



**TEL BESLEMELİ ARK ERGİTMELİ EKLEMELİ İMALAT
YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN ISIL DAVRANIŞ,
GEOMETRİK, MEKANİK VE METALÜRJİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Ahmet Suat YILDIZ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2020

Ahmet Suat YILDIZ tarafından hazırlanan “TEL BESLEMELİ ARK ERGİTMELİ EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN ISIL DAVRANIŞ, GEOMETRİK, MEKANİK VE METALÜRJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Erhan İlhan KONUKSEVEN

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Ulaş YAMAN

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 15/12/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

Ahmet Suat YILDIZ
15/12/2020

TEL BESLEMELİ ARK ERGİTMELİ EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE
ÜRETİLEN PARÇALARIN ISIL DAVRANIŞ, GEOMETRİK, MEKANİK VE
METALÜRJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI
(Doktora Tezi)

Ahmet Suat YILDIZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2020

ÖZET

Eklemeli imalat karmaşık tasarımlar için sağlamış olduğu esneklik, daha az malzeme gideri ve daha kısa üretim süresi ile son yıllarda önemi artan ileri imalat yöntemlerinden birisidir. Tel beslemeli ark ergitmeli eklemeli imalat yöntemi (WAAM) büyük ve orta karmaşıklıkta parçaların üretimine imkân tanıyan bir metal eklemeli imalat yöntemidir. Bu tez çalışmasında, WAAM yöntemiyle üretimde gerçekleşen ısı etkilerinin malzeme davranışına, parça geometrisine ve parçanın mikro yapısına etkileri sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada ilk olarak WAAM yöntemi etkin proses parametreleri tel besleme hızı (TBH) ve TBH'nin ilerleme hızına (İH) oranının dikiş geometrisine, mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Sonuçlar TBH ve TBH/İH oranının ısı girdisini ve dikiş geometrisini kontrol eden ana parametreler olduğunu göstermiş ve dikiş geometrisini tahmin eden bir regresyon modeli geliştirilmiştir. Seçilen iki farklı parametre seti ile düşük, yüksek ısı girdili tek dikiş ve iki farklı yığıma yollu bitişik dikiş duvarlar üretilmiştir. Bu duvarlar üzerinden alınan mikro yapı ve çekme numunelerinin incelenmesi sonucunda yüksek ısı girdisinin sünekliği %22 arttırdığı, akma ve çekme dayanımını sırasıyla %6 ve %4 düşürdüğü görülmüştür. Dikey ve yatay yönde çıkartılan çekme numunelerinin dayanımları izotropik özellikler göstermiştir. Tez çalışmasında ayrıca WAAM prosesi sırasında malzemede gerçekleşen ısı davranışı incelemek amacı ile sonlu elemanlar analiz yöntemi ile bir ısı model geliştirilmiş ve deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Bu ısı modelin WAAM prosesinde katmanlar arası bekleme sürelerinin tahmininde kullanılabilirliği kanıtlanmıştır. Elde edilen soğuma hızları sürekli soğuma dönüşüm grafiğine yerleştirilmiş ve üretilen parçaların mekanik özelliklerine doğrudan etki eden mikro yapıların oluşması tahmininde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, tel beslemeli ark ergitmeli imalat, mikro yapı, mekanik özellikler, sonlu elemanlar, ısı davranış
Sayfa Adedi : 124
Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

INVESTIGATION OF THERMAL BEHAVIOR, GEOMETRICAL, MECHANICAL
AND METALLURGICAL PROPERTIES OF WIRE ARC ADDITIVE
MANUFACTURED PARTS

(Ph. D. Thesis)

Ahmet Suat YILDIZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2020

ABSTRACT

Additive manufacturing is promising by providing complex design flexibility, less material usage and short lead times. Wire arc additive manufacturing (WAAM) is a variant of additive manufacturing which allows production of large-scale and middle complex parts. In this thesis work, geometrical, mechanical and metallurgical properties of WAAM parts with the thermal behavior effects was studied. Firstly, the effect of the main WAAM parameters wire feed speed (WFS) and the ratio of WFS to travel speed (TS) on bead geometry, microstructure, and mechanical properties was investigated. The results showed that WFS and WFS/TS are the major parameters to control the heat input and bead geometry. A regression model which estimates the bead geometry was developed. With two chosen parameter sets, low and high heat input single-bead walls, and multiple bead walls with parallel and oscillation building strategy were deposited. Tensile and microstructure specimens extracted from the walls showed that the high heat input improves the toughness by 22%, but lowers the yield and tensile strength by 6% and 4% respectively. Vertical and horizontal oriented samples tensile test results showed that the material exhibits isotropic properties with WAAM. In order to investigate the thermal behavior in the material, a model using finite element method was developed and verified with the experiments. This model was further developed to estimate the cooling time between layers. The cooling curves were also used to estimate the microstructure which affects the mechanical properties of the parts by using the continuous cooling transformation diagram.

Science Code : 91438
Key Words : Additive manufacturing, wire arc additive manufacturing,
microstructure, mechanical properties, finite element, thermal behavior
Page Number : 124
Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması ve diğer akademik çalışmalarında bilgi, beceri ve deneyimiyle bana yön gösteren ve desteğini hiç esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması süresince, yapmış olduğumuz dönemlik toplantılarda geribildirimleri ile katkı sağlayan tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Erhan İlhan KONUKSEVEN ve Sayın Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK'e de ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam sırasında bana manevi destek olan ve zaman ayırmam konusunda sabır gösteren biricik eşim Nurhan YILDIZ'a ve güzel yavrularım Kerem ve Ecem YILDIZ'a sevgi ve teşekkürlerimi sunarım. Beni bu noktalara getiren ve hep okuyup, araştırmamı öğütleyen rahmetli babam Mahmut YILDIZ'a, beni dünyaya getiren ve büyüten sevgili annem Fethiye YILDIZ'a, kardeşlerim Arzu YILDIZ ve Filiz BOZKURT'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamı "Savunma Sanayii İçin Araştırmacı Yetiştirme Programı" kapsamında yapmama imkân tanıyan Savunma Sanayi Başkanlığı'na teşekkürlerimi sunarım. Projenin sanayi danışmanı olan değerli yöneticim Barış KOÇ'a hem teknik hem de yol gösterici desteği için teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca ekip arkadaşım Cansu OKÇU'ya destekleri için teşekkür ederim. Programa ortak olup bu projede beni destekleyen ve çalışanı olmaktan gurur duyduğum FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.'ye, Öz Kaynak Ar-Ge Projeleri-Teknoloji Yönetimi, Ar-Ge Merkezi İdari Yönetimi ve Sanayi Katılımı-Offset bölümleri yöneticileri ve çalışanları Şamil AKASLAN, Alpay SANCAR, Nebahat KARASU ATABEY, Ayşegül ÖZTÜRK, Hazal KOŞAL, Banu ESKİ ÖZDEMİR, Ozan KAYADELEN ve Selin SATAR'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması kapsamında yapılan deneyler için altyapı desteği sağlayan INTECRO Robotik A.Ş. yöneticileri ve Enes GEBEL'e, deneyler sırasında ısı ölçümü yapılması için ekipman ve bilgi desteği sağlayan FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. Ar-Ge Test bölümü yöneticileri Erkal ÖZBAYRAMOĞLU, ONUR BÜTÜN ve mühendisi Mehmet SUBAŞI'ya teşekkür ederim. Deneyler sonucu elde edilen numunelerin mekanik testleri için destek veren FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. Giriş Kalite Malzeme Kontrol mühendisi Buğra ATASOY ve ekibine, mikro yapı incelemeleri ve hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımının kullanılması konusunda destek veren Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nden Dr. Öğr. Üyesi Kemal DAVUT ve ekibine teşekkür ederim. Sonlu elemanlar metodu yöntemi ile modelleme çalışmalarına katkı sundukları ve yazılım lisansını kullanmama olanak tanıdıkları için FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. Analiz bölümü yöneticisi İlker KURTOĞLU ve mühendisleri Dr. Kutlay ODACI ve Ömer Faruk DEMİRKAYA'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMA	5
2.1. Metal Eklemeli İmalat.....	5
2.2. Tel Beslemeli Ark Ergitmeli Eklemeli İmalat (WAAM).....	7
2.3. WAAM Proses Planlama ve Kontrol	12
2.4. WAAM Isıl Davranış ve Modelleme	17
2.5. WAAM Malzeme Mikro yapı ve Mekanik Özellikleri.....	22
2.6. Literatür Özeti ve İlgili Literatür Açığı.....	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM	29
3.1. Deney Düzenegi	29
3.2. Malzemeler.....	30
3.3. WAAM Proses Parametreleri.....	30
3.3.1. Isı girdisinin hesaplanması.....	31
3.3.2. Yığılma hızı ve yığılan malzeme hacminin hesaplanması	32
3.4. Tek Katman Kaynak Dikişleri	33
3.5. Duvar Geometri Üretimi	34

	Sayfa
3.5.1. Tek dikiş duvarlar	35
3.5.2. Bitişik dikiş duvarlar	36
3.6. Kaynak Dikiş Karakteristiğinin Ölçülmesi	38
3.7. Duvar Karakteristiğinin Ölçülmesi	39
3.8. Mikro Sertlik ve Mikro Yapı Analizi	40
3.9. Çekme Testi	41
3.10. Isıl Ölçüm.....	43
3.10.1. Isıl çift ölçümü	43
3.10.2. Kızılötesi kamera kullanımı	44
3.10.3. Kızılötesi kamera ölçümünün ısı çiftler ile doğrulanması	47
3.11. Isıl Modelleme ve Doğrulama.....	50
3.11.1. Modelleme stratejisi	50
3.11.2. Sonlu eleman ağı	51
3.11.3. Isı kaynağı modeli ve parametreler	52
3.11.4. Malzeme modeli.....	54
3.11.5. Malzeme yığma modeli.....	55
3.11.6. Model sınır koşulları	56
3.11.7. Isıl modelin doğrulanması.....	58
3.11.8. Soğuma hızı ile mikro yapı tahmini	59
4. GEOMETRİK, MEKANİK ve MİKROYAPI ÖZELLİKLERİ ANALİZLERİ	61
4.1. Geometrik Özelliklerin Analizi.....	61
4.1.1. Tel besleme hızı ile tel besleme hızının ilerleme hızına oranının ısı girdisine etkisi.....	61
4.1.2. Tel besleme hızı ile tel besleme hızının ilerleme hızına oranının dikiş genişliği ve yüksekliğine etkisi.....	62
4.1.3. Tel besleme hızı ile tel besleme hızının ilerleme hızına oranının nüfuziyet derinliğine etkisi	64

	Sayfa
4.1.4. Tel besleme hızı ile tel besleme hızının ilerleme hızına oranının tepe ve nüfuziyet alanına etkisi	64
4.1.5. Kaynak dikiş boyutlarının tahmin edilmesi	65
4.1.6. Duvar karakteristiği ölçüm sonuçları	68
4.2. Mikro Yapı Analizi	69
4.2.1. Kaynak dikişlerinin mikro yapı analizi	69
4.2.2. Radyografik muayene	69
4.2.3. WAAM duvarlarının mikro yapı analizi	70
4.3. Mekanik Özelliklerin Analizi.....	75
4.3.1. Kaynak dikişi sertlik analizi.....	75
4.3.2. Duvar sertlik analizleri.....	76
4.3.3. Duvarların çekme özellikleri.....	78
4.4. Dairesel Bir Geometrinin Üretilmesi	81
5. ISIL MODEL DOĞRULAMA ve ANALİZ ÇALIŞMALARI	85
5.1. Doğrulama Çalışmaları	85
5.1.1. Model hesaplama zaman adımının belirlenmesi	85
5.1.2. Model doğrulama	86
5.1.3. Kızılötesi kameranın doğrulanması.....	87
5.2. Isıl Çevrimler	88
5.3. Sıcaklık Alanı Değişimleri.....	89
5.4. Isı Girdisi Etkisi	90
5.5. Sıcaklık Gradyanı Değişimi	92
5.6. Soğuma Süresinin Katmanlar Arası Sıcaklığa Etkisi.....	93
5.7. Altlık Boyutunun Katmanlar Arası Sıcaklığa Etkisi.....	95
5.8. Bitişik dikiş stratejileri	96
5.8.1. Paralel ve Osilasyon Yığma Stratejisi.....	96

	Sayfa
5.8.2. Boyuna ve enine osilasyon yığma stratejisi	99
5.9. Isı Modelinin Katmanlar Arası Soğuma Süresi Tahmininde Kullanılması	101
5.9.1. Düşük ve yüksek ısı tek dikiş duvarlar	102
5.9.2. Bitişik dikiş duvarlarda soğuma süresi hesaplanması	103
5.9.3. Dairesel bir geometride soğuma süresi hesaplanması.....	103
5.10. Soğuma Hızı ile Mikro Yapı Tahmini	105
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	107
6.1. Katkı ve Öneriler.....	110
KAYNAKLAR	111
EKLER.....	119
EK- 1. Mikro ve makro incelemelerde kullanılan a) optik, b) stereo mikroskoplar ve mekanik özelliklerin incelenmesi için kullanılan c) mikro sertlik cihazı..	120
EK- 2. DITD duvardan çıkarılan yatay ve dikey yönde çekme numuneleri	121
EK- 3. YITD duvardan çıkarılan yatay ve dikey yönde çekme numuneleri	122
ÖZGEÇMİŞ	123

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonları	30
Çizelge 3.2. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri	30
Çizelge 3.3. Deneylerde kullanılan değişken ve sabit proses parametreleri.....	31
Çizelge 3.4. Proses girdi parametreleri	33
Çizelge 3.5. Duvar geometriler proses parametreleri	34
Çizelge 3.6. Kızılötesi kamera özellikleri.....	46
Çizelge 3.7. Isı modeli parametreleri	54
Çizelge 3.8. Model sınır koşulları.....	57
Çizelge 3.9. Doğrulama modeli parametreleri	58
Çizelge 4.1. Çekme testi sonuçlarının özeti.....	80
Çizelge 5.1. Duvarların katmanlar arası sıcaklıkları ve değişimleri.....	92
Çizelge 5.2. Soğuma sürelerine göre katmanlar arası sıcaklıklar (°C)	94

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal eklemeli imalatın sınıflandırılması	5
Şekil 2.2. Toz yataklı Eİ sisteminin genel görünüşü	6
Şekil 2.3. Toz üflelemeli Eİ sisteminin genel görünüşü	6
Şekil 2.4. WAAM yöntemi şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.5. Kısa Devre Transfer	9
Şekil 2.6. Küresel Transfer	10
Şekil 2.7. Sprey ark transferi	10
Şekil 2.8. CMT prosesinde akım ve voltaj dalga biçimleri	12
Şekil 2.9. WAAM ile üretilen duvar geometrisi kesiti	12
Şekil 2.10. Kaynak dikiş modelleri a) Tek kaynak dikiş modeli b) Bitişik dikiş modeli	14
Şekil 2.11. Farklı kaydırma adımlarının oluşturduğu dikiş şekilleri a) $d > w$ b) $d < w$ c) $d < w$, birleşme alanı ile vadi alanı eşit d) $d < w$, birleşme alanı vadi alanından büyük	14
Şekil 2.12. Yığma stratejileri a) osilasyon b) paralel	16
Şekil 2.13. Osilasyon ve paralel yığmada ısı iletimi	16
Şekil 2.14. Zikzak örme yığma stratejisi	17
Şekil 2.15. Isı kaçış modlarının şematik diyagramı; a) WAAM proses başlangıcı, b) ince duvar üretimi sırasında, c) sıralı yığmada üst üste binen komşu dikişler	18
Şekil 2.16. İnşa yönü boyunca duvar genişlik değişiminin şematik olarak gösterimi ...	19
Şekil 2.17. Altlık, katman yüzeyi sıcaklıkları ve parçada ısı birikmesi	20
Şekil 2.18. 1., 5. ve 10. katmanların ısı çevrimleri	21
Şekil 2.19. Ergiyik havuzundaki epitaksiyal tanecik büyümesinin şematik gösterimi...	22
Şekil 2.20. İlk katmanın farklı katman sıcaklıklarında sıcaklık profillerinin SSD diyagramında şematik gösterimi	26
Şekil 2.21. WAAM prosesinin zorlukları	27

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Elektrot uzaması, ark boyu, TUİM ve TUİM etkisinin şematik gösterimi	31
Şekil 3.2. Yığma yolunun şematik olarak gösterilmesi	35
Şekil 3.3. Bitişik dikiş için paralel yığma yolu	37
Şekil 3.4. Bitişik dikiş için osilasyon yığma yolu.....	38
Şekil 3.5. Yüzey dalgalığının şematik görünümü	40
Şekil 3.6. Çekme testi numunelerinin a) boyutu b) konumları	42
Şekil 3.7. Numunenin çenelere yerleştirildiği çekme test cihazı	42
Şekil 3.8. Isıl çift şematik gösterimi	44
Şekil 3.9. Kızılötesi kamera çalışma prensibi	45
Şekil 3.10. Kamera ölçüm mesafesi, alanı ve piksel büyüklüğü	47
Şekil 3.11. Yayınırlık katsayısının %10 hatalı girilmesindeki ölçüm hatası	47
Şekil 3.12. İki adet ısıl çiftin önceden üretilmiş duvar üzerine yerleştirilmesi.....	48
Şekil 3.13. 5 katmanlı doğrulama modeli geometrisi ve sonlu elmanlar ağı.....	51
Şekil 3.14. Goldak çift elipsoid ısı modeli.....	52
Şekil 3.15. Malzeme yığma modeli, a) Numune parça üzerindeki aktif ve inaktif elemanlar b) eleman aktivasyon fonksiyonu	56
Şekil 3.16. İki adet ısıl çiftin altlık yüzeyine yerleştirilmesi	58
Şekil 3.17. Kaynak teli kompozisyonu ile elde edilen SSD diyagramı	59
Şekil 4.1. Isı girdisinin TBH ve TBH/İH ile değişimi	62
Şekil 4.2. Dikiş genişliğinin TBH ve TBH/İH ile değişimi	63
Şekil 4.3. Dikiş yüksekliğinin TBH ve TBH/İH ile değişimi	63
Şekil 4.4. Nüfuziyet derinliğinin TBH ve TBH/İH ile değişimi.....	64
Şekil 4.5. Dikiş a) tepe, b) nüfuziyet alanının TBH ve TBH/İH ile değişimi.....	65
Şekil 4.6. Dikiş boyutlarının ısı girdisi ile değişimi	66
Şekil 4.7. Isı girdisinin TBH/İH ile değişimi	67
Şekil 4.8. Yukarıdan aşağıya dikiş sertlik değerlerinin değişimi.....	75

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. Kaynak dikişleri sertlik değerlerinin değişimi.....	76
Şekil 4.10. DITD ve YITD duvarlarının sertlik dağılımları	77
Şekil 4.11. Bitişik dikiş duvar sertlik dağılımları a) PBYD ve b) OBYD	77
Şekil 4.12. a) Çekme dayanımlarının karşılaştırılması, b) gerilme-uzama eğrileri	78
Şekil 4.13. Yatay ve dikey duvar numunelerinin akma ve uzama dayanımları.....	79
Şekil 4.14. Dairesel parça proses planlaması.....	82
Şekil 4.15. Dairesel geometrilili WAAM parçası sertlik incelemesi	83
Şekil 4.16. Dairesel geometrilili WAAM parçası çekme testi sonuçları	83
Şekil 5.1. Zaman adımının belirlenmesi için oluşturulan küçük boyutlu model	85
Şekil 5.2. Farklı zaman adımları ile katman orta noktası sıcaklık zaman grafiği değişimi.....	86
Şekil 5.3. Model ve ölçümden alınan sıcaklık zaman eğrileri	86
Şekil 5.4. Isıl çift ve kamera sıcaklık zaman grafikleri.....	87
Şekil 5.5. Referans ile deney kamerasının 0,84 ve 0,475 yayınlılık katsayıları seçildiği durumda 1. katman sıcaklık zaman grafikleri	88
Şekil 5.6. 5 katmanlı duvar modeli ve katman ölçüm noktaları	88
Şekil 5.7. Katman orta noktalarının a) sıcaklık-zaman b) ısınma-soğuma hız grafikleri	89
Şekil 5.8. Birinci ve dördüncü katmanlar sonrası sıcaklık dağılımı	89
Şekil 5.9. Düşük ve yüksek ısı girdili duvarların a) geometri ve ölçüm noktaları b) 1. katman c) 5. Katman sıcaklık zaman eğrileri	90
Şekil 5.10. Düşük ve yüksek ısı girdili duvarda 1. katman orta noktası ısına ve soğuma hız değişimi	91
Şekil 5.11. 1, 5 ve 10. katmanlar sonrası sıcaklık düşük (d) ve yüksek (y) ısı girdili duvarda sıcaklık gradyanı değişimi	93
Şekil 5.12. Katmanlar arası sıcaklıkların 0, 1, 2 ve 4 dakika soğuma süreleri ile değişimleri	94
Şekil 5.13. 5. ve 10. katman sıcaklık dağılımları a) 1 dakika soğuma süreli b) soğuma süresiz	95

Şekil	Sayfa
Şekil 5.14. 5 katmanlı duvarda 1.katman ölçüm noktasında küçük ve büyük boyutlarda altlık ile sıcaklık zaman grafiğinin değişimi	96
Şekil 5.15. Bitişik dikiş yığma stratejileri a) paralel ve b) osilasyon	97
Şekil 5.16. Bitişik dikiş sıcaklık dağılımları a) paralel (3dk) b) paralel (1dk) c) osilasyon.....	98
Şekil 5.17. Paralel (1dk, 3dk) ve osilasyon yığma yolu birinci katman sıcaklık zaman eğrileri.....	99
Şekil 5.18. Osilasyon bitişik dikiş yığma stratejisi a) boyuna b) enine	99
Şekil 5.19. Osilasyon bitişik dikiş sıcaklık profilleri a) boyuna b) enine	100
Şekil 5.20. Sıcaklık dağılımları a) boyuna b) enine osilasyon stratejisi	101
Şekil 5.21. Modelde katmanlar arası sıcaklık kontrol noktaları yerlerinin gösterimi.....	101
Şekil 5.22. Sabit katmanlar arası sıcaklıkta soğuma süresinin değişimi.....	102
Şekil 5.23. Düşük ısı girdili duvarda 200 °C ve 400 °C sabit katman sıcaklıklar için bekleme süreleri.....	102
Şekil 5.24. Enine ve boyuna osilasyon yığma yollu duvarlarda soğuma süresi analizi..	103
Şekil 5.25. Dairesel geometriler ve son katman sonrası sıcaklık dağılımları a) 100, b) 200 mm çaplar	104
Şekil 5.26. 100 ve 200 mm çaplı dairel geometrilerin soğuma süreleri	105
Şekil 5.27. SSD diyagramı üzerinde numunelerin 800-500 °C arası soğuma hızları.....	105

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Robotik WAAM eklemeli imalat sistemi	8
Resim 2.2. Soğuk metal transferi yöntemi	11
Resim 2.3. Katılma modları a) düzlemsel b) gözeli (ing. cellular) c) dikine dallantılı d) eş eksenli dallantılı	23
Resim 2.4. Duvar kesiti yükseklik boyunca mikro yapılar, a) son katman, en üst, b) duvar orta bölgesi, c) duvar taban bölgesi, d) altlık ile yığmanın başladığı birleşme bölgesi	25
Resim 3.1. Robot manipülatör, pozisyoner, kaynak makinası ve diğer ekipmanlardan oluşan WAAM deney düzeneğinin genel görünümü	29
Resim 3.2. Çizelge 3.4'teki parametrelere göre üretilen 18 adet kaynak dikişi	34
Resim 3.3. Düşük ısı girdili tek dikiş duvar.....	35
Resim 3.4. Tek dikiş duvar yüksek ısı girdili duvar	36
Resim 3.5. Paralel yığma yolu ile bitişik dikiş duvar	37
Resim 3.6. Osilasyon yığma yolu ile bitişik dikiş duvar	38
Resim 3.7. Tek katman dikişlerinin kesit fotoğrafları, a) plaka üzerinde b) bakalite alınmış.....	39
Resim 3.8. Enine kesilen kaynak dikişinin ölçülen dikiş boyutları ile makro grafik görüntüsü	39
Resim 3.9. Duvarların orta bölge kesitleri a) DITD b)YITD c) PYBD d) OYBD	40
Resim 3.10. Dikiş mikro sertlik ölçüm noktaları.....	41
Resim 3.11. Isıl ölçüm için kullanılan deney düzeneği	43
Resim 3.12. Isıl çift ölçümü, a) K tipi ısıl çift, b) sıcaklık zaman ölçüm grafikleri	44
Resim 3.13. Kızılötesi kamera yazılımı ara yüzü	46
Resim 3.14. Kızılötesi kameranın ve ısıl çiftlerin konumu	48
Resim 3.15. Duvar üzerine yerleştirilen IÇ'ler a) parça görüntüsü b) kamera görüntüsü	49
Resim 3.16. Farklı dalga boylarında iki kızılötesi kamera ile ölçüm	49
Resim 3.17. LS Dyna kaynak dikiş parametre ara yüzü	53

Resim	Sayfa
Resim 3.18. Goldak ısı modeli parametrelerinin belirlenmesi	54
Resim 3.19. Ls Dyna ısı malzeme kartı	55
Resim 3.20. LS Dyna kaynak sırası ve sınır şartları ara yüzü	57
Resim 3.21. Duvar numuneleri; tek katman a) düşük, b) yüksek ısı; dört katman c) düşük, d) yüksek ısı	60
Resim 3.22. Tek katman a) düşük (D1), b) yüksek ısı (Y1); dört katman c) düşük (D4), d)yüksek ısı (Y4).....	60
Resim 4.1. Üç farklı TBH/İH oranı (10,15,20) ve altı farklı TBH (5,6,7,8,9,10) oranı ile üretilen tek katman dikiş kesit fotoğrafları.....	66
Resim 4.2. Duvar kesitlerinin genişlikleri a) DITD b) YITF c) PYBD d) OYBD	68
Resim 4.3. Düşük, orta ve yüksek ısı girdili dikişlerin mikro yapı görüntüleri (x500) ..	69
Resim 4.4. Duvarların radyografi görüntüleri a) DITD b) YITD c) PYBD	70
Resim 4.5. Tek dikiş duvarlardan alınan 7500x SEM ve 100x OM fotoğrafları; altlıktan 70 mm mesafe a) DITD b) YITD; Altlık bölgesi c) DITD d) YITD.....	71
Resim 4.6. OYBD 7500x SEM ve 100x OM fotoğrafları; a) altlık bölgesi b) orta bölge	72
Resim 4.7. PYBD OM altında mikro yapı görüntüleri	72
Resim 4.8. PBYD 1. boğum noktasının taramalı elektron mikroskop görüntüleri.....	73
Resim 4.9. Resim 4.8d'nin detay görüntüsü	74
Resim 4.10. EDS analizleri a) noktasal EDS analizi b) çizgisel EDS analizi	74
Resim 4.11. Makro fotoğraflarla birlikte 50x optik mikro fotoğraflar a) DITD b)YITD	81
Resim 4.12. Üretilen dairesel geometrili WAAM parçası.....	82
Resim 5.1. 10 katmanlı duvar kesiti genişlik değişimi	92
Resim 5.2. Katmanlar arası soğuma süresi verilmeden yapılan duvarda akma ve geometrinin bozulması	95
Resim 5.3. Düşük ve yüksek ısı girdili bir ve dört katlı numunelerin 500x büyütme ile birinci katman OM görüntüler, a) D1, b) Y1, c) D4, d) Y4	106

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

T	Sıcaklık, °C
T₀	İlk sıcaklık, °C
T_∞	Ortam sıcaklığı, °C
σ	Stefan Boltzman sabiti, W/(m ² .K ⁴)
k	Isı iletim katsayısı, W/(m.K)
c_p	Öz ısı kapasitesi, J/(kg.K)
h	Taşınım ile ısı transferi katsayısı, W/(m ² .K)
ε	Yayınırılık değeri
Q	Güç, W
q	Üretilen ısı, W/m ³
f	Güç dağıtım faktörü
V	Hız, mm/sn
t	Zaman, sn
η	Verim

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
BDT	Bilgisayar destekli tasarım
BTF	Buy to fly
CMT	Soğuk metal transfer
Dk	Dakika
DITD	Düşük ısı tek dikiş
EDS	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
Eİ	Eklemeli imalat
EIE	Elektron ışın ergitme

Kısaltmalar**Açıklamalar**

GMAK	Gaz metal ark kaynağı
GTAK	Gaz tungsten ark kaynağı
Hz	Hertz
HV	Hardness vickers
İÇ	Isıl çift
IG	Isı girdisi
İH	İlerleme hızı
MIG/MAG	Metal Inert/Active Gas
OM	Optik mikroskop
OYBD	Osilasyon yığma bitişik dikiş
PAK	Plazma ark kaynağı
PYBD	Paralel yığma bitişik dikiş
SEA	Sonlu elemanlar analizi
SEM	Scanning electron microscopy
SiC	Silicon carbide
SLE	Seçici lazer ergitme
Sn	Saniye
SSD	Sürek soğuma dönüşüm
TBH	Tel besleme hızı
TUİM	Torç ucunun iş parçasına mesafesi
WAAM	Wire arc additive manufacturing
YEY	Yönlendirilmiş enerji yığma
YITD	Yüksek ısı tek dikiş
YH	Yığma hızı
YMDA	Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı
YMH	Yığılan malzeme hacmi

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) yapısal metal parçaların doğrudan üretiminde, imalat teknolojileri arasında önemli giderek artan bir teknoloji haline gelmektedir. Bu teknolojinin en temel ve bilinen prensibi bilgisayar destekli tasarım (BDT) ile oluşturulan katı modelin bir yüzey üzerinde katmanlar halinde üst üste eklenerek geometrinin en yakın halinin üretilmesidir. Döküm, dövme ve doludan işleme gibi geleneksel imalat teknolojilerine kıyasla karmaşık geometriler herhangi bir kalıba ve yüksek oranda işlemeye ihtiyaç duyulmadan daha az üretim süresi, malzeme kaybı ve maliyetle imal edilebilmektedir. Eİ, konvansiyonel imalat yöntemleri ile yapılması zor veya imkânsız olan geometrik özelliklerin yapılmasına imkân vererek tasarımcıya büyük bir esneklik sağlamakla birlikte birçok alt parçadan oluşan karmaşık montajları tek parça halinde üretmeye de imkân vermektedir.

Eklemeli imalat sistemi temel olarak bir hareket sistemi, ısı kaynağı ve beslenen malzemedan oluşmaktadır. ASTM'nin (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu) F-2792 numaralı standardında yedi farklı eklemeli imalat yönteminin tanımı yapılmıştır [1]. Bunlardan bir tanesi ısı enerjisinin yoğunlaştırılarak beslenen malzemeyi ergiten yönlendirilmiş enerji yığma (YEY) yöntemidir. Genelde metal malzemeler için kullanılan YEY yöntemi, kullanılan ısı kaynağına ve beslenen malzemenin durumuna göre sınıflandırılabilir. Isı kaynağına göre lazer, elektron ışını ve ark kaynaklı olarak üçe ayrılmaktadır. Beslenen malzemeye göre ise toz ve tel beslemeli olarak ikiye ayrılmaktadır. Toz yataklı sistemler olan seçici lazer ergitme (SLE) ve elektron ışın ergitme (EIE) yöntemi ile yüksek çözünürlükte işlemeye ihtiyaç duymayan çok yakın geometride parçalar üretilebilmektedir, fakat bu yöntemler kapalı hacimde çalışmakta ve düşük yığma hızlarına sahiptirler. Bu yüzden küçük ve karmaşık geometriler için daha uygun olmaktadır. Büyük ve orta karmaşık parçaları üretmeye uygun olarak kapalı hacimde çalışmak zorunda olmayan, yüksek yığma hızlarına sahip tel beslemeli sistemler kullanılabilir, fakat bu yöntemle üretilen parçalarda daha fazla işleme gerekmektedir.

Metal eklemeli imalat teknolojileri arasında tel beslemeli ark ergitmeli eklemeli imalat (ing. WAAM), orta karmaşıklıkta büyük parçaları yüksek yığma hızı, düşük ekipman maliyeti, yüksek malzeme verimi ve çevreye dost özelliği ile imal etmeye imkân tanıdığı için son yıllarda imalat sektörünün ilgisini çekmektedir. WAAM tekniğinin geçmişi 1925 yılında Baker tarafından metal süslerin tel malzemenin elektrik arkı ile ergitilmesi fikrine

dayanmaktadır [2]. WAAM'ın düşük ekipman maliyeti endüstride uzun yıllardır kullanılan metal, tungsten soy gaz ve plazma gaz altı kaynak tekniklerini ve ekipmanlarını kullanabilmesinden ileri gelmektedir. WAAM sisteminde torcun hareketi robotik veya kartezyen bir sistem ile sağlanabilmektedir.

Özellikle son 10 yılda araştırmacılar WAAM üzerine farklı kaynak yöntemler ve malzemelerle sürekli olarak çalışmalar yapmaktadır. Bugüne gelindiğinde WAAM yöntemi titanyum, alüminyum, nikel alaşımlar ve çelik gibi mühendislik malzemelerini kullanabilme yeteneği ile gelecek vadetmeye devam etmektedir. WAAM'ın malzeme ve maliyet avantajını en iyi açıklayan ölçüm 'Buy-to-fly' (BTF) oranı olarak isimlendirilmektedir. Bu terim literatüre havacılık sanayiinden girmiştir. İsminden de anlaşılacağı üzere BTF, satın alınan dolu malzemenin (ing. buy) ağırlığının işlendikten sonra uçakta uçan (ing. fly) bitmiş ağırlığına oranıdır. Bu oran ne kadar büyük ise malzeme ve maliyet kaybı o kadar fazladır. Örnek olarak, bir uçak iniş takımı parçasının imalatında 20 kg'lık parçayı elde etmek için 240 kg ağırlığında titanyum bloğu kullanılmakta ve bu bloğun 220 kg'ı işlenerek atılmaktadır. WAAM ile bu oran 12'den 2,3'e düşürülmüştür. Bu durumda parça 46 kg olarak istenen geometriye yakın olarak üretilmiş ve sadece 26 kg'ı işlenmiştir. Sonuç olarak dolu malzemedan işleme yöntemine oranla, WAAM ile %88 malzeme tasarrufu ve %69 gibi ciddi bir maliyet avantajı sağlanmıştır. Titanyum ve alüminyum için 1 kg/saat ve çelik için 3 kg/h için ortalama yığma hızlarında BTF oranı 1,5'tan düşük tutulabilmekte, malzeme ve maliyet tasarrufu sağlanabilmektedir [2].

Bu doktora tez çalışmasında WAAM prosesiyle parça üretimi esnasında malzemede oluşan ısı davranış etkileri ile geometrik, mikro yapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır.

Bu amaçlar doğrultusunda tez çalışmasının hedefleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Proses parametreleri ile üretim esnasında yığılan malzeme geometrisi arasındaki ilişkinin tanımlanması
- Proses parametrelerinin mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi
- Yığma stratejilerinin mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi
- Isı ve sıcaklık etkisinin incelenebilmesi için sonlu elemanlar yöntemi ile ısı model oluşturulması ve ölçümler ile doğrulanması

- Isıl modelden elde edilen soğuma hızlarının mikro yapıya etkisinin incelenmesi
- Isıl model ile parametre ve katmanlar arası soğuma bekleme süresi arasındaki ilişkinin incelenmesi

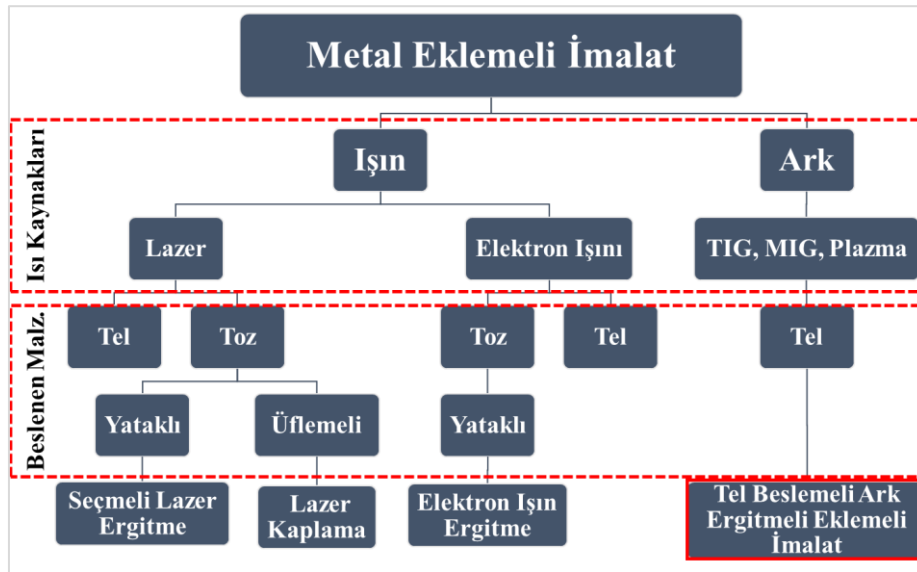
Bu tez çalışması giriş, literatür taraması, materyal ve yöntem, geometrik, mekanik ve mikro yapı özellikleri analizleri, ısı modelleme, doğrulama ve analiz çalışmaları ve son olarak sonuç ve öneriler olmak üzere altı ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde Eİ ve WAAM prosesi ilgili ön bilgi verilmiş, araştırmanın motivasyonu ve amacı kısaca tartışılarak tezin kapsamı anlatılmıştır. İkinci bölümde metal Eİ ve WAAM prosesi hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Ayrıca bölüm 1'de belirlenen amaç ve hedefler doğrultusunda WAAM prosesinde planlama, kontrol, ısı davranış, modelleme, malzeme mikro yapı ve mekanik özellikleri ile ilgili geçmiş akademik çalışmalar incelenmiş ve literatüre katkı ihtiyacı belirlenmiştir. Bölüm 3'te deney düzeneği, deneylerde kullanılan malzeme bilgileri, mikro yapı inceleme yöntemleri, sertlik analizi, çekme testleri, ısı ölçüm ve modelleme yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Geometrik, mekanik ve mikro yapı özellikleri analizleri bölümünde kaynak dikiş geometrisinden başlayarak proses parametrelerinin geometriye etkileri incelenmiştir. Buradan edinilen uygun parametre setleri ile duvar geometrileri üretilmiş ve WAAM parçalarının mekanik ve mikro yapı özellikleri analiz edilmiştir. Isı modelleme ve doğrulama çalışmaları kapsamında sonlu elemanlar metodu ile bir ısı model oluşturulmuş ve deneylerle doğrulanmıştır. Doğrulan model ile parçanın maruz kaldığı ısı çevrimler incelenmiş, mikro yapı ve soğuma bekleme süresine olan etkileri incelenmiştir. Sonuç ve öneriler bölümünde tez çalışması kapsamında yapılan deneysel test ve ölçümlerden elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilerek, gelecek çalışmalara ışık tutması amacıyla öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMA

2.1. Metal Eklemeli İmalat

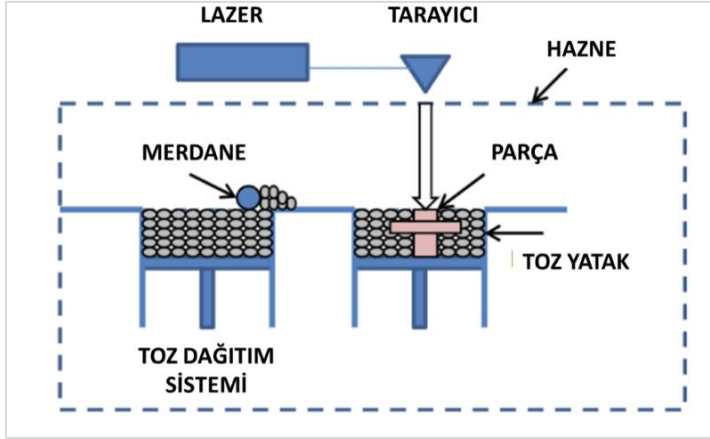
Talaşlı imalat, döküm ve dövme gibi geleneksel imalat yöntemlerinden farklı olarak; eklemeli imalat yöntemi parçaların katmanlar halinde malzeme eklenerek imal edildiği yöntemdir [1]. Yaygın ismiyle 3 boyutlu baskı (ing. 3D printing) yöntemi, son yıllarda geniş uygulama alanı bularak tasarım ve imalat yöntemlerine yeni bir boyut kazandırmıştır [3].

Metal eklemeli imalat ısı kaynağı ve beslenen malzemeye kategorilere ayrılmaktadır. Beslenen malzemeye göre toz yataklı sistemler, toz beslemeli sistemler ve tel beslemeli sistemler mevcuttur [4]. Bu sınıflandırma Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Her yöntem karakteri gereği belli uygulamalar için daha uygun olmaktadır.



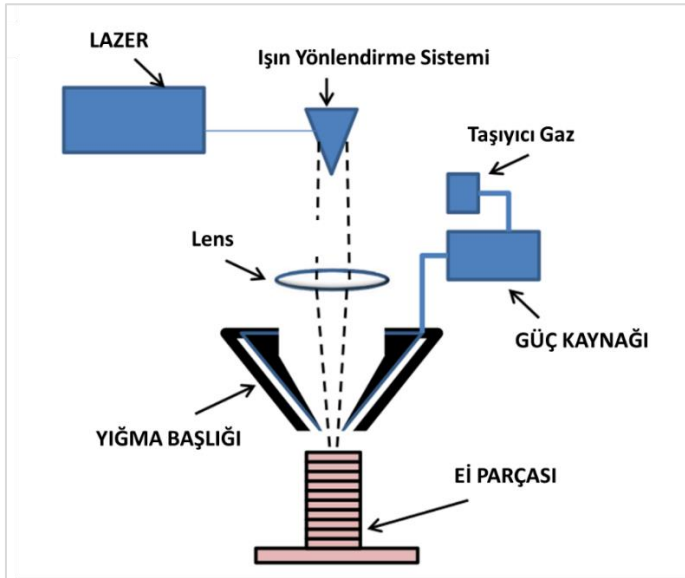
Şekil 2.1. Metal eklemeli imalatın sınıflandırılması

Toz yataklı sistemler Şekil 2.2'deki gibi lazer veya elektron enerji kaynağını bir metal toz katmanının üzerine seçici biçimde uygulayarak bir katmanı ergitmektedir. Tozun bu şekilde ergitilmesinden sonra yeni bir toz katmanını inşa yüzeyine serilerek istenilen parça geometrisi katmanlar halinde üretilmektedir. Toz yataklı sistemler çözünürlüğü yüksek ve parça içerisinde kalan geometrik unsurların fazla olduğu parçaları üretme kabiliyetine sahiptir [4]. Bununla birlikte toz yataklı sistemlerin ilk yatırım ve işletme maliyetleri yüksektir. Ayrıca toz yataklı sistemlerin yığılma hızı düşüktür [2].



Şekil 2.2. Toz yataklı Eİ sisteminin genel görünüşü [4]

Şekil 2.3'te genel görünüşü verilen toz üflemleri sistemlerde toz yataklı sistemlerden farklı olarak toz enerji kaynağı tarafından yığılma esnasında eş zamanlı olarak ergitilir. Enerji kaynağı her katmanda beslenen malzeme olan toz ile birlikte hareket ederek katmanları ve istenen geometriyi oluşturur. Bu sistemlerde enerji kaynağı ve beslenen malzeme daha geniş alanlara ulaşabildiği için toz yataklı sistemlere kıyasla daha büyük ebatlı parçalar üretilebilmektedir. Bununla birlikte bu sistemler ile toz yataklı sistemler ile üretilebilen iç kanallar yapılamaz ve yığılma hızları daha düşüktür [4].



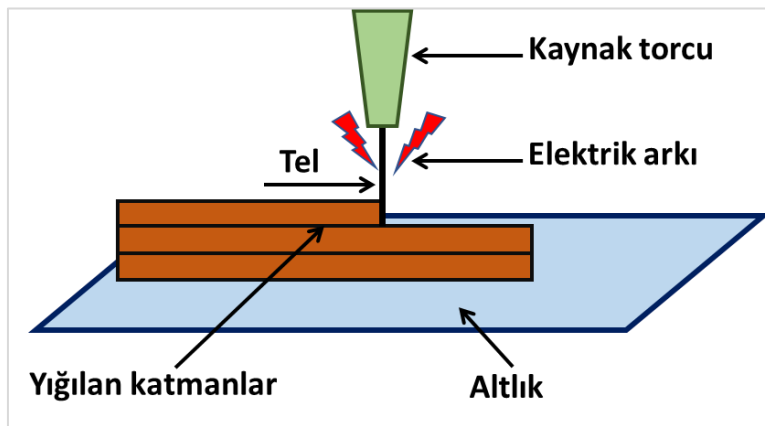
Şekil 2.3. Toz üflemleri Eİ sisteminin genel görünüşü [4]

Tel beslemeli sistemlerde parçalar tel malzemenin beslenmesiyle üretilir. Beslenen tel elektron, lazer ışını veya elektrik arkı ile katmanlar halinde ergitilerek üç boyutlu geometriyi oluşturur. Ayrıca tel beslemeli sistemler diğer metal eklemeli sistemler ile kıyaslandığında

düşük ilk yatırım ve işletme maliyetlerine sahiptir. Tel beslemeli sistemlerin başka bir avantajı da telin toza göre daha verimli kullanılabilmesidir. Bu sistemlerde tel israf edilmeden tamamen ergitilebilirken toz beslemeli sistemlerde bir miktar toz israf edilebilmektedir. Ayrıca tozun tanecik büyüklüğü ve dağılımı gibi konular proses performansını olumsuz olarak etkilemektedir. Tel beslemeli sistemlerde tel tamamen ergitildiği ve üretilen yapının bir parçası olduğu için çevreye ve insan sağlığına zararı yok denecek kadar azdır. Toz yataklı sistemlerde küçük toz parçacıkları hem çevreye hem de kullanıcıya zarar verme riski barındırmaktadır. Tel beslemeli sistemlerde sarf malzeme israfı olmadığı ve maliyetler düşük olduğu için büyük yapısal parçaların üretiminde avantaj sağlamaktadır. Tel beslemeli sistemlerde karmaşık toz besleme üniteleri olmadığı için kolaylıkla bir robot koluna veya kartezyen CNC tezgahına entegre edilebilirler. Bu şekilde mevcut bir ekipmana entegrasyon ile maliyet düşürülebilir ve inşa hacimleri artırılabilir [2]. Tel beslemeli sistemler ile üretilen parçalar istenilen geometriye yakın olarak üretildikten sonra sıklıkla işlemeye tabi tutulurlar. Bu anlamda tel beslemeli ark ergitmeli eklemeli imalat proses sonrası işleme gerektiren kum döküm prosesine benzemektedir [5].

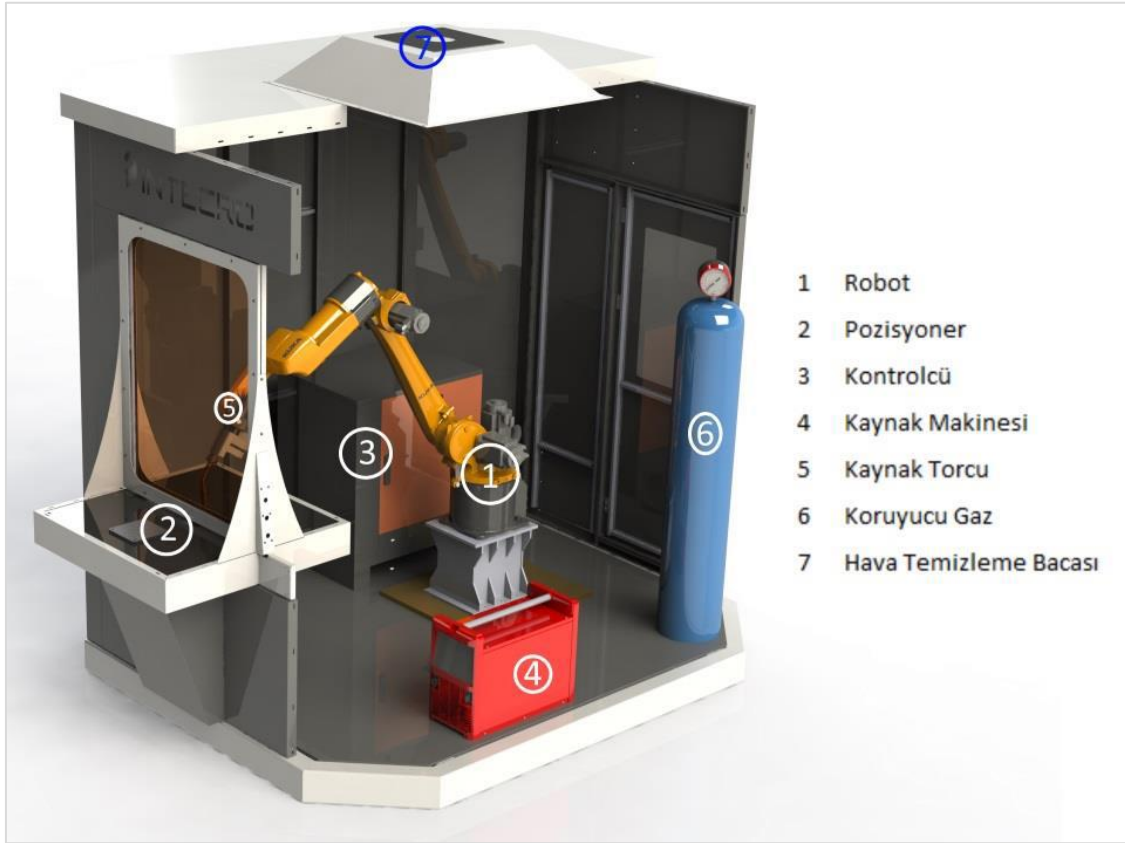
2.2. Tel Beslemeli Ark Ergitmeli Eklemeli İmalat (WAAM)

WAAM ASTM F2792-12a standardında YEY içerisinde sınıflandırılmıştır. Tanımı, ısı kaynağı olarak elektrik arkının kullanılarak tel şeklinde beslenen malzemenin ergitilmesidir [1]. Şekil 2.4'te şematik olarak görülen WAAM yönteminde ısı kaynağı olan elektrik arkı kaynak torcu içerisinde gelen tel malzemeyi ergitip altlık yüzeyine katmanlar halinde yığarak üç boyutlu yapı oluşturulmaktadır.



Şekil 2.4. WAAM yöntemi şematik gösterimi

WAAM prosesi ısı kaynağına göre kendi içerisinde üç tipe ayrılmaktadır. Bunlar gaz altı metal ark kaynağı (GMAK), gaz tungsten ark kaynağı (GTAK) ve plazma ark kaynağıdır (PAK). GMAK'ta tel torç ile eş merkezli olarak beslendiği için takım yolu planlaması ve robotun programlanması telin dışarıdan beslendiği GTAK ve PAK kaynak yöntemlerine göre daha kolay olmaktadır. GTAK ve PAK'ta tel hep aynı doğrultudan beslenmek zorunda olduğu için torcun sürekli döndürülmesi gerekmektedir [2]. Resim 2.1'de görülen robotik WAAM sistemi güç kaynağı olarak kaynak makinesi, hareket kontrol sistemi olarak robot kolu, robot kontrolü için kontrolcü, arkin kontrolü için torç, koruyucu gaz ve tel besleme ünitesinden oluşmaktadır.

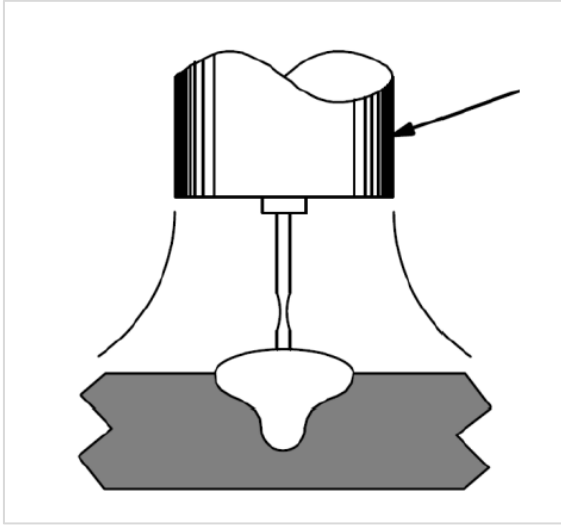


Resim 2.1. Robotik WAAM eklemeli imalat sistemi [6]

Elektrik ark temelli kaynak, iyi kalitede parçalar elde etmek için birçok proses parametresinin kontrol edilmesini gerektirdiği için genellikle karmaşıktır. Proses parametreleri akım, voltaj, koruyucu gaz tipi ve akış hızı, torç ucunun iş parçasına mesafesi, tel besleme hızı, ilerleme hızı ve torç açısını içermektedir. Sonuç olarak her ekipman ve malzeme için bu parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Parametrelerin doğru seçimi kaynak dikiş genişliği, yüksekliği, nüfuziyet derinliği, yığma hızı ve yüzey dalgalılığı

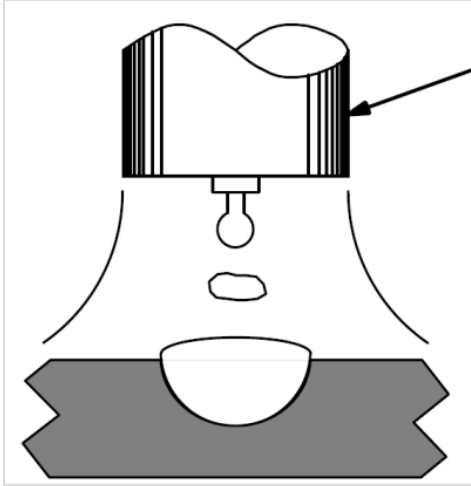
gibi geometrik özelliklerin belirlenmesi için önemli olan metal transfer modunu etkilemektedir. Metal transferi beslenen telin ergitilerek iş parçası yüzeyine yığılması ile gerçekleşir. GMAK, kısa devre, küresel ve spreyc ark transferi olarak üç farklı metal transfer tekniğine sahiptir [7-9].

