



**ROBOTİK TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE
PARAMETRİK MODELLEME YAKLAŞIMIYLA TAKIM YOLU
GELİŞTİRİLMESİ**

Enes Furkan ARSLAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2025

ETİK BEYAN

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

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

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

Enes Furkan ARSLAN

08/09/2022

ROBOTİK TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE PARAMETRİK MODELLEME YAKLAŞIMIYLA TAKIM YOLU GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Enes Furkan ARSLAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2025

ÖZET

Tel ark eklemeli imalat (WAAM), kaynak teknolojilerine dayalı olarak metal parçaların katmanlı biçimde üretilmesini sağlayan bir üretim yöntemidir. WAAM süreci; üç boyutlu (3B) dijital bir modelin oluşturulması, bu modelin üretime uygun bir şekilde katmanlara ayrılması, her katman için takım yollarının oluşturulması, üretim sürecinin simüle edilmesi, takım yollarının makine diline dönüştürülmesi ve fiziksel üretimin gerçekleştirilmesi gibi çok aşamalı bir iş akışını içermektedir. Bu süreçte farklı yazılım araçlarının kullanılması, veri aktarımında uyumsuzlukların ortaya çıkmasına, bilgi kayıplarının yaşanmasına, yazılımlar arası entegrasyon sorunlarına ve lisans maliyetlerinin artmasına neden olmakta; bu da sürecin bütüncül yönetimini ve operasyonel esnekliğini sınırlamaktadır. Bu çalışmada, WAAM süreçlerini uçtan uca entegre şekilde yürütebilen parametrik bir modelleme altyapısı geliştirilmiştir. Grasshopper ortamında geliştirilen bu entegre yapı; dilimleme algoritması, takım yolu planlama stratejileri, robotik üretimin programlanması ve oluşturulan takım yolunun, geliştirilen son işlemci betiği aracılığıyla makine koduna dönüştürülmesi süreçlerini kapsamaktadır. Ayrıca üretim öncesi doğrulama amacıyla malzeme birikimini temsil eden hacimsel birikim simülasyonu da geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmalar, iki farklı 3B model üzerinde dijital ortamda test edilmiş; bu modellerden birisi fiziksel olarak üretilerek algoritmaların işlevselliği deneysel olarak doğrulanmıştır. Üretilen parçanın dış yüzeyleri, temassız 3B tarama yöntemi ile dijitalleştirilmiş, ardından tasarım ve simülasyon modelleri ile karşılaştırılarak yüzey deformasyonları analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, üretilen parçanın %94,83'lük kısmı tasarım modeliyle, %97,65'lik kısmı ise simülasyon modeliyle ± 1 mm tolerans aralığında örtüştüğü belirlenmiştir. Ayrıca, dijital radyografi yöntemiyle parçanın iç yapısı ve katmanlar arası birleşme kalitesi incelenmiştir. Gerçekleştirilen analizler ve incelemeler, geliştirilen parametrik modelleme altyapısının WAAM süreçlerinde etkin ve entegre bir üretim yaklaşımı sunduğunu göstermektedir.

Bilim Kodu : 91448

Anahtar Kelimeler : Tel ark eklemeli imalat, parametrik modelleme, takım yolu geliştirme, malzeme yığıma simülasyonu, yüzey deformasyon analizi

Sayfa Adedi : 114

Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TOOL PATHS DEVELOPMENT WITH PARAMETRIC MODELING APPROACH IN ROBOTIC WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Enes Furkan ARSLAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2025

ABSTRACT

The Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is a manufacturing method that enables the layer-by-layer production of metal components based on arc welding technologies. The WAAM workflow involves several interconnected steps, beginning with the creation of a three-dimensional (3D) model, slicing it into distinct layers, generating a toolpath, simulating the production process, converting the toolpath into machine-readable instructions, and concluding with the actual manufacturing. While various software applications are available to execute specific steps within this workflow, the use of separate tools often leads to incompatibilities in data transfer, loss of information, integration challenges among software platforms, and increased licensing costs. In this study, a parametric modeling framework has been developed to facilitate the end-to-end integration of WAAM processes. The integrated framework, developed in the Grasshopper, encompasses a slicing algorithm, toolpath planning strategies, robotic manufacturing programming, and the conversion of the generated toolpath into machine code through the developed post-processor script. Furthermore, a material deposition simulation has been implemented to enable pre-manufacturing verification of the deposition geometry. The developed algorithms were digitally tested on two distinct 3D models, one of which was fabricated to experimentally validate the functionality of the developed framework. The outer surfaces of the produced component were digitized using a non-contact 3D scanning technique, and surface deformation analyses were conducted by comparing the scanned data with both the original design model and the simulated deposition model. According to the analysis results, 94,83% of the manufactured part's surface was found to be within a ± 1 mm tolerance range compared to the design model, while 97,65% overlapped within the same tolerance range when compared to the simulation model. In addition, the internal structure and interlayer bonding quality of the fabricated component were assessed using digital radiography. The comprehensive evaluations and analyses confirm that the developed parametric modeling infrastructure offers an effective and fully integrated approach for WAAM process planning and execution.

Science Code : 91448

Key Words : Wire arc additive manufacturing, parametric modeling, toolpath development, material deposition simulation, surface deformation analysis

Page Number : 114

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgi, deneyim ve değerli yönlendirmeleriyle bana rehberlik eden, akademik gelişimime katkı sağlayan ve her aşamada desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam kapsamında gerçekleştirdiğim üretim sürecinde sağladıkları teknik altyapı, bilgi paylaşımı ve değerli katkılarından ötürü MetalWorm Eklemeli İmalat Teknolojileri A.Ş. firmasına ve kıymetli çalışanları Nevzat BOL, Barış DAMGACI ile Yunus Berk AYAZ'a teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde olduğu gibi, bu süreçte de manevi desteklerini her daim hissettiğim, sabır ve anlayışlarıyla bana destek veren, kazandırdıkları değerlerle bugünlere gelmemi sağlayan sevgili annem Saliha ARSLAN ile sevgili babam Şakir ARSLAN'a sonsuz şükran ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam süresince ne olursa olsun her koşulda yanımda olarak, moral ve motivasyonun çok ötesinde her türlü desteğini esirgemeyen; karşılaştığım güçlüklerin aşılmasında en önemli pay sahibi olan, inancını ve desteğini bir an olsun eksiltmeyen, gösterdiği sabır, anlayış ve fedakârlığın yanı sıra her an hissettirdiği manevi varlığıyla bana güç katan Melisa GÖZET'e en derin şükran, minnet ve sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	7
2.1. WAAM'ın Tarihsel Gelişimi	8
2.2. WAAM Prosesinin Çalışma Prensibi.....	11
2.3. WAAM Prosesinde Kullanılan Isı Kaynakları	12
2.4. WAAM Prosesinde Kullanılan Metaller.....	14
2.5. WAAM Prosesinde Takım Yolu Planlaması	16
2.5.1. Takım yolu desenleri ve stratejileri.....	18
2.5.2. Kaynak Dikişinin Modellenmesi	27
2.5.3. Proses parametrelerinin kaynak dikişi geometrisi üzerindeki etkileri.....	36
2.6. Robotik WAAM Yönteminde Parametrik Modelleme Yaklaşımı.....	37
2.7. WAAM Süreçlerinde Farklı Yazılımların Kullanılması.....	44
3. PARAMETRİK TAKIM YOLU ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ	47
3.1. Yazılım Altyapısının Belirlenmesi.....	47

	Sayfa
3.2. Dilimleme Algoritmasının Geliştirilmesi	49
3.3. Takım Yolu Planlaması ve Oluşturulması	51
3.4. Robotik Üretimin Programlanması	58
3.5. Malzeme Yığılma Simülasyonunun Oluşturulması.....	64
4. GELİŞTİRİLEN ALGORİTMALARIN UYGULANMASI.....	67
4.1. Parçaların Tasarımı ve Yığılma Stratejilerinin Belirlenmesi	67
4.2. Dilimleme Algoritmasının Uygulanması	68
4.3. Tasarlanan Parçalar İçin Takım Yollarının Planlanması	69
4.4. Tasarlanan Parçalar İçin Robotik Üretimin Programlanması	70
4.5. Malzeme Yığılma Simülasyonun Gerçekleştirilmesi ve Görsel Doğrulama	72
5. ENDÜSTRİYEL WAAM UYGULAMASI	75
5.1. WAAM Sistemi ve Proses Parametreleri.....	75
5.2. Model A İçin WAAM Uygulaması	77
6. DEFORMASYON ANALİZİ VE SONUÇLARIN TARTIŞILMASI...	81
6.1. Ölçüm Yöntemi ve Donanım.....	81
6.2. Üretilen Parçanın Tasarlanan Model İle Boyutsal Karşılaştırılması	81
6.3. Üretilen Parçanın Malzeme Yığılma Simülasyonundan Elde Edilen Model İle Boyutsal Karşılaştırılması	91
6.4. Deformasyon Analizi Sonuçlarının Tartışılması	94
6.4. Dijital Radyografi Yöntemi İle İç Yapı Kalitesinin Değerlendirilmesi	102
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	103
KAYNAKLAR	105
ÖZGEÇMİŞ	113

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Yığma desenlerinin avantajları ve dezavantajları.....	27
Çizelge 2.2. Üç farklı kaynak dikişi modeli ve bunlara ilişkin dikiş yüksekliği, dikiş genişliği ve dikiş kesit alanı değerleri	32
Çizelge 2.3. Parametrik modelleme yaklaşımını temel alan bazı akademik çalışmalar .	42
Çizelge 5.1. ER70S-6 kaynak telinin kimyasal bileşimi	76
Çizelge 5.2. Üretimde kullanılan proses parametreleri ve değerleri.....	76
Çizelge 5.3. Model A'nın üretim sürecine ait ortalama proses verileri ve zamanlama bilgileri.....	79
Çizelge 6.1. Tüm parçanın yüzey deformasyon analizine ait istatistiksel değerlendirme sonuçları	84
Çizelge 6.2. 1-26. katmanlar arası yüzey deformasyon analizine ait istatistiksel değerlendirme sonuçları	87
Çizelge 6.3. 27-79. katmanlar arası yüzey deformasyon analizine ait istatistiksel değerlendirme sonuçları	88
Çizelge 6.4. 80-140. katmanlar arası yüzey deformasyon analizine ait istatistiksel değerlendirme sonuçları	89
Çizelge 6.5. Simülasyon modeli için yüzey deformasyon analizine ait istatistiksel değerlendirme sonuçları	93

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. WAAM sisteminin şematik diyagramı	11
Şekil 2.2. WAAM yönteminin fiziksel prosesi.....	12
Şekil 2.3. GTAW kaynak teknolojisinin şematik diyagramı	13
Şekil 2.4. GMAW kaynak teknolojisinin şematik diyagramı	13
Şekil 2.5. PAW kaynak teknolojisinin şematik diyagramı	14
Şekil 2.6. Robotik WAAM prosesinin temel aşamaları.....	17
Şekil 2.7. Robotik WAAM prosesinde kullanılan takım yolu desenleri için örnekler (a) raster, (b) zikzak, (c) kontur, (d) spiral, (e) hibrit, (f) orta eksen dönüşümü.....	19
Şekil 2.8. Düzensiz bir kaynak dikişi profilinin şematik kesit görünümü	20
Şekil 2.9. 40 mm/s nominal bir hızda doğrusal bir yörünge boyunca arkın açık ve kapalı durumlarda robotun hız profili.....	20
Şekil 2.10. CMT prosesi sırasında kaydedilen kaynak akımı ve gerilim dalga formları	21
Şekil 2.11. Kontur tabanlı takım yolu kullanımında karşılaşılan boşluk hataları (a) iç bölgelerde, (b) keskin köşelerde.....	24
Şekil 2.12. Farklı takım yolu yaklaşımlarının biriktirme sonuçlarının karşılaştırılması. Siyah çizgiler parçanın geometrik sınırlarını, yeşil çizgiler takım yollarını, gri alanlar ise biriktirilen bölgeleri temsil etmektedir. (a) kontur tabanlı takım yolu ile sınır doğruluğu yüksek ancak iç bölgelerde boşluk oluşumu, (b) orta eksen dönüşümü tabanlı takım yolu ile boşluksuz biriktirme ancak sınır bölgelerinde fazla malzeme birikimi, (c) uyarlanabilir orta eksen dönüşümü tabanlı takım yolu ile boşluksuz ve yüksek sınır doğruluğuna sahip biriktirme	26
Şekil 2.13. Tekil kaynak dikişinin kesit görünüşü	29
Şekil 2.14. Deneysel olarak elde edilen kaynak dikişi kesit profiline ait yükseklik değerlerinin, (a) Gauss fonksiyonu, (b) lojistik fonksiyonu, (c) parabol fonksiyonu, (d) sinüs fonksiyonu kullanılarak yapılan eğri uydurma sonucu elde edilen modeller ile karşılaştırılması.....	30
Şekil 2.15. Kaynak dikişi kesit alanının gerçek ve tahmin edilen değerleri için bağıl hata karşılaştırması	31
Şekil 2.16. Tel besleme hızının ilerleme hızına oranının bağıl hata üzerine etkisi	31

Şekil	Sayfa
Şekil 2.17. Örtüşen kaynak dikişlerinin şematik gösterimi	32
Şekil 2.18. Farklı ardışık dikiş merkez mesafelerinin katman yüzey geometrisi üzerindeki etkileri: (a) yetersiz örtüşme, (b) kısmi örtüşme, (c) optimum örtüşme, (d) aşırı örtüşme durumu	33
Şekil 2.19. Teğetsel örtüşme modeli kapsamında tanımlanan kritik vadi alanı ve örtüşme alanının şematik gösterimi	36
Şekil 2.20. WAAM proses aşamalarında kullanılan bazı yazılım araçları	45
Şekil 3.1. Stadyum kesit profili ve geometrik tanımı	65
Şekil 6.1. Yüzey deformasyonu verilerinin istatistiksel dağılımını temsil eden normal dağılım eğrisi	85
Şekil 6.2. Alan parametresi nedeniyle hedef noktaya yaklaşımadan yön değiştirme hareketinin şematik gösterimi	100

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. WAAM yöntemi ile üretilen endüstriyel parça örnekleri (a) yakıt ve gaz taşımacılığında kullanılan bağlantı elemanı, (b) üç kanatlı pervane	8
Resim 2.2. Ralph (1925) tarafından üretilen dekoratif ürünler.....	10
Resim 2.3. WAAM yöntemi ile üretilmiş endüstriyel parça örnekleri (a) gemi pervanesi, (b) su türbini kanatları, (c) roket nozülü, (d) kubbe şeklinde kalıp parçası, (e) bir uçak gövdesinin paneli, (f) boru kesitli kafes kiriş	10
Resim 2.4. Geliştirilmiş model tarafından öngörülen profil ile gerçek profilin karşılaştırılması.....	35
Resim 2.5. Parametrik modelleme yöntemi kullanılarak üretilmiş bazı parça örnekleri (a) yaya köprüsü, (b) dallı yapı, (c) dairesel içi boş kesitli çelik kolonlar, (d) kavisli metal parça, (e) eğimli tek cidarlı yapı, (f) ark şeklinde parça, (g) çelik kafes kiriş, (ğ) diyagrid kolon, (h) metal kompleks parça	44
Resim 3.1. İçi boş silindirik geometri için Grasshopper ortamında oluşturulan parametrik algoritma yapısı.....	48
Resim 3.2. Örnek olarak oluşturulan içi boş silindirik geometrinin Rhinoceros 3D ortamında görselleştirilmiş hali	48
Resim 3.3. Dilimleme algoritmasının Grasshopper ortamında uygulanış adımlarının bir örnek üzerinden gösterimi: (a) hedef geometri, (b) sınır kutusunun oluşturulması, (c) sınır kutusu köşe noktalarının çıkarılması ve alt-üst noktalar arasında referans doğrusunun tanımlanması, (d) katman yüksekliğine göre referans doğrusunun noktalara bölünmesi, (e) referans noktaları merkez alan XY düzlemlerinin oluşturulması, (f) kesit eğrilerinin elde edilmesi	50
Resim 3.4. Grasshopper ortamında geliştirilen dilimleme algoritmasına ait parametrik bileşen yapısı.....	50
Resim 3.5. Grasshopper ortamında geliştirilen takım yolu planlama algoritmasına ait parametrik bileşen yapısı	51
Resim 3.6. Düşük sayıda eşit aralıklı noktalara bölünmüş örnek altıgen bir kesit eğrisinde, takım yolu çözünürlüğünün azalması ve eğri geometrisinin yüksek doğrulukla izlenememesinin temsili gösterimi	53
Resim 3.7. Yüksek sayıda eşit aralıklı noktalara bölünmüş örnek altıgen bir kesit eğrisinde, takım yolu çözünürlüğünün artması ve eğri geometrisinin yüksek doğrulukla izlenmesinin temsili gösterimi	54

Resim	Sayfa
Resim 3.8. Keskin köşelere sahip örnek bir kesit eğrisi üzerinde birinci yöntem ile eşit aralıklı noktaların tanımlanması ve köşe bölgesinde nokta tanımlanmaması sorunu.....	55
Resim 3.9. Altıgen kesit eğrisi üzerinde süreksizlik bileşeni ile oluşturulmuş takım yolu	55
Resim 3.10. Kaynak başlangıç noktalarının yönlendirilmesi ve ötelenmesi stratejisinin örnek parça üzerinde uygulanışı (a) modelin oluşturulması, (b) modelin dilimlenmesi, (c) yönlendirici eğrinin tanımlanması ve başlangıç noktalarının hizalanması, (d) takım yolunun noktasal temsillerinin oluşturulması, (e) kaynak başlangıç noktalarının aynı doğrultuda hizalanması, (f) başlangıç noktalarının ötelenmesi, (g) başlangıç ve bitiş noktalarının aynı konumda olacak şekilde ayarlanması.	57
Resim 3.11. Kaynak torcunun yaklaşma ve uzaklaşma hareketlerinin tanımlandığı algoritmik yapı.....	58
Resim 3.12. Robots eklentisinde robot sisteminin ve takım yolunun tanımlanması, robot hareket simülasyonu, hata bildirimi ve program süresine ilişkin bileşen yapısı.....	59
Resim 3.13. Pozisyoner kullanım tercihinine bağlı olarak kaynak düzlemlerinin yönelimini tanımlayan hizalama yapısı	60
Resim 3.14. Pozisyoner eğilme ve dönme eksenlerine ait açısal değerlerin tanımlandığı parametrik kontrol yapısı.....	60
Resim 3.15. Kaynak torcuna ait takım parametrelerinin tanımlanması için geliştirilen yapı.....	61
Resim 3.16. Robot hareketlerine ilişkin hız, konfigürasyon ve alan parametrelerinin kullanıcı tarafından ayarlanabilen kontrol yapısı.....	62
Resim 3.17. Geliştirilen son işlemci betiğine ait bileşenin Robots eklentileri ile entegre yapısı	64
Resim 3.18. Geliştirilen malzeme birikimi simülasyonunun parametrik yapısı.....	65
Resim 4.1. Tasarlanan parçalar ait izometrik görünüm ve boyutsal özellikler (mm cinsinden); (a) tek dikişli yığma stratejisi için tasarlanan sekizgen kesitli model A ve altlık, (b) kontur tabanlı çoklu dikiş stratejisi için tasarlanan stadyum kesitli model B	67
Resim 4.2. Model A için dilimleme sonrası elde edilen kesitlerin (a) önden ve (b) üstten görünüşleri.....	69
Resim 4.3. Model B için dilimleme sonrası elde edilen kesitlerin (a) önden ve (b) üstten görünüşleri.....	69

Resim	Sayfa
Resim 4.4. Model A'nın üretimine yönelik programlanan robot kolun hareket simülasyon görünümü	71
Resim 4.5. Model A'ya ait hacimsel malzeme birikimi simülasyonunun (a) izometrik, (b) yandan ve (c) üstten görünüşleri.....	72
Resim 4.6. Model B'ye ait hacimsel malzeme birikimi simülasyonunun (a) izometrik, (b) önden, (c) yandan ve (d) üstten görünüşleri	73
Resim 4.7. Model A için hacimsel birikim simülasyonunun (a) %25, (b) %50, (c) %75 ve (d) %100 yığma oranlarındaki görünüşleri	73
Resim 4.8. Model B için hacimsel birikim simülasyonunun (a) %25, (b) %50, (c) %75 ve (d) %100 yığma oranlarındaki görünüşleri	74
Resim 5.1. Üretimin gerçekleştirildiği WAAM sistemi	75
Resim 5.2. Proses parametrelerinin doğrulanmasına yönelik ince duvar biriktirme çalışması	77
Resim 5.3. Model A'nın üretimi esnasında çekilmiş bir fotoğraf.....	78
Resim 5.4. İmal edilen Model A'nın farklı katmanlarının üstten görünüşleri.....	79
Resim 5.5. İmal edilen Model A'nın farklı katmanlarının yandan görünüşleri.....	80
Resim 6.1. Üretilen parçanın tarama sonrası elde edilen (a) iyileştirilmiş nokta bulutu verisi ve (b) 3B model görünümü.....	82
Resim 6.2. STL model ile kabuk modelin üst üste bindirilmesine ait görsel	82
Resim 6.3. CAD kabuk model referans alınarak gerçekleştirilen tüm parçanın yüzey sapma analizine ait renk haritası görselleri	83
Resim 6.4. Üretilen parçanın iki farklı bakış açısından $\pm 1,0$ mm tolerans bandı içerisindeki (yeşil) ve dışındaki (kırmızı) yüzey bölgelerinin görsel gösterimi	85
Resim 6.5. CAD kabuk model referans alınarak gerçekleştirilen 1-26. katmanlar arası yüzey sapma analizine ait renk haritası görselleri	86
Resim 6.6. CAD kabuk model referans alınarak gerçekleştirilen 27-79. katmanlar arası yüzey sapma sapma analizine ait renk haritası görselleri	87
Resim 6.7. CAD kabuk model referans alınarak gerçekleştirilen 80-140. katmanlar arası yüzey sapma sapma analizine ait renk haritası görselleri	88
Resim 6.8. Üretilen parçanın alt, orta ve üst bölgelerini temsil eden kesit düzlemlerinin gösterimi.....	90

Resim	Sayfa
Resim 6.9. Alt kesit düzlemine ait deformasyon analizinde elde edilen yüzey sapmaları ve vektörel gösterimi.....	90
Resim 6.10. Orta kesit düzlemine ait deformasyon analizinde elde edilen yüzey sapmaları ve vektörel gösterimi.....	91
Resim 6.11. Üst kesit düzlemine ait deformasyon analizinde elde edilen yüzey sapmaları ve vektörel gösterimi.....	91
Resim 6.12. STL model ile simülasyon CAD modelin üst üste bindirilmesine ait görsel.....	92
Resim 6.13. Simülasyon CAD modeli referans alınarak gerçekleştirilen yüzey sapma analizine ait parçanın renk haritası görselleri	93
Resim 6.14. Kaynak torcunun köşe noktasına tam erişmeden yön değiştirmesi sonucu dairesel geçiş hareketi sergilemesinin bir örneği.....	99
Resim 6.15. Üretilen parçanın tepe bölgesinde gözlemlenen dalgalı yüzey formunun görünüşü.....	101
Resim 6.16. Üretilen parçanın (a) yan görünüşten, (b) ön görünüşten alınmış radyografik görüntüleri	102

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

A	Amper
d	Ardışık dikişlerin merkezleri arasındaki mesafe
d*	Kritik merkez mesafesi
dak	Dakika
h	Dikiş yüksekliği
J	Joule
kg	Kilogram
L	Litre
m	Metre
mm	Milimetre
s	Saniye
V	Volt
w	Dikiş genişliği
°C	Santigrat derece

Kısaltmalar

Açıklamalar

3B	Üç boyutlu
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CAM	Bilgisayar destekli üretim
CMT	Soğuk metal transferi
DfAM	Eklemeli imalat için tasarım
ECS	Eşdeğer temas yüzeyi
Eİ	Eklemeli imalat
FDM	Ergiyik biriktirmeli imalat
FOM	Düz üst örtüşme modeli

Kısaltmalar**Açıklamalar****GMAW**

Gaz metal ark kaynağı

GTAW

Gaz tungsten ark kaynağı

LWAM

Lazer tel beslemeli eklemeli imalat

MEİ

Metal eklemeli imalat

MIG

Metal inert gaz

NURBS

Düzgün olmayan rasyonel temelli eğriler

PAW

Plazma ark kaynağı

PRP

Parametrik robot programlama

PRP

Standart üçgen dil

TIG

Tungsten inert gaz kaynağı

TOM

Teğetsel örtüşme modeli

TTS

Torç ilerleme hızı

TYF

Toz yatağı füzyon

YEY

Yönlendirilmiş enerji yığma

WAAM

Tel ark ergitmeli eklemeli imalat

WIM

Tel ark ergitmeli eklemeli imalat bilgi modeli

1. GİRİŞ

Son yıllarda üretim teknolojilerinde yaşanan köklü dönüşüm, geleneksel imalat yöntemlerinin sınırlarını zorlayan ve tasarım özgürlüğünü maksimize eden eklemeli imalat (Eİ) teknolojilerinin ön plana çıkmasına neden olmuştur. Eİ, katmanlı üretim prensibine dayalı olarak malzemenin üç boyutlu dijital modeller üzerinden katman katman birleştirilmesiyle fiziksel ürünlerin oluşturulmasını sağlayan ileri bir üretim teknolojisidir. Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinden farklı olarak, malzeme çıkarımı yerine ekleme esasına dayanması sayesinde tasarım özgürlüğü, malzeme tasarrufu ve üretim esnekliği gibi önemli avantajlar sunmaktadır [1, 2]. Bu teknoloji; karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi, hızlı prototipleme ve kişiye özel ürün tasarımı gibi alanlarda etkin bir şekilde kullanılmakta, aynı zamanda üretim sürelerini ve maliyetlerini azaltmaktadır [1, 3].

Eİ, özellikle havacılık, otomotiv, tıp, inşaat ve enerji gibi yüksek hassasiyet ve dayanım gerektiren sektörlerde yaygınlaşmıştır [4]. Bu alanlarda, geleneksel yöntemlerle üretimi zor olan iç yapılar veya optimize edilmiş topolojilere sahip bileşenler, Eİ teknikleriyle daha verimli biçimde üretilebilmektedir. Ayrıca, kişiselleştirilmiş protez üretimi, hafif yapıli havacılık parçaları ve işlevsel prototipler gibi uygulamalar da bu teknolojinin potansiyelini gözler önüne sermektedir [1, 4].

Eİ teknolojilerinde çok çeşitli mühendislik malzemeleri ile çalışılabilmektedir. Başlangıçta sadece plastik, reçine ve balmumu gibi polimer bazlı malzemelerle sınırlı olan bu teknolojiler; zamanla seramik, kompozit ve metal malzemelerin de eklenmesiyle geniş bir uygulama alanına ulaşmıştır [5]. Metal malzemelerin yüksek ergime sıcaklıklarına sahip olmaları ve karmaşık metalürjik davranışlar sergilemeleri, özel enerji kaynaklarının kullanımını ve hassas proses kontrollerini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, metal tabanlı eklemeli imalat yöntemleri diğer malzeme türlerinden ayrılmakta ve kendilerine özgü üretim stratejileri gerektirmektedir [6–8]. Bu bağlamda, metal eklemeli imalat (MEİ), bu teknolojik dönüşümün kritik bir alt dalı olarak yapısal dayanım, ısıli direnç ve işlevsel bütünlük gerektiren uygulamalarda ön plana çıkmaktadır [7, 9].

ISO/ASTM 52900 standardına göre, MEİ teknolojileri toz yatağı füzyon (TYF), yönlendirilmiş enerji yığıma (YEY), bağlayıcı püskürtme, malzeme ekstrüzyon, sac

laminasyon ve malzeme püskürtme gibi alt başlıklarda sınıflandırılmaktadır [1, 2]. Bu yöntemler arasında YEY, yüksek sıcaklıklı bir enerji kaynağı (lazer, plazma arkı veya elektron ışını) kullanılarak tel veya toz formundaki metal malzemenin hedef yüzey üzerinde ergitilerek katmanlar halinde biriktirilmesi esasına dayanır. YEY sistemleri, tel beslemeli veya toz beslemeli olarak çalışabilmekte olup, bu sayede hibrit imalat sistemlerine entegre edilebilme potansiyeli taşımaktadır. Enerji kaynağına göre YEY sistemleri lazer tabanlı, elektron ışını tabanlı ve ark kaynağı tabanlı sistemler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, kullanılan malzemenin ergime davranışı, enerji yoğunluğu ve besleme tipi gibi temel işlem parametreleriyle doğrudan ilişkilidir [10].

YEY yöntemleri arasında öne çıkan tekniklerden biri olan WAAM, elektrik arkı yardımıyla tel formundaki metal malzemenin katmanlı olarak ergitilip biriktirilmesine dayanan ve endüstriyel ölçekte yüksek uygulanabilirliğe sahip bir üretim teknolojisidir. Bu yöntem, gaz metal ark kaynağı (GMAW), gaz tungsten ark kaynağı (GTAW), plazma ark kaynağı (PAW) ve soğuk metal transferi (CMT) gibi kaynak sistemleri ile entegre biçimde çalışmakta olup, telin sürekli beslenmesi sayesinde yüksek birikim hızları elde edilmektedir [8]. WAAM teknolojisi, özellikle tel formundaki ham maddenin toz formuna kıyasla daha düşük maliyetli olması, yüksek yoğunluklu yapıların üretimine olanak tanınması ve büyük boyutlu parçaların imalatına elverişliliği sayesinde; havacılık, denizcilik ve otomotiv gibi yapısal dayanım gerektiren endüstrilerde güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır [3, 11, 12].

WAAM teknolojisinin sunduğu yüksek potansiyele rağmen, bu yöntemin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi; yalnızca enerji kaynağı ve ham madde gibi fiziksel kaynakların ve ekipman altyapısının yeterliliğiyle değil; aynı zamanda dijital üretim süreçlerinin planlanması, robotik sistemlerin entegrasyonu ve çok disiplinli mühendislik yaklaşımlarının bütüncül olarak ele alınmasıyla mümkündür. Bu bağlamda WAAM süreci; parçanın 3B modellenmesi, dilimlenerek katmanlara ayrılması, takım yolunun oluşturulması, kaynak parametrelerinin belirlenmesi, endüstriyel robot kolun programlanması, üretimin gerçekleştirilmesi gibi birbirini izleyen çok sayıda adımdan oluşmaktadır [13–15].

WAAM sürecinin başarısı, doğru tanımlanmış takım yolu stratejileri ile bu stratejileri destekleyen uygun proses parametrelerinin belirlenmesine doğrudan bağlıdır. Takım yolu planlamasında kullanılacak strateji, hem birikim homojenliğini hem de geometrik kararlılığı etkileyen en kritik unsurlardan biridir [14]. Bu bağlamda, katman sayısı, katmanlar arası

yönelim, katman yüksekliği, yığmanın başlama ve bitiş noktaları, tel besleme hızı, torç ilerleme hızı, kaynak akımı ve ark gücü gibi takım yolu ve proses parametrelerinin doğru bir şekilde optimize edilmesi, hem geometrik sapmaların minimize edilmesini hem de hedeflenen mikro yapı ve mekanik özelliklerin yapı boyunca sürekliliğini sağlamaktadır. Buna karşın, söz konusu parametrelerin hatalı tanımlanması, kaynak havuzunun termal davranışında dengesizliklere, katmanlar arası bağlanma kalitesinin düşmesine, yapıda çarpılmalar oluşmasına, gözeneklilik ve ısıl gerilmeler gibi sorunların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır [7, 8, 14, 15]. Bu nedenle, takım yolu ve proses parametrelerinin dijital ortamda simülasyonla kontrol edilmesi, WAAM uygulamalarında kaçınılmaz hale gelmiştir [13, 15, 16].

Bu aşamada, parametrik modelleme kavramı WAAM süreçlerinin dijital kontrolü açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Parametrik modelleme; geometrik yapıların belirli kurallar, ilişkiler ve değişkenler doğrultusunda sayısal olarak tanımlanıp, algoritmik olarak kontrol edildiği bir tasarım yaklaşımıdır [17]. WAAM özelinde ise bu yöntem, özellikle takım yolu stratejileri ve üretim parametreleri başta olmak üzere tüm üretim sürecinin dinamik ve bütüncül bir şekilde kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır. Grasshopper gibi algoritmik modelleme araçları sayesinde; tasarımda yapılan herhangi bir değişiklik, takım yolu geometrileri ve üretim parametreleri üzerinde anında ve otomatik güncellemelerle yansıtılabilmektedir. Bu yaklaşım, üretim sürecinde insan kaynaklı hataların azaltılmasını, zaman ve maliyet tasarrufu sağlanmasını, tasarım-üretim entegrasyonunun güçlendirilmesini ve özelleştirilmiş üretim senaryolarının etkin bir biçimde uygulanabilmesini mümkün kılmaktadır. Parametrik modelleme sayesinde, WAAM süreçlerinde hem tasarım esnekliği hem de üretim verimliliği artırılabilir [13, 16, 17].

Günümüzde WAAM süreçlerinde yaygın olarak benimsenen üretim yaklaşımı, parçanın 3B modellenmesi, dilimlenerek katmanlara ayrılması, takım yolunun oluşturulması, robot kolun programlanması ve oluşturulan takım yolunun makine diline dönüştürülmesi gibi temel üretim adımlarının, farklı yazılım platformları aracılığıyla ayrı ayrı yürütülmesine dayanmaktadır [13–15]. Ancak bu birden çok yazılımın kullanıldığı yapı, süreç boyunca veri aktarımında çeşitli zorluklara yol açmaktadır. Özellikle dosya formatlarının uyumsuzluğu, bilgi kayıpları ve algoritmik yapıların birbirleriyle entegre çalışamaması gibi problemler, dijital üretim zincirinin bütüncül bir şekilde yönetilmesini zorlaştırmaktadır [18, 19]. Her bir yazılımın belirli bir süreçlere odaklanmış olması nedeniyle, WAAM süreç zincirinin

tamamının tekil ve bütüncül bir veri akışı içerisinde yönetilmesi güçleşmekte, bu da üretim adımları arasında manuel müdahale ihtiyacını artırmakta ve hata olasılığını yükseltmektedir. Bu durum yalnızca zaman ve kaynak kaybına neden olmakla kalmamakta, aynı zamanda robotik kontrol sistemleri ile üretim süreci arasındaki senkronizasyonu da olumsuz etkilemektedir. Buna ek olarak, her yazılımın kendine özgü kullanıcı ara yüzü ve veri yapısına sahip olması, kullanıcıların bu sistemlere adaptasyon sürecini zorlaştırmakta ve operasyonel verimliliği azaltmaktadır. Farklı yazılımların kullanımı, yalnızca teknik uyumsuzlukları artırmakla kalmamakta, aynı zamanda her bir platform için ayrı lisans teminini zorunlu kılarak toplam sistem işletim maliyetini de yükseltmektedir [13, 18–20]. Sürecin farklı fazlarında kullanılan bu yazılımlar arasında doğrudan entegrasyonun sağlanamaması, özellikle üretim öncesi dijital doğrulama ve simülasyon adımlarında tutarsızlıklara neden olmakta; bu da WAAM uygulamalarında üretimin tekrarlanabilirliğini, izlenebilirliğini ve kalite güvencesini sınırlandırmaktadır.

