yönüne doğru tercihli bir yönlenme göstermediğini, bunun yerine farklı kristal eksenlerine göre rastgele yönlenmiş olduklarını işaret etmektedir. Harici ısıtıcıların

kullanımı, tanelerin büyüme yönünü dengeleyerek anizotropik yönlenmelerin azalmasına katkıda bulunmuş olabilir. Bunun sonucunda, malzemede izotropik mekanik özellikler sergilenmesi beklenebilir. Ancak, tanelerin (111), (101), ve (001) yönlerine eşit derecede yönlenmesi, malzemenin belirli eksenlere yönelik herhangi bir zayıflık veya güçlülük sergilemeyeceğini de gösterir. Bu yönlenme dağılımı, WAAM sürecinde harici ısıtıcıların malzemenin iç yapısında daha homojen bir termal etki yarattığını göstermektedir.

Bu bulgular, WAAM sürecinde harici ısıtıcıların etkisini anlamak açısından oldukça önemlidir. Özellikle, WAAM numunesinin aksine, harici ısıtıcılarla üretilen numunede ortalama tane boyutunun üretim yönü boyunca tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, numunedeki ITAB ve erime havuzu gibi farklı bölgelerin tanımlanmasını zorlaştırmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, harici ısının mikroyapıda tane boyutu değişkenliğini önemli ölçüde azalttığını bu yaklaşımla mümkün olabileceğini göstermektedir. Bu da harici ısıtıcıların WAAM süreçlerinde kullanılmasıyla daha homojen bir mikroyapı ve daha tutarlı mekanik özellikler elde edilebileceğini ortaya koymaktadır.

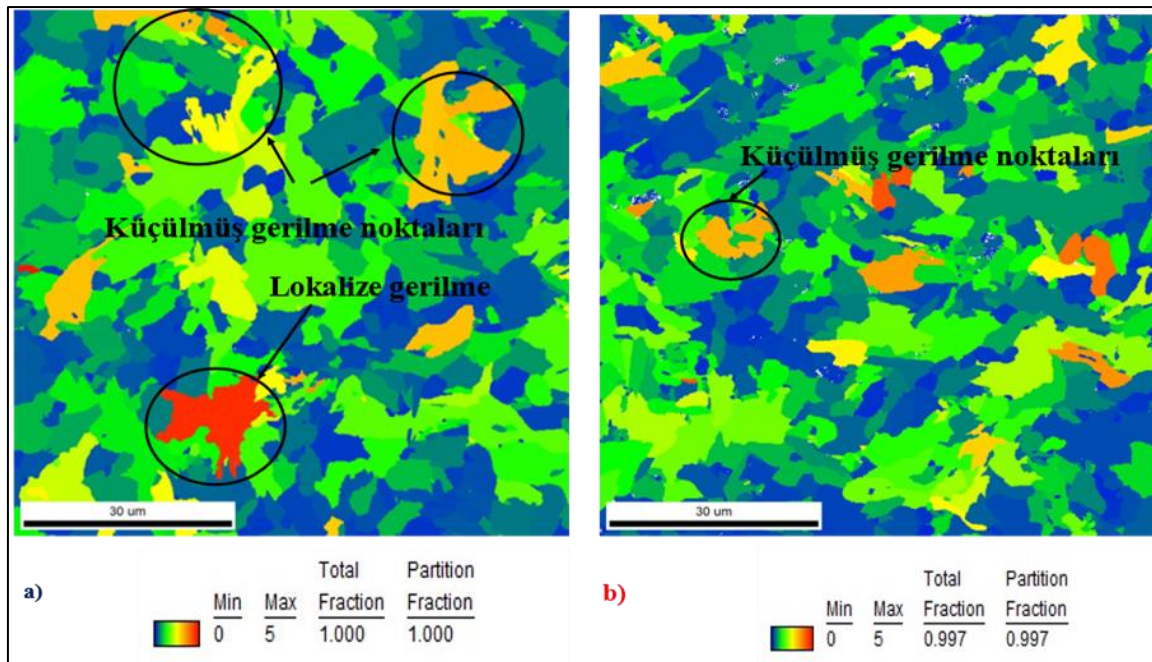
Hem WAAM hem de harici ısıtıcılı WAAM numunelerinde belirgin bir tane yönlenmesi gözlenmemiştir. EBSD analizleri numunelerin orta bölgesinde yapıldığı için WAAM üretiminde tekrarlayan ısınma tane yöneliminin önüne geçmiştir. Harici ısıtıcılı WAAM üretimi tane yönlenmesine ilave olarak tane boyutlarının da tekrarlayan ısıdan etkilenmesini engellemiştir.

Şekil 5.16'da harici ısıtıcılı WAAM ve WAAM numunelerinin faz haritaları gösterilmektedir. Her iki malzeme de ferrit fazından oluşurken, katılaşma sırasında tutulan bir miktar östenit esas olarak ferrit tane sınırları boyunca dağılmıştır. Alfa ferrit fazını (Hacim merkezli kübik, HMK), gama ise östenit fazını (Yüzey merkezli kübik, YMK) [94] temsil etmektedir. Östenit ferritten daha sert bir yapı olduğu için (çünkü daha yüksek karbon çözünürlüğü ve daha yoğun atomik yapısı (YMK yapısı) vardır) [95] WAAM numunesinin sertliğini arttırmıştır. Bu durum katılaşma sırasında ısının hızlı bir şekilde uzaklaştırılması ve dönüşüm kinetiğinin bu hızla uyum sağlayamamasıyla açıklanabilir. Harici ısıtma östenit yapısının ferrit haline dönüşmesine neden olmuştur bu durum sertliği düşürmektedir.



Şekil 5.16. Duvarların faz haritaları (a) WAAM (b) Harici ısıtıcılı WAAM

GOS (Grain Orientation Spread) analiz haritaları, malzemenin iç yapısındaki kalıntı gerilmeler ve dislokasyon yoğunlukları hakkında önemli bilgiler sunar [96]. Şekil 5.17’de, WAAM numunesi ile harici ısıtıcılı WAAM numunesinin karşılaştırıldığı, GOS haritaları verilmiştir. WAAM numunesinde belirgin şekilde görülen büyük turuncu ve kırmızı alanlar, yüksek GOS değerlerini işaret eder.



Şekil 5.17. Duvarların GOS analiz haritaları (a) WAAM (b) Harici ısıtıcılı WAAM

Bu alanlar, malzeme içinde yoğun kalıntı gerilmelerin ve dislokasyonların biriktiği yerlerdir. Bu tür lokalize bölgeler, malzemenin belirli kısımlarında yüksek iç gerilmeler ve mikroyapısal düzensizlikler olduğunu gösterir. Bu, özellikle WAAM işleminin hızlı soğuma, termal gradyanlar ve kontrolsüz ısı dağılımı nedeniyle oluşabilir. Harici ısıtıcıların kullanıldığı WAAM numunesinde, GOS haritasında turuncu ve kırmızı alanlar daha küçük ve homojen olarak dağılmıştır. Bu, kalıntı gerilmenin ve dislokasyonların daha dengeli bir şekilde dağıldığını ve malzemenin genel yapısında daha az iç gerilme olduğunu düşündürmektedir. Harici ısıtıcılar, termal süreçlerin daha iyi yönetilmesini sağlar, böylece ısı dağılımı ve soğuma süreci daha kontrollü hale gelir. Bu, mikroyapısal homojenliği artırır ve anizotropiyi azaltır.

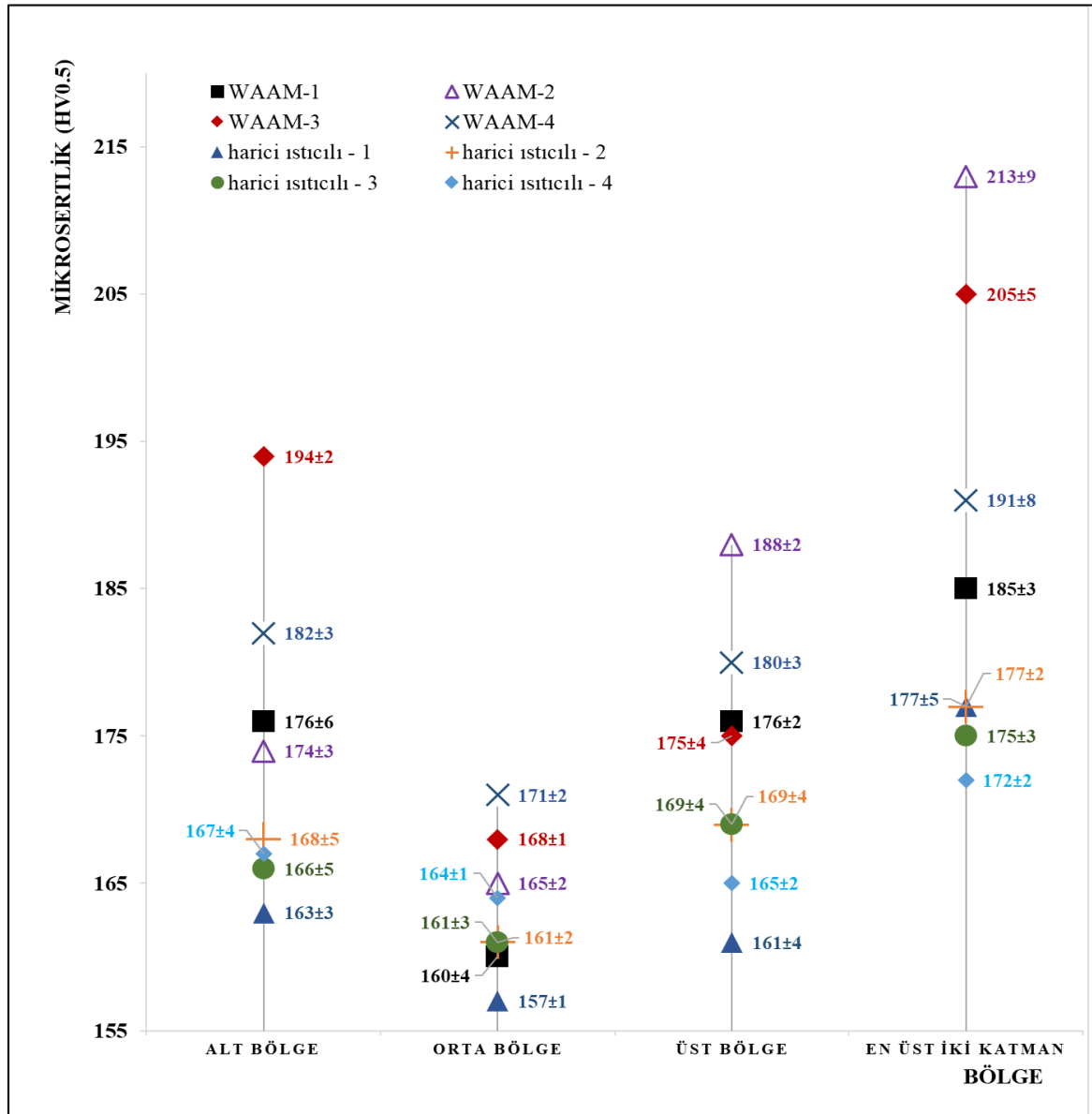
5.1.5. Mikrosertlik analizi

İnşa yönü boyunca dört farklı yükseklikte (Şekil 4.14b) dört farklı duvar kesitinin (Şekil 4.14a) mikrosertliği ölçülmüştür. Şekil 5.18, WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen duvarlar için farklı yükseklik ve kesitlerdeki ortalama mikrosertlik değerlerini ve ölçüm bölgesindeki ortalama sapma değerlerini göstermektedir. WAAM duvarının ortalama mikrosertlik değerleri alt bölge için 182 ± 10 HV (İng. Hardness Vicker's), orta bölge için 160 ± 5 HV, üst bölge için 180 ± 6 HV ve üst iki katman için 200 ± 10 HV olarak ölçülmüştür; bu sonuçlar ilgili literatürle uyumludur [65, 77, 97].

Harici ısıtıcılı WAAM numunesi için yapılan mikrosertlik ölçümleri, farklı bölgelerde değişiklik göstermektedir. Alt bölge için mikrosertlik değeri 166 ± 3 HV, orta bölge için 162 ± 4 HV, üst bölge için 166 ± 3 HV ve üst iki katman için ise 175 ± 3 HV olarak belirlenmiştir. Bu sertlik değerlerinde gözlenen değişimler, malzemenin mikro yapısındaki farklılıklarla doğrudan ilişkilidir.

Sertlikteki bu düşüşler, özellikle yapıdaki ferrit tanelerinin boyutu ve miktarı ile bağlantılıdır [78]. Daha büyük ve daha fazla ferrit tanelerinin varlığı, malzemenin sertliğinin azalmasına neden olabilmektedir. Ferrit tanelerinin ince ve homojen yapıda olması, genellikle daha yüksek sertlik değerlerine katkıda bulunurken, tanelerin büyümesi ve miktarının artması malzemenin yumuşamasına yol açar.

Bu bağlamda, mikrosertlik ölçümleri hem SEM görüntüleri hem de diğer mikroyapısal gözlemlerle tutarlılık göstermektedir. SEM ve mikroyapı analizlerinde görülen tanelerin büyüklüğü ve dağılımı, sertlikteki bu bölgesel farklılıkları açıklayabilir. Üst iki katmanda gözlemlenen daha yüksek sertlik, muhtemelen hızlı soğuma sonucu oluşan daha ince ve sıkı tanelerle ilişkili olabilir. Bu gözlemler, harici ısıtıcılı WAAM işleminin malzemenin mikro yapısında ve mekanik özelliklerinde nasıl bir etkiye sahip olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır.

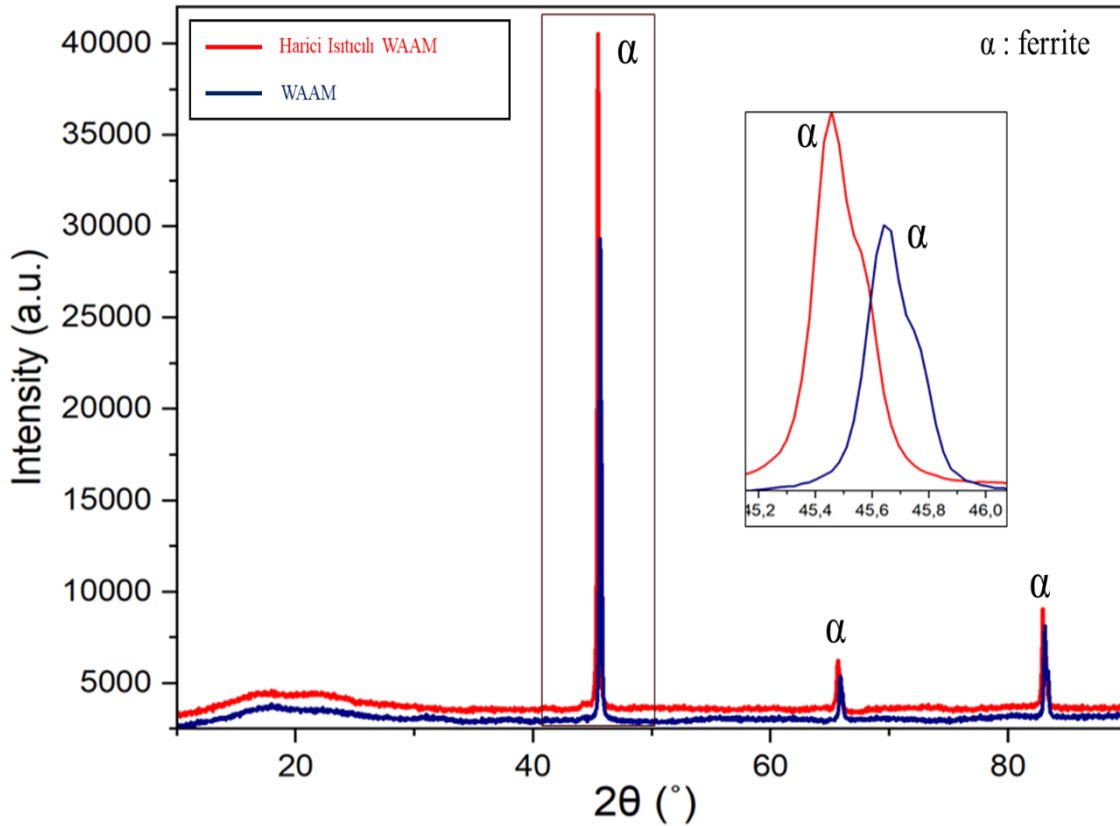


Şekil 5.18. WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen duvarlar için ortalama Vicker's mikrosertliği

5.1.6. XRD analizi

X-Işını kırınımı (XRD), malzeme biliminde toz veya dökme malzemelerin iç yapılarını incelemek için kullanılan, tahribatsız kantitatif yöntemdir [98]. XRD yöntemi, deformasyonun varlığını, mikro deformasyonu ve alan boyutunu daha iyi analiz etmek için kullanılır.

ER70S-6 duvarların XRD modeli 2. bölgede (bkz. Şekil 4.14a) inşa yönü boyunca orta bölgelerden faz tanımlaması için ölçümler yapılmıştır. Elde edilen spektrumlar WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen duvarlar için Şekil 5.19'da verilmiştir. Görüldüğü gibi, WAAM duvarı JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) 98-000-9982 modellerine göre [79, 98-100] $45,66^\circ$, $65,91^\circ$ ve $83,15^\circ$ 'de 2θ 'da α -Demirden (HMK, ferrit) oluşmuştur. Harici ısıtıcılı WAAM duvarı için aynı desen sırasıyla $45,48^\circ$, $65,7^\circ$ ve $82,93^\circ$ idi. Burada, WAAM durumu için elde edilen yoğunluğun daha düşük olduğu ve sağa doğru bir kayma olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.19. WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen duvarların orta bölgesindeki XRD analiz sonuçları

Luo ve diğerleri [101] numunede indüklenen termal stresin daha yüksek sıcaklık ve daha büyük havuz boyutundan kaynaklandığını bulmuştur. Bu durumu, tane irileşmesinden kaynaklanan daha yüksek bir enerji yoğunluğu olarak değerlendirmişlerdir. Dolayısıyla, bunun kırınım pik yoğunluğunda bir değişikliğe yol açması muhtemeldir. Sonuç olarak, maksimumun yarıdaki tam genişlikte bir azalma olabilir. Yazarlar ayrıca kırınım deseninin sağa kaymasının kristal kafes parametresinin küçüldüğünü gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, Brag yasasına göre ($2d\sin\theta = n\lambda$), kırınım deseninin sağa kaymasının, dalga boyu λ sabit kaldığında kristalin kafes parametresinin küçülmesine neden olduğunu göstermişlerdir. Kafes parametrelerindeki büzülmenin baskılanmış 316L paslanmaz çeliklerin içindeki kalıntı basınç gerilmesinden kaynaklanabileceğini düşünmüşlerdir. WAAM numunesinde kırınım deseninde benzer bir sağa kayma gözlemlenmiştir. WAAM numunesindeki bu sağa kayma, kristal yapıdaki kusurların aşırı olduğunu göstermektedir. Böylece kristal yapıdaki kusurlar dislokasyonlar üretmiştir. OM ve SEM görüntüleri ile mikrosertlik ölçümleri, XRD sonuçları ve Lou ve arkadaşlarının kalıntı gerilme yorumuyla uyumludur.

5.2. Farklı Geometriler Deneysel Çalışma Sonuçları

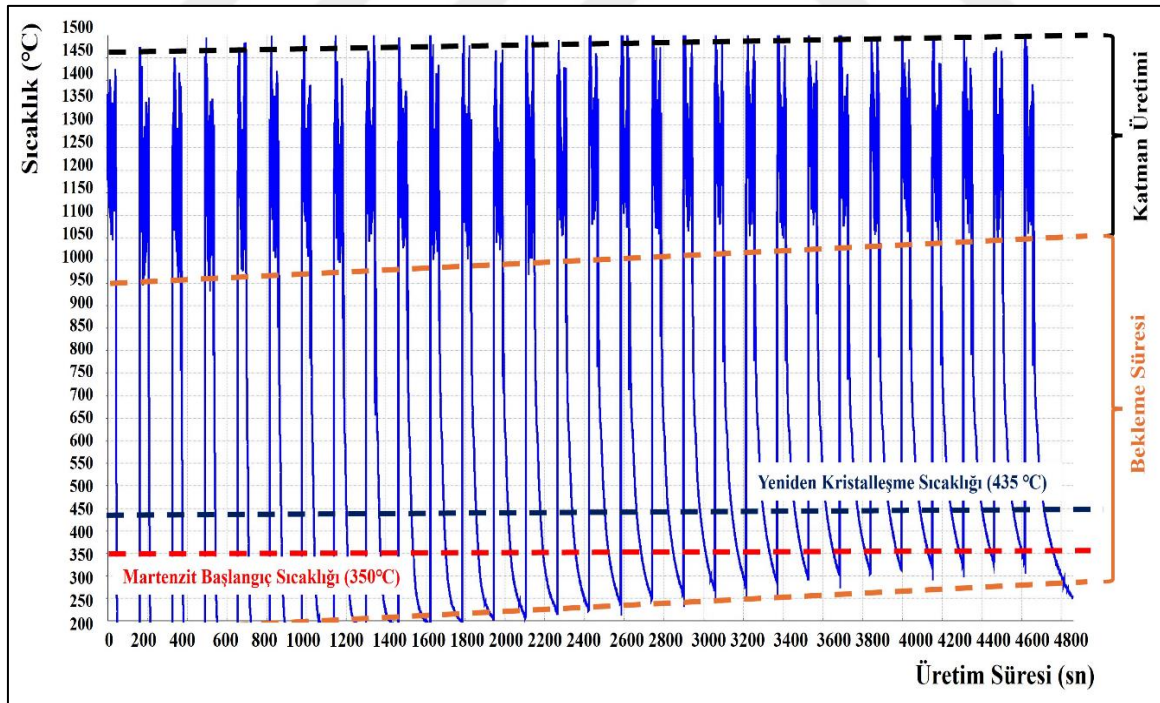
WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM ile üretilen 4 farklı geometri, bu geometrilerin üretiminden ve çıkarılan numunelere yapılan testlerden elde edilen sonuçlar bu bölümde tartışılmıştır. Öncelikle üretimde boyunca elde edilen termal veriler verilmiştir. Daha sonra ise üretilen geometri ve numunelere yapılan testlerin sonuçları tartışılmıştır.