Kısa devre transferi geleneksel gaz altı metal kaynak çeşitlerinden birisidir (Şekil 2.5). Bu transfer sırasında, kaynak teli taban metaline saniyede 20-200 kez temas etmektedir. Metal transferi, tel kaynak banyosuna temas edince ya da kısa devre oluşunca gerçekleşmektedir. Sprey ark transferi gibi yüksek yığılma hızlarına sahip olmasa da birçok avantajları vardır. Kısa devre transferi düşük akım ve voltaj gerektirdiğinden iş parçasına daha az ısı girdisi sağlamaktadır. Kaynak prosesinde bu durum kalın malzemeler için nüfuziyet eksikliğine sebebiyet verse de WAAM için az ısı girdisi istenen bir durumdur. WAAM prosesinde bir önceki katmana tutunacak kadar bir nüfuziyet yeterli olmaktadır. Kısa devre transfer bu sebeple yüksek yığılma hızlarına da çıkabilmektedir [8-10].



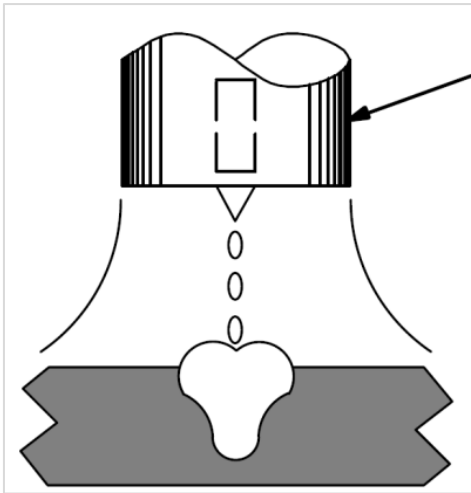
Şekil 2.5. Kısa Devre Transfer [9]

Kısa devre için tavsiye edilen akım ve voltaj değerleri bu değerlerin üzerine çıktığında küresel transfer meydana gelir. Küre şeklindeki damlacıklar elektrotun ucunda birikerek iş parçasına akarlar (Şekil 2.6). Kısa devre transferine kıyasla küresel transferde elektrotun ucunda iş parçasına geçmeden önce daha fazla metal birikir. Küresel transfer çok fazla sıçrama, kaynak metali ve kötü kaynak görünümü nedeni ile tercih edilmemektedir [8-10].



Şekil 2.6. Küresel Transfer [9]

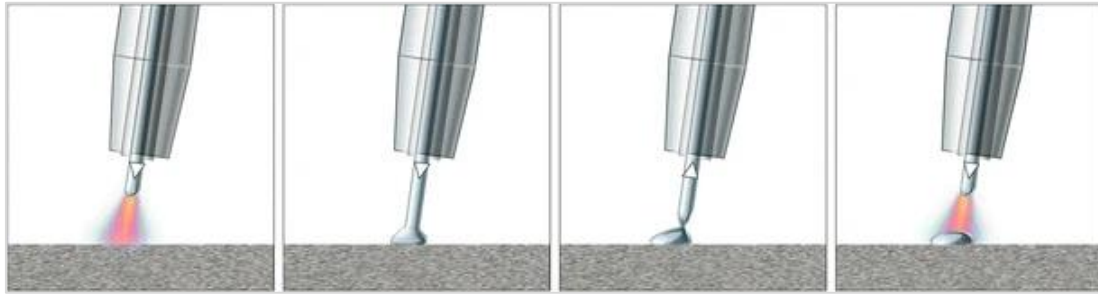
Kaynak akımı ve voltajı daha da arttırıldığında metal transferi spreylere dönüşür. Sprey ark transferinde elektrottan ergiyen metal, damlacıklar halinde taban metaline geçer (Şekil 2.7). Sprey ark transferinin en büyük avantajı yüksek yağma hızı ve iyi kaynak nüfuziyetidir. Bununla birlikte spreylere ark transferi yüksek güç girdisi gerektirdiğinden iş parçasına olan ısı girdisi yüksektir. Bu sebeple düşük ısı girdisinin tercih edildiği WAAM prosesi için ideal değildir [8-10].



Şekil 2.7. Sprey ark transferi [9]

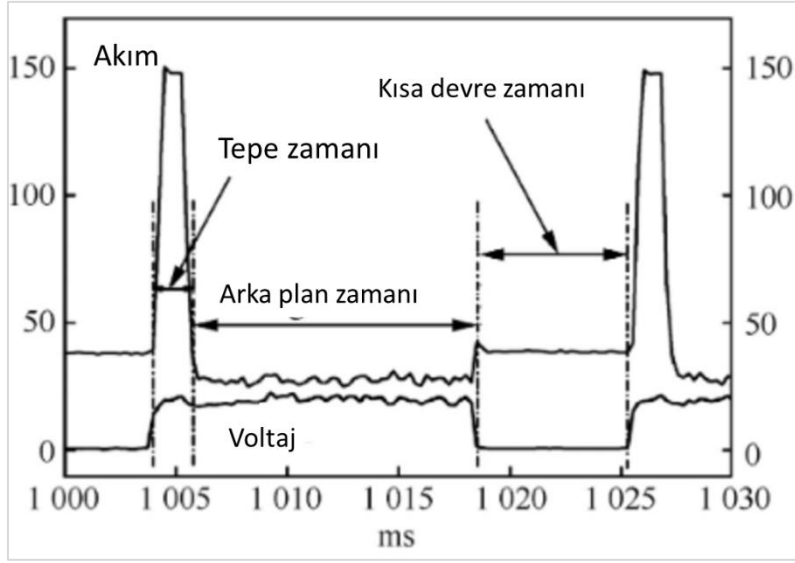
Stabil proses ve daha kaliteli kaynak dikişleri elde etmek amacı ile kaynak makinesi üreticileri proses parametrelerini kontrol edip programlayabildikleri yeni teknikler geliştirmektedirler. Bu teknolojilerden bir tanesi olan Fronius firması tarafından geliştirilen soğuk metal transferi yöntemi (CMT, Ing: Cold metal transfer) Resim 2.2’de görülmektedir. Aslında ilk olarak düşük ısı girdisi gerektiren Alüminyum kaynağı için geliştirilen CMT kısa

devre transfer modunun kontrollü halidir [10, 11]. CMT prosesinde, ark boyunun, metal transferi miktarının ve ısı girdi miktarının kontrolü için dijital kontrol sistemine entegre edilmiş bir tel elektrot sürme sistemi mevcuttur. Konvansiyonel gaz altı MIG/MAG prosesinde kaynakta kısa devre oluşana kadar tel elektrot kaynak banyosu içerisine beslenmeye devam eder. Kısa devre oluşup kaynak akımı çok yükseldiğinde ise, kaynak bölgesine yüksek ısı girdi gerçekleşir ve bu nedenle de sıçramalar meydana gelir. CMT prosesinde ise metal transferi sırasında gerçekleşen her kısa devrede, dijital kontrol sistemi kaynak akımını neredeyse sıfıra kadar düşürür ve tel elektrotun geri çekilmesini kontrol ederek sıçramaları engeller [12, 13]. Telin bu ileri geri hareket frekansı 70 Hz'tir. Bu sayede saniyede 70 damla yığılabilmektedir [14]. Tel elektrotun geri çekilme hareketi kısa devre süresince damla geçişine yardım eder. Böylece, elektromanyetik kuvvetin yardımı olmadan damlacık kaynak banyosuna transfer edilir. Bu şekilde kaynak bölgesindeki ısı girdisi büyük ölçüde azaltılmış olur. Damla transferinden sonra ark yeniden ateşlenir ve tel elektrot tekrar ileri sürülerek döngü yeniden başlar (Resim 2.2) [13].



Resim 2.2. Soğuk metal transferi yöntemi [11]

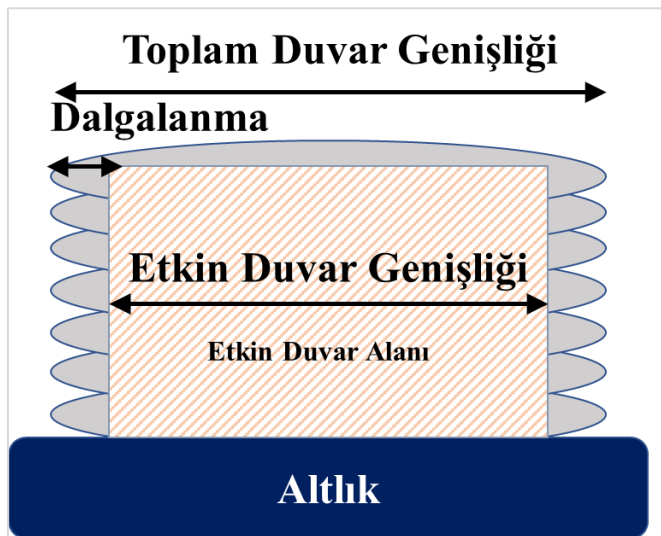
CMT kaynağı elektrik sinyal çevrimi, elektrottan ergiyen bir damlacığın kaynak havuzuna düşmesi için gerekli olan süre olarak tanımlanabilir. Akım ve voltaj dalga biçiminin analizi damlacık transferi sırasındaki enerji dağılımının farklı evrelerinin incelenmesi için önem taşımaktadır (Şekil 2.8). Bu çevrim üç evreye ayrılmaktadır. İlki arkın tutuşmasını ve elektrotu ısıtarak damlacık oluşumunu sağlamak için sabit voltaj ile tepe akımı evresidir. İkincisi küresel metal transferini engellemek için akımın düşürülmesi ile arka plan akımın evresi olarak adlandırılır. Bu evre üçüncü evre olan kısa devre evresine kadar devam eder. Kısa devre evresinde ark voltajı sıfıra düşürülür. Aynı anda tel besleme ünitesine teli geri çekmesi için sinyal gönderilir. Bu evre damlacığın ayrılarak kaynak havuzuna geçişine yardım eder [12].



Şekil 2.8. CMT prosesinde akım ve voltaj dalga biçimleri [12]

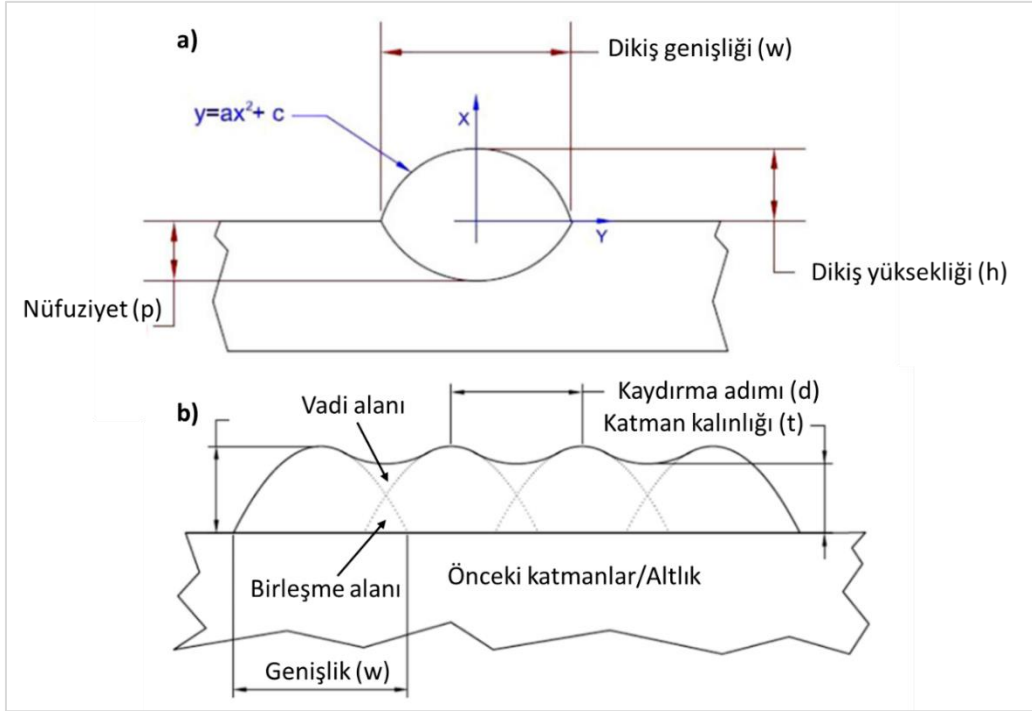
2.3. WAAM Proses Planlama ve Kontrol

WAAM ile üretilen üç boyutlu metalik parçalar tek kaynak dikişlerinin birbirinin üzerine yığılmasıyla katmanlar halinde oluşturulmaktadır. Bunun sonucunda Şekil 2.9'da kesiti görülen minimum 1-2 mm genişliğinde, yüzey dalgalılığına sahip duvarlar oluşur. Bu dalgalılık ile oluşan fazla malzeme ardıl işlem ile işlenerek yüzey düzeltilmektedir. Yüzey dalgalılığına sahip duvarın genişliği toplam duvar genişliği olarak adlandırılırken, ardıl işlemden sonraki duvar genişliği etkin duvar genişliği olarak isimlendirilir (Şekil 2.9) [15].



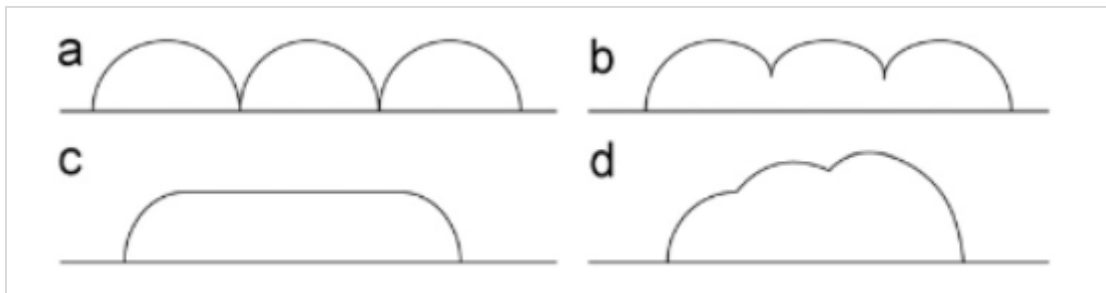
Şekil 2.9. WAAM ile üretilen duvar geometrisi kesiti

Plastik eklemeli imalat alanında şu anda birçok ticari yazılım 3 boyutlu modelleri dilimleyip G kodları oluşturarak doğrudan parça üretimi yapabilmektedir. WAAM prosesi için insan müdahalesi olmadan doğrudan 3 boyutlu modelden üretim yapabilen yazılımlar henüz geliştirilme aşamasındadır [16]. Bu yazılımlara girdi sağlamak ve parça kalitesinin arttırmak için WAAM prosesinde kaynak dikiş geometrisi ve geometrinin proses parametreleri ile olan ilişkisi incelenmektedir. Daha iyi yüzey kalitesine sahip olmak için proses parametrelerinin optimizasyonu sırasında sürekli deneme yanılma yöntemi ile ilerlemek zaman kaybettireceği için proses parametreleri ve kaynak dikiş geometrileri arasında bağlantı kuran matematiksel denklemler geliştirilmiştir. Denklemleri oluşturmak için kaynak parametreleri ile ampirik deneyler, açılı ve kapalı geometri üretim denemeleri yapılmıştır [17, 18, 19]. Bu amaçla Almeida ve arkadaşları parametrelerin tek kaynak dikişi yığmada hangi etkin duvar genişliğinde geometriler oluştuğu ile ilgili ampirik modeller oluşturmuştur. Modeller oluşturulurken en küçük kareler yöntemi ve çoklu doğrusal regresyon kullanılmıştır. Modelde kullanılan değişken parametreler tel besleme hızı (TBH), TBH' nin ilerleme hızına (İH) oranı (TBH/İH) ve tel çapıdır [20]. Ding ve arkadaşları ise tek kaynak dikişlerini, farklı TBH, İH ve torç ucunun iş parçasına olan mesafesi değişken parametreleriyle üretmişlerdir. Girdi parametreleri ile çıktı parametreleri olan dikiş yüksekliği ve genişliği arasındaki ilişkiyi yapay sinir ağı tekniği ile modellemişlerdir. Bu çalışmanın çıktısı ile geliştirdikleri yığma yolu modelleme stratejisini bir kullanıcı ara yüzünde birleştirerek sistemi otomatik hale getirmeye çalışmışlardır [21]. Suryakumar ve arkadaşları hibrit üretim yöntemi üzerinde çalışarak işlenen malzeme miktarını azaltmaya çalışmışlardır. Bunun için Şekil 2.10a'daki gibi tek dikiş simetrik bir parabol eğrisi olarak modellemiş ve ardından Şekil 2.10b'de gösterildiği gibi benzer şekilde yan yana yapılan dikişlerin oluşturduğu geometriyi modellemişlerdir. Isı girdisinin düşük tutulması, ısının geniş bir alana yayılması ve işlenen malzemeyi azaltmak amacı ile proses girdi parametreleri olarak TBH, İH ve kaydırma adımı (d) seçilmiştir. Modelde vadi alanı ile birleşme alanının (Şekil 2.10b) eşit olduğu durumda yan yana dikişlerin tepe noktaları eşit olmaktadır. Düz bir üst yüzey için gerekli bu durumda d dikiş genişliğinin 0,667 katı olmaktadır. Uygulama çalışmasında yüksek ısı girdisinin getirdiği çarpılma, iç gerilmeler ve işlenen malzemenin artması gibi etkileri azaltmak için düşük ısı girdisi sağlayan düşük TBH ve yüksek İH değerleri ile dikiş genişliği (w) ve katman kalınlığı (t) belirlenmiştir. Ardından belirlenen w'nin 0,667 katı alınarak d değeri hesaplanmıştır. Bu değerlerin hepsi takım yolu oluşturan bir yazılıma girdi oluşturmuştur [22].



Şekil 2.10. Kaynak dikiş modelleri a) Tek kaynak dikiş modeli b) Bitişik dikiş modeli [22]

Xiong ve arkadaşları parabol dikiş modeline ek olarak ark ve kosinüs dikiş modellemelerini önermişlerdir. Bitişik dikiş modelinde TBH/İH oranının etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Suryakumar [22] ve arkadaşları gibi d 'nin w 'nin 0,667 katı olmasının optimum sonuç verdiğini ifade etmişlerdir. Kaydırma adımı (d) seçiminin geometriye etkileri Şekil 2.11'de gösterilmiştir [23].



Şekil 2.11. Farklı kaydırma adımlarının oluşturduğu dikiş şekilleri a) $d > w$ b) $d < w$ c) $d < w$, birleşme alanı ile vadi alanı eşit d) $d < w$, birleşme alanı vadi alanından büyük [23]

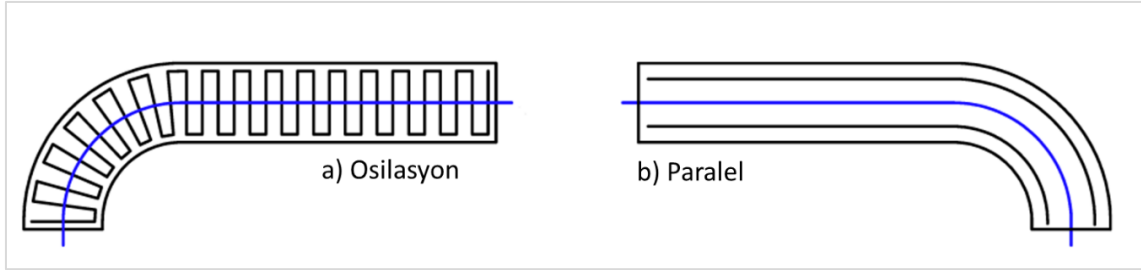
Ding ve arkadaşları, Suryakumar [22], Xiong [23] ve arkadaşlarının geliştirdiği bitişik dikiş modelin tahmin oranını arttırmak için farklı olarak tanjant bindirme modelini önermişlerdir. Bu modelden önce tek dikişlerin profilini tahmin etmek için ampirik deneyler yaparak eğri uydurma tekniği ile bir model üzerinde çalışmışlardır. Parabol ve kosinüs fonksiyonlarının

tek dikiş geometrisini en hassas biçimde temsil ettiği sonucuna varmışlardır. Bitişik dikişler ile ürettikleri model sonucunda dikiş merkezleri arasındaki mesafenin dikiş genişliğinin 0,667 katı yerine 0,738 katı olduğunda bitişik dikiş yüksekliğinin daha düzgün devam ettiği sonucuna varılmıştır [24].

Geometrinin modellenmesi çalışmalarının yanında dikiş ve duvar yüzey kalitesini arttırmaya yönelik çalışmalarda yapılmıştır. ER70S-6 çelik kaynak teli ve CMT ile yapılan çalışmalarda kaynak hızının 0.4 m/dk'nin altında olmasının üretim süresini uzattığı ve yüzey dalgalılığını arttırdığı görülmüştür [14, 25]. Xiong ve arkadaşları yüksek akım ile artan ark basıncı ve ergiyen damlacıkların çarpma hızının kaynak banyosu üzerindeki olumsuz etkisini vurgulamışlardır. Bu durum ısı birikmesi ile birleştiğinde akım değeri 200 A'in üzerinde olduğunda ilerleyen katmanlarda akma görülmüştür. Uygun akım değerlerini 100-180 A olarak belirlemişlerdir. Buna bağlı olarak ısı girdisi sırasıyla 1400-200 J/mm olabilmektedir. Çalışma sonunda telin ileri geri hareketleriyle yüzey gerilmesinin ve ısı girdisinin az olduğu CMT metodunu tavsiye etmişlerdir [26]. Xiong ve arkadaşları başka bir çalışmada lazer görüntü sensörü kullanarak farklı parametrelerin duvar yan yüzeylerinin kalitesini nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Sonuç olarak pasolar arası sıcaklık düştükçe yüzey kalitesinin iyileştiğini tespit etmişlerdir. Sabit ilerleme hızında (İH) tel besleme hızının (TBH) artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Sabit TBH'de ilerleme hızı 0,42 m/dk'ya kadar yüzey kalitesinin iyileştiği bu değerden sonra arkın kararsızlaşmasından dolayı kötüleştiğini tespit etmişlerdir. Bu sonuç Cerqueira [14] ve arkadaşlarının bulduğu sonuç ile benzeşmektedir. TBH/İH oranı sabit tutulurken TBH artırıldığında yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır. Aynı TBH/İH oranı için düşük TBH ve düşük İH en iyi yüzey kalitesini vermektedir [27]. Duvar üretimlerinde görülen her katmanda yığmaya aynı yerden başlandığında ve bitirildiğinde başlangıç kısmında bitiş kısmına göre daha fazla malzeme yığıldığı Zhang ve arkadaşları tarafından görülmüştür [28]. Bunun çözümü için Hu ve arkadaşları başlangıçta kaynak hızı ve akımının yüksek olması ve bitişe doğru azaltılmasını önermiştir. Diğer bir çözüm önerisi de zikzak şeklinde her katmanda kaynak başlangıç yönünün değiştirilmesi şeklindedir [29].

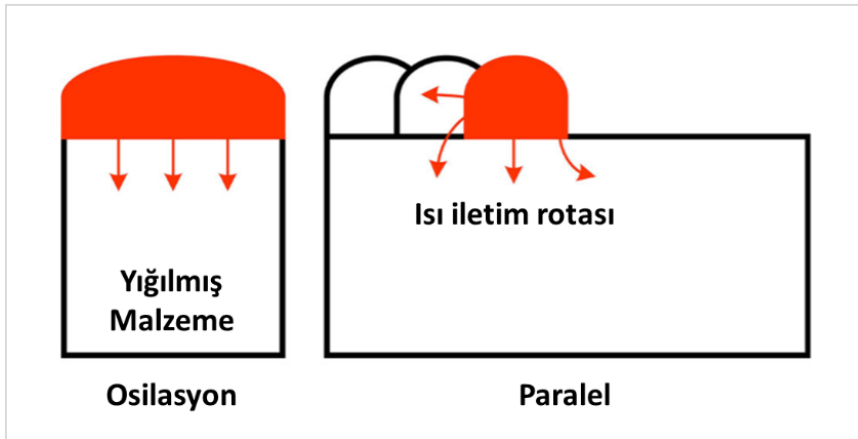
WAAM parçaları sadece duvar geometrilerinden oluşmadığı için dikiş geometri davranışı anlaşıldıktan sonra daha karmaşık parçalar için doğru yığma stratejilerinin seçilmesi için çalışmalar yapılmıştır [7]. Geometride bulunan birçok birleşme yeri paralel ve osilasyon olarak isimlendirilen takım yolları ile yapılabilmektedir (Şekil 2.12) [30]. Paralel takım

yolunda geometri bir yönde çizgiler halinde doldurulurken, osilasyon yığmada ayrı paralel çizgiler birleştirilerek paso sayısını azaltan sürekli bir takım yolu oluşturulur. Paralel ve osilasyon yığmada çevresel hassasiyet kenarlar takım yolu ile paralel olmadığı durumlarda azalmaktadır. Bunu azaltmak için çevresel sınırlardan başlayarak bir takım yolu oluşturulur [16].



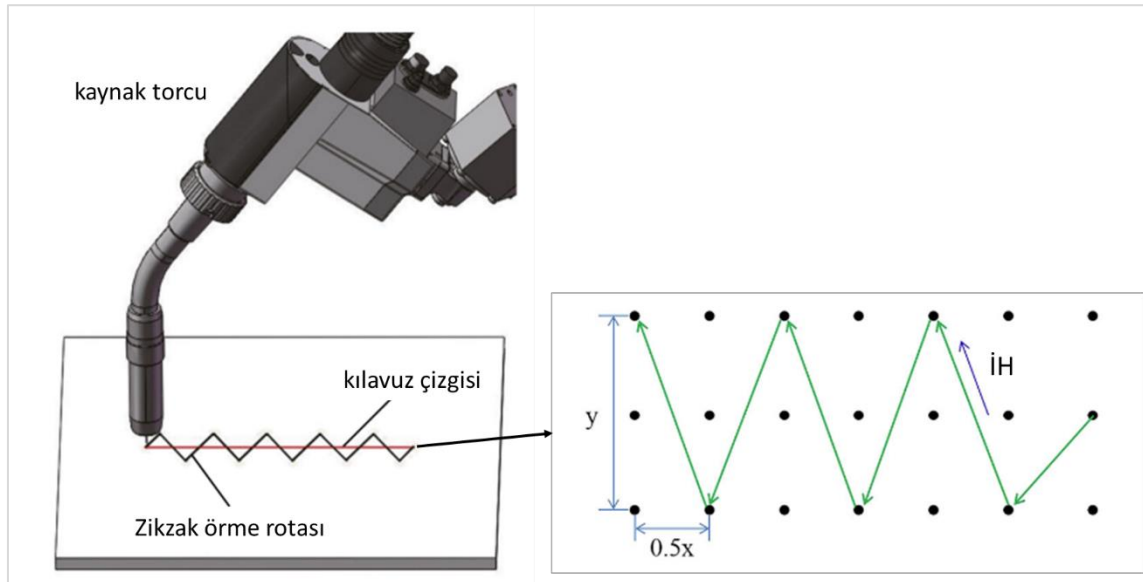
Şekil 2.12. Yığma stratejileri a) osilasyon b) paralel [30]

Xiangfang ve arkadaşları CMT-WAAM ile farklı parametreler ve yığma stratejileri kullanarak yüksek alaşımlı ve mukavemetli maraj çeliğinden kalın parçalar üretmişlerdir. Kullanılan parametreler ve yığma stratejileri ile parçaların yüzey kalitesi ve çıkan hatalar arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Isı iletiminin Şekil 2.13'te görüldüğü osilasyon yığma stratejisi ile kaynak banyosunun büyük ve yüksek sıcaklığa uzun süre maruz kaldığı görülmektedir, çünkü torç bir noktada daha uzun süre kalmakta ve ısı sadece aşağı doğru iletilmektedir. Paralel yığma yolunda ise ısı kaynağı toplam yığma doğrultusunda daha hızlı hareket ettiğinden ve yığılan malzeme üzerinde daha fazla ısı iletim rotası olduğundan ısı girdisi düşük olmaktadır. Bu yüzden paralel strateji osilasyona göre daha az ısı girdisi ve yüksek soğuma oranı sağlamaktadır.



Şekil 2.13. Osilasyon ve paralel yığmada ısı iletimi [31]

Ma ve arkadaşları alüminyum malzeme ile Ding ve arkadaşlarının çelik malzeme ile oluşturdukları paralel bitişik dikiş modelini kullanarak yapmaya çalışmışlar, fakat dikiş birleşme noktalarında boşluklar meydana gelmiştir. Bu sebeple Şekil 2.14'te görüldüğü gibi zikzak örme (ing. weaving) yığma stratejisini deneyerek daha düzgün yüzeyler elde etmişlerdir [32]. Zikzak örme yığma stratejisi osilasyon ve paralel arasında geliştirilmiş bir stratejidir. Bu stratejide her katman doğrusal biçimde ama yan yana zikzaklar halinde yığılmaktadır. Xiangfang ve arkadaşları maraj çeliği ile yaptıkları çalışmada paralel, osilasyon ve zikzak örme stratejilerinin etkilerini incelemişlerdir. Maraj çeliği karbon çeliğine göre düşük ısı iletimi ve yüksek öz ısı katsayısına sahiptir. Bu yüzden osilasyon yığma stratejisindeki yüksek ısı girdisi ve düşük soğuma hızı katılaşmayı olumsuz etkileyerek delik oluşumuna sebep olmuştur. Paralel strateji ile delikler oluşmamış olsa da az ısı girdisi ve hızlı soğuma nedeni ile meydana gelen dar ve yüksek dikiş geometrisi bitişik dikişte boşluk riski oluşturmaktadır. Sonuç olarak maraj çeliği için boşluk oluşma riskini azaltan, geniş ve düşük dikiş geometrisine sahip zikzak örme stratejisinin paralel ve osilasyon yığma stratejisine kıyasla bitişik dikiş üretilmesine daha uygun olduğunu tespit etmişlerdir [31].

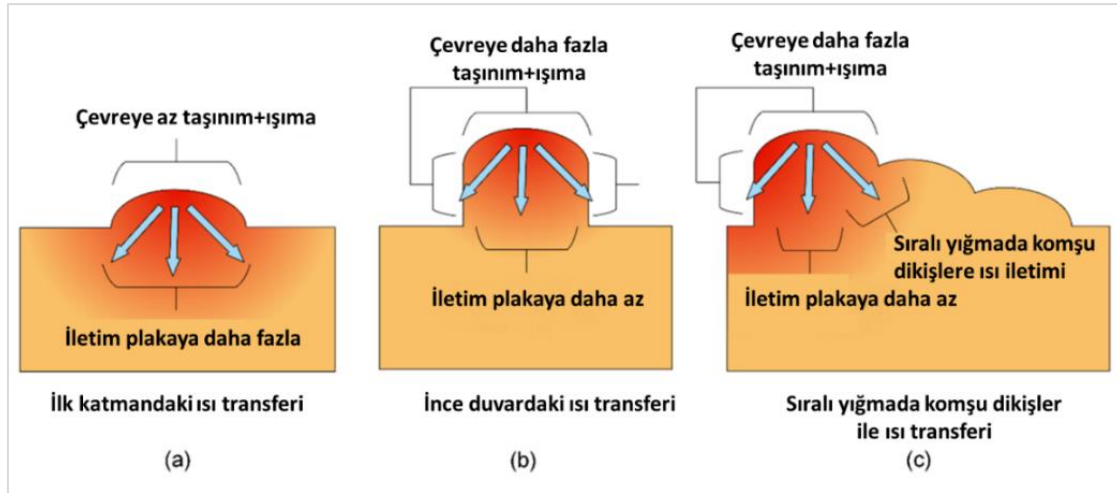


Şekil 2.14. Zikzak örme yığma stratejisi [31, 32]

2.4. WAAM Isıl Davranış ve Modelleme

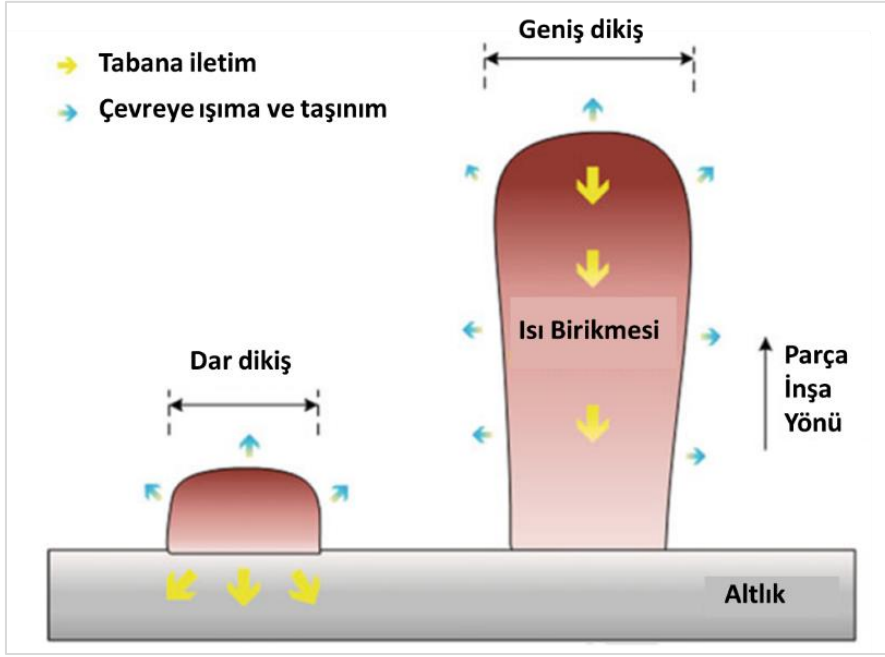
Ark ısı kaynağı ile üretim yapılırken WAAM ile üretilen parçalarda sürekli değişen tekrar ısınma ve soğumalardan dolayı eşit olmayan ısıl genleşme ve büzölmeler meydana gelir.

Yığma sırasında katmanlar arttıkça ısı transferi modunda değişiklik meydana gelir. İlk olarak ısı, taban yüzeyine iletim ve daha sonra atmosfere ışıma ve taşınım ile kaçar. Katmanlar arttıkça iletim ile ısı transferi azalırken ışıma ve taşınım ile ısı transferi daha etkin hale gelir. Bu durum Şekil 2.15'te gösterilmiştir [33]. Isıl profillerin bu değişkenliğinden dolayı ark ve metal transfer davranışları, yığma hataları, ölçüsel hassasiyet, mikro yapı değişimi ve malzeme özellikleri güçlü bir şekilde etkilenmektedir [34].



Şekil 2.15. Isı kaçış modlarının şematik diyagramı; a) WAAM proses başlangıcı, b) ince duvar üretimi sırasında, c) sıralı yığmada üst üste binen komşu dikişler [33]

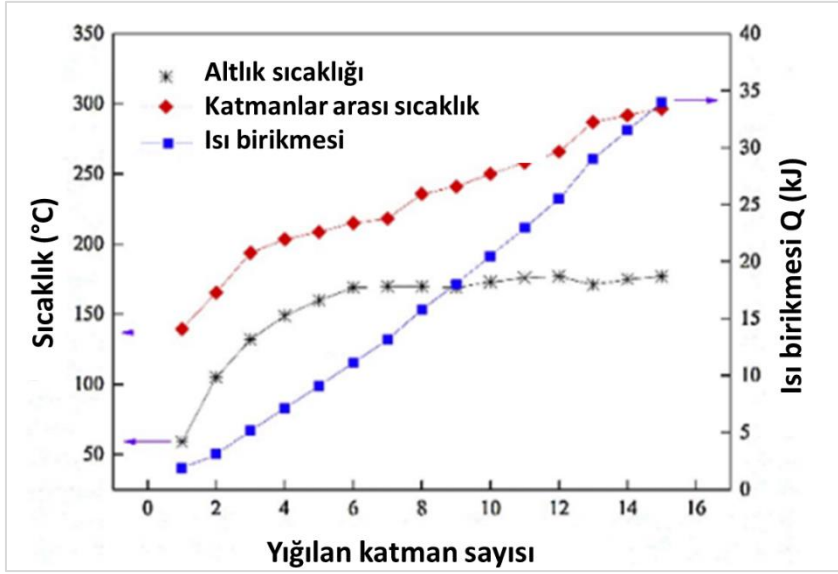
WAAM prosesinde katman sayısı arttıkça ısı kaybı, altlığa olan ısı iletimi azaldığından ve devreye giren taşınım ve ışıma ısı transferi miktarının iletme oranla daha az olmasından dolayı azalmaktadır. Bu yüzden parçada ısı birikmesi meydana gelmektedir [35]. Şekil 2.16'da duvar genişliğinin inşa yüksekliği boyunca nasıl değiştiği görülmektedir. İlk katmanlarda ısı direk olarak tabana iletildiği için daha hızlı bir soğuma gerçekleşir ve bu yüzden dikiş genişliği dar olmaktadır. Duvar yüksekliği arttıkça tabana ısı kaçış direnci artmakta ve ısı daha fazla taşınım ve ışıma ile çevreye kaçmaktadır. Bu kaçış iletim ile olan kaçışından daha az etkilidir. Isı kaçışındaki bu yavaşlama kaynak banyosundaki ısı kaçışını azaltarak yüksek katmanlarda daha geniş dikişler görülmesine neden olur. Sabit katmanlar arası soğuma süresi ile daha fazla katman yapıldıkça duvar genişliği sabit olur. Bunun sebebi ısı girdisi ve ısı kaçışının dengeye ulaşmasıdır [34, 36].



Şekil 2.16. İnşa yönü boyunca duvar genişlik değişiminin şematik olarak gösterimi [35]

Isı birikmesini engellemenin bilinen en yaygın yöntemi katmanlar arası soğuma süresi belirlemektir. Bu yöntemde belirlenen sabit katman sıcaklığına ulaşıldıktan sonra yeni katmana başlanmaktadır. Belirlenen düşük katman yüzey sıcaklığı ile kaynak banyosu sabit tutularak daha stabil bir parça geometrisi elde edilebilmektedir [37]. Başka bir yöntemde su soğutmalı bir fikstür kullanmaktır [38]. Ek olarak yığma stratejisi değiştirilerek ısı transferi karakteristikleri ve ısıl profiller istenen duruma getirilebilir [34].

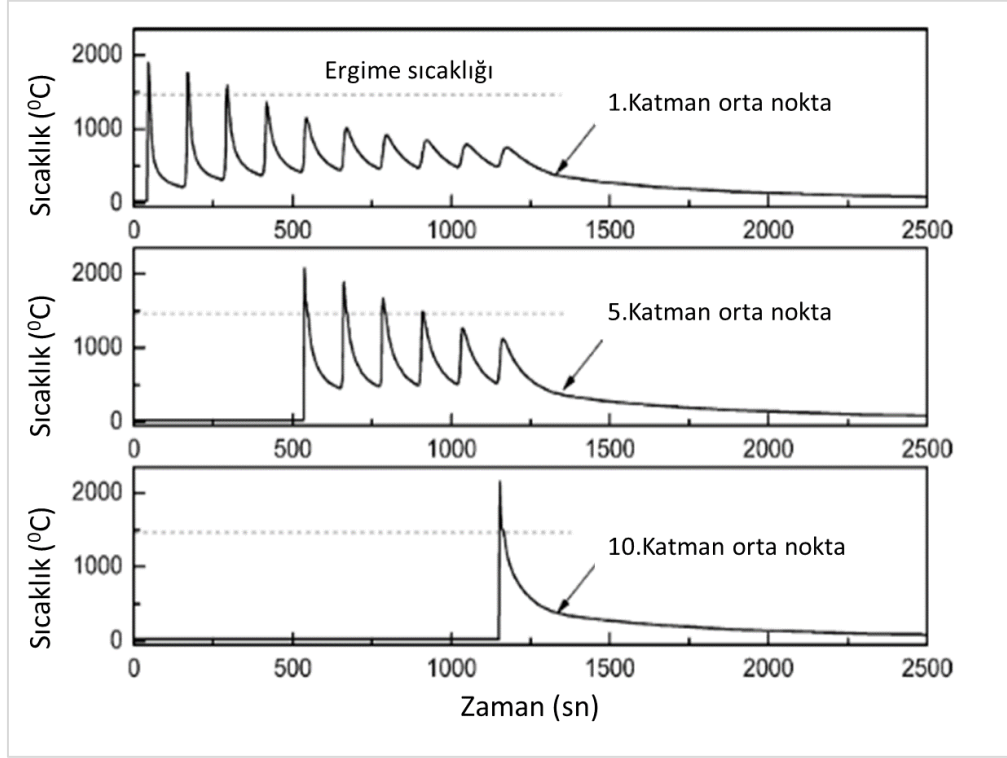
WAAM prosesinde kızılötesi kamera kullanılarak ince tek dikiş duvarın ısı analizi Dongqing ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Daha sonra kızılötesi kamera ölçümü ısı çiftleri ile doğrulanmıştır. Ölçümde kaynak havuzu bölgesinde yayınlılık katsayısı farkından dolayı okuma hatası görülmüştür. Isıl analizde katman sayısı arttıkça kaynak havuzu arkasındaki alanın genişlediği görülmüştür. Soğuma bekleme süresi arttıkça duvarın ortalama sıcaklığının düştüğü, soğuma hızı ve sıcaklık gradyanının arttığı tespit edilmiştir. [39]. Wu ve arkadaşları ısı birikmesinin etkilerini araştırdıkları çalışmalarında katman sıcaklığının ölçülebilmesi için temassız ölçüm ekipmanı olan pirometre kullanmışlardır. Sonuç olarak katmanlar arası soğuma bekleme süresi az olduğunda altlık yüzeyi ile katmanlar arası sıcaklık arasında büyük fark olduğunu tespit etmişlerdir. Bu yüzden altlık yüzeyinden ölçüm alınarak hareket edilmesinin büyük hatalara sebebiyet vereceği sonucuna varmışlardır. Bu fark Şekil 2.17’de görülmektedir. Altlık yüzeyi sıcaklığı 8. katmandan sonra dengelenirken katman yüzeyi sıcaklığı 15. katmana kadar sürekli artmıştır [40].



Şekil 2.17. Altlık, katman yüzeyi sıcaklıkları ve parçada ısı birikmesi [40]

WAAM parçalarının mikro yapısı ve özellikleri doğrudan malzeme, tel besleme hızı, ısı girdisi ve katmanlar arası soğuma süresi gibi proses parametrelerine bağlıdır. WAAM prosesini optimize etmenin en büyük zorluğu istenilen karakteristikler için birçok deney yapılması gerekmesidir. Bu yüzden sonlu elemanlar analizinin (SEA) WAAM prosesine adaptasyonu büyük önem taşımaktadır [7]. Zhao ve arkadaşları tek dikiş on katmanlı duvarın sonlu elemanlar analizi modeli ile sıcaklık dağılımı değişimi, ısıl çevrim karakteri, sıcaklık gradyanı ve yığma yollarının ısıl prosese etkilerini incelenmişlerdir. Sıcaklık dağılımı değişimi birinci, beşinci ve onuncu katmanın ortalarında incelendiğinde kaynak havuzunun arkasındaki yüksek sıcaklık alanının yığma yüksekliğinin artması ile gitgide genişlediği görülmüştür. Bunun sebebi giren ısıнын iletim, taşınım ve ışıınım ile atılmasının artan duvar yüksekliği ile azalması ve ısı birikmesidir. Isı atılmasının azalmasında iletimin azalmasının taşınım ve ışıınımına göre daha fazla etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 2.18’de görüldüğü gibi ısı birikmesi nedeni ile ısıl çevrim en yüksek sıcaklığının artan katman sayısı ve duvar yüksekliği ile arttığı görülmüştür. Grafikte birinci katman sıcaklığının ikinci ve üçüncü katman yığılırken ergime sıcaklığını geçtiğini göstermektedir. Son iki katman haricinde tüm katmanlar kendinden sonra gelen iki katmanın sıcaklığından etkilenecek tekrar ergimekte ve birleşme için yeterli şartı sağlamaktadır (Şekil 2.18). Isıl çevrim eğrilerine göre bir noktanın soğuma hızı hesaplanabilir. Birinci katmanın orta noktası altlığa en yakın olduğundan en iyi iletme sahiptir. Katman sayısı arttıkça soğuma oranının azaldığı görülmüştür. Sebebi ısı birikmesi ile altlık sıcaklığının artmasıdır. Ayrıca yığma yüksekliği arttıkça ısı kaynağının alttaki katmanlara etkisi azalmaktadır. Katman sayısı arttıkça katmanlardaki sıcaklık

gradyanı ısı birikmesinden dolayı azalır. Kaynak havuzu ise genişler. Yığma yönü sürekli aynı olduğu durumda sıcaklık gradyanı yığma yönü sürekli değişen duruma göre daha yüksek olmaktadır. Sonuç olarak yığma yönü değiştirilerek ısı yayılmasının iyileştirilebileceği görülmüştür [41].



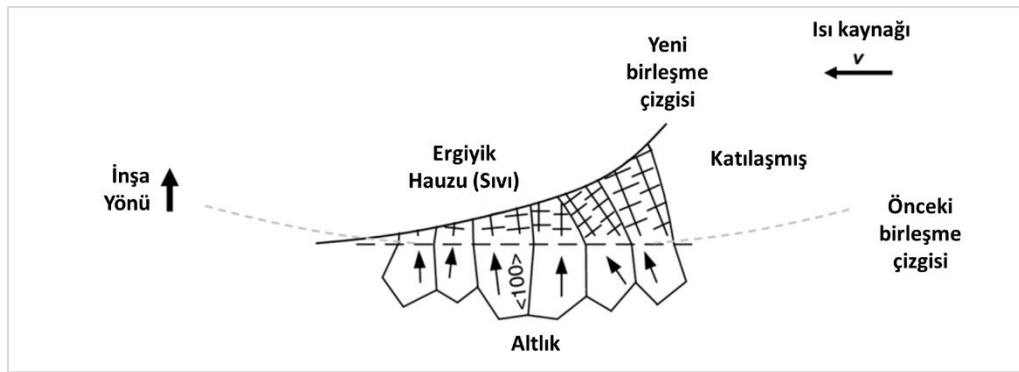
Şekil 2.18. 1., 5. ve 10. katmanların ısı çevrimleri [41]

Dairesel bir geometrideki ısı yayılımı Xiong ve arkadaşları tarafından SEA ile incelenmiştir. Kaynak havuzundaki sıcaklık gradyanının katman yüksekliği ile azaldığı görülmüştür. İlk katmanlarda altlık yönünde fazla olan sıcaklık gradyanının üst katmanlarda azalarak katman yan yüzeylerine doğru arttığı görülmüştür [42]. Xiong ve arkadaşları yine dairesel bir geometride SEA ile altlığın ön ısıtmasının ısıl prosese etkisini incelemişlerdir. Ön ısıtma sıcaklığının artması ile birlikte katmanlar arasındaki sıcaklık gradyanı farkı azalmıştır. Ön ısıtma ilk katmandaki soğuma eğrisini daha yumuşak hale getirmiş ve diğer katmanlar için soğuma hızını düşürmüştür. Yapılan çalışmada 400 ile 600 °C arasında ön ısıtma sıcaklıklarının ısıl gerilimi ve kırılma eğilimini azalttığı sonucuna varılmıştır [43]. Montevecchi ve arkadaşları ısı birikmesini engellemek amacı ile parçaya hava üfleyen bir soğutma sistemini modellemişlerdir. Model ile yapılan soğutma sistemli ve sistemli analizlerde önerilen sistemin kaynak havuzu genişliğini azalttığını ve katmanlar arası sıcaklığın artmasını engellediğini tespit etmişlerdir [44].

Montevecchi ve arkadaşları Goldak ısı modeline ek olarak farklı bir ısı modeli önermişlerdir. Önerdikleri ısı modelinin kaynak makinesinden tel ve altlığa gerçek durumda aktarılan gücü dikkate aldığını vurgulamışlardır [45]. Başka bir çalışmada Montevecchi ve arkadaşları altlıkta gereken en kaba ağ yapısı kullanan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu şekilde çözüm süresinden tasarruf edilebileceğini belirtmişlerdir. Ding ve arkadaşları da çözüm süresini kısaltmak amacı ile farklı modelleme yaklaşımları denemiş ve benzer sonuçlar veren bir model ile hesaplama süresinden %80 tasarruf edilebileceği sonucuna varmışlardır [38].

2.5. WAAM Malzeme Mikro yapı ve Mekanik Özellikleri

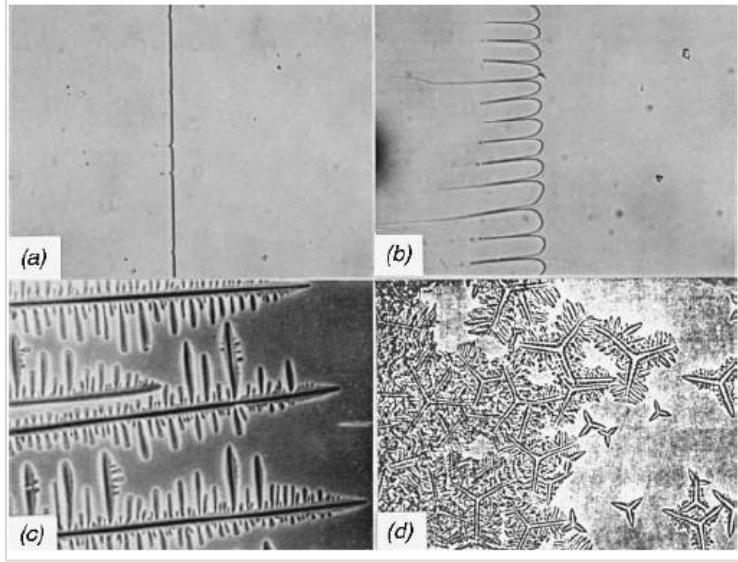
Parçanın üretimi sırasında, yığılan malzeme birçok farklı ısınma ve soğuma çevrimine maruz kalmaktadır. Bu da malzeme iç yapısında farklı tanecik yapılarının oluşmasına neden olmaktadır. Tanecik yapısı kontrolü önemlidir, çünkü malzemenin mekanik özelliklerini belirleyici özelliğe sahiptir. Eİ ile üretilen parçalar tipik olarak tabandan yığma yüksekliği yönüne doğru katı sıvı ara yüzüne dik olarak epitaksiyal büyüyen büyük kolon biçimde taneciklerden oluşmaktadır (Şekil 2.19). Bu büyüme sıcaklık gradyanının en yüksek olduğu yerde gerçekleşir ve yapının çekirdeklenme yerlerine ihtiyacını ortadan kaldırır. Bu şekilde büyüme mekanik özelliklere zarar veren anizotropik özelliklerin oluşmasına neden olmaktadır. Sünekliği artırıp kırılma duyarlılığını azalttığı için yapıda eş eksenli taneciklerin oluşması istenmektedir. Bu şekilde Eİ ile üretilen parçalarda izotropiğe yakın özellikler elde edilebilmektedir [7, 46, 47].



Şekil 2.19. Ergiyik havuzundaki epitaksiyal tanecik büyümesinin şematik gösterimi [48]

Dallantılı yapıların oluşması katılma modlarıyla açıklanmaktadır. Katılma şartı ve malzeme sistemine göre bu modlar Resim 2.3'teki gibi oluşmaktadır. Katılma modları sıcaklık gradyanı ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$) ve katılan çekirdeğin büyüme hızına (cm/sn) göre

değişmektedir. Bu iki parametrenin çarpımı ise soğuma hızını göstermektedir. Dikine ve eş eksenli dallantılı yapıların oluşması düşük sıcaklık gradyanı (G) ve yüksek büyüme hızı (R) sebebiyledir. Soğuma hızı (GxR) ise oluşan yapıların büyüklüğü ve dolayısı ile yapının kaba veya ince olmasına etki etmektedir [48].



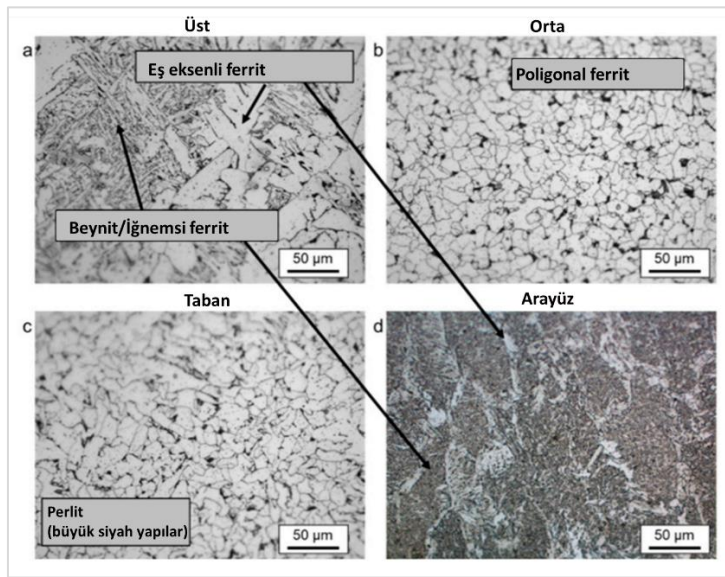
Resim 2.3. Katılaşma modları a) düzlemsel b) gözeli (ing. cellular) c) dikine dallantılı d) eş eksenli dallantılı [48]

Kaynak teli olarak elde edilebilen her malzeme genellikle WAAM için kullanılabilir. Bu malzemelerden en çok kullanılanları çelik [49], alüminyum [50], titanyum [51], nikel [52] ve bronz [53] tabanlı alaşımlardır. Titanyum ve nikel bazlı alaşımlar havacılık sektörüne uyumlu olduğu için sıklıkla araştırılmaktadır. WAAM'ın avantajlarından bir tanesi de geniş bir malzeme çeşitliliğini kullanabilmesidir. Bu malzeme çeşitlerinden bir tanesi de çeliklerdir [7].