Bu tezin temel amacı, WAAM yöntemine yönelik tüm üretim aşamalarını tek bir platform üzerinden entegre biçimde yürütülmesini sağlayan parametrik modelleme tabanlı bir takım yolu oluşturma ve robotik üretim algoritması geliştirmektir. Bu amaç doğrultusunda tez çalışmasının hedefleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Parametrik modelleme ortamı olan Grasshopper üzerinde, WAAM sürecine uygun 3B CAD modellerin üretim amaçlı katmanlara ayrılmasını sağlayan bir dilimleme algoritmasının geliştirilmesi; her bir katman için kaynak yollarını ve katmanlar arası geçiş hareketlerini içeren takım yolu verisini oluşturacak bütünleşik bir algoritma yapısının tasarlanması,
- Geliştirilen takım yolu algoritmasından elde edilen takım yolu verilerinin robot kontrol sistemleriyle uyumlu makine kodlarına dönüştürülmesi amacıyla bir son işlemci betiğinin geliştirilmesi,
- Malzeme yığılma sürecinin üretim öncesi dijital ortamda doğrulamasına olanak tanıyacak hacimsel birikim simülasyonunun oluşturulması ve geliştirilen algoritmalarla eşzamanlı çalışacak şekilde parametrik modelleme ortamına entegre edilmesi,
- Geliştirilen parametrik modelleme altyapısının, farklı geometrik tasarımlara sahip parçalar üzerinde dijital ortamda uygulanarak işlevselliğinin test edilmesi; bu tasarımlardan birinin fiziksel olarak üretilmesi yoluyla geliştirilen algoritmaların doğrulanması,

- Üretilen parçanın 3B tarayıcı ile elde edilen boyutsal verileri kullanılarak gerçekleştirilen analizler yoluyla geometrik deformasyonların belirlenmesi ve geliştirilen parametrik algoritmaların üretim doğruluğunun sayısal olarak değerlendirilmesi; ayrıca, dijital radyografi yöntemleri kullanılarak parçanın iç yapısının ve katmanlar arası bağlanma kalitesinin incelenmesi.

Bu tez çalışması; giriş, literatür taraması, parametrik takım yolu algoritmasının geliştirilmesi, geliştirilen algoritmaların uygulanması, endüstriyel WAAM uygulaması, deformasyon analizi ve sonuçların tartışılması, sonuçlar ve öneriler olmak üzere yedi ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, WAAM yöntemine dair genel bir çerçeve çizilmiş, çalışmanın bilimsel gerekçesi ve özgün katkısı ortaya konularak araştırmanın amacı ile kapsamı özetlenmiştir. İkinci bölümde, WAAM yönteminin tarihsel gelişimi, temel çalışma prensibi, kullanılan ısı kaynakları ve metal türleri, takım yolu planlama stratejileri, kaynak dikişi modelleme yaklaşımları ve proses parametrelerinin dikiş geometrisi üzerindeki etkileri, parametrik modelleme yaklaşımları ve bu süreçlerde yaygın olarak kullanılan yazılımlar sistematik olarak incelenmiş, mevcut araştırmalardaki eksiklikler ortaya konulmuştur. Üçüncü bölümde, WAAM sürecine yönelik olarak geliştirilen parametrik takım yolu algoritmasının temel bileşenleri açıklanmıştır. Bu kapsamda; dilimleme, takım yolu stratejileri ve robotik üretimin programlanmasına yönelik algoritmalar geliştirilmiş, makine kodu üretimi için bir son işlemci betiği oluşturulmuş ve malzeme birikimini dijital ortamda temsil eden hacimsel simülasyon yapısı ayrıntılı olarak sunulmuştur. Dördüncü bölümde, geliştirilen algoritmaların uygulanabilirliği iki farklı model üzerinden dijital ortamda test edilmiştir. Beşinci bölümde ise, tasarlanan modellerden binin fiziksel üretimi gerçekleştirilmiş; deneysel üretim sürecinde kullanılan ekipmanlar, proses parametreleri, sıcaklık kontrol stratejileri ve üretim verileri detaylı olarak sunulmuştur. Altıncı bölümde, üretilen parçanın geometrik doğruluğu, yüzey deformasyonları ve iç yapısının kalitesi, 3B tarayıcı ve dijital radyografi yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Yedinci ve son bölümde ise tez çalışmasının genel sonuçları özetlenmiş, önerilen çalışmalar sunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

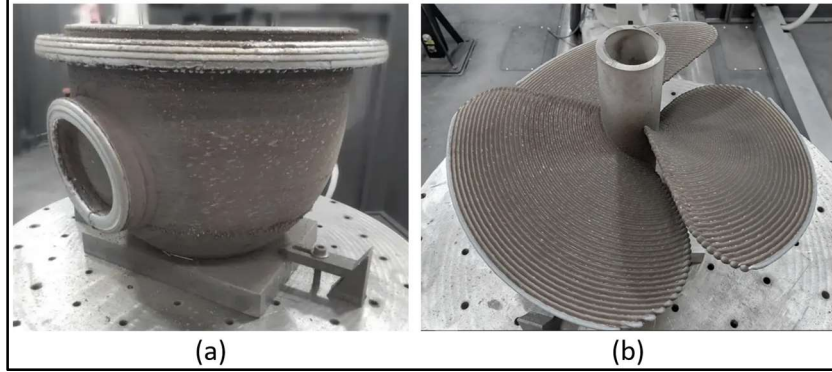
WAAM yöntemi, büyük boyutlu ve karmaşık geometrilere sahip metal parçaların ekonomik, hızlı ve malzeme kullanım verimliliği yüksek şekilde üretilmesini mümkün kılarak, hem geleneksel üretim tekniklerine hem de diğer MEİ teknolojilerine kıyasla çeşitli yönlerden önemli üstünlükler sunmaktadır [11].

Geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla WAAM, CAD verilerinden doğrudan üretime olanak tanıyarak, kalıp, fiktür gibi yardımcı üretim ekipmanlarına olan gereksinimi ortadan kaldırmakta, bu da üretim süresini anlamlı ölçüde azaltmaktadır [21]. WAAM sistemlerinde kullanılan 6 eksenli robot kolları ve 2 eksenli döner pozisyonerler, çok yönlü hareket kabiliyeti sağlayarak karmaşık yüzey geometrilerine sahip parçaların üretimini kolaylaştırmakta, böylece geleneksel yöntemlerle imalatı güç olan parçaların üretilebilirliğini artırmaktadır. Ayrıca WAAM, topoloji optimizasyonuna uygun hafifletilmiş yapıların üretimini desteklemekte ve satın al-uç oranlarını düşürerek özellikle havacılık sektöründe malzeme kullanım verimliliğini artırmaktadır [22]. Bunun yanı sıra %90'a varan enerji verimliliğine sahip olan WAAM [23], Avrupa Uzay Ajansı tarafından düşük enerjili, sürdürülebilir ve yeşil bir üretim teknolojisi olarak adlandırılmaktadır [21].

Yüksek birikim hızı WAAM'ın en belirgin teknik üstünlüklerinden biridir. 50–130 g/dakika aralığında değişen birikim hızları, lazer ve elektron demeti temelli alternatif yöntemlere kıyasla yaklaşık on kat daha yüksektir [23]. Bununla birlikte, malzeme kaybını en aza indirmesi ve neredeyse %100 malzeme kullanımı sayesinde WAAM, toz tabanlı imalat yöntemlerine kıyasla daha yüksek malzeme kullanım verimliliği sunmaktadır [22].

WAAM'ın bir diğer kritik üstünlüğü ise düşük enerji ve ekipman maliyetine sahip olmasıdır. Ark kaynak sistemleri, lazer ve vakum gerektiren elektron demeti ekipmanlarına kıyasla çok daha düşük maliyetlidir. Örneğin, ark tabanlı sistemler lazer sistemlerinin yaklaşık onda biri, elektron demeti sistemlerinin ise otuzda biri maliyetine sahiptir [21]. Ayrıca, WAAM teknolojisinin atmosferik koşullarda çalışabilmesi, vakum gerektirmemesi sayesinde hem operasyonel esneklik sağlamakta hem de endüstriyel entegrasyonu kolaylaştırmaktadır. Tüm bu etmenler, büyük boyutlu metal yapıların üretimi açısından WAAM'ı son derece ekonomik ve uygulanabilir bir yöntem haline getirmektedir [24]. Nitekim Resim 2.1'de

MetalWorm Eklemeli İmalat Teknolojileri A.Ş. firması tarafından WAAM yöntemi ile üretilen endüstriyel parçaları görebilirsiniz [25].



Resim 2.1. WAAM yöntemi ile üretilen endüstriyel parça örnekleri (a) yakıt ve gaz taşımacılığında kullanılan bağlantı elemanı, (b) üç kanatlı pervane [25]

WAAM, diğer eklemeli imalat teknolojileriyle karşılaştırıldığında da pek çok açıdan avantajlıdır. Örneğin, TYF yöntemi yüksek geometrik hassasiyet sunmasına karşın, üretilebilecek parça boyutları sınırlı olup üretim hızları da nispeten düşüktür. WAAM ise daha büyük boyutlardaki parçaların üretilmesine olanak tanırken, yüzey kalitesi açısından bazı sınırlılıklar barındırır da, bu dezavantajlar talaşlı son işlemler ile giderilebilmektedir [21, 24]. Ayrıca WAAM’da kullanılan tel elektrotların kilogram başına maliyeti, aynı malzemenin toz formuna kıyasla %50–70 oranında daha düşüktür. Örneğin, Ti–6Al–4V alaşımı tel formunda yaklaşık £120/kg iken, toz formunda bu değer £280/kg seviyesindedir [21].

2.1. WAAM’ın Tarihsel Gelişimi

WAAM teknolojisi, günümüzde endüstriyel üretim süreçlerinde giderek artan bir öneme sahip olmakla birlikte, tarihsel olarak kökleri yaklaşık bir asır öncesine dayanmaktadır. Bu süreçte gerek teknik altyapı gerekse terminolojik yapı açısından dikkate değer bir evrim geçirmiş ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kabul görmüştür [21]. WAAM teknolojisinin temelini oluşturan elektrik ark kaynağının icadı 1881 yılına kadar uzanmakta olup [23], sistematik olarak uygulanmasına yönelik ilk önemli adım ise Ralph (1925) tarafından alınan ve “şekilli kaynaklama” (ing. shape welding) yöntemi olarak tanımlanan patentle atılmıştır [26]. Bu yöntem, metal elektrotların helisel yollar izleyerek üst üste biriktirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntem ile Ralph tarafından üretilen ürünler Resim

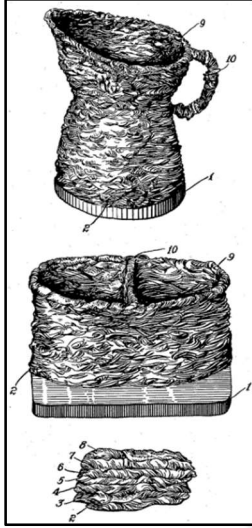
2.2’de gösterilmiştir. Ralph’ın öncü çalışmasını takiben, Shockey (1932) tarafından ardışık kaynak dikişlerin üçte bir oranında örtüşmesi prensibi kullanılarak yapılan çalışma teknolojinin pratik uygulanabilirliğini artırmıştır [27]. Bu gelişmelerin ardından, Ujiie (1971, 1973) yalnızca kaynak metali ile biriktirme tekniğini kullanarak dairesel kesitli basınç kaplarını başarıyla üretmiş, daha sonra metal birikim hızını artırmak amacıyla üç elektrotlu GMAW yöntemini geliştirmiştir [28, 29].

WAAM teknolojisinin büyük ölçekli endüstriyel uygulamalara uyarlanabilirliği açısından kritik kırılma noktası, Kussmaul, Schoch ve Luckow’un (1983) geliştirdiği tandem toz altı kaynağı tekniği ile yaşanmıştır. Bu yöntem ile biriktirme hızı (ing. deposition rate) 20 kg/saat seviyesine çıkarılarak, WAAM’ın sanayi ölçekli üretimler için uygunluğu ortaya konulmuştur [30]. 1980’li yıllarda Eİ teknolojilerinin genel çerçevesinin oluşmaya başlaması ve 1990’lı yıllarda hibrit üretim yaklaşımlarının literatürde yer bulmasıyla birlikte [23], WAAM teknolojisi sistematik bir gelişim göstermeye başlamıştır. Özellikle bilgisayar destekli üretim teknolojilerinin imalat sektörüne entegrasyonu, üç boyutlu kaynak uygulamalarının yeniden gündeme gelmesini sağlamış, teknolojik altyapı güçlenmiştir. Ayrıca Rolls-Royce ile Cranfield Üniversitesi arasındaki iş birliği kapsamında, havacılık motoru bileşenlerinin Ti-6Al-4V ve Inconel 718 alaşımları kullanılarak şekilli metal yığma yöntemiyle üretilmesi, WAAM’ın yüksek performanslı uygulamalar için uygunluğunu göstermiştir [31]. Bu gelişmeler, WAAM teknolojisinin manuel uygulamalardan çıkarak yüksek hassasiyetli ve otomatikleştirilmiş üretim sistemlerine evrilmesini sağlamış, böylece günümüzde Endüstri 4.0 paradigmasının önemli bileşenlerinden biri hâline gelmesinin önünü açmıştır [23].

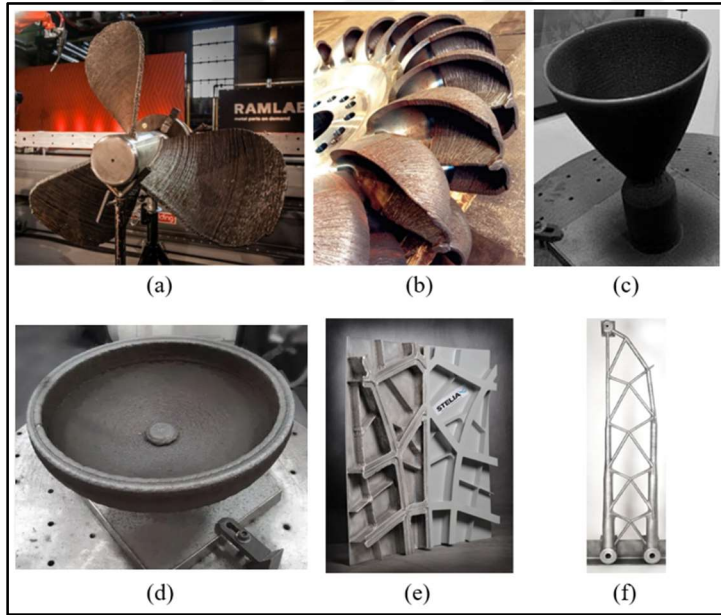
Tarihsel süreçte yalnızca teknik gelişmeler değil, aynı zamanda kullanılan terminoloji de dikkate değer bir dönüşüm geçirmiştir. WAAM teknolojisi, geçmişte şekilli kaynaklama, şekilli ergitme, hızlı prototipleme, katı serbest şekilli imalat, şekilli metal yığma ve 3B kaynaklama gibi çeşitli isimlerle anılmış; son 15 yılda ise WAAM terminolojisi etrafında bir standardizasyon sağlanmıştır [31]. Bu terminolojik bütünleşme, teknolojinin hem akademik hem de endüstriyel bağlamda olgunluğa eriştiğinin göstergesidir [23].

WAAM teknolojisinin tarihsel gelişimi boyunca kazandığı teknik olgunluk, günümüzde karmaşık geometrilere sahip yüksek dayanımlı metal bileşenlerin üretiminde etkin biçimde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Havacılık, otomotiv, enerji ve savunma sanayileri başta

olmak üzere birçok alanda WAAM tabanlı üretim süreçleri, geleneksel imalat yöntemlerine alternatif olarak benimsenmektedir. WAAM teknolojisi kullanılarak üretilmiş bazı endüstriyel parça örnekleri Resim 2.3'te verilmiştir.



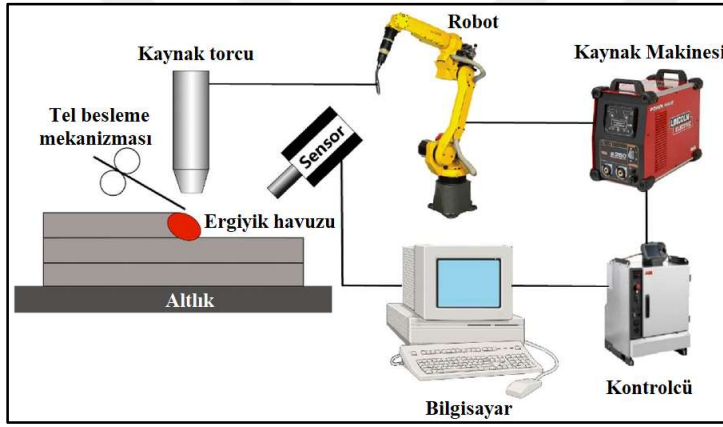
Resim 2.2. Ralph (1925) tarafından üretilen dekoratif ürünler [26]



Resim 2.3. WAAM yöntemi ile üretilmiş endüstriyel parça örnekleri (a) gemi pervanesi [24], (b) su türbini kanatları [24], (c) roket nozülü [25], (d) kubbe şeklinde kalıp parçası [25], (e) bir uçak gövdesinin paneli [3], (f) boru kesitli kafes giriş [32]

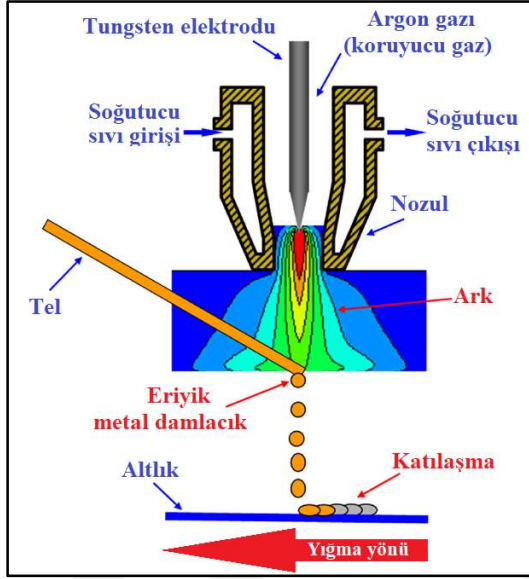
2.2. WAAM Prosesinin Çalışma Prensibi

WAAM, tel formundaki metalik katkı malzemesinin elektrik arkı yardımıyla ergitilerek bir alt tabaka üzerine ardışık katmanlar hâlinde biriktirilmesini esas alan ileri düzey bir Eİ teknolojisi [24]. Proses, temel olarak bir arc kaynak makinesi, tel besleme mekanizması, endüstriyel robot kolu veya CNC platformu olmak üzere bir hareket sistemi ve tüm süreci senkronize eden bir kontrol ünitesi olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır [21]. Bu yapı sayesinde, karmaşık ve serbest formlu geometrilere sahip metal parçaların üretimi çok eksenli takım yolları boyunca mümkün hâle gelmektedir. Örnek bir WAAM sisteminin şematik diyagramı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. WAAM sisteminin şematik diyagramı [21]

WAAM süreci, üretilecek parçanın dijital ortamda oluşturulan CAD modelinin katmanlara ayrılması (ing. slicing) ile başlar. Bu aşamada, modelin geometrisine uygun takım yolu (ing. toolpath) verileri oluşturulur ve ilgili proses parametreleri tanımlanır. Katman kalınlıkları genellikle 1–2 mm aralığında olup, her bir katman bir kaynak dikişiyle temsil edilir. Elde edilen takım yolu doğrultusunda, tel formundaki metal katkı malzemesi, elektrik arkı tarafından oluşturulan yüksek sıcaklıklı bir bölgeye sürekli olarak beslenir. Bu bölgede tel, lokal olarak ergitilir ve oluşan sıvı metal damlacıklar, yerçekimi, yüzey gerilimi ve elektromanyetik kuvvetlerin etkisiyle ergiyik havuzuna aktarılır. Bu damlacıkların kontrollü birikimiyle birinci katman oluşur. Kaynak torcu, endüstriyel robotik sistemler veya CNC kontrollü çok eksenli manipülatörler aracılığıyla hassas biçimde yönlendirilir. Her bir katman tamamlandığında, kaynak torcu bir sonraki katmanın başlangıç seviyesine yükseltilir ve bu işlem yapı tamamlanana kadar ardışık şekilde sürdürülür [22, 33]. Şekil 2.2’de WAAM yönteminin fiziksel prosesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. WAAM yönteminin fiziksel prosesi [21]

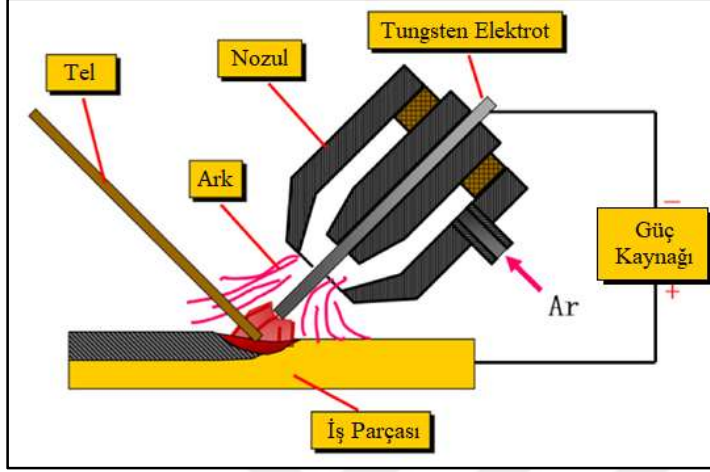
WAAM prosesinin başarısı; ısı girdisinin homojen dağılımı, ergiyik havuzunun kararlılığının sağlanması, katmanlar arası metalürjik bağın kalitesi ve oluşabilecek termal deformasyonların etkin şekilde kontrol edilmesine bağlıdır. Bu nedenle süreç, gerçek zamanlı izleme sistemleriyle sürekli denetlenmekte olup; optik sensörler, kızılötesi termal kameralar ve lazer tarayıcılar gibi ileri düzey izleme teknolojileri kullanılmaktadır [21]. Proses sonrası ortaya çıkabilecek kalıntı gerilmeler ve geometrik sapmalar ise; katmanlar arası haddeme, ısıtılmalı yapı platformları ve aktif soğutma sistemleri gibi termomekanik kontrol yöntemleriyle minimize edilmeye çalışılmaktadır [24].

2.3. WAAM Prosesinde Kullanılan Isı Kaynakları

WAAM teknolojisinde kullanılan ısı kaynağı, prosesin verimliliği ve elde edilen parçaların kalitesi üzerinde doğrudan belirleyici bir rol oynamaktadır. Literatürde yer alan çalışmalarda, bu teknolojiye GMAW, GTAW, PAW ve CMT olmak üzere yaygın olarak dört temel ark kaynağı teknolojisinin kullanıldığı görülmektedir [21, 33].

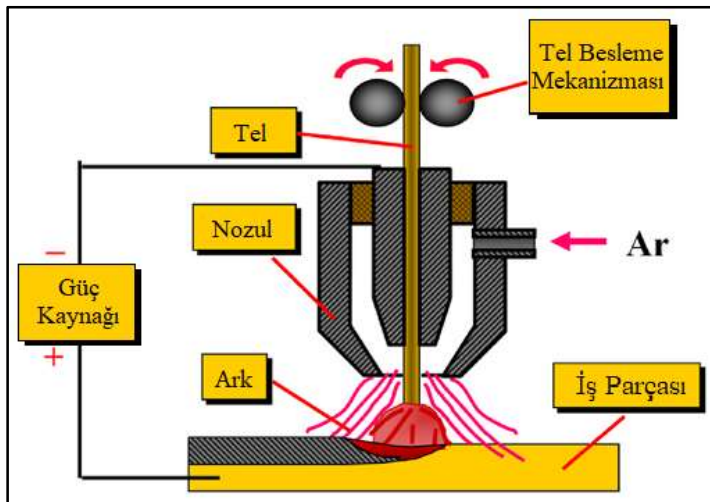
GTAW teknolojisi, yüksek ergime sıcaklığına sahip tungsten elektrotların kullanması nedeniyle tungsten inert gaz kaynağı (TIG) olarak da anılmaktadır [33]. GTAW tabanlı WAAM sistemleri; düşük enerji girdisi, minimum sıçrama potansiyeli ve yüksek düzeyde geometrik kararlılıkla katman biriktirme gibi avantajları sayesinde, özellikle havacılık ve uzay sanayii gibi hassas üretim gereksinimi duyan sektörlerde yaygın olarak tercih

edilmektedir. Bu sistemlerde ayrı tel besleme sistemi kullanılması, farklı yönlerde ve pozisyonlarda tel besleme stratejilerinin uygulanmasına olanak tanımaktadır [21]. Ancak, bu esneklik robotik uygulamalarda daha karmaşık takım yolu planlaması gerektirebilmektedir [33]. GTAW kaynak teknolojisinin şematik diyagramı Şekil 2.3'te verilmiştir.



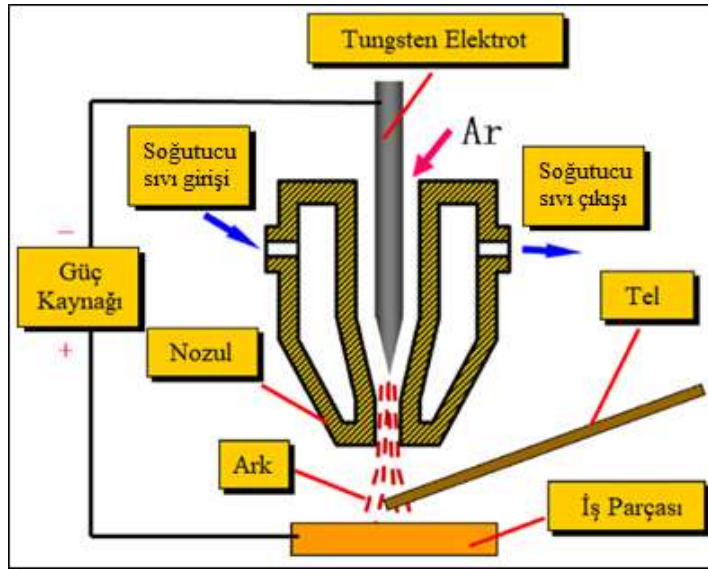
Şekil 2.3. GTAW kaynak teknolojisinin şematik diyagramı [21]

GMAW teknolojisi, metal inert gas (MIG) kaynağı olarak da bilinmekte olup, kaynak torcunun ve tel elektrodun eş eksenli yapısı sayesinde takım yolu oluşturma ve robotik programlama süreçlerinde kolaylıklar sunmaktadır. GMAW tabanlı WAAM sistemleri, diğer ark tabanlı sistemlere kıyasla daha yüksek biriktirme oranına sahip olup, yaklaşık olarak 3-4 kg/saat biriktirme kapasitesi sunmaktadır [21, 34]. GMAW kaynak teknolojisinin şematik diyagramı Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. GMAW kaynak teknolojisinin şematik diyagramı [21]

PAW teknolojisi ise, GTAW teknolojisine benzer bir prensiple çalışmakla birlikte, GTAW teknolojisinden plazma arkının bir nozul yardımıyla daraltılarak daha odaklanmış bir hale getirilmesi ile farklılaşmaktadır [33]. Odaklanmış ark yapısı sayesinde ısı transfer verimliliği, ark kararlılığı ve kaynak hızları artmaktadır. PAW teknolojisi, özellikle nikel ve nikel alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımları ile paslanmaz çelik gibi refrakter endüstriyel metallerin kaynaklanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.5'te PAW kaynak teknolojinin şematik diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.5. PAW kaynak teknolojinin şematik diyagramı [21]

CMT teknolojisi, Fronius firması tarafından geliştirilen ve kısa devre transfer prosesine dayanan modifiye edilmiş GMAW sistemidir [21]. CMT teknolojisi, yenilikçi tel besleme sistemi ve hızlı dijital kontrol mekanizması sayesinde düşük ısı girdisi ve yüksek bir ark kararlılığı sağlamaktadır. Singh ve Khanna (2021) tarafından belirtildiği üzere, CMT tabanlı WAAM sistemleri yüksek kaliteli biriktirme, minimum geometrik bozulma (ing. distorsion), sifıra yakın sıçrama miktarı ve geniş bir proses tolerans aralığı gibi avantajlar sunmaktadır [22].

2.4. WAAM Prosesinde Kullanılan Metaller

WAAM teknolojisinin öne çıkan başlıca avantajlarından biri, çok çeşitli metalik malzemeler ile bu yöntemin uygulanabilir olmasıdır. Bu yöntemde kullanılan tel formundaki metal alaşımlar, genellikle piyasada kolaylıkla temin edilebilen kaynak telleri ile uyumludur.

Ayrıca toz tabanlı eklemeli imalat teknolojilerinde olduğu gibi ham madde için özel üretim gerektirmez ve toz partiküllerinin neden olabileceği iş sağlığı ve güvenliği risklerini ortadan kaldırır [22]. Literatürde WAAM sürecinde en sık tercih edilen metalik malzemeler arasında alüminyum ve titanyum alaşımları, nikel esaslı süperalaşımlar, paslanmaz çelik türleri ile bakır ve bakır alaşımları yer almaktadır.

Alüminyum alaşımları; yüksek özgül mukavemetleri, düşük yoğunlukları, yüksek kırılma toklukları ve korozyon direncine karşı gösterdikleri dayanım sayesinde, WAAM uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Li, Su ve Zhu (2022) yapmış oldukları araştırmada, alüminyum alaşımların WAAM sürecinde kullanılmasında karşılaşılan başlıca zorluklar arasında; katmanlar arası bağ bütünlüğünde meydana gelen süreksizlikler, kimyasal bileşimde oluşan segregasyonlar ve gözenekli yapı gibi üretim hatalarının öne çıktığı belirtilmiştir. Bu tür mikro yapısal ve metalurjik problemler, WAAM uygulamaları için optimize edilmiş özel kaynak parametrelerinin ve proses stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Literatürde, 5356, 2219 ve 4043 gibi farklı alüminyum alaşımı türlerinin WAAM teknolojisi ile başarıyla üretildiği belirtilmektedir [21].

Titanyum alaşımları; düşük yoğunlukları, yüksek özgül mukavemetleri ve üstün korozyon dirençleri sayesinde özellikle havacılık ve biyomedikal sektöründe yaygın biçimde tercih edilmektedir [21]. Bu alaşımlar arasında Ti-6Al-4V, WAAM süreçlerinde en sık kullanılan titanyum alaşımı olarak öne çıkmaktadır. Titanyum alaşımlarının WAAM yöntemiyle işlenmesinde, biriktirme hızı 0,75–2 kg/saat aralığında olup, yaklaşık 0,5 mm mertebesinde bir imalat çözünürlüğü ve makro yüzey pürüzlülüğü (veya dalga boyu) elde edilmektedir [22].

Yüksek sıcaklık koşullarında yapısal bütünlüğünü sürdürebilme kabiliyeti sayesinde, nikel esaslı süperalaşımlar, eklemeli imalat alanında yoğun bir şekilde araştırılan malzemeler arasında yer almaktadır. Özellikle Inconel 625 ve Inconel 718 gibi nikel bazlı alaşımlar, yüksek sıcaklık uygulamaları için önemli bir potansiyel sunmaktadır [33].

Paslanmaz çelik malzemeler; yüksek mukavemetleri, iyi süneklik özellikleri ve üstün korozyon dirençleri sayesinde, WAAM uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir [33]. Katmanlı üretim sürecinde elde edilen yapıların ve buna bağlı olarak ortaya çıkan mekanik özelliklerin görece kararlı bir karakter sergilemesi, çok katmanlı ve çok geçişli sürekli

biriktirme stratejilerinin endüstriyel uygulamalarda kullanılmasına olanak sağlamaktadır. SS316, SS308L ve H08Mn2Si gibi paslanmaz çelik alaşımları WAAM süreçlerinde yaygın biçimde kullanılan malzemeler arasında yer almaktadır.

Bakır ve bakır alaşımları; yüksek düzeyde elektriksel ve termal iletkenlik özelliklerine sahip metalik malzemelerdir. Li, Su ve Zhu'nun (2022) yapmış olduğu çalışma göstermektedir ki, alüminyum, bakır ve magnezyum gibi yüksek yansıtıcılık özelliği gösteren metal alaşımlar için lazer tabanlı eklemeli imalat yöntemleri uygun bir seçenek oluşturmamaktadır. Zira bu tür malzemelerde lazer enerjisinin absorpsiyon oranı oldukça düşüktür. Bu bağlamda WAAM teknolojisi, söz konusu alaşımlar için daha verimli ve uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır. Nitekim CuAl8Ni6 gibi bakır esaslı alaşımlar, GMAW tabanlı WAAM sistemleriyle başarılı bir şekilde işlenebilmektedir [21].

Sonuç olarak, bu malzemelerin her biri WAAM sürecinde kendine özgü avantajlar ve zorluklar barındırmakta olup, malzeme seçimi yapılırken hem proses kararlılığı hem de nihai ürünün performans gereklilikleri dikkate alınmalıdır.

2.5. WAAM Prosesinde Takım Yolu Planlaması

Robotik WAAM prosesi, üç boyutlu parça tasarımından başlayarak üretim aşamasına kadar olan tüm adımların dijital tabanlı bir iş akışı içerisinde yönetildiği, modern bir imalat yaklaşımıdır. Bu süreç, dijital tasarımdan takım yolu planlamasına, kaynak parametrelerinin belirlenmesinden üretimin gerçekleştirilmesine kadar çok aşamalı bir yapıya sahiptir. Robotik WAAM prosesi Şekil 2.6'da gösterildiği üzere, 3B parça tasarımı, dilimleme işlemi, takım yollarının oluşturulması, proses parametrelerinin belirlenmesi, oluşturulan takım yolunun makine diline dönüştürülmesi ve üretimin gerçekleştirilmesi olmak üzere genel olarak altı temel aşamadan meydana gelmektedir.