5.2.1. Üretim sürecince termal davranış ve yüzey morfoloji

WAAM işleminin termal döngüsünü daha iyi analiz edebilmek amacıyla, tam otomatik WAAM tezgahına bir termal kamera eklenmiştir. Bu sayede, üretim sürecindeki ısı ve soğutma döngüleri detaylı bir şekilde incelenebilmiştir. Bu çalışma kapsamında, üretim süreci Çizelge 4.5'te verilen dört farklı geometri için kayıt altına alınmış ve elde edilen termal veriler analiz edilmiştir. Üretim geometrileri belirlenirken sade, düz duvarlara sahip, karşılıklı paralel duvarların oluşturduğu, üretimi kolay olan tek kaynak dikişi ile üretilecek yapısal bütünlüğe sahip geometriler seçilmiştir. Bu bölümde, WAAM işlemi sırasında gözlemlenen termal davranışlar ve bu davranışların farklı geometriler üzerindeki etkileri detaylı olarak ele alınacaktır.

Termal kameralar, nesnelerin yüzey sıcaklıklarını belirlemek için kullanılan hassas cihazlardır ve doğru ölçümler yapabilmeleri için çeşitli kalibrasyonlar gerektirir. Bu kalibrasyonlardan biri de emisyon değeridir. Termal kameralar, yüzey sıcaklıklarını doğru bir şekilde ölçmek için emisyon değerine ihtiyaç duyar. Emisyon, bir malzemenin enerji yayma kabiliyetinin bir ölçüsüdür ve genellikle 0-1 arasında bir değere sahiptir. Tamamen siyah bir cisim (ideal radyatör) için emisyon 1'dir ve bu, maksimum enerji yayma kabiliyetine sahip olduğu anlamına gelir. Emisyon değeri 0 olan bir yüzey ise hiç enerji yaymaz. Bu çalışmada emisyon değeri $\epsilon=0,930$ olarak seçilmiştir. Üretimler sürecince termal kameranın 200-1500 °C aralığında sıcaklık değerlerini ölçebilen modunda üretimlerin termal sürecini kaydetmiştir.

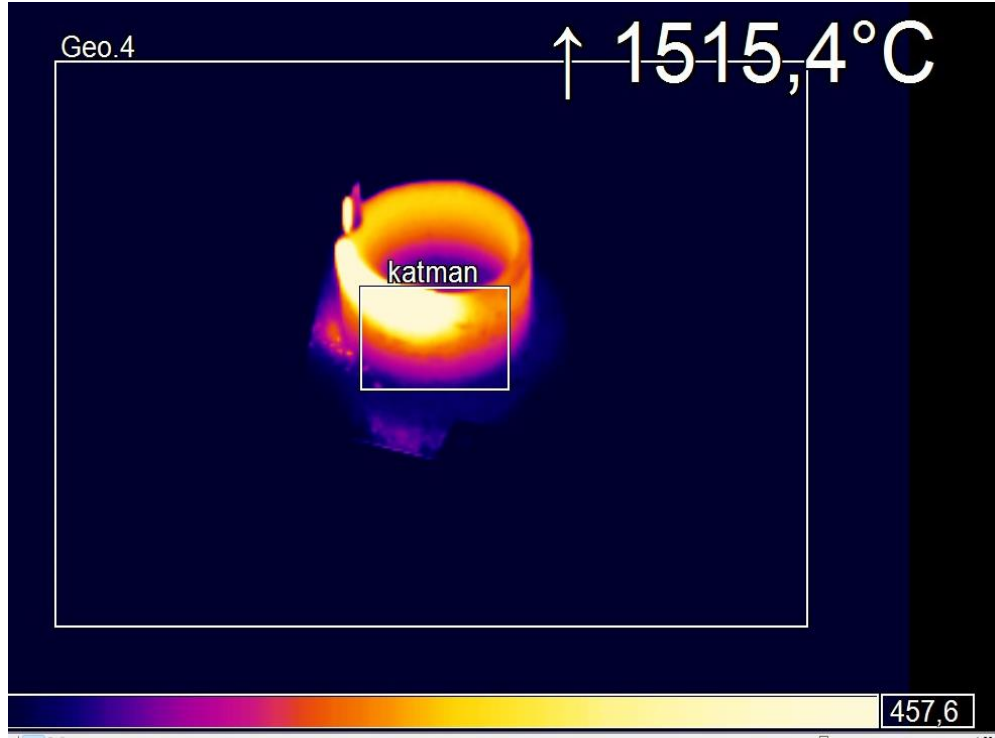
Üretilen geometrilere ait termal kamera görüntüleri, Optris PIX Connect (Rel. 3.18.3103.0) yazılımı ile analiz edilmiştir. Bu yazılım kullanılarak yapılan analizler, termal davranışları ve farklı geometriler üzerindeki ısı-soğutma döngülerini ortaya koymuştur. Analizlerden elde edilen sonuçlar, bu bölümde detaylandırılarak sunulmuştur. Üretilen geometriler için termal kayıtlar aşağıda Şekil 5.20'de verilmiştir.



Şekil 5.20. Geometri 1 için WAAM üretiminin termal geçmişi

Şekil incelendiğinde, üretim süresince her yeni katman üretiminde sıcaklığın telin ergime sıcaklığı olan 1400 – 1500 °C aralığına yükselmektedir. Katman üretimine ait termal kamera

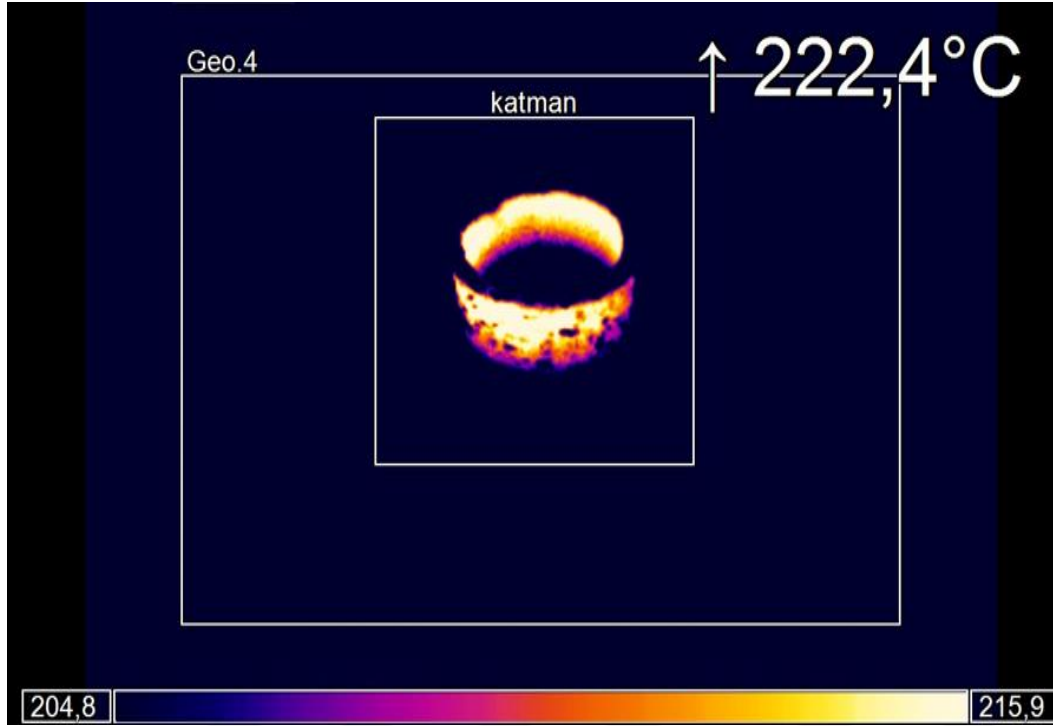
görüntüsü Şekil 5.21’de verilmiştir. Her yeni katmanda bu kontrolsüz ısı önceki katmanların sıcaklığını artırmakta ve katmanların katılma, soğuma döngüsüne müdahale etmektedir.



Şekil 5.21. WAAM işleminde katman üretimi sırasında parçada oluşan anlık sıcaklık

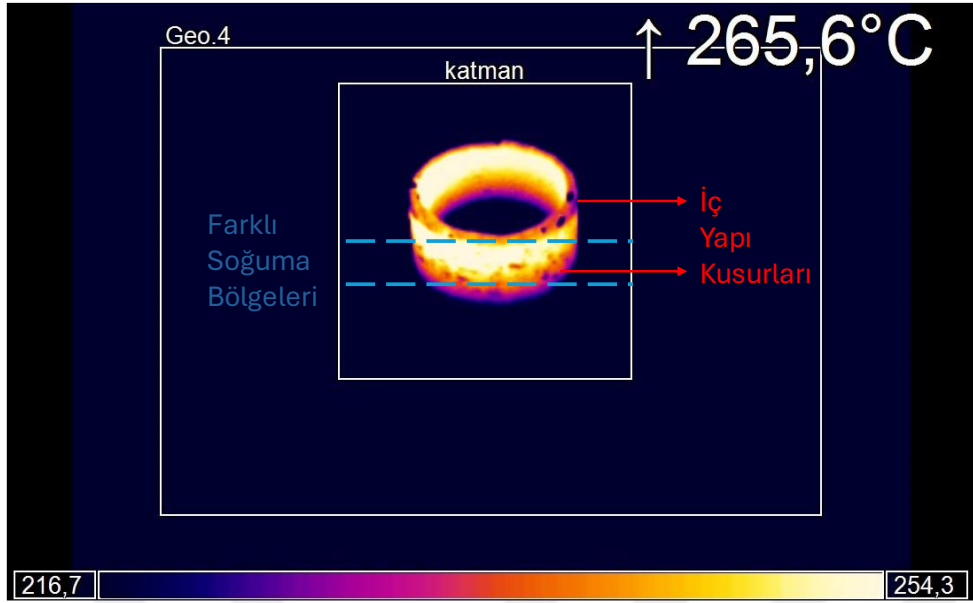
Katman üretimi tamamlandığında ise sıcaklık hızla 200 °C'ye düşmektedir. Bu sıcaklık değişimi, bekleme süresi olan 90 saniye boyunca 1500 – 200 °C aralığında seyretmektedir. Bekleme süresi sonunda elde edilen termal kamera görseli ise Şekil 5.22’de verilmiştir. Üretim sürecinde her yeni katmanın eklenmesiyle birlikte bu termal döngü tekrar etmektedir. Bu büyük termal dalgalanma, malzeme üzerinde çeşitli olumsuz etkiler yaratmaktadır. İlk olarak, sıcaklık artışı ve düşüşü sırasında meydana gelen termal gerilmeler, üretim geometrisinde kalıcı deformasyonlara yol açabilmektedir. Bu deformasyonlar, nihai ürünün boyutsal doğruluğunu ve yapısal bütünlüğünü olumsuz etkilemektedir. İkinci olarak, sürekli ısınma ve soğuma döngüleri, malzeme içerisinde kalıntı gerilmelerin birikmesine neden olur. Kalıntı gerilmeler, malzemenin iç yapısında çatlakların oluşmasına ve yayılmasına sebep olabilir, bu da malzemenin mekanik özelliklerini zayıflatır ve uzun vadede kullanım ömrünü kısaltabilir. Son olarak, bu termal dalgalanmalar, iç yapı kusurlarının ortaya çıkmasına neden olabilir. Örneğin, hızlı soğuma sırasında malzeme içinde mikro çatlaklar veya gözenekler oluşabilir. Bu kusurlar, malzemenin dayanıklılığını azaltır ve beklenmedik arızalara yol açabilir. Bu nedenlerden dolayı, WAAM üretiminde sıcaklık kontrolü ve termal yönetim

stratejileri büyük önem taşımaktadır. Termal dalgalanmaların minimize edilmesi, ürün kalitesini ve güvenilirliğini artırmak için kritik bir faktördür.



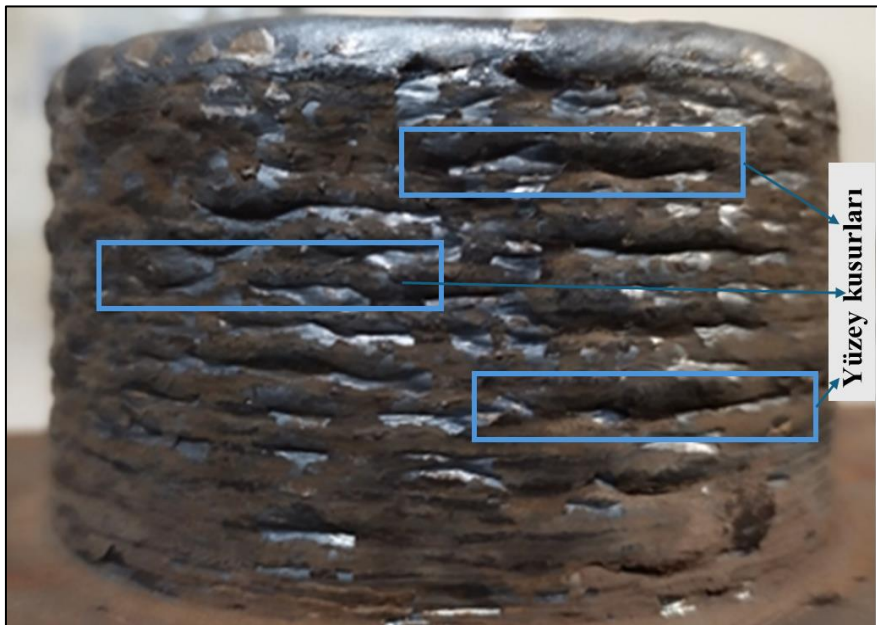
Şekil 5.22. WAAM işleminde bekleme süresi sonunda parçada oluşan sıcaklık

Kontrolsüz termal geçmiş, malzemede çeşitli kusurların oluşmasına neden olmaktadır. Üretim sürecinde meydana gelen büyük termal dalgalanmalar, özellikle malzemenin yüzeyinde ve iç yapısında istenmeyen kusurlara yol açabilir. Yüzey kusurları, çıplak gözle yapılan muayenelerle tespit edilebilecek seviyededir ve bu kusurların varlığı, malzemenin genel kalitesini ve işlevselliğini olumsuz etkiler [34, 49, 102, 103]. Bu kusurların temeli olan kontrolsüz soğuma ve parçanın farklı bölgelerinde farklı soğuma rejimleri parçanın yüzeyinde istenmeyen yapısal kusurlara sebebiyet vermektedir. Parçanın farklı bölgelerinde gerçekleşen farklı soğuma rejimleri Şekil 5.23'te verilmiştir. Bu kontrolsüz soğuma parçada iç yapı hatalarına, birleşme kusurlarına ve nihayetinde mekanik özelliklerin bozulmasına sebep olmaktadır. Şekil 5.23'te bekleme süresi sonuna doğru oluşan sıcaklık dağılımı net olarak görülmektedir. Farklı soğuma rejimi parçada kusurların oluşmasına sebep olurken, farklı soğuma bölgeleri parçanın termal kaynaklı gerilmeler üretmesine sebep olmaktadır.



Şekil 5.23. WAAM işleminde parçada oluşan farklı soğuma rejimleri

Termal döngülerin neden olduğu bu yüzey kusurları, üretilen geometrilere ait fotoğraflarda açıkça görülmektedir. Fotoğraflarda, yüzeyde oluşan çatlaklar, deformasyonlar ve düzensizlikler net bir şekilde gözlemlenebilir. Bu tür kusurlar, sadece estetik açıdan değil, aynı zamanda mekanik performans ve dayanıklılık açısından da önemli sorunlar yaratmaktadır. Şekil 5.24'te görülen kusurlar kontrolsüz ve hızlı soğumanın temel sonucudur.

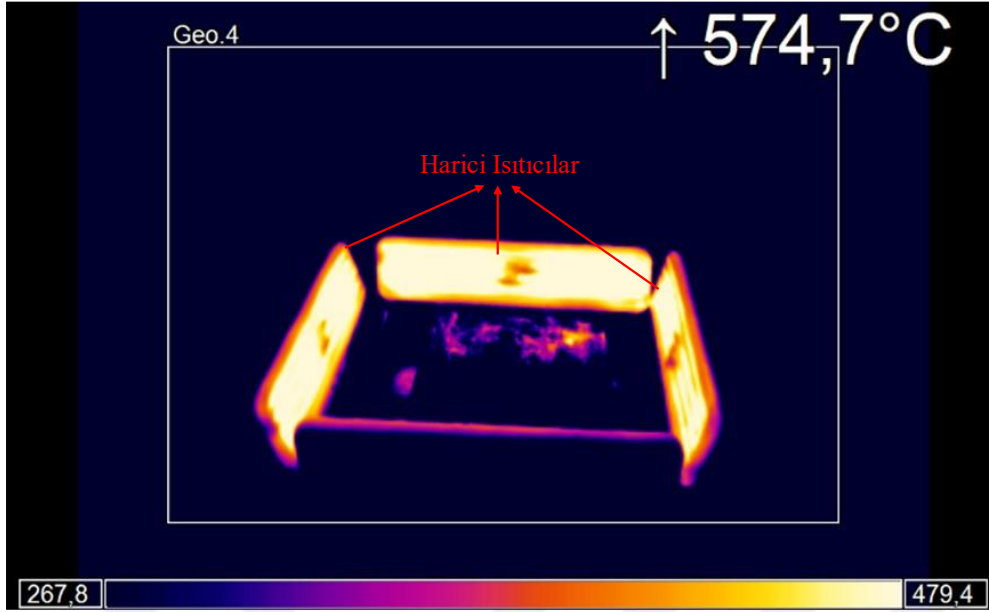


Şekil 5.24. WAAM üretimine ait numunenin (Geo.4) yüzey kusurları

Parçanın farklı bölgelerinde oluşan farklı soğuma rejimleri beraberinde farklı yönlerde gerilimler üreterek parçada istenmeyen bu kusurları oluşturmaktadır. Bu kusurların oluşmasında sadece yüzeyde oluşan hızlı soğuma değil bu soğumaya eşlik edemeyen parçanın iç kısmı da bu sorunların ikincil kaynağıdır.