ER70S-6 düşük alaşım yumuşak çelik telini GMAK ile kullanan Liberini ve arkadaşları optimum proses parametrelerinin seçilmesini incelemişlerdir. Farklı proses parametreleri kullanılmasına rağmen soğuma eğrisinin ağır basmasından dolayı mikro yapıda belirgin bir değişiklik tespit etmemişlerdir. Numune duvar kesitinde üç bölge tespit edilmiştir. En alt bölgede ince şeritli perlitte sahip ferritik yapı, ortada eş eksenli ferrit tanecik yapısı ve üstte ise lamelli beynitik yapı görülmüştür. Bu yapı farklarının sebebi bu bölgelerin farklı ısı geçişlere sahip olmalarıdır. Soğuma hızının alt ve üst bölgede yüksek olmasından dolayı orta bölgeye göre daha ince bir tanecik yapısı oluşmuştur. Mikro sertlik ölçümleri mikro yapı farklılıklarını doğrulamıştır. Bu çalışmada çekme, uzama ve yorulma gibi diğer

mekanik özellikler incelenmemiştir. Son ürünün ihtiyaçlarına göre ferrit/beynit yapısının katmanlar arası farklı soğutma çevrimleri ile sağlanabileceği öngörülmüştür [54]. ER70S-6 karbon ve 316L-Si östenitik paslanmaz çeliğini WAAM ile mekanik özelliklerini inceleyen Moore ve arkadaşları her iki malzemenin darbe tokluk özelliklerinin geleneksel yöntemlere kıyasla yeterli olduğunu, yığma stratejisinin parça dayanımı üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu, geleneksel kaynağa göre WAAM dayanımının daha düşük olduğunu ve yığma stratejisinin mikro yapı gelişimi üzerine etkisinin anlaşılması gerektiğini tespit etmişlerdir. Gelecek çalışma olarak yığma stratejilerinin ve mikro yapıya etkilerinin araştırılmasını ve WAAM'a uygun teller geliştirilmesini önermişlerdir [55]. ER70S-6 karbon ve 304 paslanmaz çeliğin kullanıldığı başka bir çalışmada Haden ve arkadaşları WAAM ile çekme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Paslanmaz çeliğin inşa yönüne doğru yerel ısı geçmişlerden dolayı aşınma hızının azaldığı ve sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Yumuşak çeliğin yatay ve dikey çekme numuneleri incelendiğinde belirgin bir fark görülmemiştir. Bu da parçada izotropiye işaret etmiştir [56]. Düşük maliyetli bir sistem tasarımı ile Lu ve arkadaşları ER70S-6 çelik tel ile numuneler üretilip mikro yapı ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Ayrıca ince duvarların yıkılmasını önlemek için bir soğutma yöntemi geliştirmişlerdir. Mikro yapıda katmanların birleştiği ve birbirinden uzakta oldukları noktaları mikroskop altında görüntülediklerinde yapıda ferrit, az perlit ve artık östenit olduğunu gözlemlemişlerdir. Ferrit tane boyutu katmanların birleşmediği yerlerde birleşen yerlere göre oldukça küçük olmaktadır. Yığma yönünde mikro yapının ve mikro sertliğin katmanlar halinde sandviç dağılımına benzer şekilde değiştiğini gözlemlemişlerdir. Son olarak parça inşa yönüne dik doğrultuda olan numunelerin kopma ve akma mukavemetlerinin inşa yönüne paralel olanlardan daha yüksek, uzama oranlarının daha düşük olduklarını tespit etmişlerdir [57]. ER70S-6 karbon çelik kaynak telini CMT ile kullanan Carqueria ve arkadaşları çalışmada duvar kesitleri sertlik ölçümlerini ve mikro yapı bulgularını kullanarak çekme dayanımlarını tahmin ederek CMT prosesinin konvansiyonel kısa devre kaynağına göre üstün olduğunu tespit etmişlerdir. Mikro yapı etkisinin parça davranışına etkisi konusunda hala literatür açığı olduğunu belirtmişlerdir [58]. ER70S-6 kaynak telini karbon mangan (C-Mn) çeliği olarak adlandıran Sridharan ve arkadaşları WAAM'a benzeyen çoklu pasolu kaynakta tokluk değerlerinin yöne bağlı olarak değişim gösterdiğini ifade ederek bu değişimi incelemişlerdir. C-Mn çeliklerinde ilk katılaşma sırasında östenite dönüşen delta ferrit oluşmaktadır. Bazı durumlarda alaşım elementleri ve soğuma hızlarından dolayı östenit katılaşan ilk faz olabilmektedir. Östenit daha sonra ferrit, beynitik ferrit, martensit-kalıntı östenit-sementit ve son soğumada iğnemsiz ferrit yapılarına

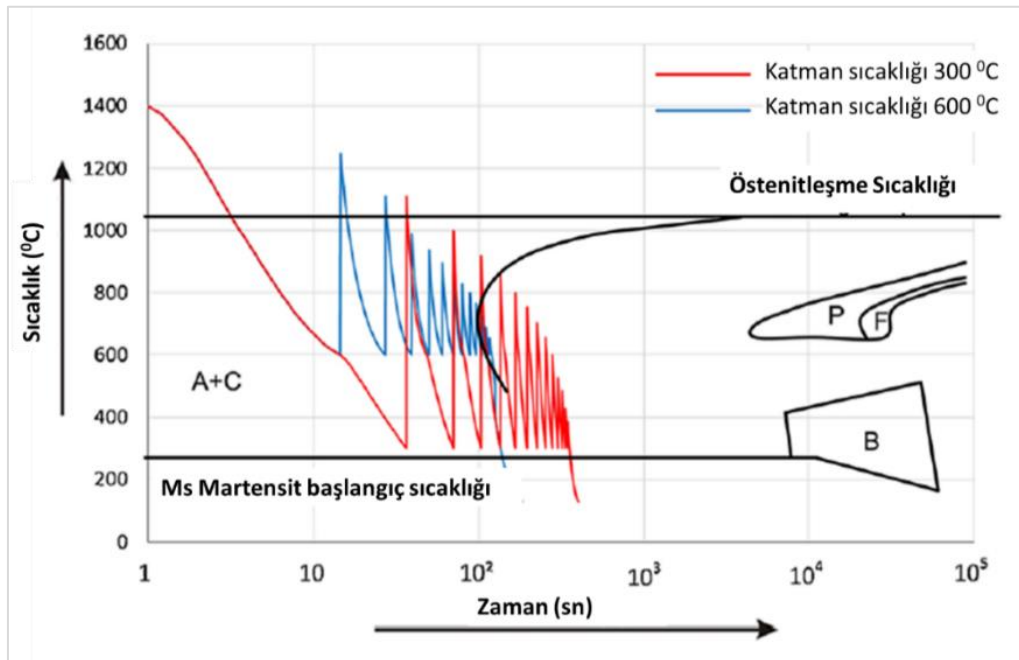
dönüşmektedir. Çoklu paso kaynaklarda ilk katmandan sonra diğer yapılan katmanlar alttaki katmanlardaki yapıları tekrar östenite dönüştürür. Çekme dayanımı ve darbe tokluk gibi önemli mekanik özellikler mikro yapıya bağlıdır. C-Mn çeliklerinde final mikro yapıyı belirleyen, ilk östenitin tanecik boyutu, tekrar eden ısı çevrimleri, soğuma hızı ve kalıntılardır. Çalışma sonucunda 800-500 °C arasındaki sürenin 30 sn'den fazla olmasının mekanik özelliklere olumlu etki yaptığını tespit etmişlerdir [59]. C-Mn çeliği ile mikro yapı ve mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi inceleyen Shassere ve arkadaşlarının ürettikleri duvar geometrisinin iç yapısında en üst noktada beynit (Resim 2.4a), ortada poligonal ferrit (Resim 2.4b), tabanda perlit (Resim 2.4c) ve altlık ile duvarın birleştiği ara yüzde eş eksenli ferrit (Resim 2.4d) görülmüştür. Ara yüzdeki heterojen yapıdan dolayı sertlik dağılımı bu bölgede değişken olsa da duvarın genelinde eşit dağılmıştır [60]. Görülen mikro yapılar Liberini ve arkadaşlarının sonuçları ile uyushmaktadır [40].



Resim 2.4. Duvar kesiti yükseklik boyunca mikro yapılar, a) son katman, en üst, b) duvar orta bölgesi, c) duvar taban bölgesi, d) altlık ile yığmanın başladığı birleşme bölgesi [60]

Hu ve arkadaşları sonlu elemanlar yazılımından tahmin edilen sıcaklık geçmişleri ile düşük karbon çeliği ER70-S6'dan üretilen ince duvarı kullanarak proses parametreleri, mikro yapı ve özellikler arasında ilişkiler kurmuşlardır. Son mikro yapı sıcaklık geçmişi ve sürekli soğuma dönüşüm diyagramı (SSD) ile açıklanabilmektedir. Bu mikro yapı östenitten ferrit/beynit dönüşümü arasındaki soğuma oranı ve sonraki ısınma çevrimleri ile oluşmaktadır. Hızlı soğuma oranı tabana yakın küçük ferrit tanecikleri ve ince beynit yapıya yol açmıştır. Yavaş soğuma ve ferrit-perlit bölgelerinin sürekli ısınma çevrimlerine maruz

kalması az miktarda perlitte birlikte orta tanecik boyutlu ferrit oluşmasına yol açmıştır. Tekrar ısıtma olmayan en üst bölge en düşük soğuma oranına sahiptir ve büyük oranda iri tanecikli eş eksenli ferrit ve beynitik yapıya sahiptir [61]. Sıcak iş takım çeliği ve CMT kullanılarak yapılan çalışmada Ali ve arkadaşları farklı ısı girdileri ve katmanlar arası sıcaklığın mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. SSD diyagramında görüldüğü üzere 600 °C yerine 300 °C'ye kadar katmanın soğumasının beklenmesi temperleme süresini arttırdığından sertlik değerlerini düşürdüğü görülmüştür (Şekil 2.20). Ayrıca bu sıcaklığın martensit oluşma sıcaklığı olan 290 °C'den yüksek tutulması parça yüksekliği boyunca daha homojen bir sertlik profili oluşmasını sağlamıştır [62].

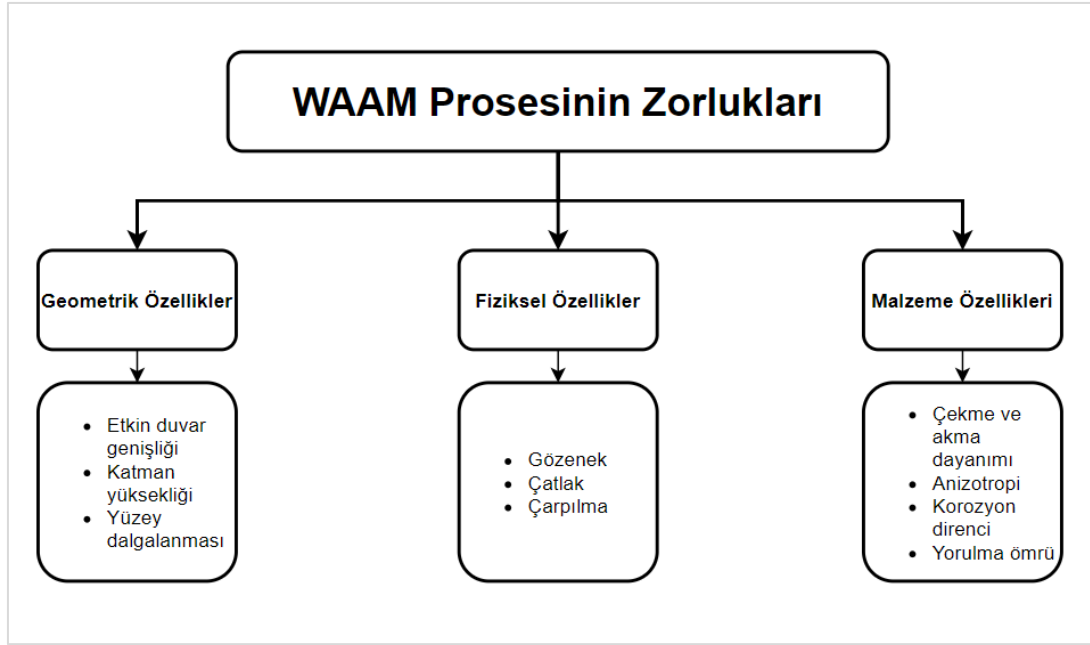


Şekil 2.20. İlk katmanın farklı katman sıcaklıklarında sıcaklık profillerinin SSD diyagramında şematik gösterimi [62]

YMDA (HSLA, Ing. High strength low alloy steels) çelik tel olan ER110S-G ile yapılan çalışmada Rodrigues ve arkadaşları düşük ve yüksek ısı girdisi ile iki tek dikiş duvar yapılmıştır. Her iki ısı girdisinde katman sayısı arttıkça sıcaklık gradyanının düştüğü görülmüştür. Yüksek ısı girdisinde daha düşük soğuma hızları tespit edilmiştir. Faz değişimlerinin olduğu 800-500 °C aralığında kalma süresi yüksek ısı girdili duvarda daha fazladır. Farklı ısı girdilerine rağmen benzer olarak her iki yapıda da ferrit, beynit ve martensit tespit edilmiştir. Düşük ısı girdili duvarın daha düşük değerlerde ve homojen bir sertlik profiline sahip olduğu görülmüştür [63].

2.6. Literatür Özeti ve İlgili Literatür Açığı

Literatürde sıklıkla çalışılan ana konular WAAM prosesinin zorlukları hakkında fikir vermektedir. Bu zorlukların ana başlıkları geometrik, fiziksel ve malzeme özellikleri olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 2.21). Tez çalışması ile geometrik ve malzeme özellikleri başlıklarına katkı sağlanması amaçlanmıştır.



Şekil 2.21. WAAM prosesinin zorlukları

Tez çalışmasında CMT kaynak yöntemi kullanılarak daha önce parametre geometri ilişkisi çalışılmamış olan ER120S-G yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliğin dikiş geometrisinin etkin kaynak parametreleriyle olan ilişkisi incelenecektir. Bu ilişki ile ortaya çıkan matematiksel denklem ile istenen dikiş geometrisine ulaşmak için gerekli kaynak parametreleri seçilebilecektir. Literatürde çeliklerle yapılan çalışmalarda büyük oranda düşük mukavemetli karbon mangan çeliği kullanılmıştır. Düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çeliklerle ilgili çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmüştür.

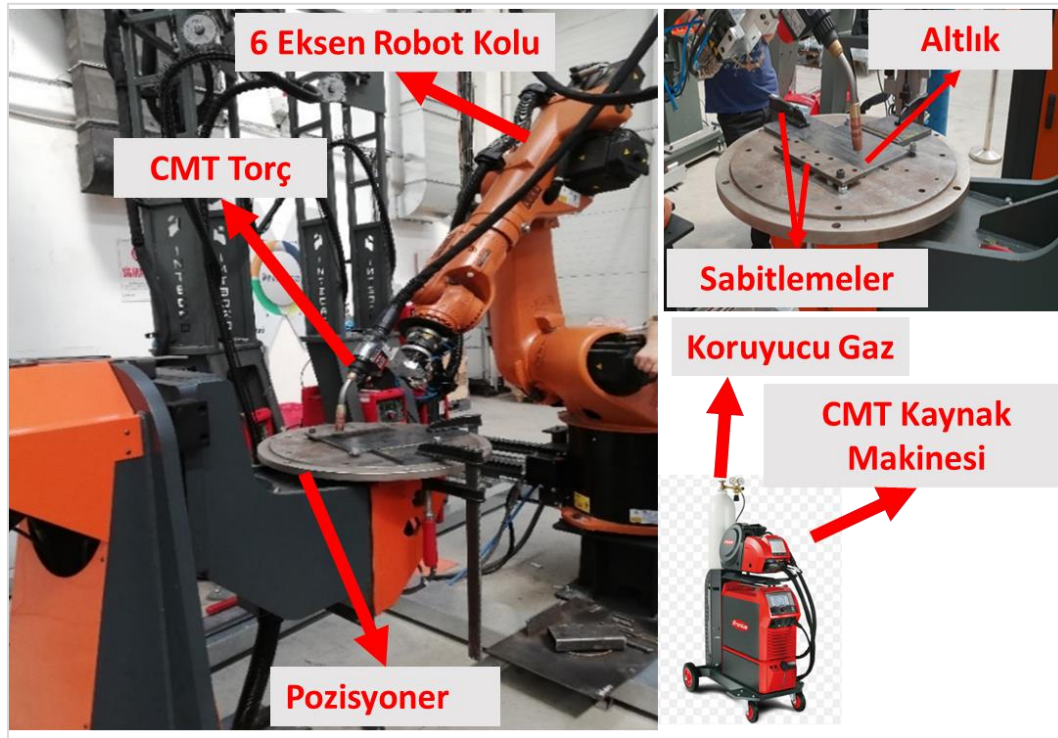
WAAM parçalarının ısı davranışının hem yüzey kalitesi hem de mikro yapı ve mekanik özelliklerin oluşumuna etkisinin önemi literatürde vurgulanmıştır. Isıl davranış ve etkilerini incelemek için çalışmalar yapılmış olsa da sınırlı sayıda olduğu bilinmektedir. Özellikle ısıl modelden elde edilen bilgilerin katmanlar arası soğuma süresi ve mikro yapı dönüşümü tahmininde kullanılması ile ilgili literatürde fazla çalışma yapılmadığı görülmüştür.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, tez çalışmasında yürütülen deneyler kapsamında kullanılan sistem, altlık malzemesi, ölçüler, kaynak teli özellikleri, sabit ve değişken parametreler açıklanmıştır. Ayrıca ısı ölçümde kullanılan kızılötesi kamera, ısı çift ve ölçüm yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Son olarak WAAM prosesinin SEA yöntemi ile modellenmesi ve doğrulanması anlatılmıştır.

3.1. Deney Düzenegi

Deneyde Resim 3.1’de görülen Kuka KR30 HA model 6 eksenli robot kolu ve soğuk metal transferi (CMT) moduna sahip Fronius TP400i gaz altı kaynak makinesi kullanılmıştır. Kaynak makinesi telin beslenmesi ve koruyucu gaz altında elektrik arkı ile ergitilmesini sağlamaktadır. Kaynak torcu robot kolunun ucuna montajlıdır. Robot kolu kaynak torcunun x, y ve z eksenindeki hareketini sağlamaktadır. Torcun hangi yönde ve hızda ilerleyeceği öğretici kumanda veya bilgisayar programlama ile robot koluna aktarılmaktadır.



Resim 3.1. Robot manipülatör, pozisyoner, kaynak makinesi ve diğer ekipmanlardan oluşan WAAM deney düzeneginin genel görünümü

3.2. Malzemeler

Deneyler ve uygulamalarda ESAB OK Aristorod 89 ER120S-G 1.2 mm düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çelik kaynak teli kullanılmış, yığma yolları robotun el kumandası ile programlanmıştır. Yığma esnasında EN M21 80Ar/18 % CO₂ koruyucu gaz kullanılmıştır. Altlık malzemesi olarak TS EN 10025-2 standardına göre S355JR alaşımsız yapı çeliği kullanılmıştır [64]. Malzemelerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonları [64, 65]

Malzeme	C %	Mn %	Si %	Ni %	Cr %	Mo %
ER120S-G	0,081	1,75	0,8	2,22	0,41	0,533
S355JR	0,2	1,60	0,55	-	-	-

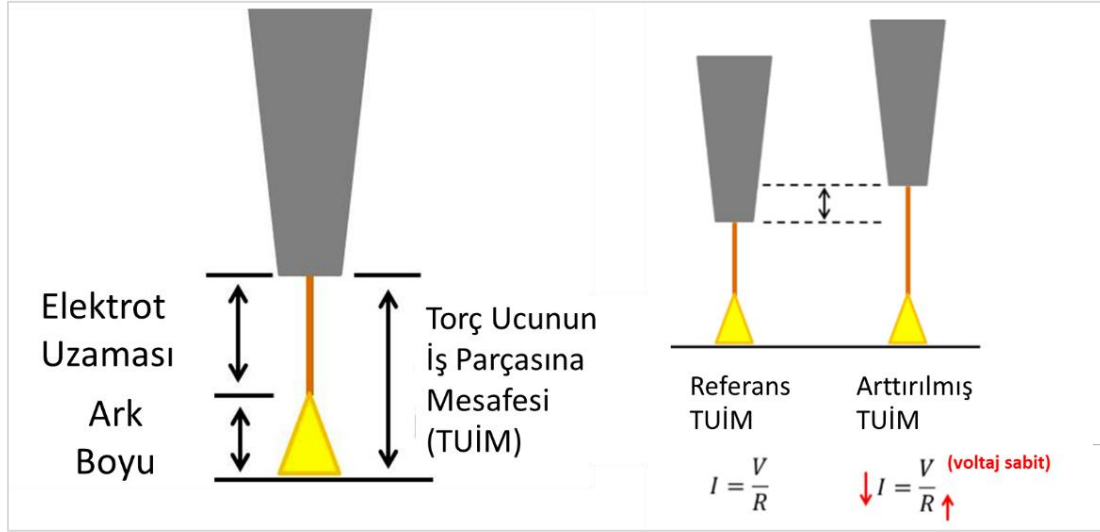
Deneylerde kullanılan ER120S-G kaynak telinin üretici verilerine göre kaynaklı halde çekme, akma ve uzama değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Aynı şekilde S355JR alaşımsız yapı çeliğinin TS EN 10025-2 standardına göre değerleri Çizelge 3.2’de görülmektedir.

Çizelge 3.2. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri [64, 65]

Malzeme	Akma (MPa)	Çekme (MPa)	Uzama (%)
ER120S-G	920	940	18
S355JR	355	470-630	20

3.3. WAAM Proses Parametreleri

Kaynak makinesinde kaynak modu CMT, tel tipi çelik, tel çapı 1.2 mm, koruyucu gaz tipi Ar/CO₂ (20%) olarak seçilmiştir. Koruyucu gaz debisi tüpün üzerinde bulunan manometre aracılığı ile 15 l/dk olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.1’de görülen torç ucunun iş parçasına olan mesafesi (TUİM) akımın değişmesine sebebiyet verdiği için önem arz etmektedir. Ohm kanununa göre tel uzunluğu arttıkça direnç artmakta ve telin üzerinden geçen akım miktarı azalmaktadır. Sonuç olarak kaynak nüfuziyeti azalmaktadır [66]. Bu parametre, etkisini yok etmek için tek dikiş denemelerinde 13 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 3.1. Elektrot uzaması, ark boyu, TUİM ve TUİM etkisinin şematik gösterimi [66]

CMT modunda en önemli değişken parametre tel besleme hızıdır (TBH). TBH kaynak makinesine girildikten sonra voltaj ve akım makine tarafından otomatik olarak ayarlanmaktadır. CMT'nin özelliklerinden olan voltaja ve akıma müdahaleye izin veren sırasıyla ark boyu ve dinamik düzeltme parametreleri bu çalışmada kullanılmamıştır. Diğer en önemli değişken parametre robotun kontrolü ile sağlanan torç ilerleme hızıdır (İH). Tez çalışmasında kullanılan sabit ve değişken parametreler Çizelge 3.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. Deneylerde kullanılan değişken ve sabit proses parametreleri

Değişken Parametreler			Sabit Parametreler		
TBH	İH	Koruyucu Gaz	Gaz Debisi (l/dk)	Tel Çapı (mm)	TUİM (mm)
(m/dk)	(m/dk)	Ar/CO2 (20%)	15	1,2 mm	13 mm

3.3.1. Isı girdisinin hesaplanması

Kaynak sırasında iş parçasına verilen ısı enerjisi girdisi (IG) Eş. 3.1 ile hesaplanmaktadır.

$$IG \left(\frac{J}{mm} \right) = \frac{Volta j(V) \times Akım(A)}{İH \left(\frac{m}{dk} \right)} \times \eta \times 0,06 \quad (3.1)$$

Voltaj ve akımın çarpımı birimi Watt (J/sn) olan gücü vermekte ve ilerleme hızına (İH) bölündüğünde birim ilerlemedeki ısı girdisini vermektedir. İlerleme hızı birimi m/dk olarak formülde kullanıldığında J/mm'ye çevirmek için formül 0,06 ile çarpılmaktadır. η verim değeri CMT kaynağında 0,9 olarak kullanılmaktadır [38]. Deneyler sırasında gerçekleşen ortalama akım ve voltaj değerleri kaynak makinesi yazılımı ile toplanmıştır.

3.3.2. Yığma hızı ve yığılan malzeme hacminin hesaplanması

Yığma hızı (YH), birim zamanda eritilen tel kütlesini ifade etmektedir. Eklemeli imalatta proseslerin hızlarının karşılaştırılması için kıstas olarak kullanılmaktadır. Eş. 3.2 ile hesaplanmaktadır.

$$YH \left(\frac{kg}{saat} \right) = A(m^2) \times \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times TBH \left(\frac{m}{saat} \right) \quad (3.2)$$

A tel kesit alanı, ρ tel malzemesinin yoğunluğu ve TBH tel besleme hızıdır. Tel kesit alanı tel çapına bağlıdır ve tel çapı arttıkça artmaktadır. Sonuç olarak yüksek yığma oranları için daha büyük tel çapları ve tel besleme hızları kullanılması gerekmektedir.

Yığılan Malzeme Hacmi

Yığılan malzeme hacmi (YMH) birim uzunlukta yığılan malzeme hacmini ifade etmektedir ve Eş. 3.3 ile hesaplanmaktadır.

$$YMH \left(\frac{mm^3}{mm} \right) = \frac{A(mm^2) \times TBH \left(\frac{mm}{sn} \right)}{IH \left(\frac{mm}{sn} \right)} \quad (3.3)$$

Bu formüle göre kaynak dikişinin birim uzunlukta kesit alanı TBH/İH oranına bağlı olarak değişmektedir. Gaz altı metal ark kaynağında akım tel besleme hızı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Sonuç olarak hem ısı girdisi hem de kaynak birim kesit alanı TBH'nin, İH'ye oranı ile değişmektedir.

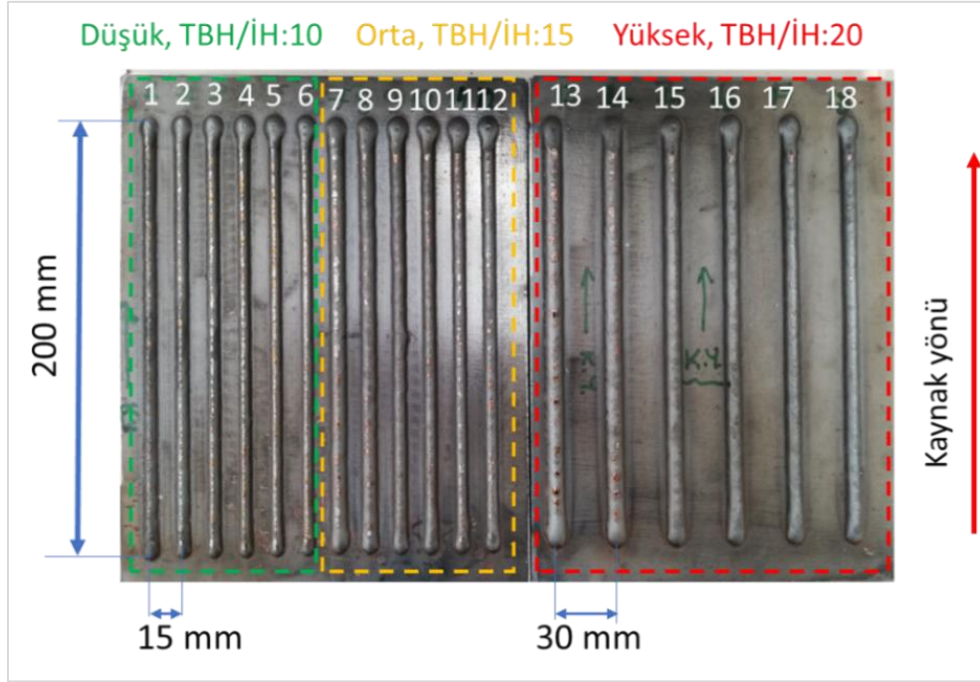
3.4. Tek Katman Kaynak Dikişleri

Bu bölümde tel besleme hızı (TBH) ve tel besleme hızının ilerleme hızına oranı (TBH/İH) girdi parametreleri ile üretilen tek kaynak dikişleri üretilerek bu parametrelerin kaynak dikiş karakteristiğine olan etkisi incelenmiştir. Girdi parametrelerinin seçimi, veri azaltmayı hedefleyen deney tasarımı yaklaşımı yerine kapsayıcı sistematik deney yaklaşımı veri toplama stratejisine dayanmaktadır. Bu yaklaşım ile en küçük kareler regresyon modeli daha basit ve hassas olarak oluşabilmektedir [67]. Ayrıca parametre aralıklarının seçiminde tel üreticisinin kullanılan kaynak teli çapı için önerdiği değerler dikkate alınmıştır [65]. Deneyisel çalışmada, Çizelge 3.4'te görüldüğü gibi altı farklı tel besleme hızı ve her tel besleme hızı için TBH/İH oranını 10,15 ve 20 olarak sağlayacak şekilde altı farklı ilerleme hızı girdi parametresi olarak kullanılmıştır. TBH/İH oranı iyi kalitede ve birbirine yakın kesit alanı ile yığılma yapılabilmesi için girdi parametresi olarak seçilmiş ve bu şekilde tel besleme hızı ve ilerleme hızının düzensiz kombinasyonun önüne geçilmiştir. Buna örnek olarak yüksek ilerleme hızı ve düşük tel besleme hızında yaşanabilecek kamburluklar verilebilir. Ortalama akım ve güç tel besleme hızı ile doğrusal olarak değiştiği için bu oranı sabit tutmak ısısının sabit tutulmasını sağlamaktadır [17]. Eş. 3.1'de verilen IG formülüne göre TBH/İH oranı ile ısı girdisi kontrolünün sağlanabileceği görülmektedir. Isının etkisini incelemek amacı ile TBH/İH oranları düşük, orta ve yüksek olarak gruplandırılmıştır. Çizelge 3.4'te verilen parametreler ile 200 mm uzunluğunda on sekiz adet kaynak dikişi 250x200x10 mm boyutlarında S355JR altlıklar üzerine uygulanmıştır.

Çizelge 3.4. Proses girdi parametreleri

Isı girdisi seviyesi	TBH/İH	TBH (m/dk)						
Düşük	10							
Orta	15	5	6	7	8	9	10	
Yüksek	20							

Çizelge 3.4'te verilen TBH ve TBH/İH oranları ile üretilen on sekiz adet kaynak dikişi Resim 3.2'de görülmektedir.



Resim 3.2. Çizelge 3.4'teki parametrelere göre üretilen 18 adet kaynak dikişi

3.5. Duvar Geometri Üretimi

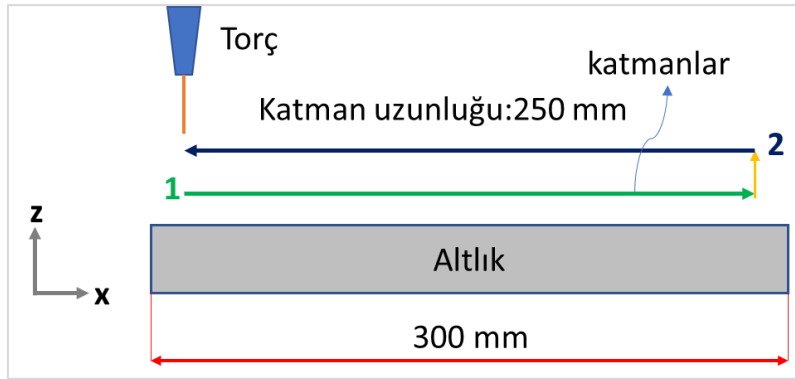
Deneylelerin ikinci kısmında tek dikiş kaynak deneyinde kullanılan ve Çizelge 3.4'te verilen parametrelerden uygun olan iki parametre seti seçilerek 250 mm uzunluğunda iki adet tek dikiş duvar ve iki adet bitişik dikiş duvar üretilmiştir. Seçilen iki farklı parametre setiyle tek dikiş duvarlarda ısı girdisinin etkisi incelenmiştir. Bitişik dikiş duvarlarda ise aynı parametre seti ve ısı girdisi ile yığma stratejisinin etkisi incelenmiştir. Duvar üretimlerinde kullanılan parametreler Çizelge 3.5'te görülmektedir.

Çizelge 3.5. Duvar geometriler proses parametreleri

Duvar Tanımı	TBH/İH	TBH (m/dk)	İH (m/dk)	I (A)	V (V)	Soğuma Süresi (dk)	Isı Girdisi (J/mm)	Uzun İsim (yığma stratejisi)
DITD	10	6	0,6	195	17,4	1	339	Düşük ısı tek dikiş (paralel)
YITD	20	10	0,5	293	15,9	1	559	Yüksek ısı tek dikiş (paralel)
OYBD	10	6	0,6	215	16,8	5	361	Osilasyon yığma bitişik dikiş
PYBD	10	6	0,6	215	16,8	1	361	Paralel yığma bitişik dikiş

3.5.1. Tek dikiş duvarlar

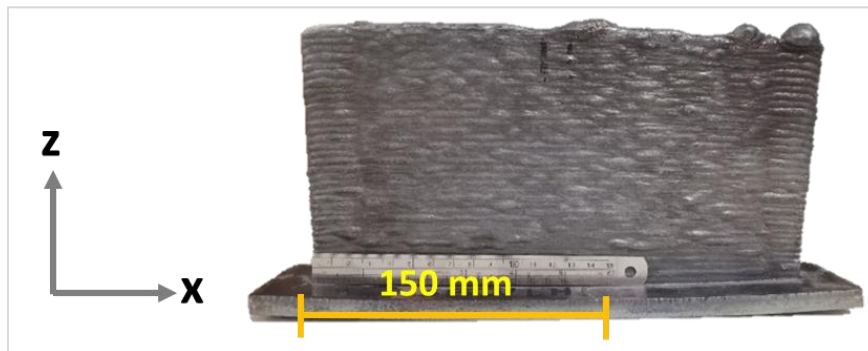
Tek dikiş duvarlar Şekil 3.2’de görülen paralel yığma stratejisi ile üretilmiştir. Duvarlardan bir tanesi düşük ısı girdisi (339 J/mm) ile diğeri ise yüksek ısı girdisi (559 J/mm) ile üretilmiştir. Torç ilerleme yönüne dik bir şekilde tutulmuştur. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi her katmanda yığma başlangıç yönü değiştirilerek malzemenin X yönünde her iki uca eşit dağıtılması sağlanmıştır [28].



Şekil 3.2. Yığma yolunun şematik olarak gösterilmesi

Düşük Isı Girdili Tek Dikiş Duvar

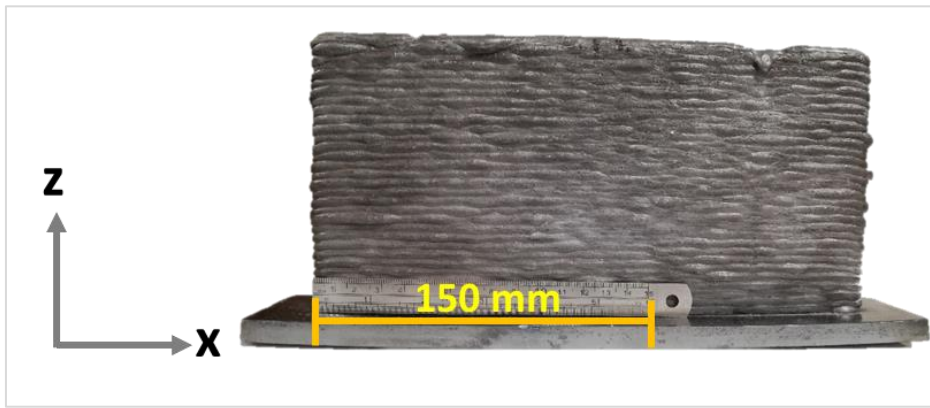
Düşük ısı girdili tek dikişi (DITD) duvar üretimi için iki numaralı tek kaynak dikişi seçilmiş ve bu dikişin parametre seti olan tel besleme ve ilerleme hızları sırasıyla 6 ve 0,6 m/dk olarak deney düzeneğine girilmiştir. Torç z-ekseninde sabit 1,5 mm olarak yükseltilerek katmanlar arası geçiş yapılmıştır. Katmanlar arası soğuma süresi bir dakika olarak belirlenerek 70 katman ve 130 mm yüksekliğinde (z eksen) Resim 3.3’te görülen duvar üretilmiştir.



Resim 3.3. Düşük ısı girdili tek dikiş duvar

Yüksek Isı Girdili Tek Dikiş Duvar

Yüksek ısı girdili tek dikiş (YITD) duvarın üretimi için on sekiz numaralı dikişin TBH ve İH değerleri sırasıyla 10 ve 0,5 m/dk olarak deney düzeneğine girilmiştir. DITD'ye kıyasla TBH/İH oranı 10 yerine 20'ye çıkartılarak ısı girdisi arttırılmıştır Resim 3.4'te görülen ve 130 mm yüksekliğinde üretilen YITD duvarın üretimi için 62 katman yığılmıştır. Yığma sırasında torç z-ekseninde sabit olarak 2 mm yükseltilmiştir. Katmanlar arası soğuma süresi 1 dakika olacak şekilde belirlenmiştir.



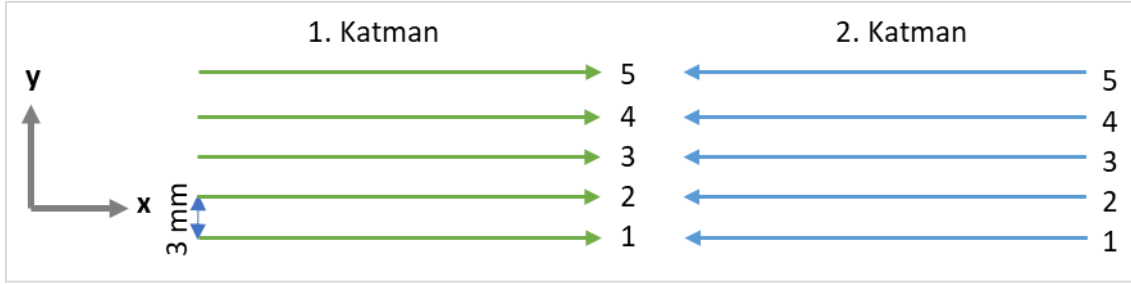
Resim 3.4. Tek dikiş duvar yüksek ısı girdili duvar

3.5.2. Bitişik dikiş duvarlar

Bitişik dikişlere parça duvar kalınlığını arttırmak için ihtiyaç duyulmaktadır. Dikiş 2'nin sırasıyla 6 ve 0,6 m/dk olan TBH ve İH parametre seti kullanılarak iki adet bitişik dikiş duvar üretilmiştir. Bu duvarların üretiminde sırasıyla paralel ve osilasyon yığma yolu stratejileri kullanılmıştır.

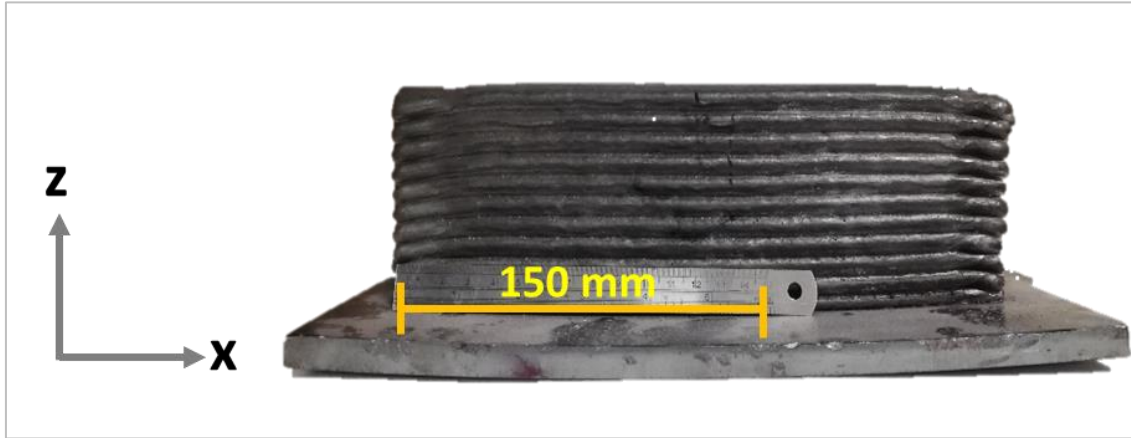
Paralel Yığma Yolu ile Bitişik Dikiş Duvar

Paralel yığma yolu ile bitişik dikiş duvar (PYBD), paralel kaynak dikişlerinin Şekil 3.3'te gösterilen sıra ile birbirlerinin üzerine bindirilmesiyle üretilmiştir. Her katmanda beş dikiş uygulanmış ve dikiş yönleri diğer katmana geçişte uç taraflara eşit malzeme dağılması amacı ile değiştirilmiştir (Şekil 3.3). Dikiş 2'nin ölçülen dikiş genişliği 6 mm'dir. Torç her dikişte y-ekseninde dikiş genişliğinin yarısı olacak şekilde 3 mm kaydırılmıştır. Torç z-ekseninde sabit 4 mm yükseltilmiştir.



Şekil 3.3. Bitişik dikiş için paralel yığma yolu

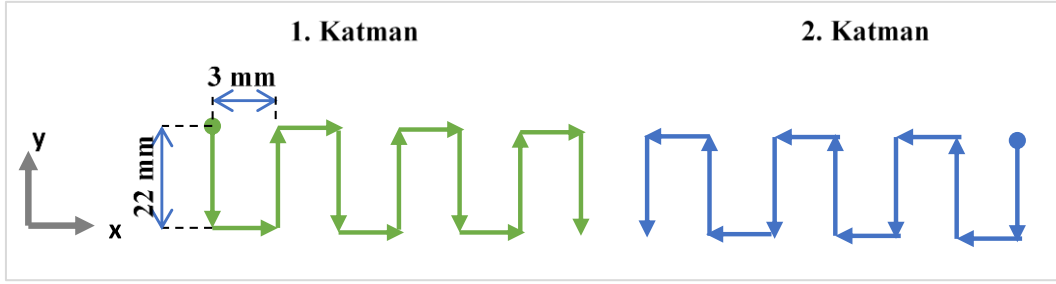
Yirmi iki katman ve 80 mm yüksekliğinde yapılan PYBD duvar Resim 3.5'te görülmektedir. Ortalama katman yüksekliği $80/22$ ile 3.6 mm'dir. Parçayı soğutmak amacı ile her katman sonunda 1 dakika beklenilerek bir katmanda toplam 5 dakika beklenilmiştir.



Resim 3.5. Paralel yığma yolu ile bitişik dikiş duvar

Osilasyon Yığma Yolu ile Bitişik Duvarlar

Osilasyon yığma yolunda y eksenine tanımlanan mesafe ile istenilen duvar genişliği tek katmanda elde edilebilmektedir. Bu yığma yolu ile üretilen bitişik duvarda (OYBD) bu değer 22 mm'dir. X ekseninde dikiş genişliğinin yarısı kadar (3mm) kaydırma aralığı verilmiştir ve her katmanda kaynak yönü değiştirilmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Bitişik dikiş için osilasyon yığma yolu

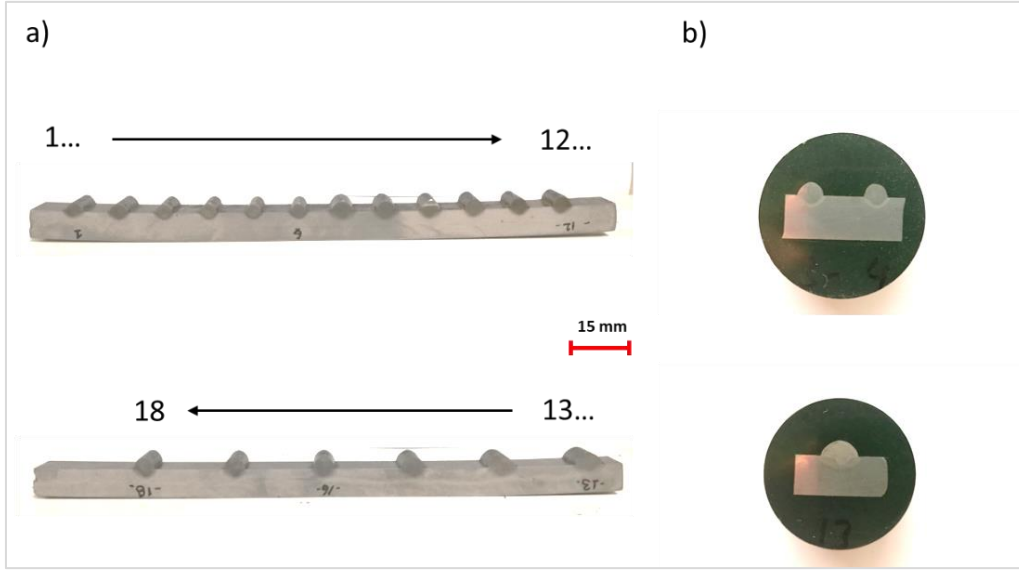
OYBD’de de bir katmanda 2.1 m kaynak yolu olduğu ve dolayısıyla fazla ısı girdisi olduğundan katmanlar arası 5 dakika beklenmiştir [31]. Torç z-ekseninde sabit olarak 4 mm yükseltilmiştir. Uzunluğu (x) 250 mm, genişliği (y) 33 mm, yüksekliği (z) 31 mm olan 9 katmanlı duvar Resim 3.6’da görülmektedir.



Resim 3.6. Osilasyon yığma yolu ile bitişik dikiş duvar

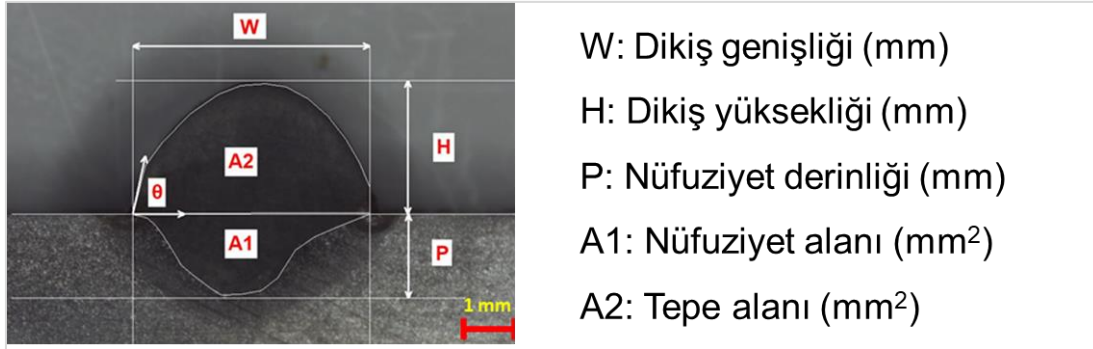
3.6. Kaynak Dikiş Karakteristiğinin Ölçülmesi

Plakalar dikişlerin ortasından kesit alınabilmesi için Resim 3.7a’deki gibi ikiye bölünmüştür. Daha sonra 15 mm aralıklarla yapılan dikişler ikiye, 30 mm aralıklarla yapılan dikişler tekli olarak Resim 3.7b’deki gibi bakalite alınmıştır. 35 mm çapında dairesel bakalite alınan numuneler 120, 500 ve 800 numaralı SiC (ing. Silicon carbide) zımpara kağıtları ile kabadan hassasa doğru zımparalanmış ve ardından parlatma çuhası (3 ve 1 μm) ile parlatılmıştır. En son olarak %5 Nital ile dağlama işlemi yapılmıştır.



Resim 3.7. Tek katman dikişlerinin kesit fotoğrafları, a) plaka üzerinde b) bakalite alınmış

Resim 3.7b'de görülen bakalite alınmış 18 adet kaynak dikiş kesiti EK- 1b'de gösterilen Nikon SMZ745T stereo mikroskop altında görüntülenmiştir (Resim 3.8). Daha sonra mikroskopun kendine ait olan görüntü işleme yazılımı yardımı ile dikiş boyutları ölçülmüştür. Ölçümler sonunda her bir dikişin genişliği, yüksekliği, nüfuziyet derinliği, nüfuziyet alanı ve tepe alanı belirlenmiştir.

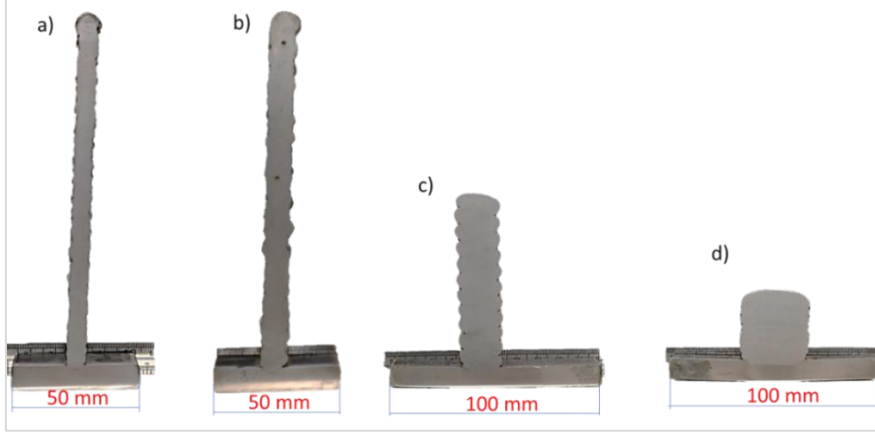


Resim 3.8. Enine kesilen kaynak dikişinin ölçülen dikiş boyutları ile makro grafik görüntüsü

3.7. Duvar Karakteristiğinin Ölçülmesi

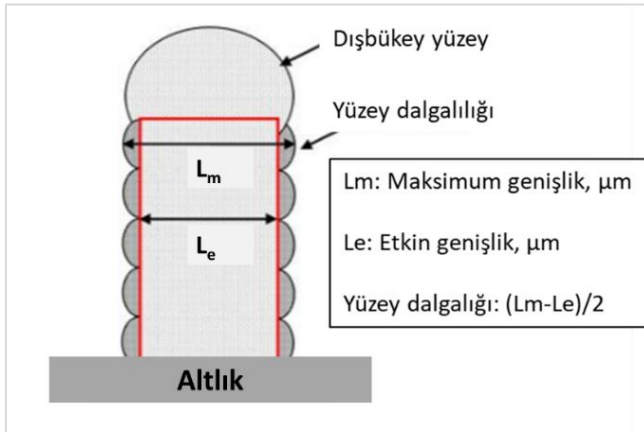
Üretilen DITD, YITD, PYBD ve OYBD duvarlar üzerinden kesitler çıkarılmadan önce Balteau marka tahribatsız muayene cihazı ile radyografik muayeneye tabi tutulmuştur. Daha sonra duvar numunelerinin ortalarından alınan kesitlerin mikro yapıları ve sertlikleri

incelenmiştir. Resim 3.9a-d arasında sırasıyla düşük ve yüksek ısı girdili tek dikiş duvar, paralel ve osilasyon yığma yollu bitişik dikiş duvarların kesitleri görülmektedir.



Resim 3.9. Duvarların orta bölge kesitleri a) DITD b) YITD c) PYBD d) OYBD

Duvar kesitlerinin orta bölgelerinden stereo mikroskop altında 3,35 büyütme ile alınan görüntülerde duvar genişliklerinin en büyük ve en küçük değerleri ölçülmüştür. En küçük değer literatürde etkin duvar genişliği olarak adlandırılmaktadır [68]. Bu değerler ile yüzey dalgalılığı (ing. surface waviness) hesaplanmıştır (Şekil 3.5). Yüzey dalgalılığı yığılan malzemenin ne kadar etkin kullanıldığı ile ilgili çıktı sağlamaktadır. Etkin genişlik alanı dışında kalan alanlar işlenerek atılmaktadır.

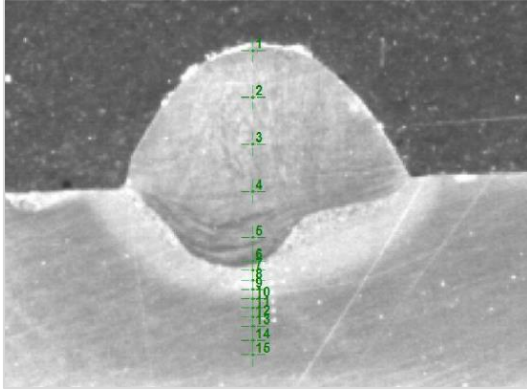


Şekil 3.5. Yüzey dalgalığının şematik görünümü [68]

3.8. Mikro Sertlik ve Mikro Yapı Analizi

On sekiz adet dikiş kesiti üzerindeki sertlik noktaları EK-1c’de görülen Emcotest Vickers mikro sertlik cihazının kamerası ve yazılımı aracılığı ile Resim 3.10’daki gibi işaretlenerek

ölçülmüştür. Ölçümlerde ortalama 25 mm/sn hızla 1 kg kuvvetinde yük uygulanmıştır. Ölçüm noktaları arası mesafe aşağıdan başlayarak ısıdan etkilenen bölgede daha sık olarak 200 μm ve kaynak metalinde 1 mm olarak belirlenmiştir. Her kaynak dikişi için kaynak metalinden kaynak yüksekliği boyunca 6 adet ölçüm noktası alınmıştır. Duvarların ortalarından alınan kesitler üzerinde kaynak dikişleri ile benzer olarak ölçüm noktaları belirlenerek mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır (Bkz. Resim 3.9).