WAAM prosesinde ilk adım, üretilecek metal parçanın üç boyutlu modelinin CAD tabanlı yazılımlar (örneğin Rhino, SolidWorks veya Fusion 360) kullanılarak oluşturulmasıdır [14]. Tasarımı tamamlanan bu model, prosesin katman bazlı doğasına uygun olacak şekilde, dilimleme yazılımları aracılığıyla iki boyutlu kesitlere ayrılır. Bu dilimleme işlemi, üretim sırasında her bir katmanın ardışık olarak oluşturulabilmesi için gereklidir. Dilimleme işlemi; sabit katman kalınlığına dayalı üniform dilimleme, parçanın geometrik özelliklerine bağlı

olarak değişken katman kalınlıkları içeren adaptif dilimleme veya hem dilimleme yönü hem de kalınlık değişkenliğini dikkate alan çok yönlü dilimleme gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir [1, 3].



Şekil 2.6. Robotik WAAM prosesinin temel aşamaları [14]

Elde edilen iki boyutlu kesitler üzerinden, her bir katman için belirli dikiş genişliğine göre takım yolları oluşturulur. Takım yolu planlaması WAAM prosesinin en kritik adımlarından birisidir; zira bu aşama, kaynak yolunun geometrik sürekliliği, torç hareket yönü, kaynak hızı, torç eğim açısı ve katmanlar arası örtüşme gibi parametreleri doğrudan etkilemekte ve dolayısıyla nihai parça kalitesini belirlemektedir [14].

Takım yolunun oluşturulmasının ardından, prosesi etkileyen parametreler belirlenir ve bu proses parametreleri üretilcek parçanın malzemesine ve geometrik karmaşıklığına göre optimize edilmelidir [1, 3]. Bu aşamalardan sonra parçanın üretimine geçilmeden önce oluşturulan takım yolu makine diline dönüştürülür ve robotik sistemin programlaması yapılır. Robotik WAAM sistemlerinde genellikle altı serbestlik dereceli endüstriyel robot kollar ile iki eksenli pozisyonerler kullanılmaktadır. Oluşturulan G kodu ise robotik WAAM prosesinde parçanın nasıl üretileceğine dair talimatları içermektedir [13].

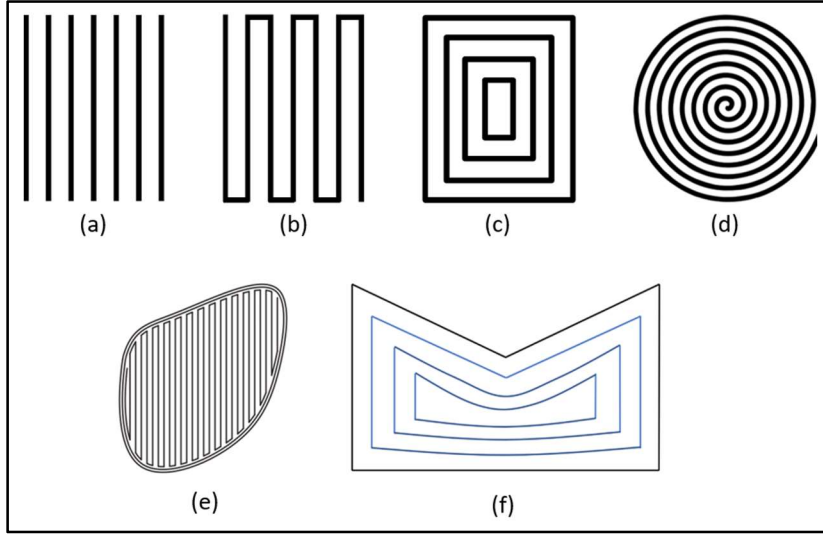
2.5.1. Takım yolu desenleri ve stratejileri

WAAM sistemlerinde takım yolu planlaması, üretim sürecinin temel belirleyicilerinden biri olup, parçanın geometrik doğruluğunu, yüzey kalitesini, üretim süresini ve termal yayılım davranışını doğrudan etkilemektedir [3, 35]. Aynı zamanda, kullanılacak takım yolu stratejisi, nihai ürünün mekanik özellikleri üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Takım yolu desenleri, kaynak torcunun üç boyutlu uzaydaki hareketini tanımlayarak, malzeme birikim sürecini kontrol eder ve bunun sonucunda oluşan katman yapısını şekillendirir [8, 36].

Parçanın geometrik yapısı, üretim stratejisi, robot kolunun kinematik sınırları ve hedeflenen yüzey özellikleri dikkate alınarak takım yolu deseni belirlenmektedir. Ancak, uygun olmayan yol planlama stratejilerinin tercih edilmesi durumunda gözeneklilik, ergime eksikliği ve boyutsal sapma gibi istenmeyen imalat kusurları ortaya çıkabilmektedir [3]. Bu tür kusurlar, hem üretim kalitesini düşürmekte hem de parçanın dayanımını olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Geleneksel takım yolu desenleri arasında yer alan raster, zikzak, kontur ve spiral gibi stratejiler, başlangıçta CNC kontrollü takım tezgâhları için geliştirilmiş olmakla birlikte, eklemeli imalat süreçlerine de uyarlanmıştır [37]. Bu desenler, özellikle toz tabanlı AM yöntemlerinde başarılı sonuçlar vermektedir. Ancak WAAM gibi ark tabanlı imalat yöntemlerinin kendine özgü termal ve fiziksel etkileşimleri, bu klasik stratejilerin bazı geometrik topolojilerde verimsiz veya güvensiz sonuçlar doğurmasına neden olmaktadır [38].

Bu bağlamda, WAAM süreçlerine özgü takım yolu planlama algoritmaları literatürde geniş bir şekilde ele alınmış ve farklı geometrik ve termal gereksinimleri karşılamak üzere çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Takım yolu planlamasının amacı; maksimum boyutsal hassasiyet, yüksek yüzey kalitesi ve üstün mekanik dayanım sağlayacak şekilde malzeme biriktirme yollarının tanımlanmasıdır. Bu hedef doğrultusunda, üretim parametreleriyle uyumlu çeşitli biriktirme stratejileri ve hibrit desen kombinasyonları önerilmiştir [39]. Literatürde WAAM uygulamaları için yedi temel takım yolu deseni tanımlanmakta olup bu desenlerin temsili görselleri Şekil 2.7’de sunulmuştur [3, 35, 39, 40].



Şekil 2.7. Robotik WAAM prosesinde kullanılan takım yolu desenleri için örnekler (a) raster, (b) zikzak, (c) kontur, (d) spiral, (e) hibrit, (f) orta eksen dönüşümü [3, 35, 39, 40]

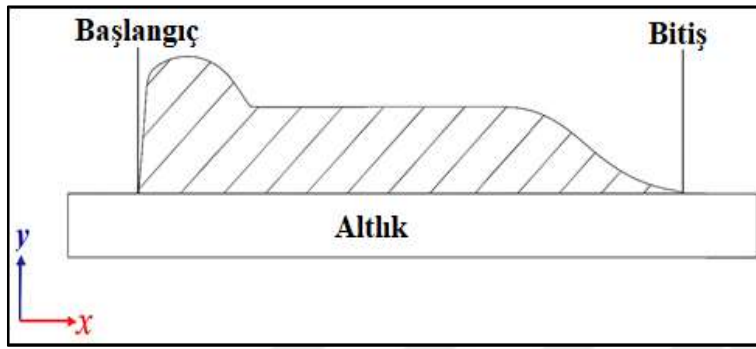
Raster takım yolu deseni

Raster deseni, düzlemsel ışın projeksiyonu prensibine dayanan tek yönlü bir takım yolu stratejisidir [35, 36]. Bu yöntemde, kaynak torcu belirli bir doğrultuda lineer hareket ederek birbirine paralel kaynak dikişleri oluşturmaktadır (bkz. Şekil 2.7.a) [36]. Raster stratejisinde tarama geçişleri arasındaki mesafe üretim parametrelerine göre optimize edilerek, yüzeyin homojen biçimde doldurulması hedeflenmektedir [36, 40].

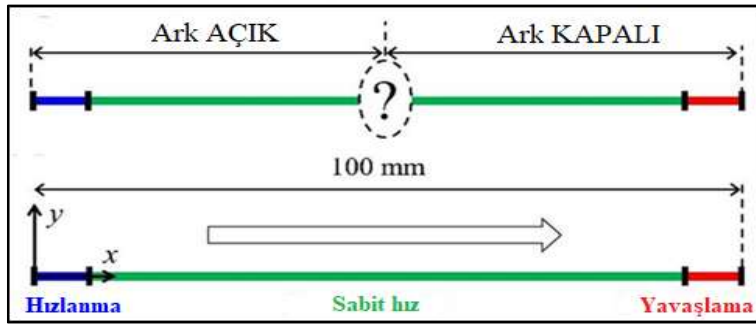
Bu takım yolu deseni, algoritmik basitliği ve farklı geometrilere uygulanabilirliği sayesinde ticari eklemeli imalat sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Raster deseninin temel avantajları arasında, geniş bir yüzey alanını etkin biçimde tarayabilmesi ve nispeten yeterli düzeyde malzeme biriktirebilmesi yer almaktadır [35]. Ancak bu stratejisinin en temel dezavantajı, her bir kaynak dikişinin başlangıç ve bitiş noktalarında birer kaynak arkı başlatma ve sonlandırma işlemi gerektirmesidir [41]. Bu durum, kaynak dikişlerinde geometrik düzensizliklerin ortaya çıkmasına ve biriktirme hassasiyetinin azalmasına neden olmaktadır [14, 41, 42].

WAAM sürecinde oluşan kaynak dikişi genellikle, Şekil 2.8’de gösterildiği üzere, başlangıç ve bitiş bölgeleri arasında belirgin yükseklik farklarına sahip düzensiz bir profile sahiptir [14]. Bu düzensizliğin ilk nedeni, robotik sistemin takım yolunu takip ederken sergilediği

kinematik davranıştan kaynaklanmaktadır. Viola, Balandraud, Poulhaon, Michaud ve Duc (2023) tarafından gerçekleştirilen araştırmalarda, robot kolun nominal hızı sabit olarak programlansa da, her kaynak dikişi başlangıcında ve sonunda torcun ivmelenme ve yavaşlama fazlarına girdiği gözlemlenmiştir. Bu geçiş fazları, torcun hız profilinde ani değişimlere neden olarak arkın iş parçası üzerindeki etki süresini değiştirmekte ve bu da kaynak dikişinin uç bölgelerinde belirgin profil sapmalarına yol açmaktadır. Şekil 2.9’da robotun kaynak başlangıcında mavi ile temsil edilen ivmelenen fazda, bitişinde ise kırmızı ile temsil edilen yavaşlayan fazda bir hareket izlediği açıkça görülmektedir [43].

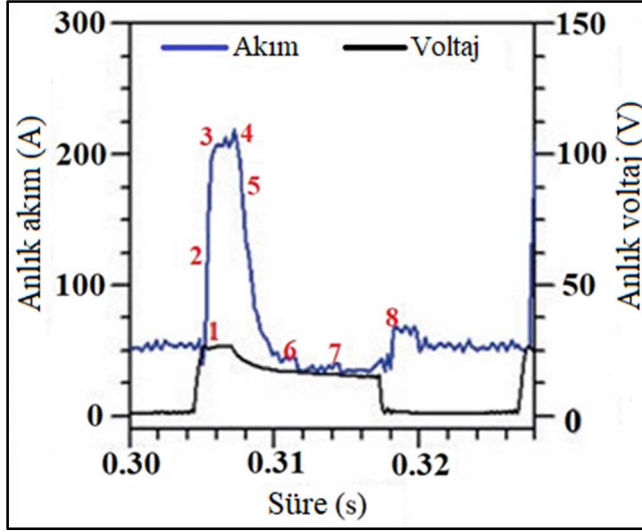


Şekil 2.8. Düzensiz bir kaynak dikişi profilinin şematik kesit görünümü [14]



Şekil 2.9. 40 mm/s nominal bir hızda doğrusal bir yörünge boyunca arkın açık ve kapalı durumlarda robotun hız profili [43]

Dikiş geometrisinde düzensiz profilin oluşmasındaki ikinci önemli neden, kaynak arkının doğasında yer alan değişkenliklerdir. Şekil 2.10’de, Shukla, Dash, Kiran ve Bukkapatnam (2020) tarafından yapılan deneysel çalışmalar sonucunda CMT prosesi sırasında kaydedilen tipik kaynak akımı ve gerilim dalga formları sunulmuştur. Bu dalga formu, güçlendirme, bekleme ve kısa devre evreleri olmak üzere üç ana faz ile karakterize edilmektedir. 1 ile 6 numaralı noktalar arasındaki bölge güçlendirme fazını, 6 ile 8 numaralı noktalar arasındaki bölge bekleme fazını, 8 numaralı noktadan sonraki bölge ise kısa devre fazını temsil etmektedir [44].



Şekil 2.10. CMT prosesi sırasında kaydedilen kaynak akımı ve gerilim dalga formları [44]

Çalışmada elde edilen bulgulara göre özellikle güç artırımı evresinde, elektrik arkı stabil olmamakla birlikte, yoğunluğunun en yüksek seviyesine ulaştığı ve bu aşamada hem taban plakasında hem de elektrot ucunda önemli miktarda ergime meydana geldiği belirtilmektedir. Kaynak akımının artmasıyla birlikte elektrot ucunda oluşan anot bölgesi genişlemekte, plazma hacmi yayılmakta ve arkın etkisi artmaktadır [44]. Ayrıca, kaynak başlangıcında metalin nispeten soğuk olması nedeniyle oluşan yüksek ısı kaybı, bu bölgede daha düşük penetrasyona ve dolayısıyla daha yüksek bir kaynak izi profilinin oluşmasına yol açmaktadır. Öte yandan, kaynak işleminin sonuna doğru elektrik arkı kapanma rejimine girmekte ve ergimiş metalin torcun hareket yönünün tersine doğru akması nedeniyle bu bölgede malzeme birikimi azalmakta ve kaynak profili giderek incelmektedir [42, 44].

Bu iki temel faktör, yani robot kolunun hız geçişlerinden kaynaklanan kinematik etkiler ile ark karakteristiğindeki dinamik değişkenlikler birlikte değerlendirildiğinde, kaynak dikişlerinin başlangıç ve bitiş noktaları WAAM prosesinde potansiyel kusur bölgeleri olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca bu noktalarda oluşan düzensizlikler, sonraki katmanların geometrisini etkilemekte ve bu etki birkaç katmandan sonrasında kümülatif olarak artarak parçanın beklenen şekline kıyasla önemli sapmaların ortaya çıkmasına sebebiyet vermektedir [42, 45]. Raster desenin yapısı gereğince de kaynak başlangıç ve bitiş noktaları diğer takım yolu stratejilerine kıyasla çok daha fazla bulunmaktadır. Üretim verimliliği açısından değerlendirildiğinde ise raster stratejisi etkin bir yöntem değildir. Çünkü toplam işlem süresinin büyük bir kısmı, kaynak yapılmayan geçiş hareketlerine ayrılmakta; bu da enerji, zaman gibi kaynakların gereksiz şekilde tüketilmesine yol açmaktadır [43].

Zikzak takım yolu deseni

Zikzak takım yolu deseni, raster stratejisinden farklı olarak, her bir katmanın yalnızca tek bir başlangıç ve bitiş noktasına sahip olacak şekilde, kaynak dikişlerinin kesintisiz biçimde birbirine bağlandığı sürekli bir biriktirme yöntemidir (bkz. Şekil 2.7.b) [36, 41]. Bu sürekli yığma stratejisi sayesinde, her bir katman için elektrik arkının yalnızca bir kez başlatılması ve sonlandırılması yeterli olmakta; bu da arkın açılıp kapanmasından kaynaklı hataları azaltabilmektedir. Zikzak desenin bir diğer avantajı ise takım yolu geçiş sayılarını azaltarak raster stratejisine kıyasla toplam üretim süresini önemli ölçüde kısaltmasıdır [8, 39, 43]. Bu yönüyle proses verimliliğini artırmakta ve kaynak sistemlerinin daha etkin kullanımına olanak tanımaktadır.

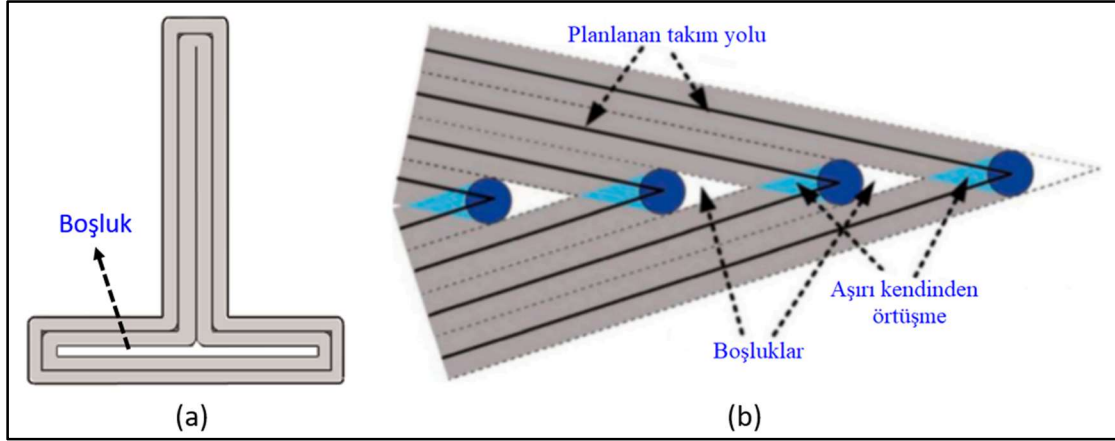
Bununla birlikte, zikzak desenin birtakım dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle eğrisel ya da küçük yarıçaplı dönüşlerin olduğu yollar boyunca kaynak yapılırken, robotun nominal ilerleme hızı sabit görünse de, kaynak dikişinin iç ve dış kenarları arasında göreceli hız farklılıkları ortaya çıkmaktadır. Bu durum, kaynak yolunun yalnızca iki boyutlu geometriye göre tanımlanmasına karşın, gerçek kaynak işleminin üç boyutlu hacimsel bir yapı üzerinde gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır [41]. Eğri bölgelerde, özellikle iç yarıçap boyunca robotun göreceli hızı azaldığından fazla malzeme yığılması ve buna bağlı olarak lokal ısı birikimi meydana gelmekte; dış yarıçapta ise eriyik metalin viskozitesi nedeniyle yeterli birleşme sağlanamamakta, bu da kaynak dikişinde süreksizliklere ve yapısal kusurlara neden olabilmektedir. Bu etkiler, zikzak desenin yön değiştirdiği 180° dönüş noktalarında daha belirgin hale gelmektedir [41,43].

Ayrıca, zikzak desenin dış sınır doğruluğu açısından da bazı dezavantajları söz konusudur. Raster stratejisinde, kaynak dikişlerinin başlangıç ve bitiş noktaları genellikle yapı kenarlarında konumlanırken; zikzak stratejisinde dönüş noktalarının yapının dış kısımlarında yer alması nedeniyle, takım yolunun dış konturlarla tam örtüşmesi zorlaşmaktadır. Bu durum, özellikle dış sınır bölgelerinde yüzey dalgalanmalarına, boyutsal sapmalara ve düşük geometrik hassasiyete yol açmaktadır. Bu nedenle, raster ve zikzak gibi doğrusal tabanlı desenlerin dış konturların yüksek doğrulukla işlenmesinin kritik olduğu uygulamalarda yetersiz kaldığı, bu tür uygulamalar için kontur tabanlı yollar veya hibrit takım yolu stratejilerinin tercih edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır [8, 41].

Kontur takım yolu deseni

Kontur tabanlı takım yolu deseni, her katmanda dış sınır geometrisinin referans alınarak içe doğru ölçeklendirilmesiyle oluşturulan, kapalı döngü biçimindeki yolların ardışık olarak yerleştirilmesi esasına dayanmaktadır (bkz. Şekil 2.7.c) [8, 36]. Her bir yol, kendine ait başlangıç ve bitiş noktalarına sahiptir. Raster ve zikzak gibi doğrusal desenlerin neden olduğu yüzey dalgalanmalarını ve dış sınır düzensizliklerini azaltmak amacıyla, kontur yolu stratejisi kullanılmaktadır [8, 41]. Özellikle son ürünün dinamik yüklere maruz kalacağı durumlarda, dış yüzey kalitesinin artırılması ve geometrik sapmaların minimize edilmesi açısından kontur yolu büyük avantaj sunar. Bu yöntemle hem düzgün bir yüzey kalitesi sağlanmakta hem de parça üzerindeki geometrik hassasiyet iyileştirilmektedir [3, 35, 39, 41].

Bununla birlikte, kontur deseninin birtakım sınırlılıkları da bulunmaktadır. Özellikle karmaşık geometrilerde uygulanabilirlik zorlukları, takım yolunun adaptasyonu için gerekli hesaplama yükünün artması ve işlem süresinin uzaması, bu yöntemin başlıca dezavantajları arasında yer almaktadır [39, 46]. Ayrıca kontur yolların ardışık olarak içe doğru ölçeklendirilmesi sonucunda iç bölgelerde; aşırı kendinden örtüşme ve yetersiz yığma nedeniyle de keskin köşelerde boşluklar oluşabilmektedir. Bu durum da söz konusu bölgelerde boşluk oluşumuna ve yapısal bütünlüğün zayıflamasına yol açmakta; dolayısıyla kontur deseninin tek başına kullanımı, özellikle karmaşık geometriye sahip parçalarda yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, kontur yolunun çoğunlukla raster, zigzag veya spiral gibi farklı takım yolu desenleriyle hibrit biçimde kullanılması veya parçaya özel, optimize edilmiş takım yolu stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir [35, 38, 46]. Nitekim, Şekil 2.11’de kontur desenine dayalı takım yolu kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda hem iç bölgelerde hem de keskin köşe bölgelerinde meydana gelen boşluklar açıkça gözlemlenmektedir [35, 46].



Şekil 2.11. Kontur tabanlı takım yolu kullanımında karşılaşılan boşluk hataları (a) iç bölgelerde, (b) keskin köşelerde [35, 46]

Spiral takım yolu deseni

Spiral takım yolu deseni, bireysel kontur yollarının birleştirilmesi ile elde edilmektedir. Bu yöntemde, torç parça yüzeyinin dış konturundan başlayarak kesitin içerisine doğru sürekli ve dönerek ilerlemekte, böylece takım yolu tek bir başlangıç ve tek bir bitiş noktasına sahip olmaktadır [41]. Spiral desenin temel avantajlarından biri, zikzak deseninde takım yolunun sık yön değiştirmesinden kaynaklanan hataları ortadan kaldırarak daha akıcı ve kesintisiz bir takım yolu oluşturmaktır. Bu sebeple özellikle geometrik olarak dairesel veya eliptik yapıların imalatında tercih edilmektedir [35, 36, 39].

Bununla birlikte, spiral desenin yalnızca belirli geometrik modellere uygulanabilmesi ve karmaşık geometrilere sahip parçalarda kullanıma elverişli olmaması, bu yöntemin temel kısıtlayıcı faktörleridir [36, 39]. Ayrıca spiral desene dayalı takım yollarında yığma yapılacak kesitin merkezine yaklaşıldıkça malzeme birikimi iç kısımlarda artmaktadır. Bu birikme, küçük ölçekli yapılar için ihmal edilebilir düzeyde olsa da, çok katmanlı ve büyük parçalar için önemli kalite sorunlarına neden olabilmektedir [41].

Hibrit takım yolu deseni

Hibrit takım yolu stratejisi, iki veya daha fazla farklı takım yolu deseninin bir araya getirilmesiyle oluşturulan bir takım yolu planlama yaklaşımıdır [40]. Bu stratejinin temel amacı, farklı takım yolu desenlerinin sahip olduğu avantajların bir arada kullanılarak optimum yüzey kalitesi, malzeme biriktirmesi ve geometrik doğruluk elde etmektir [36].

Örneğin, yaygın olarak tercih edilen bir hibrit takım yolu uygulamasında, parçanın dış sınır bölgeleri kontur yöntemi ile yığılarak yüksek yüzey kalitesi sağlanmakta; iç dolgu alanları ise zikzak takım yolu stratejisiyle doldurularak yeterli malzeme birikimi elde edilmektedir. Böylece, kontur ve zikzak yöntemlerinin avantajları aynı takım yolu üzerinde bütünleşerek hem geometrik hassasiyet hem de üretkenlik açısından optimum bir üretim süreci elde edilmektedir [36, 40, 47].

Orta eksen dönüşümü takım yolu deseni

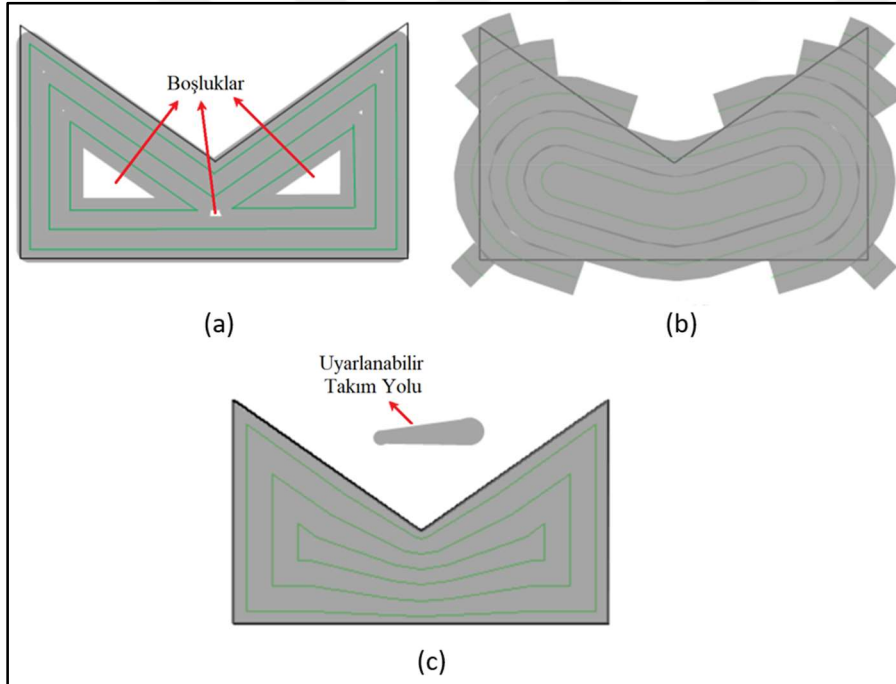
Orta eksen dönüşümüne dayalı takım yolu yaklaşımı, geometrinin merkez bölgelerinden dış sınırlara doğru ofsetlenerek takım yolu oluşturulmasına dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemde, öncelikle parçanın orta eksenini veya iskeleti hesaplanmakta, ardından bu eksene dayalı olarak dış sınıra doğru ofsetlenmiş takım yolları oluşturulmaktadır.

Orta eksen dönüşümü tabanlı takım yolu planlama, özellikle tel beslemeli eklemeli imalat süreçlerinde karşılaşılan iç boşluk oluşumunu önlemek amacıyla geliştirilmiştir. Konvansiyonel kontur tabanlı takım yolu yaklaşımlarında, takım yolu dış sınırdan başlayarak merkeze doğru ilerlemekte, ancak bu durumda parçanın merkez bölgelerinde doldurulamayan alanlar kalabilmektedir. Bu tip bölgelerin eksiksiz şekilde doldurulması, özellikle karmaşık geometrilerde ciddi zorluklar doğurmaktadır. Orta eksen dönüşümü yöntemi, bu iç boşlukları önlemek ve boşluksuz homojen bir biriktirme sağlamak amacıyla geliştirilmiştir.

Literatürde orta eksen dönüşümü tabanlı takım yolu planlamasının, malzemenin boşluksuz biriktirilmesini sağladığı ve böylece yeterli doluluk oranının elde edilmesine katkıda bulunduğu belirtilse de bazı önemli dezavantajlara da sahiptir. Öncelikle, katman sınırlarında takım yolu süreksizlikleri oluşmakla birlikte fazla malzeme birikimi meydana gelmekte ve bu durum bileşen sınırlarında geometrik doğruluğun bozulmasına yol açmaktadır. Bu fazlalıkların giderilebilmesi için son işlem olarak talaşlı imalat gereksinimi ortaya çıkmakta; bu ise hem malzeme israfına hem de enerji tüketiminin artmasına sebep olmaktadır.

Söz konusu dezavantajların minimize edilmesi amacıyla, literatürde uyarlanabilir takım yolu planlama yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde, takım yolu boyunca adım mesafesi

sabit tutulmamakta; bunun yerine, takım yolu geometrisine ve proses gereksinimlerine bağlı olarak sürekli değiştirilmektedir. Bu sayede, merkez bölgelerde boşluksuz ve homojen malzeme biriktirilmesi sağlanırken, dış sınır bölgelerinde aşırı malzeme birikimi önemli ölçüde azaltılmaktadır. Ek olarak, uyarlanabilir takım yolu planlama yöntemi; ilerleme hızı, tel besleme hızı gibi proses parametrelerinin dinamik olarak optimize edilmesine olanak tanımakta ve böylece sabit biriktirme yüksekliği ile yüksek yüzey kalitesi elde edilmektedir. Şekil 2.12’de aynı geometri üzerinde kontur tabanlı, orta eksen dönüşümü tabanlı ve uyarlanabilir orta eksen dönüşümü tabanlı takım yolu stratejileri kullanılarak elde edilen takım yolları ve bunlara karşılık gelen biriktirme sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Ayrıca takım yolu desenleri ve stratejileri başlığı altında ele alınan tüm örüntülerin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.



Şekil 2.12. Farklı takım yolu yaklaşımlarının biriktirme sonuçlarının karşılaştırılması. Siyah çizgiler parçanın geometrik sınırlarını, yeşil çizgiler takım yollarını, gri alanlar ise biriktirilen bölgeleri temsil etmektedir. (a) kontur tabanlı takım yolu ile sınır doğruluğu yüksek ancak iç bölgelerde boşluk oluşumu, (b) orta eksen dönüşümü tabanlı takım yolu ile boşluksuz biriktirme ancak sınır bölgelerinde fazla malzeme birikimi, (c) uyarlanabilir orta eksen dönüşümü tabanlı takım yolu ile boşluksuz ve yüksek sınır doğruluğuna sahip biriktirme [38]

Çizelge 2.1. Yığma desenlerinin avantajları ve dezavantajları

Takım Yolu Deseni	Avantajlar	Dezavantajlar
Raster	- Algoritmik basitlik ve uygulama kolaylığı - Farklı geometrilere uygulanabilirlik - Geniş yüzey alanlarının etkin taranabilmesi	- Çok sayıda kaynak başlangıç ve bitiş noktasının bulunması, bu noktalarda ark başlatma ve sonlandırma gerekliliği - Kesit dış sınırlarında düşük geometrik doğruluk elde edilmesi
Zikzak	- Tek bir kaynak başlangıç-bitiş noktası ile kaynak sürecinde süreklilik sağlanabilmesi - Tüm kaynak dikişi boyunca yalnızca bir kez ark başlatma ve sonlandırma	- Torç ilerleme hızındaki değişimler nedeniyle eğrisel ve küçük yarıçaplı dönüşlerde ısı birikimi ve aşırı malzeme yığılmasının oluşabilmesi - Kesit dış sınırlarında yetersiz birleşme ve süreksizliklerin oluşması
Kontur	- Yüzey dalgalanmalarının azaltılması - Kesit dış sınırlarında yüksek geometrik doğruluk sağlanabilmesi - Dinamik yüklere maruz kalacak parçalar için uygunluk	- Karmaşık geometrilere uygulanabilirlik zorlukları - Keskin köşelerde ve iç bölgelerde boşluk oluşumu ihtimali - İç bölgelerde aşırı kendinden örtüşme
Spiral	- Tek kaynak başlangıç-bitiş noktası ile tek seferde ark başlatma ve sonlandırma - Zikzak desendeki yön değişiminden kaynaklı hataların azaltılması	- Karmaşık geometrilere uygulanabilirlik zorlukları - Kesitin merkezine yaklaşıldıkça malzeme birikiminin artması
Hibrit	- Farklı takım yolu desenlerinin avantajlarının bir arada kullanılabilmesi	- Karmaşık takım yolu planlaması gerekliliği - Desenler arasındaki geçişlerin optimize
Orta Eksen Dönüşümü	- Boşluksuz yığmanın gerçekleştirilebilmesi - Yeterli doluluk oranının elde edilebilmesi	- Karmaşık takım yolu planlaması - Kesit sınırlarında fazla malzeme birikimi
Uyarlanabilir Orta Eksen Dönüşümü	- Kesit sınırlarındaki malzeme birikiminin önlenmesi - Yüksek yüzey kalitesi ve sabit biriktirme yüksekliğinin sağlanabilmesi	- Karmaşık hesaplama ve proses kontrolü

2.5.2. Kaynak dikişinin modellenmesi

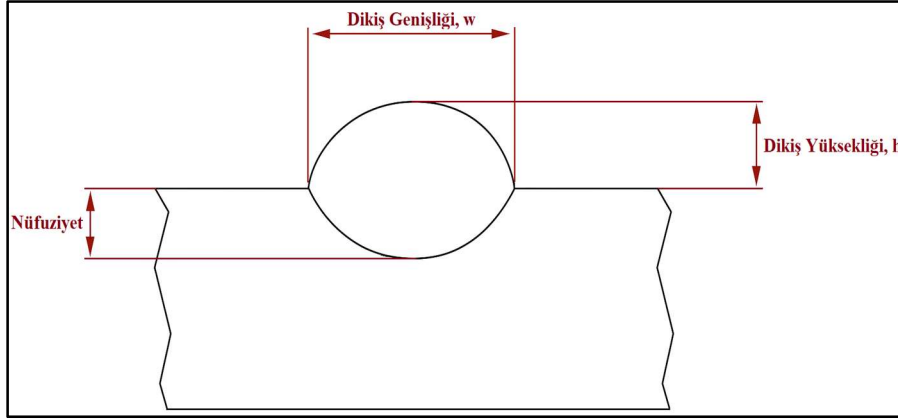
WAAM yöntemi, esas itibarıyla belirli bir örtüşme (ing. overlapping) oranında ardışık olarak biriktirilen tekil kaynak dikişlerinin kontrollü bir şekilde üst üste bindirilmesi yoluyla metal parçaların üretilmesi prensibine dayanmaktadır [14, 48]. Sürecin temelinde, ergiyik metalin bir altlık veya bir önceki katman üzerinde kontrollü bir şekilde biriktirilmesi ve böylece ardışık kaynak dikişlerinin birikimiyle parçanın üç boyutlu formunun elde edilmesi yer almaktadır [14]. Bu bağlamda, kaynak dikişi geometrisi, takım yolu planlaması aşamasında dikkate alınması gereken temel parametrelerden birisi olarak öne çıkmaktadır. Zira kaynak dikişinin geometrik özelliği, kaynak dikişinin altlık malzemesine veya bir önceki katmana nüfuz ettiği bölgenin derinliği, üretilen parçanın hem mekanik özelliklerini hem de boyutsal doğruluğunu doğrudan etkilemektedir [14, 48–50].