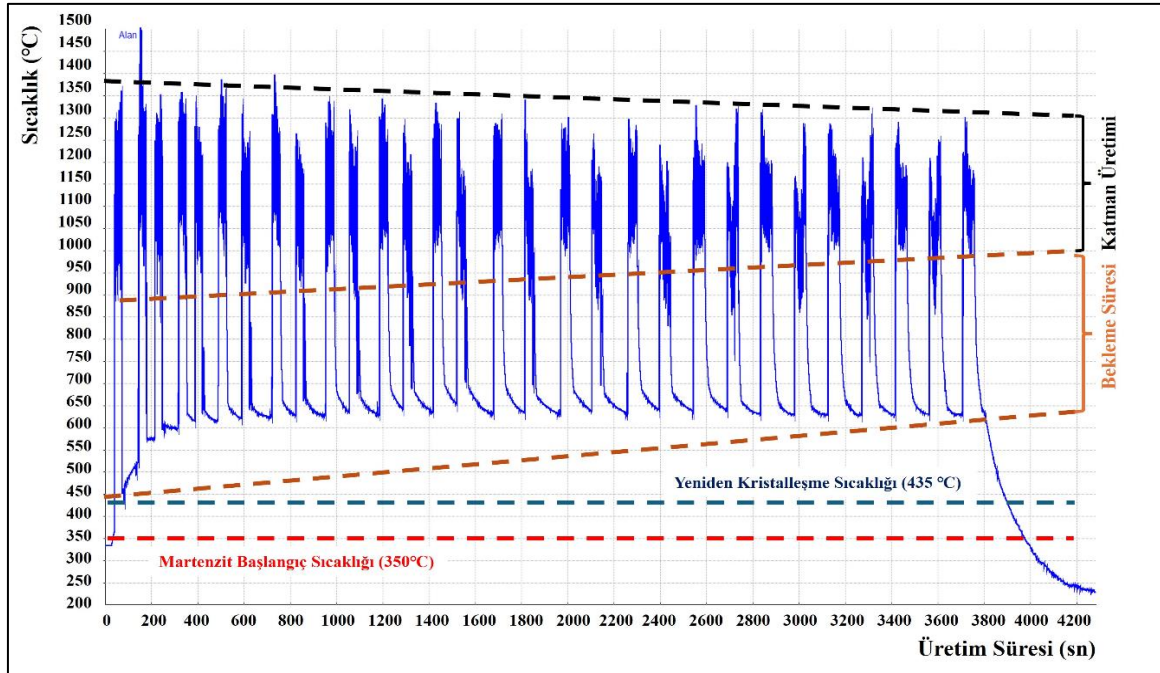
Parçada katman üretimi sonrası yüksek sıcaklıktan soğutulduğunda genellikle parçanın genelinde soğuma hızında büyük farklılıklar meydana gelir. Bu farklılıklar, parçanın yüzeyi ve iç kısmının tecrübe ettiği soğuma hızlarındaki farklardan kaynaklanır ve termal büzülmede lokalize varyasyonlara neden olur. Farklı ısı büzülme, tekdüze olmayan gerilmelerin oluşmasına yol açar. Soğuma sırasında yüzey daha hızlı soğur ve bu durum merkezdeki daha sıcak malzemeyi sıkıştırır. Bu sıkışma, merkezdeki malzemenin soğuma sürecini zorlaştırır, çünkü merkezdeki malzeme soğumaya çalışırken daha soğuk olan dış malzeme tarafından kısıtlanır. Bu süreç, malzeme içerisinde gerilimlerin oluşmasına neden olur. Sonuç olarak, iç kısımda kalıntı bir çekme gerilimi ve parçanın dış kısmında kalıntı bir basınç gerilimi oluşur. Bu iç çekme gerilimleri, malzemenin mukavemetini ve dayanıklılığını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, termal büzülmedeki bu farklılıklar, malzemede mikroyapısal değişikliklere yol açarak, çatlakların oluşmasına ve malzeme yorgunluğuna neden olabilir [19, 26, 30, 61, 104, 105]. Termal kaynaklı kalıntı gerilmeler parçada istenmeyen kusurların diğer bir kaynağıdır.

Parçada meydana gelen kontrolsüz soğuma davranışının üstesinden gelmek için, üretim sırasında parçanın etrafı harici ısı kaynakları ile çevrilmiş ve ısıнын koruyucu etkisinden faydalanılmıştır. Bir önceki bölümden farklı olarak, çalışmanın bu aşamasında parçanın etrafı dört adet ısı kaynağı ile çevrilmiştir. Bu ısıtıcılar, Şekil 5.25'te gösterildiği gibi, üretim öncesinde çalıştırılmış ve 600 °C sıcaklık verecek şekilde ayarlanmıştır. Üretim süresince ısıtıcılar aktif halde tutulmuştur. Bu düzenleme, parçanın yüzeyi ve iç kısmı arasındaki soğuma hızlarındaki farkı azaltarak, termal büzülme ve gerilmelerin kontrol altına alınmasını sağlamıştır. Isıtıcıların sağladığı sabit sıcaklık, parçanın soğuma sürecinde daha homojen bir termal dağılım elde edilmesine yardımcı olmuştur. Böylece, kontrolsüz ısı davranışlar minimize edilerek, parçada oluşabilecek termal gerilimler ve deformasyonlar azaltılmıştır.



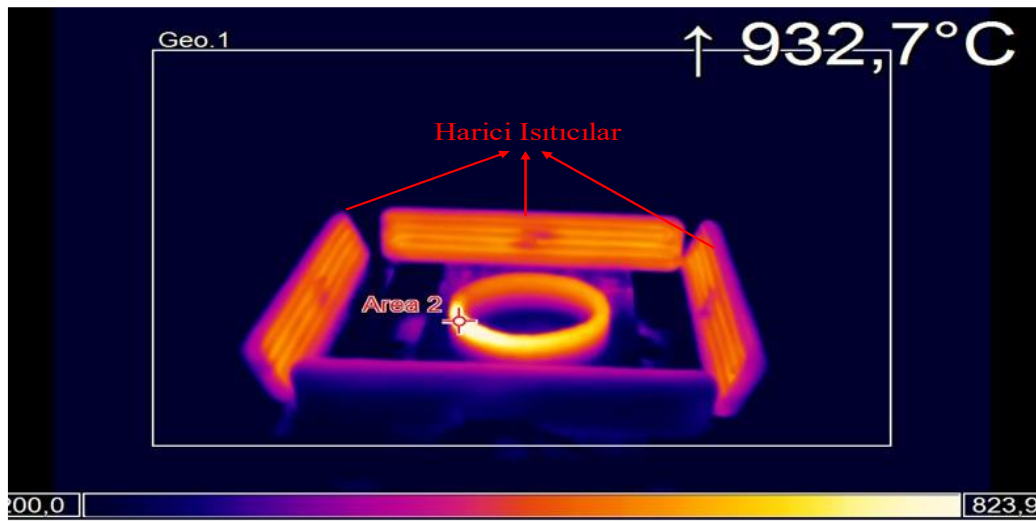
Şekil 5.25. Harici ısı kaynaklarının üretim öncesi devreye alınması

Üretim sürecinde harici ısıtıcılar aktif hale getirilmiş ve üretim bölgesinde termal bir kalkan oluşturulmuştur. Bu termal kalkan, üretim parçasının soğuma rejimine müdahale ederek, parçanın soğuma sürecini kontrol altına almıştır. Harici ısıtıcılar, üretim süresince parçanın etrafında sabit bir ısı koruması sağlayarak, parçada ani sıcaklık düşüşlerini engellemiştir. Bu müdahale neticesinde, iş parçası bekleme süresi boyunca ve sonunda kritik sıcaklıkların altına düşmeden yeni katman üretimine geçilmiştir. Özellikle yeniden kristalleşme sıcaklığı ve martenzit başlangıç sıcaklığı gibi kritik sıcaklık seviyelerinin altına inilmeden yeni katmanın üretimine başlanması, parçada istenmeyen mikro yapı değişikliklerinin önüne geçmiştir. Bu sayede, termal gerilmeler ve deformasyonlar minimize edilerek, parçada daha homojen ve kaliteli bir yapı elde edilmiştir. Harici ısıtıcılı WAAM üretimine ait termal geçmiş, Şekil 5.26’da detaylı olarak gösterilmiştir. Bu termal geçmiş, harici ısıtıcıların kullanımının, üretim süreci boyunca parça üzerinde nasıl bir etkisi olduğunu ve sıcaklık dağılımının nasıl kontrol edildiğini açıkça ortaya koymaktadır. Harici ısıtıcıların oluşturduğu termal kalkan sayesinde, üretim parçasının yüzeyi ve iç kısmı arasındaki sıcaklık farkı azaltılmış, bu da termal büzülmelerin ve iç gerilmelerin kontrol altında tutulmasına olanak sağlamıştır.



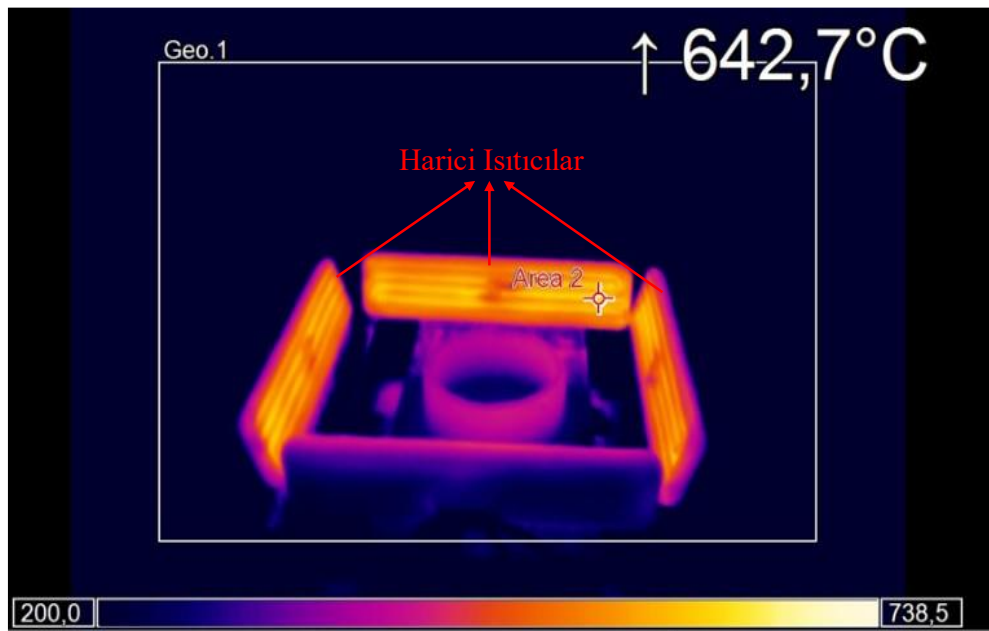
Şekil 5.26. Geometri 1 için harici ısı kaynaklı WAAM üretiminin termal geçmişi

Katman üretimi ve bekleme süresi sonrasında, WAAM işleminde sıklıkla görülen kontrolsüz soğuma neticesinde oluşan farklı soğuma rejimi ve bölgeleri bu aşamada asgari seviyededir. Harici ısıtıcıların kullanımı, iş parçasının soğuma sürecini düzenleyerek, parça üzerinde homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır. Bu düzenleme, üretim sürecinde istenmeyen termal varyasyonları ve bölgesel soğuma farklılıklarını ortadan kaldırmıştır. Bu durum üretim katman üretimi sonrasına ait termal kamera görüntüsünde açıkça görülmektedir. Şekil 5.27 bu durumu göstermektedir.



Şekil 5.27. Harici ısı kaynaklı WAAM için katman üretimi sonrası termal geçmiş

Harici ısıtıcılar, üretim parçasının yüzeyinde ve iç kısmında oluşabilecek ani sıcaklık değişimlerini minimize ederek, termal gerilmeleri ve deformasyonları önemli ölçüde azaltmıştır. Sonuç olarak, parçada kontrollü ve dengeli bir soğuma sağlanmış, böylece malzeme üzerinde oluşabilecek mikroyapısal kusurlar ve kalıntı gerilmeler en aza indirilmiştir. Bekleme süresinin sonunda parçada oluşan termal geçmiş, Şekil 5.28'de detaylı olarak gösterilmiştir. Bu şekil, harici ısıtıcıların etkinliği ile elde edilen sıcaklık profillerini ve soğuma davranışlarını açıkça ortaya koymaktadır. Isıtıcıların sağladığı koruyucu sıcaklık etkisi, parça üzerinde daha dengeli bir termal yönetim sağlanmasına olanak tanımıştır.



Şekil 5.28. Harici ısı kaynaklı WAAM için bekleme süresi sonunda parçada oluşan termal geçmiş

Kontrol altına alınan termal davranış, öncelikle yüzey kusurlarının giderilmesinde önemli bir etki göstermektedir. Üretim süresince verilen harici ısı ile parçanın dış yüzeyi ile iç kısmı arasındaki sıcaklık farkı azaltılmış ve bu sayede termal kaynaklı yüzey kusurları engellenmiştir. Harici ısı kaynaklı olarak üretilen WAAM parçasının görseli Şekil 5.29'da verilmiştir.



Şekil 5.29. Harici ısı kaynaklı WAAM parçasının yüzey görünümü: yüzeydeki katman profili ve katmanlı yapının detayları

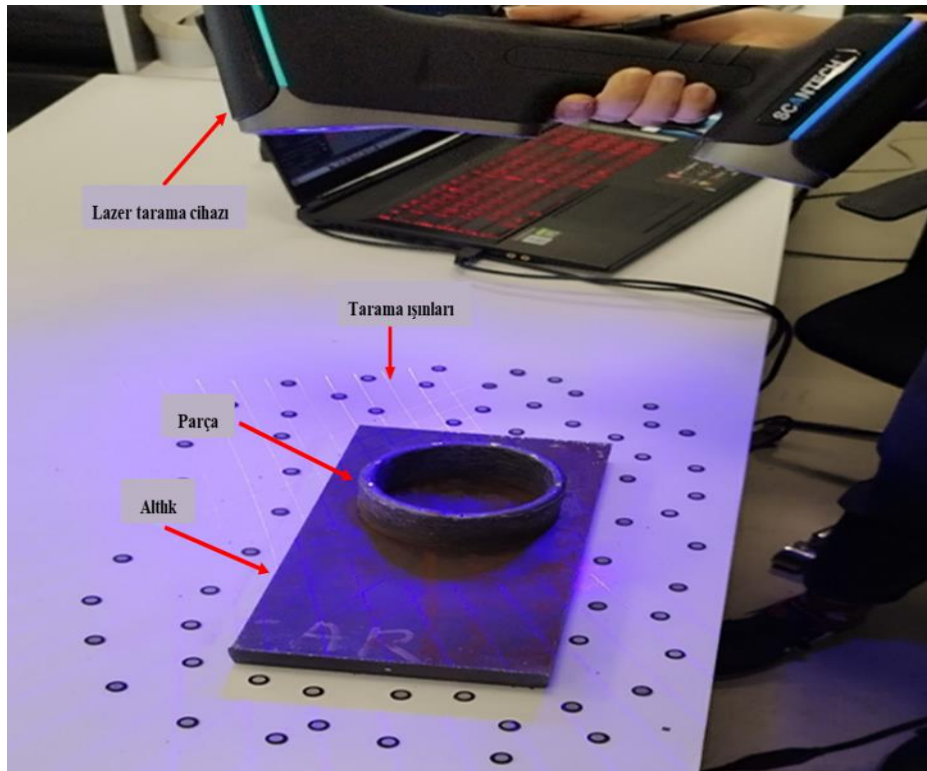
Standart üretim süreçlerinde sıklıkla karşılaşılan yüzey kusurları, harici ısı kaynaklarının kullanımıyla birlikte, kontrollü ısı döngüleri sayesinde ortadan kaldırılmıştır. Bu yöntemle üretilen parçanın yüzeyinde, daha az pürüzsüz ve kusursuz bir yapı elde edilmiştir. Harici ısı kaynakları, üretim sırasında parçanın yüzey sıcaklığını sabit tutmaya çalışarak, soğuma sırasında oluşabilecek gerilmeleri ve deformasyonları minimize etmiştir. Şekil 5.29’da gösterilen parça görseli, harici ısı kaynaklarının kullanımının yüzey kalitesine olan olumlu etkilerini ortaya koymaktadır. Standart üretim süreçlerinde görülen yüzey kusurları, harici ısı kaynaklı üretimde kontrol altına alınmış ve yüzey kaliteli parçalar üretilmiştir.

5.2.2. WAAM ve harici ısı kaynaklı WAAM üretiminin boyutsal karşılaştırılması

WAAM ve harici ısı kaynaklı WAAM üretimi sonucunda elde edilen 8 adet geometri, CAD verileri ile karşılaştırılması amacıyla temassız ölçüm yöntemi olan lazer tarama yöntemi ile teste tabi tutulmuştur. Lazer tarayıcı, çift lazer ışığı kullanan cihaz 10µm çözünürlüğe sahiptir, bu da yüksek hassasiyetli ölçümler yapabilmesini sağlar.

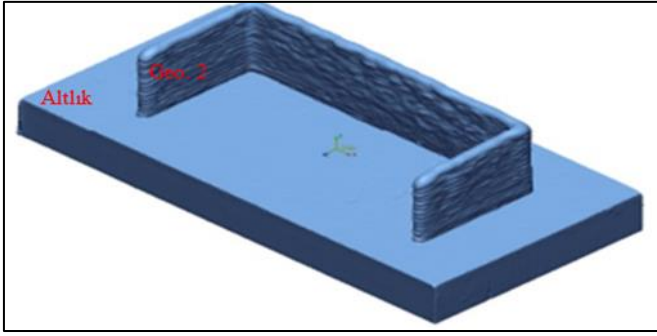
Lazer tarama yöntemi, üretilen parçaların yüzey profilini yüksek hassasiyetle analiz ederek, elde edilen verilerin CAD modeli ile karşılaştırılmasına imkân tanır. Bu yöntem, parça

yüzeyindeki mikroskobik detayların ve üretim sürecinden kaynaklanan geometrik sapmaların tespit edilmesinde son derece etkilidir. Şekil 5.30'da sunulan lazer tarama görüntüsü, üretilen parçanın yüzeyindeki topografik farklılıkları ve sapmaları görselleştirerek, tasarım ile imalat arasındaki uyumsuzlukları açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu tür analizler, üretim süreçlerinin doğruluğunu değerlendirmek ve olası hataları minimize etmek amacıyla kritik öneme sahiptir.



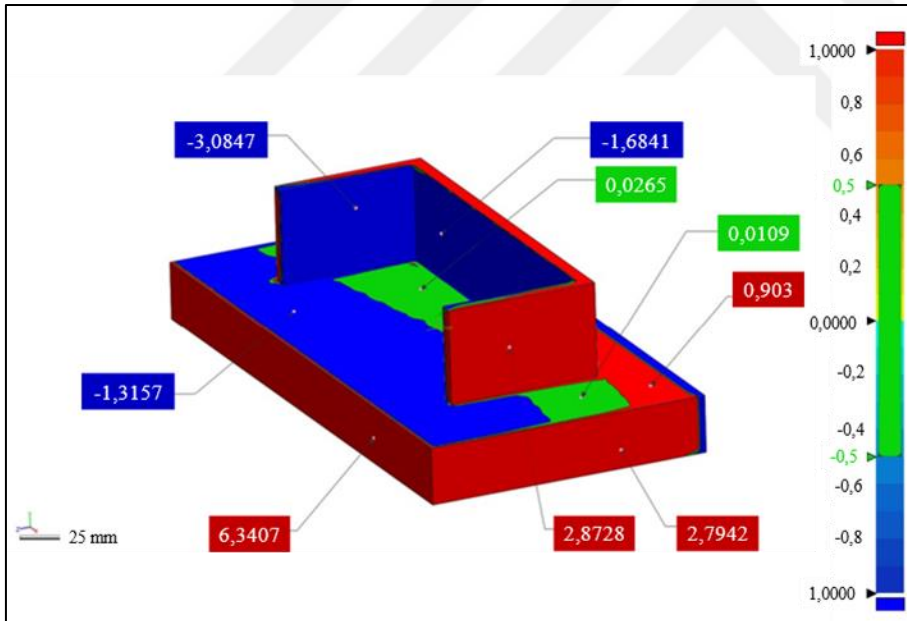
Şekil 5.30. Lazer tarama işlemi; silindirik (Geo.4) parça üzerindeki lazer ışınları ve tarama cihazının gösterimi

Lazer tarama süreci, parçaların yüzeyine zarar vermeden ve yüksek hassasiyetle ölçüm yapılmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu özellik, özellikle karmaşık ve hassas geometrilere sahip parçaların doğruluğunun değerlendirilmesinde büyük avantaj sunmaktadır. Lazer tarayıcı, üretim sürecinde elde edilen gerçek geometri ile CAD modelleri arasındaki uyumu değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen lazer tarama verileri, üretim sonrası geometrik sapmaların belirlenmesi ve üretim kalitesinin iyileştirilmesi için kritik öneme sahiptir. Şekil 5.31'de verilen görsel, lazer taraması sonrası elde edilen verilerin analizi için kullanılan bir örneği sunmaktadır. Bu görsel, tarama sonucu elde edilen verilerin analiz öncesindeki durumu yansıtmaktadır ve CAD modeli ile üretim sonrası geometrinin karşılaştırılması amacıyla yapılacak mühendislik değerlendirmesine zemin hazırlamaktadır.



Şekil 5.31. 3B lazer tarama sonucu elde edilen ve analiz de kullanılacak geometri görseli

Analiz sürecinde, CAD verisi üretim öncesinde tasarlanan ideal geometrik formu temsil ederken, üretim verisi, gerçek imalat süreci sonunda elde edilen nihai yapıyı ifade etmektedir. Bu iki veri setinin karşılaştırılması, üretimde meydana gelen sapmaların ve olası hataların tespit edilmesi açısından büyük bir önem taşımaktadır. Analiz sonucunda elde edilen verilerin bir örneği Şekil 5.32'de sunulmuştur.