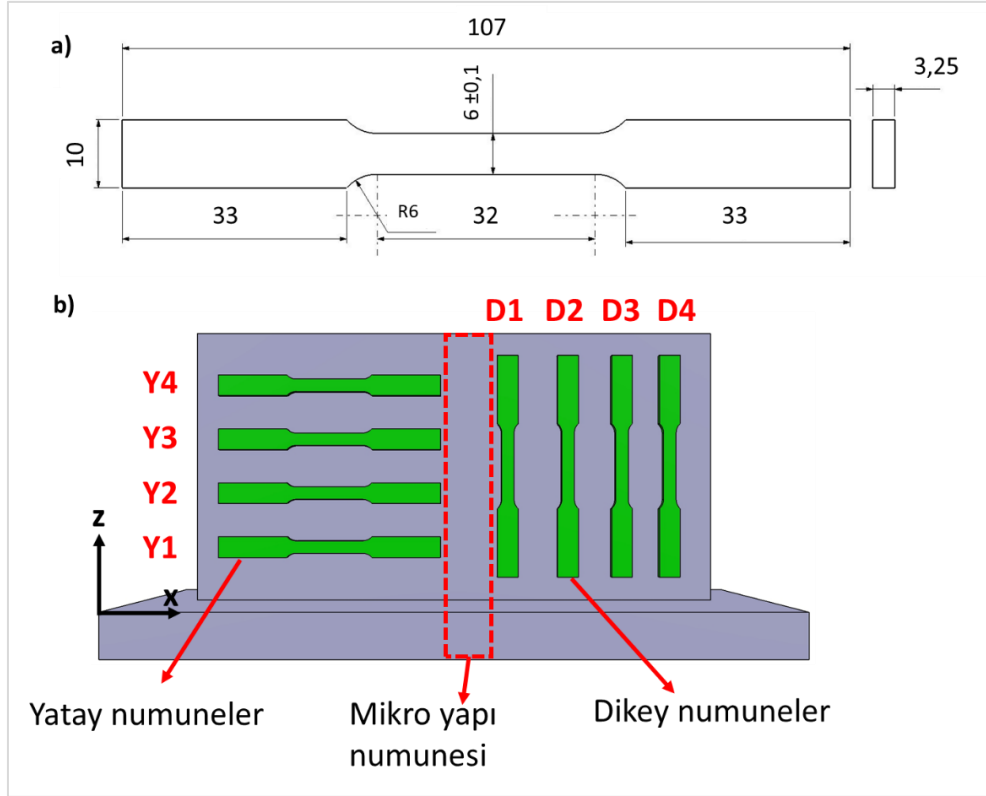


Resim 3.10. Dikiş mikro sertlik ölçüm noktaları

Sertlik analizi için kullanılan 18 adet kaynak dikiş kesiti ve 4 adet duvar kesiti bölüm 3.6'de anlatılan parlatma ve dağlama işlemleri yapılarak EK-1a'da gösterilen Nikon marka optik mikroskopta (OM) incelenmiştir. Optik mikroskopta 50, 100, 200 ve 500 büyütme ile kaynak dikişlerinin ısıdan etkilenen bölgeleri ve kaynak metali bölgeleri incelenmiştir. Numune hazırlama işlemine tabi tutulan ve Resim 3.9'da görülen duvar kesitlerinin de tabana yakın ve orta bölümlerinin mikro yapıları incelenmiştir. Duvar kesitlerinin detaylı mikro yapı incelemesi için Zeis marka Merlin alan yayılım başlıklı taramalı elektron mikroskopi (SEM, Ing. Scanning electron microscopy) kullanılmıştır.

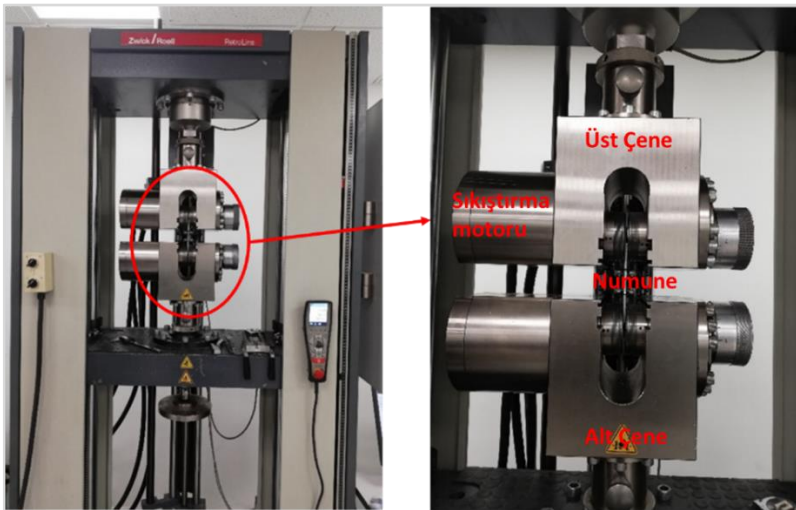
3.9. Çekme Testi

Düşük ve yüksek ısı girdili tek dikiş duvarlardan Şekil 3.6a'da ASTM E8/E8m standardına uygun ve gösterilen boyutlarda dört adet çekme numunesi Şekil 3.6b'deki gibi hem yatay (x eksen) hem de dikey (z eksen) yönünde çıkartılmıştır [69].



Şekil 3.6. Çekme testi numunelerinin a) boyutu b) konumları

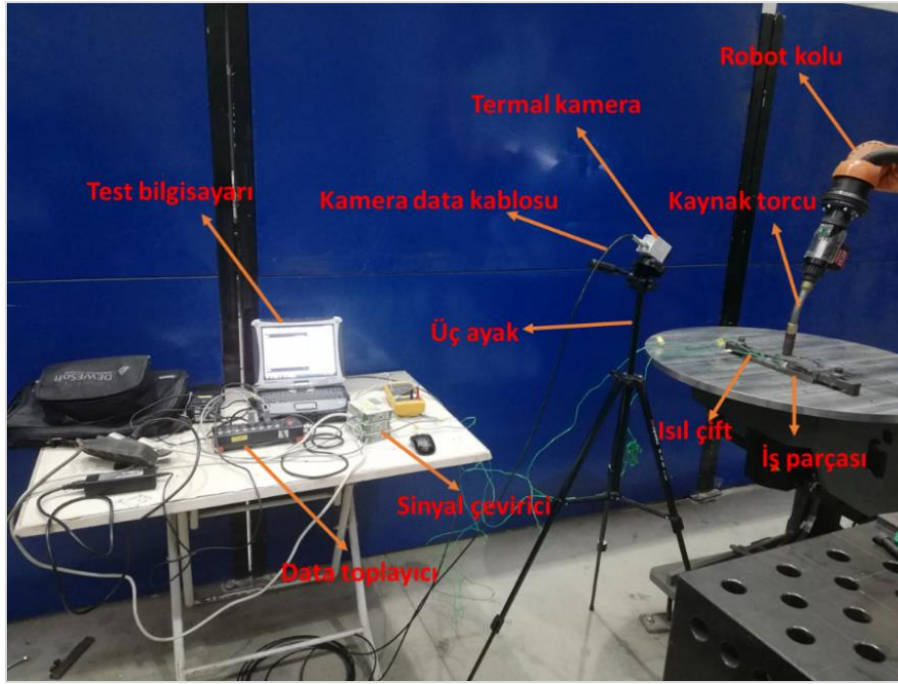
Hem düşük hem de yüksek ısı girdili duvardan çıkarılan numuneler Şekil 3.7’de görülen Zwick Z250 çekme test cihazı ile 0,0067 1/s hızı ile çekilerek akma, çekme dayanımları ve uzama değerleri ölçülmüştür. Bitişik dikiş duvarlardan OYBD duvardan yatay yönde çıkarılan numunelerin çekme testi aynı şekilde yapılmıştır.



Şekil 3.7. Numunenin çenelere yerleştirildiği çekme test cihazı

3.10. Isıl Ölçüm

WAAM ısı girdisinin yoğun olduğu bir proses olduğu için sıcaklık tespiti önem arz etmektedir. WAAM parçası üzerinde sıcaklığın zamana bağlı değişiminin tespiti için tez çalışması kapsamında Resim 3.11’de görülen deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneğinin ana elemanları, ısıl çift (İÇ), kızılötesi kamera, data toplayıcı ve test bilgisayarıdır.

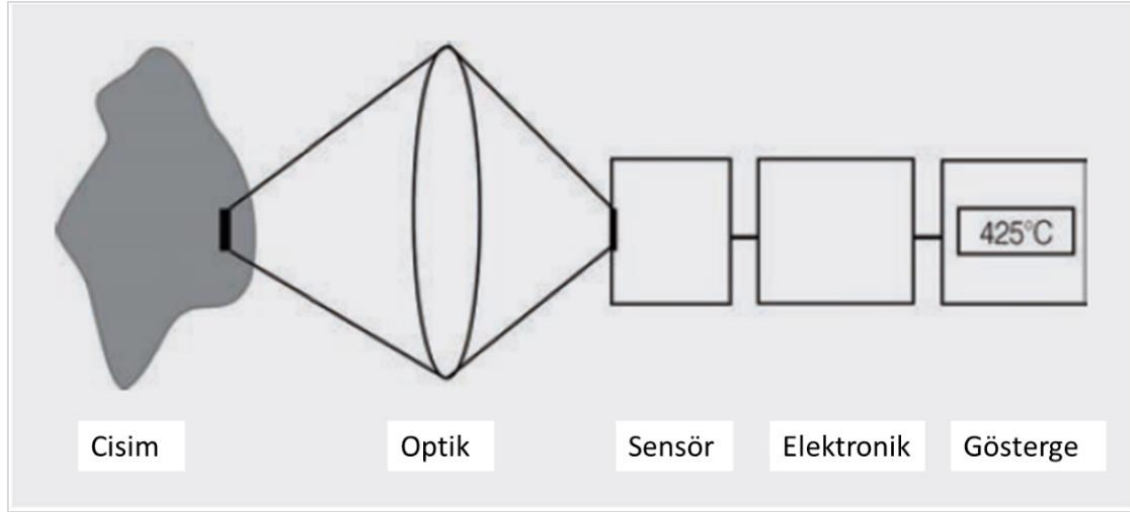


Resim 3.11. Isıl ölçüm için kullanılan deney düzeneği

3.10.1. Isıl çift ölçümü

Isıl çift sıcaklık ölçümü için yaygın olarak kullanılan sensör tiplerindendir. Isıl çiftin bu kadar yaygın olarak kullanılmasının sebepleri düşük maliyeti, değiştirilebilir olması, geniş ölçüm aralığı ve güvenilirliğidir. Isıl çiftlerin çalışma prensibi Seebeck etkisine dayanmaktadır. Seebeck etkisinde temas eden iki farklı metal sıcaklık değişiminde küçük bir voltaj farkı oluştururlar. Bu fark dışardan herhangi bir sinyal şartlandırıcı olmadan pasif olarak gerçekleşir. Bu farka Seebeck voltajı denir. İsmi 1821 yılında bu olayı keşfeden fizikçi Thomas Johann Seebeck’ten almıştır. Şekil 3.8’de şematik olarak gösterilen ısı çift kromel ve alumel metallere oluşmaktadır. İki metalin birleştiği noktadan sıcaklığı algılayan ısı çift, çevre sıcaklığını referans alarak oluşan farkı elektriksel olarak bir data toplayıcıya iletir [70].

elektromanyetik ışıma yaymaktadır. Parça sıcaklığına bağlı bu ışıma kullanılarak cismin sıcaklığı ölçülebilmektedir. Bu ışıma atmosfere nüfuz etmektedir. Şekil 3.9’da görüldüğü gibi lens yardımı ile bir sensörde toplanan ışınlar ışıma ile orantılı olarak elektriksel sinyal üretirler. Bu sinyal artırılır ve bir dizi ardışık sinyal işleme kullanılarak cisim sıcaklığı ile orantılı bir çıktıya dönüştürülür [71].



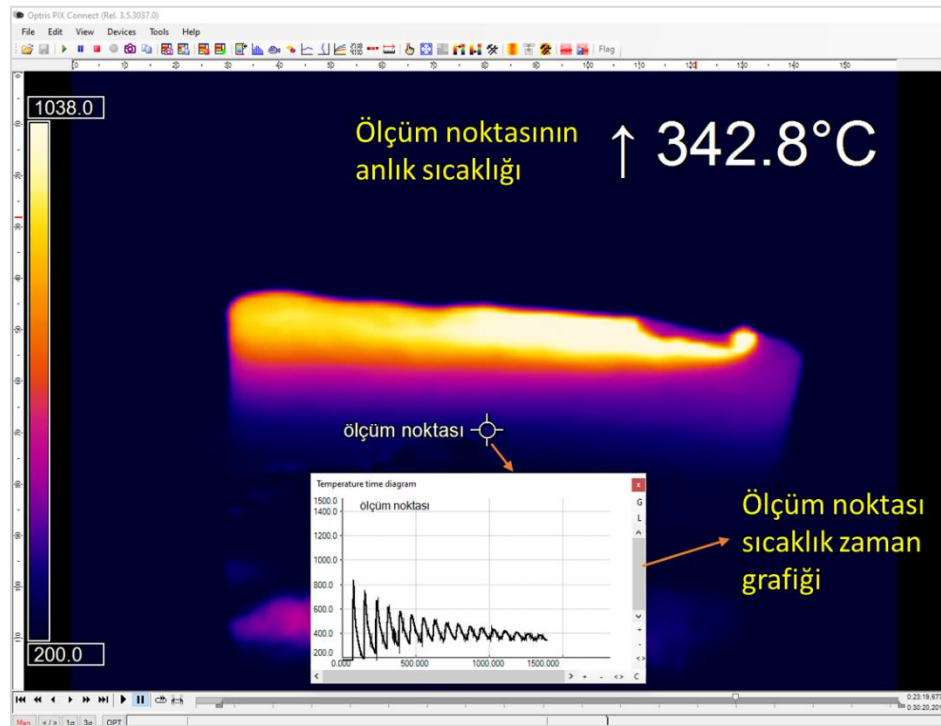
Şekil 3.9. Kızılötesi kamera çalışma prensibi [71]

Işınım miktarı ile sıcaklık arasındaki ilişki Stefan-Boltzmann yasası ile belirlenmektedir. Yasaya göre sensöre gelen elektrik sinyalinin büyüklüğü yayınlılık katsayısı ile orantılıdır. Bu durumda sıcaklığı ölçülen yüzeyin yayınlılık katsayısının (ϵ) doğru tespit edilmesi önem arz etmektedir. Yayınlılık katsayısı aynı sıcaklıktaki gri ve siyah cisim arasındaki ısı ışımanın oranını ölçer. 0 ile 1 arasında bir değerdir. 1 değeri maksimum ışıma sağlayan ideal siyah bir cisme aittir. Bütün dalga boylarında aynı yayınlılık katsayısına sahip gri cisimler için bu değer 1’den küçüktür. Metal gibi cisimlerde yayınlılık katsayısı hem sıcaklığa hem de dalga boyuna bağlıdır. Böyle cisimlere gri olmayan veya seçici cisimler denir. Bu sebeple tez çalışmasında kullanılan metal malzeme ve sıcaklık koşulları için yayınlılık katsayısı belirleme çalışması yapılmıştır [71]. Kullanılan Optris markasının PI 160 modeli olan kamera, 160 x 120 piksel çözünürlüğe, 7.5 – 13 μm dalga boyuna, 120 Hz çerçeve hızına, $\pm 2^\circ\text{C}$ hassasiyete ve 200 – 1500 $^\circ\text{C}$ sıcaklık ölçüm aralığına sahiptir (Çizelge 3.6).

Çizelge 3.6. Kızılötesi kamera özellikleri

Çözünürlük	160 x 120
Dalga Boyu	7.5 – 13 μm
Çerçeve Hızı	120 Hz
Hassasiyet	± 2 °C
Sıcaklık Ölçüm Aralığı	200 – 1500 °C

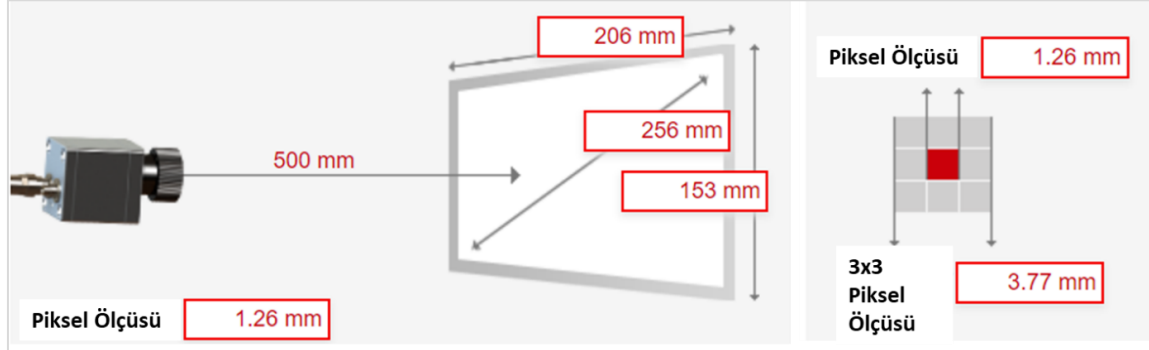
Kamera USB bağlantısı ile data toplayıcıya ihtiyaç duymadan bilgisayara doğrudan bağlanabilmektedir. Resim 3.13'te ara yüzü görülen kendi yazılımı sayesinde ölçüm bilgisayar üzerinden başlatılabilmekte ve kayıt alınabilmektedir. Bu kayıt içerisinde daha sonra sıcaklık dağılımları ve istenen noktaların sıcaklık zaman grafikleri okunabilmektedir.



Resim 3.13. Kızılötesi kamera yazılımı ara yüzü

Kamera ara yüzünde görüntü piksellere ayrılmış şekildedir. Her bir pikselin kenar ölçüsü ve kameranın görebildiği alanın ölçüleri kamera ölçüm mesafesine göre değişmektedir. Deneylerde kamera 500 mm uzaklığa yerleştirilmiştir. Kamera üreticisinin sağladığı yazılım vasıtası ile kamera modeli, lens bilgileri ve ölçüm mesafesi girildikten sonra bu değerler Şekil 3.10'daki gibi hesaplanmaktadır. 500 mm uzaklığa göre hesaplanan en küçük karenin kenar ölçüsü 1.26 mm'dir. Aynı uzaklıkta kamera 206 mm genişliğinde ve 153 mm

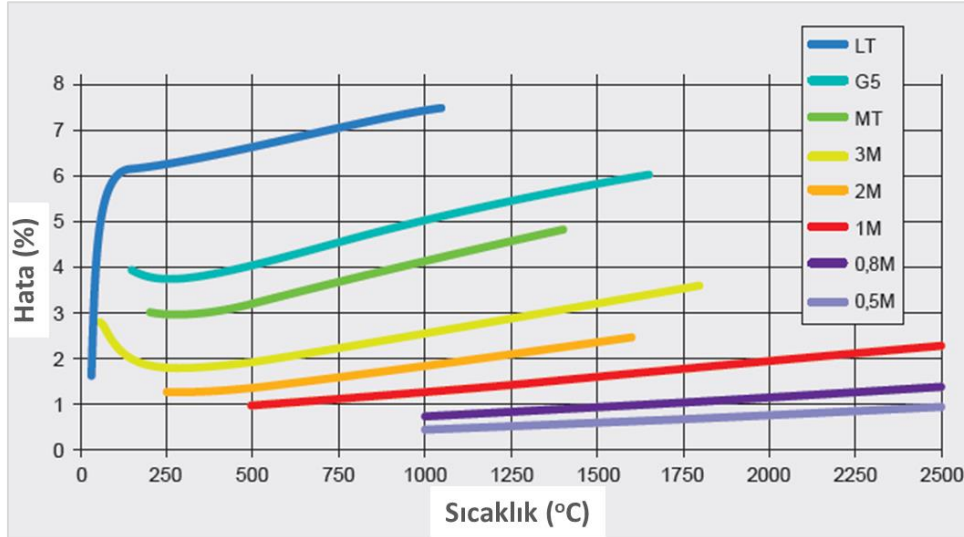
yüksekliğinde bir alanı ölçebilmektedir. Bu değerin bilinmesi ile kamera görüntüsü üzerinde belirli bir noktadan ne kadar uzaklaşıldığı tespit edilebilmektedir.



Şekil 3.10. Kamera ölçüm mesafesi, alanı ve piksel büyüklüğü [72]

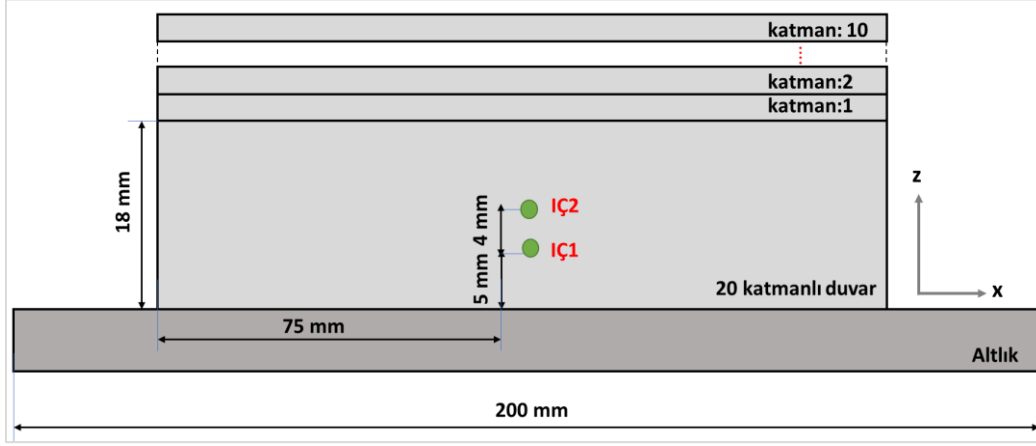
3.10.3. Kızılötesi kamera ölçümünün ısı çiftleri ile doğrulanması

Kamera ölçümünü etkileyen en önemli parametre kameranın yazılımı aracılığı ile kameraya girilen yayınlılık katsayısıdır. Deneyde kullanılan 7.5 – 13 μm dalga boyundaki kamera için yayınlılık katsayısının %10 hatalı belirlenmesinin ölçüme etkisi LT isimli eğri ile Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



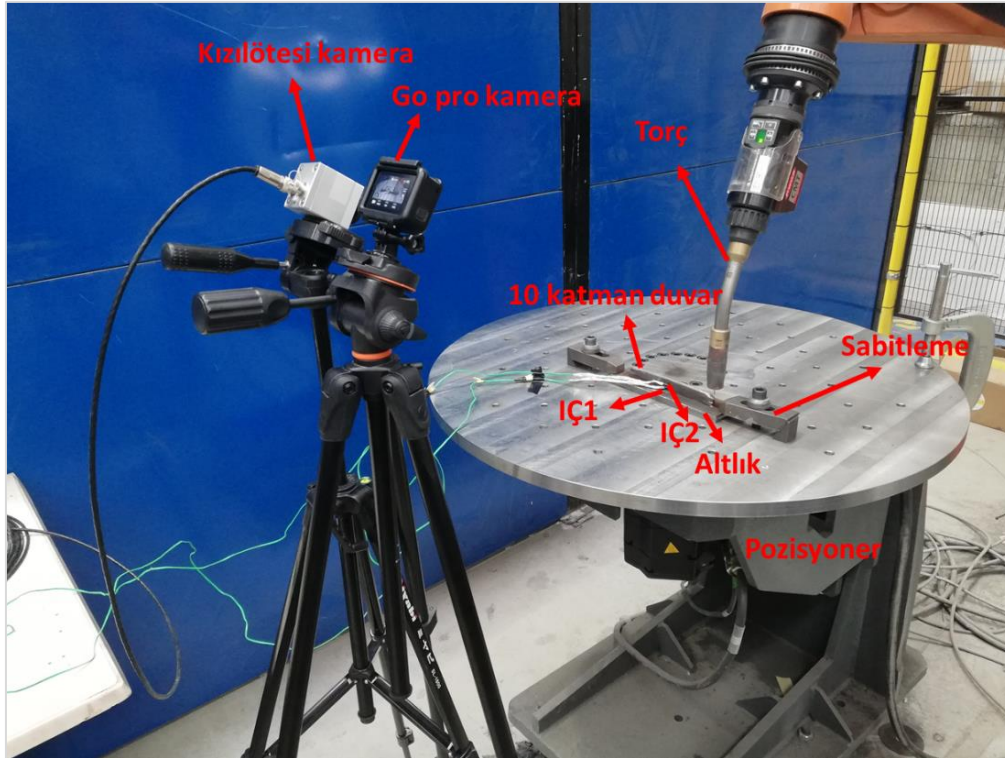
Şekil 3.11. Yayınlılık katsayısının %10 hatalı girilmesindeki ölçüm hatası (LT: 8 – 14 μm ; G5: 5 μm ; MT: 3.9 μm ; 3M: 2.3 μm ; 2M: 1.6 μm ; 1M: 1.0 μm ; 0.8M: 800 nm; 0.5M: 525 nm) [71]

Yayınırılık katsayısının doğru seçilebilmesi için daha önce yığılan bir duvar üzerinden İÇ ile ölçüm alınmıştır. Bunun için 2 adet İÇ, 20 katmanlı 18 mm yüksekliğinde bu duvarın üzerine Şekil 3.12’de görülen ölçülerde bağlanmıştır.



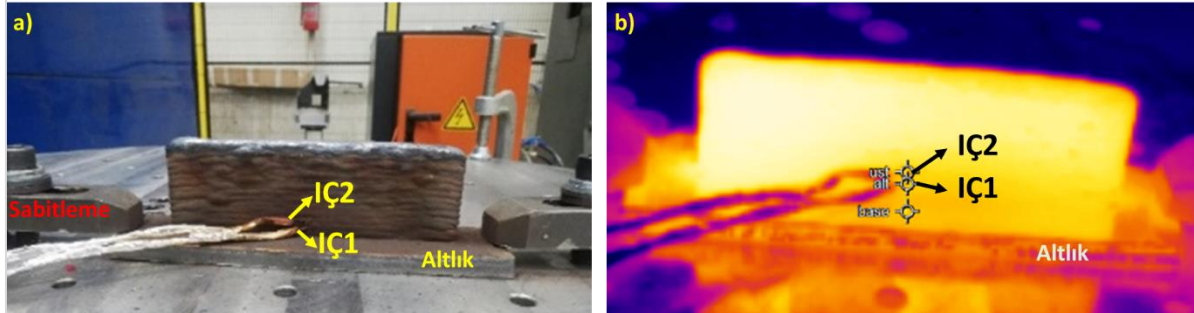
Şekil 3.12. İki adet ısıl çiftin önceden üretilmiş duvar üzerine yerleştirilmesi

Deney sırasında kızılötesi kamera Resim 3.14’te görüldüğü açı ile deney parçasında 50 cm uzaklıkta üç ayak üzerine yerleştirilmiştir.



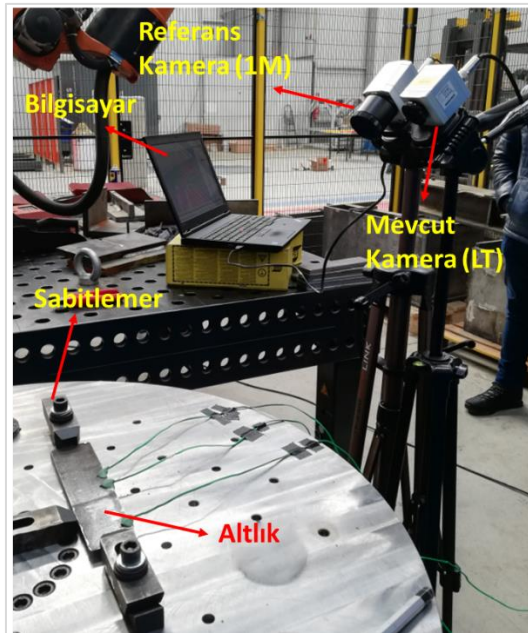
Resim 3.14. Kızılötesi kameranın ve ısıl çiftlerin konumu

Isıl çiftlerin parça üzerinde temas ettiği noktalar Resim 3.15'te görüldüğü gibi kamera yazılımı ile işaretlenerek karşılaştırılmıştır.



Resim 3.15. Duvar üzerine yerleştirilen IÇ'ler a) parça görüntüsü b) kamera görüntüsü

Metal yüzeylerin sıcaklığı için düşük dalga boyunda ölçüm yapabilen kızılötesi kameralar önerilmektedir. Bu yüzden ısı çiftle doğrulamaya ek olarak arkın hemen arkasındaki yüksek sıcaklıkta yayınlılık katsayısının belirlenebilmesi için dalga boyu $1\text{ }\mu\text{m}$ olan aynı marka bir kamera ile doğrulama çalışması yapılmıştır (Resim 3.16). Bu kamera ile deneylerin devamında kullanılacak kamera arasında hata payı farkı $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta %6 olmaktadır (Bkz. Şekil 3.11 1M eğrisi). Düşük dalga boyuna sahip kameranın $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ sonrası hata payı %1 civarındadır. Deneyde mevcut kamera ve düşük dalga boylu referans kamera ile 10 katlı duvarın yığılması sırasında ölçüm alınmıştır.



Resim 3.16. Farklı dalga boylarında iki kızılötesi kamera ile ölçüm

3.11. Isıl Modelleme ve Doğrulama

Bilgisayarların gelişmesi ile, kaynak ve eklemeli imalat proseslerinin analizi için üç boyutlu süreksiz ısı mekanik modellerden faydalanılması yaygın hale gelmiştir. Hassas sonlu eleman (SE) modelleri gerçek deneylerin tamamlayıcısı olarak ısı mekanik bilginin alınması ve deneylerden alınması zor veya imkânsız bilgilerin toplanması için kullanılabilmektedir.

3.11.1. Modelleme stratejisi

Bu bölümde, bir WAAM parçasının 3 boyutlu süreksiz ısı SE modeli geliştirilmiş ve deneylerle doğrulanmıştır. Bu model tez çalışmasında yapılan diğer modellere referans teşkil etmektedir. Modellerde kullanılan malzemeler kaynak teli için ER120S-G düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çelik ve altlık için S355 düşük karbonlu yapı çeliğidir. Tez çalışmasındaki bütün modellemeler ticari LS Dyna SE kodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SE çözümleri 4 çekirdek işlemcili ve 32 GB geçici hafızası olan bir iş istasyonunda yapılmıştır.

WAAM prosesi parçadaki ısı transferi problemini çözmek amacı ile makro seviyede modellenmiştir. Problemi basitleştirmek adına kaynak banyosundaki ısı ve kütle transferi ihmal edilmiştir. Bu eklemeli imalat modellemelerinde sıklıkla başvurulanan bir yaklaşımdır [37, 73]. Problem katı bir cisim içerisinde ısı yayılımının kısmi diferansiyel denklemi olarak Eş. 3.4'teki gibi tanımlanmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q(x, y, z, t) = \rho c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.4)$$

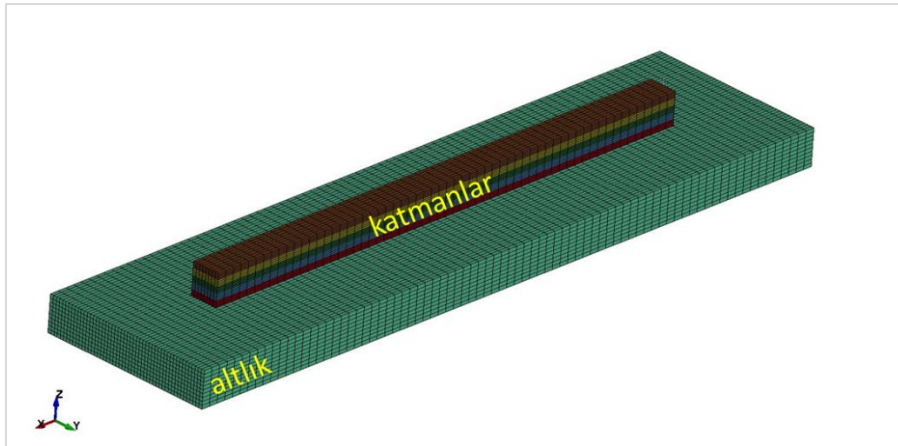
Denklemde T zamana ve pozisyona bağlı (x, y, z) bilinmeyen sıcaklıktır; k(T) sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik katsayısı (W/m.K⁻¹); c_p(T) sıcaklığa bağlı öz ısı kapasitesi (J/kg.K⁻¹); ρ kütle yoğunluğu (kg/m³); ve q(x, y, z, t) kaynak prosesindeki ısı kaynağını temsil eden üretilen ısı terimidir (W/m³). Bu terim yığılma takım yoluna bağlı olarak hem zamanın hem de uzaysal koordinatların fonksiyonudur. Eş. 3.4'ün sınır ve başlangıç koşulları Eş. 3.5'teki gösterilmektedir [37].

$$\begin{cases} -k(T) \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Omega, t} = h(T - T_{\infty}) \\ -k(T) \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Omega, t} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\infty}^4) \\ T|_{x,y,z} = T_0 \end{cases} \quad (3.5)$$

Eş. 3.5'teki ilk bağıntı Newton'un soğuma kanunu tarafından tanımlanan taşınım sınır koşulunu temsil etmektedir. Bu eşitlikte h ısı transfer katsayısı, T_{∞} parçanın uzağındaki hava sıcaklığı, $\vec{n}$ ısı transfer yüzeyinin (Ω) normal vektörüdür. İkinci bağıntı Stefan-Boltzman kanunu tarafından tanımlanan çevreye olan ışıma sınır koşulunu temsil etmektedir. Eşitlikteki σ ise Stefan Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) sabiti ve ε yayınlılık katsayısıdır. Üçüncü bağıntı başlangıç şartı olarak parçanın ilk andaki sıcaklığını temsil etmektedir (T_0).

3.11.2. Sonlu eleman ağı

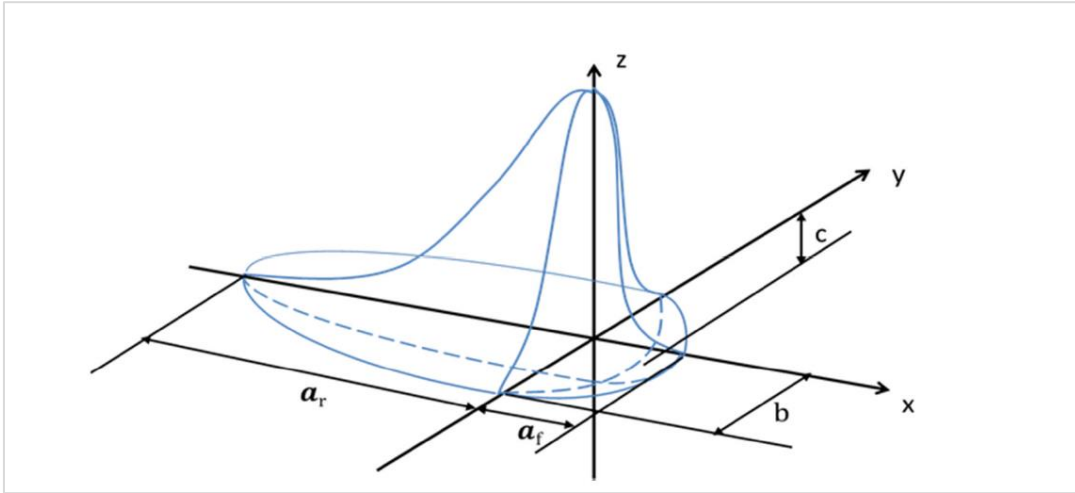
SE ağındaki elemanların sayısı ve boyutu modelin doğruluğunu ve çözüm süresini önemli ölçüde etkileyebilir. Küçük boyutlu elemanlar daha hassas sonuçlar vermektedir. Nitekim küçük boyutlu elemanlar uzun çözüm süreleri ve büyük veri depolama ihtiyacına neden olmaktadır. Bu yüzden dengeli bir ağ yapısı stratejisi kullanılarak hem ihtiyaç olan hassaslıkta sonuçlar alınabilmeli hem de model de daha az eleman kullanılabilmelidir [25]. Doğrulama modelinde $200 \times 50 \times 10$ mm ölçülerde bir altlık ve üzerinde $150 \times 8 \times 2$ mm ölçülerinde 5 katman kaynak dikişi geometrisi sonlu elemanlarına ayrılmıştır. Bu elemanların ve düğüm noktalarının sayısı sırasıyla 49601 ve 56423'tür. Analizlerde 1-2 mm arasında kenar uzunlukları olan altı yüzlü katı elemanlar kullanılmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. 5 katmanlı doğrulama modeli geometrisi ve sonlu elemanlar ağı

3.11.3. Isı kaynağı modeli ve parametreler

Modeldeki ısı kaynağı kaynak prosesindeki ısı girdisini iş parçasına iletir. WAAM prosesinde elektrik arkı, tel ve kaynak banyosu arasında farklı boyut ve zaman aralıklarında karmaşık ilişkiler vardır. Bu yüzden modelin çözüm zamanını kısaltmak için bir ısı modeli kullanılır [74]. Ark kaynak proses modellemeleri için kullanılan en yaygın ısı modeli Goldak ve arkadaşları tarafından geliştirilen çift elipsoid ısı modelidir (Şekil 3.14) [75]. Goldak ısı modelinde ısı girdisi, birim hacim başına içeride üretilen (W/m^3) ve bir koordinat sistemi içerisinde yığma yolu boyunca hareket eden Gauss dağılımına sahip ısı enerjisidir. Bu dağılımın sebebi ısı kaynağının önündeki sıcaklık değişim hızı kaynak banyosunun takip eden kısımdan daha diktir. Bölgedeki güç yoğunluğu ark merkezinin önü ve arkası şeklinde ayrı olarak tanımlanabilmektedir [25].



Şekil 3.14. Goldak çift elipsoid ısı modeli [24,75]

Arkın ön kısmındaki güç yoğunluğu dağılımı Eş. 3.6'daki gibi ifade edilir [25].

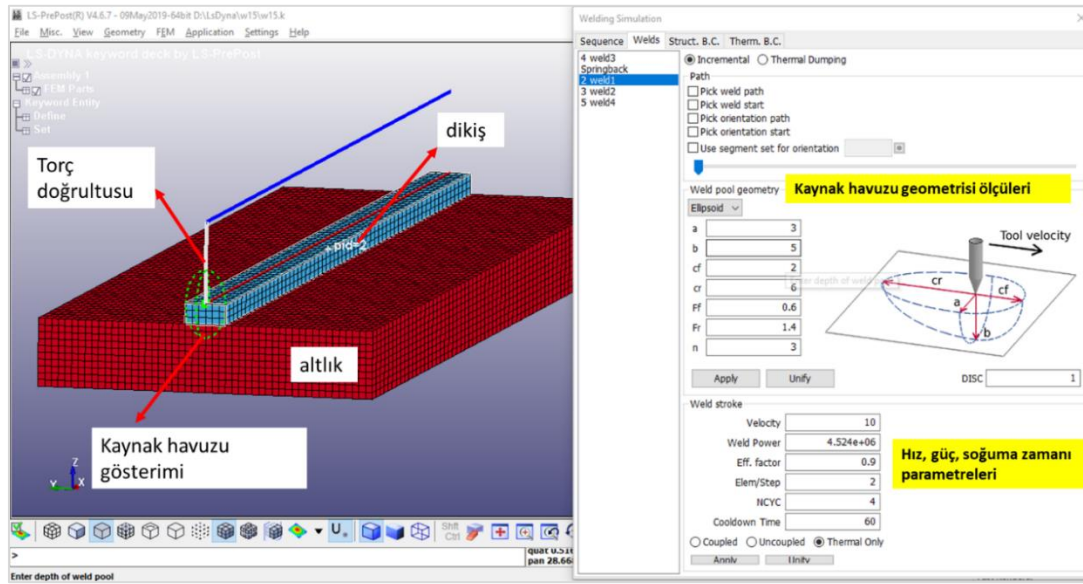
$$q_f = \frac{6\sqrt{3}Qf_f}{\pi\sqrt{\pi}a_fbc} e^{\left[-3\left(\frac{x^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right]} \quad (3.6)$$

Arkın arka kısmındaki güç yoğunluğu dağılımı Eş. 3.7'deki gibidir [25].

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

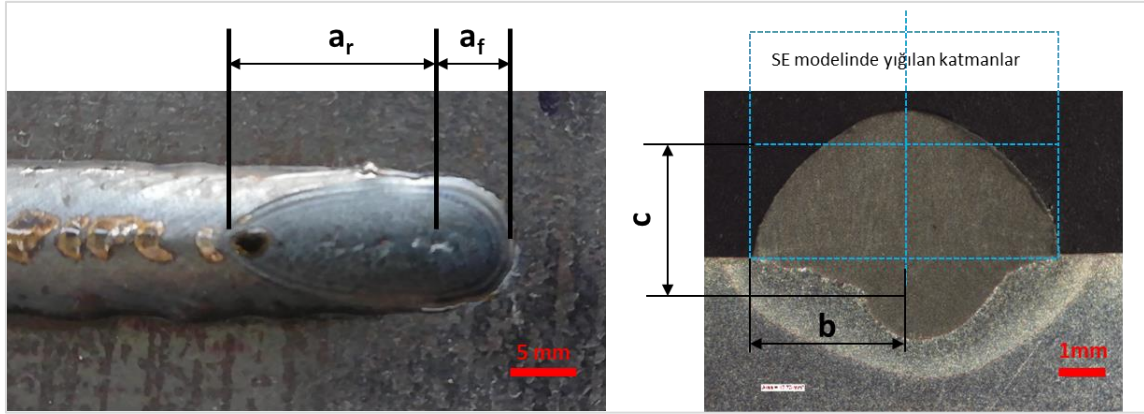
a_f ve a_r elipsoidin sırasıyla ön ve arka uzunluklarıdır; b ısı kaynağının genişliği; c ısı kaynağının derinliği; Q verim faktörü dahil edilmiş güç girişidir; f_f ve f_r gücün ısı kaynağının önüne ve arkasına dağıtım faktörleridir ve aralarında $f_f + f_r = 2$ şeklinde bir ilişki vardır. Goldak'ın çift elipsoit modeli parametreler ayarlanarak farklı kaynak proseslerine uyum sağlayabilir. Kaynak havuzu ölçü ve şeklinin tanımlayan parametreler olan a , b , c genellikle Resim 3.18'deki gibi kaynak metalografik numune kesitinden ve kaynak havuzunun üzerindeki izlerden tahmin edilmektedir [76]. Tüm parametreler içerisinde ısı girdisi sıcaklık dağılımında en önemli role sahiptir [77]. Isı kaynağının geometrik parametreleri ise ergime ve ısıdan etkilenen bölge sınırlarını etkiler [78].

LS Dyna'da kaynak analiz modelinin hazırlanmasını kolaylaştıran Resim 3.17'deki gibi bir ara yüz kullanılarak torçun doğrultusu, kaynak yönü, kaynak havuzu parametreleri, kaynak hızı, kaynak gücü, verim, çözüm adımı ve soğuma süresi bilgileri modele girilmiştir. Bu ara yüz, girilen parametre bilgilerini yazılımın kullandığı ilgili kartların içerisine yazmaktadır.



Resim 3.17. LS Dyna kaynak dikiş parametre ara yüzü

Dikiş genişlik, yükseklik ve nüfuziyeti belirleyen kaynak havuzu ölçüleri önceki bölümde üretilen tek katman dikişlerinin boyutsal ölçümlerinden elde edilmiştir (Resim 3.18). Kaynak havuzu ve katman ölçüleri model hazırlama aşamasında ısı girdisi miktarına göre belirlenmiştir. Belirlenen bu ölçülerin analiz boyunca yeni katmanların eklenmesi ve ısı birikmesi ile değişmediği varsayılmıştır.



Resim 3.18. Goldak ısı modeli parametrelerinin belirlenmesi

Modelde kullanılan kaynak havuzu ölçüleri, güç, verim, güç oranı, hız ve soğuma süresi parametreleri birimleri ile birlikte Çizelge 3.7’de özetlenmiştir. f_f ve f_r değerleri için sırası ile Goldak tarafından önerilen sabit 0,6 ve 1,4 oranlar kullanılmıştır [75].

Çizelge 3.7. Isı modeli parametreleri

Kaynak Havuzu Ölçüleri				Güç	Verim	Güç Oranı (Ön)	Güç Oranı (Arka)	Hız	Soğuma Süresi
a_f	a_r	b	c	Q	η	f_f	f_r	V	t
mm	mm	mm	mm	W	0,9	0,6	1,4	mm/sn	sn

3.11.4. Malzeme modeli

Malzemenin modellenmesi kaynak prosesinin modellenenbilmesinde büyük önem taşımaktadır. Artan modelleme teknikleri ve bilgisayarların yetenekleri ile kaynak prosesi için malzeme modellemesinde büyük bir gelişme yaşanmıştır [25, 79].

Kaynak prosesinin ısı analizi için genellikle sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik ve ısı sığası değerleri kullanılmaktadır. Gizli ısı dışında faz dönüşümleri ısıl modellerde ihmal edilmektedir. Gizli ısının ergime ısını modelerken belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bu bir değer olarak SE koduna girilebilir ya da sıvı ısı sığası değeri dışarıdan değiştirilebilir. Kaynak havuzunda sıvı akışının etkisini dikkate almak için ergime noktasının üzerindeki sıcaklıklar için yüksek ısıl iletkenlik katsayısı kasıtlı olarak artırılır [25, 80, 81].

LS Dyna SE elemanlar yazılımında kaynak analizi için tanımlanmış olan MAT CWM isimli malzeme modeli içerisine S355JR altlık ve ER120S-G kaynak teli malzemelerinin sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri eklenmiştir. Bu özellikler JMat Pro yazılımında malzemelerin kimyasal kompozisyonları girilerek eğri şeklinde elde edilmiştir. Isıl ve mekanik analiz için iki ayrı malzeme kartı tanımlanmaktadır. Isıl kartın içerisinde malzemeye özgü, sıcaklığa bağlı ısı sığası ve ısıl iletkenlik katsayıları eğri şeklinde tanımlanmıştır (Resim 3.19). Katman dikişlerinin malzeme özelliklerinin ergime noktası sıcaklığında aktif hale gelmesi amacı ile ergime sıcaklık aralığı malzeme kartına tanımlanmıştır.

Resim 3.19. Ls Dyna ısı malzeme kartı

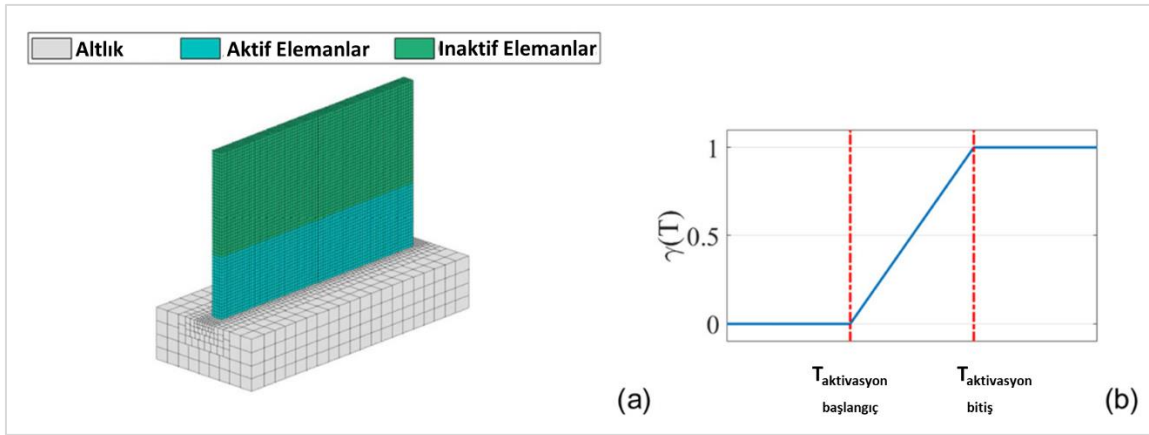
3.11.5. Malzeme yığma modeli

Her eklemeli imalat prosesinde üretilen parça sürekli devam eden bir malzeme eklenmesi ile üretilmektedir. Bu yığma prosesi çeşitli teknikler kullanılarak modellenmektedir. Bu tez çalışmasında kaynak analiz literatüründe tanımlanan ve aktif olmayan element stratejisine dayanan bir teknik kullanılmıştır [37, 82, 83]. Bu teknikte WAAM parçasını oluşturan tüm elemanlar analizin başından beri modelde bulunmaktadır (Şekil 3.15). Malzeme eklenmesi malzemenin ısıl iletkenlik katsayısının sürekli güncellenmesi ile modellenir. Analizi başında kaynak katmanlarını temsil eden elemanlara çok küçük bir ısıl iletkenlik katsayısı atanır. Daha sonra bu katsayı sıcaklığın belli bir aralığı aşması ile gerçek değerine yükseltilir. Bu yöntem ile düşük ısıl iletkenliğe sahip aktif olmayan elemanların aktif elemanlar ile ısı transferine izin verilmez. Sonuç olarak analizin başından beri modelde

bulunan ama henüz yığma sırası gelmemiş katmanlar daha önce yığılan alttaki katmanları ve altlığın ısıl davranışını etkileyemez. Ek olarak inaktif elemanların sıcaklığı ısı kaynağı tarafından doğrudan ısıtıldığı zaman belirgin bir şekilde artmaktadır. Bu da aktivasyon sırasını gerçek yığma prosesi ile tutarlı hale getirmektedir. Yukarıda bahsedilen bu teknik, SE çözücüsü içerisinde malzeme ısıl iletkenliğini tanımlamak için Eş. 3.8 ile yerleştirilmiştir.

$$k(T(\tau)) = \gamma(T_{maks})k_{akt}(T(\tau)) + (1 - \gamma(T_{maks}))k_{inakt} \quad (3.8)$$

Eşitlikte k , analizin τ zamanındaki sıcaklığın fonksiyonu olan ısıl iletkenlik katsayısı; k_{akt} ve k_{inakt} ısıl iletkenlik katsayısının aktif ve inaktif değerleri; γ elemanın maksimum sıcaklıktaki aktivasyon değişkenidir. Bu değişkenin değişim eğrisi Şekil 3.15b’de görülmektedir. SE analizinde yakınsama problemlerini engellemek için aktivasyon bir sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Eleman sıcaklığı birleşme noktalarında hesaplandıkça Eş. 3.8’deki formül her zaman adımında tekrar hesaplanmaktadır. γ , elemanın tüm birleşme noktalarında 1’e eşit olduğunda elemanın aktivasyonu tamamlanmaktadır.



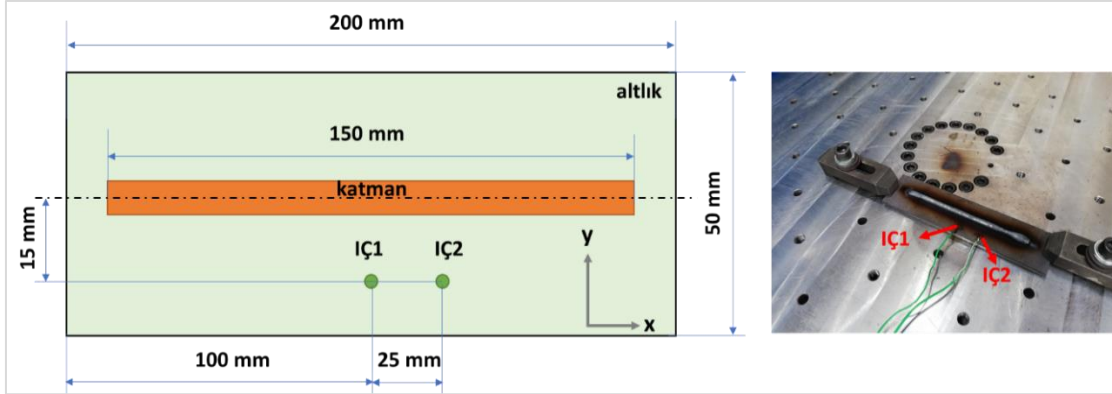
Şekil 3.15. Malzeme yığma modeli, a) Numune parça üzerindeki aktif ve inaktif elemanlar b) eleman aktivasyon fonksiyonu [37]

3.11.6. Model sınır koşulları

Işıma ve taşınım ile ısı kaybı kaynak prosesindeki ana ısıl sınır koşullarıdır. Bu yüzden prosesin ısıl modeli içerisinde dikkate alınmalıdırlar. Isı girdisine kıyasla, taşınım ve ışımanın etkisi ikinci planda kalmaktadır. Çalışmalarda genellikle sabit film taşınım katsayısı kullanılmıştır ve bu değer yaklaşık $5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ’dir [84, 85]. Ark kaynak prosesinde

3.11.7. Isıl modelin doğrulanması

Isıl modelin doğrulanması amacı ile iki adet ısı çifti (İÇ) 200x50x10 mm ölçüsündeki altlık yüzeyine Şekil 3.16’da gösterilen ölçülerde bağlanmıştır. İÇ1 altlığın ortasına, İÇ2 ise İÇ1’in 25 mm yanına bağlanmıştır. Her iki ısı çiftte kaynak merkezinden 15 mm uzaklıktadır.



Şekil 3.16. İki adet ısı çiftin altlık yüzeyine yerleştirilmesi

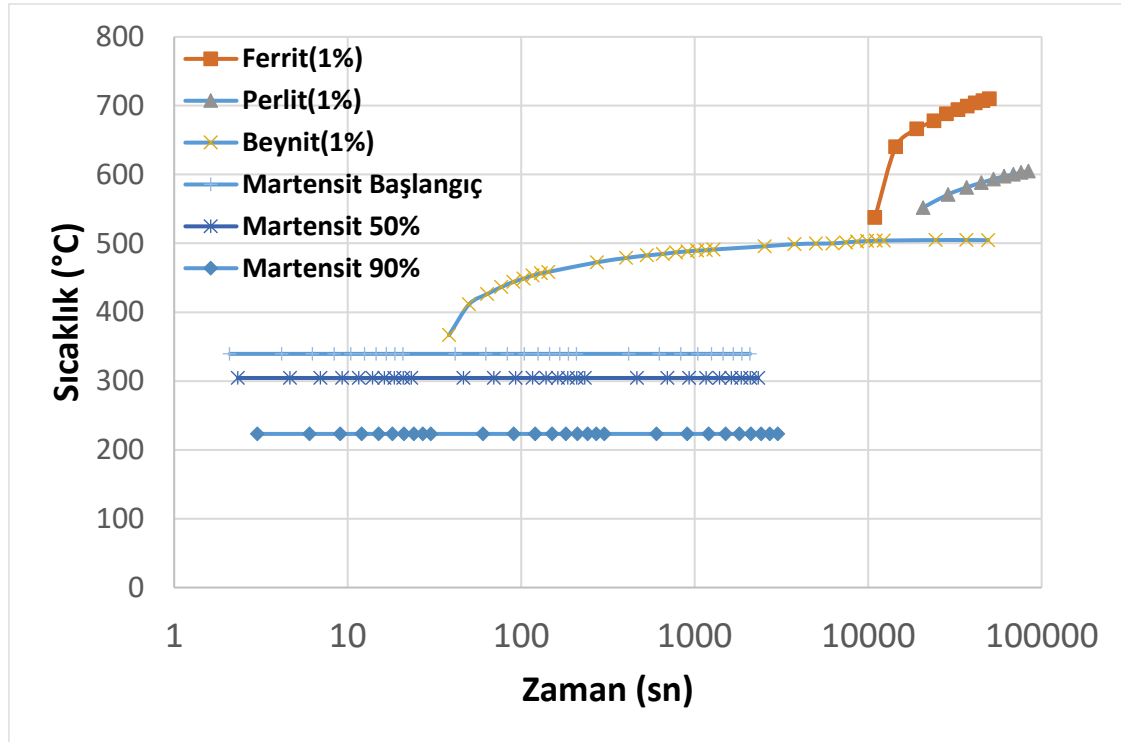
Isı modelinin doğrulanması için altlık üzerine yerleştirilen ısı çiftten alınan zamana bağlı sıcaklık ölçümü ile ısı modeli çözümü sonrası aynı koordinata tekabül eden düğüm noktasından alınan sıcaklık zaman grafiği karşılaştırılmıştır. Modelde kullanılan kaynak havuzu ölçüleri, güç, ilerleme hızı, katmanlar arası soğuma süresi, ısı sınır şartları Çizelge 3.9’da özetlenmiştir. Altlık ile masa arasındaki ısı iletimi katsayısı modeli basitleştirmek için masa modellenmeyerek hava ile eş değer taşınım katsayısı olarak modellenmiştir. Bu değer daha sonra ölçüm sıcaklık zaman eğrileri kıyaslanırken değişken olarak tutulmuş ve daha sonra belirlenmiştir.