Bununla birlikte, yüksek yüzey kalitesi, geometrik hassasiyet ve boyutsal toleransların sağlanabilmesi için yalnızca tekil kaynak dikişi geometrisinin değil, aynı zamanda çoklu kaynak dikişlerinin birbirleriyle olan örtüşme miktarlarının da doğru şekilde modellenmesi büyük önem arz etmektedir [48]. Bu kapsamda kaynak dikişi geometrisini doğru ve kapsamlı bir biçimde temsil eden bir modelin geliştirilmesi, WAAM sürecinde karşılaşılabilecek proses kaynaklı hataların minimize edilmesine, üretim sürecinin tekrarlanabilirlik ve kararlılık düzeyinin artırılmasına, ayrıca elde edilen parçaların hedeflenen geometrik hassasiyet ve boyutsal tolerans kriterlerine uygunluğunun iyileştirilmesine doğrudan katkı sağlamaktadır [14].

Bu kapsamda takip eden bölümlerde hem tekil kaynak dikişi geometrisinin modellenmesine hem de çoklu kaynak dikişlerinin belirli bir örtüşme oranıyla üst üste bindirilmesine yönelik literatürde yapılmış olan çalışmalar, geliştirilen yöntemler ve raporlanan bulgular ele alınacaktır.

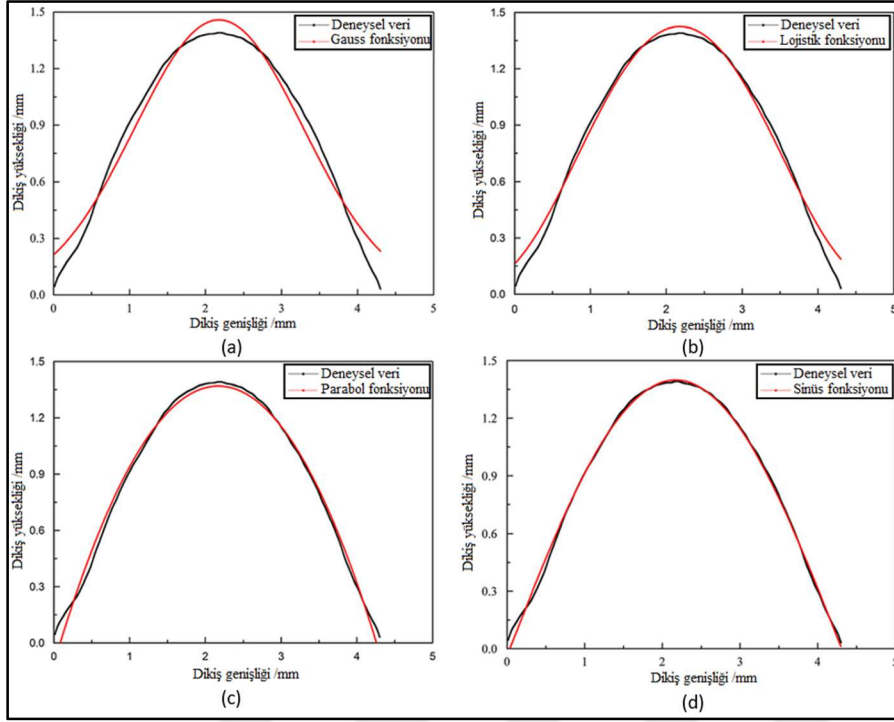
Tekil kaynak dikişinin modellenmesi

Tekil kaynak dikişinin modellenmesindeki temel amaç, kaynak dikişi kesitinin geometrik özelliklerini en doğru şekilde temsil edebilecek uygun bir matematiksel modelin geliştirilmesidir. Bu doğrultuda, literatürde bugüne kadar birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve kaynak dikişi kesitini temsil etmek amacıyla çeşitli fonksiyonel yaklaşımlar kullanılmıştır. Özellikle yay, parabol, kosinüs ve sinüs fonksiyonları gibi farklı matematiksel modeller, kaynak dikişi kesit geometrisinin analitik olarak tanımlanması amacıyla yaygın şekilde denenmiştir. Söz konusu modeller, kaynak dikişinin üç temel geometrik parametresi olan genişlik (w), yükseklik (h) ve nüfuziyet derinliği üzerine odaklanmaktadır. Şekil 2.13'te, tekil bir kaynak dikişinin kesit geometrisi ile birlikte, kaynak dikişinin altlık malzemesine olan nüfuziyetini gösteren şematik bir temsil sunulmaktadır.



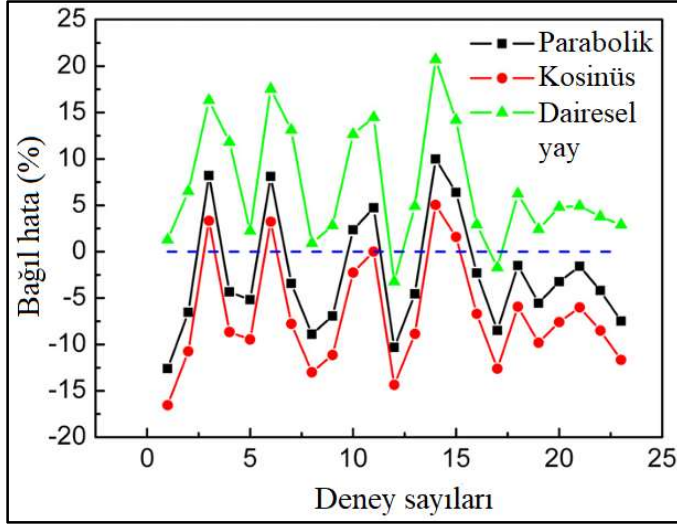
Şekil 2.13. Tekil kaynak dikişinin kesit görünüşü

Tekil kaynak dikişinin modellenmesine yönelik literatürde gerçekleştirilen öncü çalışmalarda, kaynak prosesi parametreleri ile kaynak dikişi geometrisi arasındaki ilişkiyi modellemek amacıyla regresyon analizi, yapay sinir ağları ve bu iki yöntemin kombinasyonunu içeren çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir [51–53]. Ancak, bu çalışmalar kaynak dikişi profiline ilişkin kapsamlı ve yeterli düzeyde bir modelleme ortaya koyamamıştır. Suryakumar ve diğerleri (2011), tel çapı, tel besleme hızı ve torç ilerleme hızı gibi kaynak parametrelerinden yola çıkarak, kaynak dikişi yüksekliği ve genişliğini hesaplamak için cebirsel denklemler geliştirmiş ve kaynak dikişi kesit profilini simetrik bir parabol formunda tanımlamışlardır [54]. Cao, Zhu, Liang ve Wang (2011) ise, robotik MAG kaynağıyla elde edilen dikişlerin kesit geometrisini, Canny kenar algılama ve Gauss filtreleme yöntemlerini kullanarak sayısal olarak çıkarmış; ardından Gauss, lojistik, parabol ve sinüs fonksiyonları olmak üzere dört farklı matematiksel model ile eğri uydurma yöntemi kullanılarak dikiş kesitlerini modellemişlerdir. Yapılan analiz sonucunda, sinüs fonksiyonunun kaynak dikişi kesit profilini en yüksek doğrulukla temsil ettiği belirlenmiştir. Şekil 2.14’te eğri uydurma yöntemi kullanılarak dört farklı matematiksel fonksiyon için oluşturulan modellerin, deneysel olarak elde edilen kaynak dikişi kesit profiline ait yükseklik değerleri ile karşılaştırılması gösterilmektedir [55].

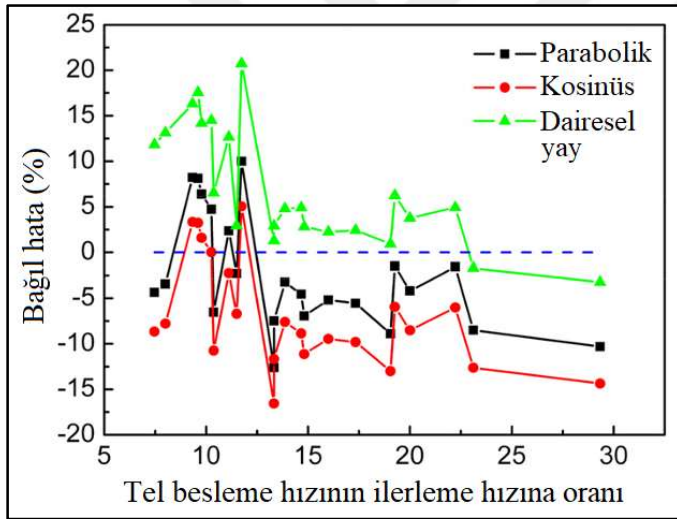


Şekil 2.14. Deneyisel olarak elde edilen kaynak dikişi kesit profiline ait yükseklik değerlerinin, (a) Gauss fonksiyonu, (b) lojistik fonksiyonu, (c) parabol fonksiyonu, (d) sinüs fonksiyonu kullanılarak yapılan eğri uydurma sonucu elde edilen modeller ile karşılaştırılması [55]

Xiong, Zhang, Gao ve Wu (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı kaynak parametre kombinasyonları altında elde edilen kaynak dikişi kesit profilini dairesel yay, parabol ve kosinüs fonksiyonları kullanarak matematiksel olarak modellemiş ve her bir modelin öngördüğü kesit alanını deneysel verilerle karşılaştırarak hata oranlarını hesaplamışlardır. Şekil 2.15'te, söz konusu üç farklı fonksiyon kullanılarak oluşturulan modellerin bağıl hata değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, tel besleme hızının ilerleme hızına oranının kaynak dikişi profilinin geometrisi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur. Özellikle, tel besleme hızının ilerleme hızına oranı 12,5'in altında olduğunda parabol modelinin, bu oran 12,5'in üzerine çıkması durumunda ise dairesel yay modelinin en yüksek doğrulukla kaynak dikişi geometrisini temsil ettiği tespit edilmiştir. Kosinüs modelinin ise genel doğruluk seviyesi açısından diğer iki modelin gerisinde kaldığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, tel besleme hızının ilerleme hızına oranının bağıl hata üzerindeki etkisini gösteren Şekil 2.17'de açıkça görülebilmektedir [49].



Şekil 2.15. Kaynak dikişi kesit alanının gerçek ve tahmin edilen değerleri için bağıl hata karşılaştırması [49]



Şekil 2.16. Tel besleme hızının ilerleme hızına oranının bağıl hata üzerine etkisi [49]

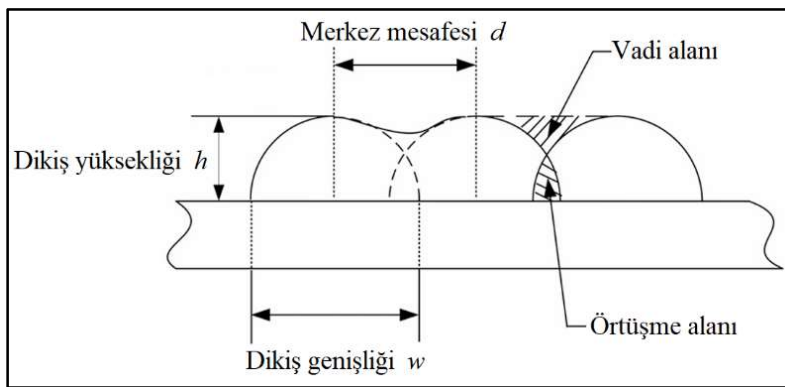
Ayrıca Ding, Pan, Cuiuri ve Li (2015) tarafından yapılan bir başka çalışmada, tekil kaynak dikişi kesit profili parabol, kosinüs ve dairesel yay olmak üzere üç farklı matematiksel modelle temsil edilmiş ve bu modellerin doğrulukları karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak elde edilen kesit profil verileri üzerinde gerçekleştirilen eğri uydurma analizleri sonucunda, parabol ve kosinüs fonksiyonlarının dikiş kesitini yüksek doğrulukla modellediği belirlenmiştir. Söz konusu üç modele ait yükseklik, genişlik ve alan ifadeleri matematiksel olarak Çizelge 2.2’de sunulmuştur [48].

Çizelge 2.2. Üç farklı kaynak dikişi modeli ve bunlara ilişkin dikiş yüksekliği, dikiş genişliği ve dikiş kesit alanı değerleri [48]

Model	Şekil	Yükseklik
Parabol	$y = ax^2 + c$	c
Kosinüs	$y = a\cos(bx)$	a
Dairesel yay	$y = \sqrt{a^2 - x^2} + b$	$a - b$
Genişlik		Alan
Parabol	$2\sqrt{\frac{-c}{a}}$	$A_p = \frac{4c}{3}\sqrt{\frac{-c}{a}}$
Kosinüs	$\frac{\pi}{b}$	$A_k = \frac{2a}{b}$
Dairesel yay	$2\sqrt{a^2 - b^2}$	$A_d = \arccos(-b/a) - b\sqrt{a^2 - b^2}$

Çoklu kaynak dikişleri örtüşmesinin modellenmesi

Daha önce de ifade edildiği üzere, birleştirme uygulamalarında oluşturulan tekil kaynak dikişlerinden farklı olarak, WAAM süreci, belirli bir örtüşme oranına sahip ardışık olarak biriktirilen tekil kaynak dikişlerinin kontrollü biçimde üst üste bindirilmesi prensibine dayanmaktadır. Ardışık kaynak dikişlerinin belirli bir örtüşme oranı ile üst üste bindirilme durumunu gösteren bir şematik temsil Şekil 2.17’de sunulmuştur. Söz konusu şekilde, ardışık dikişler arasındaki çukur bölgesi ve üst üste binme alanı belirtilmiş; ayrıca ardışık dikişlerin merkezleri arasındaki mesafe d ile tanımlanmıştır.

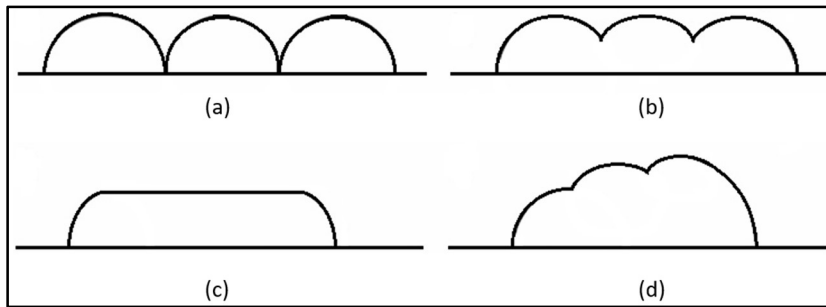


Şekil 2.17. Örtüşen kaynak dikişlerinin şematik gösterimi [49]

Ardışık kaynak dikişlerinin merkezleri arasındaki mesafe, süreç kalitesini ve nihai ürün geometrisini doğrudan etkileyen kritik bir parametre olarak öne çıkmakta olup, belirli bir aralıkta tutulması gerekmektedir [41]. Literatürde, bu mesafenin, tekil kaynak dikişi genişliği (w) dikkate alınarak, teorik olarak $w/2$ ile w arasında sınırlandırılması gerektiği

ifade edilmektedir. Merkez mesafesinin, kaynak dikişı genişliğinden (w) büyük olması durumunda, ardışık dikişler arasında geometrik örtüşme gerçekleşmez. Öte yandan, merkez mesafesinin $w/2$ değerinden küçük olması halinde, yeni oluşturulan kaynak yolu, önceki dikişin üzerine aşırı bindirilir. Bu durum, bitişik dikişlerin gereğinden fazla yeniden ergimesine sebep olarak, yeterli ısı girişi sağlanamamasına yol açmakta ve bunun sonucunda hem biriktirme kalitesi hem de mevcut dikişin alt tabaka veya önceki katmanlarla olan bağ mukavemeti olumsuz etkilenmektedir [41, 46, 49, 56].

Ardışık dikişler arasındaki merkez mesafesi, aynı zamanda yüzey kalitesi ve yüzey düzgünlüğünün belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Şekil 2.18’de gösterildiği üzere, farklı merkez mesafeleri, katman kalınlığı ve yüzey düzgünlüğü üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Eğer merkez mesafesi, tekil kaynak dikişı genişliği (w) değerinden büyük tutulursa, ardışık dikişler arasında herhangi bir malzemenin üst üste binmesi gerçekleşmez (bkz. Şekil 2.18.a). Bu durumda, katman üst yüzeyinde düzensizlikler, boşluklar ve pürüzlü alanlar meydana gelir; bu da bir sonraki katmanın biriktirilmesi sırasında yeterli metal ergimesinin sağlanamamasına ve nihayetinde yapısal birleşme eksikliği oluşmasına sebebiyet verir. Merkez mesafesinin azalması ile birlikte, biriktirilen katmanın yüzey düzgünlüğü iyileşir; zira örtüşme alanı, vadi bölgesini kısmen doldurarak yüzey düzensizliklerini minimize etmektedir (bkz. Şekil 2.18.b). Şekil 2.18.c’de ise merkez mesafesinin belirli bir optimum değere ulaşması sonucu arzu edilen yüzey düzgünlüğü gösterilmiştir. Ancak, merkez mesafesinin bu optimum değer altına düşürülmesi, örtüşme alanının aşırı büyümesine sebep olarak katman kalınlığını artırmakta ve yüzey düzgünlüğünü olumsuz yönde etkilemektedir (bkz. Şekil 2.18.d). Bu durum, katmanlı eklemeli imalat uygulamalarında istenmeyen bir sonuçtur [41, 46, 49, 56].

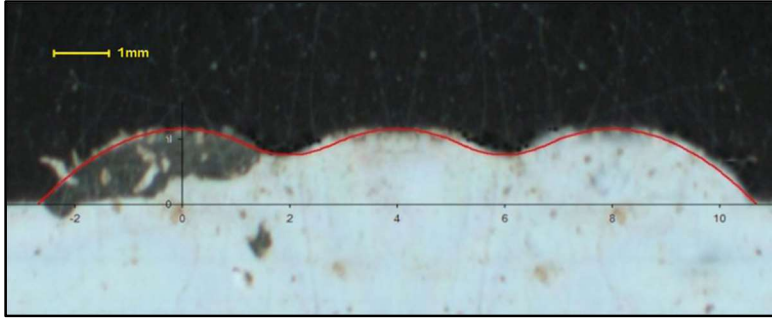


Şekil 2.18. Farklı ardışık dikiş merkez mesafelerinin katman yüzey geometrisi üzerindeki etkileri: (a) yetersiz örtüşme, (b) kısmi örtüşme, (c) optimum örtüşme, (d) aşırı örtüşme durumu [49]

Bu nedenle, ardışık kaynak dikişleri arasında optimum bir örtüşme miktarının sağlanması, toplam biriktirme işlemi sonucunda yapının üst yüzeyinde derin çukur ve girintilerin oluşmasının önlenmesi ve yüksek geometrik doğruluğa sahip, sürekli ve düzgün bir yüzey elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir [46,56]. İki ardışık dikişin yüzde örtüşme oranının matematiksel ifadesi Eş. 2.1'de verilmiş olup, bu eşitlik kullanılarak ardışık kaynak dikişleri arasındaki örtüşme oranı merkezler arası mesafe (d) ve kaynak dikişi genişliğine (w) bağlı olarak hesaplanabilmektedir [41].

$$\text{örtüşme oranı (\%)} = \left(1 - \frac{d(mm)}{w(mm)}\right) \times 100 \quad (2.1)$$

Literatürde, ideal örtüşme oranının belirlenmesine yönelik çeşitli teorik ve deneysel yaklaşımlar geliştirilmiş; bu kapsamda sayısal modeller önerilmiş ve çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Aiyiti, Zhao, Lu ve Tang (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, biriktirilen ardışık kaynak dikişleri arasındaki farklı örtüşme oranlarının, üretilen parçaların yüzey düzgünlüğü ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu kapsamda basitleştirilmiş bir örtüşme modeli geliştirilmiştir. Bu modelde dikiş kesitinin dairesel yay profiline sahip olduğu kabul edilmiştir. Çalışmada ER308L paslanmaz çelik malzemesi kullanılarak numuneler üretilmiş ve yüzey düzgünlüğü, çekme mukavemeti, uzama değerleri açısından deneysel olarak test edilmiştir. Sonuçlar, daha yüksek örtüşme oranına sahip parçalarda yüzey düzgünlüğü, çekme mukavemeti ve uzama değerlerinin belirgin şekilde iyileştiğini göstermiştir [56]. Suryakumar ve diğerleri (2011) tarafından yapılan çalışmada ise başlangıç aşamasında tüm kaynak dikişlerinin parabolik kesit profiline sahip olduğu ve örtüşme durumundan etkilenmediği varsayılmış, ancak üst üste binen bölgelerde malzeme fazlası olduğu ve bu bölgelerde dikiş profilinin geometrik olarak değiştiği deneysel olarak ortaya konulmuştur. Bu bulgular doğrultusunda geliştirilen yeni modelde, iki parabolik dikiş arasında oluşan geçiş bölgesi dairesel yay fonksiyonu kullanılarak tanımlanmış ve böylece daha gerçekçi bir kesit profili elde edilmiştir. Ayrıca, çalışmada optimum örtüşme miktarı olarak kaynak dikişi genişliğinin (2/3)'ü önerilmiştir. Resim 2.4'te, söz konusu çalışma kapsamında geliştirilen model tarafından öngörülen kesit profili ile üretim sonrası elde edilen ardışık kaynak dikişlerinin gerçek kesit profili karşılaştırılması sunulmaktadır [54].

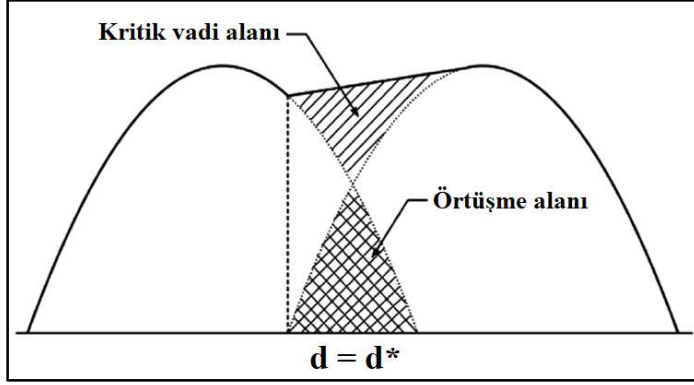


Resim 2.4. Geliştirilmiş model tarafından öngörülen profil ile gerçek profilin karşılaştırılması [54]

Cao ve diğerleri (2011) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, optimum örtüşme oranının belirlenebilmesine yönelik olarsak "eşdeğer alan biriktirme teorisi" geliştirilmiştir. Bu teori, merkezler arası mesafenin belirli bir optimum değere ulaştığında, ardışık kaynak dikişleri arasında oluşan örtüşme alanı ile vadi alanının eşitlendiği ve bu durumda elde edilen yüzeyin maksimum düzlemselliğe ve yüzey düzgünlüğüne sahip olduğu prensibine dayanmaktadır (bkz. Şekil 2.18.c). Söz konusu çalışmada geliştirilen modelde, ideal kaynak dikişi kesit profili sinüs eğrisi olarak kabul edilmiştir. Yapılan teorik ve deneysel analizler sonucunda, ideal düz yüzeyin elde edilebilmesi için optimum örtüşme oranının %63,66 olduğu belirlenmiştir [55].

Ding ve diğerleri (2015) yapmış oldukları çalışmada, robotik WAAM sürecinde çoklu kaynak dikişi örtüşme davranışını daha gerçekçi şekilde modellemek amacıyla, literatürde yaygın olarak kullanılan düz üst örtüşme modeli (FOM) (ing. flat-top overlapping model) yerine teğetsel örtüşme modeli (TOM) (ing. tangent overlapping model) geliştirilmiş ve bu kapsamda kararlı çoklu kaynak dikişi örtüşme süreci için kritik merkez mesafesi kavramı ortaya konulmuştur. FOM modelinde, üst üste binen komşu kaynak dikişlerinin birleşim bölgesinin yüzeyinin tamamen düz olduğu ve dikiş profillerinin üst kısmında herhangi bir malzeme birikimi veya geometrik dalgalanma oluşmadığı varsayılmaktadır. Ancak, deneysel gözlemler bu varsayımı desteklememekte; gerçek yüzey profilinin dalgalı bir geometriye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen TOM modelinde, bindirme bölgesindeki yüzeyin daha doğru şekilde temsil edebilmek için kritik vadi geometrisi tanımlanmıştır. Söz konusu model çerçevesinde, kararlı bir örtüşme süreci için gerekli olan kritik merkez mesafesi (d^*) analitik olarak hesaplanmış ve bu mesafenin ($d^* = 0,738w$) olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca, önerilen model kullanıldığında

malzeme verimliliğinde %8.4 oranında bir artış sağlandığı belirtilmiştir [48]. Şekil 2.19’da çalışma kapsamında tanımlanan kritik vadi alanı ve örtüşme alanı gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Teğetsel örtüşme modeli kapsamında tanımlanan kritik vadi alanı ve örtüşme alanının şematik gösterimi [48]

2.5.3. Proses parametrelerinin kaynak dikişi geometrisi üzerindeki etkileri

Tekil kaynak dikişi geometrisi, kaynak prosesinde uygulanan temel parametrelerin doğrudan etkisi altında şekillenmektedir. Özellikle tel elektrot çapı, tel besleme hızı, kaynak torcunun ilerleme hızı, kaynak akımı ve gerilim gibi değişkenler; kaynak dikişinin yüksekliği, genişliği, yüzey düzgünlüğü ve kaynak dikişinin altlık malzemesine olan nüfuziyeti üzerinde doğrudan etkili olmaktadır [3, 40, 54, 57]. Bu parametrelerin uygun şekilde kontrol edilmesi, hedeflenen kaynak dikişi geometrisinin elde edilmesini ve dolayısıyla üretim kalitesinin iyileştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Literatürde, proses parametrelerinin kaynak dikişi geometrisi ve altlık malzemeye olan nüfuziyeti üzerindeki etkilerini inceleyen çok sayıda deneysel çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bulgularına göre, kaynak akımının artırılması, kaynak bölgesine aktarılan enerji miktarını yükseltmekte ve bunun sonucunda birleşme bölgesindeki nüfuziyet derinliği ile birlikte biriktirme hızında artış meydana gelmektedir. Aynı zamanda, kaynak dikişinin yüzey pürüzlülüğünde azalma eğilimi gözlemlenmektedir. Buna karşılık, kaynak geriliminin artırılması, ark uzunluğunun artmasına yol açarak kaynak dikişinin daha yayvan bir forma sahip olmasına neden olmaktadır. Bu durum, enerji yoğunluğunun odaklanma kapasitesini düşürerek, kaynak banyosunda oluşan ısıнын malzeme içerisine etkin şekilde iletilmesini sınırlandırmakta ve dolayısıyla nüfuziyet derinliğinde azalma meydana getirmektedir [3, 53].

Tel besleme hızının artırılması, kaynak dikişi yüksekliğinde artışa yol açarken, kaynak dikişi genişliğinde azalma eğilimi ortaya çıkarmaktadır. Bununla birlikte, torç ilerleme hızının artırılması durumunda, kaynak dikişi genişliğinde ve nüfuziyet derinliğinde azalma meydana gelirken, yüzey pürüzlülüğü artış göstermektedir. Öte yandan, ark gücünün düşük seviyede olduğu koşullarda, ark uzunluğunun aşırı biçimde kısaltılması da yeterli enerji transferini engelleyerek nüfuziyetin hedeflenen değerlere ulaşmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum, yüksek torç ilerleme hızının veya düşük ark gücünün, birleşme kalitesinde zayıflamaya yol açabileceğini ortaya koymaktadır [3, 53]

Dolayısıyla, WAAM sürecinde optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi, kaynak dikişi geometrisinin kontrol edilebilirliğini sağlamak açısından elzemdir. Özellikle dikiş genişliği, yüksekliği, yüzey düzgünlüğü ve birleşme bölgesindeki nüfuziyet derinliği gibi geometrik ve yapısal parametrelerin, proses değişkenleri ile birlikte bütüncül bir yaklaşımla optimize edilmesi sayesinde, üretilen parçaların hedeflenen kalite ve boyutsal tolerans kriterlerini karşılaması mümkün hâle gelmektedir. Aksi durumda, geometrik sapmalar, yüzey kusurları ve birleşme kalitesindeki yetersizlikler gibi istenmeyen üretim hataları kaçınılmaz olacaktır.

2.6. Robotik WAAM Yönteminde Parametrik Modelleme Yaklaşımı

Geleneksel takım yolu üretim yöntemleri, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde çeşitli sınırlamalar içerirken, Eİ teknolojilerinin gelişimi bu sınırlamaların aşılmasına olanak tanıyan yenilikçi ve esnek üretim yaklaşımlarını ön plana çıkarmıştır. Bu doğrultuda, robotik sistemlerle entegre edilen WAAM yöntemi, çok eksenli hareket kabiliyeti ve otomasyon avantajları sayesinde, özellikle karmaşık geometrili yapıların üretiminde etkili bir çözüm sunarak endüstride giderek daha yaygın kullanılmaktadır. Ancak bu üretim yönteminin etkinliği ve üretim kalitesi, doğrudan doğruya takım yolunun ve proses parametrelerinin hassasiyetle tanımlanmasına ve kontrol edilmesine bağlıdır.

Bu doğrultuda, parametrik modelleme yaklaşımı, özellikle WAAM sürecinde takım yolu stratejileri ve üretim parametreleri başta olmak üzere tüm üretim sürecinin dinamik ve bütüncül bir şekilde kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle parametrik modelleme, tasarım ve üretim aşamalarının entegre bir biçimde yönetilmesini mümkün kılan güçlü bir mühendislik aracı olarak öne çıkmaktadır [2, 58]. Genel bir ifade ile parametrik

modelleme; geometrik yapıların belirli kurallar, ilişkiler ve değişkenler çerçevesinde sayısal olarak tanımlandığı ve bu yapıların algoritmik yöntemler aracılığıyla kontrol edildiği hesaplama dayalı bir tasarım yaklaşımıdır [2, 17].

Parametrik tasarım süreci; parametrelerin belirlenmesi, kısıtlamaların tanımlanması ve parametreler arasındaki ilişkilerin oluşturulması olmak üzere üç temel aşamadan meydana gelmekte olup, bu aşamalar birbirleriyle doğrudan etkileşim halindedir ve sürekli olarak birbirini besleyen dinamik bir yapıya sahiptir [59, 60].

Parametrik üç boyutlu modelleme süreci aşağıdaki şekilde yapılandırılmaktadır:

- Parametrelerin tanımlanması: Parametreler, modelin boyutlarını, açılarını ve diğer temel tasarım karakteristiklerini ifade eden değişkenlerdir. Örneğin, bir bileşenin uzunluğu, genişliği, yüksekliği veya açı değerleri gibi geometrik özellikleri parametre olarak tanımlanabilir. Bu parametreler doğrudan sayısal değerler ile tanımlanabileceği gibi, birbirleriyle matematiksel formüller yoluyla da tanımlanabilir [59, 60].
- Kısıtlamaların tanımlanması: Kısıtlamalar, model içerisindeki elemanların birbirleriyle olan konum, yönelim ve ölçüsel ilişkilerini belirleyen sınırlamalardır. Bu sayede tasarım, parametrelerde yapılan değişikliklere rağmen geometrik tutarlılığını ve yapısal bütünlüğünü korur. Makine mühendisliği uygulamalarında sıklıkla kullanılan kısıtlama türleri; geometrik kısıtlamalar (paralellik, diklik, teğetlik ve eş merkezlilik), boyutsal kısıtlamalar (uzunluk, açı ve yarıçap gibi ölçülerin sabitlenmesi veya bağıntılı hale getirilmesi) ve montaj kısıtlamaları (farklı parçaların birbirine göre konumunun ve hareket sınırlarının tanımlanması) şeklinde sınıflandırılmaktadır [59, 60].
- Parametreler arasındaki ilişkilerin oluşturulması: Bu aşamada, modelin bileşenleri arasında parametrik bağıntılar kurulmaktadır. Örneğin, bir parçanın yüksekliğinin genişliğinin iki katı olması gerektiği kuralı tanımlandığında, genişlik parametresinde yapılan bir değişiklik, modelin yüksekliğini de otomatik olarak günceller. Böylelikle model tümüyle birbirine bağlı, tutarlı ve esnek bir şekilde davranış sergiler [59, 60].

Parametrik tasarım ortamında tasarımcıların sorumluluğu, geleneksel CAD yaklaşımlarından farklı olarak, yalnızca geometrik şekillerin modellenmesiyle sınırlı kalmamakta; bunun yanında, tasarımın temelini oluşturan mühendislik kurallarının,

parametreler arasındaki ilişkilerin ve tüm mantıksal altyapının sistematik bir şekilde kurgulanması ve tanımlanmasını da gerektirmektedir [58].