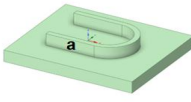
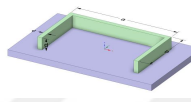
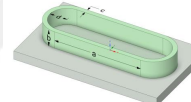
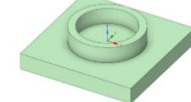
Şekil 5.32. 3B tarama sonuçlarına ait analiz görseli

Şekildeki renkli kodlamalar, CAD modeli ile üretim sonrası yapı arasındaki sapmaları net bir şekilde görselleştirmektedir. Mavi ile işaretlenen bölgeler, hedeflenen geometriden negatif yönde sapmaları örneğin, çekme veya malzeme kaybı ifade ederken, kırmızı bölgeler pozitif yöndeki sapmaları genleşme veya malzeme fazlası göstermektedir. Örneğin, mavi renkli bölgelerde tespit edilen negatif değerler örneğin, -3,0847 modelin tasarıma göre daha ince veya daraldığını belirtirken, kırmızı renkli bölgelerdeki pozitif değerler örneğin, 6,3407,

ilgili alanın CAD modeline kıyasla daha kalın veya geniş olduğunu işaret etmektedir. Yeşil renkli alanlarda ise sapma minimum seviyededir ve bu bölgeler, CAD verisine en yakın yüzeyleri temsil etmektedir.

Analiz sonucunda elde edilen değerler, üretim kalitesini ve CAD verileri ile uyumunun detaylı bir şekilde değerlendirilmesi için özet olarak Çizelge 5.2’de sunulmuştur. Bu çizelge, lazer tarama verileri ile CAD modeli arasındaki farkların istatistiksel ölçütlerini içermektedir. Her bir geometri için 4 farklı analiz yapılmış ve analizlerin sonuçları çizelgede sunulmuştur.

Çizelge 5.2. Geometriler için 3B lazer tarama sonuçları (mm)

	Geometri 1		Geometri 2		Geometri 3		Geometri 4	
								
	WAAM	Harici ısıtıcılı WAAM	WAAM	Harici ısıtıcılı WAAM	WAAM	Harici ısıtıcılı WAAM	WAAM	Harici ısıtıcılı WAAM
Min.	-3,9586	-3,779	-4,82	-3,7103	-3,9432	-8,0394	-2,809	-1,6844
Maks.	5,3669	4,265	5,0419	4,372	8,0445	7,5667	4,5823	4,6734
Ort.	0,4313	0,1559	0,3152	0,2731	0,7111	0,5385	1,1338	1,0088
RMS	1,9403	1,5341	1,7568	1,5468	2,8504	2,5831	1,8703	1,6977
Std. Sap.	1,8918	1,5262	1,7283	1,5225	2,7602	2,5264	1,4875	1,3655
Değiş.	3,5789	2,3292	2,9869	2,3179	7,6189	6,3825	2,2126	1,8645
+Ort.	1,6807	1,2525	1,4385	1,2529	2,5064	2,4369	1,7902	1,6212
-Ort.	-1,1177	-0,9849	-0,9292	-0,8993	-1,2954	-1,7471	-0,5596	-0,3778

Elde edilen ölçüm sonuçları hem geleneksel WAAM hem de harici ısıtmalı WAAM yöntemleriyle üretilen parçaların doğruluğunun ve kalite kontrol süreçlerinin etkinliğinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu tür karşılaştırmalar, üretim

yöntemlerinin optimizasyonu ve gelecekteki iyileştirme çalışmalarına rehberlik etme açısından büyük değer taşımaktadır. CAD verileri ile 3B lazer tarama sonuçları arasındaki farkları analiz etmek için çeşitli istatistiksel ölçütler kullanılmaktadır. Bu ölçütler, üretilen parçaların doğruluğunu ve kalitesini objektif bir şekilde değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Aşağıda, çizelgede sunulan ifadelerin açıklamaları verilmiştir:

Minimum ve maksimum değerler

Minimum ve maksimum değerler, tarama sonuçları ile CAD verileri arasındaki en büyük ve en küçük sapmaları temsil eder. Bu değerler, kritik bölgeleri ve belirgin sapmaları belirlemede önemli bir göstergedir. Minimum değer, veri setindeki en küçük farkı ifade ederken, maksimum değer en büyük farkı temsil eder. Bu ölçütler, aşırı düşük veya yüksek sapmaların tespit edilmesinde kullanılır.

Ortalama (Ort.)

Ortalama değer, genel uyumu gösterir. Eğer ortalama sıfıra yakınsa, tarama sonuçları ve CAD verileri arasındaki farklar oldukça düşüktür. Pozitif veya negatif bir sapma, genel bir eğilimin mevcut olduğunu gösterebilir. Ortalama, veri setinin genel eğilimlerini ve merkezini belirler; CAD verileri ile tarama sonuçları arasındaki ortalamaların yakınlığı, iki veri setinin genel eğilimlerinin uyumlu olduğunu gösterir.

Kök ortalama kare (RMS)

RMS değeri, tarama sonuçları ile CAD verileri arasındaki kök ortalama kare hatasını gösterir. Düşük bir RMS değeri, genel doğruluğun yüksek olduğunu ifade eder. RMS değerinin düşük olması, tarama sonuçları ile CAD verileri arasındaki uyumun iyi olduğunu ve hata büyüklüklerinin genellikle küçük olduğunu gösterir.

Standart sapma (Std. Sap.)

Standart sapma, veri setindeki değerlerin dağılımını ölçer. Düşük bir standart sapma, verilerin genel olarak birbirine yakın olduğunu ve homojen bir dağılım gösterdiğini ifade eder.

Değişim (Değiş.)

Değişim, tarama sonuçları ve CAD verileri arasındaki en büyük farkı ifade eder. Bu ölçüt, potansiyel olarak kritik bölgelerin belirlenmesine yardımcı olabilir.

Pozitif ve negatif ortalama (+Ort. ve -Ort.)

Pozitif ve negatif ortalama değerleri, tarama sonuçlarındaki artı ve eksi farkların ortalamasını temsil eder. Bu değerlerin sıfıra yakın olması, tarama sonuçları ile CAD verileri arasındaki farkların dengelendiğini ve genel uyumun iyi olduğunu gösterir.

Çizelge 5.2'deki veriler incelendiğinde, harici ısıtmalı sistemin CAD verileri ile daha uyumlu sonuçlar verdiği dikkat çekmektedir. Özellikle, RMS değerlerinin daha düşük olması ve ortalama değerlerin sıfıra yakın olması, bu yöntemin üretim sürecinde daha yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir. Harici ısıtma sistemi, üretim ve bekleme süresi boyunca oluşan sıcaklık farklılıklarını minimize ederek, üretilen parçaların geometrileri ile CAD verileri arasındaki uyumu artırmıştır. Kontrollü termal davranış, parçadaki termal gerilmeleri ve bu gerilmelerin neden olduğu deformasyonları asgari seviyelere indirmiştir.

5.2.3. Kalıntı gerilme ölçümü

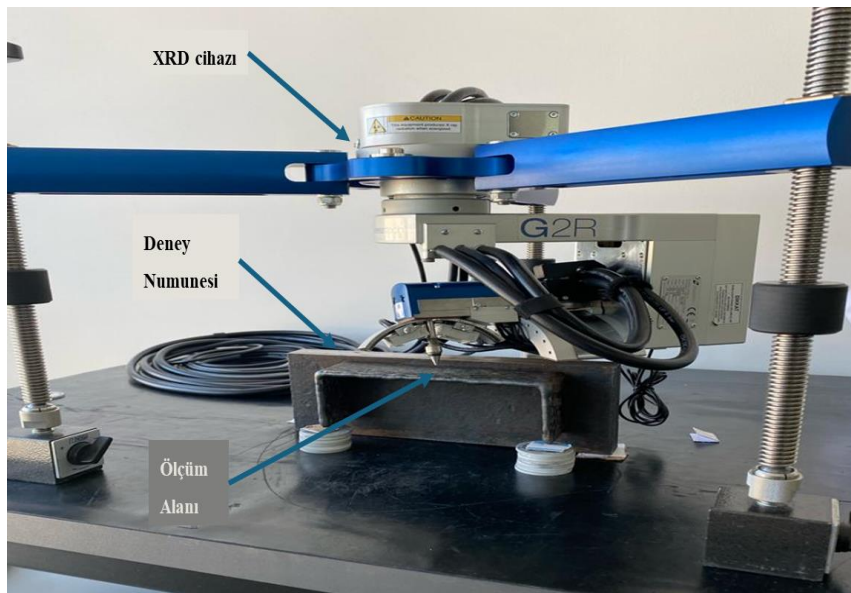
Harici ısı kaynaklarının WAAM yöntemi ile üretilen parçaların kalıntı gerilmeleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, tahribatsız bir kalıntı gerilme ölçüm yöntemi olan X-ışını kırınımı (XRD) [106, 107] metodu kullanılmıştır. XRD metodu, parçaların yüzeyinden kalıntı gerilme ölçümleri yapabilme yeteneği nedeniyle tercih edilmiştir. Bu yöntemin avantajı, parçaya zarar vermeden ve yapısal bütünlüğünü bozmadan, kalıntı gerilmelerin detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımasıdır. Bu çalışmada, XRD ölçümleri için EN 15305:2008 “Non-Destructive Testing. Test Method for Residual Stress Analysis by X-Ray Diffraction” standardı esas alınmıştır. Ölçümler, Cr K α ($\lambda = 0,22106867$ nm) radyasyon kaynağına sahip XStress G2R Diffractometre (Stresstech Oy) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında 2 mm kolimatör tercih edilmiş ve kalibrasyon işlemi Fe ferrit tozu örneği ile yapılmıştır. Ölçüm alınan numunelerin yüzeyinde bulunan oksit tabakası nedeniyle, yüzeyde oluşabilecek olumsuz etkileri minimize etmek amacıyla elektro polisaj işlemi uygulanmıştır. Ölçümler, tri-aksiyel yönlerde ($\phi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)

gerçekleştirilmiş olup, numunelerin elastik modülü 215 GPa ve Poisson oranı 0.280 olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan ölçüm parametreleri Çizelge 5.3'te özetlenmiştir. Kalıntı gerilme ölçümleri Çizelge 4.5'te verilen geometri 1,2 ve 3 için uzun kenarlarının geometrik orta noktasından yapılmıştır. Ölçümler hem WAAM hem de harici ısıtıcılı WAAM parçaları için yapılmıştır.

Çizelge 5.3. Kalıntı gerilme ölçümü için kullanılan deneysel parametreler

Ölçüm Yöntemi	XStress G2R Diffractometre
Radyasyon kaynağı	Cr K α ($\lambda = 0,22106867$ nm)
Kolimatör	2 mm
Kalibrasyon Örneği	Fe, Ferrit Tozu
Örnek Koşulu	Yüzeyde Ölçek/Oksit
Ölçüm Yönleri	Tri-Aksiyel ($\phi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)
Örneğin Elastik Modülü	215 GPa
Örneğin Possion Oranı	0,280

Yapılan test çalışmasına ait görsel, Şekil 5.33'te gösterilmiştir. Bu görsel, XRD cihazı kullanılarak yapılan kalıntı gerilme ölçüm sürecini ve deney numunesinin yerleşimini göstermektedir.



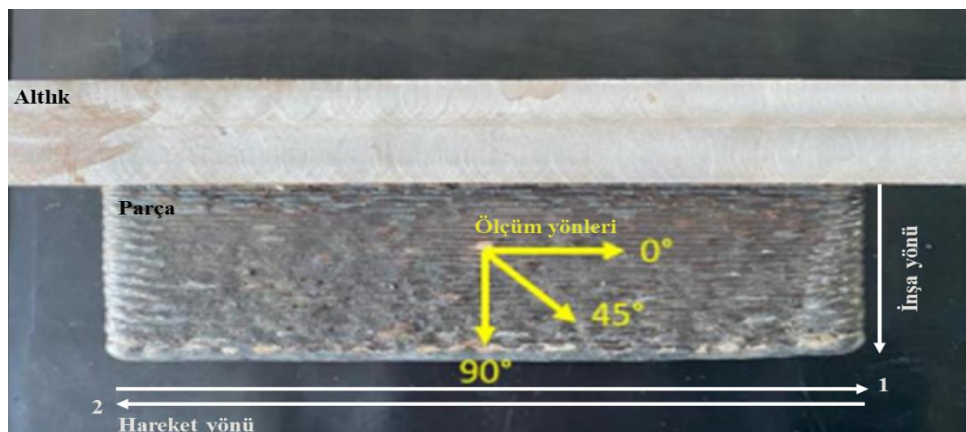
Şekil 5.33. Kalıntı gerilme ölçümü; XRD cihazı, deney numunesi (Geo.2) ve ölçüm alanının detayları

Parçalar üzerinde yapılan kalıntı gerilme ölçüm yönleri Şekil 5.34'te detaylı olarak sunulmuştur. Bu ölçümler, 0° , 45° ve 90° yönlerinde gerçekleştirilmiştir. Bu yönlerin seçilmesinin temel nedeni, kalıntı gerilme dağılımının ve genliğinin çeşitli doğrultulardaki farklılıklarını kapsamlı bir şekilde analiz etmektir.

0° yönü genellikle hareket veya kaynak yönü ile hizalıdır. Bu doğrultudaki gerilmeler, malzemenin işlem sırasındaki davranışını doğrudan yansıtabilir. Üretim süreci sırasında uygulanan termal ve mekanik yükler, bu yönde belirgin gerilmelere neden olabilir. Bu nedenle, 0° yönünde yapılan ölçümler, malzemenin üretim süreci boyunca maruz kaldığı gerilmeleri ve bu gerilmelerin kalıntı etkilerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir.

45° yönü, iki ana eksen arasındaki ara doğrultuyu temsil eder ve bu doğrultudaki ölçümler, malzemede meydana gelen gerilmelerin daha karmaşık bileşenlerini ortaya çıkarabilir. Bu yön, malzemenin izotropik olmayan özelliklerini ve anizotropik gerilme dağılımlarını anlamak için seçilmiştir. 45° yönünde elde edilen veriler, malzeme yapısının karmaşıklığını ve farklı yüklenme koşullarına verdiği tepkileri incelemek açısından önemlidir.

90° yönü ise, genellikle 0° yönüne dik olan doğrultuyu ifade eder. Bu yön katmanlı imalat için inşa yönünü temsil eder ve bu doğrultudaki gerilmeler, malzemenin genişleme veya büzülme eğilimlerine dair kritik bilgiler sağlar. Bu yön, malzemenin işlem sonrası stabilitesini ve yapısal bütünlüğünü değerlendirmek için önemli veriler sunar. 90° yönündeki ölçümler, özellikle kalıntı gerilmelerin malzemenin hizmet ömrü boyunca nasıl değişebileceğini ve bu değişimlerin malzemenin performansını nasıl etkileyebileceğini anlamak için yapılmıştır [108].



Şekil 5.34. Kalıntı gerilme işlemi için ölçüm noktası ve ölçüm yönleri

Wandtke ve arkadaşları [108] yaptıkları çalışmada, düşük soğutma süreleri, yani malzemenin hızlı bir şekilde soğuması, katmanların kısmen temperlenmesine yol açtığını belirtmişlerdir. Temperleme, malzemenin mikro yapısındaki iç gerilmelerin rahatlaması ve bazı mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla yapılan ısıtma işlemidir. Ancak, bu işlem tam olarak gerçekleşmediğinde, yani katmanlar yeterince yavaş soğutulmadığında, temperleme işlemi eksik kalır. Bu durumda, malzemenin içindeki kalıntı gerilmeler tam olarak giderilemez ve malzeme içindeki bu gerilmeler kalmaya devam eder. Bu kalıntı gerilmeler, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir ve zamanla çatlak oluşumu veya diğer yapısal problemler gibi sorunlara yol açabilir. Bu nedenle, düşük soğutma süreleri, kalıntı gerilmelerin tam olarak hafifletilmesini engeller ve bu gerilmeler malzeme içinde kalıcı olur. Çalışmalarında, 300 °C katmanlar arası sıcaklık, 100 °C'ye kıyasla, daha düşük soğuma hızları nedeniyle bileşen içindeki kalıntı gerilme eğiminin daha düşük olmasına neden olduğunu belirtmişlerdir.

Kalıntı gerilme ölçümlerinde elde sonuçlar Çizelge 5.4'te verilmiştir. Çizelge kalıntı gerilme ve yarı maksimum tam genişlik (Full Width at Half Maximum; FWHM) sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.4. 6 farklı geometri için kalıntı gerilme ölçüm sonuçları

Geometri	Ölçüm Yönü	WAAM		Harici Isıtıcılı WAAM	
		Kalıntı Gerilme	FWHM	Kalıntı Gerilme	FWHM
		[$\pm$ MPa]	[$\pm^\circ$]	[$\pm$ MPa]	[$\pm^\circ$]
1	0°	15,8 $\pm$ 24,4	1,8 $\pm$ 0,1	100 $\pm$ 40,4	1,7 $\pm$ 0,2
	45°	82,4 $\pm$ 40,8	1,8 $\pm$ 0,1	8,6 $\pm$ 37,6	1,8 $\pm$ 0,1
	90°	-21,7 $\pm$ 26,9	1,8 $\pm$ 0,1	57,8 $\pm$ 37	1,7 $\pm$ 0,1
2	0°	45,2 $\pm$ 34,5	1,8 $\pm$ 0,2	36,6 $\pm$ 31,3	1,9 $\pm$ 0,1
	45°	50,6 $\pm$ 31,4	1,8 $\pm$ 0,2	-15,9 $\pm$ 15,4	1,8 $\pm$ 0,1
	90°	-15,9 $\pm$ 42,7	1,8 $\pm$ 0,1	14,2 $\pm$ 18	1,7 $\pm$ 0,1
3	0°	32,9 $\pm$ 47,6	1,7 $\pm$ 0,1	6,9 $\pm$ 34,7	1,7 $\pm$ 0,1
	45°	81,3 $\pm$ 37,6	1,7 $\pm$ 0,1	88,7 $\pm$ 28,3	1,7 $\pm$ 0,1
	90°	93,6 $\pm$ 30	1,8 $\pm$ 0,2	45,5 $\pm$ 27,3	1,7 $\pm$ 0,1

WAAM üretiminde, bekleme süresi boyunca meydana gelen sıcaklık farkı yaklaşık 1300°C civarındadır. Bu büyük sıcaklık farkı, parça üretimi süresince her bir katmanı etkileyerek önemli termal döngüler oluşturur. Bu termal döngüler, malzemede katı hal dönüşümlerinin kaynağı olup, malzemenin mikroyapısında ve dolayısıyla kalıntı gerilmelerinde önemli değişikliklere yol açar.

Katı hal dönüşümleri, yüksek soğuma hızları ve termal döngüler sonucunda malzemenin kristal yapısının veya fazının değiştiği süreçlerdir. Bu dönüşümler, malzemenin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini belirleyici rol oynar. WAAM üretiminde, yüksek soğuma hızları, malzemede martensitik dönüşümler gibi katı hal değişikliklerine neden olabilir. Bu tür dönüşümler, malzemenin sertlik ve kırılgenlik gibi mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Martensitik dönüşümler, özellikle çeliklerde, malzemenin mukavemetini artırırken, aynı zamanda kırılgenliği de artırabilir. Bu, kalıntı gerilmelerin oluşumunda ve yayılımında önemli bir rol oynar [29, 97, 105, 109].

Katmanlı imalat süreçlerinde, yüksek soğuma hızları ve termal döngüler, yalnızca malzemenin mikroyapısını değil, aynı zamanda kalıntı gerilmelerini de etkiler. Kalıntı gerilmeler, malzemenin termal genleşme ve büzülme davranışları sonucunda oluşur. Yüksek soğuma hızları, malzemenin hızlı bir şekilde büzülmesine ve dolayısıyla iç gerilmelerin oluşmasına neden olabilir. Bu gerilmeler, malzemenin genel mekanik performansını ve dayanıklılığını etkiler. Özellikle ince duvarlı veya karmaşık geometrili parçaların üretiminde, bu gerilmelerin kontrolü kritik önem taşır.

Harici ısıtıcılı WAAM üretiminde ise, bekleme süresi boyunca oluşan sıcaklık farkı 900°C civarındadır. Bu süreçte, bekleme süresi sonunda parça yaklaşık 600°C'ye kadar soğumuştur. Bu sıcaklık, kullanılan ER70S-6 telinin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindedir. Yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde kalan malzeme, daha düşük kalıntı gerilmelere sahip olur, çünkü kontrollü soğuma, gerilme birikimini minimize eder. Harici ısıtıcılar kullanılarak elde edilen bu kontrollü termal döngü, malzemenin mikroyapısında istenmeyen faz dönüşümlerini ve buna bağlı gerilmeleri azaltır.

Abusalma ve arkadaşlarının [30] çalışmalarında belirtildiği üzere, üretim sürecindeki bekleme süreleri, parçaların kalıntı gerilme üretiminde önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışmada, bekleme süresinin hem boylamasına hem de yapısal gerilimler üzerinde kayda değer bir etkisi olduğu ve bekleme süresinin azaltılmasının, gerilme profillerinin nispeten tekdüze hale gelmesine ve yüksek gerilimli bir bölgenin yapı yönü boyunca daha derine uzanmasına neden olduğu vurgulanmıştır.