Çizelge 3.9. Doğrulama modeli parametreleri

Kaynak Havuzu				Güç	Hız	Soğuma	Isıl Sınır Şartları				
Ölçüleri (mm)				(W)	(mm/sn)	Süresi (sn)					
a _f	a _r	b	c	Q	V	t	h	ε	h _e	T _∞	T ₀
							(Wm ⁻² K ⁻¹)	-	(Wm ⁻² K ⁻¹)	(°C)	(°C)
5	15	4	2	4500	10	60	5	0,84	-	19	22

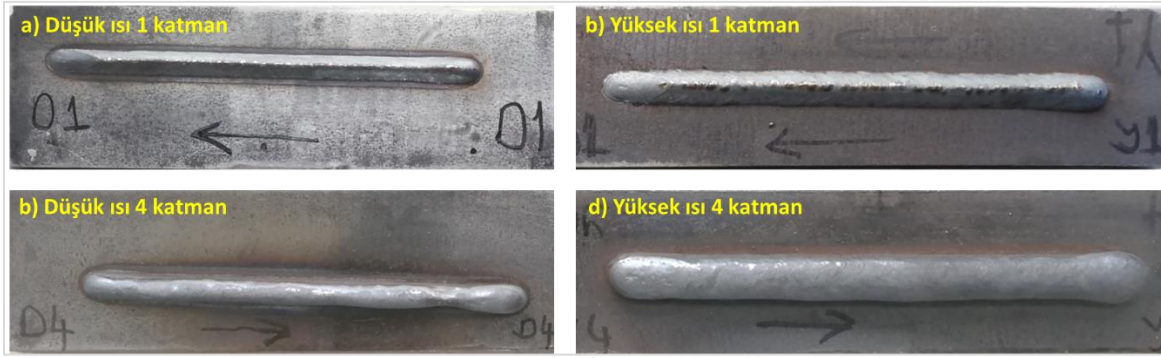
3.11.8. Soğuma hızı ile mikro yapı tahmini

Soğuma hızının malzemenin mikro yapısının oluşmasında belirleyici olduğu bilinmektedir. Sıcaklık ölçümü ve ısıl modelden elde edilen sıcaklık zaman grafikleri ile soğuma hızının tespiti mümkün olmaktadır. Soğuma hızı kullanılarak sürekli soğuma dönüşüm diyagramı (SSD) ile yapıda oluşan fazlar tahmin edilebilmektedir. Bu tahmin ile proses parametreleri değiştirilerek mikro yapının kontrolü sağlanabilmektedir. JMat Pro yazılımına çalışmada kullanılan kaynak telinin kompozisyonunun girilmesiyle bu malzeme için SSD diyagramı elde edilmiştir (Şekil 3.17). JMat Pro hesaplamalı malzeme mühendisliği alanında kullanılan bir simülasyon yazılımıdır. Bu bilgiler ışığında modelden elde edilen sıcaklık profilleri içerisindeki soğuma eğrilerinin mikro yapı tahmininde kullanılabileceği düşünülmüştür.



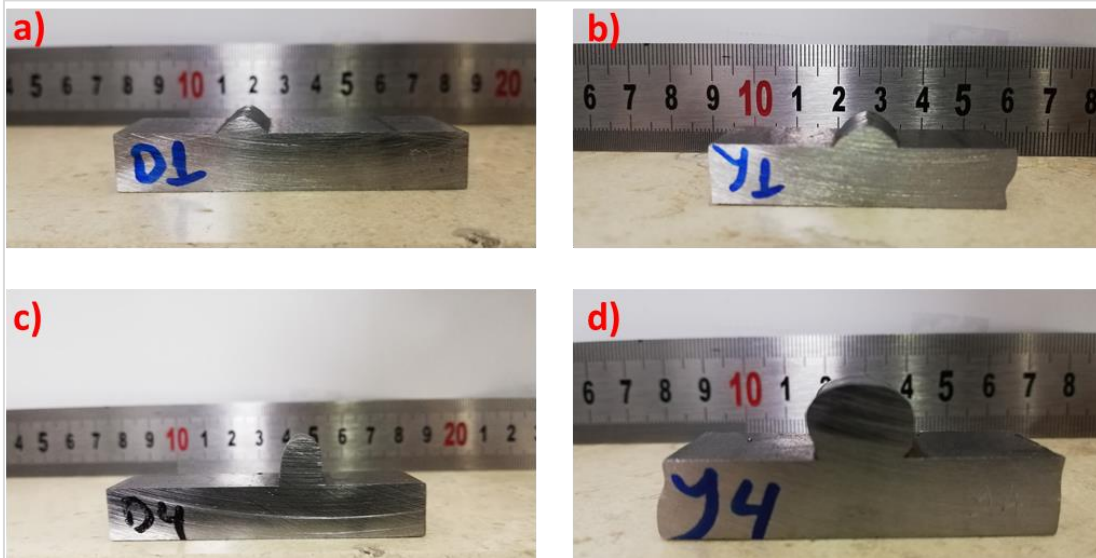
Şekil 3.17. Kaynak teli kompozisyonu ile elde edilen SSD diyagramı

Kimyasal kompozisyonla elde edilen SSD diyagramının sonuçlarını doğrulamak amacı ile tek dikiş bir ve dört katmanlı düşük ve yüksek ısı girdili 150 mm uzunluğunda duvar numuneleri üretilmiştir (Resim 3.21a-d).



Resim 3.21. Duvar numuneleri; tek katman a) düşük, b) yüksek ısı; dört katman c) düşük, d) yüksek ısı

Üretilen duvarların ortasından alınan kesitlerin (Resim 3.22a-d) mikro yapıları optik mikroskop ile incelenmiştir. Mikro yapılar içerisinde görülen fazlar, SSD diyagramına yerleştirilen soğuma hızları ile belirlenen faz yapıları ile karşılaştırılarak doğrulama çalışması yapılmıştır.



Resim 3.22. Tek katman a) düşük (D1), b) yüksek ısı (Y1); dört katman c) düşük (D4), d)yüksek ısı (Y4)

4. GEOMETRİK, MEKANİK ve MİKROYAPI ÖZELLİKLERİ ANALİZLERİ

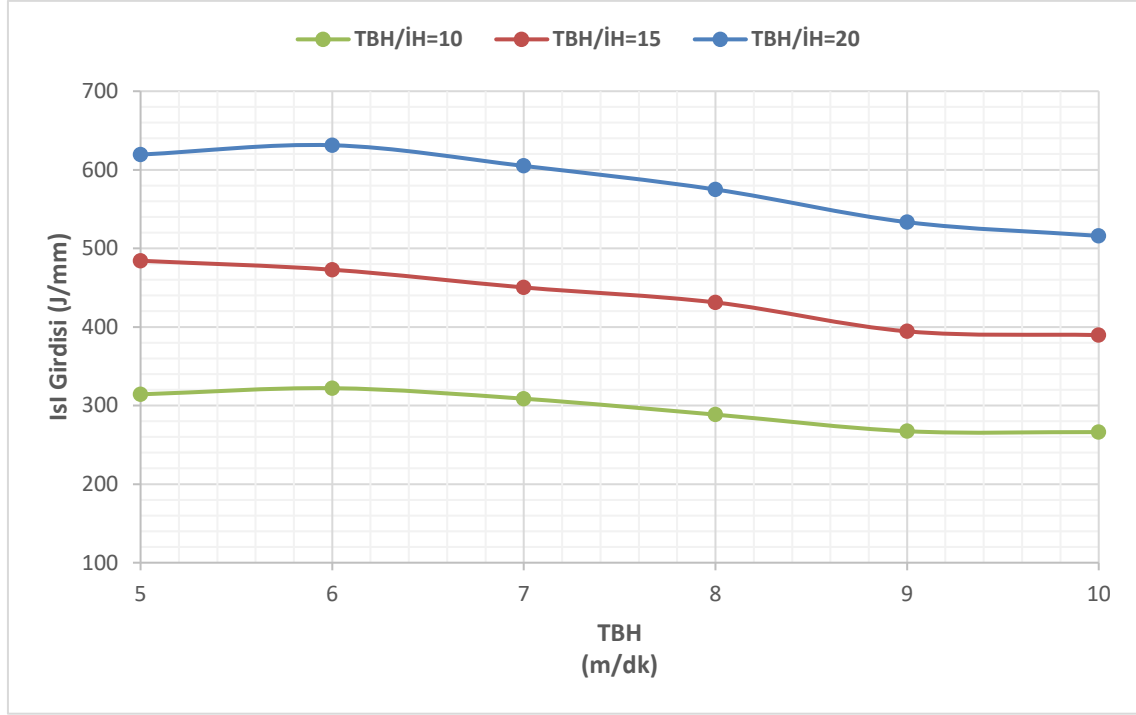
Tez çalışmasının bu bölümünde TBH ve TBH/İH parametre setleri ile üretilen on sekiz adet kaynak dikişi (Bkz. Çizelge 3.4) ve dört adet duvarın (Bkz. Çizelge 3.5) geometrik özelliklerinin ölçüm sonuçları verilmiş ve parametreler ile olan ilişkileri incelenmiştir. Geometrik özelliklerin incelemesinden sonra seçilen parametre setleri ile üretilen duvar geometrileri üzerinden çıkarılan numuneler kullanılarak WAAM parçalarının mekanik ve mikro yapı özellikleri karşılaştırılmıştır.

4.1. Geometrik Özelliklerin Analizi

Bu bölümde geometrik özelliklerden dikiş genişliği, yüksekliği, nüfuziyet derinliği, nüfuziyet ve tepe alanının parametreler ve ısı girdisi ile değişimi incelenmiştir (Bkz. Resim 3.8). Ayrıca seçilen dikiş parametreleri ile üretilen duvarların etkin duvar genişliği ve yüzey dalgalılığı incelenmiştir. Bölüm sonunda Minitab istatistik yazılımı yardımı ile çoklu regresyon analizi yapılmıştır.

4.1.1. Tel besleme hızı ile tel besleme hızının ilerleme hızına oranının ısı girdisine etkisi

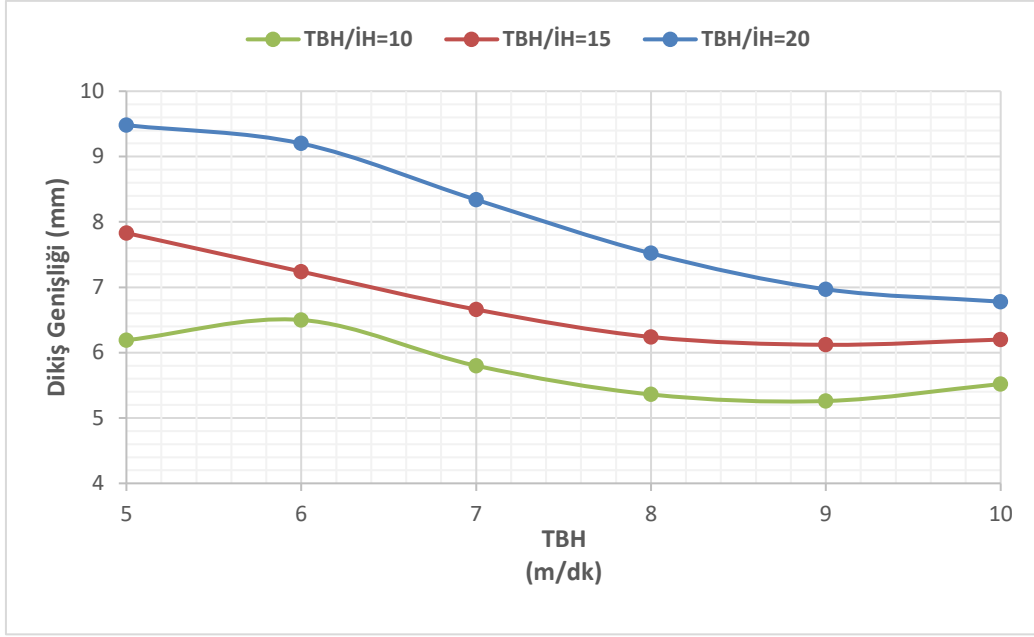
Farklı TBH ve TBH/İH oranları ile üretilen on sekiz adet dikişe verilen ısı girdileri Eş. 3.1 ile hesaplanmıştır. Hesaplanan ısı girdilerinin TBH ve TBH/İH oranı ile değişimi Şekil 4.1’de görülmektedir. GMAK prosesinde ısı girdisi akımın ilerleme hızına oranı ile değişmektedir. Akım ise tel besleme hızı ile orantılı olarak değişmektedir. Bu duruma göre TBH/İH oranının ısı girdisini kontrol edebileceği görülmektedir. TBH/İH oranının 10, 15 ve 20 olduğu durumda ısı girdilerinin ortalaması sırasıyla 294, 437 ve 580 J/mm olmaktadır (Şekil 4.1). Aynı TBH/İH değerlerinde ısı girdisinin TBH’nin artması ile ortalama %17 azaldığı görülmüştür. Bu değişikliğin sebebi CMT prosesinde ayarlanan TBH değerinin ark boyunu sabit tutmak için kaynak makinesi tarafından değiştirilmesidir [62].



Şekil 4.1. Isı girdisinin TBH ve TBH/İH ile değişimi

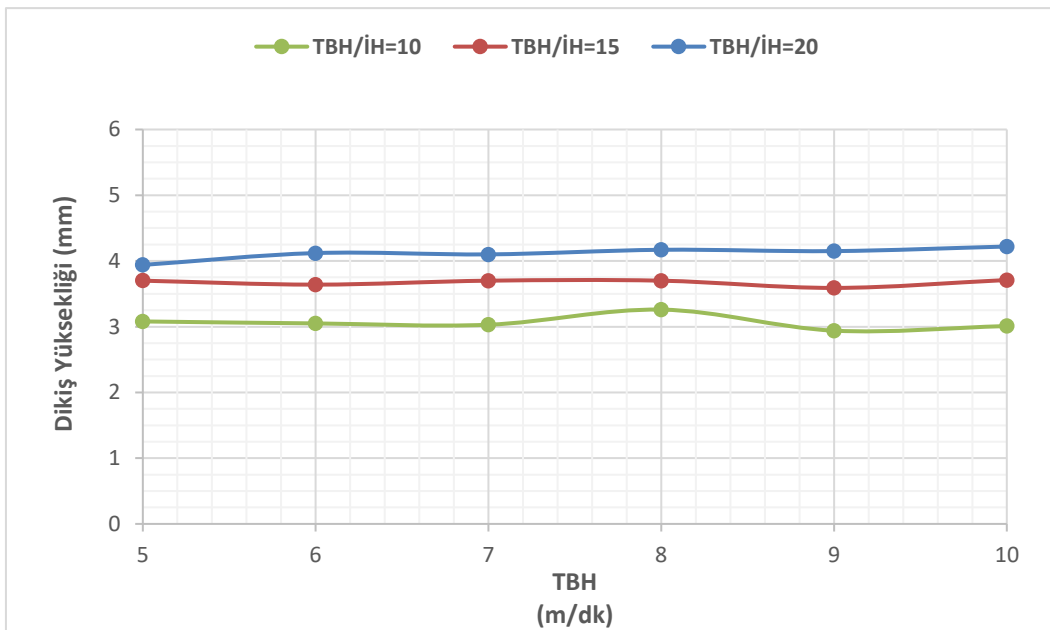
4.1.2. Tel besleme hızı ile tel besleme hızının ilerleme hızına oranının dikiş genişliği ve yüksekliğine etkisi

Dikiş genişliğinin TBH ve TBH/İH oranı ile değişimi Şekil 4.2’de görülmektedir. Dikiş genişliklerinin değişim eğiliminin Şekil 4.1’de görülen ısı girdisi değişim eğilimi ile benzer olduğu görülmektedir. Bunun sebebi Eş. 3.3’te formülü verilen yığılan malzeme hacminin de TBH/İH oranı ile orantılı olarak değişmesidir. Birim kesitte verilen ısı girdisi arttıkça ergiyen malzeme miktarı artmaktadır. Bu ise dikiş kesit alanını arttırmaktadır. Dolayısıyla dikiş genişliği TBH/İH oranı ile kontrol edilebilmektedir.



Şekil 4.2. Dikiş genişliğinin TBH ve TBH/İH ile değişimi

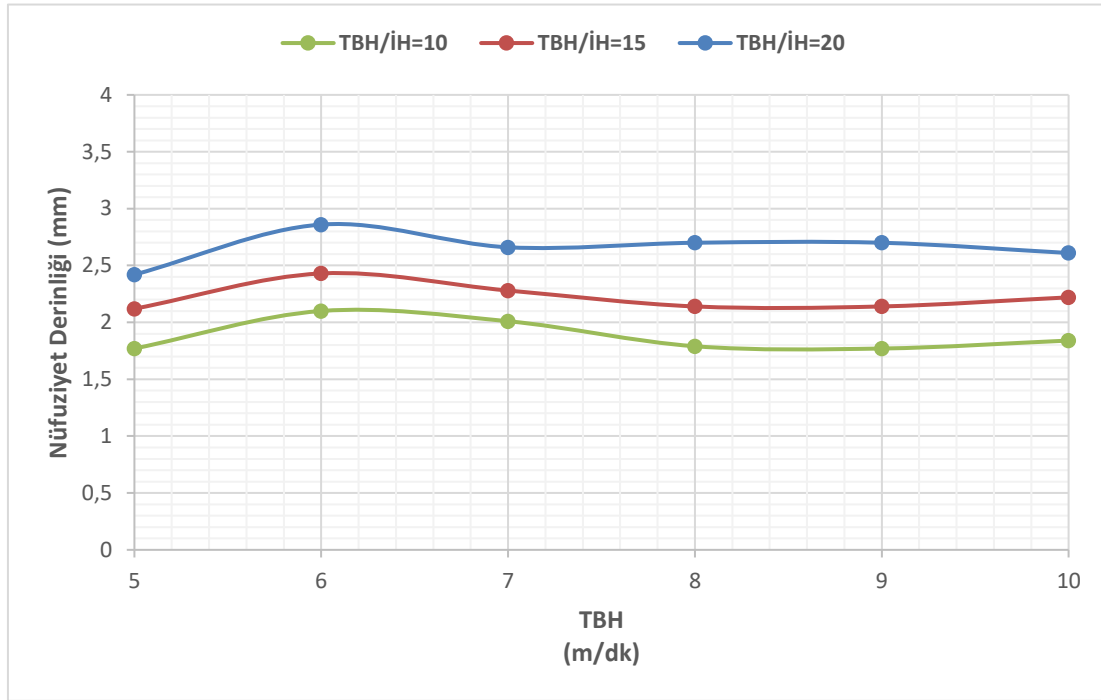
Dikiş yüksekliğinin TBH ve TBH/İH oranı ile değişimi Şekil 4.3'te görülmektedir. TBH/İH oranının artması ile dikiş yüksekliğinde artış görülmektedir. Bunun sebebi TBH/İH oranı ile ısı girdisi ve birim kesitteki yığılan malzeme hacminin artmasıdır. Dikiş genişliği ile kıyaslandığında dikiş yüksekliğinin ısı girdisinden daha az etkilendiği görülmektedir. Bunun sebebi artan sıcaklıkla ergiyik akışkanlığının artması ve dikiş genişliğinin yüksekliğe kıyasla daha fazla artmasıdır.



Şekil 4.3. Dikiş yüksekliğinin TBH ve TBH/İH ile değişimi

4.1.3. Tel besleme hızı ile tel besleme hızının ilerleme hızına oranının nüfuziyet derinliğine etkisi

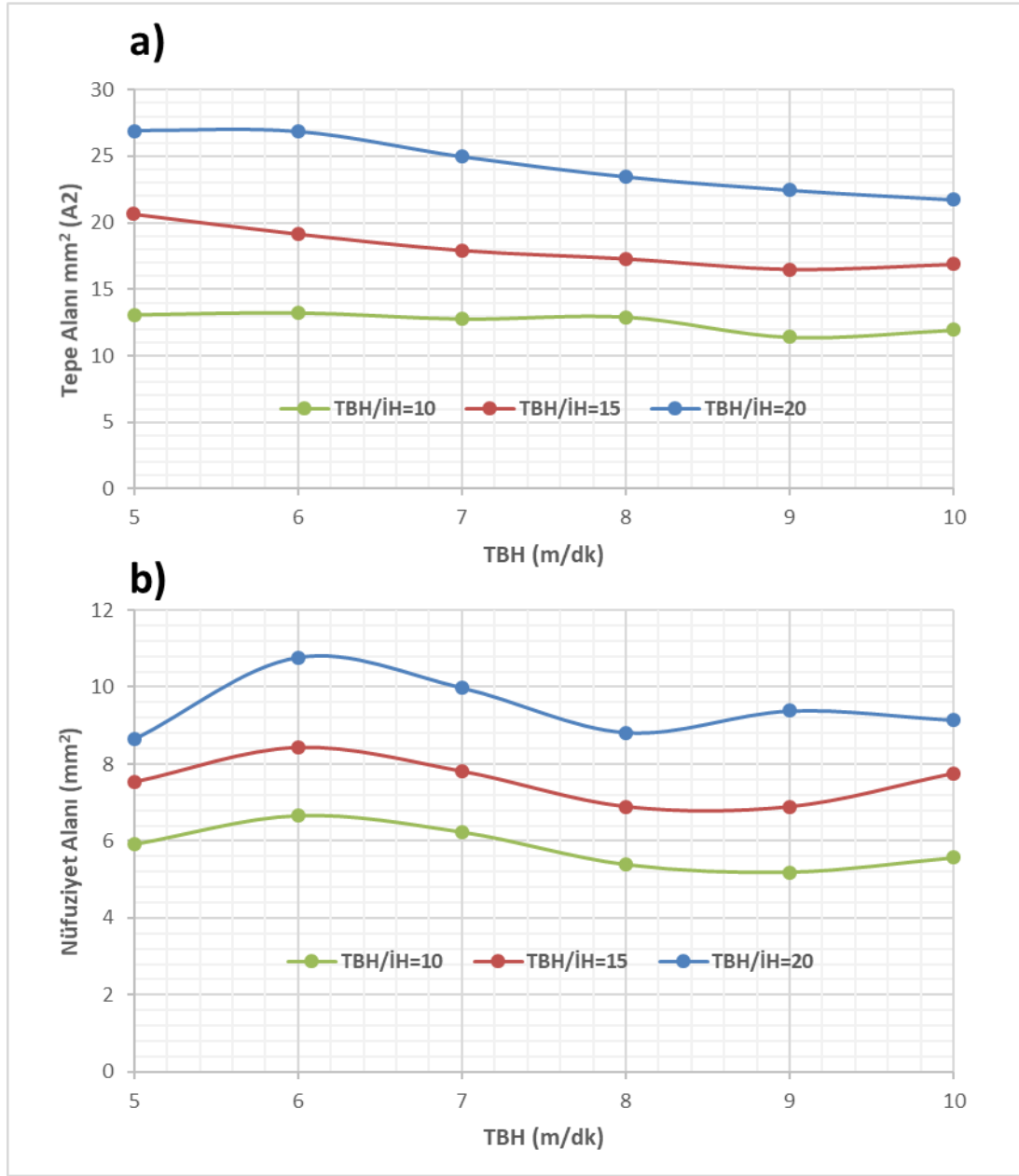
Şekil 4.4'te görüldüğü gibi nüfuziyet derinliği aynı TBH/İH oranında TBH ile önemli bir değişim göstermemektedir. Bunun anlamı ısı girdisi sabit tutulduğunda nüfuziyette sabit tutulabilmektedir. Nitekim TBH/İH oranının artması ile nüfuziyet artmaktadır. Bunun sebebi artan ısı girdisinin etkisi ile alt yüzeye nüfuz eden birim zamandaki malzeme miktarının artmasıdır.



Şekil 4.4. Nüfuziyet derinliğinin TBH ve TBH/İH ile değişimi

4.1.4. Tel besleme hızı ile tel besleme hızının ilerleme hızına oranının tepe ve nüfuziyet alanına etkisi

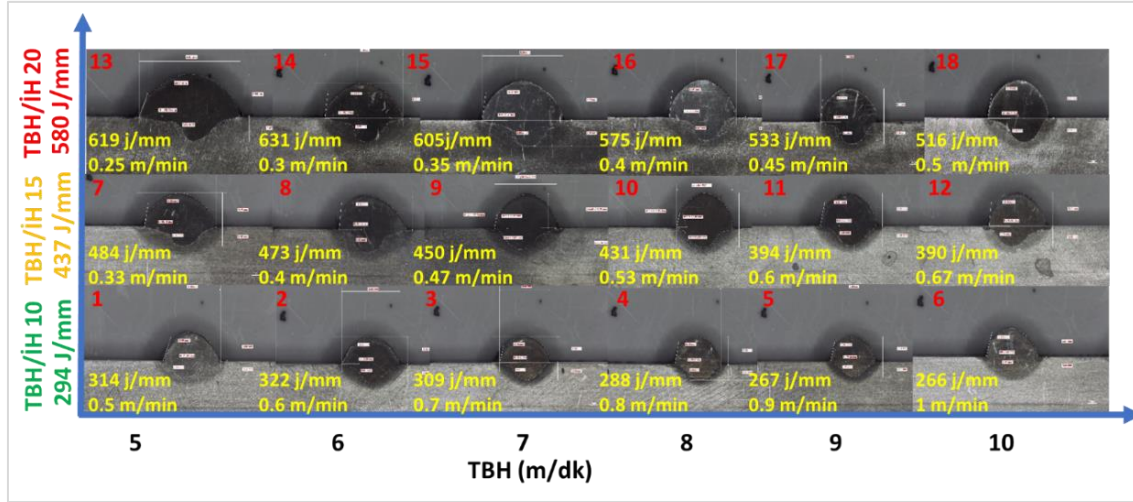
Dikiş tepe ve nüfuziyet alanının TBH ve TBH/İH oranı ile değişimi sırasıyla Şekil 4.5a ve b'de görülmektedir. Her iki alanın değişiminin ısı girdisi değişimi ile benzer eğilim gösterdiği görülmektedir (Bkz. Şekil 4.1). Bunun sebebi ısı girdisi arttıkça birim kesitte ergiyen malzeme miktarının artmasıdır. Artan ergiyen malzeme miktarı hem tepe hem de nüfuziyet alanını arttırmaktadır.



Şekil 4.5. Dikiş a) tepe, b) nüfuziyet alanının TBH ve TBH/İH ile değişimi

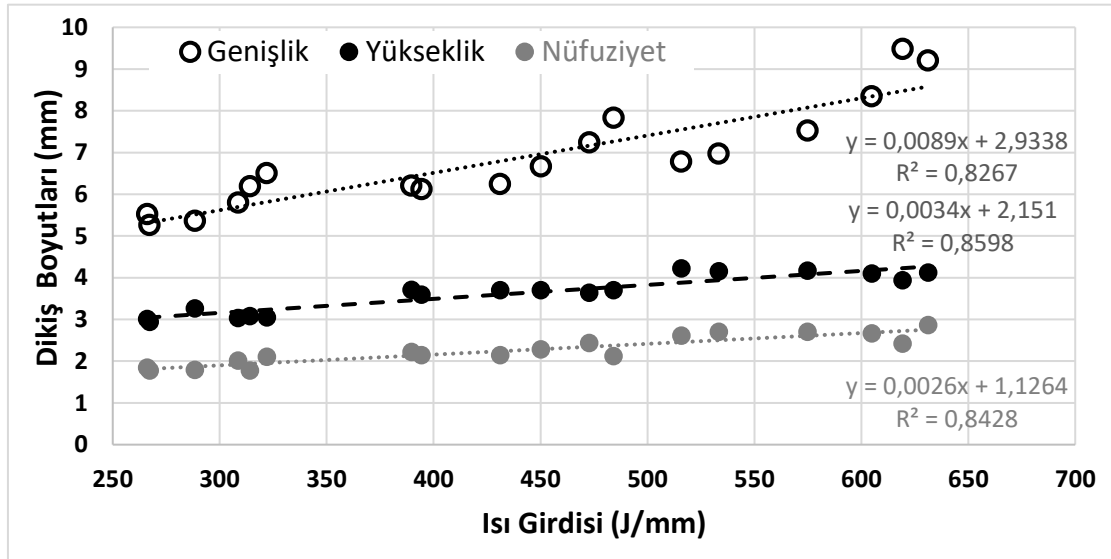
4.1.5. Kaynak dikiş boyutlarının tahmin edilmesi

Dikiş ölçüm sonuçlarında dikiş boyutlarının ısı girdisi ile değiştiği ve ısı girdisinin de TBH/İH ile orantılı olarak değiştiği ortaya konmuştu. Bu boyut değişimi Resim 4.1'deki dikiş kesit fotoğraflarında görülmektedir. Resim üzerinde her dikişe verilen ısı girdisi ve ilerleme hızı görülmektedir. X ekseninde TBH değerleri ve y ekseninde TBH/İH oranı ortalama ısı girdisi ile birlikte verilmiştir.



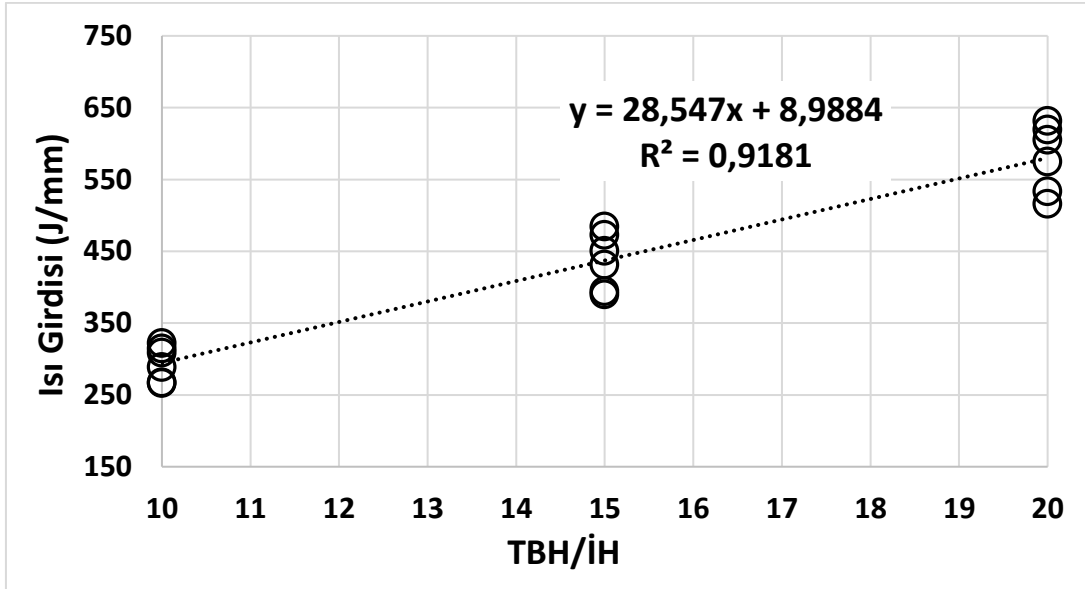
Resim 4.1. Üç farklı TBH/İH oranı (10,15,20) ve altı farklı TBH (5,6,7,8,9,10) oranı ile üretilen tek katman dikiş kesit fotoğrafları

Dikiş genişliği, yüksekliği ve nüfuziyet derinliği WAAM prosesinde geometriyi etkileyen en önemli çıktı parametreleridir. Bu parametrelerin kullanılan proses parametreleri sonucunda tahmin edilmesi proses planlama ve kontrolü için gereklidir. Şekil 4.6’de bu dikiş boyutlarının ısı girdisi ile doğrusal olarak değiştiği ve uyumluluk değerinin (R^2) 0,8’in üzerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6. Dikiş boyutlarının ısı girdisi ile değişimi

TBH/İH ile ortalama ısı girdileri arasında da doğrusal bir ilişki vardır (Şekil 4.7). Uyumluluk değeri 0,9’un üzerindedir. Sonuç olarak TBH/İH parametresi ile ısı girdisi ve dikiş geometrisinin kontrol edilebileceği anlaşılmıştır.



Şekil 4.7. Isı girdisinin TBH/İH ile değişimi

On sekiz tek katman dikiş ölçüm sonuçları ile Minitab istatistik yazılımı kullanılarak çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Girdi parametreleri olarak TBH ve TBH/İH, çıktı parametreleri olarak dikiş genişlik, yükseklik ve nüfuziyet derinliği kullanılmıştır. Girdi ve çıktı parametreleri arasında istatistiksel anlamlı bir fark olup olmadığını anlamakta kullanılan p değeri her üç çıktı parametresi için 0,01'den küçüktür. Bu değer girdi ve çıktı parametreleri arasında istatistiksel anlamlı bir fark olduğunu göstermiştir. Çıktı parametrelerinin değişiminin hangi oranda regresyon modeli ile açıklanabileceğini gösteren R^2 değerleri dikiş genişlik, yükseklik ve nüfuziyet için sırasıyla %96,84, %97,64 ve %86,57'dir. Analiz sonucunda oluşturulan regresyon model eşitlikleri dikiş genişlik, yükseklik ve nüfuziyet için sırasıyla Eş. 4.1, 4.2 ve 4.3'te verilmiştir. Eşitliklerdeki X1 ve X2 sırasıyla TBH ve TBH/İH değişkenleridir.

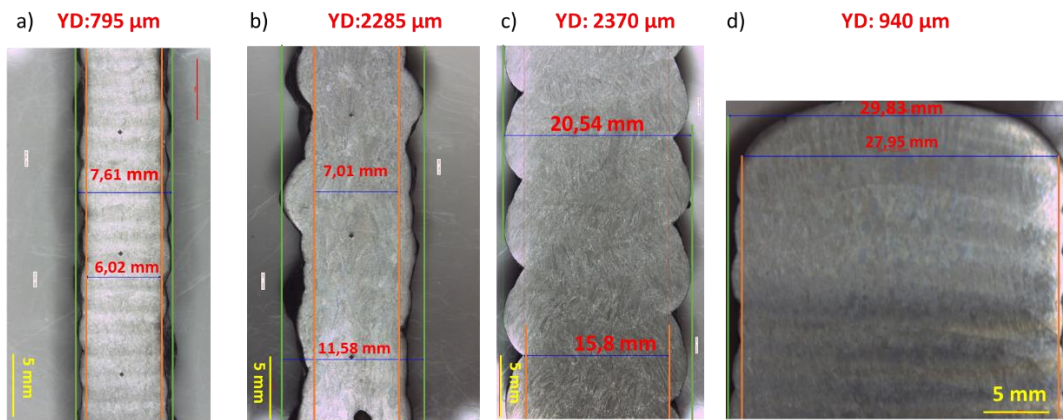
$$\text{Genişlik} = 4.85 - 0.613 X_1 + 0.5170 X_2 + 0.0538 X_1^2 - 0.03857 X_1 * X_2 \quad (4.1)$$

$$\text{Yükseklik} = 1.907 - 0.0765 X_1 + 0.1634 X_2 - 0.00337 X_2^2 + 0.00574 X_1 * X_2 \quad (4.2)$$

$$\text{Nüfuziyet derinliği} = 1.086 + 0.07783 X_2 \quad (4.3)$$

4.1.6. Duvar karakteristiği ölçüm sonuçları

Duvar kesitlerinin orta bölümlerinin stereo mikroskop altında ölçülmesi ile elde edilen duvar genişlik değerleri Resim 4.2’de görülmektedir. Duvarların bu bölümlerindeki en geniş ve en dar kesitleri ölçülerek yüzey dalgalılığı hesaplanmıştır. Duvarlardaki yüzey dalgalılığı ne kadar yüksek olur ise yüzey kalitesi o kadar azalmakta ve işlenmesi gereken malzeme miktarı artmaktadır. Tek dikiş duvarlar kendi arasında karşılaştırıldığında yüksek ısı girdisi ile yapılan duvarın yüzey dalgalılığının daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi yüksek ısı girdisine rağmen katmanlar arası soğuma süresinin aynı olmasıdır. Her yeni katman bir önceki katmanın yeteri kadar soğumasına fırsat vermeden yapıldığında sıcaklık gradyanı azaldığı için duvardan ısı kaçışı azalmıştır. Bu da ısı birikmesine sebep olmuştur. Sürekli artan katmanlar arası sıcaklık sebebi ile katılma zamanı ve kaynak havuzunun akışkanlığı artmıştır. Bu da yüzey kalitesinin azalmasına sebep vermiştir. Bir diğer sebep ise YITD duvarın TBH’sinin yüksek olmasından kaynaklı ark kuvvetinin artması ve damlacık darbeleri ile kaynak havuzunun kararlılığının bozulmasıdır. Bitişik dikişlerde osilasyon yığma yolu ile yapılan duvarın daha iyi yüzey kalitesine sahip olduğu görülmüştür. Paralel yığma yolunda her katmanda beş ince dikiş bir önceki katmanın üzerine tek tek yığılmıştır. Her dikiş sonrası bir dakika beklendiği için katmanlar arasında yeterli soğuma sağlanmaktadır. Bu sebeple yeni gelen katmanların yüksekliği artmıştır. Bu durum merdiven etkisini belirgin hale getirmiştir. Osilasyon yığma yolunda istenen duvar kalınlığı tek katmanda sağlandığı ve katmanlar arası sıcaklığın yüksek olmasından dolayı merdiven etkisi daha az olmuş ve yüzey kalitesi daha iyi olmuştur.



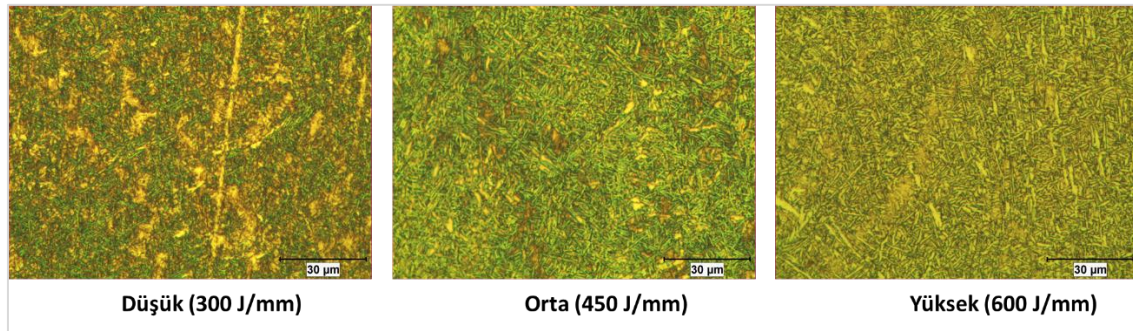
Resim 4.2. Duvar kesitlerinin genişlikleri a) DITD b) YITF c) PYBD d) OYBD

4.2. Mikro Yapı Analizi

Her katman inşasında sürekli ısınma ve soğumaya maruz kalan WAAM parçaları her soğuma sonrasında katmanın çıktığı sıcaklık ve sonrasında soğuma hızına bağlı olarak farklı faz ve yapılara sahip olmaktadır. Bu bölümde numunelerin farklı ısı girdileri ve yığıma yolları ile mikro yapılarının nasıl etkilendiği incelenmiştir. Duvar mikro yapı analizlerinden önce üretilen duvarların içerisinde birleşmeme ve gözenek gibi hataların olup olmadığının tespiti için radyografik muayene yapılmıştır.

4.2.1. Kaynak dikişlerinin mikro yapı analizi

Düşük, orta ve yüksek ısı girdisi ile üretilen kaynak dikişlerinin optik mikroskop altında 500 büyütmedeki mikro yapı fotoğrafları Resim 4.3'te görülmektedir. Düşük ısı girdisi ile üretilen dikişin soğuma oranı yüksek olduğu için martensit oranının fazla olduğu görülmektedir. Orta ve yüksek ısı girdili dikişlerde ısı girdisinin artması ve soğuma oranının düşmesi nedeniyle sürekli soğuma dönüşüm diyagramı ile uyumlu olarak martensit azalmış ve beynit oluşumu artmıştır.

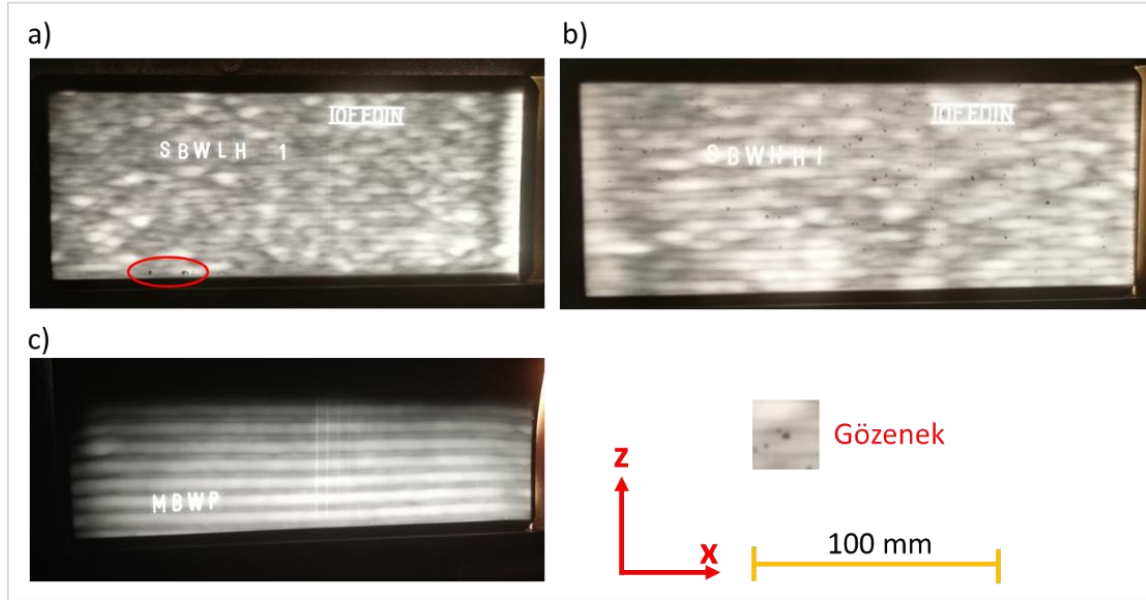


Resim 4.3. Düşük, orta ve yüksek ısı girdili dikişlerin mikro yapı görüntüleri (x500)

4.2.2. Radyografik muayene

Duvar içlerinde katmanlar arası birleşmeme ve gözenek gibi hataların kontrolü için duvarlar Resim 4.4'teki gibi radyografik muayeneye (X-Ray) tabi tutulmuştur. Duvarlarda herhangi bir birleşme hatası görülmemiştir. Bu durum ısı girdisinin bir önceki katman ile birleşme için yeterli olduğunu göstermektedir. Düşük ısı girdili duvarın filminde sadece işaretli taban bölgesinde (Resim 4.4a) iki adet gözenek görülürken yüksek ısı girdili tek dikiş duvarın içerisinde (Resim 4.4b) 20. katmandan sonra gözenek oluştuğu ve sayısının arttığı

görülmüştür. Altlıkta kalan bir kirlilik tabanda gözeneğe neden olabilmektedir. Yüksek ısı girdili duvarda belirli bir katmandan başlayarak gözeneğin artması sürekli artan katmanlar arası sıcaklık ve ısı birikmesinin etkisini göstermektedir. Bu etki ile kaynak havuzu akışkanlığı artarak hava akımından daha çok etkilenmiştir. Ek olarak artan tel besleme hızı ile birlikte de ark kuvveti artmış ve damlacık çarpması ile kaynak havuzunun kararlılığı bozulmuştur. Paralel yığma yolu ile bitişik dikiş duvar içerisinde herhangi bir birleşme hatası ve gözenek görülmemiştir (Resim 4.4c). Boşluk görülmediği için bitişik dikiş kaydırma mesafesinin yeterli olduğu anlaşılmaktadır. Osilasyon yığma yolu ile yapılan duvarın yüksekliğinin az olması sebebi görüntü alınamamıştır.

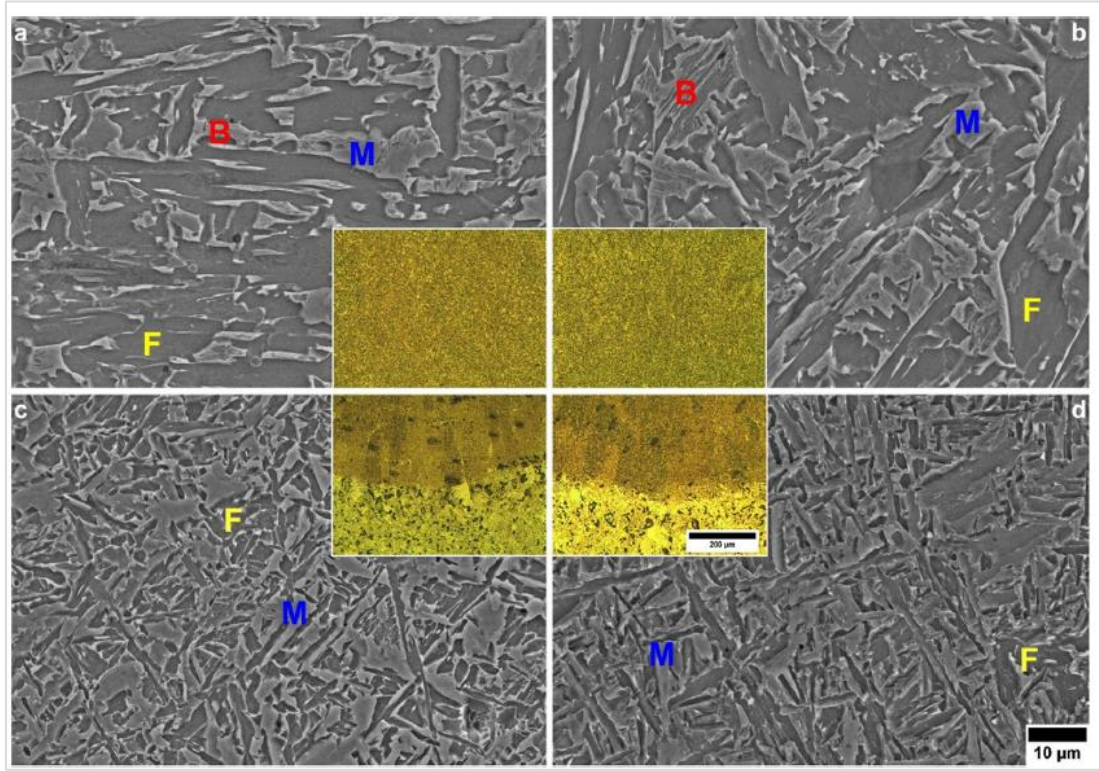


Resim 4.4. Duvarların radyografi görüntüleri a) DITD b) YITD c) PYBD

4.2.3. WAAM duvarlarının mikro yapı analizi

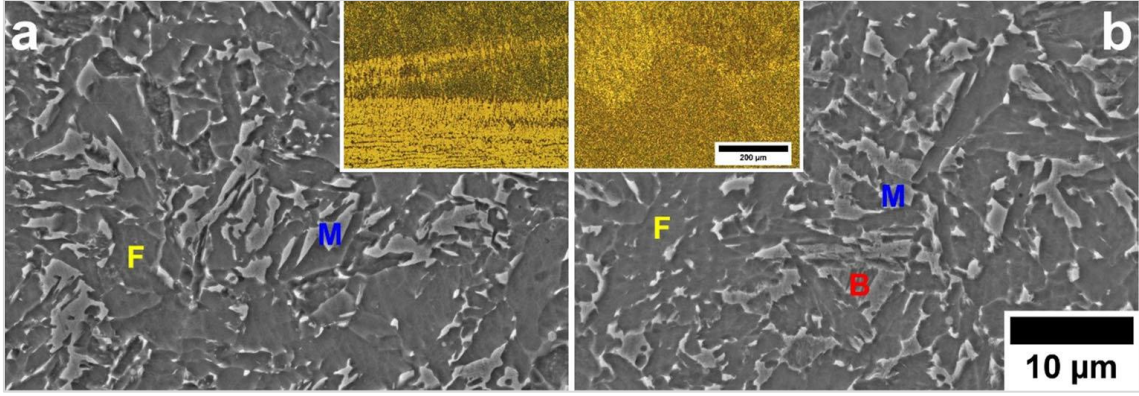
Bu bölümde DITD, YITD, PYBD ve OYBD duvar kesitlerinin (Bkz. Resim 3.9) mikro yapıları incelenmiştir. Düşük ve yüksek ısı girdili tek dikiş duvarların SEM ve OM altındaki mikro yapı görüntüleri Resim 4.5'te görülmektedir. Altlık bölgesinde yüksek miktarlarda martensit görülmektedir (Resim 4.5c-d). Altlık bölgesine kıyasla orta bölgeler daha fazla ferrit, beynit ve daha az martensit içermektedir (Resim 4.5a-b). Altlık bölgesinin ilk katmanların yapımı sırasında düşük sıcaklıkta bulunmasından dolayı soğuma hızı bu bölgede yüksek olmaktadır. Yüksek soğuma hızı sebebi ile martensit miktarı bu katmanlarda yüksektir. Orta bölgelere doğru ısı birikmesinin etkisi ile soğuma hızı düşmüş ve yapıda martensit yerine beynit ve ferrit fazları artmıştır. DITD alt bölgesinde YITD'ye oranla

soğuma hızının yüksek olması kaynaklı martensit oranı fazladır. Orta bölgede ise YITD daha düşük soğuma hızına sahip olduğu için beynit oranı DITD'ye göre daha fazladır (Resim 4.5c-d).



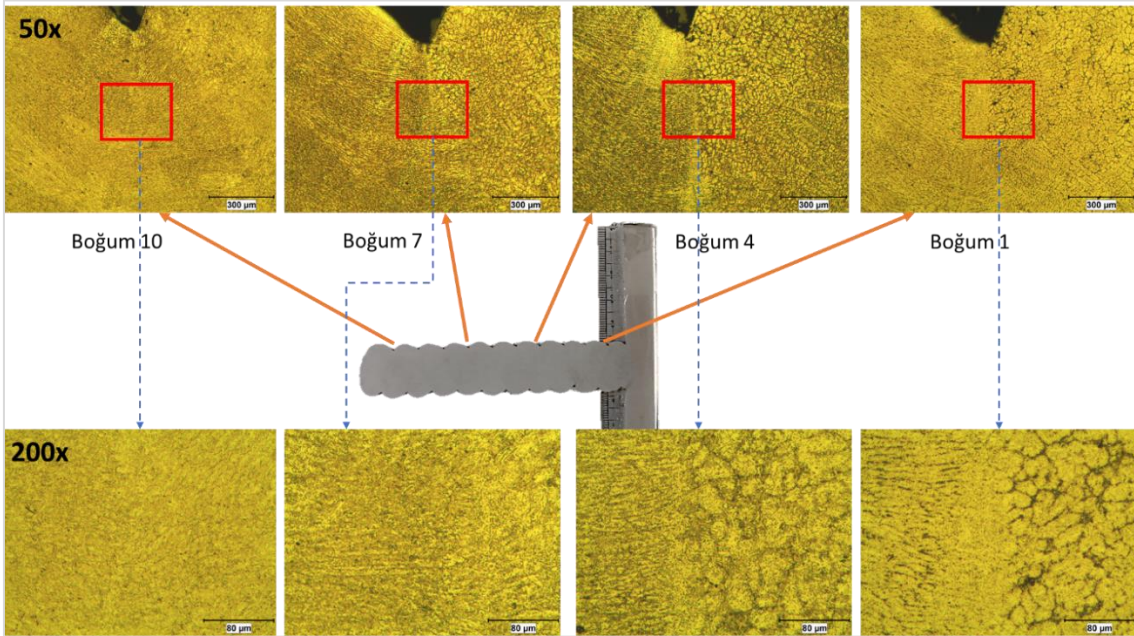
Resim 4.5. Tek dikiş duvarlardan alınan 7500x SEM ve 100x OM fotoğrafları; altlıktan 70 mm mesafe a) DITD b) YITD; Altlık bölgesi c) DITD d) YITD

Resim 4.6'da verilen OYBD duvarın mikro yapı fotoğrafında daha ince martensit ve beynitik bir yapı görülmektedir. Bu numunenin ferrit ve martensit oranları YITD duvarı ile benzemektedir. Nitekim OYBD numunesinde martensit adaları daha ince ve beynit içermektedir. Beynit içerisinde ferrit iğnemsî bir yapıda ve karbür ayrı parçacıklar halinde bulunur. Bu yapı sünekliği muhafaza ederken yüksek dayanım değerleri sağlamaktadır. Nikel, krom ve molibden gibi alaşım elementleri SSD diyagramını sağ tarafa kaydırarak orta dereceli soğuma hızlarında beynit oluşumuna izin verirler.