Parametrik modelleme, geleneksel CAD yaklaşımlarına kıyasla mühendislik uygulamalarında önemli avantajlar sunmaktadır:

- Anlık güncelleme ve esnek tasarım imkânı: Parametrik modelleme, yapılan değişikliklerin yalnızca ilgili parametreler üzerinden anlık ve otomatik şekilde tüm modele yansıtılmasına olanak tanıyarak, tasarım sürecinin hızını ve doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır. Geleneksel CAD yöntemlerinde ise benzer bir değişikliğin uygulanabilmesi çoğunlukla tüm modelin baştan oluşturulmasını gerektirmektedir [59, 61–64].
- Optimizasyon çalışmalarını kolaylaştırma: Parametrelerin hızlı bir şekilde değiştirilebilmesi, optimum kesit geometrilerinin, boyutların, malzeme türlerinin veya üretim parametrelerinin sistematik olarak test edilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece mühendislik tasarımlarında hem performans hem de maliyet açısından en verimli çözüm kısa sürede test edilip belirlenebilmektedir [59].
- Farklı tasarım varyasyonlarının hızlı üretimi ve şablon model olarak kullanılabilirlik: Parametrik modelleme yaklaşımı, tanımlanan kural setleri ve algoritmik yapı sayesinde, geleneksel yöntemlerin aksine aynı tasarımın çok sayıda varyasyonunun hızlı ve zahmetsiz şekilde üretilmesine olanak tanır. Ayrıca oluşturulan parametrik modeller, farklı mühendislik projelerinde kolaylıkla şablon model olarak kullanılabilir. Örneğin; yükseklik, çap, kesit boyutları veya eğim gibi parametrelerin değiştirilmesiyle aynı model farklı uygulama senaryolarına uyarlanabilmekte ve her seferinde sıfırdan modelleme yapılmasına gerek kalmamaktadır [58, 59, 61].
- Kontrollü ve verimli deneysel tasarım: Parametrik modellemede modelin tüm bileşenlerinin birbirleriyle ilişkisel olarak bağlı olması, manuel müdahale ihtiyacını azaltmaktadır [2, 59].

Her ne kadar parametrik modelleme önemli avantajlar sağlasa da, bu yaklaşımın en belirgin dezavantajı, parametre sayısı ve ilişkisel yapı arttıkça modelin yönetiminin zorlaşmasıdır. Özellikle büyük ve karmaşık projelerde, parametreler arasındaki ilişkilerin takibi ve kontrolü

deneyimli kullanıcılar için bile güçleşebilmektedir. Bu nedenle, modelin sürdürülebilirliği için sistematik bir yapı ve dikkatli planlama gereklidir.

Parametrik modelleme yaklaşımı, sunduğu avantajlar sayesinde son yıllarda havacılık ve uzay, otomotiv, mimarlık, endüstriyel ekipman tasarımı ve oyun sektörü gibi pek çok alanda yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır [60]. Bu yaklaşımın dikkat çeken kullanım alanlarından biri de robotik WAAM prosesidir. Özellikle serbest formlu yüzeylere ve karmaşık geometrilere sahip parçaların WAAM prosesiyle üretiminde, parametrik modelleme tabanlı takım yolu oluşturulmasına yönelik çalışmalar literatürde son yıllarda artış göstermektedir. Literatürde yer alan bu çalışmaların önemli bir bölümü, hedeflenen ve gerçekleşen yapı yükseklikleri arasındaki sapmaların giderilmesine odaklanmaktadır. Bu sapmalar, genellikle kaynak dikişinin başlangıç ve bitiş bölgeleri arasındaki geometrik farklılıklar, ısı birikiminden kaynaklanan deformasyonlar, proses boyunca kaynak torcu ile üretim yüzeyi arasındaki mesafenin sabit tutulamaması ve katmanlar arası soğuma sürelerinin ideal şekilde ayarlanamaması gibi etmenlerden kaynaklanmaktadır. Bu etkiler, katman yüksekliğinde düzensizliklere, kaynak havuzunun genişliğinde değişimlere ve birikimli geometrik sapmalara neden olmakta; dolayısıyla takım yolunun önceden planlanmış yörüngede ilerlemesini zorlaştırmaktadır. Bu problemlerin önüne geçmek amacıyla bazı araştırmacılar parametrik robot programlama (PRP) yöntemine dayalı adaptif takım yolu kontrolü üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir [13, 16, 65–67].

WAAM prosesinde katman yüksekliğinin adaptif kontrolüne yönelik Feucht ve diğerleri (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, PRP ile oluşturulan takım yolları izo-eğri üretimi ve polinom regresyon teknikleriyle modellenmiş; temas tabanlı sensörler aracılığıyla katman yüksekliği sürekli olarak denetlenmiştir [13]. Heimig ve diğerleri (2020) ise dallı çelik yapılar üretiminde artımsal nokta kaynağı yöntemiyle çalışmış, katman yüksekliği sapmalarını kamera destekli bir sistemle kontrol etmiş ve özellikle eğimli yüzeylere sahip parçaların üretiminde başarılı bir adaptif takım yolu kontrolü gerçekleştirmiştir [65]. Waldschmitt ve Lange (2023), çelik kolonlar üzerinde aktif ve pasif soğutma stratejilerini de entegre ederek, PRP tabanlı sistemin mekanik davranışlar üzerindeki etkisini ortaya koymuştur [66]. Kerber ve diğerleri (2023) tarafından önerilen eşdeğer temas yüzeyi (ECS) kavramı ise, kaynak sırasında oluşan ısı birikimlerin sebep olduğu geometrik sapmaları azaltmak üzere geliştirilmiş; ısı verileri ile takım yolu geometrisi entegre edilerek süreç adaptif hale getirilmiştir [67]. Takip eden bir diğer çalışmada, Kerber ve diğerleri (2024),

sarkan geometrilere sahip yapıların destek malzemesi olmaksızın üretilmesini sağlayan bir kontrol stratejisi sunmuş ve katmanlar arası konumlama doğruluğu başarıyla sağlanmıştır. Aynı zamanda üretim parametreleri ile takım yolu verilerini bütünleşik olarak kaydedebilen dijital bir WAAM bilgi modeli (WIM) altyapısı geliştirilmiştir [68].

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar, WAAM prosesi kapsamında parametrik modelleme ile oluşturulan takım yollarının adaptif şekilde yönetilebildiğini ortaya koymuştur. Bu sayede, üretim sırasında hedeflenen ile gerçekleşen katman yüksekliği arasındaki sapmalar tespit edilerek gerekli adaptif düzeltmeler yapılabilmekte ve parçaların üretim kalitesi artırılabilir. Böylelikle üretim süreci durdurulmadan, takım yolu programlamasının yeniden yapılmasına gerek kalmaksızın, proses sırasında sapmalar uygun yöntemlerle anlık olarak belirlenip giderilmekte ve üretimin sürekliliği sağlanabilmektedir. Ayrıca PRP yaklaşımı sayesinde, robot hafızasında daha az veri saklanması yeterli olmakta, robot programındaki kod miktarı azaltılarak hem yazılım karmaşıklığı hem de hata riski önemli ölçüde düşürülmektedir [13, 16, 65–68].

Parametrik modelleme yaklaşımının WAAM teknolojisine katkı sunduğu bir diğer alan ise, 3B modelleme ve optimizasyon temelli tasarım süreçleridir. Laghi, Palermo, Gasparini ve Trombetti (2020), parametrik tasarım yöntemlerini kullanarak diyagrid yapı formunda çelik kolonlar geliştirmiş ve bu yapıların WAAM ile üretilebilirliğini başarıyla ortaya koymuştur [69]. Benzer şekilde, Ye ve diğerleri (2021) tarafından sunulan çalışmada ise parametrik modelleme, yerleşim ve kesit optimizasyonu ile entegre edilerek çelik kafes kirişlerin yapısal verimliliği artırılmış ve uçtan uca bir WAAM üretim çerçevesi sunulmuştur [32].

Parametrik modelleme sadece WAAM ile sınırlı kalmayıp, diğer eklemeli imalat tekniklerinde de etkin bir araç olarak kullanılmaktadır. Biedermann ve Meboldt (2020), ergiyik biriktirmeli imalat (FDM) sürecinde çoklu akış kanalına sahip nozül tasarımlarını parametrik yöntemlerle geliştirerek akış performansını optimize etmiştir [61]. Mbodj, Abuabiah, Kandaoui, Yaacoubi ve Plapper (2022) ise lazer tel beslemeli eklemeli imalat (LWAM) sürecine, parametrik modellemeyle entegre edilen bir adaptif robotik kontrol sistemi kazandırmış ve bu sistem aracılığıyla G-koda ihtiyaç duymadan yüksek hassasiyetle metal yapı üretimi gerçekleştirmiştir [70]. Parametrik modelleme yaklaşımını temel alan bu akademik çalışmalara ait bilgiler Çizelge 2.3'te sunulmuştur.

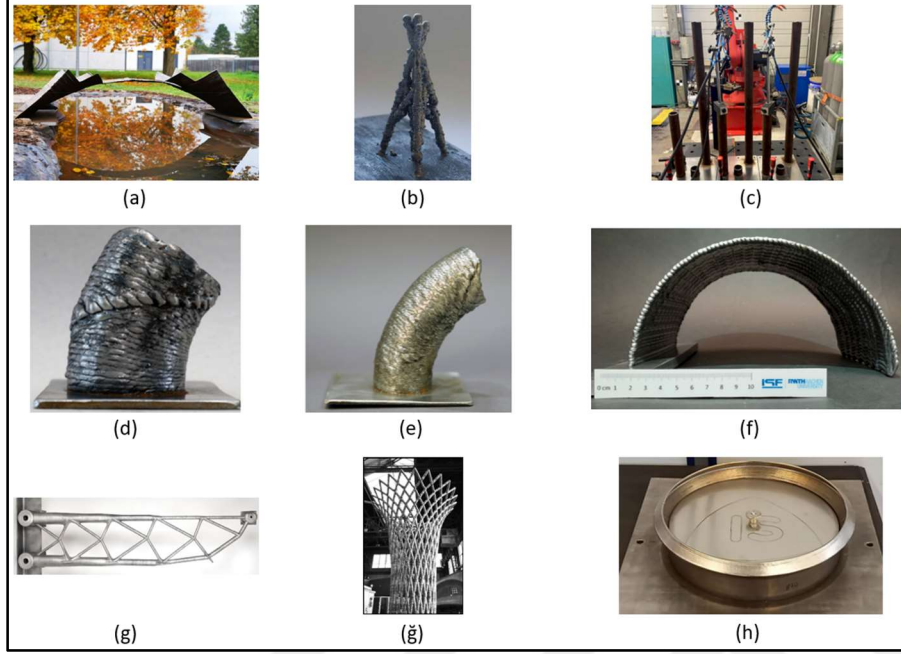
Çizelge 2.3. Parametrik modelleme yaklaşımını temel alan bazı akademik çalışmalar

Çalışma	İmalat Türü	Amacı	Yöntemler	Yazılım	Bilimsel Katkı
Feucht ve diğerleri (2020) [13]	WAAM	Katman yüksekliğindeki sapmaları üretim sırasında tespit edip telafi edebilecek adaptif bir takım yolu kontrol sistemi geliştirmek	-PRP yaklaşımı ile takım yolu oluşturma -Takım yolu koordinatlarının üretim yüksekliğine bağlı fonksiyonlarla tanımlanması -Karmaşık geometrilere sahip yüzeylerin izo-eğrilere bölünmesi ve polinom regresyon yöntemiyle modellenmesi -Katman yüksekliği kontrolünün temas algılama yöntemi ile yapılması	-Rhinoceros 3D & Grasshopper (parametrik CAD modelleme) -Grasshopper (parametrik takım yolu modelleme) -MATLAB (fonksiyon kontrolü ve doğrulama) -Math.Net Numerics (polinom regresyon hesaplamaları) -Galapagos (genetik algoritma optimizasyonu) -Karamba3D (yapısal analiz)	-Katman yüksekliğinde oluşan sapmaların PRP yöntemi ile otomatik olarak telafi edilmesini sağlayan bir iş akışı geliştirilmiştir -Geliştirilen iş akışı çelik köprü üretimi ile doğrulanmıştır -PRP yaklaşımı sayesinde robot programında kullanılan kod miktarında %80 oranında azalma sağlanmıştır -Robot hafızasının ve işlem gücünün daha verimli kullanımı mümkün hale gelmiştir
Heimig ve diğerleri (2020) [65]	WAAM	Dallı çelik yapıların üretimde katman yüksekliğindeki sapmaları gidermek için adaptif bir takım yolu kontrol sistemi geliştirmek	-PRP yaklaşımıyla takım yolunun modellenmesi -Artımsal nokta kaynağı yönteminin kullanılması -Yapı ile torç arasındaki mesafe kontrolünün kamera destekli görüntü işleme yöntemi ile yapılması	-LabVIEW (proses kontrolü) -Rhinoceros 3D & Grasshopper (parametrik CAD modelleme) -Grasshopper (parametrik takım yolu modelleme) -KUKA prc (robot programlama & simülasyon)	-Yatayla 50°'ye kadar eğimli parçaların başarılı şekilde imalatının yapılmıştır -Katman yüksekliğindeki sapmalara karşı anlık düzeltmeler yapılabilen PRP iş akışı geliştirilmiş ve dallı çelik yapıların üretimi ile doğrulanmıştır
Laghi ve diğerleri (2020) [69]	WAAM	Paslanmaz çelik diyagrid kolonların üretimi için parametrik modelleme ve yapısal optimizasyon temelli bir tasarım-üretim sürecinin oluşturulması	-Optimum geometri için parametrik modelleme yaklaşımı ile genetik algoritma temelli optimizasyon ve topolojik tasarım yöntemlerinin uygulanması -Üretimde noktasal kaynak birikimi stratejisinin kullanılması -Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme ve basma testlerinin gerçekleştirilmesi -Geometrik doğruluk ve yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi için 3B lazer tarama yönteminin kullanılması -Yapısal performansın sonlu elemanlar analizi ile belirlenmesi	-Rhinoceros 3D & Grasshopper (parametrik CAD modelleme) -Grasshopper (parametrik tasarım) -Galapagos (genetik algoritma optimizasyonu) -Karamba3D (yapısal analiz) -SAP2000 (sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırmalı analiz)	-WAAM teknolojisinin büyük ölçekli yapısal elemanların üretiminde uygulanabilirliği gösterilmiştir -Genetik algoritma destekli parametrik tasarım süreci üretim kısıtlarını da dikkate alarak entegre edilmiştir -Geliştirilen diagrid kolon tasarımı sabit kesitli silindirik kolonla kıyasla %12 daha hafiftir -İleri düzey mimari formların mühendislik temelli üretimi için örnek bir parametrik tasarıma dayalı iş akışı sunulmaktadır
Biedermann ve Meboldt (2020) [61]	FDM	Birden fazla akış kanalına sahip çok akışlı nozul geometrilerinin otomatikleştirilmiş şekilde tasarlanması için parametrik ve hesaplamalı tasarım sentezi çerçevesinin geliştirilmesi	-Görsel tabanlı parametrik modelleme ile nozul yapısının tanımlanması -Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ile performans değerlendirmesi -Parametrik optimizasyon algoritmaları ile akış performansının iyileştirilmesi	-Rhinoceros 3D & Grasshopper (parametrik CAD modelleme) -Grasshopper (parametrik modelleme) -STAR-CCM+ (hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi) -Opossum (parametrik optimizasyon)	-Çok akışlı nozul tasarımlarının otomatikleştirilmesi için parametrik tasarıma dayalı bir iş akışı geliştirilmiştir -Çok akışlı nozul tasarımları 5–10 saniyede üretilmektedir -Parametrik optimizasyon ile akış hızı homojenliği %69'dan %80'e çıkarılmıştır -Geliştirilen yapı, farklı akış senaryolarına kolayca uyarlanabilir ve çok akışlı bileşenler için özelleştirilebilmektedir.

Çizelge 2.3. (devam) Parametrik modelleme yaklaşımını temel alan bazı akademik çalışmalar

Çalışma	İmalat Türü	Amacı	Yöntemler	Yazılım	Bilimsel Katkı
Ye ve diğerleri (2021) [32]	WAAM	Çelik kafes kirişlerin geometrik ve yapısal performansını optimize etmek amacıyla, parametrik modelleme ve yapısal optimizasyon tekniklerini entegre eden uçtan uca bir üretim çerçevesi geliştirmek	-Yerleşim optimizasyonu -Geometri optimizasyonu -Kesit optimizasyonu -Sonlu elemanlar analizi	-Peregrine (yerleşim ve geometri optimizasyonu) -Rhinoceros 3D & Grasshopper (parametrik CAD modelleme) -MATLAB (kesit optimizasyon algoritması) -ABAQUS (sonlu elemanlar analizi)	-Optimize edilmiş kafes kirişlerin kapasite-kütle oranları eş değer geleneksel tasarımlara kıyasla en az 2 kat yüksektir -WAAM üretim sınırlamalarını ve burkulma koşullarını dikkate alan uçtan uca üretim çerçevesi geliştirilmiştir
Mbodj ve diğerleri (2022) [70]	LWAM	G-kodu üretimine gerek duyulmaksızın, parametrik modelleme tabanlı adaptif robotik takım yollarının geliştirilmesi	- PRP yaklaşımıyla takım yolunun modellenmesi	-Rhinoceros 3D & Grasshopper (parametrik CAD modelleme) -Grasshopper (parametrik takım yolu modelleme) -HAL (robot programlama) -RobotStudio (proses simülasyonu & kontrolü)	-Parametrik modelleme ile, G-kodu gerektirmeden doğrudan üretim kodu üreten adaptif bir robot takım yolu geliştirilmiştir. -Düz duvar, içi boş silindirik ve karmaşık yüzeyli üç metal yapı, dijital modellerine göre %3,58–7,15 hata oranıyla üretilmiştir.
Waldschmitt ve Lange (2023) [66]	WAAM	-Dairesel içi boş kesitli çelik kolonların PRP yöntemi ile üretilmesi ve elde edilen yapıların mekanik davranışlarının değerlendirilmesi	- PRP yaklaşımıyla takım yolunun modellenmesi -Katman yüksekliğinin temas algılama yöntemi ile kontrol edilmesi -Aktif (su ve hava destekli) ve pasif (beklemeli) soğutma stratejilerinin uygulanması -Mekanik özelliklerin basma testleriyle belirlenmesi	-Rhinoceros 3D & Grasshopper (parametrik CAD modelleme) -Grasshopper (takım yolunun parametrik modellenmesi)	-Katman yüksekliğindeki sapmalara karşı anlık düzeltmeler yapılabilen PRP iş akışı geliştirilmiş ve farklı uzunluklarda 21 adet kolon başarıyla üretilmiştir -Aktif soğutma stratejisi kullanılarak üretilen numunelerin mekanik özellikleri, tel elektrot malzemesinin mekanik özelliklerine yakın değerler göstermektedir
Kerber ve diğerleri (2023) [67]	WAAM	Isıl dinamiklerin modellenmesi için yardımcı değişken ECS'nin tanımlanması, bu değişkene dayalı parametrik modelleme yöntemiyle dinamik takım yolu stratejisinin geliştirilmesi	-PRP yaklaşımıyla takım yolunun modellenmesi -ECS modeli sayesinde sıcaklık verisine dayalı adaptif takım yolu planlaması -Katmanlar arası sıcaklık değerlerinin kamera aracılığıyla izlenmesi -Kaynak işlemleri sırasında oluşan sıcaklık verilerinin geliştirilmiş Python tabanlı bir arayüz aracılığıyla toplanıp ECS kavramının geliştirilmesinde kullanılması	-Grasshopper (parametrik takım yolu modelleme) - IoT tabanlı bulut destekli uzaktan kontrol altyapısı (proses kontrolü ve verilerinin toplanması) -Python destekli veri işleme arayüzü -WIM (süreç verilerinin depolanması)	-ECS modeli ile ısı gerilmeler ve geometrik sapmalar optimize edilmiştir -IoT tabanlı kontrol altyapısı, proses parametreleri ile sensör verilerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini, analiz edilmesini ve senkronize edilmesini sağlamıştır -ECS modeliyle destek yapısı olmadan çıkıntılı geometriler üretilmiş, takım yolu sıcaklığa göre dinamik olarak yönlendirilebilmiştir -Geometrik doğruluk, üretim sürekliliği ve malzeme verimliliği arttırılmıştır
Kerber ve diğerleri (2024) [68]	WAAM	Sarkan geometrilere sahip yapıların dış eksen kullanmaksızın, destek yapısı gerektirmeden üretimini mümkün kılacak bir WAAM sürecinin planlanması ve bu süreç parametrelerini optimize edecek bir bilgi modelinin geliştirilmesi	-Parametrik modelleme yaklaşımı ile 3B CAD tasarımını -Proses parametrelerinin kaynak dikişi geometrisi üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi -Katmanlar arası sıcaklık değerlerinin kamera aracılığıyla izlenmesi -WAAM sürecine ilişkin verilerin sistematik olarak kaydedildiği WIM veritabanının oluşturulması	-Rhinoceros 3D & Grasshopper (parametrik CAD modelleme) -Grasshopper (parametrik takım yolu modelleme) -KUKA prc (robot programlama & simülasyonu) -Python destekli veri işleme arayüzü - IoT tabanlı bulut destekli uzaktan kontrol altyapısı (proses kontrolü ve verilerinin toplanması) -WIM (süreç verilerinin kaydedilip, analiz edilmesi)	-Harici eksen kullanılmaksızın, 180° eğrilige sahip bir referans geometrinin üretimi başarıyla gerçekleştirilmiş; sarkan geometrilere sahip yapıların harici destek yapısı kullanılmadan üretilbildiği gösterilmiştir -WIM ile tüm üretim adımları dijital olarak kaydedilmiş, böylece üretimden elde edilen veriler hem geriye dönük analiz hem de ileriye dönük parametrik optimizasyon için kullanılabilir hale getirilmiştir

Çizelge 2.3'te yer alan akademik çalışmalarda geliştirilen parametrik modelleme yaklaşımlarının doğrulanması için üretilen bazı parçalar Resim 2.5'te gösterilmektedir.



Resim 2.5. Parametrik modelleme yöntemi kullanılarak üretilmiş bazı parça örnekleri (a) yaya köprüsü [13], (b) dallı yapı [65], (c) dairesel içi boş kesitli çelik kolonlar [66], (d) kavisli metal parça [67], (e) eğimli tek cidarlı yapı [68], (f) ark şeklinde parça [68], (g) çelik kafes kiriş [32], (ğ) diyagrid kolon [69], (h) metal kompleks parça [70]

2.7. WAAM Süreçlerinde Farklı Yazılımların Kullanılması

Eİ'nin farklı sektörlerde hızla yaygınlaşması, tasarım süreçlerinde paradigmaların değişmesine neden olmuştur. Geleneksel tasarım ilkeleri, Eİ yöntemlerinin sunduğu potansiyeli sınırlamakta; bu nedenle eklemeli imalat için tasarım (DfAM) kavramı literatürde önemli bir yer edinmiştir. Günümüzde birçok önde gelen CAD yazılım geliştiricisi, ürünlerine DfAM işlevselliğini entegre etmeye başlamış olsa da, tasarımdan üretime kadar olan tüm süreci kapsayan entegre ve bütünlük yazılım çözümleri halen sınırlı sayıdadır [19]. Robotik WAAM süreci, birbirini takip eden çok sayıda aşamadan oluşmakta olup, bu sürecin her adımında çeşitli CAD/CAM yazılımları ve sayısal mühendislik araçları etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 2.20'de, WAAM yönteminin farklı aşamalarında kullanılan bazı yazılım araçları sunulmaktadır [18, 19, 71]. Bu sürecin her aşamasına yönelik bütünlük ve entegre çözüm sunabilen yazılım altyapılarının geliştirilmesi, hem yazılımlar arasında yinelenen geçişlerin ortadan kaldırılmasını sağlamakta, hem de geçişlerde yaşanan

bilgi kayıplarını azaltarak proses verimliliğini artırmaktadır [19, 72]. Bu noktada Rhinoceros 3D ve eklentisi Grasshopper, sundukları algoritmik modelleme olanakları ve geniş eklenti ekosistemi sayesinde, WAAM süreçlerine bütüncül bir çözüm sunabilecek niteliktedir.



Şekil 2.20. WAAM proses aşamalarında kullanılan bazı yazılım araçları [18, 19, 71]

Rhinoceros 3D, düzgün olmayan rasyonel temelli eğriler (NURBS) tabanlı modelleme altyapısı sayesinde karmaşık yüzey geometrilerinin yüksek hassasiyetle ve doğrulukla tanımlanmasını mümkün kılan gelişmiş bir CAD yazılımıdır [73, 74]. Rhino'nun Grasshopper eklentisi ise, görsel algoritmik modelleme platformu olarak parametrik tasarımı mümkün kılmakta ve kodlama bilgisi gerektirmeden kullanıcıların tasarım süreçlerine yönelik algoritmalar geliştirmesine olanak tanımaktadır. Geliştirilen algoritmalar aracılığıyla; geometrik parametrizasyonun gerçekleştirilmesi, çok sayıda tasarım değişkeninin eş zamanlı olarak denetimi ve modelin anlık olarak güncellenmesi gibi işlevler sağlanabilmekte [73], bu da WAAM süreçlerinin farklı üretim senaryolarına uygun şekilde kolaylıkla yeniden yapılandırılmasına olanak tanımaktadır. Tasarımdaki her değişiklik Rhino ara yüzünde eş zamanlı olarak görselleştirilebildiğinden, modelleme süreci anlık geri bildirimlerle yönlendirilebilmektedir.

Grasshopper altyapısı, WAAM süreçlerinde kritik öneme sahip olan dilimleme, takım yolu oluşturma ve malzeme biriktirme simülasyonu gibi adımların parametrik olarak kontrol edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, Grasshopper tabanlı KUKA|pro ve Robots gibi eklentiler aracılığıyla, Rhino ortamı içerisinde doğrudan robot programlaması gerçekleştirilebilmektedir. Bu eklentiler sayesinde endüstriyel robotların pozisyonları, hız profilleri ve kaynak parametreleri parametrik biçimde tanımlanabilmekte; ayrıca farklı robot

üreticilerine uygun kontrol kodları otomatik olarak üretilebilmektedir. Bu bütünleşik yapı, WAAM uygulamalarında karşılaşılan yazılım geçişlerini, harici yazılım bağımlılıklarını büyük ölçüde azaltmaktadır. Böylece, tasarımdan üretime kadar olan süreç tek bir dijital platform üzerinde entegre biçimde yönetilebilmektedir. Ayrıca Grasshopper; Python, IronPython ve C# gibi programlama dilleriyle uyumlu çalışarak, kullanıcı tanımlı özel algoritmaların sistem mimarisine entegre edilmesine imkân sunmaktadır.

Sonuç olarak, Rhinoceros 3D ve Grasshopper tabanlı yazılım altyapısı, WAAM süreçleri için yalnızca bir tasarım aracı olmanın ötesine geçmekte; parametrik modelleme, algoritmik kontrol, robotik üretim ve dijital simülasyon gibi tüm alt süreçleri bir araya getirerek entegre, esnek ve yeniden yapılandırılabilir bir üretim platformu sunmaktadır.

3. PARAMETRİK TAKIM YOLU ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ

Bu bölümde, WAAM yöntemi için parametrik modelleme yaklaşımına dayalı takım yolu algoritmalarının geliştirilme süreçleri açıklanmıştır. İlk aşamada, WAAM proses adımlarının algoritmik olarak modellenmesine olanak tanıyacak yazılım altyapısı belirlenmiş ve çalışma mantığı açıklanmıştır. Ardından, 3B CAD modellerin üretime uygun biçimde katmanlara ayrılmasını sağlayan parametrik dilimleme algoritmasının geliştirilme süreci açıklanmış, devamında ise her bir katman için takım yolu oluşturma stratejilerinin nasıl belirlendiği detaylandırılmıştır. Oluşturulan takım yollarının uygun robot komutlarına dönüştürülmesini sağlayan özel bir son işlemci (ing. post-processor) yapısı geliştirilmiş ve endüstriyel robot kolun üretim için nasıl programlandığı açıklanmıştır. Son olarak üretim öncesinde malzeme birikiminin simüle edilebilmesi için bir simülasyon algoritması oluşturulmuştur.

3.1. Yazılım Altyapısının Belirlenmesi

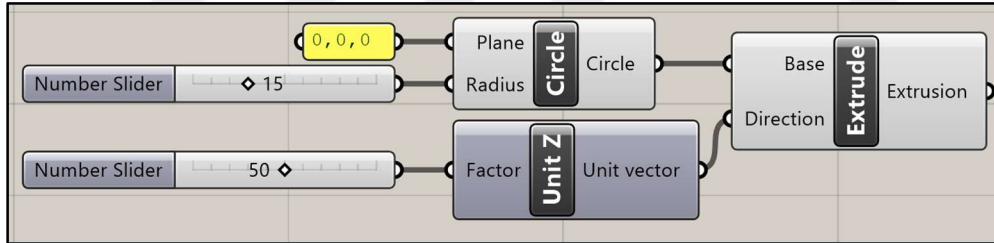
Bu çalışmada, WAAM yönteminin tüm üretim adımlarını tek bir dijital ortamda birleştiren bütünsel ve parametrik bir iş akışı geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, WAAM prosesinin dilimleme, takım yolu oluşturma, robotik programlama ve üretim simülasyonu gibi tüm aşamalarının algoritmik olarak modellenip yürütülmesine imkân tanıyan bir yazılım altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu gereksinimleri karşılamak amacıyla, 2.7. numaralı alt başlıklı bölümde ayrıntılı şekilde açıklanan avantajları ve özellikleri doğrultusunda, Rhinoceros 3D ve bu platform üzerinde çalışan Grasshopper eklentisi tercih edilmiştir. Ayrıca, oluşturulan takım yollarının robot hareket komutlarına dönüştürülmesi için Robots eklentisi kullanılarak robotik programlama süreci dijital ortama entegre edilmiştir.

Grasshopper programının çalışma mantığı

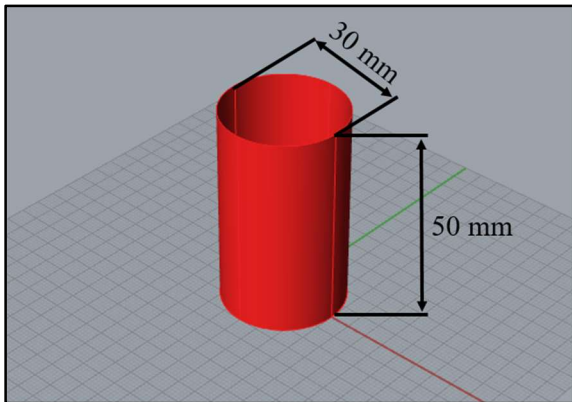
Parametrik modelleme platformu Grasshopper, 3B modelleme yazılımı Rhinoceros 3D ile bütünsel olarak çalışmakta olup, kullanıcıya görsel programlama temelli bir kullanıcı arayüzü sunmaktadır. Parametrik modelleme süreçleri iki temel çalışma penceresi üzerinden yürütülmektedir. Birinci pencere, algoritmik tanımlamaların gerçekleştirildiği ve bileşen

tabanlı yapının oluşturulduğu Grasshopper arayüzüdür; ikinci pencere ise, bu algoritmalar sonucunda elde edilen geometrik yapıların 3B ortamda görselleştirildiği Rhinoceros 3D arayüzüdür [17, 59].

Grasshopper'daki her bir bileşen, giriş ve çıkış parametreleri aracılığıyla çalışır. Kullanıcı, bir bileşenin çıkışını başka bir bileşenin girişine bağlayarak bileşenler arasında bir ağ yapısı kurar [17, 59]. Bu yapının işleyişi, içi boş silindirik bir geometri oluşturmak amacıyla geliştirilen ve Resim 3.1'de gösterilen algoritmik yapı üzerinden açıklanabilir. İlk adımda, kullanıcı çemberin merkez noktası ile yarıçap değerlerini tanımlar ve bu parametreler bir çember bileşenine giriş olarak bağlanarak iki boyutlu bir çember geometrisi oluşturulur. Elde edilen bu taban geometrisi, tanımlanan yükseklik parametresiyle birlikte bir ekstrüzyon bileşenine aktarılır +Z ekseninde yönlendirilmiş bir vektör boyunca uzatılarak üç boyutlu bir silindirik hacim elde edilir. Yükseklik bilgisi, sayısal bir değer ile tanımlanmakta; bu değer, birim Z vektörü ile çarpılarak ekstrüzyon yönünü tanımlayan bir vektöre dönüştürülmektedir. Elde edilen hacimsel model, Resim 3.2'de görüldüğü üzere Rhinoceros 3D ortamında eş zamanlı olarak görselleştirilmektedir.



Resim 3.1. İçi boş silindirik geometri için Grasshopper ortamında oluşturulan parametrik algoritma yapısı



Resim 3.2. Örnek olarak oluşturulan içi boş silindirik geometrinin Rhinoceros 3D ortamında görselleştirilmiş hali

Tanımlanan bu parametrik yapı sayesinde, yarıçap veya yükseklik gibi herhangi bir parametrede yapılan değişiklik, modelin tüm algoritmik yapısını etkileyerek geometrinin anlık olarak güncellenmesini mümkün kılmaktadır.