Deneyisel çalışma sırasında, geometri 2 ve 3 için değişken bekleme süreleri tercih edilmiştir. Üretim sürecinde, 1-5. katmanlar arasında 30 saniye, 5-15. katmanlar arasında 60 saniye ve 15-30. katmanlar arasında 90 saniye bekleme süresi uygulanmıştır. Bu değişken sürelerle rağmen, harici ısıtıcılı WAAM işleminde kalıntı gerilme seviyelerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Harici ısıtıcılar, parçanın bekleme süresinde kalıntı gerilme oluşum sürecini, dış ve iç yüzey arasındaki sıcaklık farkını azaltarak engellemektedir. Bu durum, gerilme oluşumunu minimize eder ve parçanın genel mekanik performansını iyileştirir. Harici ısıtıcılı WAAM işleminde, bekleme sürelerinin kontrollü bir şekilde yönetilmesi, malzeme mikroyapısında

istenmeyen faz dönüşümlerini ve buna bağlı gerilmeleri azaltarak, üretilen parçaların dayanıklılığını ve kalitesini artırır.

Wandtke ve arkadaşları [108] çalışmalarında, numune tasarımının yükseklik, uzunluk ve kalınlık değişiminin, yan duvardaki boylamasına kalıntı gerilmelerin dağılımı ve büyüklüğü üzerinde önemli etkiler gösterdiğini belirtmişlerdir. Uzunluk ve kalınlığın etkisi önemli değilken, yüksekliğin önemli bir etkisi vardır. Yükseklik arttıkça, ortalama kalıntı gerilmeler azalmaktadır. Bunun, alt tabaka plakasının yerel kısıtlamasında kaynaklandığını belirtmektedirler. Çalışmamızda aynı altlık geometrileri için harici ısıtıcılar aynı yükseklik değerlerinde daha düşük kalıntı gerilme değerlerinin oluşmasını sağlamaktadır.

5.2.4. Manyetik Barkhausen gürültüsü ölçümü

Manyetik Barkhausen Gürültüsü (MBG) ölçümü, malzeme içindeki kalıntı gerilmeleri ve mikroyapısal değişiklikleri belirlemek için kullanılan etkili bir tahribatsız test yöntemidir. Bu yöntem, manyetik malzemelerdeki mikro manyetik alan değişimlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkan gürültü sinyallerinin analizi ile gerçekleştirilir.

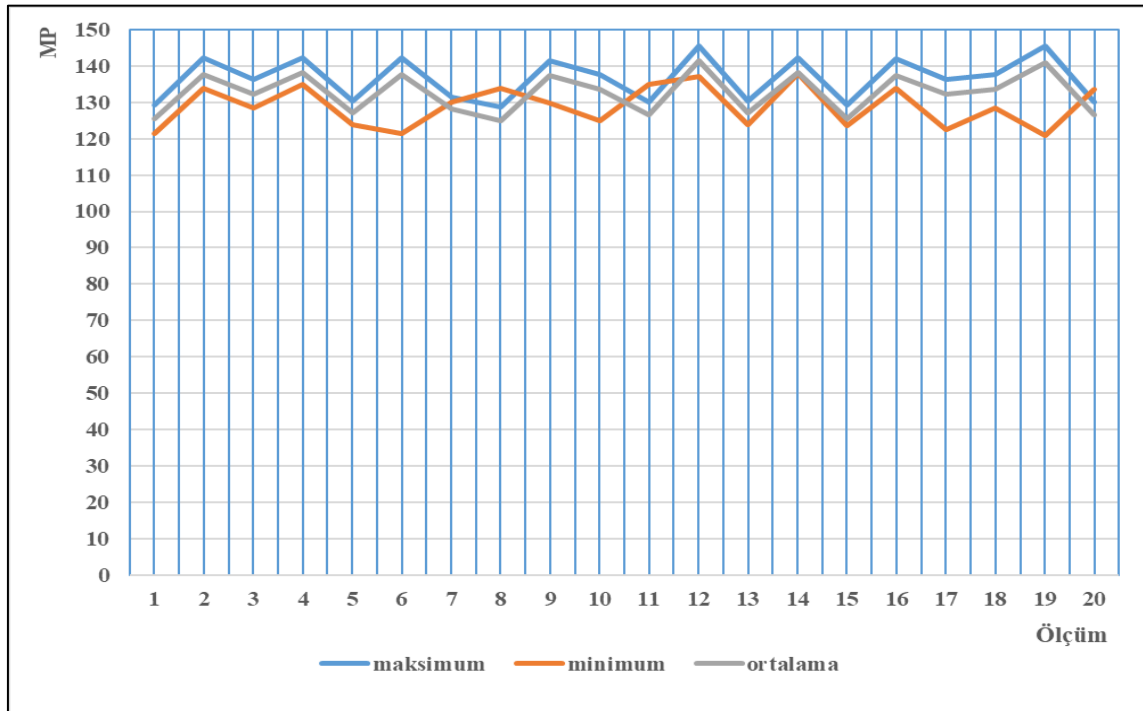
MBG ölçümünün temel prensibi, manyetik alanın malzeme yüzeyine uygulandığında, manyetik domainlerin (manyetik alan yönünde hizalanmış atomik dipol momentler) hareketi ve yeniden hizalanması sırasında ortaya çıkan küçük manyetik akım dalgalanmalarının tespit edilmesidir. Bu dalgalanmalar, malzemenin iç yapısındaki gerilme ve mikroyapısal değişiklikler hakkında bilgi verir. Kalıntı gerilmeler ve mikro yapıdaki kusurlar, manyetik domainlerin hareketini etkileyerek Barkhausen sinyalinin karakteristiğini değiştirir.

WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM numunelerine manyetik Barkhausen gürültüsü testi uygulanmıştır. Ölçümler, üretilen parçaların düz kenarlarından gerçekleştirilmiştir. Ölçüm taramaları, parçaların düz kenarlarının geometrik merkezinden yapılmış olup, detaylar Şekil 5.35'te sunulmuştur. Ölçümlerden önce, probun yüzey üzerinde düzgün bir şekilde hareket edebilmesini sağlamak amacıyla, yüzey talaşlı imalat yöntemiyle temizlenmiştir. Bu işlem sırasında, yüzeyde oluşabilecek termal etkileri minimize etmek için bol soğutma sıvısı kullanılmıştır. Bu önlemler, ölçüm hassasiyetini artırmak ve yüzeydeki olası sıcaklık kaynaklı gerilmelerin test sonuçlarına etkisini en aza indirmek amacıyla alınmıştır.



Şekil 5.35. MBG için ölçüm noktaları ve ölçüm doğrultusunun şematik gösterimi

Yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar, WAAM (Şekil 5.36) ve harici ısıtıcılı WAAM (Şekil 5.38) numuneleri için grafiksel olarak sunulmuştur. Bu grafikler, her bir ölçüm noktasındaki maksimum, minimum ve ortalama değerleri göstermektedir. Grafikte dikey eksen, ölçüm noktasında elde edilen genlik zirvesini (MP) ifade ederken, yatay eksen ise ölçüm noktalarının sırasını temsil etmektedir. Bu analiz, ölçüm noktalarındaki manyetik Barkhausen gürültüsü sinyalinin genlik davranışını karşılaştırmalı olarak değerlendirerek, farklı üretim yöntemlerinin yüzey gerilmeleri ve mikroyapısal özellikler üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.36. WAAM parçasının Barkhausen gürültüsü değerleri; maksimum, minimum ve ortalama değerlerin 20 ölçüm noktasındaki dağılımı

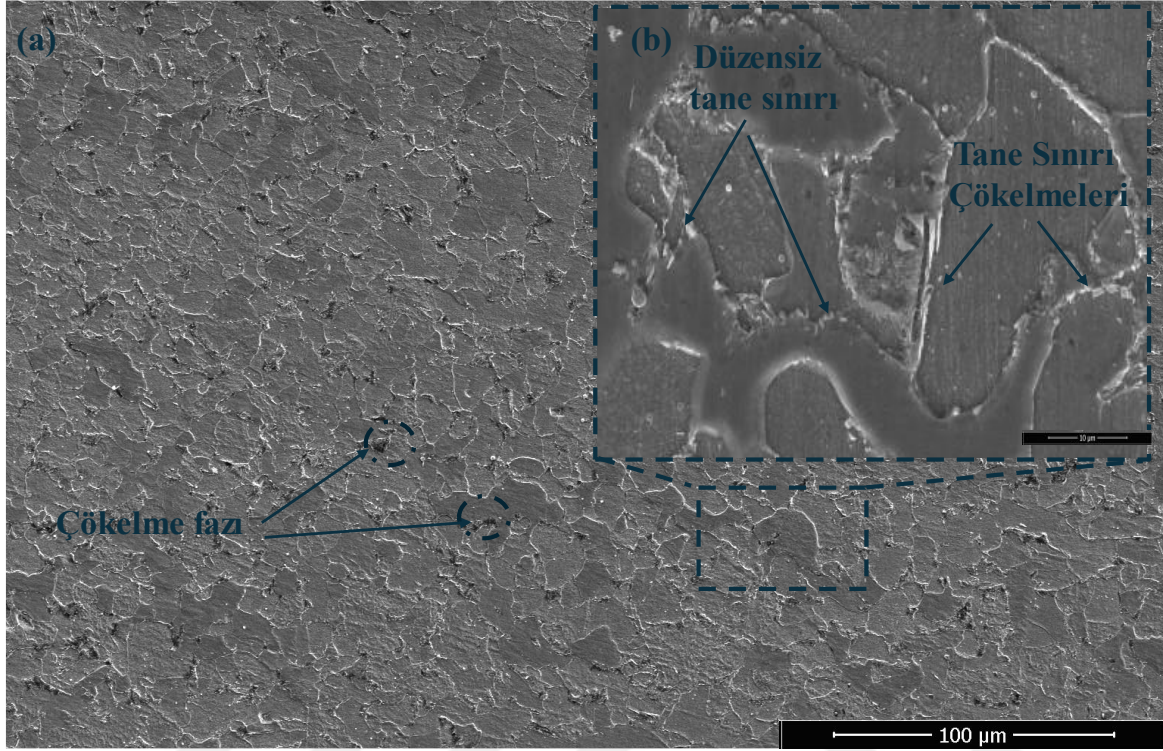
WAAM parçalarında genlik zirvesi değerleri, maksimum 137 ± 5 , minimum 129 ± 4 ve ortalama 133 ± 5 aralığındadır. Maksimum değerler, manyetik domainlerin yeniden düzenlenmesi sırasında ortaya çıkan en yüksek gürültü seviyelerini temsil etmektedir. Örneğin, 145,36 (Ölçüm 19) ve 145,35 (Ölçüm 12) gibi yüksek maksimum değerler, belirli bölgelerde yüksek iç gerilmeler veya mikro yapısal kusurların varlığına işaret etmektedir. Bu durum, malzemenin bazı bölgelerindeki manyetik özelliklerin bozulduğunu gösterebilir. Minimum değerler, malzeme içindeki en düşük gürültü seviyelerini gösterir ve düşük minimum değerler, malzeme içindeki bazı bölgelerin daha az gerilim altında olduğunu veya daha homojen bir yapıya sahip olduğunu gösterebilir. Örneğin, 120,93 (Ölçüm 19) ve 121,4 (Ölçüm 1 ve Ölçüm 6) gibi düşük minimum değerler, malzemenin bazı bölgelerinde daha düşük iç gerilmeler olduğunu ortaya koymaktadır.

Ortalama değerler ise malzemenin genel manyetik tepkisinin bir göstergesidir ve bu çalışmada elde edilen ortalama değerler nispeten tutarlı bulunmuştur. Ancak, maksimum ve minimum değerlerdeki değişkenlik, malzemenin homojen olmadığını ve üretim sürecinde bazı düzensizliklerin mevcut olduğunu göstermektedir.

Genel olarak, veriler malzemenin manyetik tepkisinin farklı bölgelerde değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yüksek maksimum ve düşük minimum değerlerin belirli bölgelerde yoğunlaşması, bu bölgelerde iç gerilmelerin ve mikro yapısal kusurların daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu durum, WAAM yöntemi ile üretilen malzemelerde termal döngülerin ve hızlı soğuma süreçlerinin iç gerilmelerin ve mikro yapısal kusurların oluşmasına neden olabileceğini göstermektedir.

Barkhausen gürültüsü analizinde gözlemlenen değişken maksimum, minimum ve ortalama değerler, malzeme içindeki mikro yapısal özelliklerin ve özellikle tane sınırlarındaki çökelmelerin varlığı ile ilişkilendirilebilir. Tane sınırları, manyetik domainlerin hareketi sırasında engelleyici etkiler gösterir ve bu durum, iç gerilmelerin artmasına ve Barkhausen gürültüsü seviyelerinin yükselmesine neden olabilir. Özellikle, yüksek maksimum değerler, tane sınırlarında yoğun çökelmelerin ve bunlara bağlı olarak artan iç gerilmelerin bir göstergesi olabilir. Ayrıca, düşük minimum Barkhausen Gürültüsü (MBG) değerleri, malzemenin belirli bölgelerinde çökelme miktarının daha az olduğunu ve iç gerilmelerin nispeten düşük olduğunu gösterebilir. Bu durum, malzemenin homojen olmayan mikroyapısına işaret eder ve belirli bölgelerdeki çökelme fazlarının yoğunluğunun az

olduğunu ortaya koyar. WAAM numunesine ait Şekil 5.37’de sunulan görüntüler, tane sınırlarında çökelme fazlarının varlığını desteklemektedir.



Şekil 5.37. WAAM numunesinde mikro yapısal SEM incelemesi: (a) 1000x büyütme ile çökelme fazlarının genel görünümü, (b) 10000x büyütme ile düzensiz tane sınırları ve çökelmelerin detaylı incelemesi

Bu görüntü, iki farklı mikroyapısal bölgeyi gösteren SEM görüntülerinden oluşmaktadır:

(a) Görüntüsü

Sol tarafta yer alan bu görüntü, yüzeyin geniş bir bölgesini düşük büyütmede sunmaktadır. Görüntüde oldukça düzensiz bir yapı ve karmaşık tane sınırları gözlemlenmektedir. Yüzeyde homojen olmayan yapılar ve olası çökelme fazları bulunmaktadır. Bu tür bir yapı, üretim sürecinden kaynaklanabilecek mikroyapısal heterojenliklere işaret eder. Özellikle WAAM gibi eklemeli imalat yöntemlerinde görülebilecek soğuma hızları bu tür mikro yapısal düzensizliklere neden olabilir.

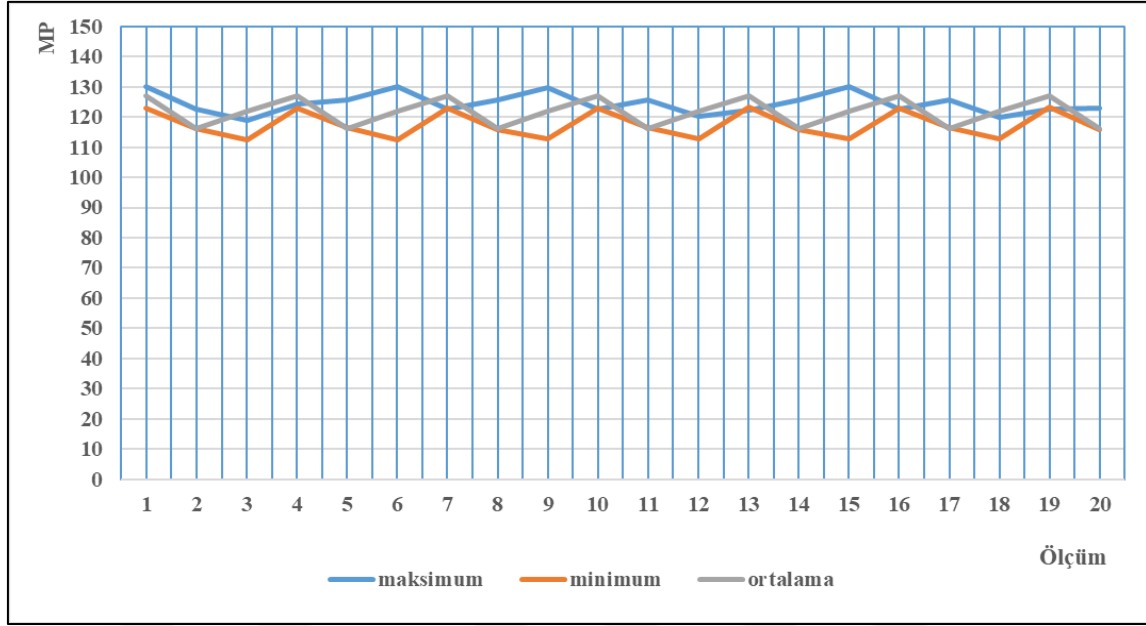
(b) Görüntüsü

Sağ üstte yer alan bu görüntü, daha yüksek büyütmede alınmış ve tane sınırlarını daha detaylı incelememize olanak tanımaktadır. Görüntüde belirgin şekilde düzensiz ve dalgalı tane

sınırları dikkat çekmektedir. Tane sınırlarında çökelme fazları ya da oksit kalıntıları gibi mikroyapısal oluşumlar görülebilir. Bu tür çökelmeler, tane sınırlarında lokal sertleşmelere ve gerilme birikimlerine yol açarak malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir.

Bu görüntüler, malzemenin mikroyapısında önemli ölçüde heterojenlik ve tane sınırlarında belirgin çökelmelerin varlığını göstermektedir. Sol görüntüde (a) genel mikroyapıdaki homojenlik eksikliği ve düzensiz tane sınırları görülürken, sağ görüntüde (b) tane sınırlarında belirgin çökelme fazları veya kalıntılar öne çıkmaktadır. Bu çökelme fazları, Barkhausen Gürültüsü ölçümlerinde gözlemlenen iç gerilmeleri ve mikroyapıdaki farklılıkları desteklemektedir. Özellikle eklemeli imalat yöntemleri, bu tür mikroyapısal heterojenliklerin ve çökelme fazlarının oluşumuna neden olabilir. Bu çökelmeler, tane sınırlarında lokal gerilme birikimlerine ve mikroyapısal sertleşmeye yol açabilir. Barkhausen Gürültüsü sinyallerindeki farklılıklar, bu çökelme fazlarının malzeme içerisindeki dağılımının ve yoğunluğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Dolayısıyla, SEM görüntüleri ile MBG sonuçları arasında anlamlı bir ilişki bulunmakta olup, her iki analiz de WAAM üretiminin termal sürecinin mikroyapı üzerinde yarattığı etkileri ortaya koymaktadır.

Harici ısıtıcılı WAAM numunesinin Barkhausen gürültüsü analiz sonuçları Şekil 5.38’de verilmiştir. Veriler harici ısıtıcı kullanımının WAAM üretiminde gürültü seviyelerini düşürdüğünü göstermektedir. Harici ısıtıcılı WAAM numunesinin genlik zirvesi değerleri maksimum 123 ± 3 , minimum 116 ± 4 ve ortalama 122 ± 4 aralığındadır.



Şekil 5.38. Harici ısı kaynaklı WAAM parçasının Barkhausen gürültüsü değerleri; maksimum, minimum ve ortalama değerlerin 20 ölçüm noktasındaki dağılımı

Bu değerler WAAM numunesi karşılaştırıldığında maksimum değer ortalama %10 – 12 aralığında azalmıştır. Bu azalma ısıtıcıların kullanımının parça mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

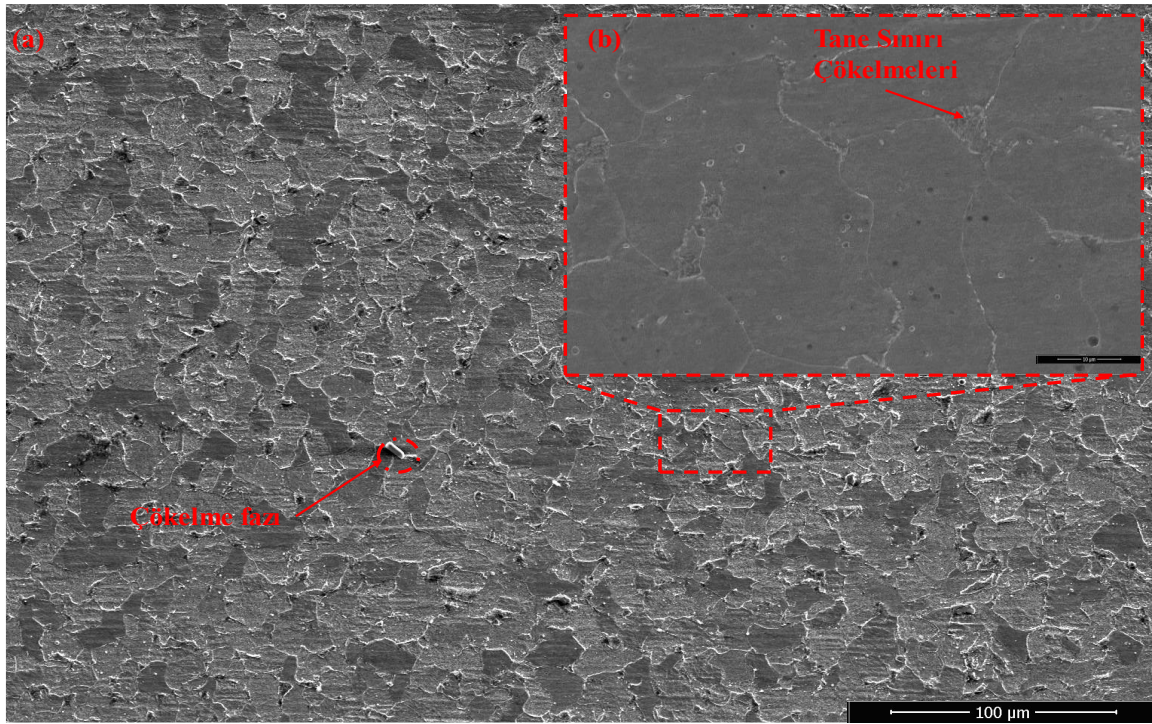
Maksimum Barkhausen gürültüsü değerleri 119 ile 130 arasında değişmektedir. Bu aralık, harici ısıtıcılı WAAM sürecinde malzeme içindeki iç gerilmelerin nispeten kontrol altında olduğunu göstermektedir. Harici ısıtıcıların kullanımı, maksimum gürültü seviyelerini düşürerek daha stabil bir üretim süreci sağladığını göstermektedir.