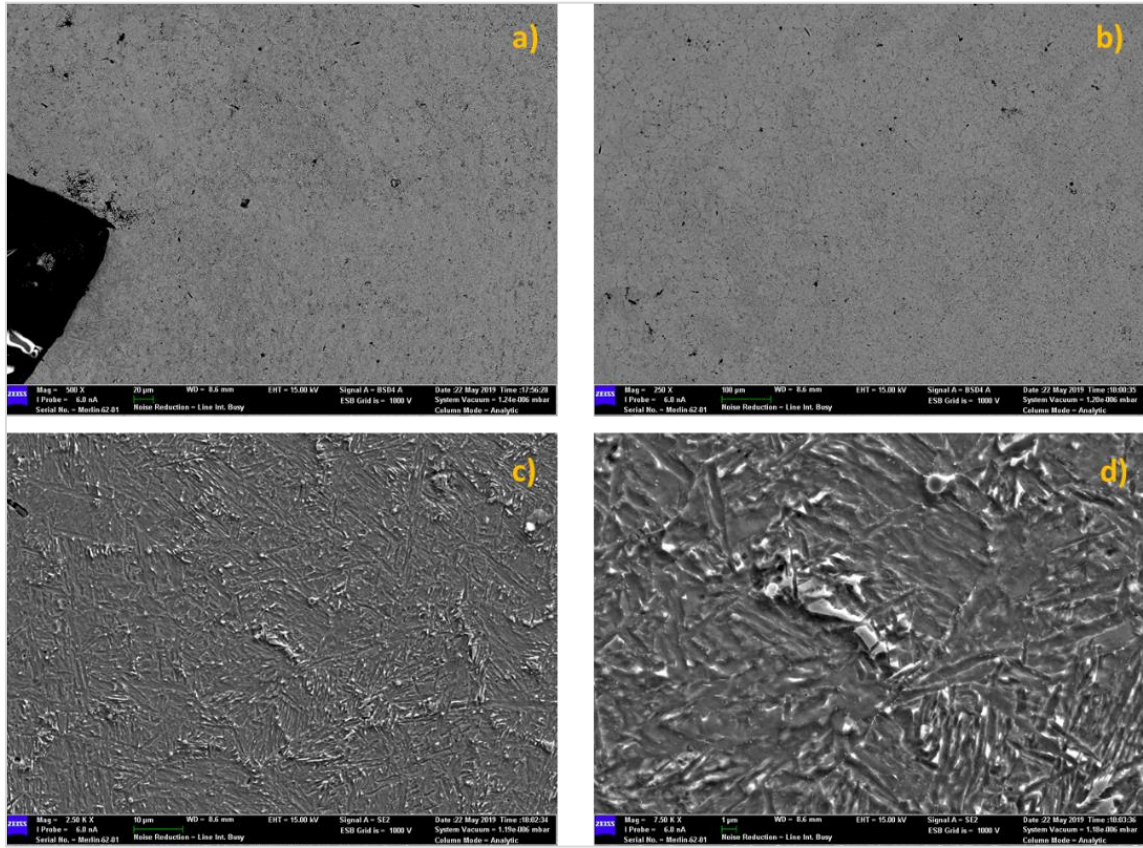
Resim 4.6. OYBD 7500x SEM ve 100x OM fotoğrafları; a) altlık bölgesi b) orta bölge

Resim 4.7’de paralel yığılma yolculu bitişik dikiş duvarın sağ boğum noktalarından alınan optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir. Burada oluşan yapılar ısı akış yönüne doğru uzanan dikine ve eş eksenli olan dallantılardır (ing. dendrites). Her boğum noktası bir katman olarak ele alındığında boğumun altında oluşan yapının eş eksenli ve kaba bir yapı olduğu görülmüştür. Üstüne gelen yeni katmanın bu katman üzerinde yeni bir ısı girdisi ile ısı birikmesini arttırması ve soğuma hızını düşürmesi bu yapıya sebebiyet vermiştir. Boğum üstünde oluşan yapıda dikine dallantılardan anlaşılan ısı akışının aşağıya olduğu ve ince yapıdan soğuma hızının yüksek olduğu anlaşılmıştır.



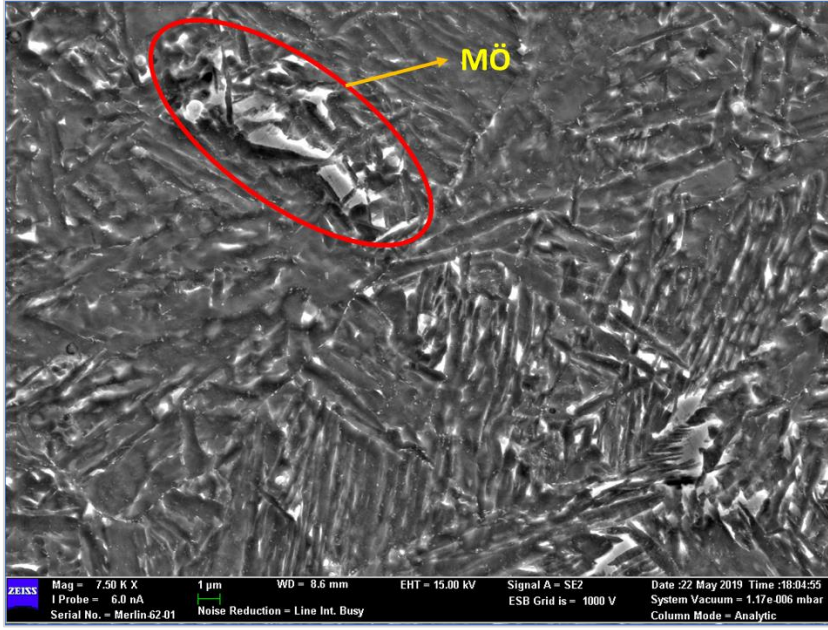
Resim 4.7. PYBD OM altında mikro yapı görüntüleri

Boğumlara genel olarak bakıldığında taban yüzeyinden üst katmanlara doğru özellikle duvar yüksekliğinin yarısından sonra yapının ince taneli hale geldiği görülmüştür. Bu üst katmanlara doğru soğuma hızının arttığını göstermektedir. Duvar yüksekliği arttıkça paralel dikişlere olan iletimle ısı akışı soğuma hızına olumlu etki yapmaktadır. Bir numaralı boğum noktasının taramalı elektron mikroskobu ile alınan görüntüleri Resim 4.8'de görülmektedir. Resim 4.8a'da boğumun genel görüntüsü görülmektedir. Resim 4.8b'de ise eş eksenli dallantılı yapılar görülmektedir. Resim 4.8c ve d'de dallantılı yapılara daha yakından bakıldığında dallantı sınırlarında martensit-östenit, geri kalan kısımda beynit fazlarının oluştuğu görülmüştür.



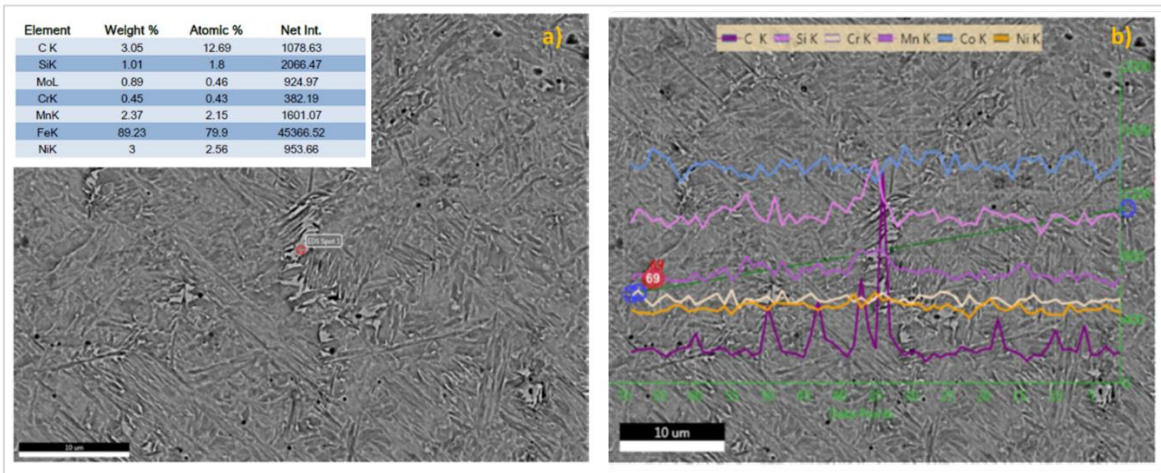
Resim 4.8. PBYD 1. boğum noktasının taramalı elektron mikroskop görüntüleri

Resim 4.8d'nin detaylı görüntüsünde beyaz renkli olan kısımların martensit-östenit ve geri kalan iğnemsiz kısımların ise beynit olduğu görülmüştür (Resim 4.9).



Resim 4.9. Resim 4.8d'nin detay görüntüsü

Martensit-östenit olarak görülen yapının karbür olup olmadığını anlamak için SEM altında enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS, Ing. Energy-dispersive X-ray spectroscopy) analizi yapılmıştır. Resim 4.10a'da görülen EDS analizi sonuçlarına göre karbon oranının karbürü işaret edecek %30 civarlarında olmadığı görülmektedir. Resim 4.10b'de yapılan çizgisel analize göre beyaz ile görülen kısımlarda karbon ve mangan miktarında artış görülmektedir. Bu artışın sebebi katılaşma sırasında birikim (ing. segregation) olmasıdır. Karbon ve manganın yükselmesi SSD diyagramında dönüşüm eğrilerinin sağa kaymasına ve aynı soğuma oranında martensit-östenit yapının oluşmasına neden olmuştur.



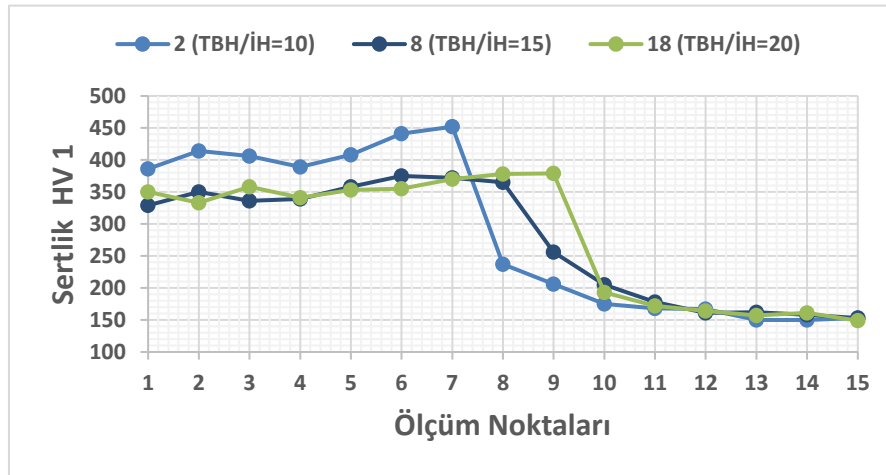
Resim 4.10. EDS analizleri a) noktasal EDS analizi b) çizgisel EDS analizi

4.3. Mekanik Özelliklerin Analizi

Bu bölümde dikiş sertlik değerlerinden başlanarak WAAM ile üretilen parçaların sertlik, akma, kopma dayanımları ve uzama değerleri sonuçları verilip tartışılmıştır.

4.3.1. Kaynak dikişi sertlik analizi

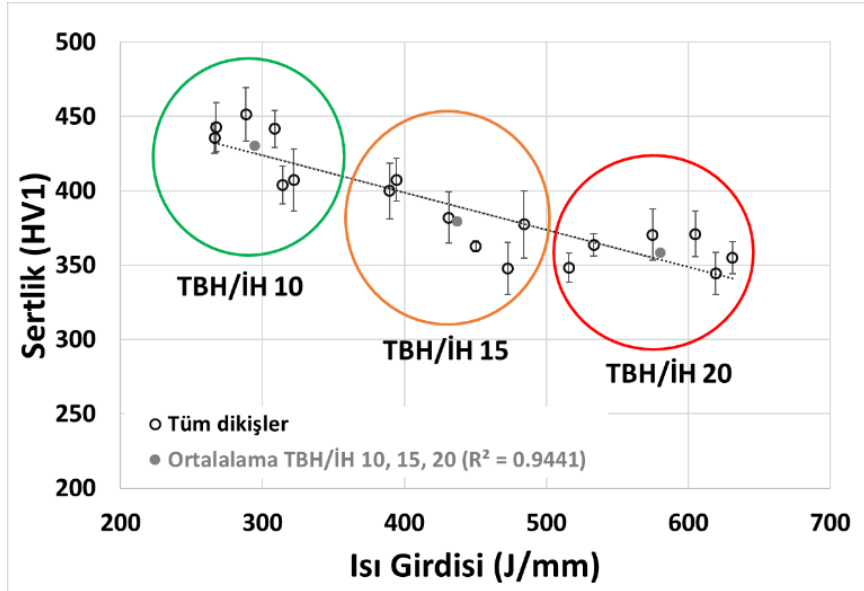
Sertlik taraması parçanın homojen bir mikro yapıya sahip olup olmadığını anlamakta ve çekme dayanımı ile ilişki kurmak için kullanılmaktadır. TBH/İH oranı 10, 15, 20 ile üretilen sırasıyla 2, 8 ve 18. dikiş kesitlerinin üst noktalarından başlanarak altlığa kadar 1 mm aralıklarla ölçülen mikro sertlik değerleri Şekil 4.8’de görülmektedir. Düşük ısı girdisi ve yüksek soğuma hızı nedeni ile dikiş 2’nin sertliğinin yüksek ısı girdili 8 ve 10. dikişlere kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. 2 numaralı dikişin mikro yapı analizlerinde görülen yüksek martensit oranı bu sertlik artışını desteklemektedir (Bkz. Resim 4.3). S355 olan altlık malzemesinin ölçümüne geçildiğinde sertliğin 150 HV değerlerine düştüğü görülmüştür.



Şekil 4.8. Yukarıdan aşağıya dikiş sertlik değerlerinin değişimi

Sertliğin ısı girdisi ile olan değişimi on sekiz dikişin tepe alanı üzerindeki sertlik ölçüm noktalarının ortalaması alınarak incelenmiştir. Değişim grafiği Şekil 4.9’da görülmektedir. Isı girdisinin artması ile dikiş sertliklerinin düşüş eğiliminde olduğu görülmüştür. Isı girdisinin artması ile düşen soğuma oranları ile dikiş iç yapılarında beynit oluşumu artmıştır. Beynit martensite göre daha yumuşak bir yapı olduğu için sertliğin düşmesi bu sebebe bağlanmaktadır. Sertlik azalma oranının TBH/İH 10’dan sonra TBH/İH 15 ve 20 arasında

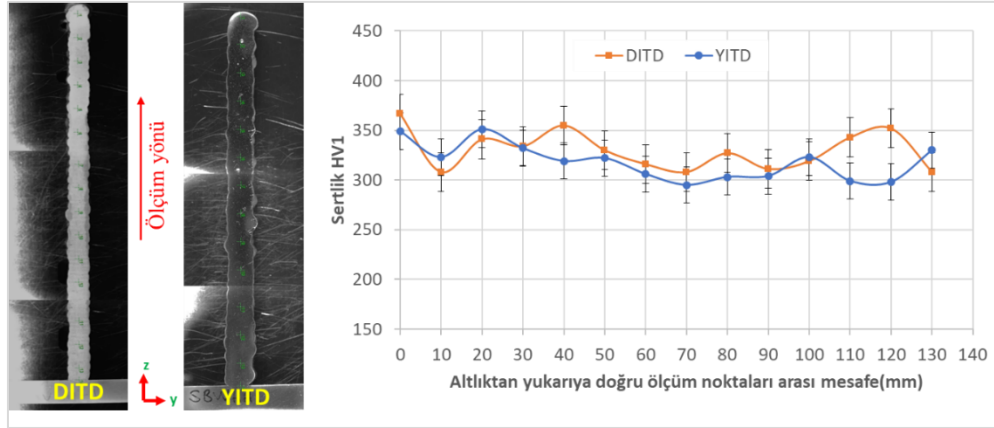
düştüğü gözlenmiştir. Bunun sebebi TBH/İH 10 oranı ile elde edilen soğuma oranlarının yapıda martensit oluşmasına sebep olurken TBH/İH 15 ve 20 arasındaki soğuma oranı farklarının beynit olan yapıyı çok fazla değiştirmemesinden kaynaklanmaktadır (Bkz. Resim 4.3).



Şekil 4.9. Kaynak dikişleri sertlik değerlerinin değişimi

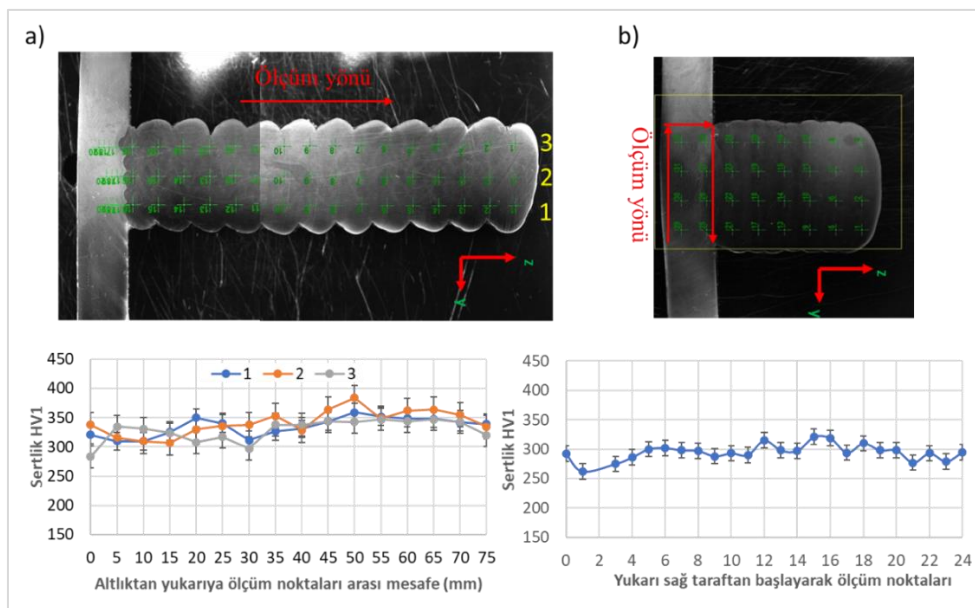
4.3.2. Duvar sertlik analizleri

DITD ve YITD duvarların mikro sertlikleri duvarın üst tarafından aşağıya doğru başlanarak 10'ar mm aralıklar ile ölçülmüştür. Ölçüm noktaları ve değerleri Şekil 4.10'da görülmektedir. Ana malzemede görülen ortalama sertlik değerleri sırasıyla 330 ± 19 ve 318 ± 18 HV'dir. Sertlik değerlerinin standart sapmasının her iki duvarda da düşük olması mikro yapının homojen olduğunu göstermektedir. Her iki duvarın orta bölge sertliklerinin en düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi orta bölgede ısı birikmesi nedeni ile katmanlar arası sıcaklığın artması ve soğuma hızının azalmasıdır. Özellikle altlıktan 40 mm sonra YITD duvarda ısı birikmesi daha fazla olduğu için sertlik değerleri daha düşük seyretmektedir. Orta bölgelerdeki mikro yapılar bu durumu doğrulamaktadır (Bkz. Resim 4.5a-b). Duvarların altlığa yakın bölgeleri büyük oranda martensit içerdiği en yüksek sertliğe sahiptirler (Bkz. Resim 4.5c-d). Altlık bölgesine kıyasla orta bölgeler daha çok ferrit, beynit ve daha az martensit içermektedir. Artan ısı birikmesi soğuma hızını düşürdüğünden martensit miktarı da azalmıştır. Ek olarak YITD duvarın orta bölgesinde daha fazla beynit bulunduğu için DITD'ye göre sertlik daha düşüktür (Bkz. Resim 4.5a-b).



Şekil 4.10. DITD ve YITD duvarlarının sertlik dağılımları

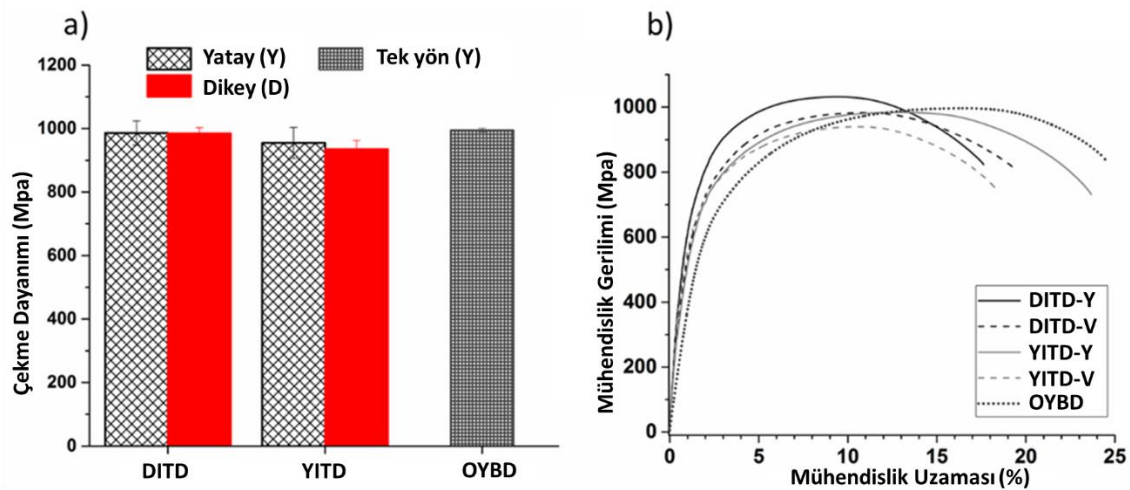
PYBD ve OYBD duvarların Z yönünde 5'er mm ve Y yönünde 7'er mm aralıklarla yapılan sertlik ölçüm noktaları ve değerleri sırasıyla Şekil 4.11a ve b'de görülmektedir. Duvarların ortalama sertlikleri sırasıyla 335 ± 18 ve 295 ± 13 HV'dir. PYBD ortalama duvar sertliğinin OYBD'den fazla olmasının sebebi yığma stratejisinden kaynaklı daha az ısı girdisi ve hızlı soğumadır. PYBD duvarda üst katmanlarda sertlik artmıştır. Mikro yapıdaki tanecik yapısının üst katmanlara doğru incilmesi soğuma hızının arttığını göstererek bu artışı doğrulamaktadır (Bkz. Resim 4.7). PYBD duvarda 1, 2, 3 şeklinde belirtilen kenar ve orta bölgelerin sertlik değerlerinin salınım gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.11a). Nitekim OYBD duvarda sertlik dağılımının daha homojen olduğu görülmektedir. Sebebi PYBD duvarda ısı iletimi yönünün ve soğuma hızlarının OYBD'ye göre daha fazla değişmesidir.



Şekil 4.11. Bitişik dikiş duvar sertlik dağılımları a) PBYD ve b) OBYD

4.3.3. Duvarların çekme özellikleri

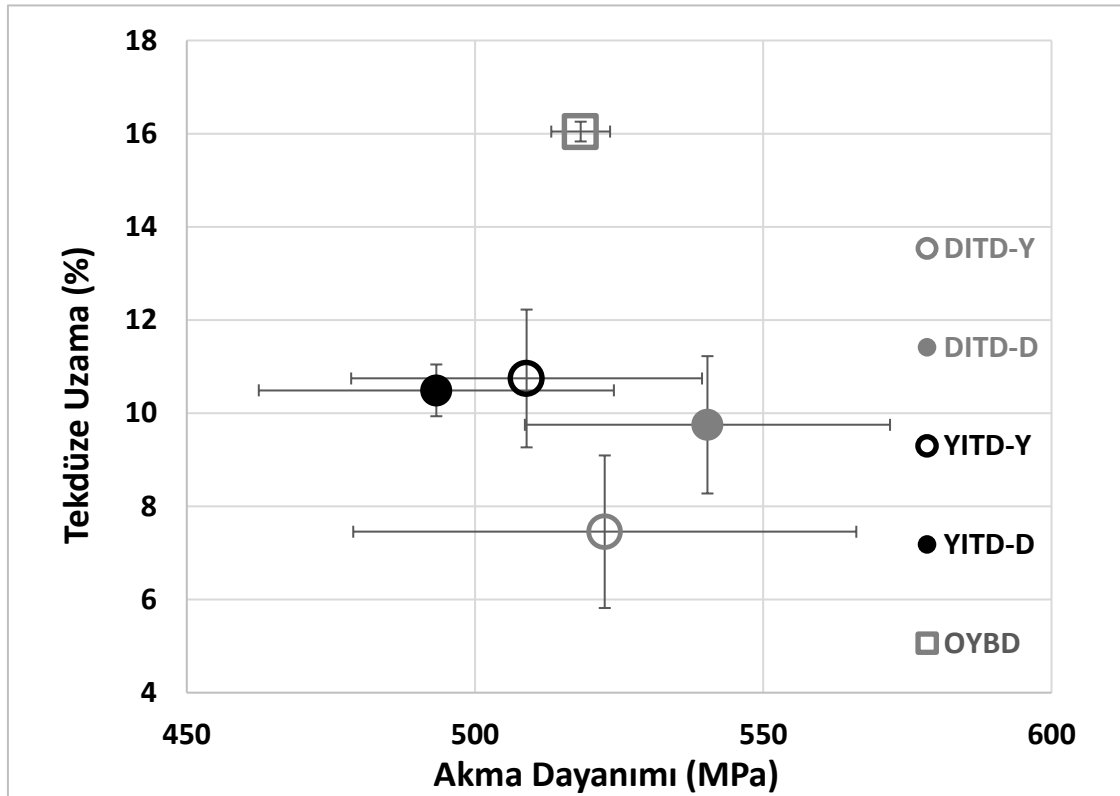
DITD, YITD ve OYBD duvarların yatay ve dikey doğrultuda ortalama çekme dayanımları ve ortalama en yakın gerilim uzama eğrilerinden birer tanesi sırasıyla Şekil 4.12a ve b’de görülmektedir. Her iki yönde de yüksek ısı girdili duvar düşük ısı girdiliye kıyasla daha düşük çekme dayanımına, fakat daha iyi uzamaya sahiptir. OYBD numunesi YITD ile benzer çekme dayanımına sahip ve bununla birlikte daha iyi uzamaya sahiptir. Bu sonuçlar mikro yapı ile uyum göstermektedir. Düşük ısı girdili duvar yüksek martensit oranına sahip olduğundan yüksek dayanım gösterirken düşük sünekliğe sahiptir. Yüksek ısı girdili numuneler sünekliği iyileştirip dayanımı azaltan daha fazla ferrit içermektedirler. Osilasyon yığılma yollu numunenin davranışı içerdiği ince martensit adalarına ve beynitik yapıya bağlıdır. Bu yapıların oranları yüksek ısı girdili tek dikiş numune ile benzerlik göstermektedir. Nitekim osilasyon numunesinin martensit adaları daha ince ve daha fazla beynit içermektedir. Beynit içerisinde ferrit iğnemsî bir yapıda bulunur. Bu yapı dayanımı korurken daha fazla süneklik sağlar. Kaynak telinde bulunan nikel, krom ve molibden gibi alaşım elementleri orta yollu soğuma hızlarında beynitik yapı oluşumuna izin verirler. Numunelerin çekme testi sonrası sünek kopma şekline sahip görüntüleri EK- 2 ve 3’te verilmiştir.



Şekil 4.12. a) Çekme dayanımlarının karşılaştırılması, b) gerilme-uzama eğrileri

Numunelerin ortalama akma dayanımı ve tekdüze (ing. uniform) uzama değerleri Şekil 4.13’te karşılaştırılmıştır. Akma dayanımları da çekme dayanımları ile aynı değişim eğilimini göstermiştir. Yüksek ısı girdili duvarlar daha düşük akma dayanımına, fakat daha

yüksek tekdüze uzamaya sahiptir. OYBD duvar DITD ile aynı ısı girdisini sağlayan parametrelerle üretilmesine rağmen daha iyi uzama değerlerine sahiptir. Bu karşılaştırma yığma stratejisinin hem akma hem de uzamayı etkilediğini göstermektedir. OYBD duvarın soğuma hızı tek dikiş duvarların soğuma hızından düşük olduğu için içerisinde oluşan fazların şekil ve yapıları farklıdır. Duvarda katman sayısı arttıkça soğuma hızının düştüğü ve görülen ferrit yapısındaki tanecik büyümesi ile birlikte akma dayanımı düşerken uzamanın arttığı Shassere ve arkadaşlarının çalışmasında da ifade edilmiştir [60]. WAAM parçalarının akma dayanımının kaynak telinin sertifika değerinden %38 daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun sebebi WAAM prosesinin ısı transfer mekanizmasının standart çoklu dikiş kaynak testindekinden farklı olmasıdır. Çoklu dikiş kaynakta ısı baskın olarak iletimle altlığa iletilir. WAAM prosesinde ise katmanlar yığıldıkça iletim ile ısı transferi azalmaktadır, çünkü bir önceki katman sıcaklığı sıcaklık gradyanını azaltmaktadır. Isı ek olarak taşınım ve ışıma ile dışarı atılmasına rağmen bu durum iletim kadar etkili olmadığından ısı birikmesi artmakta ve soğuma hızı düşmektedir. Numerik analiz sonuçları ile de bu durum doğrulanmaktadır [41]. Sonuç olarak WAAM prosesinde akma ve uzama değerlerinin farklı ısı girdileri, soğuma hızları ve yığma stratejilerinden etkilendiği, çekme dayanımının ise tel sertifika değerlerine yakın değerlerde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.13. Yatay ve dikey duvar numunelerinin akma ve uzama dayanımları

Çizelge 4.1 %0,2 akma dayanımı (AD), çekme dayanımı (ÇD), toplam ve tekdüze uzamayı içeren çekme testi sonuçlarını özetlemektedir. Tek dikiş duvarlarda yüksek ısı girdisinin, sünekliği %22 arttırdığı, akma ve çekme dayanımını sırasıyla %6 ve %4 düşürdüğü görülmüştür.

Çizelge 4.1. Çekme testi sonuçlarının özeti

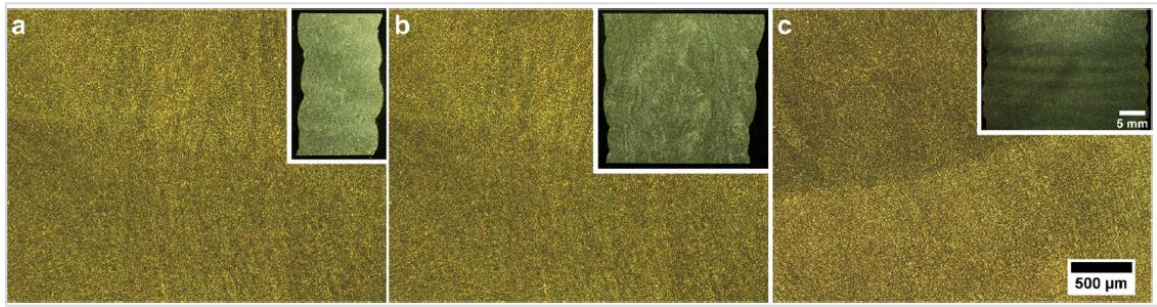
Numune İsmi	AD (MPa)	ÇD (MPa)	Toplam Uzama (%)	Tekdüze Uzama (%)
DITD-Y	523 ± 44	986 ± 38	16,6 ± 0,8	7.5 ± 1,6
DITD-D	540 ± 32	985 ± 18	17,5 ± 2,2	9.8 ± 1,5
YITD-Y	509 ± 30	955 ± 49	20,1 ± 2,6	10.7 ± 1,5
YITD-D	493 ± 31	934 ± 27	17,4 ± 2,2	10.5 ± 0,6
OYBD-Y	518 ± 5	994 ± 6	24,2 ± 0,8	16.0 ± 0,2

Numunelerde Anizotropi Durumu

Akma ve çekme dayanım değerleri için yatay ve dikey numuneler arasındaki fark standart sapma değerlerinden düşüktür. Bu yüzden numunelerin çekme özellikleri izotropik olarak kabul edilebilir. Benzer bir izotropi davranışı düşük alaşımlı çelikler ile üretilen WAAM parçalarında görülmüştür [56, 63, 86, 87]. Diğer yandan uzama değerleri test yönüyle birlikte daha belirgin bir fark sergilemektedir. Bu fark süneklikte anizotropiye işaret etmektedir.

Çalışmada kullanılan çeliğin ilk katılaşma yapısı östenittir ve dallantılı büyüme göstermektedir. Bununla birlikte dallantıların arasında Resim 4.11'deki gibi birikimler görülmektedir. WAAM prosesinde ısı altlığa, kenarlara ve üst katmana doğru ilerlemektedir. Kullanılan çelik malzemede yönlendirilmiş dallantılı östenit parça oda sıcaklığına soğuyana kadar ferrit, beynit ve martensit karışımlarına dönüşür. Ek olarak yeni bir katmanın yığılması sırasında daha önceki katmanlar tekrar östenitleşir ve soğuma hızına göre ferrit, beynit ve martensite dönüşür. Bu şekilde WAAM parçası proses sırasında çevrimsel bir ısı işleme uğrar. Bu çevrimsel işlem nedeni ile ilk uzamış dallantılı östenit yapı daha tekdüze ve eş eksenli ferrit, beynit ve martensite dönüşür. Bu durum östenitik çeliklerle kıyaslandığında, bu çeliklerde oda sıcaklığına kadar soğuma sırasında herhangi bir faz değişimi gerçekleşmemektedir. Bu yüzden östenitik çeliklerde oda sıcaklığındaki mikro yapı büyük oranda ısı akışı ile yönlendirilen taneciklerin uzamalarına göre katılaşma tarafından

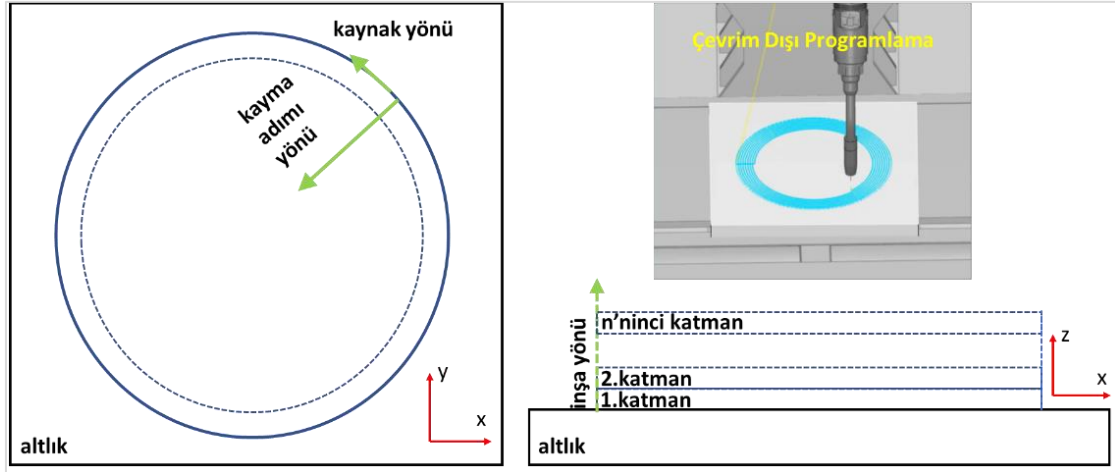
belirlenmektedir. Bu sebeple östenitik çeliklerin son mikro yapıları ve son mekanik özellikleri daha belirgin bir anizotropi sergilemektedir. Bununla birlikte krom gibi alaşım elementleri birikim eğilimini arttırarak anizotropiye katkı sağlarlar. Tez çalışmasında kullanılan çelik paslanmaz çeliğe kıyasla çok daha az krom içermektedir. Buna rağmen paslanmaz çeliğe kıyasla daha az olsa da kullanılan malzeme süneklikte %10 anizotropi sergilemektedir. Süneklikteki bu anizotropi diğer çalışmaların sonuçlarıyla uyum göstermektedir [60, 86, 88, 89].



Resim 4.11. Makro fotoğraflarla birlikte 50x optik mikro fotoğraflar a) DITD b) YITD c) OYBD

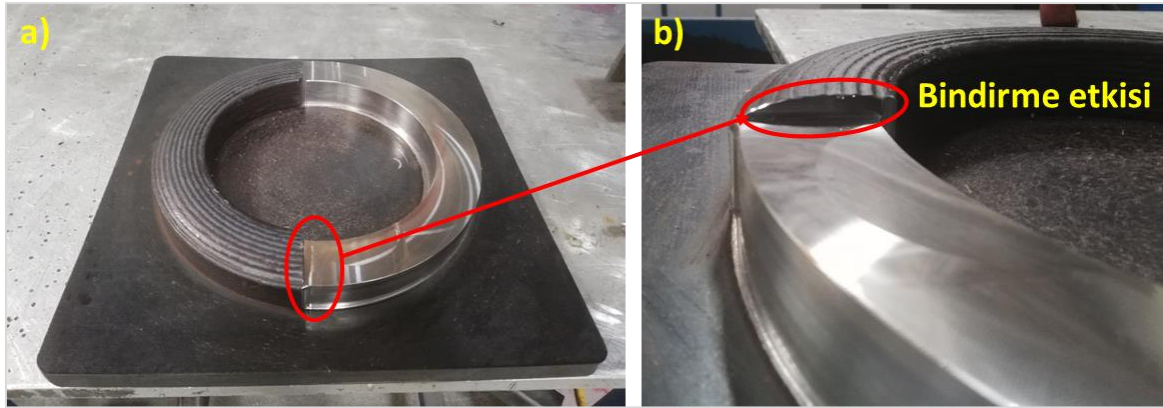
4.4. Dairesel Bir Geometrinin Üretilmesi

Geometrik, mekanik ve mikro yapı analizleri sonrası elde edilen sonuçlardan faydalanılarak dış çapı 300 mm, iç çapı 220 mm olan ve 30 mm yüksekliğinde bir halka geometrisi WAAM yöntemi ile üretilmiştir. Proses parametreleri TBH ve TBH/İH sırası ile 6 m/dk ve 10 olarak kullanılmıştır. Bu parametre seti düşük ısı girdisi grubunda dikiş 2, DITD, PBYD ve OBYD duvarların üretiminde de kullanılmıştır. İstenen ölçülerde geometriyi elde etmek için ilk olarak Şekil 4.14'teki gibi proses planlaması yapılmıştır. Yığma stratejisi olarak daha az ısı girdisi sağlayan paralel yığma yolu seçilmiştir. 40 mm et kalınlığı ve işleme payı düşünülerek dış çaptan başlayarak içeriye doğru 10 adet kaynak dikişi 4.5 mm kayma adımı ile merkeze doğru kaydırılarak yığılmıştır. Bu şekilde bir katman tamamlanmıştır. Daha sonra ortalama katman yüksekliği boyunca torç z yönünde sabit olarak 2.8 mm yukarı kaydırılarak diğer katmanlara geçilmiştir. İstenen yükseklik için işleme payı ile birlikte 12 katman inşa edilmiştir. Her katman sonrası ısı birikmesi ile parça yığılmasını engellemek amacı ile 1 dakika beklenmiştir. Proses planlama sonrası geometri, kaydırma adımı, katman yüksekliği ve bekleme süresi çevrim dışı programlama ile oluşturulup robot koduna çevrilerek robota aktarılmıştır.



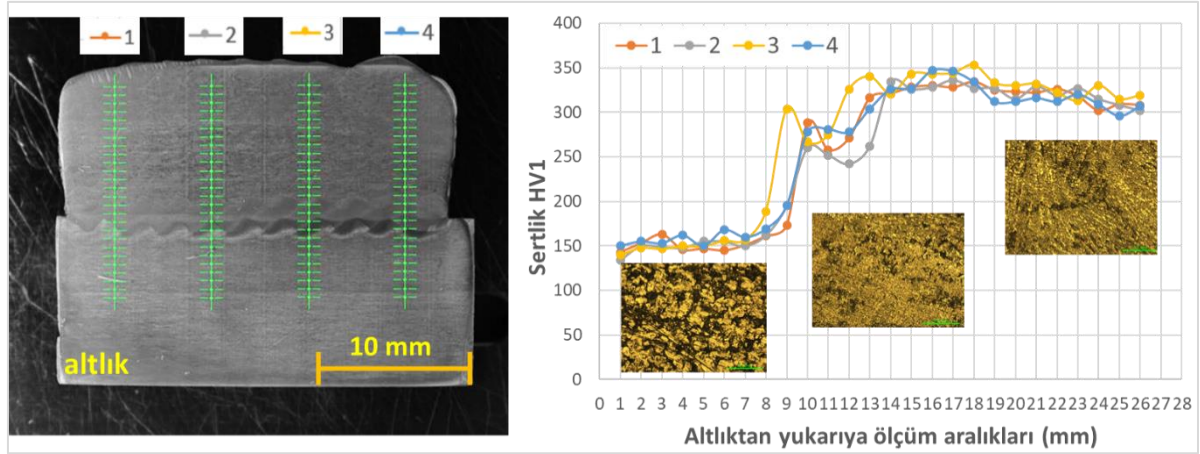
Şekil 4.14. Dairesel parça proses planlaması

Üretilen parça Resim 4.12a’da görülmektedir. Parçanın yarısı dış çap, iç çap ve parça üst tarafından sırasıyla 2,5, 6,5 ve 7 mm ölçülerinde işlenmiştir. İşlenen kısımlarda herhangi bir boşluk görülmemektedir. Resim 4.12b’de görülen bindirme etkisi sebebi ile dış çaptan içeriye doğru parça yüksekliği artmıştır [90]. Bu yükselme daha düz bir yüzey için kaydırma adımının arttırılması gerektiğini göstermiştir. Aksi taktirde talaş kaldırılacak miktar artmaktadır.



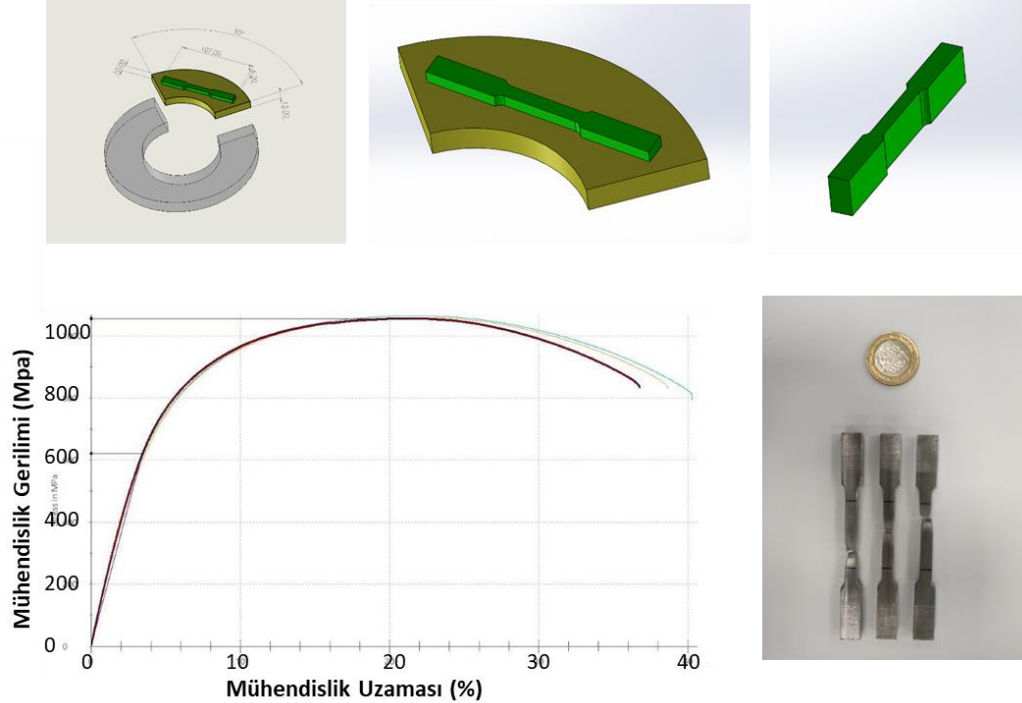
Resim 4.12. Üretilen dairesel geometrili WAAM parçası

Parça iç yapısı Şekil 4.15’teki gibi sertlik analizi ile incelendiğinde homojen bir iç yapı ortaya çıktığı görülmektedir. Altlık sertliği S355’in ferrit-perlit faz yapısına uygun olarak 150 HV civarındadır. Geçiş bölgesinden alınan mikro yapı fotoğrafı ve sertlik değerleri yapının daha sert olan beynite dönüşmeye başladığını göstermektedir. Kaynak metaline geçildiğinde yapı tamamen beynite dönüşmüş ve sertlik artmıştır. Yapının üst kısımlarına doğru ısı birikmesi ve soğuma hızı düşüşüyle sertliğin bir miktar düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.15. Dairesel geometrili WAAM parçası sertlik incelemesi

Üretilen parçadan yatay olarak çıkarılan üç adet çekme numuneleri ile yapılan çekme testinde gerilim uzama eğrilerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir (Şekil 4.16). Bu durum parça yapısının homojen olduğu hakkında fikir vermektedir. Ortalama çekme, akma dayanımları ve toplam uzama sırasıyla 1059 MPa, 614 MPa ve %20 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.16. Dairesel geometrili WAAM parçası çekme testi sonuçları

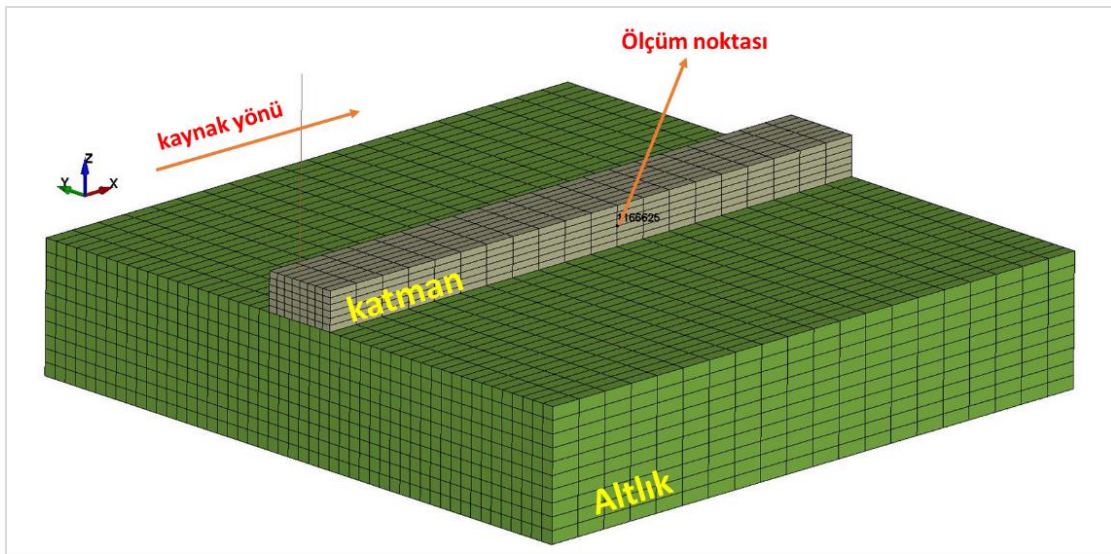
5. ISIL MODEL DOĞRULAMA ve ANALİZ ÇALIŞMALARI

5.1. Doğrulama Çalışmaları

Bu bölümde ısı modelin zaman adımının belirlenmesi için yapılan çalışma ile ısı model ve kızılötesi kamera doğrulama çalışmaları anlatılmıştır.

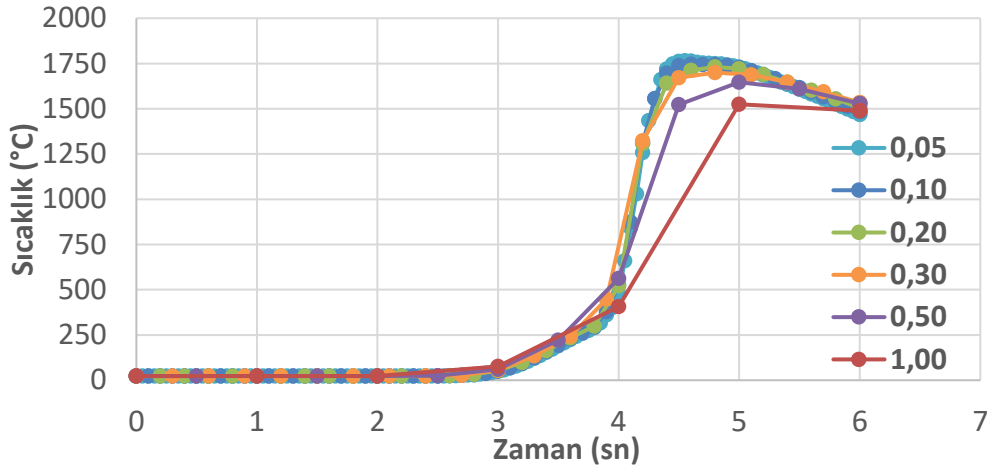
5.1.1. Model hesaplama zaman adımının belirlenmesi

Modelde çözüm zamanını çok fazla arttırmadan hassas sonuçlar elde etmek için zaman adımının tespiti için küçük bir modelde çalışma yapılmıştır. 50x50x10 mm bir altlık üzerine yapılan 50x6x3 mm boyutlarında bir katmanın orta noktasından alınan ölçüm sonuçları farklı zaman adımları ile çözdürülmüştür (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Zaman adımının belirlenmesi için oluşturulan küçük boyutlu model

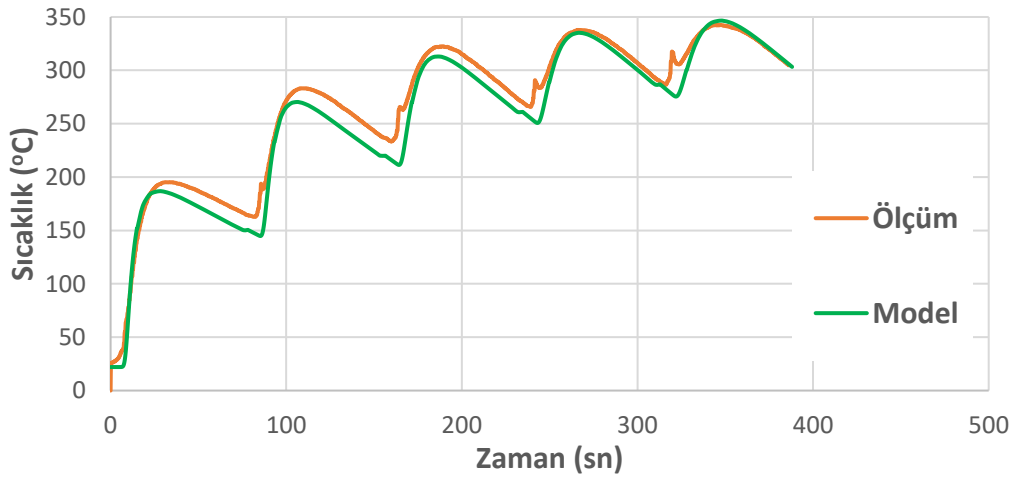
Her zaman adımı çözümü için modelde aynı kaynak parametreleri kullanılmıştır. Kaynak hızı 8.33 mm/sn olarak belirlenmiştir. 50 mm'lik bir kaynak uzunluğu için kaynak süresi 6 saniyedir. Zaman adımı küçüldükçe ısı kaynağının ölçüm noktasından geçişi sırasında kısa sürede artan yüksek sıcaklıkların hesaplanabildiği görülmektedir. Bu değer 0,5 ve 1 için hesaplama hassasiyetini düşürmüştür. 0,2 ve aşağısındaki zaman adımı değerlerinin çözüm süresini arttırmadan yüksek sıcaklıkları da yakalayabileceği görülmüştür (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Farklı zaman adımları ile katman orta noktası sıcaklık zaman grafiği değişimi

5.1.2. Model doğrulama

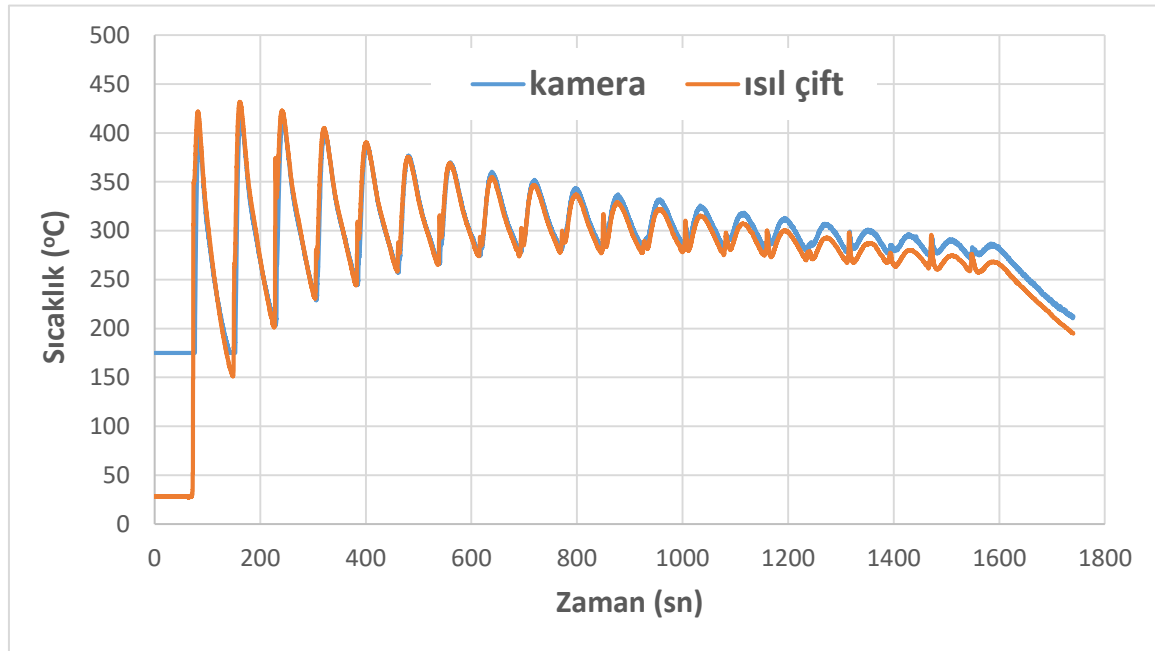
Modelde kullanılan dikiş boyutları, güç ve bekleme süresi deneyde de aynı tutulmuş ve beş katmanlı bir duvar üretilmiştir (Bkz. Çizelge 3.9). Isıl çiftin bağlandığı nokta aynı zamanda modelde ölçüm alınan düğüm noktası ile aynı koordinatlara yerleştirilmiştir. Hem model hem de deneysel ölçümden elde edilen sıcaklık zaman grafikleri aynı zaman aralığında çizdirildiğinde sonuçların Şekil 5.3'teki gibi birbirini yakından takip ettiği görülmüştür. Sıcaklık zaman grafiğini en çok etkileyen parametre altlık ile masa arasındaki iletim ile ısı transfer katsayısıdır. Bu katsayı modelde eşdeğer taşınım ısı transferi katsayısı şeklinde tanımlanmıştır. Doğrulama çalışması sonucunda $200 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ 'nin ölçüm ile en yakın sonucu verdiği görülmüştür. Altlık sıcaklığının ısı birikmesi ile her katman soğuması sonrası giderek arttığı görülmektedir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Model ve ölçümden alınan sıcaklık zaman eğrileri

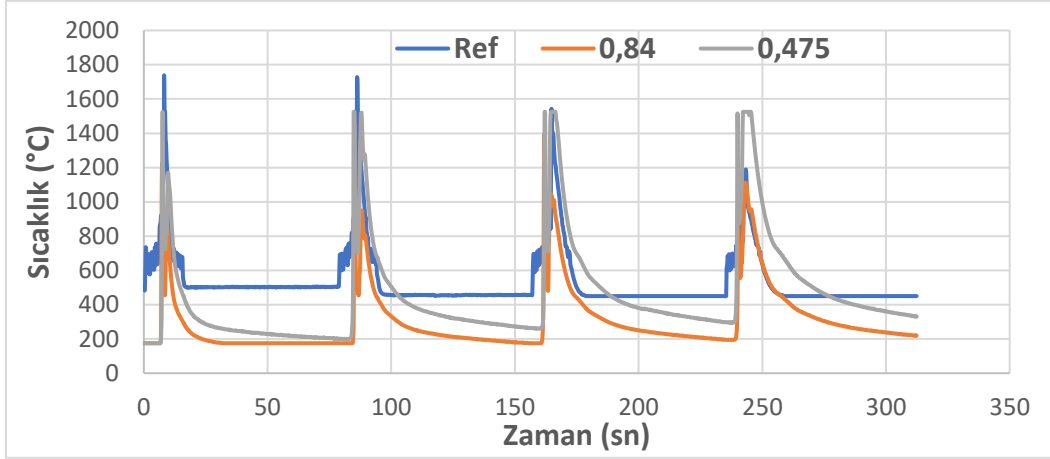
5.1.3. Kızılötesi kameranın doğrulanması

Isıl kameranın yayınlılık katsayısının belirlenerek doğrulanması için temas prensibi ile çalışan ısıl çift sıcaklık zaman grafikleriyle karşılaştırma çalışması yapılmıştır (Bkz. Şekil 3.12). Parça üzerindeki aynı noktanın ısıl çift ve kamera ile ölçülmesi ile elde edilen sıcaklık zaman eğrileri Şekil 5.4'te görülmektedir. Kamera ölçümünün ısıl çift ölçümüne en yakın olduğu durumda yayınlılık sayısı 0,84 olarak belirlenmiştir. Kızılötesi kamera ile ölçümün doğruluğunu araştıran bir çalışmada benzer bir doğrulama çalışması ve değer bulunmuştur [39].