3.2. Dilimleme Algoritmasının Geliştirilmesi

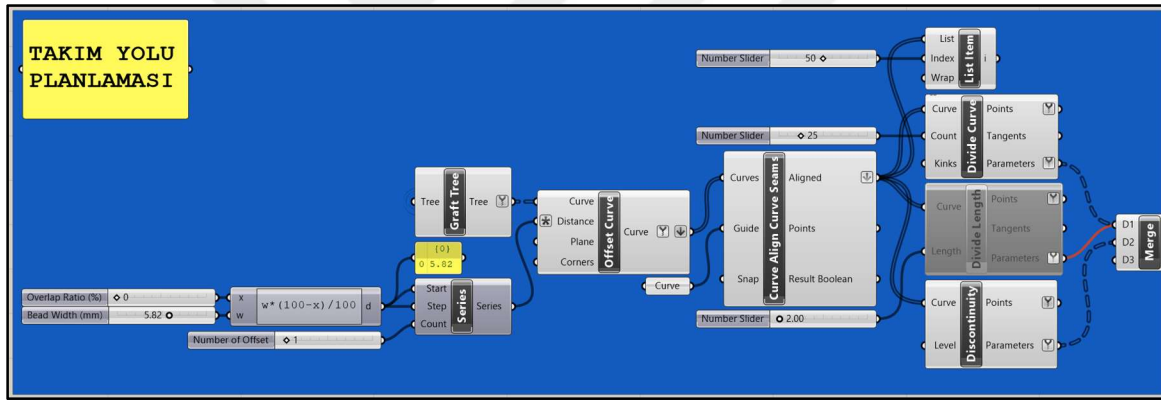
Katmanlı üretim prensibine dayanan WAAM yönteminde, üretilecek parçanın üç boyutlu modelinin dikey ekseninde (Z yönü) belirli aralıklarla katmanlara ayrılması gerekmektedir. Bu işlem, kaynak yolunun her katman için ayrı ayrı tanımlanabilmesi ve biriktirme sürecinin katman bazlı yürütülebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda geliştirilen dilimleme algoritması, +Z yönünde uygulanan 2,5B dilimleme stratejisine dayanmaktadır. Geleneksel yöntemlerde yaygın olarak kullanılan standart üçgen dil (STL) formatı yerine, Grasshopper ortamında doğrudan NURBS tabanlı geometri üzerinden dilimleme yapılabilmesi sayesinde, model yüzeyleri daha hassas biçimde işlenebilmekte ve dilimleme sonucunda elde edilen kesit profilleri daha yüksek doğrulukta tanımlanabilmektedir. Bu durum, özellikle karmaşık yüzeylere sahip parçaların üretiminde, boyutsal doğruluğun artırılmasına ve üretim sonrası geometrik sapmaların azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Geliştirilen dilimleme algoritmasının temsili uygulanış aşamaları Resim 3.3'te, parametrik bileşen yapısı ise Resim 3.4'te sunulmuştur. İlk aşamada, üretimi gerçekleştirilecek olan parçanın geometrisi sınır gösterimi (ing. brep) bileşeni aracılığıyla tanımlanmalıdır (bkz. Resim 3.3.a). Bu bileşene tanımlanacak geometri, doğrudan Grasshopper veya Rhinoceros 3D ortamında modellenebileceği gibi, harici bir CAD yazılımında hazırlanarak STEP veya IGES gibi standart dosya formatları üzerinden içe aktarılmış bir model de olabilmektedir. Ardından 3B modelin dış sınırlarını belirlemek üzere bir sınırlayıcı kutu oluşturulmuş (bkz. Resim 3.3.b) ve bu kutunun alt (A köşesi) ve üst (E köşesi) köşe noktaları arasında, modelin toplam yüksekliğini temsil eden bir referans doğrusu tanımlanmıştır (bkz. Resim 3.3.c). Bu doğru kullanıcı tarafından tanımlanan katman yüksekliği (ing. layer height) parametresine göre eşit aralıklı noktalara bölünmüş; elde edilen bu noktalar, her bir katman düzleminin merkezini belirleyen referans noktalar olarak kullanılmıştır (bkz. Resim 3.3.d). Başka bir ifadeyle, modelin toplam yüksekliği katman yüksekliğine bölünerek oluşturulacak katman sayısı da belirlenmiştir.

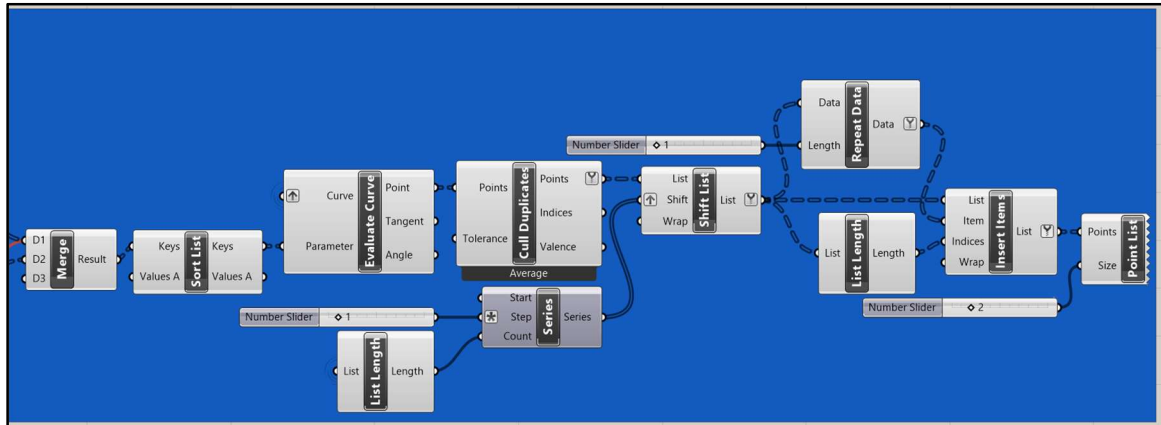
3.3. Takım Yolu Planlaması ve Oluşturulması

Üretilcek modelin katmanlara ayrılmasının ardından, dilimleme sürecinde elde edilen her bir katmana ait kesit profilleri temel alınarak, kaynak torcunun izleyeceği takım yolunun planlanması gerekmektedir. Bu planlama, biriktirme sürecinin geometrik doğruluğunu, proses verimliliğini ve kaynak dikişi kalitesini doğrudan etkilediğinden, WAAM prosesinin en kritik aşamalarından birisidir.

Geliştirilen takım yolu oluşturma algoritması, tek dikişli yığma veya kontur desene dayalı yığma stratejileri doğrultusunda çalışacak şekilde parametrik olarak tasarlanmıştır. Geliştirilen algoritmaya ait parametrik takım yolu planlama yapısı, Resim 3.5 ve Resim 3.5 (devam)'da iki parça hâlinde sunulmuştur.



Resim 3.5. Grasshopper ortamında geliştirilen takım yolu planlama algoritmasına ait parametrik bileşen yapısı



Resim 3.5. (devam) Grasshopper ortamında geliştirilen takım yolu planlama algoritmasına ait parametrik bileşen yapısı

Takım yolu stratejinin belirlenmesi

Geliştirilen takım yolu oluşturma algoritması, tek dikişli yığma ve kontur tabanlı yığma stratejilerini destekleyecek şekilde tasarlanmış olup, uygulanacak strateji, kullanıcı tarafından belirlenen eğri öteleme sayısına bağlı olarak seçilebilmektedir. Eğer öteleme sayısı parametresi 1 olarak atanırsa, her bir katmandaki kesit eğriler için yalnızca tek bir kaynak dikişi oluşturulmakta ve böylece tek geçişli bir yığma stratejisi uygulanmaktadır. Buna karşın, parametre değeri birden büyük olarak belirlendiğinde, her bir katmandaki kesit eğrisi referans alınarak içe doğru ötelenmiş çoklu eğriler elde edilmekte ve bu eğriler üzerinden takım yolları oluşturularak kontur temelli bir yığma stratejisi yürütülmektedir. Ayrıca kaynak dikişi genişliği ve örtüşme oranı da kullanıcı tarafından belirlenebilen parametreler olarak tanımlanmıştır. Kaynak dikişlerinin merkezleri arasındaki mesafe Eş. 3.1 ile hesaplanmaktadır.

$$d = \frac{w \times (100-x)}{100} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte, d mm cinsinden kaynak dikişlerinin merkezleri arasındaki mesafeyi; w mm cinsinden kaynak dikişi genişliğini; x ise yüzde olarak örtüşme oranını ifade etmektedir.

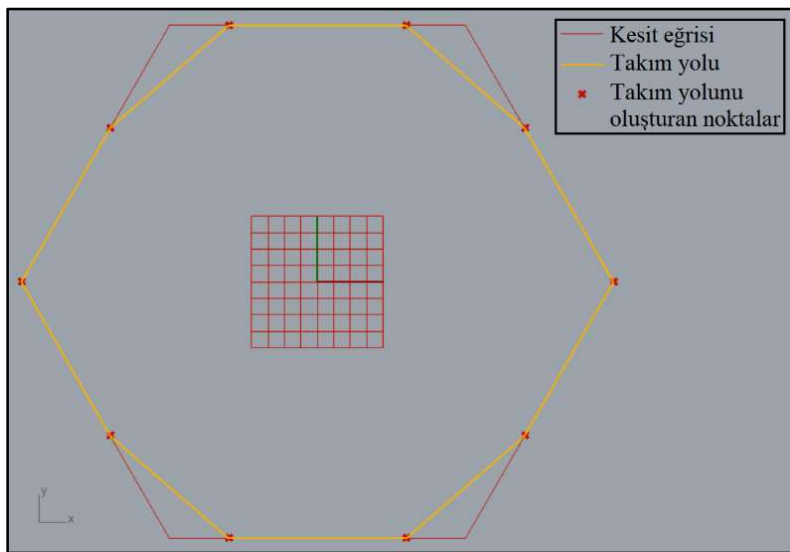
Kaynak dikişlerinin merkezleri arasındaki mesafe belirlendikten sonra, katman kesitlerinin parçanın en dış yüzeyini temsil etmesi nedeniyle, bu kesitler $(-d/2)$ kadar model geometrisinin dış sınırından içe doğru ötelenmiştir. Bu yaklaşım ile oluşturulan ilk kaynak dikişinin merkez eksenini ile parçanın dış yüzeyi arasında yarım dikiş genişliği kadar mesafe olmakta ve böylece biriktirilecek malzemenin tam olarak parça yüzeyi üzerine konumlandırılması amaçlanmaktadır.

Takım yolunun noktasal temsilinin oluşturulması

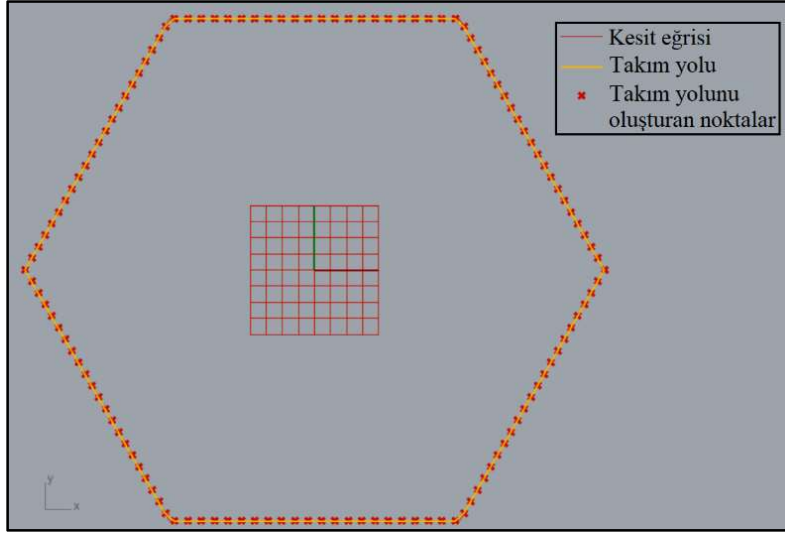
Yığma stratejisinin belirlenmesini takiben, takım yolu oluşturma sürecinin ikinci aşamasında, robot kolun takip edeceği yolun noktasal temsilinin oluşturulması gerekmektedir. Robotik WAAM uygulamalarında, takım yolları genellikle katman kesitlerini temsil eden eğrilerin belirli aralıklarla bölünerek ayrık nokta dizilerine dönüştürülmesi yoluyla oluşturulmakta ve bu sayede robot hareketleri nokta tabanlı olarak

tanımlanmaktadır. Bu çalışmada da benzer bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu doğrultuda takım yollarının noktasal temsilleri üç farklı yöntem kullanılarak oluşturulmaktadır. İlk yöntemde eğriler kullanıcı tarafından belirlenen parça sayısına göre bölünmekte ve eşit mesafeli noktalar oluşturulmaktadır. İkinci yöntemde ise, eğriler kullanıcı tarafından belirlenen uzunluk aralıklarına göre segmentlere ayrılarak, her bir segmentin başlangıcına bir nokta yerleştirilmekte ve böylece eğri boyunca toplam uzunluğa bağlı olarak uygun sayıda nokta oluşturulmaktadır.

Takım yolunun noktasal temsilinin oluşturulması aşamasında dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan birisi, hedeflenen üretim hassasiyetine ulaşılabilmesi için takım yolunun, kesit profillerini yeterli geometrik doğrulukla takip edebilmesidir. Bu doğruluğun sağlanabilmesi için, söz konusu eğriler üzerinde uygun sayıda ve ideal uzunluk aralıklarında noktaların tanımlanması gerekmektedir. Zira kesit eğrileri üzerinde eşit aralıklı az sayıda noktanın oluşturulması ya da noktalar arasındaki mesafenin fazla olması, Resim 3.6'daki örnek bir kesit eğrisinde görüleceği üzere, eğri geometrisinin yeterli doğrulukla izlenememesine ve dolayısıyla takım yolu çözünürlüğünün düşmesine neden olmaktadır. Öte yandan, Resim 3.7'de gösterildiği gibi eğriler üzerinde eşit aralıklı çok sayıda nokta oluşturulması veya aşırı sık aralıklarla noktaların tanımlanması, takım yolu çözünürlüğünü artırsa da, veri işleme yükünün artmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple takım yolunun noktasal temsili oluşturulurken noktaların sıklığı ideal bir değerde tutulmalıdır.



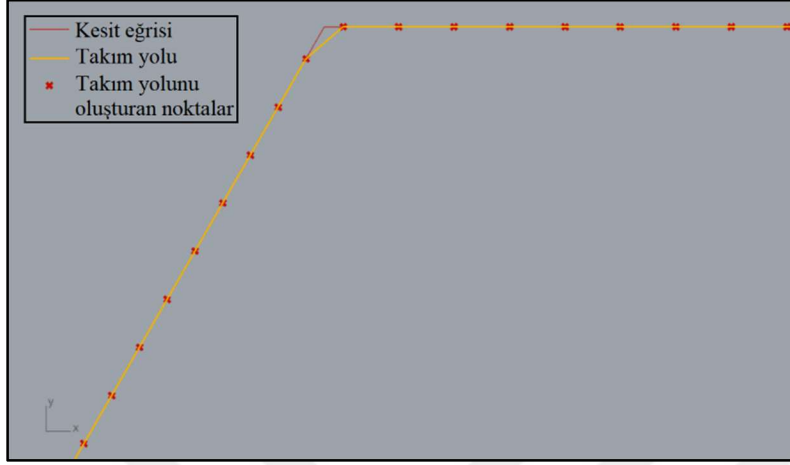
Resim 3.6. Düşük sayıda eşit aralıklı noktalara bölünmüş örnek altıgen bir kesit eğrisinde, takım yolu çözünürlüğünün azalması ve eğri geometrisinin yüksek doğrulukla izlenememesinin temsili gösterimi



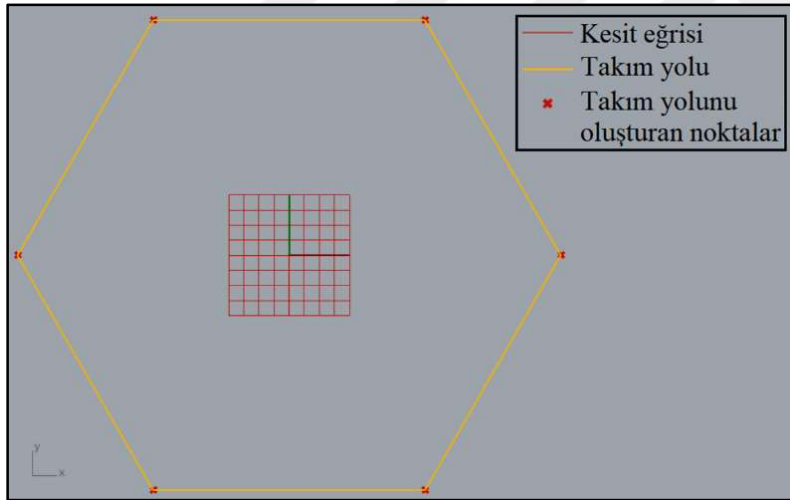
Resim 3.7. Yüksek sayıda eşit aralıklı noktalara bölünmüş örnek altıgen bir kesit eğrisinde, takım yolu çözünürlüğünün artması ve eğri geometrisinin yüksek doğrulukla izlenmesinin temsili gösterimi

Birinci ve ikinci yöntemin her ikisi de takım yolunun noktasal temsiline oluşturulmasında aktif olarak kullanılmakla birlikte, Resim 3.7’de olduğu gibi bu bileşenler kullanılarak yüksek sayıda nokta tanımlanmış olsa dahi, keskin köşe geçişlerine sahip eğri geometrilerinde köşe bölgelerde nokta tanımlanmayabilmektedir. Bu durum Resim 3.7’de sunulan altıgen kesit eğrisinin sol üst köşesine yakından bakıldığında açıkça gözlemlenebilmekte olup, ilgili köşe bölgesine ait detaylı görünüm Resim 3.8’de sunulmakta ve söz konusu köşe noktasında herhangi bir nokta oluşmadığı net bir şekilde görülmektedir. Bu nedenle, köşe noktalarında hassasiyetin korunabilmesi adına üçüncü yöntem geliştirilen algoritmaya entegre edilmiştir. Üçüncü yöntemde, eğri boyunca olan geometri değişimlerinde teğet yönünde ani değişimlerin meydana geldiği kırılma bölgeleri algılanarak bu bölgelerde noktalar oluşturmaktadır. Böylece, köşe geçişlerinin atlanmasının önüne geçilmekte ve takım yolunun daha yüksek doğrulukla eğri geometrisine uyum sağlaması mümkün hâle gelmektedir. Ayrıca, Resim 3.6’daki gibi yalnızca düz çizgilerden ve köşe noktalarından oluşan nispeten basit geometrilerde, takım yolu oluşturma aşamasında süreksizlik bileşeninin tek başına kullanımı yeterli olmakta; bu durum, kod satırı sayısını azaltarak veri yükünü hafifletmekte ve daha sade, yönetilebilir bir takım yolu üretimine olanak tanımaktadır. Nitekim, Resim 3.9’da gösterildiği üzere, örnek altıgen bir kesit eğrisi için üçüncü yöntem kullanılarak oluşturulan takım yolu yalnızca 6 noktadan oluşmakta ve yüksek doğrulukla eğri geometrisine uyum sağlamaktadır. Takım yolunun noktasal temsiline oluşturulmasında kullanılan bu üç yöntem, kullanıcı tercihi ve modelin

geometrik karmaşıklığına göre aktif ya da pasif hâle getirilebilmekte, böylece takım yolu oluşturma sürecinde kullanıcıya esneklik sağlanmaktadır.



Resim 3.8. Keskin köşelere sahip örnek bir kesit eğrisi üzerinde birinci yöntem ile eşit aralıklı noktaların tanımlanması ve köşe bölgesinde nokta tanımlanmaması sorunu



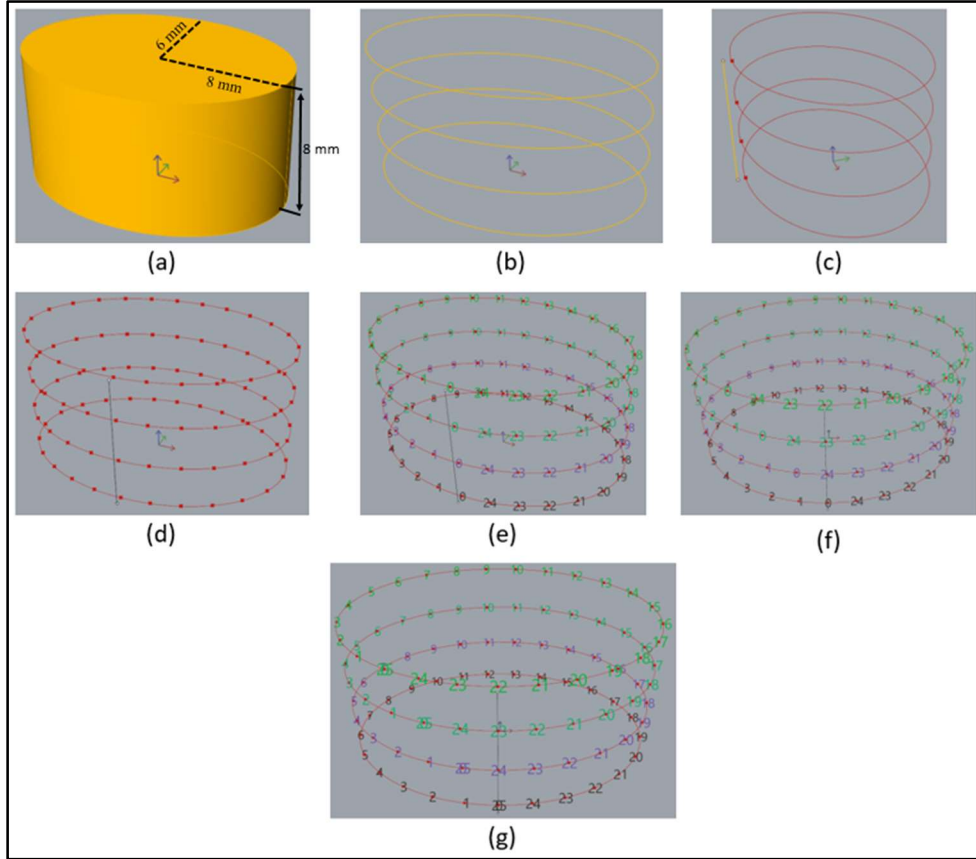
Resim 3.9. Altıgen kesit eğrisi üzerinde süreksizlik bileşeni ile oluşturulmuş takım yolu

Geliştirilen takım yolu planlama algoritmasına eklenen bir diğer özellik ise takım yolunun noktasal temsili oluşturulduktan sonra, üst üste örtüşen veya birbirine çok yakın mesafede konumlanan noktaların filtrelenmesidir. Bu sayede hem gereksiz veri işlenmesinin hem de kaynak torcunun olası gereksiz tepkiler vermesinin önüne geçilmektedir. Böylelikle takım yolu boyunca oluşturulan nokta listesi optimize edilmekte; süreç, hem geometrik doğruluk hem de hesaplama verimliliği açısından daha kararlı bir şekilde yürütülebilmektedir.

Kaynak başlangıç noktalarının yönlendirilmesi ve ötelenmesi

Geliştirilen algoritmanın dikkat çeken bir diğer yönü, WAAM sürecinde sıkça karşılaşılan kaynak başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki yükseklik farkından kaynaklanan kaynak profilindeki düzensizliklerin önüne geçmeyi hedefleyen bir strateji barındırmasıdır (bkz. Resim 2.9). Kaynak dikişinin düzensiz profile sahip olmasının nedenlerine 2.5.1. numaralı alt başlıkta detaylıca değinilmiş, robot kolunun hız geçişlerinden kaynaklanan kinematik etkilerin ve ark karakteristiğindeki dinamik değişkenliklerin, kaynak başlangıç ve bitiş noktalarında yükseklik farkı oluşmasına sebebiyet verdiği belirtilmiştir. Söz konusu problemler sonraki katmanları da etkilemekte ve birkaç katmandan sonra sapmaların kümülatif olarak artması sonucu parçanın beklenen şekline kıyasla önemli geometrik sapmaların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu durum da üretim kalitesini olumsuz etkilemektedir.

Bu problemin önüne geçmek adına, bir takım stratejiler geliştirilmiş, Resim 3.10'da geliştirilen bu yöntemin adım adım uygulandığı örnek bir parça üzerinde görsel olarak sunulmuştur. İlk aşamada, üretilecek parça modelinin dış yüzeyine, tabandan tavana doğru uzanan ve kullanıcı tarafından manuel olarak tanımlanan bir yönlendirici eğri oluşturulmaktadır. Bu eğri referans alınarak, her bir katmana ait kesit profillerinin başlangıç noktaları, söz konusu eğriye en yakın konuma otomatik olarak hizalanmakta; böylece, tüm kesit profillerinin başlangıç noktaları +Z eksenini boyunca aynı doğrultuda konumlandırılmaktadır (bkz. Resim 3.10.c). Kesit profilleri üzerinden takım yolunun noktasal temsili oluşturulduktan sonra (bkz. Resim 3.10.d) her bir katmandaki kaynak başlangıç noktası kullanıcı tarafından belirlenen miktarda ve yönde bir önceki katmana göre ötelenmektedir. Böylelikle her katmanda kaynak işlemi farklı bir konumdan başlatılmaktadır (bkz. Resim 3.10.f). Devamında her bir katmanda kaynak başlangıç ve bitiş noktalarının aynı konumda olacak şekilde düzenlenmesi ile dikiş bütünlüğü sağlanmıştır (bkz. Resim 3.10.g). Bu yöntem sayesinde, kaynak başlangıç noktaları kullanıcı tercihiyle bağlı olarak istenilen sayıda ve yönde (saat yönünde ya da saat yönünün tersine) ötelenebilmekte, kaynak başlangıç ve bitiş noktalarının model yüzeyi üzerinde hem konumsal hem de yönsel olarak kontrol edilebilirliği artırılmaktadır. Geliştirilen bu metod ile katmanlar arası sapmaların üretim süreci boyunca kümülatif olarak artmasının önüne geçilmesi amaçlanmıştır.



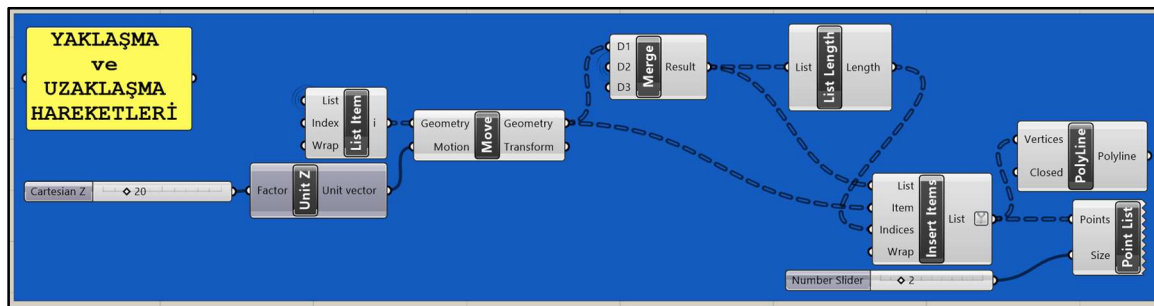
Resim 3.10. Kaynak başlangıç noktalarının yönlendirilmesi ve ötelenmesi stratejisinin örnek parça üzerinde uygulandığı (a) modelin oluşturulması, (b) modelin dilimlenmesi, (c) yönlendirici eğrinin tanımlanması ve başlangıç noktalarının hizalanması, (d) takım yolunun noktasal temsillerinin oluşturulması, (e) kaynak başlangıç noktalarının aynı doğrultuda hizalanması, (f) başlangıç noktalarının ötelenmesi, (g) başlangıç ve bitiş noktalarının aynı konumda olacak şekilde ayarlanması

Biriktirme süreci dışındaki torç yaklaşma ve uzaklaşma hareketlerinin planlanması

WAAM sürecinde yalnızca biriktirme işlemi sırasında izlenen takım yolu hareketlerinin değil, aynı zamanda katman içi ve katmanlar arasındaki geçiş hareketlerinin de planlanması gerekmektedir. Her katmandaki kaynak işlemi öncesinde kaynak torcunun hedef başlangıç noktasına güvenli bir şekilde yaklaşması ve işlem tamamlandıktan sonra biriktirilen yapıya temas etmeksizin bir sonraki yığılma bölgesine yönelmesi; hem ekipman güvenliği hem de kaynak kalitesinin korunması açısından önemlidir.

Bu nedenle, kaynak torcunun yığılma öncesi yaklaşma ve yığılma sonrası uzaklaşma hareketleri, takım yolu planlaması için geliştirilen algorithmaya dahil edilmiş ve bütüncül olarak ele alınmıştır. Resim 3.11’de görsel olarak sunulan bu parametrik yapı sayesinde, her

bir yığma başlangıç ve bitiş noktasının +Z eksenine doğrultusunda, kullanıcı tarafından belirlenebilen bir mesafe kadar yukarıda iki adet ilave referans noktası oluşturulmuştur. Bu referans noktaları, kaynak torcunun yaklaşma ve uzaklaşma hareketlerini ifade eden durak noktaları olarak takım yolu dizisine sırasıyla entegre edilmiştir. Böylece, kaynak torcunun güvenli geçişleri sağlanmış; oluşabilecek olumsuz temaslar engellenmiş ve WAAM süreci için güvenli ve kontrollü bir takım yolu yapısı elde edilmiştir.



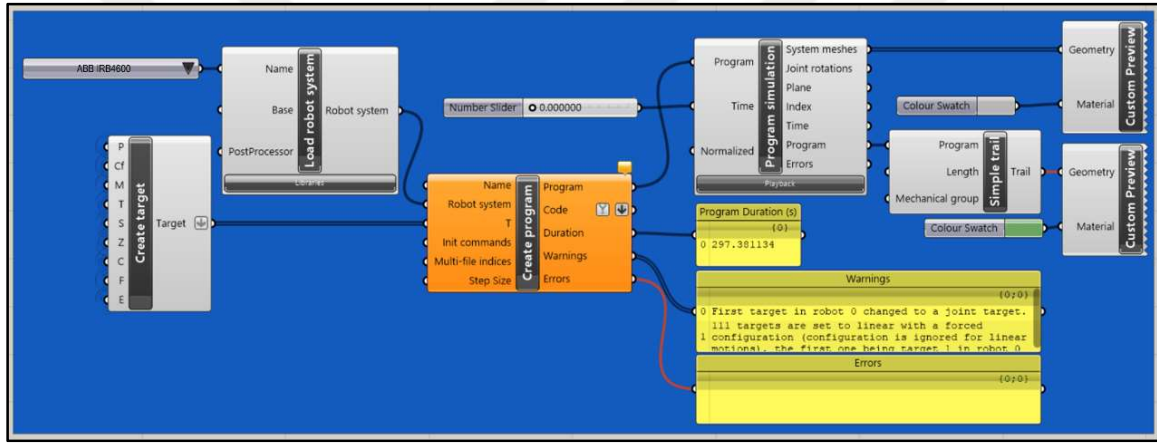
Resim 3.11. Kaynak torcunun yaklaşma ve uzaklaşma hareketlerinin tanımlandığı algoritmik yapı

3.4. Robotik Üretimin Programlanması

Parametrik takım yolu planlamasının tamamlanmasının ardından, oluşturulan yol verilerinin endüstriyel robot kollarına yönelik hareket komutlarına dönüştürülmesi ve bu doğrultuda robot kolunun programlanması gerekmektedir. Bu süreç, yalnızca dijital olarak tanımlanan takım yolunun fiziksel harekete çevrilmesini değil; aynı zamanda robot sisteminin kinematik sınırlarına, erişim kabiliyetine ve proses gereksinimlerine uygun, uygulanabilir ve güvenli bir hareket senaryosunun oluşturulmasını da içermektedir.

Bu doğrultuda, geliştirilen parametrik takım yolu oluşturma algoritması, 6 serbestlik dereceli bir ABB marka robot ile 2 eksenli bir harici pozisyonerin otomatik olarak programlanmasına olanak tanıyacak şekilde, Grasshopper ortamında çalışan Robots eklentisi ile entegre edilmiştir. Robots eklentisi, parametrik tasarım ortamında oluşturulan takım yolu verilerini doğrudan endüstriyel robot hareketlerine dönüştürmekte, böylece hem çevrimdışı programlama hem de oluşturulan takım yoluna ait robot hareketlerinin önceden simüle edilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle karmaşık geometrilere sahip biriktirme stratejilerinde, robot kolunun çalışma alanı dışına çıkıp çıkmadığı gibi kritik hususlar, bu simülasyon desteği sayesinde üretim öncesinde analiz edilebilmektedir.

Robots eklentisi, bünyesinde farklı üretici firmalara ait robot kolları ve pozisyonları içeren bir kütüphane barındırmaktadır. Ayrıca programlama işlemi sonrasında oluşturulan programın uygulanabilirliği denetlenmekte; olası hata ve eksiklikler kullanıcıya metinsel uyarılarla bildirilmektedir. Bunun yanı sıra, oluşturulan programın tahmini yürütme süresi hesaplanarak üretim planlamasına yönelik bilgi sağlanmaktadır. Sunmuş olduğu bu özellikler doğrultusunda, Robots eklentisi, geliştirilen takım yollarının robot hareketlerine dönüştürülmesinde kullanılmak üzere tercih edilmiştir. Resim 3.12’de, Robots eklentisinin; robot sisteminin ve takım yolu tanımlanma, çevrimdışı programlama, robot hareket simülasyonu, hata bildirimi ve program süresi tahmini gibi temel işlevlerini yerine getiren bileşenleri görsel olarak sunulmaktadır.

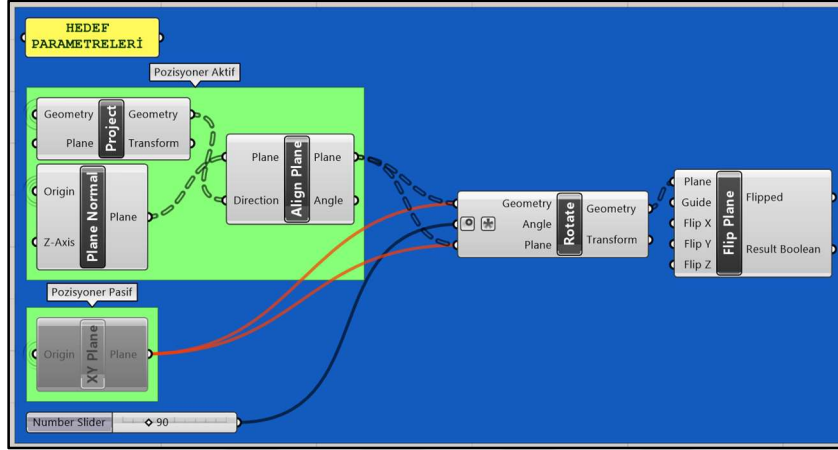


Resim 3.12. Robots eklentisinde robot sisteminin ve takım yolunun tanımlanması, robot hareket simülasyonu, hata bildirimi ve program süresine ilişkin bileşen yapısı

Geliştirilen sistemde, altı serbestlik derecesine sahip ABB marka bir robot kolun, iki eksenli harici bir pozisyonerle senkronize bir şekilde çalışabileceği bir yapı oluşturulmuştur. Kullanıcı tercihinine bağlı olarak pozisyoner aktif veya pasif hale getirilebilmekte ve böylece farklı üretim senaryolarına uygun esnek bir programlama altyapısı sağlanmaktadır. Pozisyoner aktif hale getirildiğinde, robot kol ile senkron bir şekilde dönebilmekte ve kullanıcı tarafından tanımlanan sabit bir açı değeri ile konumlandırılarak eğimli yüzeylerde üretim yapılmasına imkân tanımaktadır. Ancak, pozisyonerin yalnızca dönme eksenini boyunca senkron hareket edebilmesi nedeniyle, pozisyonerin parça yüzeyinin normaline göre eğilme hareketlerini dinamik biçimde gerçekleştirmesi mümkün olmamaktadır.