Minimum değerler 112,3 ile 123,2 arasında değişmektedir. Düşük minimum değerler, malzemenin belirli bölgelerinde iç gerilmelerin ve mikro yapısal kusurların az olduğunu göstermektedir. Harici ısıtıcılar, malzemenin homojenliğini artırarak daha düşük minimum gürültü seviyeleri sağlamaktadır.

Ortalama değerler 116,07 ile 126,85 arasında değişmektedir. Ortalama değerlerin dar bir aralıkta olması, malzemenin genel manyetik tepkisinin stabil olduğunu ve harici ısıtıcının bu stabiliteye katkıda bulunduğunu göstermektedir.

WAAM numunesinin aksine harici ısıtıcılı WAAM numunesinin gürültü seviyelerindeki azalma tane sınırlarındaki çökelme azalması ve kalıntı gerilme seviyelerindeki düşme ile

ilişkilendirilebilir. Malzemenin kontrollü soğuması tane sınırlarında meydana gelen çökelme miktarını azaltarak gürültü seviyelerinin sınırlıda olsa düşmesine katkıda bulunabilir. Şekil 5.39'da harici ısıtıcılı WAAM numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri de tane sınırlarının daha temiz olduğunu göstermektedir. Yine kontrollü ısıl davranış kalıntı gerilme seviyelerini düşürerek gürültü seviyelerindeki bu düşmeyi desteklemektedir.



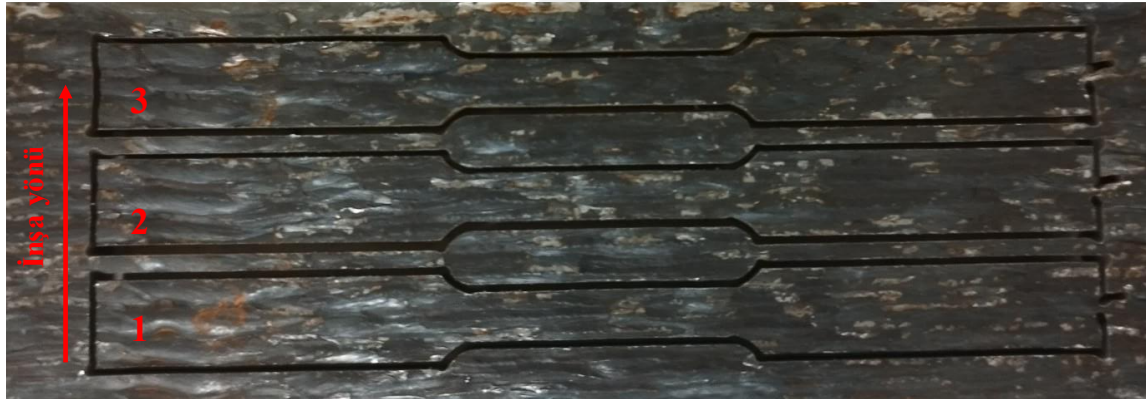
Şekil 5.39. Harici ısıtıcılı WAAM numunesinin SEM incelemesi: (a) 1000x büyütme ile mikro yapı ve çökelme fazları, (b) 10000x büyütme ile tane sınırlarının ve çökelmelerin detaylı görünümü

Şekil 5.39'da ki görüntülerde, malzemenin tane sınırlarında meydana gelen çökelme miktarının azaldığı ve bu sayede mikroyapının daha homojen hale geldiği görülmektedir. Sol taraftaki (a) görüntüsünde, yüzeyde yer alan bazı çökelme fazları işaretlenmiştir. Bu çökelme fazları, mikroyapısal heterojenliklere yol açabilecek unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Sağ üstteki (b) görüntüsünde ise tane sınırlarının daha temiz ve düzgün olduğu, çökelme fazlarının sınırlı kaldığı görülmektedir. Tane sınırlarında bulunan çökelme fazları, genellikle malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Ancak, harici ısıtma ile gerçekleştirilen kontrollü soğutma süreci bu tür çökelme oluşumlarını azaltarak, mikroyapısal bütünlüğü iyileştirmektedir. Harici ısıtıcılı WAAM numunesinde uygulanan kontrollü soğuma, tane sınırlarında oluşan çökelme miktarını azalttığı gibi, Barkhausen

Gürültüsü seviyelerinin de düşmesine katkıda bulunmaktadır. Gürültü seviyesindeki bu azalma, malzemenin iç yapısındaki kalıntı gerilmelerin azaldığını ve mikroyapının daha homojen hale geldiğini göstermektedir. Görüntülerde ayrıca tane sınırlarının belirgin ve temiz olduğu dikkat çekmektedir. Kontrollü ısı davranış, bu yapıdaki düzensizlikleri ve kalıntı gerilmeleri minimize ederek mikroyapısal stabiliteyi artırmaktadır.

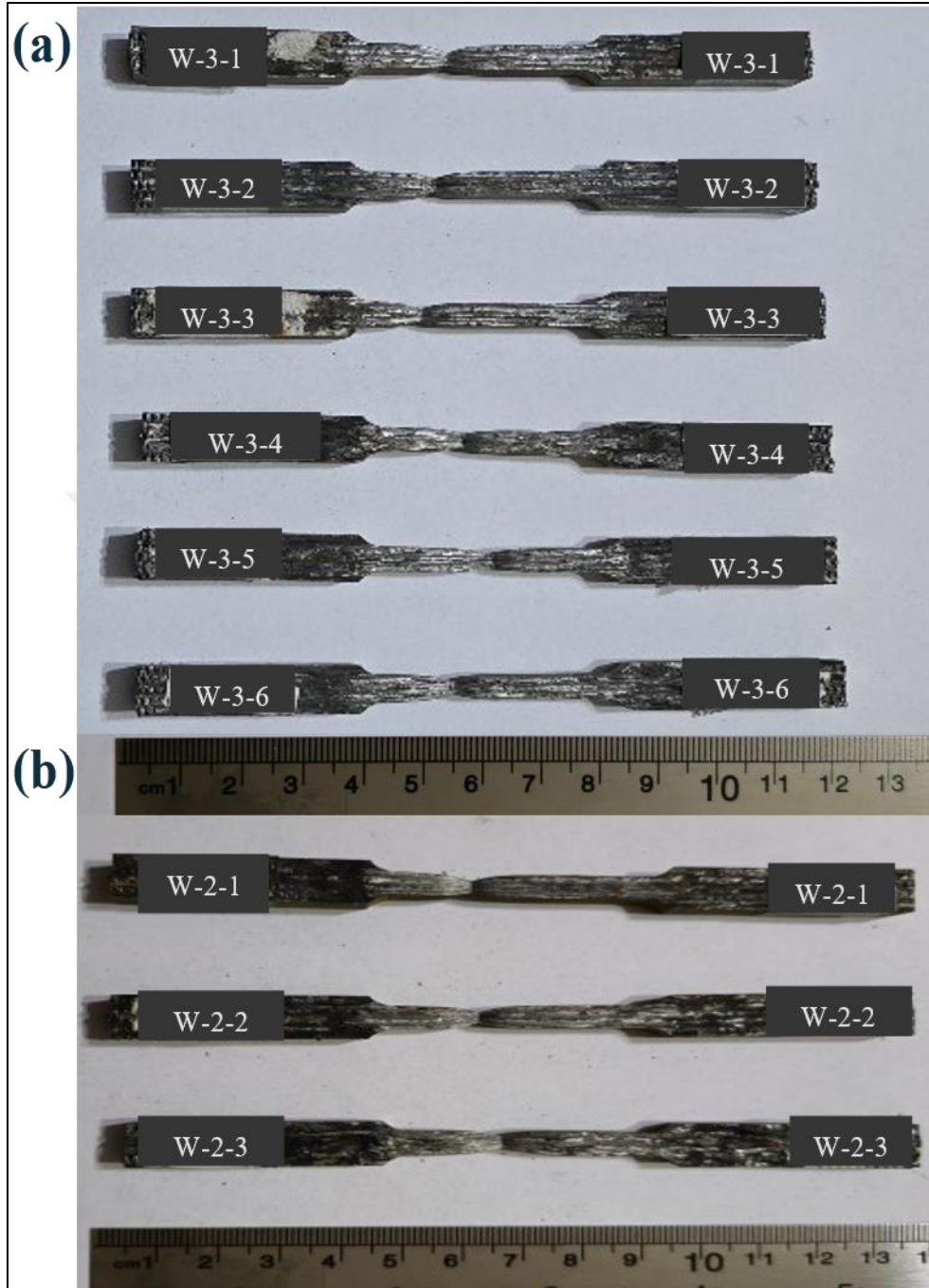
5.2.5. Çekme testi

WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM parçalarında çıkarılan toplam 18 adet numuneye çekme testi uygulanmıştır. Numuneler 2 ve 3 numaralı geometrilerin uzun kenarlarından çıkarılmıştır. 2 numaralı geometriden 3 adet, 3 numaralı geometriden ise 6 adet numune çıkarılmıştır. Numuneler su jeti tekniği ile çıkarılmıştır. Çıkarılan numunelere ait görsel Şekil 5.40'ta verilmiştir. Çekme testleri DIN EN ISO 6892-1 standardına göre oda sıcaklığında, 1 mm/dk çekme hızında yapılmıştır.



Şekil 5.40. Çekme numunesine ait görsel

WAAM numunelerinin çekme testi sonrasına ait görselleri Şekil 5.41'de sunulmuştur. Şekil 5.41a, Geo.3 bölgesinden çıkarılan 6 adet numunenin, Şekil 5.42b ise Geo.2 bölgesinden çıkarılan 3 adet numunenin çekme testi sonrası görsellerini göstermektedir. Bu numuneler, parçaların hareket yönü doğrultusunda, yani yatay ekseninde çıkarılmıştır. Numunelerin bir yüzeyi, üretim sırasında oluşan yüzey özellikleriyle kaba halde bırakılmışken, diğer yüzeyleri Barkhausen Gürültü testi için temizlendiğinden düzleştirilmiştir. Bu durum, numunelerin çekme testi sonrası yüzey morfolojisinin karşılaştırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Test sonuçları, numunelerin yüzeyindeki farklılıkların mekanik performans üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir.



Şekil 5.41. WAAM numunelerinin çekme testi sonucuna ait görseller

Görseller incelendiğinde, kırılma bölgelerinin her bir numunede farklı noktalarda gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, parçanın iç yapısındaki anizotropik özelliklerin doğal bir sonucudur. Anizotropi, bir malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinin yönlerle bağlı olarak farklılık göstermesidir. WAAM sürecinde, katmanlı üretim ve kontrolsüz ısı dağılımı, malzemenin iç yapısında farklı kristal yapılar ve tane büyüklükleri oluşturmaktadır [68, 79, 100]. Şekil 5.8 görüldüğü gibi ısının etkisi ile parçada 3 farklı mikro yapı

oluşmaktadır. Bu yapılar parçanın farklı kırılma davranışları göstermesinin temel sebebidir. Bu durum, malzemenin belirli yönlerde farklı dayanım ve esneklik özellikleri sergilemesine neden olur. Her iki gruptaki numunelerde de çekme testi sonucunda belirgin bir boyun verme ve incelme gözlemlenmiştir. Bu durum, malzemenin plastik deformasyona uğradığını ve kopmadan önce maksimum gerilmeyi karşılayacak şekilde uzadığını göstermektedir.

Kontrolsüz ısı dağılımı, özellikle WAAM yönteminde önemli bir etkiye sahiptir. Üretim sürecinde katmanlar üst üste eklenirken, her bir katmanın hızlı soğuması ve tekrar ısınması, iç yapıda termal gerilimler ve mikroyapısal farklılıklar oluşmasına yol açar. Bu termal farklılıklar, malzemenin belirli bölgelerinde zayıf noktalar oluşturabilir ve çekme testi sırasında bu zayıf noktalar kırılma bölgeleri olarak kendini gösterebilir. Üretim sürecinde oluşan bu kontrolsüz ısının etkisi, anizotropik özellikleri daha belirgin hale getirerek numunelerin mekanik performansını olumsuz yönde etkileyebilir.

WAAM numunelerinin çekme testi sonuçları Çizelge 5.5'te dokuz adet numune için sunulmuştur. Veriler incelendiğinde, her bir numune için farklı gerilme değerlerinin dikkat çekici olduğu görülmektedir. Bu farklılıklar, üretim sürecinde oluşan kontrolsüz termal etkilerden kaynaklanabileceği gibi, malzeme içindeki mikroyapısal heterojenliklerin ve termal gerilmelerin de bir sonucu olarak yorumlanmıştır. Her bir numune için elde edilen gerilme ve yüzde uzama değerlerindeki varyasyon, üretim sürecinde farklı bölgelerde meydana gelen soğuma hızları ve termal geçişlerin neden olduğu farklı mikroyapısal özellikleri yansıtmaktadır.

Çizelge 5.5. WAAM numunelerinin çekme testi sonuçları

Geometri	Numune	Akma Gerilmesi (N/mm ²)	Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Yüzdelik Uzama (%)	Elastisite Modülü (GPa)
Geo. 2	W-2-1	216	370	224	42	231
	W-2-2	254	439	260	41	258
	W-2-3	234	407	241	40	227
Geo. 3	W-3-1	274	472	280	40	295
	W-3-2	202	350	210	44	205
	W-3-3	214	367	218	46	216
	W-3-4	212	369	220	45	230
	W-3-5	240	414	245	50	243
	W-3-6	234	408	236	52	240

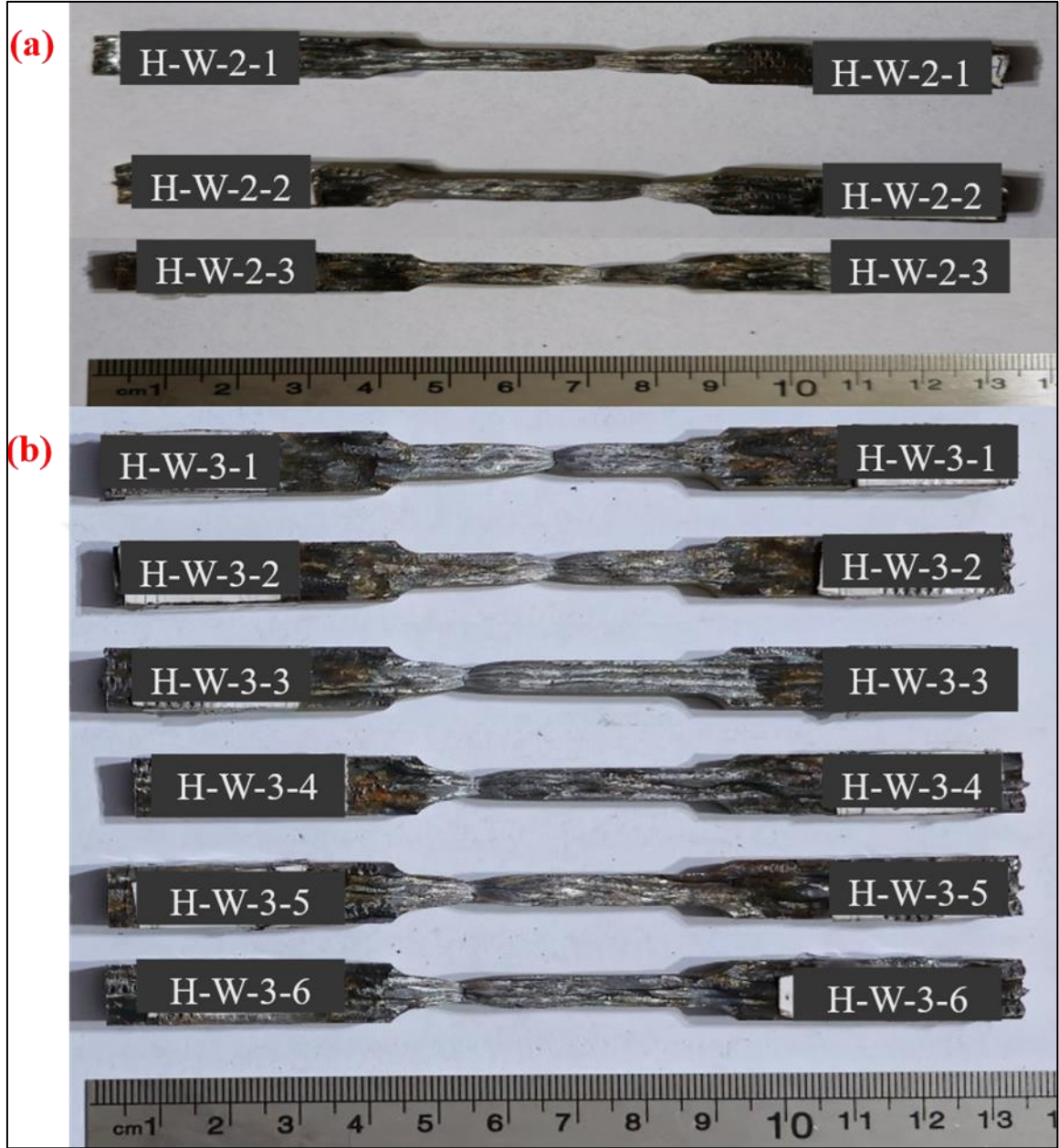
Dokuz adet numunenin çekme testi sonuçlarında, gerilme değerlerinde belirgin bir değişiklik olduğu gözlemlenmektedir. Numunelerin akma gerilmesi değeri ortalama 231 ± 22 N/mm², çekme gerilmesi değeri ortalama 400 ± 37 N/mm² ve kopma gerilmesi ortalama değeri ise 237 ± 22 N/mm² olarak hesaplanmıştır. Ayrıca WAAM numunelerinin elastisite modülü ortalama 238 ± 25 GPa olarak hesaplanmıştır. Bu veriler, WAAM yöntemiyle üretilen numunelerde üretim sürecindeki kontrolsüz ısı dağılımı, termal gerilimler ve mikroyapısal farklılıklar gibi değişkenlerin gerilme değerlerinde önemli bir sapmaya yol açabileceğini göstermektedir.

Ayrıca, stres değerlerindeki değişkenlik yüzdelik uzama değerlerinde de kendini göstermektedir. Yüzdelik uzamanın ortalama değeri $\%44 \pm 4$ olarak hesaplanmıştır. Yüzdelik uzama değerlerindeki bu değişiklik, numunelerin mikroyapısal yapısında meydana gelen heterojenliklerin, çekme testleri sırasında farklı mekanik davranışlar sergilemesine neden olduğunu işaret etmektedir.

Rafieazad ve arkadaşlarının [79] da belirttiği gibi ITAB bölgesinde iri tanelerin varlığı mekanik özellikleri, özellikle de sünekliği bozar, bu da ITAB etrafındaki tane irileşmesinin WAAM-ER70S-6 alaşımında yapı yönü boyunca ana zayıflama mekanizmalarından biri olabileceğini gösterir. Bu nedenle, çatlaklar potansiyel olarak çekirdeklenabilir ve tercihen ısıdan etkilenen bölgeler boyunca ilerleyerek ITAB boyunca erken bir arızaya yol açabilir. WAAM numunelerinde görülen farklı uzama ve yüzde uzama değerleri parçada mevcut olan

mikroyapı kusurlarının ve bunların ürettiği kalıntı gerilme ve çarpılmaların tabii sonucudur. Şekil 5.12’de sunulan WAAM numunesine ait SEM görüntüsü, bu mikroyapısal heterojenliğin oluşumunu desteklemektedir. Ayrıca, Şekil 5.14’te verilen EBSD haritalama sonuçları, iç yapıda mevcut olan farklı tane büyüklüklerini açıkça göstermektedir. Bu bulgular, WAAM yöntemiyle üretilen malzemelerin mekanik özelliklerindeki varyasyonların ve iç yapısal heterojenliklerin, kontrolsüz ısı dağılımı ve mikroyapısal farklılıklar nedeniyle oluştuğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, WAAM süreçlerinde bu tür sorunların önüne geçmek için termal yönetimin iyileştirilmesi ve mikroyapısal kontrolün sağlanması kritik önem taşımaktadır.