Şekil 5.4. Isıl çift ve kamera sıcaklık zaman grafikleri

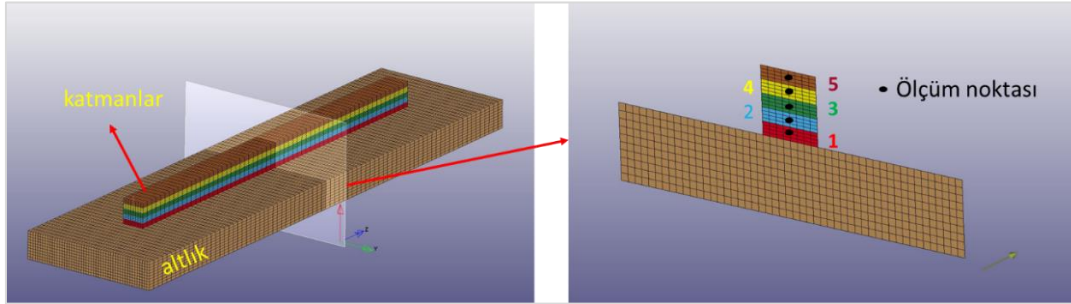
Bu çalışmaya ek olarak düşük dalga boyu ile hatalı yayınlılık katsayısı kullanıldığında hata payı düşük olan referans bir kamera ile yapılan karşılaştırma ölçümünde 1200 °C üzerindeki sıcaklıklarda yayınlılık katsayısının 0,475 değerinin altındaki sıcaklıklarda 0,84 değerinin iyi sonuç verdiği Şekil 5.5'te görülmüştür. Referans kamerası 450-1800 °C ve deney kamerası 200-1500 °C aralığında ölçüm yapmaktadır. Referans kamerasının yayınlılık katsayısı 1 olarak seçilmiştir.



Şekil 5.5. Referans ile deney kamerasının 0,84 ve 0,475 yayınlılık katsayıları seçildiği durumda 1. katman sıcaklık zaman grafikleri

5.2. Isıl Çevrimler

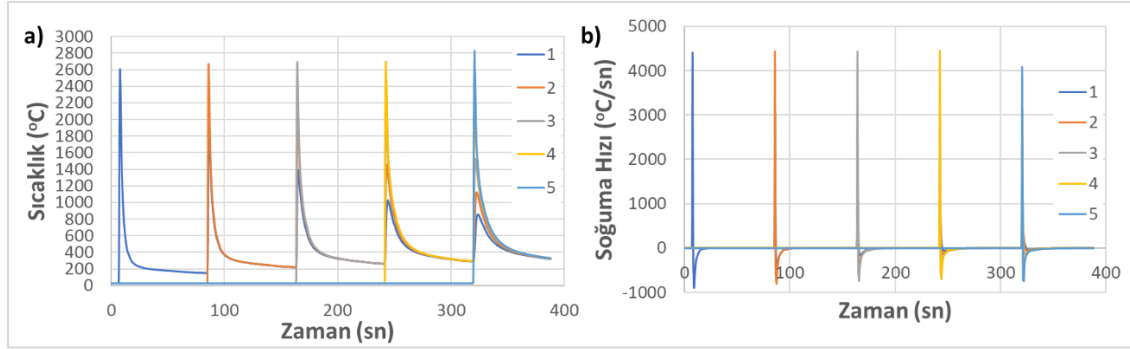
WAAM prosesinde ısıl çevrimleri incelemek için doğrulama model parametreleriyle (Bkz. Çizelge 3.9) analiz edilen 5 katmanlı duvar modeli ve katmanların orta noktalarında belirlenen ölçüm noktaları Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6. 5 katmanlı duvar modeli ve katman ölçüm noktaları

Ölçüm noktalarının sıcaklık zaman ve ısınma-soğuma hızı grafikleri sırasıyla Şekil 5.7a ve b'de görülmektedir. Yeni katmanın yığılması sırasında en yüksek sıcaklık 1. katmanda 2600 °C'den başlamış ve artarak son katmanda 2800 °C'ye ulaşmıştır. Bu artış duvarda ısı birikmesi olduğunu göstermektedir. Aynı sebeple 60 saniye soğuma sonrası katman sıcaklığı 1. katmanda 150 °C iken son katman yapıldıktan 60 saniye sonra 325 °C olmuştur. Yeni katmanlar eklendikçe alt katmanların sıcaklığının kademeli olarak düştüğü görülmüştür. Son yığılan katman altındaki katmanın sıcaklığını ergime noktasının üzerine çıkartarak bu katmanı tekrar ergitmiştir. 5. katman yığılırken 2. katmanın östenitleşme sıcaklığı olan 900 °C sıcaklığına ulaşması parça mikro yapısındaki faz değişimlerinin devam ettiğini

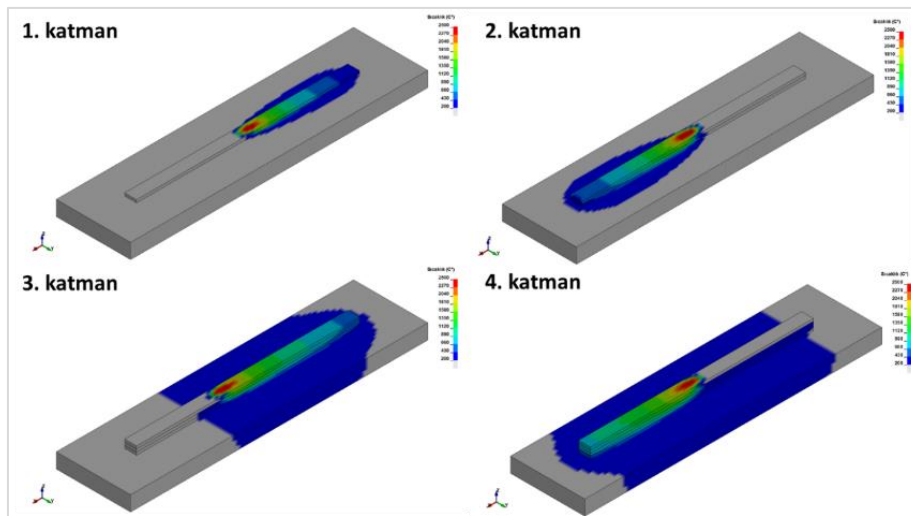
göstermiştir (Şekil 5.7a). Soğuma hızları faz değişimlerinde belirleyici olmaktadır. Son yığılan katmanın soğuma hızı daha önce yığılan katmanların soğuma hızından fazla olmaktadır. Bunun sebebi bu katmandan alt katmanlara doğru ısı iletiminin olmasıdır. Üstteki katmanlar daha hızlı soğurken alt katmanlar yukarıdan aşağıya iletimin etkisi ile daha yavaş soğumaktadır (Şekil 5.7b).



Şekil 5.7. Katman orta noktalarının a) sıcaklık-zaman b) ısınma-soğuma hız grafikleri

5.3. Sıcaklık Alanı Değişimleri

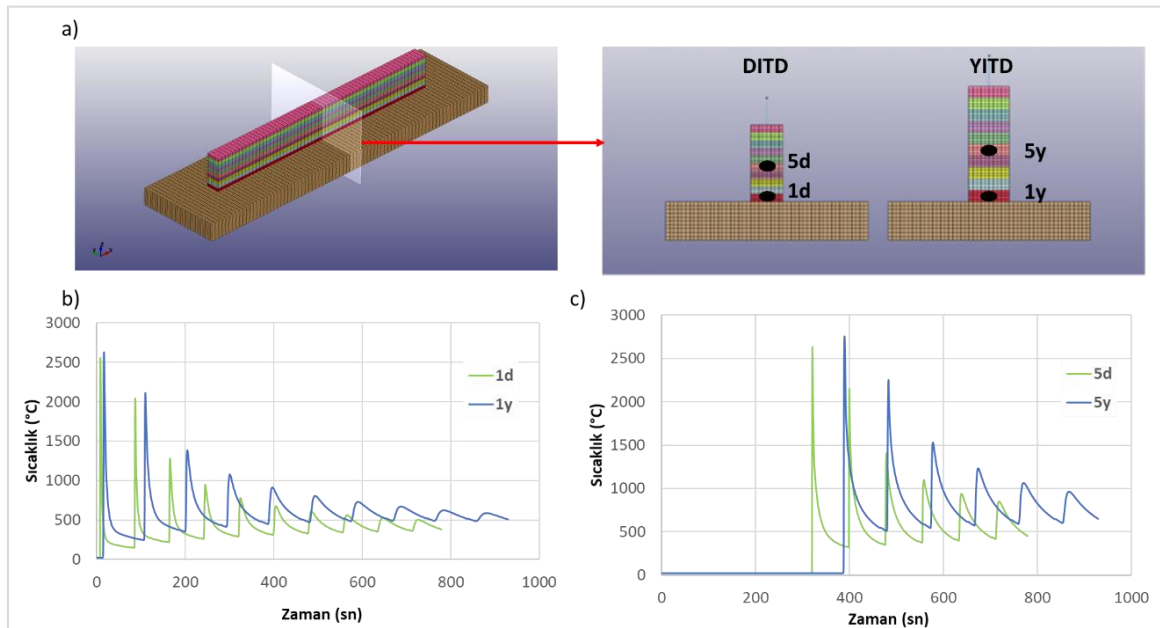
Isı kaynağı ilerlerken elemanlar aktive olmaktadır. Bir, iki, üç ve dördüncü katmanların yığılması sırasında ısı kaynağının katman ortalarına geldiği zaman oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 5.8’de görülmektedir. Isı birikmesinin bir sonucu olarak katman sayısı arttıkça sıcaklığın daha geniş bir alana yayıldığı görülmüştür.



Şekil 5.8. Birinci ve dördüncü katmanlar sonrası sıcaklık dağılımı

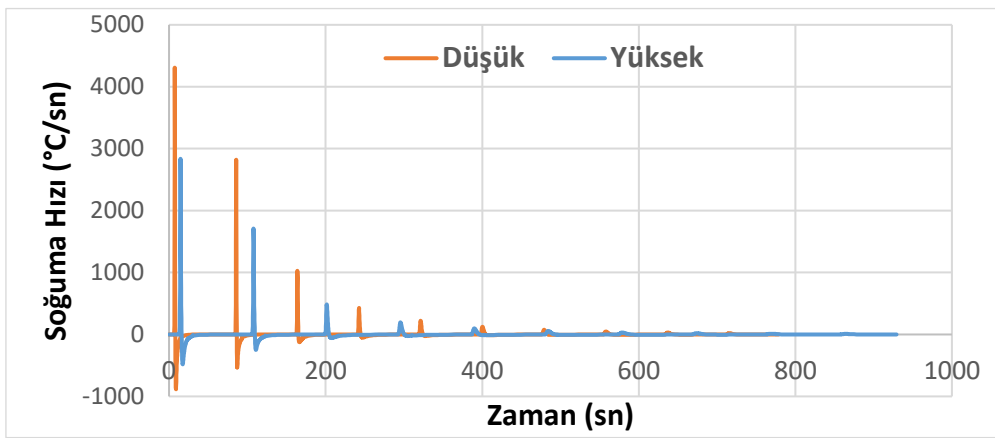
5.4. Isı Girdisi Etkisi

Bu bölümde düşük ve yüksek ısı girdili 10 katmanlı iki duvar analizi yapılmıştır. Yükselen ısı girdisi ile artan dikiş genişlik, yükseklik ve nüfuziyet ölçüleri önceki bölümdeki eşitliklerden faydalanılarak hesaplanmıştır. DITD duvar kaynak parametreleri doğrulanmış model parametreleri ile aynı tutulmuştur (Bkz. Çizelge 3.9). Yüksek ısı girdisinde modeldeki dikiş genişliği, yüksekliği ve derinliği sırasıyla 5, 3 ve 6 mm olacak şekilde arttırılmıştır. Şekil 5.9a'da bu geometri farkı görülmektedir. Her iki analizde 10 katman, 4500 W güç girdisi ve katmanlar arası 60 saniye soğuma süresi verilerek yapılmıştır. Düşük ısı girdisinde 10 mm/sn olan ilerleme hızı, yüksek ısı girdisinde 5 mm/sn'ye düşürülerek ısı girdisi iki katına çıkarılmıştır. Analizlerde 1. ve 5. katmanların ortasından ölçüm alınarak sıcaklık profilleri karşılaştırılmıştır (Şekil 5.9a). 1. ve 5. katmandaki ölçüm noktaları karşılaştırıldığında yüksek ısı girdili duvarın soğuma hızının yavaş olduğu ve katmanlar arası sıcaklığın yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 5.9b-c). Bunun sebebi ısı birikmesiyle aynı soğuma süresi boyunca katmanlar arası sıcaklığın sürekli yüksek kalarak sıcaklık gradyanının daha düşük olmasıdır. Her iki ısı girdisi durumunda 5. katmandan sonra katmanlar arası sıcaklığın değişmediği görülmektedir. Bu durum sabit soğuma bekleme süresi ve duvar yüksekliğinin artması ile ısı girdisi ile ısı kaçışının dengeye ulaşmasının bir sonucudur.



Şekil 5.9. Düşük ve yüksek ısı girdili duvarların a) geometri ve ölçüm noktaları b) 1. katman c) 5. Katman sıcaklık zaman eğrileri

Her iki ısı girdili duvarda ilk katmanın orta noktasındaki ısınma ve soğuma hızı değişimleri Şekil 5.10'da görülmektedir. Düşük ısı girdili duvarın ısınma ve soğuma hızının aynı bekleme süreleri için yüksek olduğu görülmüştür. Düşük ısı girdisinde ilk katmanda dikiş yüzey alanının daha küçük olması ile ısı artışı ve kaçıışı daha hızlı olmuştur. Isı birikmesinin etkisi ile bu fark diğer katmanlarda azalarak devam etmiştir. Soğuma hızı zirve noktaları düşük ve yüksek ısı girdili duvar için 1. katman yığılırken sırasıyla -885 ve -482 °C/sn olurken 10. katman yığılırken bu değerler -3 ve -2 °C/sn olarak soğuma hızının düştüğü görülmüştür.



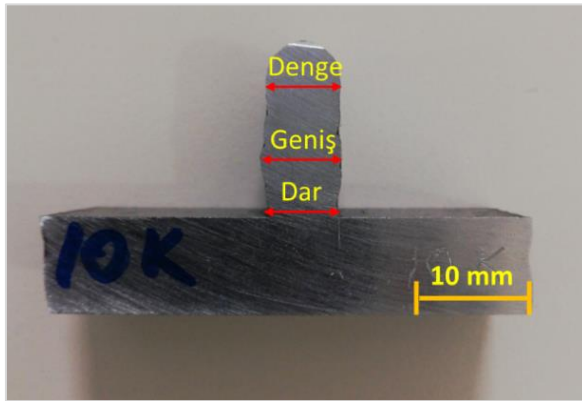
Şekil 5.10. Düşük ve yüksek ısı girdili duvarda 1. katman orta noktası ısınma ve soğuma hızı değişimi

Hem düşük hem yüksek ısı girdili duvarın her katmanda 60 saniye soğuma süresi sonrası katmanlar arası sıcaklıkları ve değişim oranları Çizelge 5.1'de özetlenmiştir. Düşük ısı girdili duvarda katmanlar arası sıcaklık 1.katmanda 151 °C olarak başlamış ve ısı birikmesi etkisi ile 487 °C'ye kadar çıkmıştır. Bu durum yüksek ısı girdili duvarda 260 °C ve 711 °C'dir. Duvarların aynı katmanlarının sıcaklıkları karşılaştırıldığında yüksek ısı girdili duvarın katmanlar arası sıcaklığının 1. katmanda %72 oranında arttığı ve 10. katmana doğru bu farkın ısı kaçışının dengelenmesi ile %46'ya düştüğü görülmüştür. Duvarların kendi içlerindeki katmanlar arası sıcaklık değişimine bakıldığında her iki duvarda benzer bir değişim olduğu görülmüştür. Yüksek ısı girdili duvarda bu oran soğuma hızının düşmesi ile daha düşük olmuştur. Her iki ısı girdisinde de değişim üst katmanlara doğru soğuma hızının azalması ile düşmüştür.

Çizelge 5.1. Duvarların katmanlar arası sıcaklıkları ve değişimleri

Katman no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Düşük (°C)	151	223	269	303	333	364	396	428	461	487
Yüksek (°C)	260	376	446	500	548	590	628	662	691	711
Düşük ve yüksek ısı aynı katmandaki değişim (%)	72	69	66	65	65	62	59	55	50	46
Katmanlar arası değişim (Düşük) (%)	-	48	21	13	10	9	9	8	8	6
Katmanlar arası değişim (Yüksek) (%)	-	45	19	12	10	8	6	5	4	3

Resim 5.1’de görülen 10 katmanlı duvar kesitinde ilk birkaç katmanda altlık etkisi ile daha hızlı soğuma hızı elde edildiği için duvarın alt kısmının genişliği daha dar olmuştur. Duvar yüksekliği arttıkça iletim ile ısı transferine olan direnç artmıştır. Duvar yüksekliği ile beraber taşınım ve ışıınım ile ısı transferi artmasına rağmen altlığa olan ısı transferi kadar etkili değildir. Bu durum ısı kaçışının yavaşlamasına ve soğuma hızının düşmesine neden olur. Sonuç olarak yüksek katman sıcaklığına temas eden kaynak havuzu birim zamanda daha fazla genişleyerek duvar genişliğinin artmasına neden olur. Isı girdisi ile ısı kaçışının dengeye ulaşması ile bu duvar genişliği de dengeye gelmiştir.

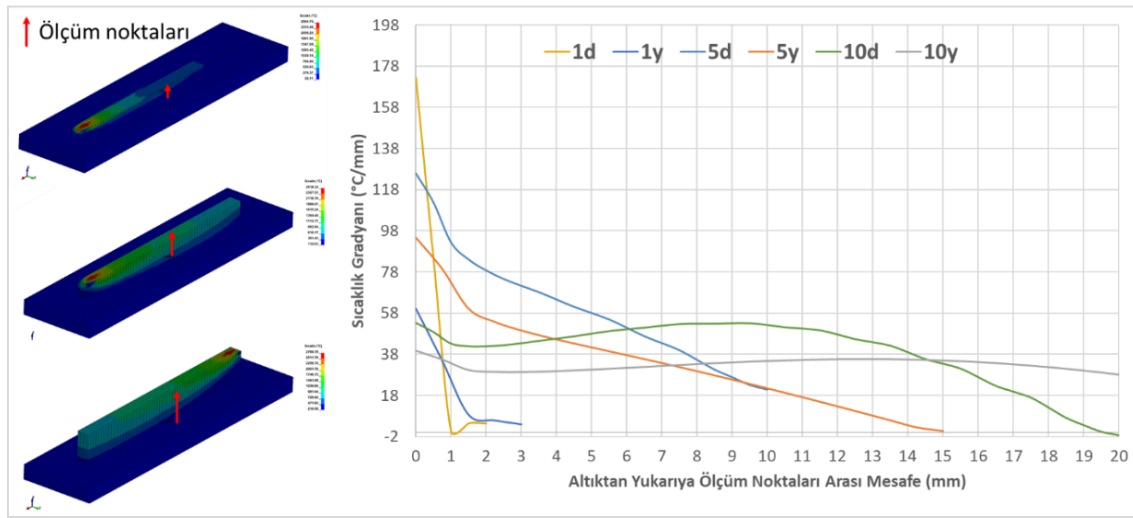


Resim 5.1. 10 katmanlı duvar kesiti genişlik değişimi

5.5. Sıcaklık Gradyanı Değişimi

10 katmanlı düşük ve yüksek ısı girdili duvar analizlerinde 1, 5 ve 10. katmanlarda kaynak bitimi sonrası duvar yüksekliği boyunca sıcaklık gradyanları incelendiğinde üst katmanlara doğru her iki analizde de sıcaklık gradyanının azaldığı görülmüştür (Şekil 5.11). İlk

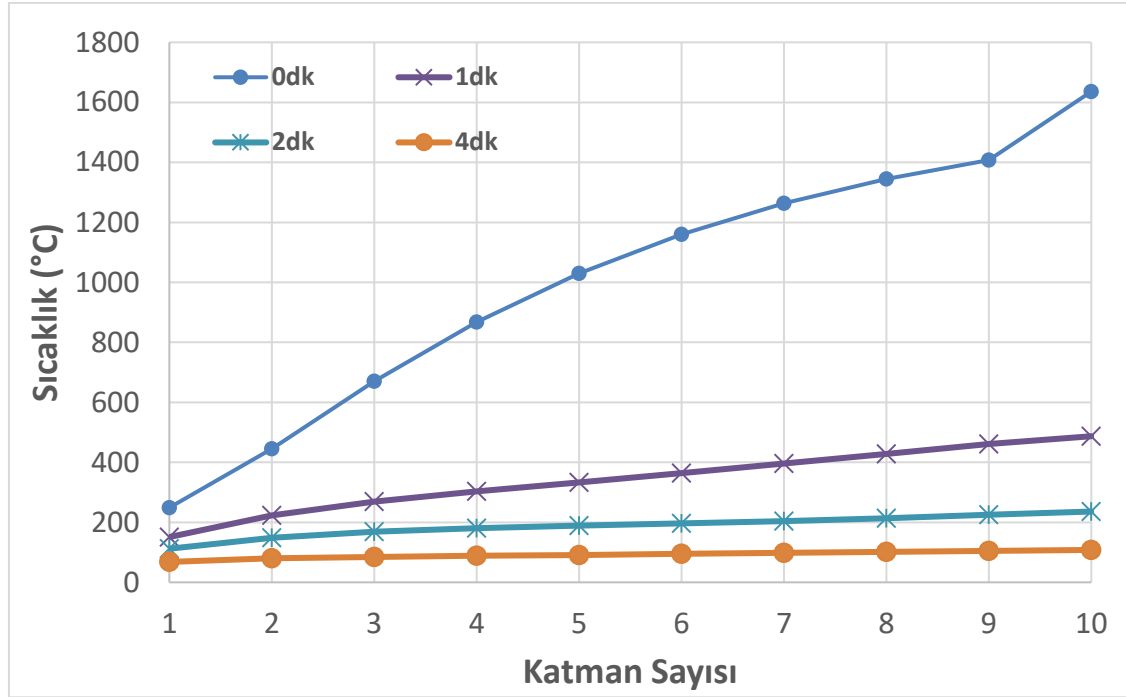
katmanda sıcaklık gradyanının yüksek olmasının sebebi oda sıcaklığındaki taban plakasının sıcaklığının aniden yükselmesidir. Üst katmanlara doğru tabanın etkisinin azalması ile sıcaklık gradyanı düşmektedir. Yüksek ısı girdili duvarda sıcaklık gradyanının tüm katmanlarda düşük ısı girdili duvara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Yüksek ısı girdili duvarda biriken ısı miktarı daha fazla olduğu için katmanlar arası sıcaklık yüksek olmakta ve bu da sıcaklık gradyanının daha düşük olmasına neden olmaktadır. Her iki girdisinde 10. katman sonrası değişimin düşük bir değerde ve duvar orta bölgelerinde yükselmesi ilettime olan direnci göstermiştir.



Şekil 5.11. 1, 5 ve 10. katmanlar sonrası sıcaklık düşük (d) ve yüksek (y) ısı girdili duvarda sıcaklık gradyanı değişimi

5.6. Soğuma Süresinin Katmanlar Arası Sıcaklığa Etkisi

10 katman ve aynı proses parametrelerini kullanarak soğuma süresiz, 1, 2 ve 4 dakika soğuma süreli yapılan analizlerde orta noktalardaki katmanlar arası sıcaklık değişimi Şekil 5.12’de görülmektedir. Katmanlar arası bekleme yapılmadan sürekli yapılan yığmada katmanlar arası sıcaklığın 1. katmandan sonra daha büyük oranda yükseldiği görülmüştür. 10. katmanda sıcaklık ergime sıcaklığının üzerine çıkarak üzerine yığılacak bir sonraki katmanın ergiyik havuzunun duvar üzerinden akacağını işaret etmiştir. 1,2 ve 4 dakika soğuma süreleri ile katmanlar arası sıcaklığın düştüğü gözlemlenmiştir. Katmanlar arası sıcaklıklar soğuma süresinin en fazla olduğu 4 dakikada en düşük olmuştur. Soğuma süresi düştükçe hem sıcaklık yükselmiş hem de sıcaklığın katman sayısı ile artış hızı artmıştır. Bu durum WAAM prosesinde her katmandan sonra soğuma süresi verilmesinin ısı kaçışı için zaman sağlayarak ısı birikmesini engellediğini göstermiştir.



Şekil 5.12. Katmanlar arası sıcaklıkların 0, 1, 2 ve 4 dakika soğuma süreleri ile değişimleri

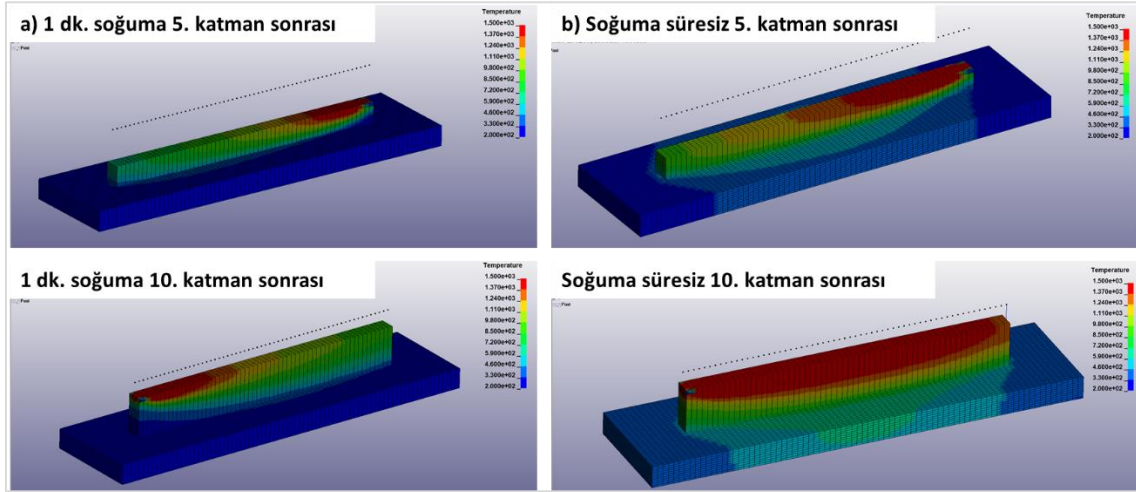
Şekil 5.12’te grafiği verilen katmanlar arası sıcaklık değerleri Çizelge 5.2’de özetlenmiştir. Hiç soğuma süresi verilmeyen durum ile 1 dakika soğuma süreli durum arasında önemli bir fark olarak son beş katmanda ortalama %68 sıcaklık farkı bulunmuştur.

Çizelge 5.2. Soğuma sürelerine göre katmanlar arası sıcaklıklar (°C)

Soğuma Süresi (dk)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	249	445	670	868	1030	1160	1263	1345	1408	1636
1	151	223	269	303	333	364	396	428	461	487
2	112	149	169	180	189	196	204	214	225	236
4	68	80	85	89	91	95	98	102	105	108

Soğuma süreli ve süresiz analizlerdeki sıcaklık dağılımları Şekil 5.13’te görülmektedir. Şekil 5.13a’daki 1 dk. soğuma süreli parçanın 5 ve 10. katman sonrası sıcaklık dağılımının 1500 °C ergime sıcaklığı üzerinde olan kısmının, Şekil 5.13b’deki soğuma süresiz duruma göre daha az olduğu görülmüştür. Soğuma süreli durumda son katmanın 2 katman aşağısında ergime sıcaklığına ulaşılması katmanların birleşmesine olumlu etki yaparken, soğuma süresiz durumda 5 katmana çıktığı görülmüştür. Bu durum duvar geometrisinde akmalara ve

katmanlar arası yüksek sıcaklık ile katmanın yayılmasından dolayı duvar yüksekliğinde kayba sebep olacaktır.



Şekil 5.13. 5. ve 10. katman sıcaklık dağılımları a) 1 dakika soğuma süreli b) soğuma süresiz

Gerçek durumdan hiç soğuma süresi verilmeden yapılan bir denemeden sonra duvardaki akma ve geometrideki bozulma Resim 5.2’de görülmektedir. Bu durum soğuma süresinin WAAM prosesindeki önemini vurgulamaktadır.

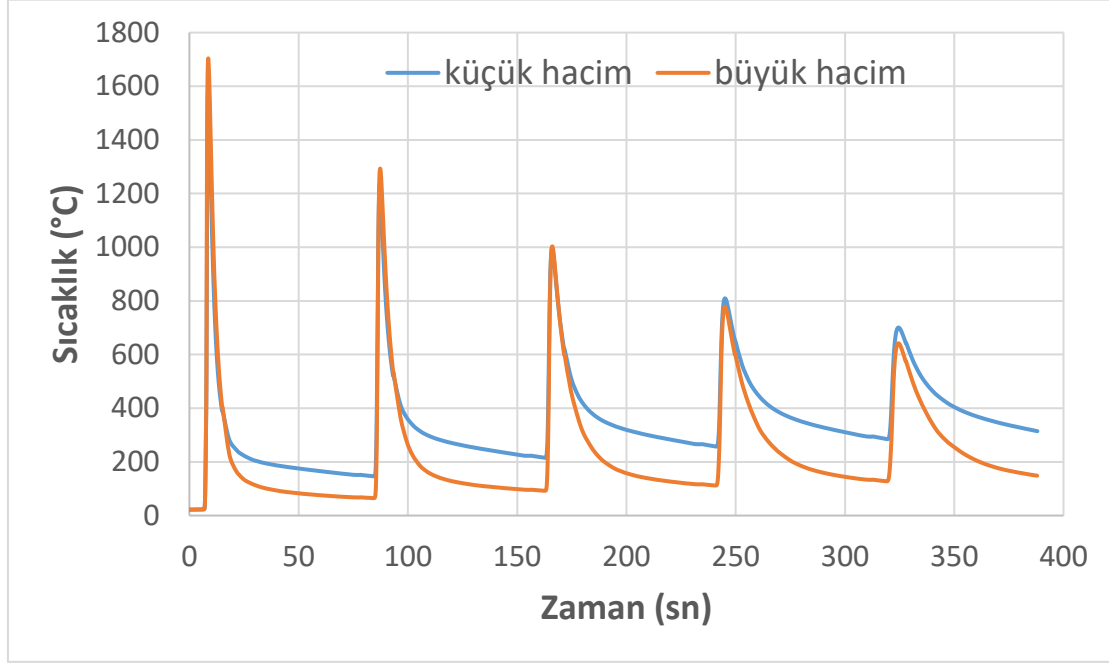


Resim 5.2. Katmanlar arası soğuma süresi verilmeden yapılan duvarda akma ve geometrinin bozulması

5.7. Altlık Boyutunun Katmanlar Arası Sıcaklığa Etkisi

Aynı kaynak parametreleri ve soğuma süresi şartlarında altlık boyutları (200x50x10 mm) her boyutta iki katına çıkarılarak yapılan 5 katmanlı bir duvar analizinde 1. katman orta noktasında alınan sıcaklık zaman grafikleri Şekil 5.14’te karşılaştırılmıştır. Beklendiği üzere

büyük hacimdeki altlık ısı kaçıışı için bir rezerv oluşturduğundan aynı soğuma süresinde katman sıcaklığının daha düşük seviyelere geldiği gözlemlenmiştir. Hacimdeki 8 kat artış katmanlar arası sıcaklığı ortalama %58 oranında düşürmüştür. Son iki katmanda ısı birikmesi etkisi ile zirve sıcaklıklar küçük hacimdeki altlıkta daha yüksek olmuştur.



Şekil 5.14. 5 katmanlı duvarda 1.katman ölçüm noktasında küçük ve büyük boyutlarda altlık ile sıcaklık zaman grafiğinin değişimi

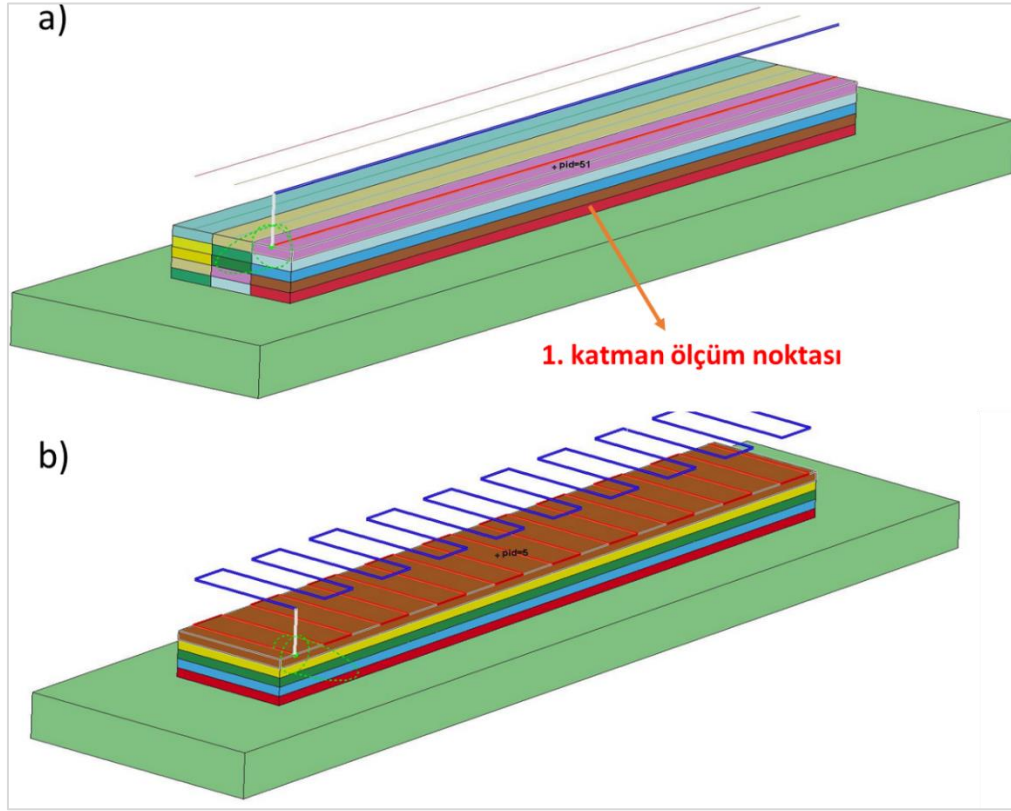
5.8. Bitişik dikiş stratejileri

Geometrilerin et kalınlığını arttırmak için WAAM prosesinde bitişik yığma stratejileri uygulanmaktadır. Genellikle uygulanan paralel ve osilasyon yığma stratejilerinin ısı davranışları bu bölümde incelenmiştir.

5.8.1. Paralel ve osilasyon yığma stratejisi

Paralel ve osilasyon yığma yolları sırası ile Şekil 5.15a ve b’de görüldüğü gibi 5 katmanlı bir duvar geometrisi üretecek biçimde analiz yazılımı içerisinde oluşturulmuştur. Kaynak parametreleri iki analizde de aynı tutulmuştur. Paralel yığma yolunda her kaynak dikişi ayrı olarak modellenmiştir. Duvarın kalınlığı 24 mm’dir. Genişliği 8 mm olan kaynak dikişlerinden bindirme yapmadan bitişik olarak üç adet yan yana dizilerek bu kalınlık elde edilmiştir. Her katmanda üç adet dikiş ve 5 katmanda toplam 15 adet dikiş modellenmiştir.

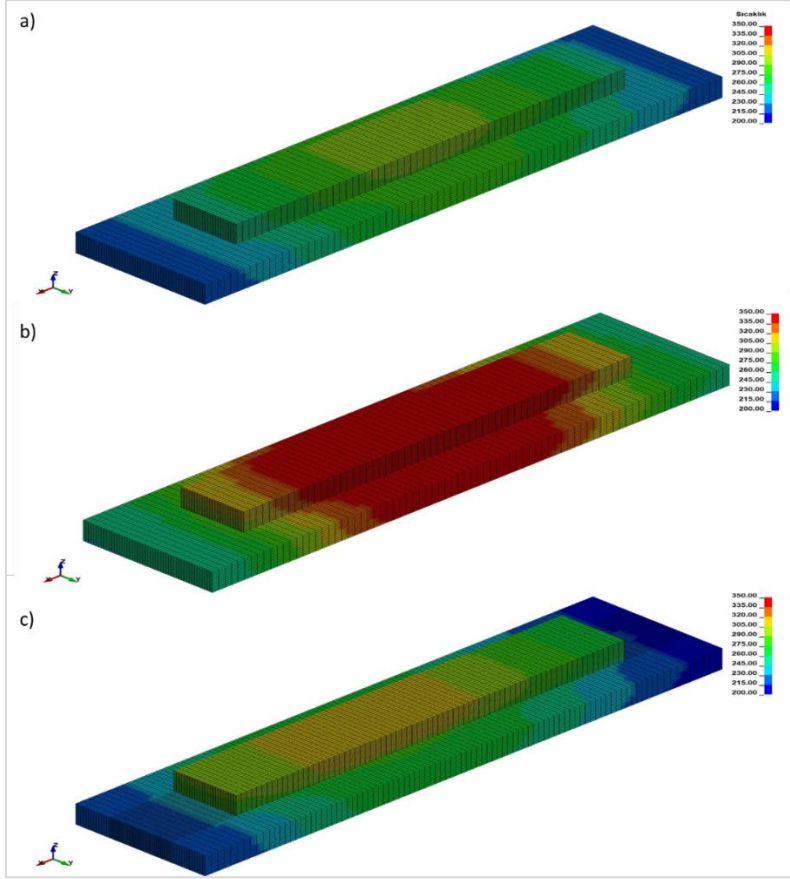
(Şekil 5.15a). Osilasyon yığma yolu katman genişliğini oluşturan 24 mm yanal genişliğe sahiptir. Böylelikle her katmanda sadece 24 mm genişliğe sahip tek dikiş modellenmiştir (Şekil 5.15b).



Şekil 5.15. Bitişik dikiş yığma stratejileri a) paralel ve b) osilasyon

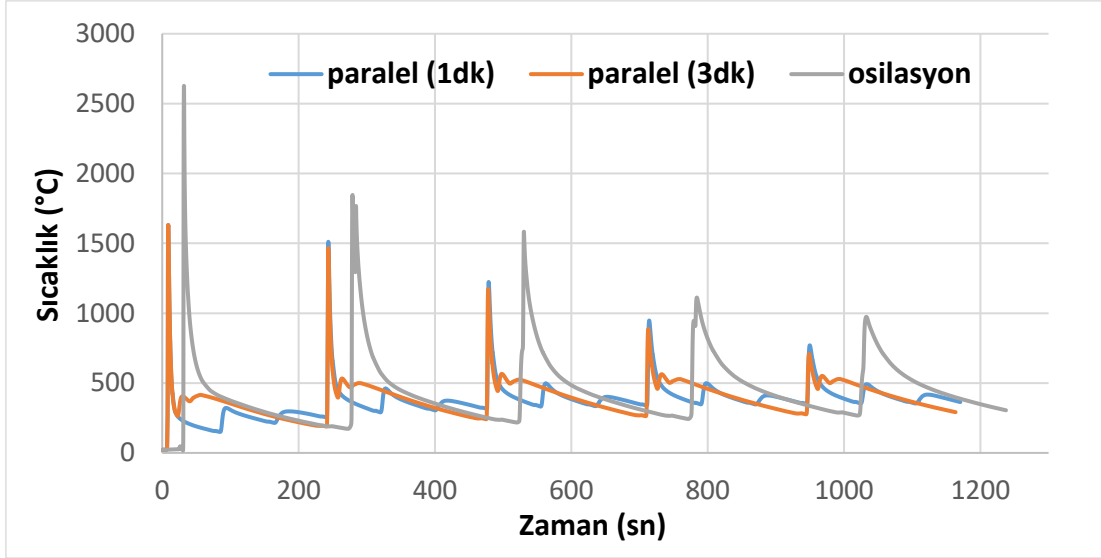
Paralel yığma yolu stratejisinde, soğuma süreleri her dikişten sonra 1 dakika ve her katmandaki üç dikişten sonra 3 dakika olacak şekilde iki analiz yapılmıştır. Osilasyon yığma yolu stratejisinde ise karşılaştırma amacı ile her katman sonunda 3 dakika soğuma süresi verilerek analiz yapılmıştır. Her üç analiz sonucunda 5. katman soğuma süresi sonunda sıcaklık dağılımları Şekil 5.16’de görülmektedir. Paralel yığma yolunda her dikiş sonunda 1 dakika beklenmesi ile 3 dikiş sonunda (1 katman) 3 dakika beklenmesi sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Her dikiş sonunda 1 dakika beklenmesi durumunda daha fazla ısı birikmesi olduğu sıcaklıkların yüksekliğinden ve geniş bir alana yayıldığından dolayı anlaşılmaktadır. Bu duruma tek dikiş yığma sonrası, soğuma süresi boyunca ısı kaçışının sadece tek bir katman üzerinden olması sebep olmaktadır. Buradaki ısı kaçışı üç dikiş sonrası geniş hacimdeki ısı kaçışına göre daha az olmuştur (Şekil 5.16a-b). Osilasyon yığma stratejisi ile katman sonunda 3 dakika beklenen paralel yığma stratejisi sıcaklık dağılımları birbirine benzemektedir. Bunun sebebi ısı kaçışı için kullanılan hacmin her iki durumda da aynı

olmasıdır. Osilasyon yığma yolunda, sıcaklık değerleri kaynak yolunun uzaması ile giren ısıнын artması sebebiyle daha yüksek olmuştur.



Şekil 5.16. Bitişik dikiş sıcaklık dağılımları a) paralel (3dk) b) paralel (1dk) c) osilasyon

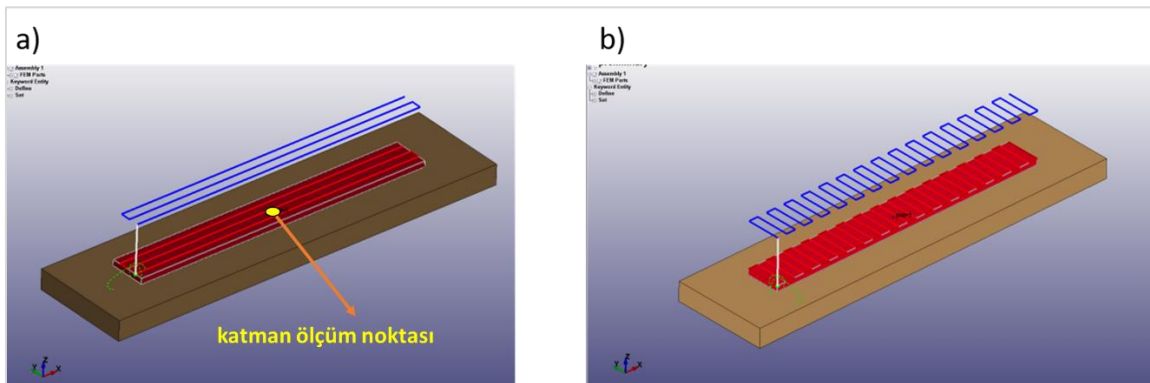
Her üç analizde ilk katmanların orta noktasından alınan (Bkz. Şekil 5.15) sıcaklık zaman eğrileri Şekil 5.17’de görülmektedir. Osilasyon yığma yolunda ısı kaynağı kenardaki ölçüm noktasına daha fazla yaklaştığı için zirve sıcaklıklar paralel yığma yoluna göre daha yüksek olmuştur. Aynı kaynak hızına rağmen osilasyon yığma yolunda zirve sıcaklıklar yolun uzunluğundan dolayı daha geç gerçekleşmiştir. Katmanlar arası sıcaklıklar karşılaştırıldığında her dikiş sonrası 1 dakika beklenen paralel yığma yolu katman sıcaklıklarının katman sonrası 3 dakika beklenen paralel ve osilasyon yığma yoluna göre yüksek olduğu görülmektedir. Osilasyon ve paralel katman sonu 3 dakika bekleme süreli katmanlar arası sıcaklıklar karşılaştırıldığında yüksek ısı girdisi nedeni ile osilasyon yığma yolunda katmanlar arası sıcaklık daha yüksek gerçekleşmiştir. Osilasyon yığma yolunda paralel yığma yoluna göre soğumanın daha yavaş olduğu görülmüştür.



Şekil 5.17. Paralel (1dk, 3dk) ve osilasyon yığma yolu birinci katman sıcaklık zaman eğrileri

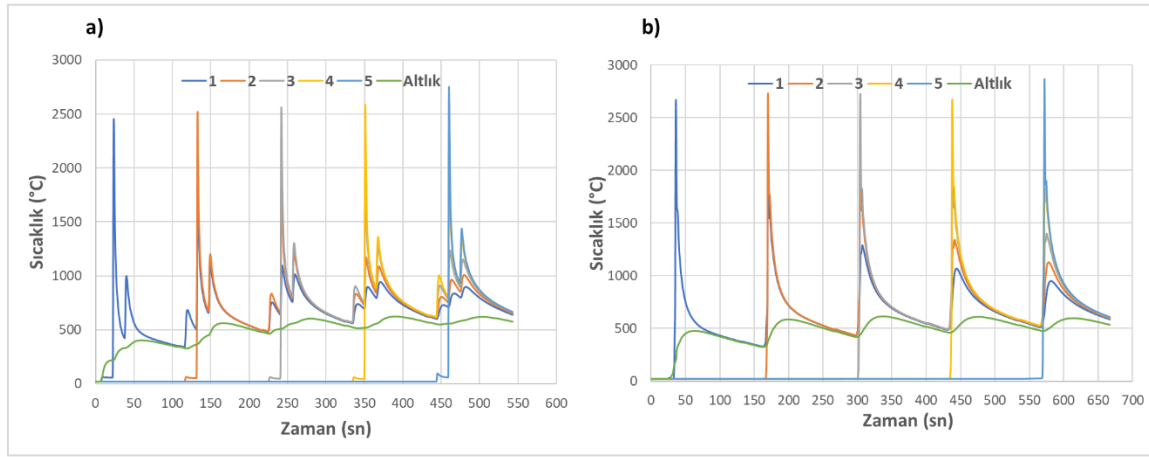
5.8.2. Boyuna ve enine osilasyon yığma stratejisi

Önceki bölümde enine osilasyon ve paralel yığma stratejisi karşılaştırılmıştı. Bu bölümde osilasyon yığma stratejisi boyuna ve enine osilasyon stratejisi şeklinde ayrılarak karşılaştırılmıştır. Bu amaçla boyuna ve enine osilasyon yığma stratejileri ile oluşturulan 5 katmanlı modellerin ilk katmanları ve yığma stratejileri sırasıyla Şekil 5.18a ve b’de görülmektedir. Her iki stratejide de aynı kaynak parametreleri kullanılmış ve 1 dakika soğuma süresi belirlenmiştir. Her katman bir önceki katmanın bittiği yerden başlatılmıştır. Bitişik kaynak adımı aralığı 5 mm olarak belirlenmiştir.



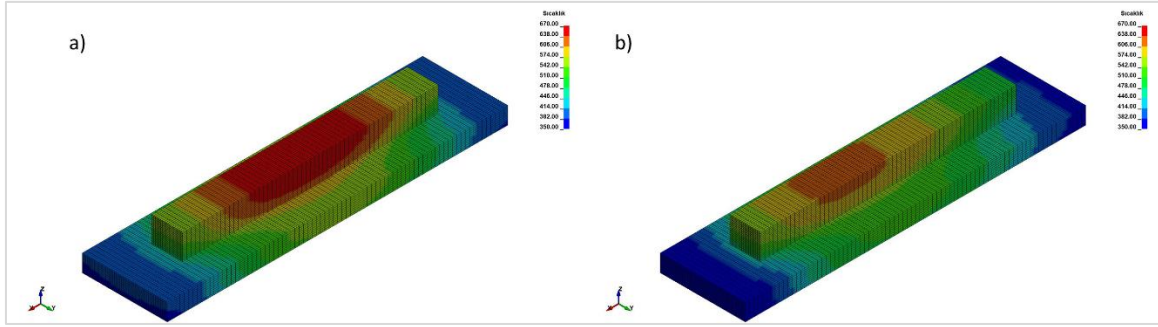
Şekil 5.18. Osilasyon bitişik dikiş yığma stratejisi a) boyuna b) enine

Analizler sonucunda her katmanın ortasından alınan sıcaklık zaman profilleri Şekil 5.19'deki gibi karşılaştırılmıştır. Genel olarak tek dikiş duvara göre bu duvarların daha karmaşık sıcaklık profillerine sahip olduğu görülmüştür. Boyuna osilasyon yığma yollu duvarda, ısı kaynağı ölçüm noktasından daha fazla geçtiği için enine osilasyona kıyasla daha fazla belirgin zirve sıcaklık noktası görülmüştür. Isı kaynağı aynı noktaya farklı zamanlarda üç kez uğramıştır. Osilasyon yığma yolunda bu durum sadece bindirme sırasında gerçekleşmiştir. Boyuna osilasyon sırasında ölçüm noktası bir katmanda ilk geçişte aktif olmadığı için diğer katmanın başlangıcında üçüncü kez zirve sıcaklığa ulaşmıştır. Katmanlar arası sıcaklığın boyuna osilasyon yığma yolu ile daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 5.19. Osilasyon bitişik dikiş sıcaklık profilleri a) boyuna b) enine

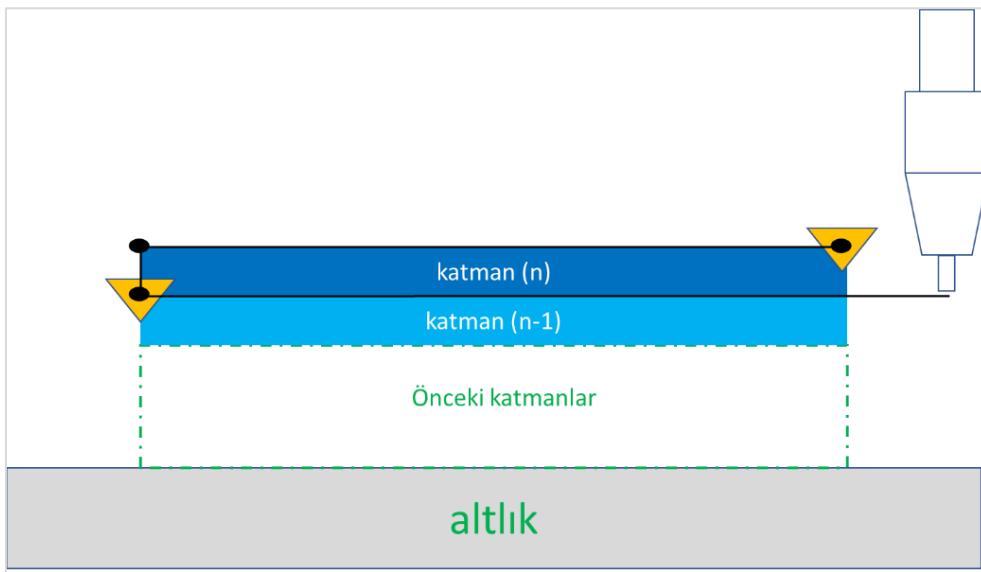
Boyuna ve enine osilasyon yığma yolu 5. katman soğuma süresi sonunda sıcaklık dağılımları sırasıyla Şekil 5.20a ve b'de verilmiştir. Boyuna osilasyon yığma yolunda sıcaklığın daha yüksek ve geniş alana yayıldığı görülmüştür. Bu durum daha fazla ısı birikmesi nedeni ile oluşmuştur. Enine yığma yolu stratejisinde aynı kaynak ilerleme hızı ile ısı kaynağı daha fazla yol gittiği için katmana verdiği ısı fazla olmasına rağmen boyuna osilasyonda daha fazla ısı birikmesi gerçekleşmiştir. Enine osilasyon yığmada katman genişliğinin tek seferde oluşturulması ısı iletimini artırarak ısı kaçışını arttırmıştır.