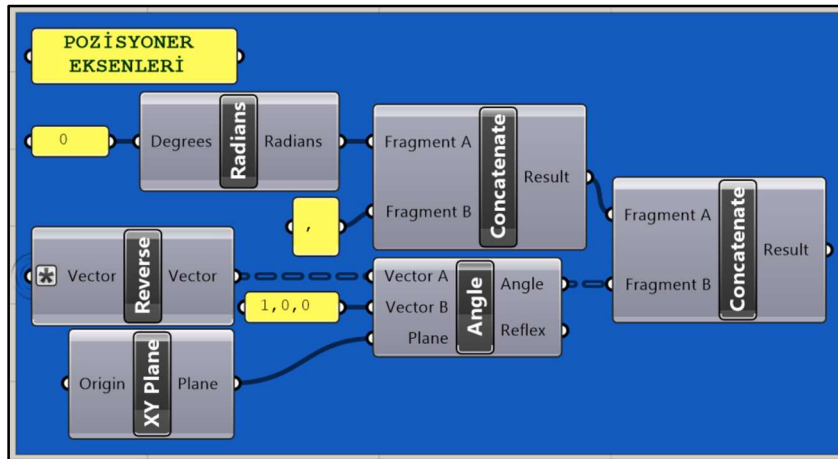
Üretimde pozisyonerin aktif olarak kullanılacağı bir yapı tercih edilecekse, bu durumda Resim 3.13’te gösterildiği üzere, düzlem hizalama bileşeni aktif hale getirilmeli ve aynı anda

XY düzlemi bileşeni devre dışı bırakılmalıdır. Pozisyonerin devre dışı bırakıldığı senaryolarda ise bu yapı tersine çevrilerek XY düzlemi bileşeni aktif hale getirilirken düzlem hizalama bileşeni devre dışı bırakılmalıdır. Böylece kaynak düzlemlerinin yönelimleri, pozisyoner kullanım durumuna göre uygun şekilde yönlendirilmektedir.



Resim 3.13. Pozisyoner kullanım tercihine bağlı olarak kaynak düzlemlerinin yönelimini tanımlayan hizalama yapısı

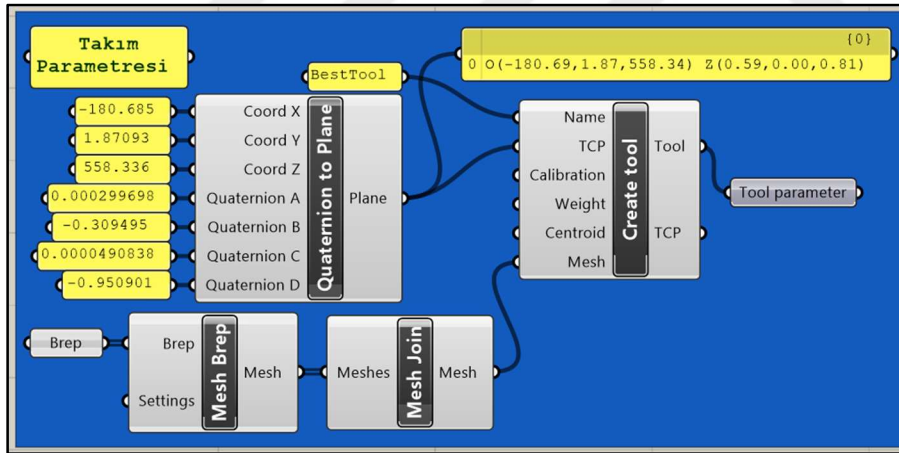
Pozisyonerin üretim sürecinde aktif olarak yer aldığı durumlarda, Resim 3.14'te sunulan yapı aracılığıyla, pozisyonere ait eğilme ve dönme eksenlerinin açısal konumları kontrol edilebilmektedir. Bu yapıda, pozisyonerin eğilme eksenini için kullanılacak açısal değer kullanıcı tarafından tanımlanabilmekte, böylece üretim esnasında pozisyonerin sabit bir eğim açısıyla konumlandırılması sağlanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde sistem, hem yatay hem de eğimli düzlemlerde üretim yapmaya uygun bir mimariye kavuşmuştur.



Resim 3.14. Pozisyoner eğilme ve dönme eksenlerine ait açısal değerlerin tanımlandığı parametrik kontrol yapısı

Robotik üretim sürecinin programlanmasında dikkate alınması gereken bir diğer kritik unsur, kaynak torcunun uzayda doğru biçimde konumlandırılması ve yöneliminin hassas şekilde tanımlanmasıdır. Bu durum hem takım yolunun yüksek doğrulukla uygulanabilirliği hem de kaynak kalitesinin sürdürülebilirliği açısından temel bir gerekliliktir. Bu gereksinim doğrultusunda, Resim 3.15'te gösterilen ve geliştirilen yapı sayesinde, torcun uç noktası olan takım merkez noktası, kullanıcı tarafından belirlenecek dört bileşenli quaternion dönüşüm katsayıları aracılığıyla uzayda tanımlanabilmektedir. Elde edilen dönüşüm verileri öncelikle düzlemsel yapıya dönüştürülmekte ve ardından takım oluşturma bileşenine aktarılmaktadır. Bu sayede, robot koluna ait uç efektörün hem konumsal hem de yönelimsel parametreleri sistem içerisine entegre edilebilmektedir.

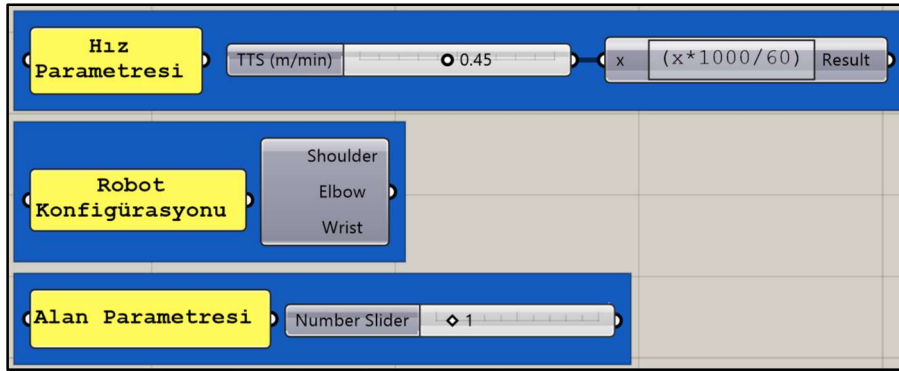
Buna ek olarak, robot hareketlerinin dijital ortamda izlenebilirliğini artırmak amacıyla, kullanılan kaynak torcuna ait üç boyutlu CAD model Rhinoceros yazılımına entegre edilebilmekte; bu model, ağ (ing. mesh) yapısına dönüştürülerek simülasyon sürecinde robot hareketleriyle senkron biçimde görselleştirilebilmektedir.



Resim 3.15. Kaynak torcuna ait takım parametrelerinin tanımlanması için geliştirilen yapı

Robotik üretimin programlanması sürecinde, kaynak torcunun uzaydaki konumu ve yöneliminin tanımlanmasının yanı sıra bu çalışma içerisinde torç ilerleme hızı (TTS), kullanıcı tarafından metre/dakika cinsinden tanımlanabilmekte ve ilgili değer, robot kontrol komutlarına doğrudan entegre edilmektedir. Buna ek olarak, robot kolunun omuz, dirsek ve bilek eksenlerine ilişkin konfigürasyon ayarları kullanıcı tercihinine göre belirlenebilmekte ve bu sayede farklı geometrik özelliklere sahip iş parçalarına uyumlu robotik pozisyonlamalar gerçekleştirilebilmektedir.

Geliştirilen yapı içerisinde alan parametresi de kullanıcı tarafından tanımlanabilir şekilde sistem entegrasyonuna dâhil edilmiştir. Endüstriyel robotlarda yaygın olarak kullanılan alan parametresi, robot kolunun hedef pozisyona yaklaşırken ne ölçüde hassasiyetle konumlanması gerektiğini belirleyen bir tolerans değeridir. Bu parametre, belirli bir mesafe ve açı aralığı içerisinde hedefe yaklaşılması durumunda, robotun duraksamadan bir sonraki harekete geçmesine olanak tanır. Böylece, hedef noktaya tam olarak ulaşma zorunluluğu ortadan kaldırılarak hareket süreleri optimize edilebilmekte ve üretim çevrimleri daha akıcı bir şekilde yürütülebilmektedir. Resim 3.16’da, ilgili kontrol parametrelerine yönelik oluşturulan yapı detaylı şekilde sunulmuştur.



Resim 3.16. Robot hareketlerine ilişkin hız, konfigürasyon ve alan parametrelerinin kullanıcı tarafından ayarlanabilen kontrol yapısı

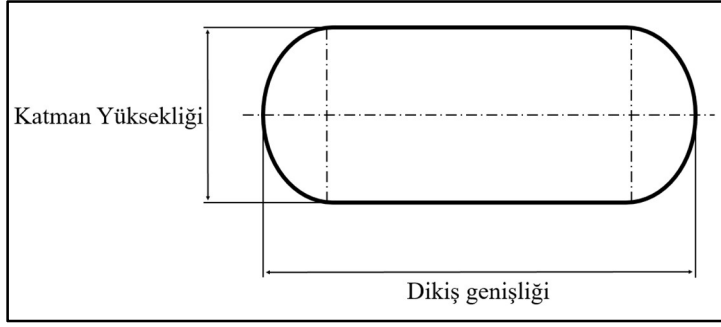
Robotik üretimin programlanması sürecinin son aşamasında, parametrik ortamda oluşturulan takım yolu verilerinin, ABB marka robot kolu ve harici pozisyoner sistemi ile uyumlu hareket komutlarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Robots eklentisinde yer alan program oluştur bileşeni aracılığıyla temel düzeyde bir robot komutu üretilebilse de, bu çıktı doğrudan ABB marka robot ve pozisyoner sistemlerinde kullanılabilir nitelikte değildir. Bu nedenle, Grasshopper platformu içerisinde Python dili ile geliştirilen özel bir son işlemci (ing. post processor) betiği tasarlanmıştır. Bu son işlemci betiği Robots eklentisinden gelen kodları otomatik biçimde işleyerek ABB marka robotların standartlarına uygun, doğrudan üretimde kullanılacak düzeyde RAPID formatında üretim kodlarına dönüştürmektedir.

Ayrıca geliştirilen son işlemci betiği ile robotik üretim süreci boyunca farklı hareket türleri kontrollü biçimde uygulanmaktadır. Yapılan planlamaya göre yığma işlemi sırasında ve kaynak torcunun hedef noktalara yaklaşma ya da uzaklaşma hareketlerinde robot kolu, doğrusal hareket modunda çalışacak biçimde yapılandırılmıştır. Katmanlar arası geçişlerde

ise, robot kolunun bir sonraki katmana hızlı ve etkin biçimde erişimini sağlamak amacıyla eklem bazlı (ing. joint) hareket tipi tercih edilmiştir. Ayrıca, kaynak torcunun hedef konumlara yaklaşırken ve işlem sonrası geri çekilirken izlediği yolların hız parametreleri de Python betiği içerisinde kullanıcı tanımlı olarak yapılandırılabilir.

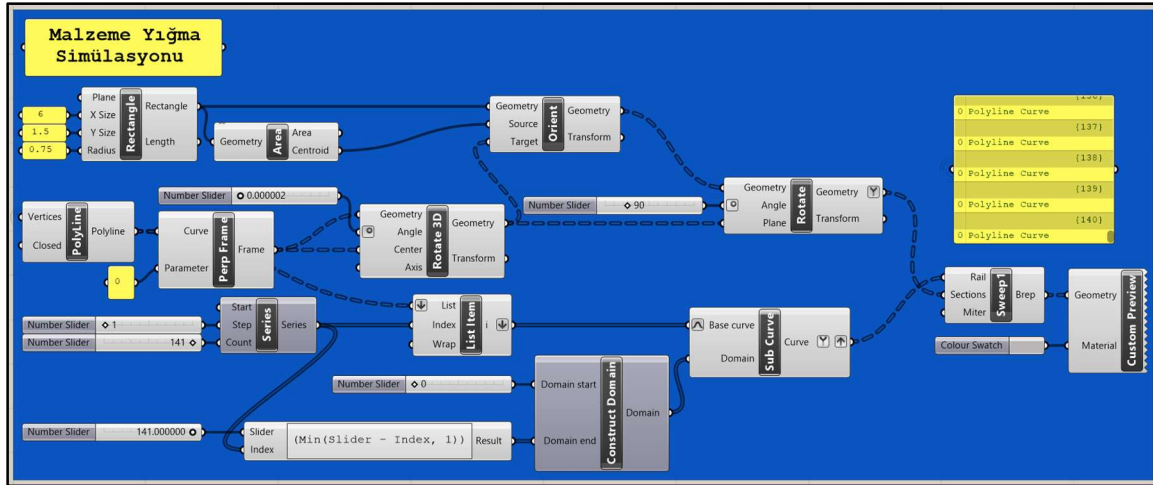
Robotik üretimin programlanması sürecinde üretim sırasında oluşabilecek termal etkilerin kontrol altına alınması da önem arz etmektedir. WAAM yönteminin doğası gereği, metalik tel elektrodun ergitilmesi için yüksek düzeyde enerji girdisi gerekmektedir. Bu enerji girdisi, biriktirme süreci boyunca parçanın sıcaklığında kademeli bir artışa neden olmakta ve dolayısıyla ısı birikimi meydana gelmektedir. Isı birikiminin kontrolsüz şekilde artması durumunda, kaynak dikişi yeterli hızda soğuyamayarak bir süre ergime sıcaklığının üzerinde kalabilmekte ve bu da dikişin akmasına sebebiyet verebilmektedir. Bu nedenle, her bir katmanın tamamlanmasının ardından, bir sonraki katmana geçilmeden önce parçanın belirli bir süre boyunca soğuması sağlanmalıdır. Bu amaçla, geliştirilen son işlemci aracılığıyla oluşturulan RAPID kodu içerisine, operatörün üretim sırasında katmanlar arası sıcaklık değerlerini belirli bir seviyenin altında tutabilmesini sağlayacak şekilde, bekleme süresini manuel olarak değiştirebileceği komutlar entegre edilmiştir. Söz konusu komutlar, üretim hattında yer alan PLC sistemi üzerinden robota aktarılabilir ve böylece termal dengelemenin operatör müdahalesiyle sahada dinamik biçimde yönetilmesi mümkün hâle gelmektedir. Bu uygulama, kaynak dikişi kalitesinin korunmasına katkı sağlamakta; aynı zamanda ardışık katmanlar arasında gerekli olan ısı dengelemenin gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır.

Bu yapı sayesinde, parametrik modelleme ortamında oluşturulan takım yolu verileri, ABB marka robot ve iki eksenli pozisyoner sistemi ile tam uyumlu ve uygulanabilir bir üretim kod dizisine dönüştürülmüştür. Böylece, herhangi bir manuel düzenlemeye gerek kalmaksızın, doğrudan robotik üretim sürecinde kullanılabilir nitelikte RAPID formatında çıktılar elde edilmiştir. Geliştirilen son işlemci bileşenine ait görsel yapılandırma Resim 3.17’de sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Stadyum kesit profili ve geometrik tanımı

Geliştirilen simülasyon yapısında, ilk olarak takım yolunu oluşturan eğriler, kullanıcı tarafından belirlenen sayıda eşit uzunlukta alt parçalara bölünmekte ve elde edilen her bir alt eğri, tekil bir kaynak dikişi segmenti olarak ele alınmaktadır. Alt parça sayısının artırılması, simülasyonun daha kısa adımlarla ilerlemesini sağlayarak hem yığma sürecinin daha akıcı ve gerçekçi biçimde temsil edilmesine hem de görsel doğrulamanın daha yüksek çözünürlükte gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Her bir alt eğri için, önceden tanımlanmış olan stadyum kesit profili, ilgili segmentin konumuna ve doğrultusuna göre yerleştirilmektedir. Bu işlem, eğri üzerinde elde edilen lokal dik düzlemler aracılığıyla gerçekleştirilmekte; profilin konumu ve yönelimi, kaynak torcunun ilerleme doğrultusuyla uyumlu olacak şekilde dönüştürülmektedir. Kesit profilinin uzaydaki yönelimi belirlendikten sonra, ilgili eğri parçası boyunca süpürme işlemi uygulanmakta ve bu sayede ardışık kaynak dikişi segmentlerine karşılık gelen hacimsel katman geometrileri oluşturulmaktadır. Malzeme yığma simülasyonu için geliştirilen yapı Resim 3.18’de ayrıntılı biçimde sunulmuştur.



Resim 3.18. Geliştirilen malzeme birikimi simülasyonunun parametrik yapısı

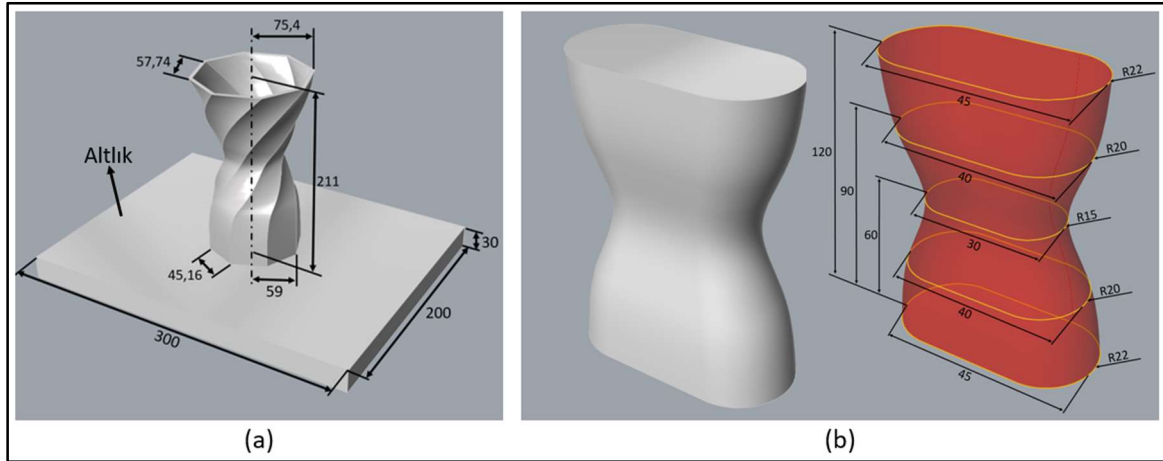


4. GELİŞTİRİLEN ALGORİTMALARIN UYGULANMASI

Bu bölüm, geliştirilen parametrik takım yolu oluşturma ve robotik üretim algoritmalarının, iki farklı deney parçası üzerinde uygulanmasına yönelik süreci kapsamaktadır. Bu doğrultuda, tek dikişli yığma ve kontur tabanlı çoklu dikiş içeren takım yolu stratejilerinin uygulanması amacıyla iki farklı parça tasarlanmıştır; her bir parça için sırasıyla dilimleme, takım yolu oluşturma, robotik üretim programlaması ve malzeme birikimi simülasyonu aşamaları gerçekleştirilmiştir; uygulanan algoritmaların işleyişi görsel çıktılarla desteklenerek ortaya konulmuştur.

4.1. Parçaların Tasarımı ve Yığma Stratejilerinin Belirlenmesi

Geliştirilen parametrik takım yolu oluşturma algoritmalarının hem dijital ortamda hem de üretim sürecinde uygulanabilirliğini test edebilmek amacıyla, farklı yığma stratejilerine uygun olacak şekilde iki adet parça tasarlanmıştır. Bu parçalar Grasshopper ortamında parametrik olarak modellenmiştir; tasarlanan parçalara ait izometrik görünüm ve boyutsal özellikler Resim 4.1’de sunulmuştur. WAAM prosesine yönelik olarak geliştirilen tüm algoritmalar her iki parçaya da uygulanmış olmakla birlikte, fiziksel üretim yalnızca Resim 4.1.a’da gösterilen model A üzerinden gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.1. Tasarlanan parçalar ait izometrik görünüm ve boyutsal özellikler (mm cinsinden); (a) tek dikişli yığma stratejisi için tasarlanan sekizgen kesitli model A ve altlık, (b) kontur tabanlı çoklu dikiş stratejisi için tasarlanan stadyum kesitli model B

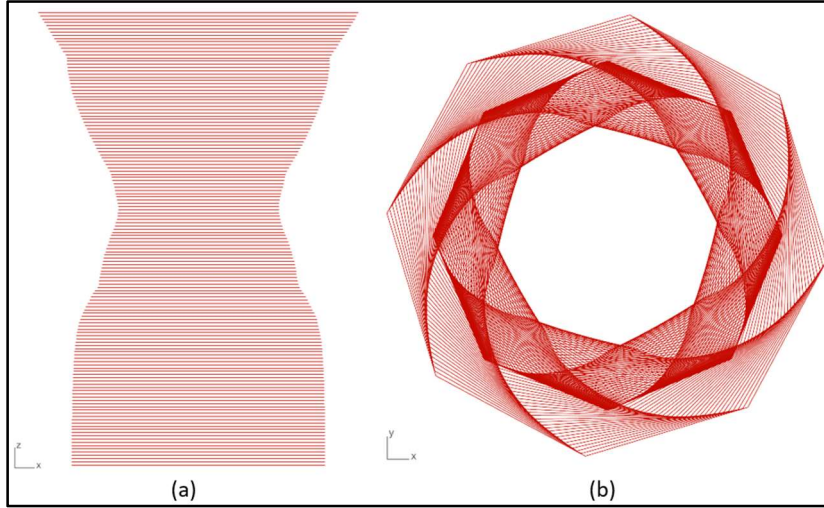
Model A (bkz. Resim 4.1.a), yalnızca bir adet kaynak dikişle katmanların oluşturulmasını hedefleyen tek dikişli yığma stratejisine uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Parça, sekizgen kesite sahip olup, tabandan itibaren yaklaşık 59 mm yüksekliğe kadar doğrusal olarak yükselmekte ve bu noktadan sonra +Z eksenine boyunca saat yönünün tersine yaklaşık 13° eğimle bükülerek kompleks bir geometri kazanmaktadır. Yükseklik boyunca değişken kesit çapı göstermesi; bazı bölgelerde genişleyen, bazı bölgelerde daralan bir forma sahip olması nedeniyle, WAAM sisteminin geometrik adaptasyon kabiliyetini ve algoritmaların üretim üzerindeki doğruluğunu test etmek açısından uygun bir yapı sunmaktadır.

Model B ise (bkz. Resim 4.1.b), her bir katmanda birden fazla kaynak dikişinin uygulanmasını gerektiren kontur tabanlı çoklu dikiş stratejisine göre tasarlanmıştır. İlk modelde olduğu gibi ikinci modelde yükseklik boyunca değişken kesit çap değerlerine sahiptir. Bu model kalın cidarlı yapılarda kontur desen stratejisinin uygulanabilirliğini değerlendirmek üzere tercih edilmiştir.

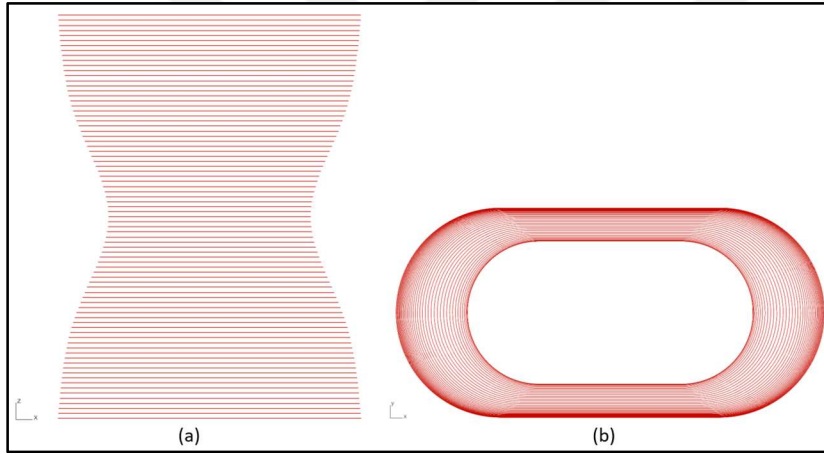
4.2. Dilimleme Algoritmasının Uygulanması

Bu bölümde, 3.2 numaralı alt başlıkta ayrıntılı biçimde açıklanan parametrik dilimleme algoritması, her iki tasarlanan parçanın üç boyutlu CAD modellerine ayrı ayrı uygulanarak, Z eksenine doğrultusunda katmanlara ayırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Her iki model için katman yüksekliği 1,5 mm olarak belirlenmiştir. Yaklaşık 210 mm yüksekliğe sahip olan Model A, bu işlem sonucunda 140 adet katmana bölünmüştür. Model B ise 180 mm yüksekliğe sahip olup, toplamda 120 adet katman elde edilmiştir.

Her iki parçaya da dilimleme algoritması başarı ile uygulanmış olup, Resim 4.2 ve Resim 4.3'te ilgili parçalara ait dilimleme işlemi sonrası elde edilen katman kesitlerinin önden ve üstten görünümüleri sunulmuştur.



Resim 4.2. Model A için dilimleme sonrası elde edilen kesitlerin (a) önden ve (b) üstten görünüşleri



Resim 4.3. Model B için dilimleme sonrası elde edilen kesitlerin (a) önden ve (b) üstten görünüşleri

4.3. Tasarlanan Parçalar İçin Takım Yollarının Planlanması

Dilimleme işlemi sonucunda elde edilen kesit eğrileri, her bir katmanda kaynak torcunun izlemesi gereken yolların belirlenmesinde temel referans niteliği taşımaktadır. Bu kapsamda, her iki parça için farklı yığıma stratejilerine uygun takım yolu planlamaları gerçekleştirilmiş ve parametrik kontrol imkânı sağlayan algoritmalar başarıyla uygulanmıştır. Takım yolu planlama sürecinde, model geometrisi, üretim stratejisi ve kaynak parametreleri dikkate alınarak çeşitli ayarlar yapılandırılmış ve her bir model özelinde noktasal takım yolu temsili oluşturulmuştur.

Model A için yalnızca tek bir kaynak dikişliyle katmanların oluşturulmasını esas alan tek dikişli yığma stratejisi benimsenmiştir. Bu doğrultuda, her bir kesit eğrisi üzerinde yalnızca bir adet takım yolu oluşturulmasını sağlayacak şekilde ofset sayısı 1 olarak tanımlanmış ve örtüşme oranı %0 olarak sabitlenmiştir. Kaynak dikişi genişliği tüm katmanlarda 6 mm olarak belirlenmiştir. Modelin sekizgen kesit geometrisine sahip olması nedeniyle, takım yolunun noktasal temsili, yalnızca keskin köşe geçişlerini yakalamak amacıyla 3.3. numaralı alt başlıkta değinilen üçüncü yöntem aracılığıyla elde edilmiştir. Bu süreçte, birinci ve ikinci yöntemler gibi eşit aralıkla nokta üreten metodlar kullanılmamıştır.

Model B ise kontur tabanlı çoklu dikişli yığma stratejisine göre planlanmış olup, her bir katmanda birden fazla kaynak yolu içermektedir. Bu amaçla, kaynak yolları arasında yeterli bir birleşme sağlanabilmesi için örtüşme oranı %31 olarak belirlenmiş ve kaynak dikişi genişliği Model A ile aynı olacak şekilde 6 mm olarak tanımlanmıştır. Modelin kesit geometrisinin yumuşak eğrilerden oluşması ve keskin köşeler içermemesi nedeniyle, noktasal temsil oluşturulurken üçüncü yöntem kullanılmamış, bunun yerine kesit eğrileri ikinci yöntem yardımıyla eşit uzunluklarda bölünerek takım yolu noktaları elde edilmiştir.

Ayrıca her iki model için de katmanlar boyunca kaynak başlangıç noktalarının üst üste denk gelmesini önlemek ve kaynak birikimine bağlı geometrik sapmaları azaltmak amacıyla, her bir katmanın başlangıç noktası bir önceki katmana göre bir birim ötelenerek döngüsel bir başlangıç yapısı oluşturulmuştur. Kaynak torcunun yığma öncesi yaklaşma ve yığma sonrası uzaklaşma mesafeleri de 20 mm olarak belirlenmiştir.

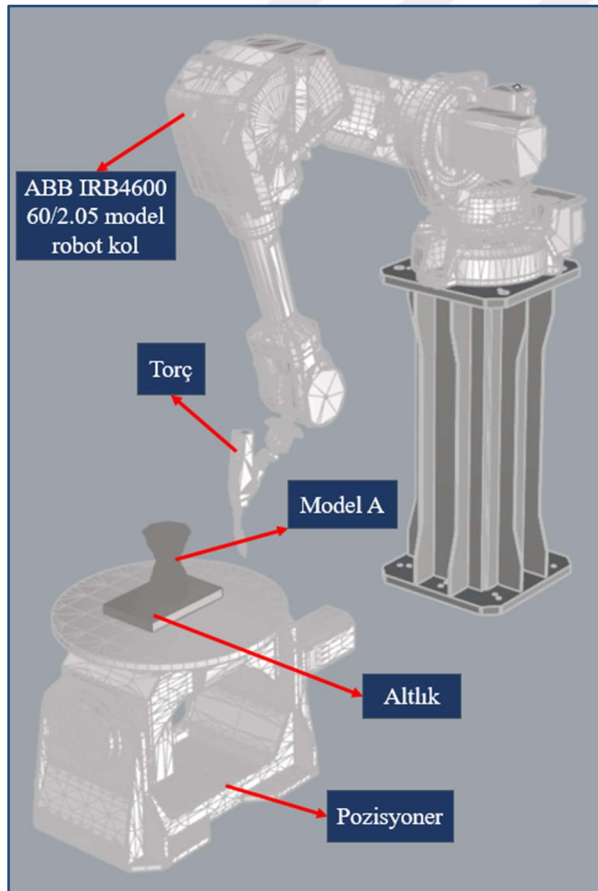
4.4. Tasarlanan Parçalar İçin Robotik Üretimin Programlanması

Bu bölümde, her iki parça için geliştirilen takım yolu verilerinin, endüstriyel robot sistemine ait hareket komutlarına dönüştürülerek robotik üretim programlarının oluşturulması süreci açıklanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, 3.4 numaralı alt başlıkta ayrıntılı biçimde tanımlanan algoritmik yapı temel alınarak, kaynak torcunun takip etmesi gereken noktasal yol verileri doğrudan robot hareketlerine çevrilmiştir.

Robots eklentisi, bünyesinde çeşitli endüstriyel robot markalarına ait robot kolları ve harici pozisyoner modellerini içeren bir kütüphane barındırmakta olup, aynı zamanda kullanıcıların kendi robot sistemlerini yerel kütüphaneye entegre etmelerine de olanak

tanınmaktadır. Model A'nın üretiminde kullanılacak ve MetalWorm Eklemeli İmalat Teknolojileri A.Ş. bünyesinde yer alan altı serbestlik derecesine sahip ABB IRB4600 60/2.05 model robot kolu ile iki eksenli harici bir pozisyoner, eklenti kütüphanesinde bulunmadığından, bu sistemler yerel kütüphaneye manuel olarak entegre edilmiştir. Yerel kütüphaneye ekleme sürecinde, hem robot kolun hem de pozisyonerin taban konumu, yönelimi, her bir eksene ait bağlantı uzunlukları, bağlantılar arası mesafeler, minimum ve maksimum dönüş açıları ile maksimum açısal hız sınırları ayrı ayrı tanımlanmıştır.

Model A'ya yönelik hazırlanan üretim senaryosunda, pozisyoner devre dışı bırakılarak, sekizgen kesitli parçanın, sabit bir platform üzerinde üretilmesi hedeflenmiştir. Buna karşılık, Model B için oluşturulan üretim senaryosunda ise pozisyoner aktif hâle getirilmiş ve yalnızca dönme eksenini doğrultusunda hareket edecek şekilde tanımlanarak, robot kolu ile senkronize biçimde çalışacak şekilde yapılandırılmıştır. Resim 4.4'te Model A'nın üretimi için programlanan robot kolun hareket simülasyonundan bir görsel sunulmuştur.



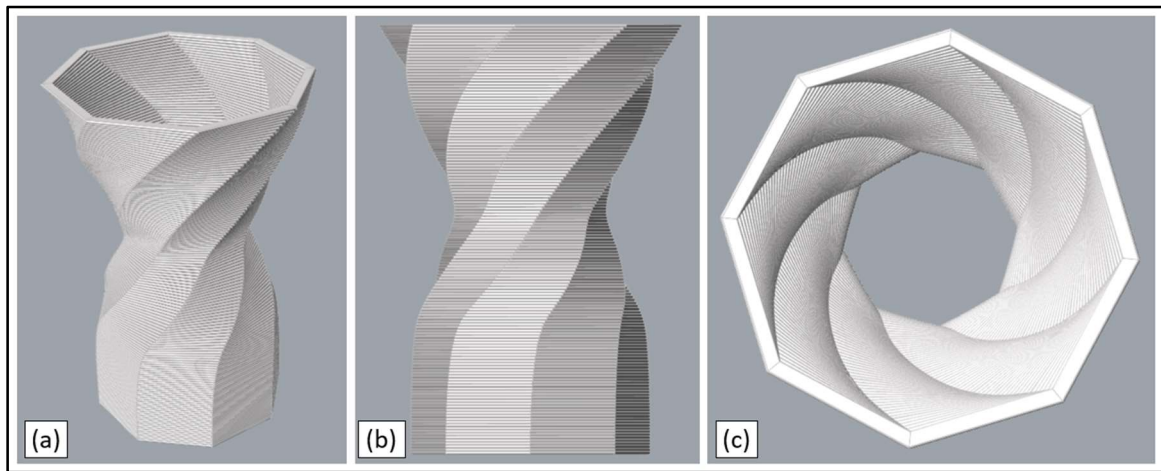
Resim 4.4. Model A'nın üretimine yönelik programlanan robot kolun hareket simülasyon görünümü

Her iki model için, kaynak torcuna ait takım parametreleri dört bileşenli quaternion dönüşüm katsayıları üzerinden tanımlanmıştır. Bu dönüşümler, ilgili düzlemlere aktarılmış ve robot kolunun uç efektör yönelimi doğru biçimde modellenmiştir. TTS her iki modelde de 0,45 m/dak olarak tanımlanmış, ayrıca robotun hedef konumlara yaklaşırken uygulayacağı pozisyonlama hassasiyetini tanımlayan alan parametresi, her iki model için 1 olarak atanmıştır.