Harici ısıtıcılı WAAM numunelerinin çekme testi sonrasına ait görselleri Şekil 5.41’de verilmiştir. Şekil 5.41a, Geo.3’ten çıkarılan 6 adet numunenin Şekil 5.41b ise Geo.2’den çıkarılan 3 adet numunenin çekme testi sonrası görsellerini vermektedir. Numuneler WAAM numunelerinde olduğu gibi parçaların hareket yönü doğrultusundan yani yatay doğrultudan çıkarılmıştır. Kırılma bölgeleri incelendiğinde Geo.3’ten çıkarılan ilk 4 numunenin hemen hemen aynı bölgeden kırıldığı, son iki numunenin ise kendi içinde aynı bölgeden fakat ilk dört numuneden farklı bölgeden kırıldığı görülmektedir. Geo.2 numuneleri ise farklı kırılma bölgelerine sahiptir. Bu sonuçlar harici ısıtıcıların kırılma bölgeleri üzerinde sınırlı bir etki oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 5.42. Harici ısıtıcılı WAAM numunelerinin çekme testi sonucuna ait görseller

Harici ısıtıcılı WAAM numunelerinin çekme testi sonuçları ise Çizelge 5.6'da dokuz adet numune için verilmiştir. Harici ısıtıcılı WAAM numunelerinde akma gerilmesi ortalama değeri 257 ± 15 N/mm², çekme gerilmesi ortalama değeri 420 ± 21.68 N/mm² ve kopma gerilmesi ortalama 261 ± 21.68 N/mm² olarak hesaplanmıştır. Gerilme değerlerindeki değişimler harici ısıtıcıların malzemenin mukavemetini artırmada olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Harici ısıtıcılı WAAM numunelerinde elastisite modülü ortalama 259 ± 15 GPa olarak hesaplanmış, bu da malzemenin elastik deformasyon bölgesinde daha yüksek bir dayanım sergilediğini göstermektedir. Yüzdelik uzama değerleri, geleneksel WAAM numunelerine kıyasla harici ısıtıcılı WAAM numunelerinde daha düşüktür. Ortalama yüzdelik uzama değerleri, harici ısıtıcılı WAAM numuneleri için $\%39 \pm 5$ 'tir. Her iki üretim yönteminde de ortalama sapma değerlerinin benzer olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, her iki süreçte de belirli oranda mikroyapısal heterojenliğin bulunduğunu ve termal yönetimin etkilerinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.6. Harici ısıtıcılı WAAM numunelerinin çekme testi sonuçları

Geometri	Numune	Akma Gerilmesi (N/mm ²)	Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Yüzdelik Uzama (%)	Young Modülü (GPa)
Geo.2	H-W-2-1	260	417	268	34	245
	H-W-2-2	264	436	269	40	273
	H-W-2-3	267	426	269	30	251
Geo.3	H-W-3-1	253	432	261	42	270
	H-W-3-2	233	390	234	40	243
	H-W-3-3	230	380	234	37	253
	H-W-3-4	254	405	258	32	238
	H-W-3-5	274	441	276	47	276
	H-W-3-6	276	445	280	45	278

Bu sonuçlar, harici ısıtıcılı WAAM numunelerinin çekme performansında belirgin bir iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır. Özellikle Geo.3 bölgesinden çıkarılan numunelerde, yüzde uzama değerlerinde daha geniş bir aralık gözlemlenmiştir. Bu durum, harici ısıtma sayesinde termal geçişlerin daha kontrollü gerçekleşmesi ve iç gerilmelerin daha homojen dağılması ile açıklanabilir. Ancak, numuneler arasında hala belirgin bir sapma görülmektedir; bu da üretim sürecinde mikroyapısal homojenliği artırmaya yönelik iyileştirmelere ihtiyaç olduğunu işaret etmektedir.

Harici ısıtıcılar, termal çevrim kaynaklı olumsuzlukları engelleyerek tane yapısının daha homojen olmasını sağlamıştır. Bu homojenlik, dislokasyon sayısını sınırlandırarak numunelerin daha az uzama ile kopmasına neden olmuştur. Ayrıca, irileşen tanelerin daha az tane sınırına sahip olması, numunelerin daha düşük süneklik ile kırılmasına yol açmaktadır. Bölüm 5.1.3 ve 5.1.4'te de belirtildiği gibi, harici ısıtıcı numuneler daha büyük tane boyutu değerlerine sahiptir. Büyük tane boyutları, daha düşük tane sınırı yoğunluğu ile ilişkilidir; bu da malzemenin sünekliğini azaltarak kırılma davranışını etkileyebilir.

Çekme testlerinin daha iyi anlaşılması amacıyla, WAAM (W-2-1) ve harici ısıtıcı WAAM (H-W-2-1) numunelerinin test sonuçları ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Çizelge 5.7'de sunulan veriler, harici ısıtıcı WAAM numunesinin mekanik performansında belirgin bir iyileşme olduğunu göstermektedir. Harici ısıtıcı WAAM numunesi, akma gerilimi açısından 253 N/mm^2 ile daha yüksek bir değer sergilemiştir, bu da malzemenin şekil değiştirmeden önce daha büyük yükleri taşıyabileceğini göstermektedir. Ayrıca, yüzdelik uzama değerleri harici ısıtıcı WAAM örneğinde %42 olup, WAAM örneğindeki %41'e kıyasla hafif bir iyileşme göstermektedir; bu da harici ısıtma uygulamasının sünekliği artırıcı bir etkisi olduğunu işaret eder.

Çizelge 5.7. WAAM (W-2-1) ve harici ısıtıcı WAAM (H-W-2-1) için çekme testi sonuçları

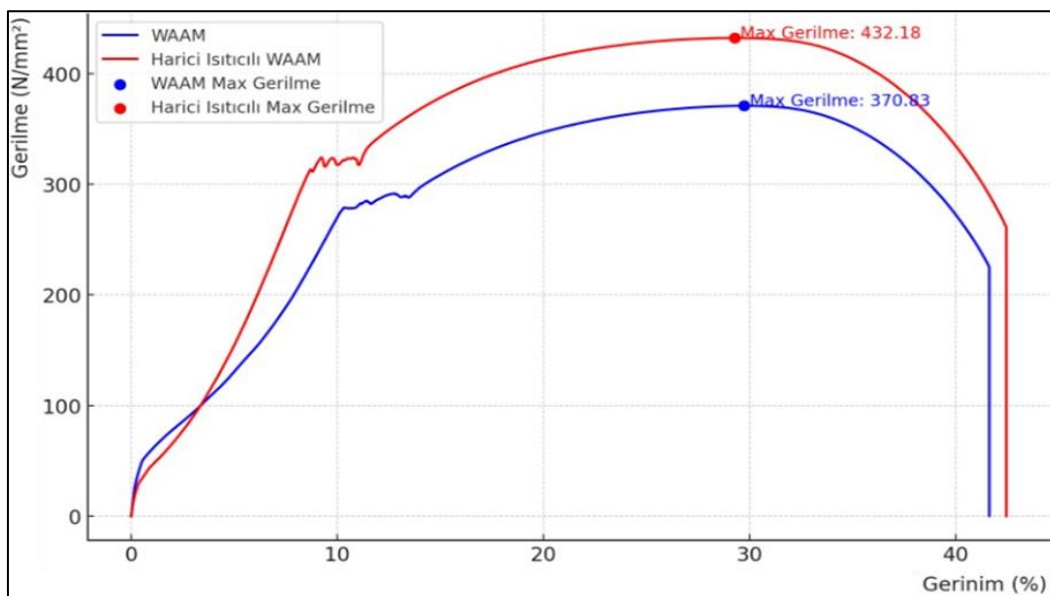
Sonuçlar	WAAM (W-2-1)	Harici ısıtıcı WAAM (H-W-2-1)
Akma Gerilimi (N/mm^2)	216	253
Çekme Gerilimi (N/mm^2)	370	432
Kopma Gerilimi (N/mm^2)	224	261
Yüzdelik Uzama (%)	42	42

Harici ısıtıcı WAAM numunesinin mekanik test sonuçları, malzemenin dayanıklılığı konusunda önemli bir iyileşme gösterdiğini ortaya koymaktadır. Kopma gerilmesi, harici ısıtıcı numunede 261 N/mm^2 olarak ölçülmüş olup, WAAM numunesindeki 224 N/mm^2 değerine kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Bu, harici ısıtıcı numunenin stres altında kırılmaya karşı daha iyi bir direnç sergilediğini göstermektedir.

Benzer şekilde, çekme gerilme değeri de harici ısıtıcılı numunede 432 N/mm^2 ile, WAAM numunesindeki 370 N/mm^2 'ye göre belirgin bir şekilde daha yüksek bulunmuştur. Bu fark, malzemenin çekme kuvvetine karşı daha iyi direnç gösterdiğini göstermektedir. Ayrıca, akma gerilmesi de harici ısıtıcılı numunede daha yüksek olup, malzemenin esneme ve plastik deformasyon kapasitesinde bir artış olduğunu işaret etmektedir.

Özellikle çekme ve kopma gerilmesi gibi kritik parametrelerde elde edilen bu iyileşmeler, harici ısıtma ile üretilen numunelerin stres altında daha dayanıklı olduğunu ve mekanik performanslarının daha yüksek olduğunu kanıtlamaktadır. Bu bulgular, harici ısıtıcılı WAAM yöntemiyle üretilen parçaların daha yüksek performans gerektiren uygulamalar için uygun olduğunu göstermektedir.

Gerilme-gerinim eğrisinde gösterilen çekme test sonuçları (Şekil 5.43), WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM'ın mekanik özelliklerini karşılaştırmaktadır. Harici ısıtıcılı WAAM örneği, standart WAAM örneğine kıyasla $432,18 \text{ MPa}$ 'lık daha yüksek maksimum gerilim değeriyle iyi çekme özellikleri sergilemektedir. Bu önemli fark, harici ısıtıcı ile üretilen malzemenin kırılmadan önce daha büyük çekme yüklerini taşıyabileceğini göstermektedir. Ayrıca, gerilme-gerinim eğrilerinin genel şekli, harici ısıtıcılı WAAM örneği için daha geniş bir gerilme aralığında daha yüksek gerilme seviyelerini koruyarak gelişmiş sünekliği göstermektedir.



Şekil 5.43. WAAM (W-2-1) ve harici ısıtıcılı WAAM (H-W-2-1) için gerilme-gerinim mühendislik eğrilerinin karşılaştırılması

Harici ısıtıcı uygulaması, termal gradyanları azaltarak daha rafine ve homojen bir mikro yapı oluşturur. Bu rafine mikro yapı hem malzemenin mukavemetini hem de sünekliğini artırır. Ayrıca, harici ısıtma, WAAM üretiminde hızlı soğuma sırasında tipik olarak oluşan kalıntı gerilimleri hafifletebilir, bu da malzemeyi zayıflatabilecek gerilim yoğunlukları ve mikro çatlakların oluşma olasılığını azaltır. Bu, geliştirilmiş kırılma direnci ve genel mekanik performans sağlar. Harici ısıtıcı ayrıca kolonlu taneler yerine eş eksenli tanelerin oluşumunu teşvik eder, bu da genel olarak daha yüksek çekme mukavemeti ve daha iyi uzama gibi daha iyi mekanik özelliklerle ilişkilidir. Ek olarak, harici ısıtıcı tarafından sağlanan ek ısı, birikim süreci sırasında atomik difüzyonu artırır, bu da katmanlar arasında daha iyi bağlanmaya ve malzemenin genel mukavemetine ve tokluğuna katkıda bulunan gözenekliliğin azalmasına yol açar. Son olarak, harici ısıtıcı kullanımı, WAAM süreci sırasında numune boyunca daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlar, termal sıcak noktaların ve soğuk noktaların oluşumunu en aza indirir ve çekme yükleri altında daha tutarlı ve öngörülebilir malzeme davranışı ile sonuçlanır.

5.2.6. Mikrosertlik testleri

WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM numuneleri üzerinde gerçekleştirilen mikrosertlik testleri, malzemenin yüzeyindeki mikroyapısal değişimlerin ve mekanik özelliklerin incelenmesi açısından önemli veriler sunmaktadır. Mikrosertlik testleri, inşa yönü boyunca iki farklı numune üzerinde yapılmış olup hem WAAM hem de harici ısıtıcılı WAAM için toplamda dört farklı sonuç raporlanmıştır.

Mikrosertlik ölçümleri, malzemenin üretim süreci sırasında maruz kaldığı termal ve mekanik etkilerin mikroyapısal düzeyde nasıl bir değişim oluşturduğunu anlamak açısından kritik rol oynar. Özellikle katmanlı imalat süreçlerinde, her bir katmanın termal çevrimi, iç yapıda mikrosertlik değişimlerine yol açabilir. Harici ısıtıcılı WAAM sürecinde, daha kontrollü bir termal yönetim sağlandığı için, mikrosertlik dağılımında daha homojen sonuçlar elde edilmesi beklenir. WAAM numunelerinde mikrosertlik değerlerinin daha düzensiz olduğu ve katmanlar arasında belirgin farklılıklar gözlemlendiği görülmüştür. Harici ısıtıcılı WAAM numunelerinde ise daha homojen bir mikrosertlik dağılımı elde edilmiştir. Harici ısıtıcılı numunelerde, daha kontrollü bir termal süreç nedeniyle iç gerilmeler ve sertlik değerleri arasındaki değişkenlik azalmış, daha kararlı bir yapı elde edilmiştir.

Yapılan testlerden elde edilen sonuçlar, çalışmanın önceki bölümünde yer alan mikrosertlik testlerini destekler nitelikte olup, harici ısıtıcılı WAAM numunesindeki büyüyen tane yapısını doğrulamaktadır. WAAM ve harici ısıtıcılı WAAM numunelerinin inşa yönü boyunca yapılan mikrosertlik ölçümlerinin ortalaması sırasıyla 177 ± 6 HV ve 170 ± 2 HV olarak kaydedilmiştir. WAAM numunelerinde ölçülen maksimum değer 190 HV iken, harici ısıtıcılı WAAM numunesinde bu değer 175 HV olarak ölçülmüştür. Minimum mikrosertlik değeri WAAM numunelerinde 169 HV seviyesinde iken, harici ısıtıcılı WAAM numunesinde 168 HV seviyesinde ölçülmüştür.

Harici ısıtıcılı WAAM numunelerinde mikrosertlik değerlerindeki dalgalanma daha azdır. Bu durum, kontrollü termal davranışın iç yapıda daha homojen bir yapı oluşturduğunu ve dolayısıyla mikrosertlik değerlerinin de daha tutarlı ve homojen olmasını sağladığını göstermektedir. Harici ısıtma sayesinde, ısı dağılımı daha dengeli sağlanmış ve bu da malzeme içindeki mikroyapısal farklılıkların azaltılmasına katkıda bulunmuştur. WAAM numunelerinde gözlemlenen daha yüksek sertlik değerleri, tane yapısındaki incelme ve mikroyapısal heterojenlikler ile ilişkilidir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, eklemeli imalat alanında önemli bir yere sahip olan tel ark ergitmeli eklemeli imalat yönteminin termal davranışı ve bu termal davranışın üretilen parçaların makro ve mikro yapıları üzerindeki etkisi üzerinde kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Araştırmanın temel amacı, üretim sürecindeki termal davranışın neden olduğu kalıntı gerilme ve çarpılma konularını incelemektir. Üretim sürecinde meydana gelen bu olumsuz etkileri en aza indirmek amacıyla, termal davranışı kontrol altına alabilecek yeni yöntem geliştirilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

WAAM işleminin termal modeli analiz edilmiş ve termal modelinin sayısal çalışmaları yapılmıştır. Bu model, üretim sürecindeki ısı dağılımını ve malzemenin termal tepkisini anlamak için kullanılmıştır.

WAAM işleminde kontrolsüz soğumanın kontrol altına alınması için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, malzemenin termal davranışını daha iyi kontrol etmek için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

WAAM işleminin temel ısı denkleminin yeni bir varyasyonu geliştirilmiştir. Harici ısı kaynaklı WAAM işleminin sayısal modellemesinde, harici ısı sisteme ek ısı girdisi olarak eklenmiştir.

Geliştirilen yöntemin ön denemeleri için sayısal çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, yöntemin uygulanabilirliğini ve etkinliğini değerlendirmek için önemlidir.

Üretilen geometrilere farklı testler yapılmış, bu testler ile sayısal sonuçlar ve harici ısıtıcıların parçalar üzerindeki etkisi ilişkilendirilmiştir.

Harici ısıtıcılar ile termal davranışın kontrol altına alındığı, kontrollü termal davranış ile özellikle çarpılma ve kalıntı gerilme kontrolünün sağlanabileceği belirlenmiştir.

Optik mikroskop görüntüleri, harici ısıtıcı kullanımının duvarın mikroyapısını değiştirdiğini ortaya koymuştur. Asiküler ve poligonal ferrit yapılarında azalma gözlenmiş ayrıca martenzit ve üst beynit yapı oluşumları önlenmiştir.

SEM görüntülerinde ise beynit oluşumu görülmemiştir. Harici ısıtıcıların, gözenekler ve füzyon eksikliği gibi ara katman süreksizlikleri ile düzensiz mikroyapıların oluşumunu azalttığı belirlenmiştir. Üst iki katmanda oluşan dendritik yapı, harici ısıtıcılar tarafından ayrıştırılarak yapı daha homojen hale gelmiştir.

Harici ısıtıcılı WAAM numunelerinde mikrosertlik değerlerindeki dalgalanma daha azdır. Kontrollü termal davranış iç yapıda homojen bir yapı oluşturarak mikrosertlik değerlerinin de homojen olmasını sağlamıştır. Mikrosertlik ölçümleri, harici ısıtıcılar ile üretilen duvarın mikrosertlik değerlerinin önemli ölçüde daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Üst iki katman arasındaki mikrosertlik farkı yaklaşık 35 HV olarak tespit edilmiş, yapı yönü boyunca ölçülen mikrosertlik değişimi WAAM ile karşılaştırıldığında %30'dan %12'ye düşmüştür.

Çekme testi sonuçları, harici ısıtıcıya tabi tutulan numunenin, standart WAAM numunesine kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti sergilediğini göstermiştir. Çekme mukavemetindeki artış yaklaşık %17 olarak hesaplanmıştır.

EBSD analizi, anizotropinin harici ısıtıcılar ile azaltılabileceğini göstermiştir.

Harici ısıtıcı kullanımının, kalıntı gerilme ölçümlerinde belirgin bir azalma sağladığı ve üretilen parçaların CAD verisi ile uyumunun ortalama %20 oranında arttığını göstermiştir.

Yapılan bu tez çalışmanın ışığında muhtemel gelecek çalışmalar şu şekilde olabilir:

Geliştirilen yeni yaklaşımın farklı alaşımlar ve malzemeler üzerindeki etkisi incelenebilir. Bu, yöntemin geniş bir malzeme yelpazesinde uygulanabilirliğini değerlendirmek açısından önemlidir.

Farklı ısı kaynakları ile yeni yöntem denenebilir.

Büyük geometriler için geometri ile büyüyen ısıtıcı modelleri üretim sürecine ilave edilebilir.

Üretim sürecinde harici ısı kaynakları için değişen sıcaklık ayarlaması yapılabilir. Bu, termal davranışın daha hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlayabilir.

Yeni yöntem ile üretilen parçalara hem tahribatsız hem de tahribatlı kalıntı gerilme ölçümleri yapılabilir. Bu ölçümler, yöntemin kalıntı gerilmeleri ne kadar etkili bir şekilde azalttığını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir.

Yeni yöntem için üretim optimizasyon çalışmaları yapılabilir. Bu çalışmalar, üretim sürecinin verimliliğini artırmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla önemlidir.



KAYNAKLAR

1. Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T., Austin, S.A., Gibb, A.G.F., ve Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21. 262-268.
2. Wong, K.V.ve Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012. 208760.
3. Tofail, S.A.M., Koumoulos, E.P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., ve Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21. (1). 22-37.
4. Alcisto, J., Enriquez, A., Garcia, H., Hinkson, S., Steelman, T., Silverman, E., Valdovino, P., Gigerenzer, H., Foyos, J., Ogren, J., Dorey, J., Karg, K., McDonald, T., ve Es-Said, O.S. (2011). Tensile Properties and Microstructures of Laser-Formed Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20. (2). 203-212.
5. Frazier, W.E. (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23. (6). 1917-1928.
6. Lewandowski, J.J.ve Seifi, M. (2016). Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties. *Annual Review of Materials Research*, 46. (1). 151-186.
7. Kelly, S. ve Kampe, S. (2004). Microstructural evolution in laser-deposited multilayer Ti-6Al-4V builds: Part II. Thermal modeling. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35. 1869-1879.
8. Zheng, B., Zhou, Y., Smugeresky, J., Schoenung, J., ve Lavernia, E. (2008). Thermal behavior and microstructure evolution during laser deposition with laser-engineered net shaping: Part II. Experimental investigation and discussion. *Metallurgical and materials transactions A*, 39. 2237-2245.
9. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., ve Li, H. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81. (1). 465-481.
10. ASTM. (2012). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015). ASTM-F2792-12a.
11. Baker, R. (1925). Method of Making Decorative Articles. *Google Patents*.
12. E. Doğan, O. Yılmaz, Ö. E. Kara, N. Bol, ve Kara, L. (2024). *Effect of External Heat Sources on Waam; Dimensional and Macro Structural*. Additive Manufacturing Conference TÜRKİYE 2024, Antalya/Türkiye.
13. Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., ve Norrish, J. (2018). A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, 35. 127-139.

14. Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., Ding, J., Pardal, G., ve Colegrove, P. (2016). Wire + Arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 32. (7). 641-647.
15. Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M., Santos, T.G., ve Oliveira, J.P. (2019). Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Materials (Basel)*, 12. (7).
16. DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Beese, A.M., Wilson-Heid, A., De, A., ve Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92. 112-224.
17. Athaib, N.H., Haleem, A.H., ve Al-Zubaidy, B. (2021). A review of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminium Composite, Process, Classification, Advantages, Challenges, and Application. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973. (1). 012083.
18. Ge, J., Ma, T., Chen, Y., Jin, T., Fu, H., Xiao, R., Lei, Y., ve Lin, J. (2019). Wire-arc additive manufacturing H13 part: 3D pore distribution, microstructural evolution, and mechanical performances. *Journal of Alloys and Compounds*, 783. 145-155.
19. Acevedo, R.B.O., Kantarowska, K., Santos, E.C., ve Fredel, M.C. (2020). Residual stress measurement techniques for Ti6Al4V parts fabricated using selective laser melting: state of the art review. *Rapid Prototyping Journal*, 29. (8). 1549-1564.
20. Francis, J.A. (2016). Measurement, modelling and mitigation of residual stress. *Materials Science and Technology*, 32. (14). 1409-1410.
21. Pan, Z.X., Ding, D.H., Wu, B.T., Cuiuri, D., Li, H.J., ve Norrish, J. (2018). Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing, Vol I, No. 1 2017*, 1. (1). 3-24.
22. Youheng, F., Guilan, W., Haiou, Z., ve Liye, L. (2017). Optimization of surface appearance for wire and arc additive manufacturing of Bainite steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91. 301-313.
23. Zahidin, M.R., Yusof, F., Abdul Rashid, S.H., Mansor, S., Raja, S., Jamaludin, M.F., Manurung, Y.H.P., Adenan, M.S., ve Syahriah Hussein, N.I. (2023). Research challenges, quality control and monitoring strategy for Wire Arc Additive Manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*, 24. 2769-2794.
24. Abe, T., Kaneko, J.i., ve Sasahara, H. (2020). Thermal sensing and heat input control for thin-walled structure building based on numerical simulation for wire and arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 35. 101357.
25. Henckell, P., Gierth, M., Ali, Y., Reimann, J., ve Bergmann, J.P. (2020). Reduction of Energy Input in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) with Gas Metal Arc Welding (GMAW). *Materials*, 13. (11). 2491.

26. Colegrove, P., Ikeagu, C., Thistlethwaite, A., Williams, S., Nagy, T., Suder, W., Steuwer, A., ve Pirling, T. (2013). Welding process impact on residual stress and distortion. *Science and Technology of Welding and Joining*, 14. (8). 717-725.
27. Srivastava, S., Garg, R.K., Sharma, V.S., ve Sachdeva, A. (2020). Measurement and Mitigation of Residual Stress in Wire-Arc Additive Manufacturing: A Review of Macro-Scale Continuum Modelling Approach. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28. (5). 3491-3515.
28. Sun, J., Hensel, J., Köhler, M., ve Dilger, K. (2021). Residual stress in wire and arc additively manufactured aluminum components. *Journal of Manufacturing Processes*, 65. 97-111.
29. Sun, R., Li, L., Zhu, Y., Guo, W., Peng, P., Cong, B., Sun, J., Che, Z., Li, B., Guo, C., ve Liu, L. (2018). Microstructure, residual stress and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening. *Journal of Alloys and Compounds*, 747. 255-265.
30. Abusalma, H., Eisazadeh, H., Hejripour, F., Bunn, J., ve Aidun, D.K. (2022). Parametric study of residual stress formation in Wire and Arc Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 75. 863-876.
31. Bauer, A., Scharf, R., Hälsig, A., ve Awiszus, B. (2021). Numerical simulation and calibration of a single seam WAAM process with a commercial and an open source software. *Journal of Applied Engineering Design and Simulation*, 1. (1). 25-31.
32. Chergui, A., Villeneuve, F., Béraud, N., ve Vignat, F. (2022). Thermal simulation of wire arc additive manufacturing: a new material deposition and heat input modelling. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*.
33. Ding, D., Zhang, S., Lu, Q., Pan, Z., Li, H., ve Wang, K. (2021). The well-distributed volumetric heat source model for numerical simulation of wire arc additive manufacturing process. *Materials Today Communications*, 27. 102430.
34. Ge, J., Ma, T., Han, W., Yuan, T., Jin, T., Fu, H., Xiao, R., Lei, Y., ve Lin, J. (2019). Thermal-induced microstructural evolution and defect distribution of wire-arc additive manufacturing 2Cr13 part: Numerical simulation and experimental characterization. *Applied Thermal Engineering*, 163. 114335.
35. Huang, H., Chen, J., Carlson, B., Wang, H.-P., Crooker, P., Frederick, G., ve Feng, Z. (2018) *Stress and Distortion Simulation of Additive Manufacturing Process by High Performance Computing*. in *ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference*.
36. Srivastava, S., Garg, R.K., Sharma, V.S., ve Sachdeva, A. (2020). Measurement and Mitigation of Residual Stress in Wire-Arc Additive Manufacturing: A Review of Macro-Scale Continuum Modelling Approach. *Archives of Computational Methods in Engineering*,

37. Argyris, J.H., Szimmat, J., ve Willam, K.J. (1982). Computational aspects of welding stress analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 33. (1). 635-665.
38. Papazoglou, V.J.ve Masubuchi, K. (1982). Numerical Analysis of Thermal Stresses During Welding Including Phase Transformation Effects. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 104. (3). 198-203.
39. Goldak, J., Chakravarti, A., ve Bibby, M. (1984). A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*, 15. (2). 299-305.
40. Bonifaz, E.A.ve Palomeque, J.S. (2020). A mechanical model in wire + Arc additive manufacturing process. *Progress in Additive Manufacturing*, 5. (2). 163-169.
41. Cadiou, S., Courtois, M., Carin, M., Berckmans, W., ve Le masson, P. (2020). 3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (Cmt-Waam). *Additive Manufacturing*, 36. 101541.
42. Bambach, M., Sideris, I., Fabbri, M., ve Wegener, K. (2022). Faster than real-time path-sensitive temperature modeling of wire-arc additive manufacturing by a data-driven finite volume method. *CIRP Annals*, 71. (1). 189-192.
43. Ogino, Y., Asai, S., ve Hirata, Y. (2018). Numerical simulation of WAAM process by a GMAW weld pool model. *Welding in the World*, 62. (2). 393-401.
44. Pavelic, V., Tanbakuchi, R., Uyehara, O., ve Myers, P. (1969). Experimental and computed temperature histories in gas tungsten arc welding of thin plates. *Welding Journal Research Supplement*, 48. 296-305.
45. Friedman, E. (1975). Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 97. (3). 206-213.
46. Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Sequeira Almeida, P.M., Wang, F., ve 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.
47. Bai, X., Colegrove, P., Ding, J., Zhou, X., Diao, C., Bridgeman, P., roman Hönnige, J., Zhang, H., ve Williams, S. (2018). Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124. 504-516.
48. Yin, J., Zhu, H., Ke, L., Lei, W., Dai, C., ve Zuo, D. (2012). Simulation of temperature distribution in single metallic powder layer for laser micro-sintering. *Computational Materials Science*, 53. (1). 333-339.
49. Scotti, F.M., Teixeira, F.R., Silva, L.J.d., de Araújo, D.B., Reis, R.P., ve Scotti, A. (2020). Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique. *Journal of Manufacturing Processes*, 57. 23-35.

50. Rodrigues, T.A., Duarte, V.R., Miranda, R.M., Santos, T.G., ve Oliveira, J.P. (2021). Ultracold-Wire and arc additive manufacturing (UC-WAAM). *Journal of Materials Processing Technology*, 296. 117196.
51. da Silva, L.J., Souza, D.M., de Araújo, D.B., Reis, R.P., ve Scotti, A. (2020). Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107. (5-6). 2513-2523.
52. Li, Z., Liu, C., Xu, T., Ji, L., Wang, D., Lu, J., Ma, S., ve 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.
53. Duan, X., Li, Q., Xie, W., ve Yang, X. (2023). Wire arc metal additive manufacturing using pulsed arc plasma (PAP-WAAM) for effective heat management. *Journal of Materials Processing Technology*, 311. 117806.
54. Alhakeem, M.M., Mollamahmutoglu, M., Yilmaz, O., Bol, N., ve Kara, O.E. (2023). A deposition strategy for Wire Arc Additive Manufacturing based on temperature variance analysis to minimize overflow and distortion. *Journal of Manufacturing Processes*, 85. 1208-1220.
55. Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., ve Fei, Z. (2018). The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 258. 97-105.
56. Yang, Y., Jin, X., Liu, C., Xiao, M., Lu, J., Fan, H., ve Ma, S. (2018). Residual Stress, Mechanical Properties, and Grain Morphology of Ti-6Al-4V Alloy Produced by Ultrasonic Impact Treatment Assisted Wire and Arc Additive Manufacturing. *Metals*, 8. (11). 934.
57. Sun, R.J., Li, L.H., Zhu, Y., Guo, W., Peng, P., Cong, B.Q., Sun, J.F., Che, Z.G., Li, B., Guo, C., ve Liu, L. (2018). Microstructure, residual stress and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening. *Journal of Alloys and Compounds*, 747. 255-265.
58. Hönnige, J.R., Colegrove, P.A., Ganguly, S., Eimer, E., Kabra, S., ve Williams, S. (2018). Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling. *Additive Manufacturing*, 22. 775-783.
59. Hönnige, J.R., Colegrove, P.A., Ahmad, B., Fitzpatrick, M.E., Ganguly, S., Lee, T.L., ve Williams, S.W. (2018). Residual stress and texture control in Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured intersections by stress relief and rolling. *Materials & Design*, 150. 193-205.
60. Martina, F., Roy, M.J., Szost, B.A., Terzi, S., Colegrove, P.A., Williams, S.W., Withers, P.J., Meyer, J., ve Hofmann, M. (2016). Residual stress of as-deposited and rolled wire+arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components. *Materials Science and Technology*, 32. (14). 1439-1448.

61. Colegrove, P.A., Coules, H.E., Fairman, J., Martina, F., Kashoob, T., Mamash, H., ve 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.
62. Martina, F., Roy, M., Colegrove, P., ve W Williams, S. (2014). Residual stress reduction in high pressure interpass rolled wire+arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components. *University of Texas at Austin*, 89-94.
63. Somashekara, M.A., Naveenkumar, M., Kumar, A., Viswanath, C., ve Simhambhatla, S. (2017). Investigations into effect of weld-deposition pattern on residual stress evolution for metallic additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90. (5). 2009-2025.
64. Yildiz, A.S., Davut, K., Koc, B., ve Yilmaz, O. (2020). Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108. (11-12). 3391-3404.
65. Nagasai, B.P., Malarvizhi, S., ve Balasubramanian, V. (2021). Mechanical properties of wire arc additive manufactured carbon steel cylindrical component made by gas metal arc welding process. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 30. (1). 188-198.
66. Vahedi Nemani, A., Ghaffari, M., ve Nasiri, A. (2020). On the Post-Printing Heat Treatment of a Wire Arc Additively Manufactured ER70S Part. *Materials (Basel)*, 13. (12). 2795.
67. Brodusch, N., Demers, H., ve Gauvin, R. (2018). Imaging with a commercial electron backscatter diffraction (EBSD) camera in a scanning electron microscope: A review. *Journal of Imaging*, 4. (7). 88.
68. Huang, C., Kyvelou, P., Zhang, R., Ben Britton, T., ve Gardner, L. (2022). Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels. *Materials & Design*, 216. 110544.
69. Guo, W., Francis, J.A., Li, L., Vasileiou, A.N., Crowther, D., ve Thompson, A. (2016). Residual stress distributions in laser and gas-metal-arc welded high-strength steel plates. *Materials Science and Technology*, 32. (14). 1449-1461.
70. Elmesalamy, A., Francis, J.A., ve Li, L. (2014). A comparison of residual stresses in multi pass narrow gap laser welds and gas-tungsten arc welds in AISI 316L stainless steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 113. 49-59.
71. Francis, J.A., Bhadeshia, H.K.D.H., ve Withers, P.J. (2007). Welding residual stresses in ferritic power plant steels. *Materials Science and Technology*, 23. (9). 1009-1020.

72. Murugan, S., Rai, S.K., Kumar, P., Jayakumar, T., Raj, B., ve Bose, M. (2001). Temperature distribution and residual stresses due to multipass welding in type 304 stainless steel and low carbon steel weld pads. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78. 307-317.
73. Su, C., Chen, X., Gao, C., ve Wang, Y. (2019). Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM. *Applied Surface Science*, 486. 431-440.
74. Jimenez, X., Dong, W., Paul, S., Klecka, M.A., ve To, A.C. (2020). Residual Stress Modeling with Phase Transformation for Wire Arc Additive Manufacturing of B91 Steel. *Jom*, 72. (12). 4178-4186.
75. Li, C., Liu, Z.Y., Fang, X.Y., ve Guo, Y.B. (2018). Residual Stress in Metal Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 71. 348-353.
76. Mukherjee, T., Zhang, W., ve DebRoy, T. (2017). An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing. *Computational Materials Science*, 126. 360-372.
77. Nagasai, B.P., Malarvizhi, S., ve Balasubramanian, V. (2022). Effect of welding processes on mechanical and metallurgical characteristics of carbon steel cylindrical components made by wire arc additive manufacturing (WAAM) technique. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 36. 100-116.
78. Shukla, V., Kumar, V., ve Dixit, A. (2023). Microstructural characteristics and tensile properties of ER70S-6 manufactured by Robotic CMT wire-and-arc additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*,
79. Rafieazad, M., Ghaffari, M., Vahedi Nemani, A., ve Nasiri, A. (2019). Microstructural evolution and mechanical properties of a low-carbon low-alloy steel produced by wire arc additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105. (5-6). 2121-2134.
80. Wang, J., Lin, X., Li, J.Q., Hu, Y.L., Zhou, Y.H., Wang, C., Li, Q.G., ve Huang, W.D. (2019). Effects of deposition strategies on macro/microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 754. 735-749.
81. Singh, S.R.ve Khanna, P. (2021). Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials. *Materials Today: Proceedings*, 44. 118-128.
82. Wang, F., Williams, S., Colegrove, P., ve Antonysamy, A.A. (2012). Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44. (2). 968-977.

83. Wang, J., Lin, X., Li, J., Hu, Y., Zhou, Y., Wang, C., Li, Q., ve Huang, W. (2019). Effects of deposition strategies on macro/microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti6Al4V. *Materials Science and Engineering: A*, 754. 735-749.
84. Wang, J., Sun, Q., Wang, H., Liu, J., ve Feng, J. (2016). Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding. *Materials Science and Engineering: A*, 676. 395-405.
85. Sridharan, N., Noakes, M.W., Nycz, A., Love, L.J., Dehoff, R.R., ve Babu, S.S. (2018). On the toughness scatter in low alloy C-Mn steel samples fabricated using wire arc additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 713. 18-27.
86. Khebreh Farshchi, Y., Khodabakhshi, F., Mohri, M., Shirazi, H., ve 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.
87. Bellamkonda, P.N., Sudersanan, M., ve Visvalingam, B. (2022). A study on tensile properties and microstructural characteristics of wire arc additive manufactured low carbon steel cylindrical components. *Welding International*, 36. (8). 443-454.
88. Kabaldin, Y., Shatagin, D., Ryabov, D., Solovyov, A., ve Kurkin, A. (2023). Microstructure, Phase Composition, and Mechanical Properties of a Layered Bimetallic Composite ER70S-6-ER309LSI Obtained by the WAAM Method. *Metals*, 13. (5). 851.
89. Gündüz, S.ve Çapar, A. (2006). Influence of forging and cooling rate on microstructure and properties of medium carbon microalloy forging steel. *Journal of Materials Science*, 41. (2). 561-564.
90. Rasouli, D., Khameneh Asl, S., Akbarzadeh, A., ve Daneshi, G.H. (2008). Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of microalloyed forging steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 206. (1-3). 92-98.
91. Dinovitzer, M., Chen, X., Laliberte, J., Huang, X., ve Frei, H. (2019). Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure. *Additive Manufacturing*, 26. 138-146.
92. Shassere, B., Nycz, A., Noakes, M.W., Masuo, C., ve Sridharan, N. (2019). Correlation of Microstructure and Mechanical Properties of Metal Big Area Additive Manufacturing. *Applied Sciences*, 9. (4). 787.
93. Bhadeshia, H.K.D.H.ve Christian, J.W. (1990). Bainite in steels. *Metallurgical Transactions A*, 21. (3). 767-797.

94. Ghaffari, M., Vahedi Nemani, A., Rafieazad, M., ve Nasiri, A. (2019). Effect of Solidification Defects and HAZ Softening on the Anisotropic Mechanical Properties of a Wire Arc Additive-Manufactured Low-Carbon Low-Alloy Steel Part. *JOM*, 71. (11). 4215-4224.
95. Gordon, J.V., Haden, C.V., Nied, H.F., Vinci, R.P., ve Harlow, D.G. (2018). Fatigue crack growth anisotropy, texture and residual stress in austenitic steel made by wire and arc additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 724. 431-438.
96. Ream, J. (2020). *Characterization of arc-based additive manufacturing of low carbon steel deposits*. Yüksek Lisans Tezi, Colorado School of Mines, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Colorado, 128.
97. Aldalur, E., Veiga, F., Suárez, A., Bilbao, J., ve Lamikiz, A. (2020). High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 58. 615-626.
98. Bushroa, A.R., Rahbari, R.G., Masjuki, H.H., ve Muhamad, M.R. (2012). Approximation of crystallite size and microstrain via XRD line broadening analysis in TiSiN thin films. *Vacuum*, 86. (8). 1107-1112.
99. Heryanto, Abdullah, B., Tahir, D., ve Mahdalia. (2019). Quantitative analysis of X-Ray diffraction spectra for determine structural properties and deformation energy of Al, Cu and Si. *Journal of Physics: Conference Series*, 1317. (1). 012052.
100. Rafieazad, M., Nemani, A.V., Ghaffari, M., ve Nasiri, A. (2021). On Microstructure and Mechanical Properties of a Low-Carbon Low-Alloy Steel Block Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30. (7). 4937-4945.
101. Luo, J., Jia, X., Gu, R., Zhou, P., Huang, Y., Sun, J., ve Yan, M. (2018). 316L Stainless Steel Manufactured by Selective Laser Melting and Its Biocompatibility with or without Hydroxyapatite Coating. *Metals*, 8. (7). 548.
102. Ge, J.G., Lin, J., Lei, Y.P., ve Fu, H.G. (2018). Location-related thermal history, microstructure, and mechanical properties of arc additively manufactured 2Cr13 steel using cold metal transfer welding. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 715. 144-153.
103. Li, R., Xiong, J., ve Lei, Y. (2019). Investigation on thermal stress evolution induced by wire and arc additive manufacturing for circular thin-walled parts. *Journal of Manufacturing Processes*, 40. 59-67.
104. Abid, M., Siddique, M., ve Mufti, R.A. (2005). Prediction of welding distortions and residual stresses in a pipe-flange joint using the finite element technique. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 13. (3). 455-470.

105. Chen, W., Voisin, T., Zhang, Y., Florien, J.B., Spadaccini, C.M., McDowell, D.L., Zhu, T., ve Wang, Y.M. (2019). Microscale residual stresses in additively manufactured stainless steel. *Nat Commun*, 10. (1). 4338.
106. Withers, P.J.ve Bhadeshia, H.K.D.H. (2001). Residual stress. Part 1 – Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, 17. (4). 355-365.
107. Withers, P.J.ve Bhadeshia, H.K.D.H. (2001). Residual stress. Part 2 – Nature and origins. *Materials Science and Technology*, 17. (4). 366-375.
108. Wandtke, K., Schroepfer, D., Scharf-Wildenhain, R., Haelsig, A., Kannengiesser, T., Kromm, A., ve Hensel, J. (2023). Influence of the WAAM process and design aspects on residual stresses in high-strength structural steels. *Welding in the World*, 67. (4). 987-996.
109. Kumar, N., Bhavsar, H., Mahesh, P.V.S., Srivastava, A.K., Bora, B.J., Saxena, A., ve Dixit, A.R. (2022). Wire Arc Additive Manufacturing – A revolutionary method in additive manufacturing. *Materials Chemistry and Physics*, 285. 126144.



Gazili olmak ayrıcalıktır