Şekil 5.20. Sıcaklık dağılımları a) boyuna b) enine osilasyon stratejisi

5.9. Isı Modelinin Katmanlar Arası Soğuma Süresi Tahmininde Kullanılması

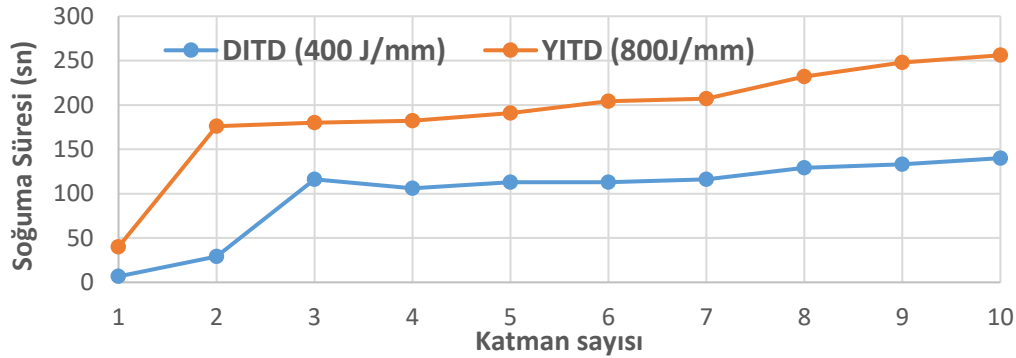
Parça üretiminde katman sayısı arttıkça katmanlar arası sıcaklığın sürekli artarak yüksek sıcaklıklara ulaşması parça geometrisi ve mikro yapıyı olumsuz etkilemektedir. Bu durumun önüne geçebilmek amacıyla katmanlar arası sıcaklığın ısı modeli yardımı ile sabit tutularak bekleme süresinin dinamik bir şekilde belirlenmesi planlanmıştır. Soğuma modelinde arkın bittiği noktadaki düğüm noktası katmandaki en sıcak nokta olduğu için modelde kontrol noktası olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.21). Yığma yolu bitiş noktaları her katmanda yer değiştirdiğinden noktaların yerleri de buna göre değiştirilmiştir. Çalışmada kullanılan kaynak teli için üreticinin önerdiği katmanlar arası sıcaklık, çoklu pasolu kaynakta 200 °C'dir. Bu noktada sıcaklık 200 °C'nin altına indiğinde analizin bitirilmesi için yazılım içerisinde bir komut yazılmıştır. Karbon çeliği ile yapılan bir çalışmada bu değer 300 °C olarak belirlenmiştir [91].



Şekil 5.21. Modelde katmanlar arası sıcaklık kontrol noktaları yerlerinin gösterimi

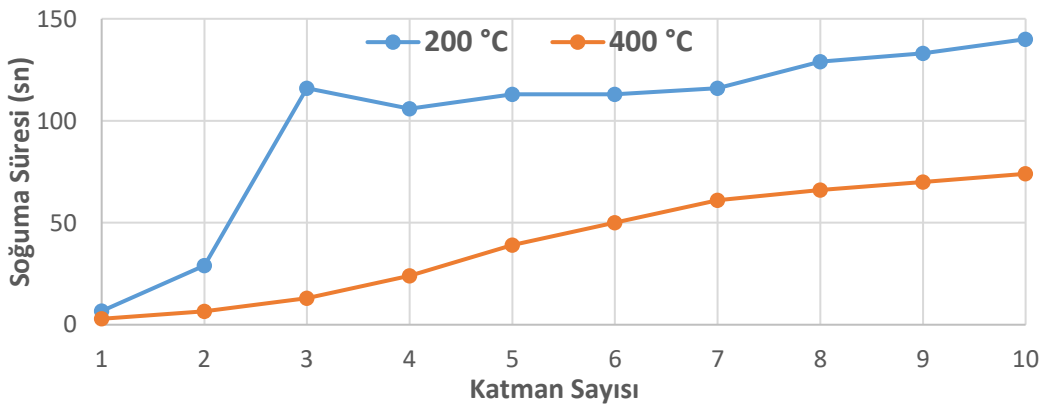
5.9.1. Düşük ve yüksek ısı tek dikiş duvarlar

Modele girilen komut ile birlikte daha önce 60 saniye soğuma süresi verilerek yapılan DITD ve YITD duvarların katmanlar arası sıcaklığı 200 °C olarak belirlenerek bu sıcaklığa ulaşana kadar her katmanda ne kadar beklenileceği Şekil 5.22’de görüldüğü gibi analiz edilmiştir. Bu durumda katman sıcaklığının istenilen sıcaklığa gelmesi için beklenen süre her iki ısı girdisinde ısı birikmesi nedeni ile artmaktadır. Özellikle 7. katmandan sonra altlıktan uzaklaşıp iletim ile transferi azaldıktan sonra soğuma süresinde hızlı bir artış olmuştur. İlk katmanlarda soğuma süresinin düşük olmasının sebebi soğuk altlık etkisi ile ısı iletiminin yüksek olmasıdır. DITD duvara kıyasla YITD duvarda iki katına çıkarılan ısı girdisi ile soğuma süresinin 5. katman sonrası ortalama %80 arttığı görülmüştür.



Şekil 5.22. Sabit katmanlar arası sıcaklıkta soğuma süresinin değişimi

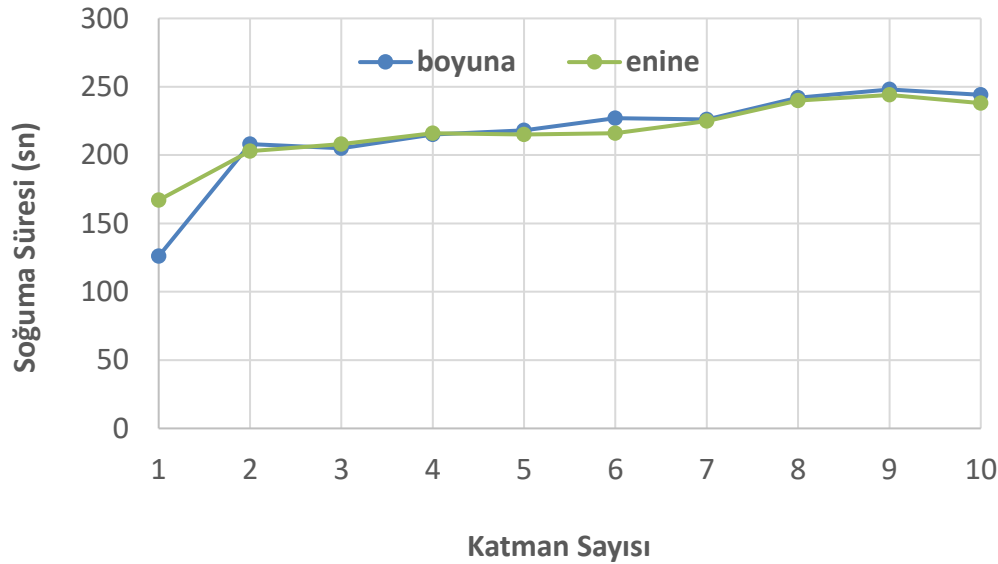
Katmanlar arası sıcaklığın ulaşması gereken sıcaklık 200 °C yerine 400 °C seçildiğinde soğuma süresinin 7. katmandan sonra ortalama %47 oranında azaldığı görülmüştür (Şekil 5.23).



Şekil 5.23. Düşük ısı girdili duvarda 200 °C ve 400 °C sabit katman sıcaklıkları için bekleme süreleri

5.9.2. Bitişik dikiş duvarlarda soğuma süresi hesaplanması

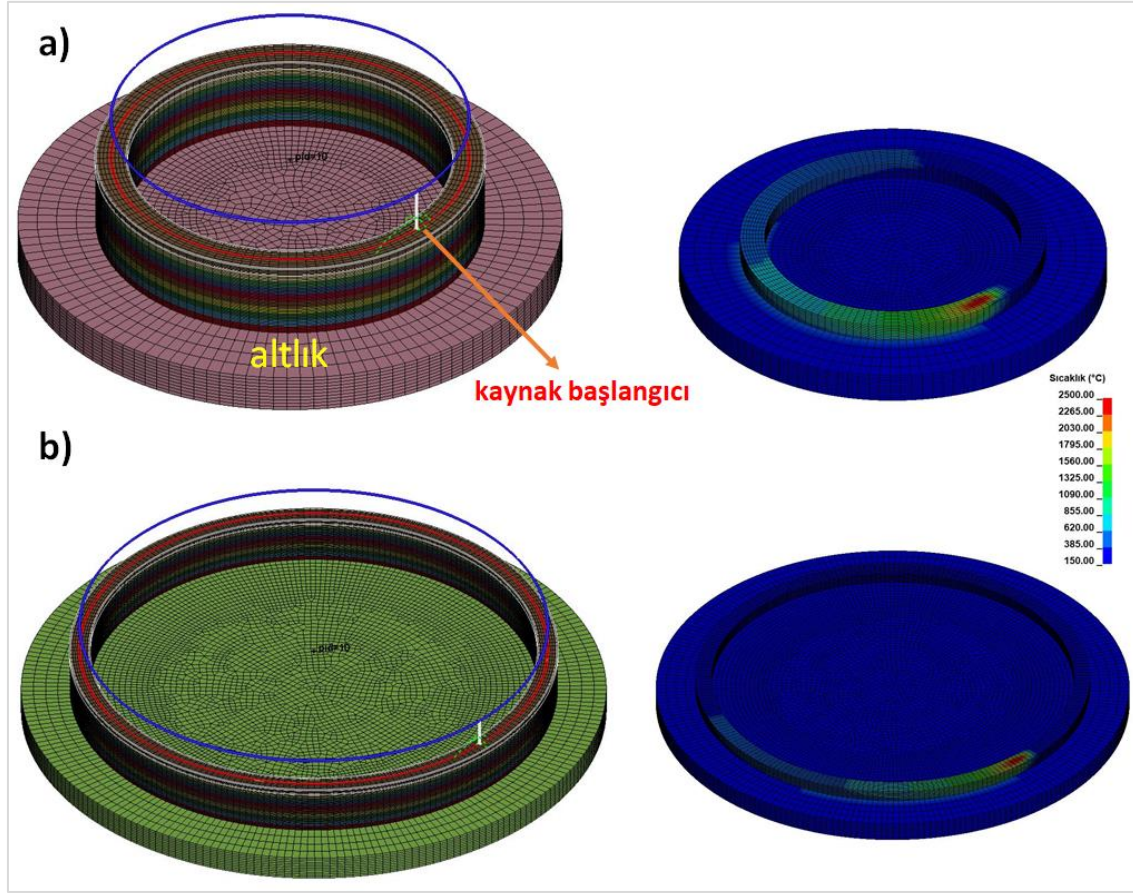
Bölüm 5.8.2’de sıcaklık zaman grafikleri verilen enine ve boyuna osilasyon yığma yollu bitişik dikiş duvarların her katman sonrası katmanlar arası sıcaklığının 200 °C’ye ulaşana kadar beklenen soğuma süreleri Şekil 5.24’te görülmektedir. Her iki duvarda ilk katmanda altlık etkisi ile soğuma süresi kısadır. Nitekim bu süre tek dikiş bir duvarın ilk katman soğuma süresinin çok üzerindedir. Boyuna osilasyon yığma yolu ile soğuma süresi bir miktar daha yüksek olsa da her iki stratejide de bekleme sürelerinin yakın olduğu görülmüştür. Sıcaklık dağılımları arasındaki farkın az olması bu sonucu desteklemektedir (Bkz. Şekil 5.20).



Şekil 5.24. Enine ve boyuna osilasyon yığma yollu duvarlarda soğuma süresi analizi

5.9.3. Dairesel bir geometride soğuma süresi hesaplanması

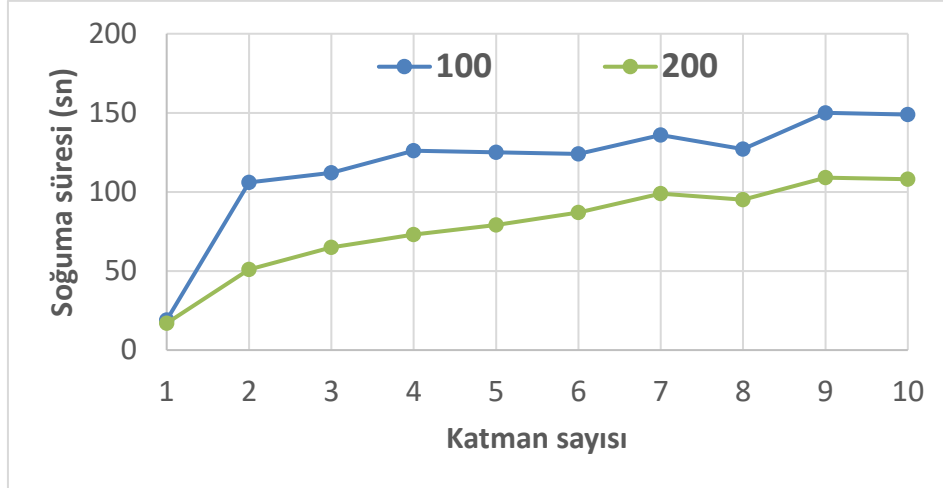
Çapları 100 ve 200 mm olan tek dikiş dairesel geometriler sırasıyla Şekil 5.25a-b’de görülmektedir. Her iki çap için düşük ısı girdili aynı parametre setleri ile analizler yapılmıştır. 200 °C sabit katmanlar arası sıcaklığa ulaşana kadar soğuma süreleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Son katman sonrası sıcaklık dağılımları yine Şekil 5.25a-b’de görülmektedir. Altlık çapları her iki durumda parça çapından 40 mm fazla olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 5.25. Dairesel geometriler ve son katman sonrası sıcaklık dağılımları a) 100, b) 200 mm çaplar

Geometrilerin her katmandaki soğuma süreleri Şekil 5.26’de görülmektedir. Çap 100 mm’den 200 mm’ye çıkartıldığında soğuma süresinin azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi artan çap ile birlikte yol ve ısı girdisi artmasına rağmen altlığın boyutunun ısı iletimini hızlandıracak şekilde daha fazla artmasıdır. İlk katman sonrası her iki parçada da altlığın soğutma etkisi ile hızlı bir soğuma sağlanmıştır. 7. katman sonrası yüksekliğin artması ve altlık etkisinin azalması ile soğuma süreleri dengeye gelmiştir.

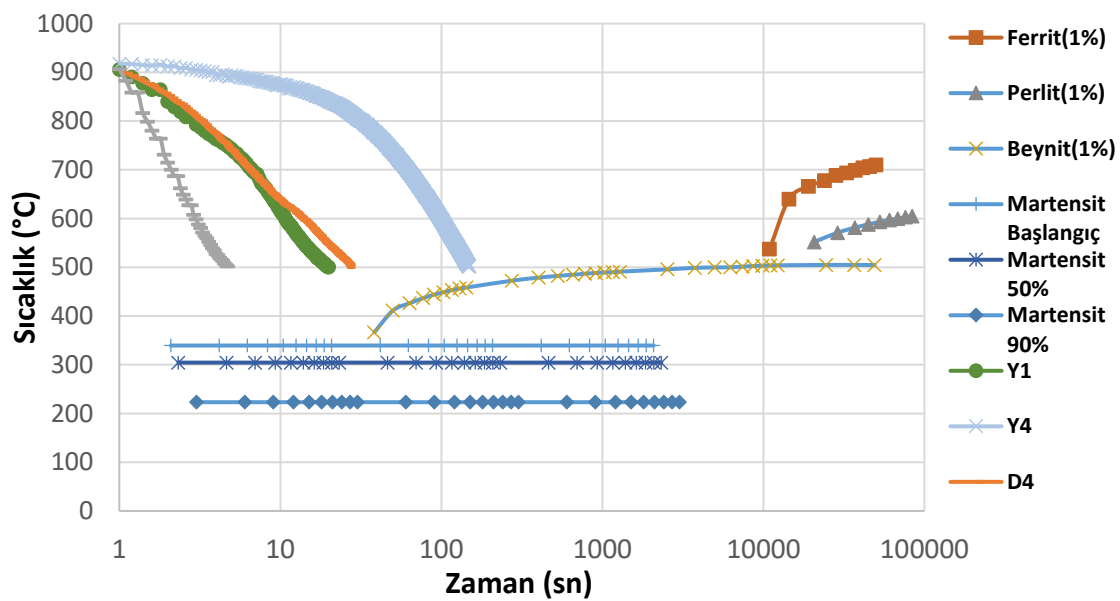
Son katmanların 150-2500 °C arası sıcaklık dağılımları incelendiğinde 100 mm çaplı geometride yüksek sıcaklığın parça üzerinde geriye doğru daha fazla yayıldığı görülmüştür. Bu ısı birikmesinin daha fazla olduğunu göstermiştir. 200 mm çaplı geometride ise parça yol boyunca soğuduğu ve geniş altlık etkisi ile yüksek sıcaklığın dağılımı daha az olmuştur (Şekil 5.25a-b).



Şekil 5.26. 100 ve 200 mm çaplı dairesel geometrilerin soğuma süreleri

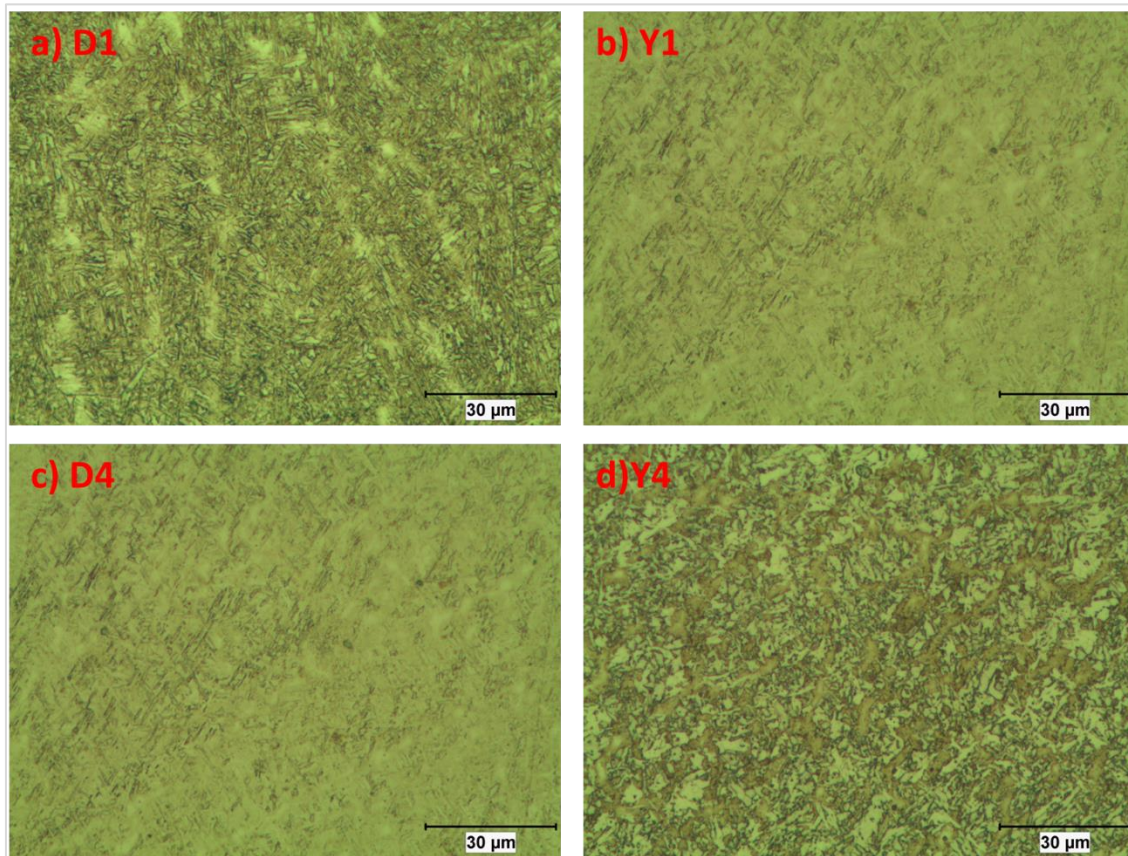
5.10. Soğuma Hızı ile Mikro Yapı Tahmini

Modelden elde edilen soğuma hızlarının SSD diyagramında kullanılarak proses öncesi mikro yapı tahmini ve kontrolü yapılması planlanmıştır. Bölüm 3.11.8’de anlatıldığı gibi kimyasal kompozisyon ile hesaplanan SSD diyagramının doğrulanması için bir ve dört katmanlı düşük ve yüksek ısı girdili dört adet duvar numunesinin kızılötesi kamera ile ölçülen soğuma hızı eğrileri Şekil 5.27’deki gibi SSD diyagramına yerleştirilmiştir. Sıcaklık ölçüm noktası tüm numuneler için ilk katman üzerinde tutulmuş ve ilk katmanlardaki mikro yapı değişimi incelenmiştir.



Şekil 5.27. SSD diyagramı üzerinde numunelerin 800-500 °C arası soğuma hızları

Diyagramdan düşük ısı ve bir katmanlı numunenin (D1) soğuma hızının en yüksek olduğu ($86\text{ }^{\circ}\text{C/sn}$) görülmektedir. Diyagrama göre bu soğuma hızı ile yapıda martensit oluşacağı anlaşılmıştır. Resim 5.3a'daki OM mikro yapı görüntüsünde görülen martensit yapı bu durumu doğrulamıştır. Bir katmanlı yüksek ısı (Y1) ve dört katmanlı düşük ısı (D4) girdili numunelerin mikro yapılarında benzer şekilde beynit görülmektedir (Resim 5.3b-c). Bu yapı görüntülerinin birbirine çok yakın olması SSD diyagramında görülen soğuma hızlarının birbirine çok yakın olmasından kaynaklanmıştır. Yüksek ısı girdili (Y4) numunenin 1. katmanındaki soğuma hızı ($2,8\text{ }^{\circ}\text{C/sn}$) hem yüksek ısı girdisi hem de ısı birikmesi ile diğer numuneleri göre düşük gerçekleşmiştir. Bu durum beynit oranını arttırarak martensit ile karışık farklı bir mikro yapı oluşumuna sebebiyet vermiştir (Resim 5.3d). Sonuç olarak ölçüm veya modelden elde edilecek bir soğuma hızı eğrisinin SSD diyagramında kullanılması ile mikro yapı tahmini ve kontrolü yapılabileceği görülmüştür.



Resim 5.3. Düşük ve yüksek ısı girdili bir ve dört katlı numunelerin 500x büyütme ile birinci katman OM görüntüleri, a) D1, b) Y1, c) D4, d) Y4

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasında WAAM prosesiyle parça üretimi esnasında malzemede oluşan ısıl davranış etkileri ile geometrik, mikro yapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında ilk olarak yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik malzeme ve CMT robotik WAAM sistemi kullanılarak farklı yığma stratejileri ve proses parametreleri ile parçalar üretilmiştir. TBH ve TBH/İH oranı ana proses parametreleri olarak seçilerek dikiş geometrisine ve mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Üretilen duvar geometrilerinde yığma stratejisinin etkisi incelenmiştir. İlk kısımda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- TBH/İH oranının ısı girdisini kontrol eden en önemli parametre olduğu görülmüştür. Isı girdisi ile dikiş genişliği, yüksekliği, nüfuziyet derinliği, nüfuziyet alanı ve tepe alanı karakteristik boyutları arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Araştırılan parametre aralığında ısı girdisi ile dikiş karakteristik boyutları arasındaki uyum derecesini gösteren R^2 değeri 0,8'in üzerindedir. TBH ve TBH/İH oranı ile dikiş geometrisi arasında istatistiksel bir ilişki olduğu görülmüştür. Çoklu regresyon analizi ile dikiş geometrisini tahmin etmeyi sağlayan bir model oluşturulmuştur.
- Tek dikiş duvarlardan yüksek ısı girdili duvarın yüzey dalgalılığının düşük ısı girdili duvara göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bitişik dikiş duvarlardan paralel yığma yolu stratejisinde yüzey dalgalılığının, osilasyon yığma yolu stratejisine göre daha fazla olduğu görülmüştür.
- Radyografik muayene sonucu aynı bekleme süresinde yüksek ısı girdili duvarda gözenek oluşumu gözlemlenmiştir.
- Tek katman dikişlerde sertlik ile ısı girdisi arasında ters orantılı bir ilişki görülmüştür. Duvar üretiminde sertlik dağılımı duvar yükseklik yönünde tekdüze bir dağılım göstermiştir.
- Tek dikiş duvarlarda yüksek ısı girdisinin, sünekliği %22 arttırdığı, akma ve çekme dayanımını sırasıyla %6 ve %4 düşürdüğü görülmüştür.
- Tek dikiş duvarlarda çekme ve akma dayanımları arasında yöne bağlı olarak önemli derecede bir fark görülmemiştir. Bunun yanında toplam ve tekdüze uzama değerlerinde anizotropiyi işaret eden %10 fark görülmüştür.
- Osilasyon bitişik dikiş duvar düşük akma dayanımı ve yüksek süneklik göstermiştir. Bu durum yığma stratejisindeki farkın mekanik özelliklere etki ettiğini göstermiştir.

- WAAM parçaları akma dayanımlarının kaynak teli sertifika değerine kıyasla %38 daha düşük olduğu görülmüştür. Çekme dayanımlarında önemli bir değişiklik görülmemiştir.
- Elde edilen dikiş geometrisi boyutları ile dairesel bir geometri üretimi için proses planlaması yapılmıştır. Bitişik dikiş ve paralel adımlarla üretilen parçada dikiş bindirme etkisi görülmüştür. Bu etki nedeni ile parçanın üst kısmında planlanandan fazla malzeme işlenmiştir. Parçanın homojen mikro yapı ve mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür.
- Tez çalışmasının diğer kısmında WAAM prosesinde geometri ve mekanik özellikleri üzerinde büyük etkisi olan ısı davranışı incelemek amacı ile sonlu elemanlar yöntemi ile bir model geliştirilmiş ve analizler yapılmıştır. Modelde kullanılan dikiş boyutları için tezin ilk kısmında elde edilen dikiş karakteristik boyut ölçümlerinden faydalanılmıştır. Oluşturulan model ısı çift ölçümü ile doğrulanmıştır. Bu kısımda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.
- Modelde katman çözündürme zaman adımı 0,2 saniye olarak seçildiğinde hassas sonuç alınabileceği görülmüştür. Model ile deneysel ölçüm sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Modelin doğrulanması sırasında en etkili parametre olan altlık ile masa arasındaki eş değer ısı transferi katsayısının $200 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ olduğu tespit edilmiştir.
- Katmanlar arası sıcaklığı ölçmek amacı ile temassız ölçüm aracı olan kızılötesi kamera kullanılmıştır. Bu kamera ısı çift ve düşük dalga boyu ile ölçüm yapan başka bir kamera ile doğrulanmıştır. Doğrulama sonucunda kamera yayınlılık katsayısının $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ altı sıcaklıklar için 0,84 ve üstü için 0,475 seçilebileceği tespit edilmiştir.
- Sayısal analizi yapılan 5 katmanlı bir duvarda katman orta noktalarının ısı çevrimleri incelendiğinde ısı birikmesi ile katmanların zirve ve soğuma sonrası sıcaklıklarının arttığı görülmüştür. Aynı katmandaki soğuma hızı yeni katmanlar eklendikçe düşmüştür. Yeni katmanlar eklenirken alt katmanların ısınma sıcaklığı düşmüş, fakat en üst katmandan 3 katman aşağıda sıcaklık östenitleşme sıcaklığı olan $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerine çıkmıştır. Bu durum faz değişimlerinin 3 katman aşağıya kadar tekrar ettiğini göstermiştir. Ayrıca yeni katman eklenirken bir önceki 2 katmanın sıcaklığını da ergime sıcaklığına getirmiştir.
- WAAM prosesinde sıcaklık alanı değişimleri incelendiğinde katman sayısı arttıkça ısı birikimi nedeni ile her katman bitiminde sıcaklığın katman arkasına doğru ve altlıkta yayılarak etki alanını arttırdığı görülmüştür.

- Düşük ve yüksek ısı girdili tek dikiş duvarların analizinde ısı girdisi iki kat artırıldığında duvarların aynı katmanları arası sıcaklık artışı, 1.katmanda %72'den başlayarak ve ısı dengesinin sağlanması ile 10. katmanda %46 olmuştur. Isınma ve soğuma hızları düşük ısı girdisinde daha yüksek olmakla birlikte katman sayısı arttıkça düşmüştür.
- Katman sayısı arttıkça duvar yüksekliği boyunca sıcaklık gradyanının düştüğü görülmüş ve altlığa doğru ısı iletiminin azaldığı sonucuna varılmıştır. Yüksek ısı girdili duvarda sıcaklık gradyanının düşük ısı girdili duvara göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.
- Katmanlar arası soğuma süresi arttıkça katmanlar arası sıcaklık düşmüştür. Hiç soğuma süresi verilmeyen durum ile 1 dakika soğuma süreli durum arasında önemli bir sıcaklık farkı görülmüştür. Bu fark ısı birikmesi ile son katmanlara doğru artmış ve son beş katmanda ortalama %68 sıcaklık farkı bulunmuştur. Soğuma süresi arttıkça yeterli ısı kaçıışı ile katmanlar arası sıcaklığın artış hızı azalmıştır.
- Her boyutu iki kat arttırılan ve sekiz kat fazla hacme sahip olan bir altlığın katmanlar arası sıcaklığı ortalama olarak %58 oranında düşürdüğü görülmüştür.
- Paralel ve osilasyon bitişik dikiş yığma stratejileri karşılaştırıldığında paralel yığmada soğuma hızının daha yüksek olduğu görülmüştür. Paralel yığma stratejisi içerisinde katman sonrası yerine katman içerisinde soğuma süresi verilmesi ısı iletimini yavaşlatarak ısı birikimini ve sıcaklıkları arttırmıştır.
- Boyuna ve enine osilasyon bitişik dikiş ile yapılan analizlerde sıcaklık profillerinin daha karmaşık olduğu görülmüştür. Boyuna osilasyon yığma stratejisi, enine yığma stratejisine göre daha fazla ısı birikimine sebep olmuştur.
- Isıl model soğuma süresinin tahmin edilmesi için kullanılmıştır. Düşük ve iki katı kadar yüksek ısı girdisiyle yapılan 10 katmanlı duvar analizlerinde 200 °C katmanlar arası sıcaklık için bekleme süresinin %80 arttığı görülmüştür. Aynı ısı girdisi ile katmanlar arası sıcaklık 400 °C'ye çıkartıldığında soğuma süresi 7. katman sonrası ortalama %47 azalmıştır.
- Aynı katmanlar arası sıcaklık durumu için boyuna ve enine osilasyon yığma stratejileri ile yapılan bitişik dikiş duvarların soğuma sürelerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.
- Dairesel bir geometride artan çap ile birlikte soğuma süresinin aynı katmanlar arası sıcaklığa ulaşmak için büyüyen altlık etkisi ile düştüğü görülmüştür.
- Hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımı ile elde edilen sürekli soğuma dönüşüm diyagramına modelden elde edilen soğuma hızları yerleştirilerek mikro yapı ve mekanik

özelliklerin tahmininde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Soğuma hızları ölçülen numunelerin mikro yapıları incelenmiş ve diyagramın verdiği sonuçlar ile uyum sağladığı görülmüştür.

6.1. Katkı ve Öneriler

Bu tez çalışmasında WAAM prosesinde yüksek mukavemetli çelik malzeme kullanıldığında, proses parametreleri ve dikiş geometrisi arasında kurulan matematiksel ilişki ile 3 boyutlu geometriyi oluşturan kaynak dikişlerinin genişliği, yüksekliği ve nüfuziyet derinliği prosese başlamadan tahmin edilebilecektir. Aynı şekilde istenen dikiş geometrisine göre proses parametreleri belirlenebilecektir. Bu katkı ile çeşitli geometriler için proses planı ve kontrolü yapılabilecektir. Geliştirilen ısı model ile proses parametrelerinin ve yığma stratejilerinin iç yapı ve mekanik özelliklere etkisi tahmin edilebilecektir. İstenilen özelliklerde parçaların üretilmesi için gerekli parametreler ve yığma stratejileri proses planlama aşamasında seçilebilecek ve kontrol edilebilecektir. Aynı ısı model ile herhangi bir deneye ihtiyaç duymadan en uygun katmanlar arası soğuma süresinin seçilebilmesi sağlanacaktır.

Tez çalışmasında önerilen dikiş geometri tahmin yaklaşımı kullanılarak farklı parametre aralıkları, sistem ve malzemeler ile çalışmalar yapılabilir. Gelecek çalışmalar ile parametre aralığı genişletilerek tahmin aralığı arttırılabilir. Tez çalışmasında geliştirilen modelde sadece ısı analizler gerçekleştirilmiş ve model ısı olarak doğrulanmıştır. Gelecek bir çalışmada aynı model ısı mekanik olarak analiz edilerek ısı davranışın çarpılma ve artık gerilmeye olan etkileri araştırılabilir. Modelde farklı soğutma yöntemleri ile soğutmanın WAAM parçaları üzerindeki etkileri incelenebilir. Katmanlarda kısmi östenitleşme sıcaklığına çıkılması durumunda yeni SSD diyagramları hesaplanarak mikro yapı incelemelerine devam edilebilir. Mikro yapıda bulunan fazların hangi oranlarda bulunduğunu hesaplamak için detaylı iç yapı analizleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. American Society for Testing and Materials. (2012). *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing and Materials (ASTM), 1-3.
2. Williams S., Martina F., Addison A. C., Ding J., Pardal G., and Colegrove P. (2016). Wire + Arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32(7), 641–647.
3. Yilmaz O., and Uгла A. A. (2016). Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(10), 1781–1798.
4. Frazier W. E. (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917–1928.
5. Gaddes J. S. (2015). Parametric Development of Wire 3D Printing. Master Thesis, Auburn University, Auburn, Alabama, 6-44.
6. Gebel E., Şen A., ve Yilmaz O. (2019, Haziran). *Robot Kontrollü bir Eklemeli İmalat Sisteminin Geliştirilmesi*. Türkiye Robotbilim Konferansı, İstanbul.
7. Rodrigues T. A., Duarte V., Miranda R. M., Santos T. G., and Oliveira J. P. (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12(7), 1121–1162.
8. İnternet: ESAB Welding& Cutting, Handbook Metal Transfer Variations. URL: https://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig1_8.htm. Son Erişim Tarihi: 16.11.2020.
9. İnternet: Miller Electric Mfg. Co. (2018). Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW). URL: https://www.millerwelds.com/-/media/miller-electric/files/pdf/resources/mig_handbook.pdf. Son Erişim Tarihi: 16.11.2020.
10. Hunko W.S. (2018). Cold Metal Transfer-Gas Metal Arc Welding (CMT-GMAW) Wire + Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process Control Implementation. Doctoral Dissertation, Auburn University, Auburn, Alabama, 3-72.
11. Posch G., Chladil K., and Chladil H. (2017). Material properties of CMT—metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries. *Welding in the World*, 61(5), 873–882.
12. Selvi S., Vishvaksean A., and Rajasekar E. (2018). Cold metal transfer (CMT) technology - An overview. *Defence Technology*, 14(1), 28–44.
13. Kahraman F., Gençer M. G., Yolcu C., Kahraman Demirel A., ve Dilbaz M. E. (2018). Soğuk Metal Transfer (CMT) ve Darbeli Soğuk Metal Transfer (Darbeli CMT) Kaynak İşlemleri ile Birleştirilmiş AA5754 Alüminyum Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(59), 635–646.

14. Prado-Cerqueira J. L., Diéguez J. L., and Camacho A. M. (2017). Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM). *Procedia Manufacturing*, 13(1), 895–902.
15. Busachi A., Erkoyuncu J., Colegrove P., Martina F., and Ding J. (2015). Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications. *Procedia CIRP*, 37(1), 48–53.
16. Pan Z., Ding D., Wu B., Cuiuri D., Li H., and Norrish J. (2018). Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review. In Chen S, Zhang Y, Feng Z (Eds.), *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*. Springer, Singapore, 3–24.
17. Kazanas P., Deherkar P., Almeida P., Lockett H., and Williams S. (2012). Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(6), 1042–1051.
18. Ríos S., Colegrove P. A., Martina F., and Williams S. W. (2018). Analytical process model for wire + arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 21(1), 651–657.
19. Martina F., Williams S. W., and Colegrove P. (2013, August). *Design of an empirical process model and algorithm for the Tungsten Inert Gas wire+arc additive manufacture of Ti-6Al-4V components*. 24th International SFF Symposium - An Additive Manufacturing Conference, Austin, Texas.
20. Sequeira Almeida P. M., and Williams S. (2010, August). *Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT)*. 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, Austin, Texas.
21. Ding D., Shen C., Pan Z., Cuiuri D., Li H., Larkin N., and van Duin S. (2016). Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part. *Computer-Aided Design*, 73(1), 66–75.
22. Suryakumar S., Karunakaran K. P., Bernard A., Chandrasekhar U., Raghavender N., and Sharma D. (2011). Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing. *CAD Computer Aided Design*, 43(4), 331–344.
23. Xiong J., Zhang G., Gao H., and Wu L. (2013). Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(2), 417–423.
24. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., and Li H. (2015). A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 31(1), 101–110.
25. Ding J. (2012). *Thermo-mechanical Analysis of Wire and Arc Additive Manufacturing Process*. Doctoral Dissertation, Cranfield University, Cranfield, United Kingdom, 61–95.

26. Xiong J., Zhang G., and Zhang W. (2015). Forming appearance analysis in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(9–12), 1767–1776.
27. Xiong J., Li Y., Li R., and Yin Z. (2018). Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 252(1), 128–136.
28. Pickin C. G., Williams S. W., and Lunt M. (2011). Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(3), 496–502.
29. Zhang Y., Chen Y., Li P., and Male A. T. (2003). Weld deposition-based rapid prototyping: a preliminary study. *Journal of Materials Processing Technology*, 135(2–3), 347–357.
30. Michel F., Lockett H., Ding J., Martina F., Marinelli G., and Williams S. (2019). A modular path planning solution for Wire + Arc Additive Manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 60(1), 1–11.
31. Xu X., Ding J., Ganguly S., Diao C., and Williams S. (2019). Preliminary Investigation of Building Strategies of Maraging Steel Bulk Material Using Wire + Arc Additive Manufacture. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(2), 594–600.
32. Ma G., Zhao G., Li Z., Yang M., and Xiao W. (2019). Optimization strategies for robotic additive and subtractive manufacturing of large and high thin-walled aluminum structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5–8), 1275–1292.
33. Cunningham C. R., Flynn J. M., Shokrani A., Dhokia V., and Newman S. T. (2018). Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 22(1), 672–686.
34. Wu B., Pan Z., van Duin S., and Li H. (2019). Thermal Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing: Characteristics, Effects and Control. In Chen S, Zhang Y, Feng Z (Eds.), *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 3-18.
35. Wu B., Pan Z., Chen G., Ding D., Yuan L., Cuiuri D., and Li H. (2019). Mitigation of thermal distortion in wire arc additively manufactured Ti6Al4V part using active interpass cooling. *Science and Technology of Welding and Joining*, 24(5), 484–494.
36. Wu B., Pan Z., Ding D., Cuiuri D., Li H., and 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(1), 97–105.
37. Montevacchi F., Venturini G., Grossi N., Scippa A., and Campatelli G. (2018). Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique. *Additive Manufacturing*, 21(1), 479–486.
38. Ding J., Colegrove P., Mehnen J., Ganguly S., Almeida P. M. S., Wang F., and 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.

39. Yang D., Wang G., and Zhang G. (2017). Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography. *Journal of Materials Processing Technology*, 244(1), 215–224.
40. Wu B., Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H., Han J., and Fei Z. (2017). Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 250(1), 304–312.
41. Zhao H., Zhang G., Yin Z., and Wu L. (2011). A 3D dynamic analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(3), 488–495.
42. Xiong J., Li R., Lei Y., and Chen H. (2018). Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 251(1), 12–19.
43. Xiong J., Lei Y., and Li R. (2017). Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 126(1), 43–52.
44. Montevocchi F., Venturini G., Grossi N., Scippa A., and Campatelli G. (2018). Heat accumulation prevention in Wire-Arc-Additive-Manufacturing using air jet impingement. *Manufacturing Letters*, 17(1), 14–18.
45. Montevocchi F., Venturini G., Scippa A., and Campatelli G. (2016). Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process. *Procedia CIRP*, 55(1), 109–114.
46. Kok Y., Tan X. P., Wang P., Nai M. L. S., Loh N. H., Liu E., and Tor S. B. (2018). Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review. *Materials & Design*, 139(1), 565–586.
47. Yan F., Xiong W., and Faierson E. J. (2017). Grain structure control of additively manufactured metallic materials. *Materials*, 10(11), 1260.
48. Kou S. (2003). *Welding Metallurgy*, (Second Edition). Hoboken, USA: John Wiley & Sons Inc., 145-187.
49. Ji L., Lu J., Liu C., Jing C., Fan H., and Ma S. (2017). Microstructure and mechanical properties of 304L steel fabricated by arc additive manufacturing. *MATEC Web of Conferences*, 128(1), 03006.
50. Derekar K. S. (2018). A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium. *Materials Science and Technology*, 34(8), 895–916.
51. Baufeld B., Biest O. van der, Gault R., and Ridgway K. (2011). Manufacturing Ti-6Al-4V Components by Shaped Metal Deposition: Microstructure and Mechanical Properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 26(1), 012001.

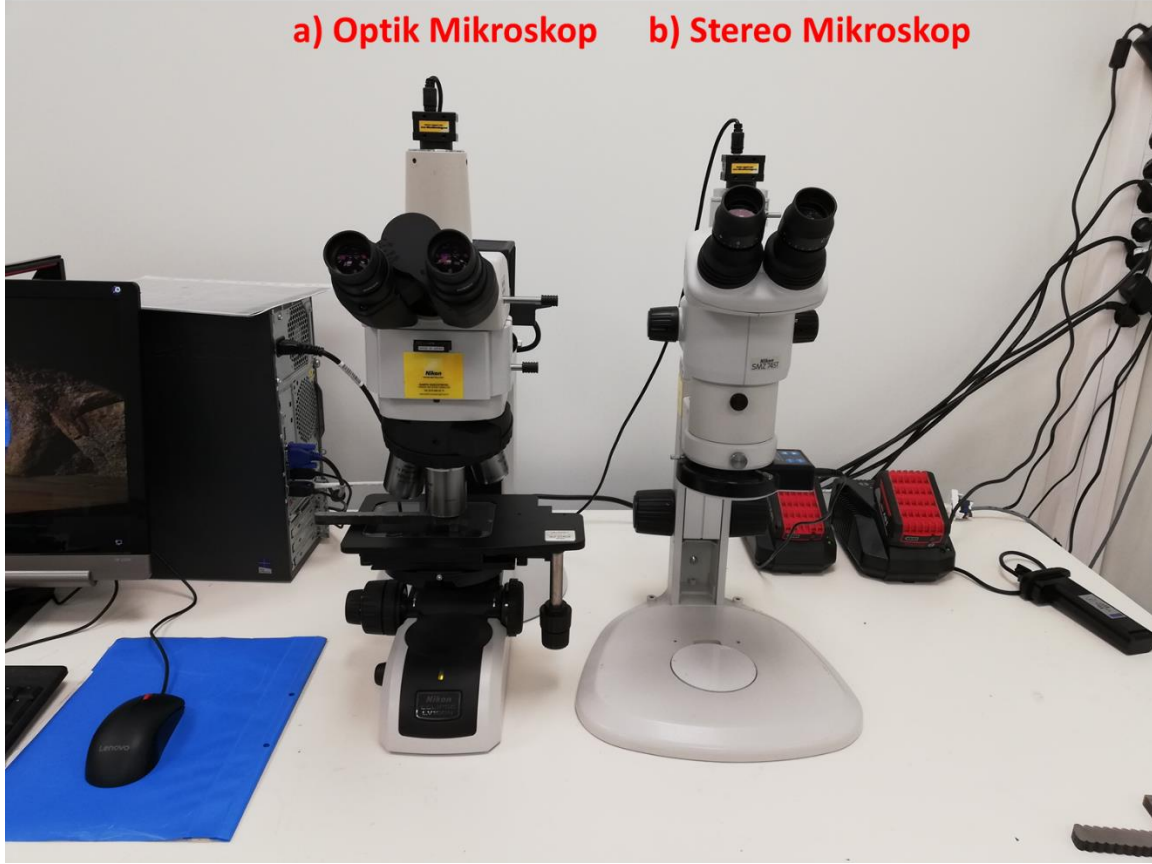
52. Clark D., Bache M. R., and Whittaker M. T. (2008). Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 203(1–3), 439–448.
53. Ding D., Pan Z., van Duin S., Li H., and Shen C. (2016). Fabricating Superior NiAl Bronze Components through Wire Arc Additive Manufacturing. *Materials*, 9(8), 652.
54. Liberini M., Astarita A., Campatelli G., Scippa A., Montevocchi F., Venturini G., Durante M., Boccarusso L., Minutolo F.M.C., and Squillace A. (2017). Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 62(1), 470–474.
55. Moore P., Addison A., and Nowak-Coventry M. (2019). Mechanical properties of wire plus arc additive manufactured steel and stainless steel structures. *Welding in the World*, 63(6), 1521–1530.
56. Haden C. V., Zeng G., Carter F. M., Ruhl C., Krick B. A., and Harlow D. G. (2017). Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties. *Additive Manufacturing*, 16(1), 115–123.
57. Lu X., Zhou Y. F., Xing X. L., Shao L.Y., Yang Q. X., and Gao S. Y. (2017). Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5–8), 2145–2154.
58. Prado-Cerqueira J., Camacho A., Diéguez J., Rodríguez-Prieto Á., Aragón A., Lorenzo-Martín C., and Yanguas-Gil Á. (2018). Analysis of Favorable Process Conditions for the Manufacturing of Thin-Wall Pieces of Mild Steel Obtained by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Materials*, 11(8), 1449.
59. Sridharan N., Noakes M. W., Nycz A., Love L. J., Dehoff R. R., and 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(1), 18–27.
60. Shassere B., Nycz A., Noakes M., Masuo C., and Sridharan N. (2019). Correlation of Microstructure and Mechanical Properties of Metal Big Area Additive Manufacturing. *Applied Sciences*, 9(4), 787.
61. Hu X., Nycz A., Lee Y., Shassere B., Simunovic S., Noakes M., Ren Y., and Sun X. (2019). Towards an integrated experimental and computational framework for large-scale metal additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 761(1), 138057.
62. Ali Y., Henckell P., Hildebrand J., Reimann J., Bergmann J. P., and Barnikol-Oettler S. (2019). Wire arc additive manufacturing of hot work tool steel with CMT process. *Journal of Materials Processing Technology*, 269(1), 109–116.
63. Rodrigues T. A., Duarte V., Avila J. A., Santos T. G., Miranda R. M., and Oliveira J. P. (2019). Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 27(1), 440–450.

64. Türk Standartları Enstitüsü. (2006). *Sıcak haddelenmiş yapı çelikleri-Bölüm 2: Alaşımsız yapı çeliklerinin genel teknik teslim şartları*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 3-25.
65. İnternet: ESAB OK Aristorod 89. URL: <https://www.esab.co.uk/gb/en/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/low-alloy-wires/ok-aristorod-89.cfm>. Son Erişim Tarihi: 16.11.2020.
67. Almeida P. M. S. (2012). *Process Control and Development in Wire and Arc Additive Manufacturing*. Doctoral Dissertation, Cranfield University, Cranfield, United Kingdom, 81-125.
68. Geng H., Li J., Xiong J., Lin X., Huang D., and Zhang F. (2018). Formation and improvement of surface waviness for additive manufacturing 5A06 aluminium alloy component with GTAW system. *Rapid Prototyping Journal*, 24(2), 342–350.
69. ASTM E8 / E8M-16a (2016). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1-27.
70. İnternet: Measure Temperature with Thermocouple Sensors, Dewesoft. URL: <https://dewesoft.com/daq/temperature-measurement-thermocouple-sensors>. Son Erişim Tarihi: 16.11.2020.
71. İnternet: Infrared Basics. URL: <https://www.optris.com.tr/infrared-basics>. Son Erişim Tarihi: 16.11.2020.
72. İnternet: Termal kamera için optik hesaplayıcı. URL: <https://www.optris.com.tr/optik-hesaplama>. Son Erişim Tarihi: 16.11.2020.
73. Parry L., Ashcroft I. A., and Wildman R. D. (2016). Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation. *Additive Manufacturing*, 12(1), 1–15.
74. Hu J., and Tsai H. L. (2007). Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(5–6), 833–846.
75. Goldak J., Chakravarti A., and Bibby M. (1984). A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*, 15(2), 299–305.
76. Deng D. (2009). FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects. *Materials & Design*, 30(2), 359–366.
77. Gilles P., El-Ahmar W., and Jullien J. F. (2009). Robustness analyses of numerical simulation of fusion welding NeT-TG1 application: “Single weld-bead-on-plate.” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86(1), 3–12.
78. Gery D., Long H., and Maropoulos P. (2005). Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 167(2–3), 393–401.
79. Lindgren L. E. (2001). Finite element modeling and simulation of welding. part 2: Improved material modeling. *Journal of Thermal Stresses*, 24(3), 195–231.

80. Shan X., Davies C. M., Wangsdan T., O'Dowd N. P., and Nikbin K. M. (2009). Thermo-mechanical modelling of a single-bead-on-plate weld using the finite element method. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86(1), 110–121.
81. Hu D., and Kovacevic R. (2003). Modelling and measuring the thermal behaviour of the molten pool in closed-loop controlled laser-based additive manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217(4), 441–452.
82. Michaleris P. (2014). Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes. *Finite Elements in Analysis and Design*, 86(1), 51–60.
83. Lindström P., Josefson B., Schill M., and Borrvall T. (2012, May). *Constitutive Modeling and Finite Element Simulation of Multi Pass Girth Welds*. NAFEMS NORDIC Conference, Gothenburg, Sweden.
84. Mughal M. P., Fawad H., and Mufti R. (2006). Finite element prediction of thermal stresses and deformations in layered manufacturing of metallic parts. *Acta Mechanica*, 183(1–2), 61–79.
85. Montevocchi F., Venturini G., Grossi N., Scippa A., and Campatelli G. (2017). Finite Element mesh coarsening for effective distortion prediction in Wire Arc Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 18(1), 145–155.
86. Rafieazad M., Ghaffari M., Vahedi Nemani A., and 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.
87. Plangger J., Schabhüttl P., Vuherer T., and Enzinger N. (2019). CMT Additive Manufacturing of a High Strength Steel Alloy for Application in Crane Construction. *Metals*, 9(6), 650.
88. Laghi V., Palermo M., Tonelli L., Gasparini G., Ceschini L., and Trombetti T. (2020). Tensile properties and microstructural features of 304L austenitic stainless steel produced by wire-and-arc additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9–10), 3693–3705.
89. Wang Z., Palmer T. A., and Beese A. M. (2016). Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia*, 110(1), 226–235.
90. Cao Y., Zhu S., Liang X., and Wang W. (2011). Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(3), 641–645.
91. Nycz A., Noakes M. W., Richardson B., Messing A., Post B., Paul J., Flamm J., and Love L. (2017, August). *Challenges in making complex metal large-scale parts for additive manufacturing: A case study based on the additive manufacturing excavator*. Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, Austin, Texas.

EKLER

EK- 1. Mikro ve makro incelemelerde kullanılan a) optik, b) stereo mikroskoplar ve mekanik özelliklerin incelenmesi için kullanılan c) mikro sertlik cihazı



EK- 2. DITD duvardan çıkarılan yatay ve dikey yönde çekme numuneleri



EK- 3. YITD duvardan çıkarılan yatay ve dikey yönde çekme numuneleri



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILDIZ, Ahmet Suat
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 28.01.1984, Mersin
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 531 291 94 54
 e-mail : ahmet.suat.yildiz@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Fachhochschule Ingolstadt / Otomotiv Mühendisliği	2009
Lisans	Çukurova Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2006
Lise	Mersin Yusuf Kalkavan Anadolu Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi
2010-2017	Man Türkiye A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Yayınlar

Yildiz A. S., Davut K., Koc B., and 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, 3391–3404.

Yildiz A. S., Koc B., and Yilmaz O. (2019, October). A Process Planning Study in Wire Arc Additive Manufacturing. Additive Manufacturing Conference Turkey (AMCTURKEY), İstanbul, Turkey.

Yildiz A. S., Koc B., and Yilmaz O. (2019, July). *Building strategy effect on mechanical properties of high strength low alloy steel in wire + arc additive manufacturing*. 72nd IIW Annual Assembly and International Conference, Bratislava, Slovakia.

Hobiler

Yüzme, Piyano, Gezi, Tarih



GAZİ GELECEKTİR..