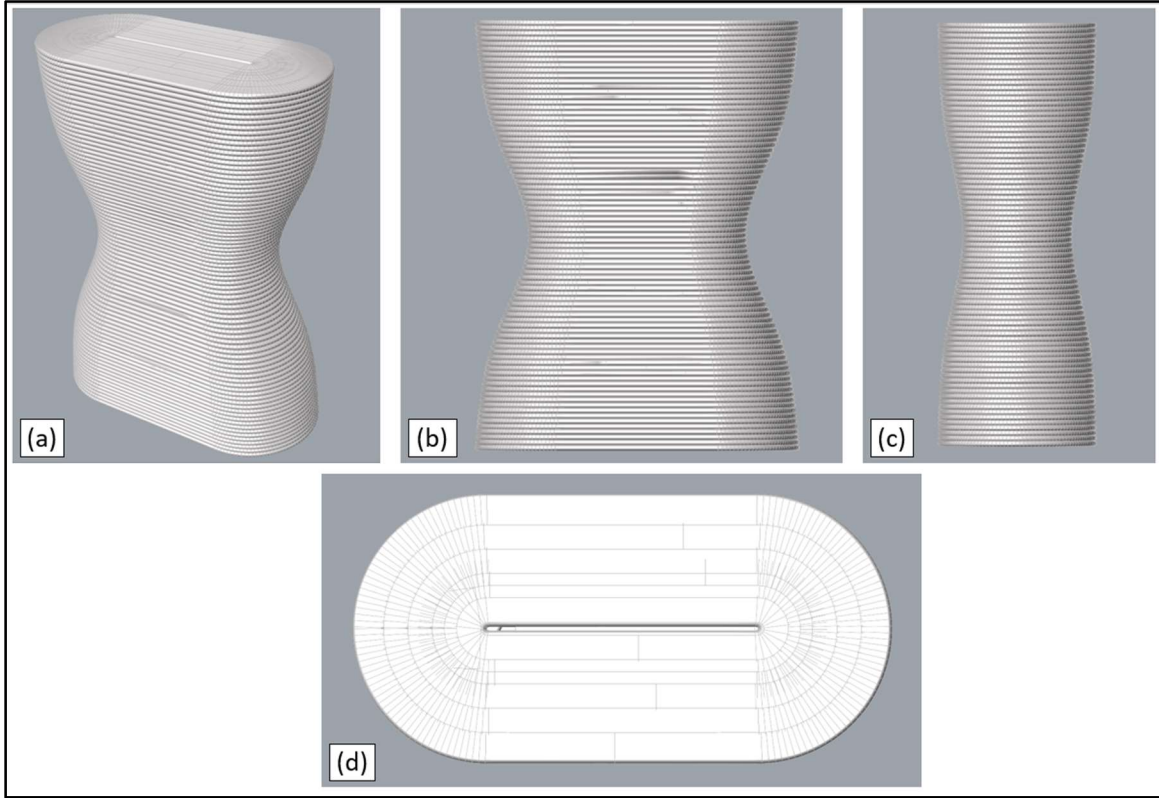
Yapılan tüm bu planlamalar sonucunda, Python tabanlı olarak geliştirilen özel bir son işlemci betiği aracılığıyla her iki model için de RAPID formatında üretim kodları otomatik olarak başarıyla oluşturulmuştur. Elde edilen bu kodlar, doğrudan robotik WAAM üretiminde kullanılabilir nitelikte olup herhangi bir manuel müdahale gerektirmeksizin robot kontrolörüne aktarılabilir şekilde yapılandırılmıştır.

4.5. Malzeme Yığma Simülasyonun Gerçekleştirilmesi ve Görsel Doğrulama

Bu bölümde, 3.5 numaralı alt başlıkta geliştirilen malzeme yığma simülasyon algoritması, tasarlanan iki parça üzerinde uygulanarak WAAM süreci sırasında meydana gelecek malzeme birikiminin dijital ortamda üç boyutlu temsili gerçekleştirilmiştir. Resim 4.5 ve Resim 4.6’da, sırasıyla Model A ve Model B parçalarına ait takım yolu verileri kullanılarak oluşturulan hacimsel simülasyon çıktıları, farklı açılardan sunulmaktadır.

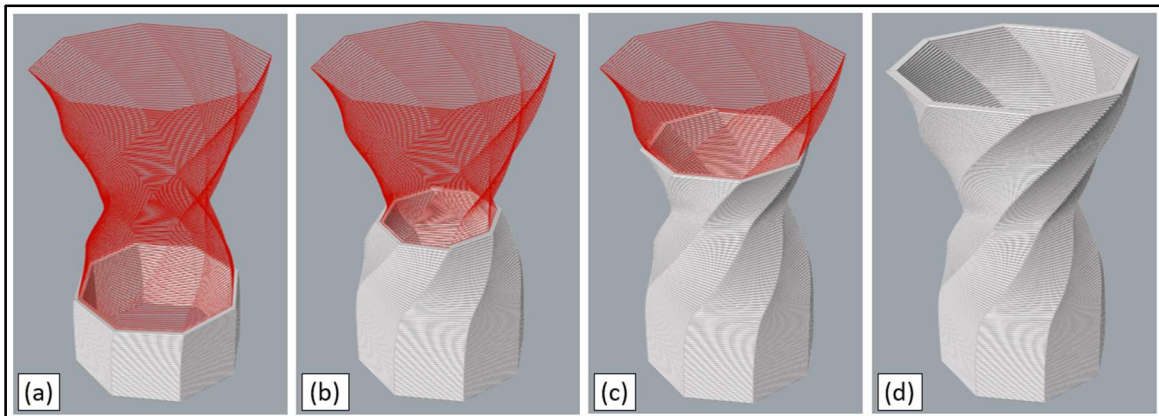


Resim 4.5. Model A’ya ait hacimsel malzeme birikimi simülasyonunun (a) izometrik, (b) yandan ve (c) üstten görünüşleri

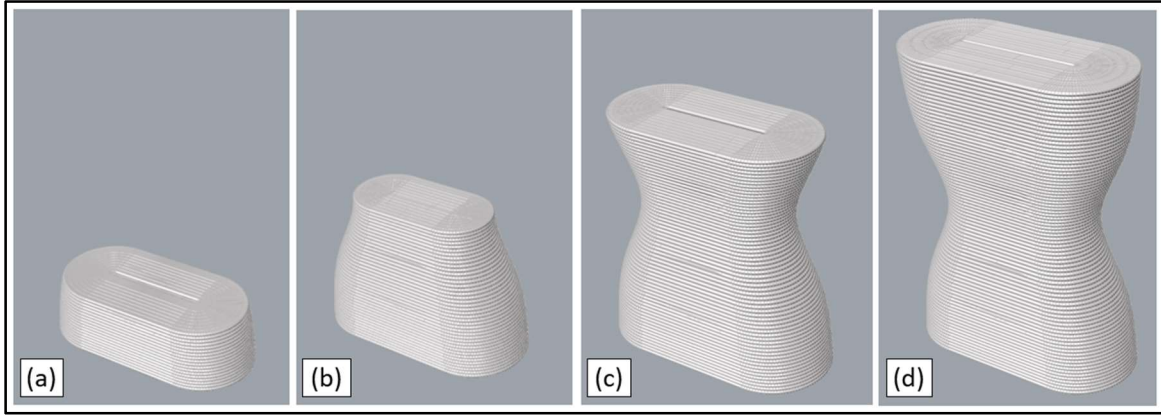


Resim 4.6. Model B'ye ait hacimsel malzeme birikimi simülasyonunun (a) izometrik, (b) önden, (c) yandan ve (d) üstten görüşleri

Geliştirilen simülasyon algoritması, belirli bir yığma oranına karşılık gelen hacimlerin modellenmesine olanak tanımaktadır. Bu doğrultuda, Resim 4.7 ve Resim 4.8'de sırasıyla Model A ve Model B için gerçekleştirilen hacimsel simülasyon çıktılarında, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında gerçekleşen yığma durumları örnek olarak sunulmuştur. Bu yapı sayesinde, üretimin herhangi bir aşamasındaki birikim durumu ayrıntılı şekilde gözlemlenebilmektedir.



Resim 4.7. Model A için hacimsel birikim simülasyonunun (a) %25, (b) %50, (c) %75 ve (d) %100 yığma oranlarındaki görüşleri



Resim 4.8. Model B için hacimsel birikim simülasyonunun (a) %25, (b) %50, (c) %75 ve (d) %100 yığma oranlarındaki görünüşleri

Elde edilen bu görsel çıktılar, üretim öncesinde uygulanan yığma stratejilerinin doğruluğunu değerlendirmeye olanak sağlamıştır. Bu doğrultuda, Model A'ya ait simülasyon çıktıları üzerinde yapılan görsel kontroller sonucunda, geliştirilen takım yolu algoritmasının, üretim geometrisiyle tam uyumlu şekilde çalıştığı ve birikim sürekliliğini başarılı biçimde sağladığı tespit edilmiştir. Tüm katmanlarda düzgün bir yığma gerçekleşmiş, herhangi bir eksiklik veya hatalı bir durum gözlemlenmemiştir. Bu sonuçlar, Model A için planlanan üretim stratejisinin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini görsel olarak da doğrulamıştır.

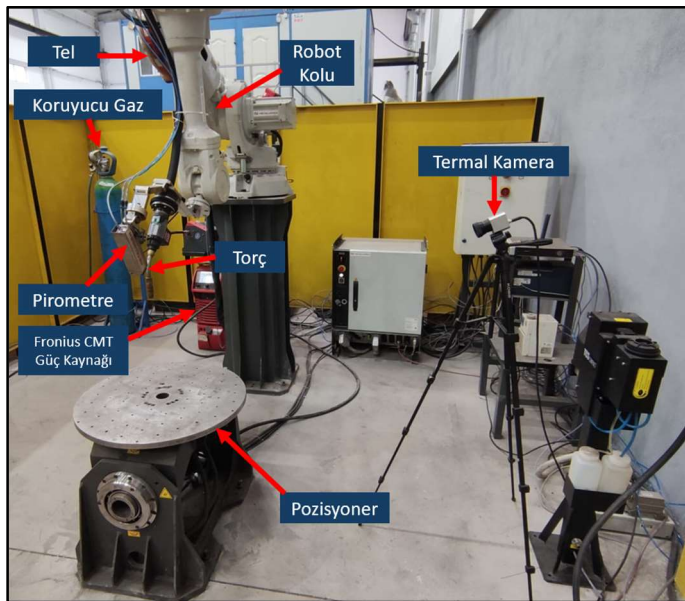
Buna karşılık, Model B'ye ait çıktılar üzerinde yapılan değerlendirmelerde, özellikle Resim 4.6.d'de üstten görünüşte de açıkça görüldüğü üzere, bazı katmanların iç bölgelerinde hacimsel boşlukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durumun temel nedeninin, değişken kesit geometrisine sahip Model B gibi parçalarda, dikiş genişliği ve örtüşme oranı parametrelerinin sabit tutulması sonucu, katmanlar arasında yerel doluluk oranlarında farklılıkların meydana gelmesi olduğu değerlendirilmektedir. Bu tür lokal yığma eksikliklerin önlenmesi adına, ilerleyen çalışmalarda dikiş genişliği ve örtüşme oranının katman bazlı olarak adaptif biçimde belirlenmesi; iç bölgelerde alternatif yığma desenlerinin kullanılması gibi stratejik iyileştirme yaklaşımlarının uygulanması önerilmektedir.

5. ENDÜSTRİYEL WAAM UYGULAMASI

Bu bölümde, geliştirilen parametrik takım yolu algoritmalarının fiziksel üretim sürecine entegrasyonu doğrultusunda gerçekleştirilen çalışma detaylı biçimde sunulmuştur. Bu kapsamda geliştirilen algoritmaların uygulanabilirliğini test etmek amacıyla, 4. başlıkta dijital ortamda tasarımı gerçekleştirilen ve her bir algoritmanın başarıyla uygulandığı Model A, MetalWorm Eklemeli İmalat Teknolojileri A.Ş. bünyesindeki WAAM sistemi kullanılarak üretilmiştir. Üretim sürecinde kullanılan donanımlar, ekipmanlar ve proses parametrelerine ilişkin teknik bilgiler sunulmuş; üretim sırasında elde edilen görsel kayıtlar paylaşılmıştır.

5.1. WAAM Sistemi ve Proses Parametreleri

Model A'nın üretimi, MetalWorm Eklemeli İmalat Teknolojileri A.Ş. bünyesinde yer alan WAAM sisteminde gerçekleştirilmiştir. Bu sistem; altı serbestlik derecesine sahip ABB IRB4600 60/2.05 model bir endüstriyel robot kol, iki serbestlik dereceli bir pozisyoner, Fronius marka CMT kaynak ünitesi, koruyucu gaz sistemi, sürecin takibi ve kontrolü amacıyla kullanılan MetalWorm Diagnostic Software adlı yazılım ile birlikte bir termal kamera ve bir pirometre cihazından oluşmaktadır. Üretimde kullanılan WAAM sistemine ait genel görünüm Resim 5.1'de sunulmaktadır.



Resim 5.1. Üretimde gerçekleştirildiği WAAM sistemi

Üretimde dolgu malzemesi olarak, düşük karbonlu çelik tel sınıfında yer alan ER70S-6 tipi kaynak teli kullanılmıştır. Kullanılan tel malzemesine ait kimyasal bileşim değerleri Çizelge 5.1’de sunulmaktadır. Yığma işlemi, $300 \times 200 \times 30$ mm boyutlarında ST52 çelik malzemeden imal edilmiş bir altlık üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ergiyik havuzun atmosferik etkilerden korunması amacıyla koruyucu gaz olarak %82 argon ve %18 karbondioksit içeren bir gaz karışımı kullanılmış; gaz akış debisi 18 L/dak olacak şekilde uygulanmıştır.

Çizelge 5.1. ER70S-6 kaynak telinin kimyasal bileşimi

Malzeme	Element (% Ağırlıkça)						
	C	Mn	Si	P	S	Cr + Mo + Ni	Fe
ER70S-6	0,073	0,97	0,51	0,009	0,013	-	Geriye Kalan

Üretimde kullanılan temel proses parametrelerine ait değerler ise Çizelge 5.2’de verilmiştir

Çizelge 5.2. Üretimde kullanılan proses parametreleri ve değerleri

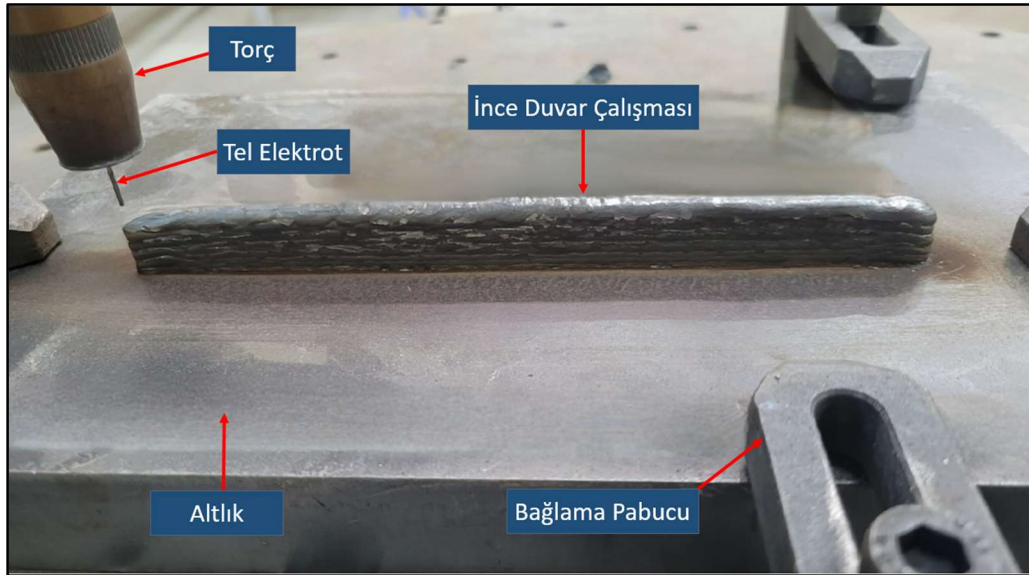
Proses parametreleri	Değerler
Tel besleme hızı (m/dak)	3
Torç ilerleme hızı (m/dak)	7,5
Tel çapı (mm)	1,2
Katman yüksekliği (mm)	1,5
Dikiş genişliği (mm)	6
Akım (A)	114
Voltaj (V)	13,3
Altlık ile torç arası mesafe (mm)	38
Torç nozülünden çıkan elektrot uzunluğu (mm)	18
Bekleme süresi (s)	120 - 210
Katmanlar arası sıcaklık (°C)	< 250

5.2. Model A İçin WAAM Uygulaması

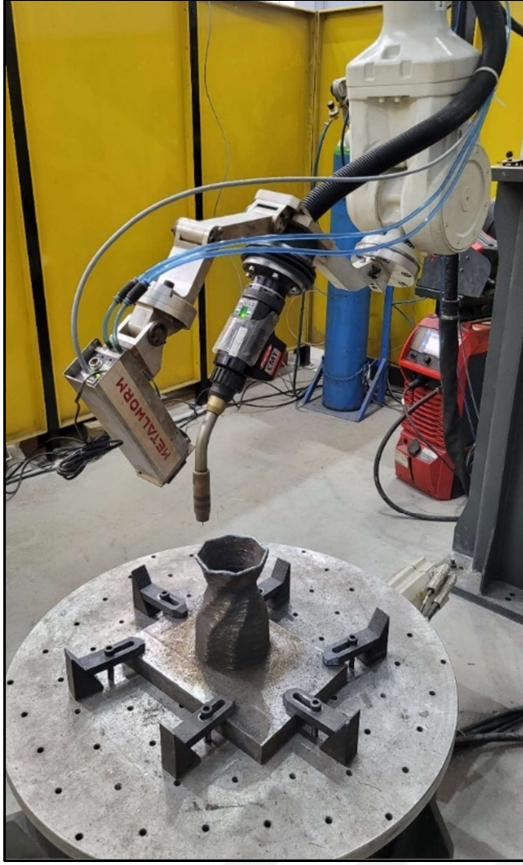
Bu bölümde, WAAM prosesine yönelik olarak geliştirilen algoritmaların doğrulanması adına, 4 numaralı başlıkta geometrik özellikleri tanımlanan Model A'nın, tek dikişli yığma stratejisi ile gerçekleştirilen fiziksel üretim süreci açıklanmaktadır.

Üretim sürecine geçilmeden önce, belirlenen proses parametrelerinin doğrulanması ve sistemin kararlı bir şekilde çalıştığının teyit edilmesi amacıyla, birkaç kattan oluşan bir ince duvar biriktirme denemesi gerçekleştirilmiştir. Bu n çalışmada; kaynak dikiş genişliği, katman yüksekliği gibi geometrik kriterlerin yanı sıra, tel besleme hızı ve torç ilerleme hızına ilişkin parametrelerin uygunluğu değerlendirilmiştir. Resim 5.2'de bu doğrulama çalışmasına ait üretilmiş beş kattan oluşan ince duvar rneği sunulmaktadır.

Yapılan ince duvar örme çalışması neticesinde, belirlenen proses parametrelerinin sistemle uyumlu olduğu ve kararlı bir yığma davranışı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, üretim sürecine geçilerek, Model A fiziksel olarak imal edilmiştir. Model A'nın üretim sürecine ait bir görüntü Resim 5.3'te sunulmaktadır.



Resim 5.2. Proses parametrelerinin doğrulanmasına yönelik ince duvar biriktirme alışması



Resim 5.3. Model A'nın üretimi esnasında çekilmiş bir fotoğraf

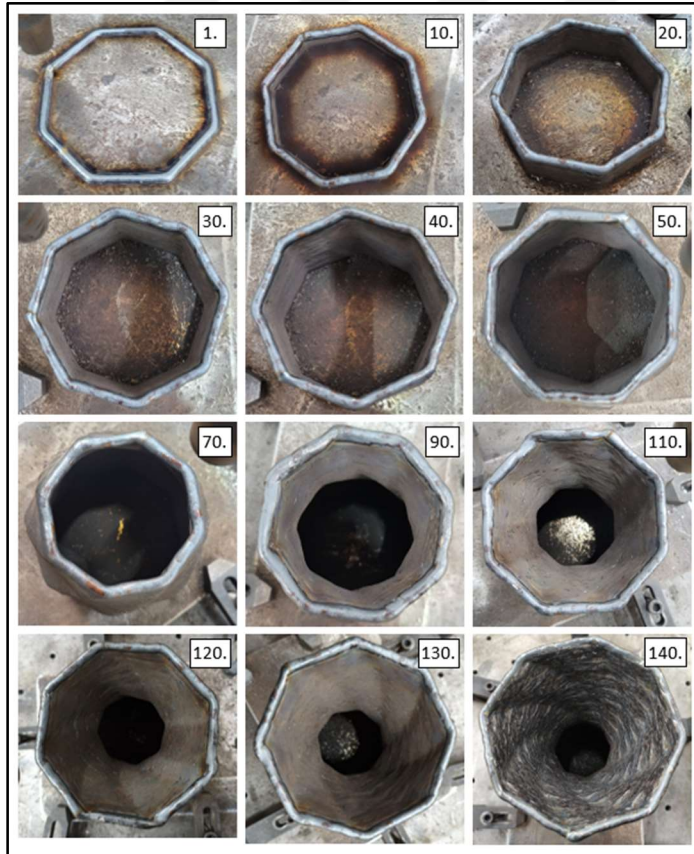
WAAM proseslerinde, katmanlar arası sıcaklık kontrolü, hem birikim kalitesi hem de geometrik kararlılığının sağlanması açısından kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir [75]. Bu nedenle, WAAM sistemine entegre edilen termal kamera ve pirometre aracılığıyla, üretim süreci boyunca her bir katmanın üst yüzey sıcaklığı anlık olarak izlenmiştir. Gerçekleştirilen üretim sürecinde, her bir yığılan katmanın ardından 120 ila 210 saniye arasında değişen bekleme süreleri uygulanarak, katmanlar arası sıcaklık değeri 250°C 'nin altında tutulmuştur. Model A'nın değişken çaplarda kesit geometrisine sahip olması nedeniyle, dar kesitli bölgelerde düşük termal kütlenin etkisiyle hızlı sıcaklık artışı gözlemlenmiş; buna karşılık geniş kesitli bölgelerde daha yüksek termal kütleyle bağlı olarak sıcaklık artışı daha yavaş gerçekleşmiştir. Bu durum, dar kesitli bölgelerde daha uzun, geniş kesitli bölgelerde ise daha kısa bekleme sürelerinin uygulanmasını gerekli kılmıştır.

Model A'nın üretimi tamamlandıktan sonra, kaynak akımı, gerilimi, tel besleme hızı, ısı girdisi parametrelerinin ortalama değerleri ile yığma süresi, bekleme süresi ve toplam üretim süresi verileri MetalWorm Diagnostic Software adlı yazılım üzerinden elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler Çizelge 5.3'te sunulmuştur.

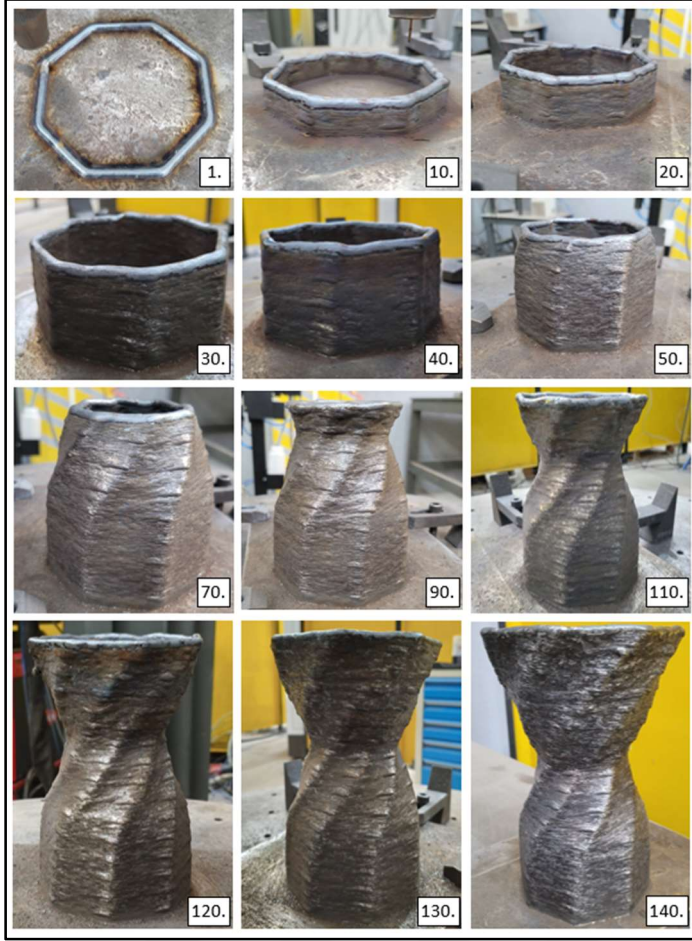
Çizelge 5.3. Model A'nın üretim sürecine ait ortalama proses verileri ve zamanlama bilgileri

Proses parametreleri	Değerler
Tel besleme hızı (m/dak)	3,54
Isı girdisi (J/mm)	200,42
Akım (A)	120,44
Voltaj (V)	13,99
Yığma süresi	01:41:56
Bekleme süresi	06:48:04
Toplam üretim süresi	08:31:56
Katman Sayısı	140

Ayrıca, parçanın üretimi süresince yığma sürecinin ilerleyişini kayıt altına almak ve üretim kalitesini görsel olarak değerlendirebilmek amacıyla, belirli katman sayılarında parçanın üstten ve yandan fotoğrafları çekilmiştir. Elde edilen bu görsel çıktılar, üstten ve yandan görüşler olarak sırasıyla Resim 5.4 ve Resim 5.5'te sunulmaktadır.



Resim 5.4. İmal edilen Model A'nın farklı katmanlarının üstten görünüşleri



Resim 5.5. İmal edilen Model A'nın farklı katmanlarının yandan görünüşleri

Üretim süresi boyunca yapılan görsel gözlemler doğrultusunda, takım yolu planlaması ve robotik üretimin programlanması aşamalarında tanımlanan stratejilerin uygulanabildiği ve her bir katmanın bir önceki katman üzerine malzeme taşması olmadan sürekli olarak biriktiği; ayrıca üretim sırasında çakışma veya gözle görülür bir birikim eksikliği gibi olumsuz durumların meydana gelmediği gözlemlenmiştir.

6. DEFORMASYON ANALİZİ VE SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

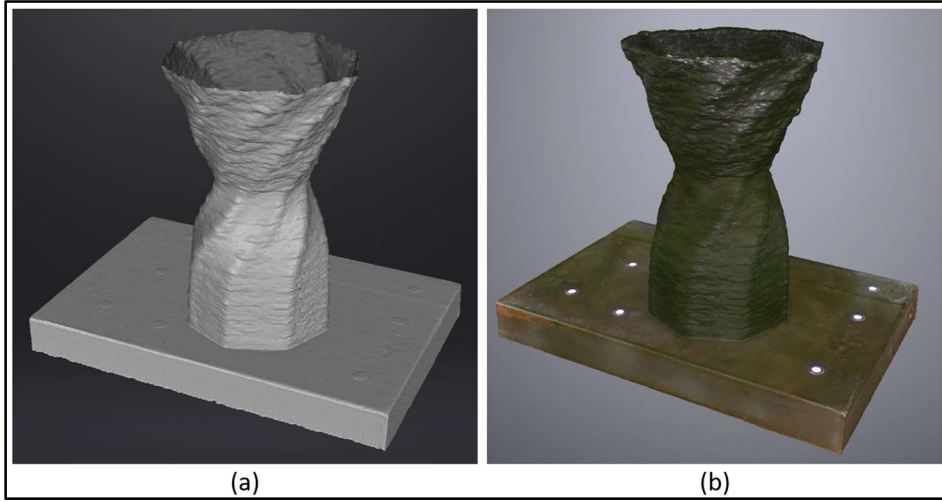
Bu bölümde, Model A'nın üretimi sonrasında gerçekleştirilen boyutsal doğruluk analizine ilişkin süreçler detaylı şekilde açıklanmakta ve parçanın iç yapısal kusurları değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, üretim sürecinin ardından parça, temassız optik tarama yöntemiyle dijital ortama aktarılmış; elde edilen STL modeli hem üretim öncesi CAD modeliyle hem de malzeme yığıma simülasyonu sonucu oluşturulan CAD modeliyle karşılaştırılarak, deformasyon analizleri istatistiksel ve görsel yöntemlerle analiz edilmiştir. Parça, geometrik karakteristiklerine göre üç bölgeye ayrılarak (alt, orta, üst) her bir bölgeye özel deformasyon yorumları yapılmış ve kesit düzlemleri üzerinden karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Son olarak, iç yapısal kusurların tespiti amacıyla dijital radyografi yöntemi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

6.1. Ölçüm Yöntemi ve Donanım

Üretilen parçanın geometrik doğruluğunun nicel olarak değerlendirilebilmesi ve olası geometrik sapmaların belirlenebilmesi amacıyla, parçanın dış yüzeyleri temassız optik ölçüm tekniğine dayalı bir 3B tarama cihazı kullanılarak dijital ortama aktarılmıştır. Bu işlemde, kızılötesi ışık teknolojisine dayalı tarama yöntemiyle çalışan ve 0,1 mm ölçüm hassasiyetine sahip olan Shining 3D markasına ait Einstar model bir 3B tarayıcı kullanılmıştır. Tarama sonrası elde edilen veriler ile üretim sonrası deformasyon analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla endüstriyel ölçüm ve tersine mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan PolyWorks yazılımı kullanılmıştır.

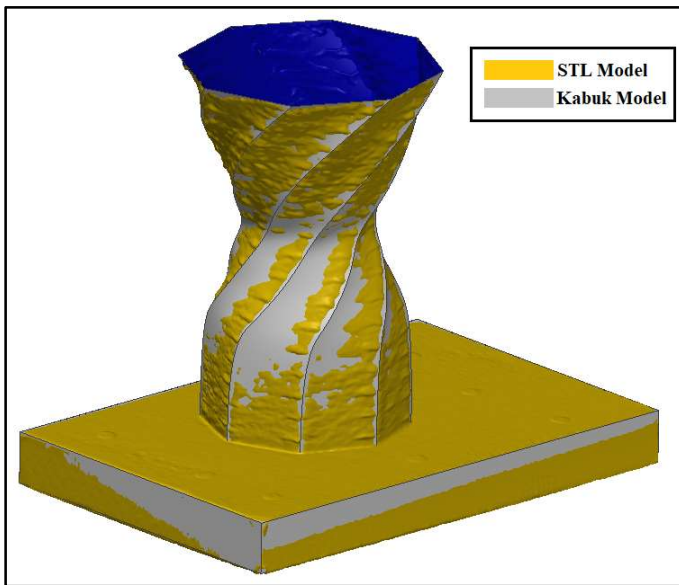
6.2. Üretilen Parçanın Tasarlanan Model İle Boyutsal Karşılaştırılması

Tarama işlemi sırasında, üretilen parçanın tüm dış yüzeyleri farklı açılardan taranmış ve dış yüzeylerin tamamını kapsayan nokta bulutu verisi elde edilmiştir. Ancak, optik taramaya bağlı tutarsızlıklar nedeniyle ham nokta bulutu verisi parçaya ait olmayan hatalı noktalar içerdiğinden, nokta bulutuna iyileştirme ve filtreleme işlemleri uygulanmıştır. Ardından iyileştirilen nokta bulutu verisi, ölçüm ve analiz süreçlerinde kullanılmak üzere STL dosya formatına dönüştürülmüştür. Tarama işlemi sonrasında iyileştirilmiş nokta bulutu ile parçanın 3B model görünümü Resim 6.1'de sunulmaktadır.



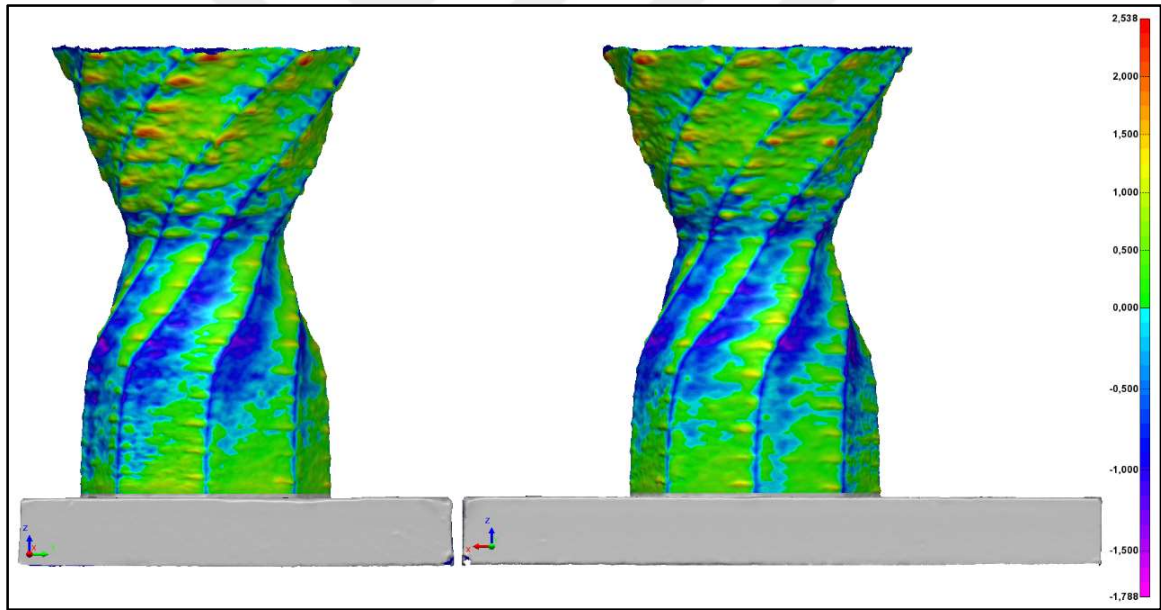
Resim 6.1. Üretilen parçanın tarama sonrası elde edilen (a) iyileştirilmiş nokta bulutu verisi ve (b) 3B model görünümü

Üretilen parçanın deformasyon analizi, tasarım sürecinde oluşturulan CAD modelin (bkz. Resim 4.1.a) dış yüzeylerini temsil eden kabuk model referans alınarak gerçekleştirilecektir. İlk olarak STL model ile kabuk modelin uzayda doğru bir biçimde hizalanarak üst üste bindirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda öncelikle en iyi uyum yöntemi kullanılarak ilk hizalama işlemi uygulanmış; ardından yüksek doğrulukta bir hizalama elde edilebilmesi adına, boyutsal özellikleri bilinen altlık malzemesinin yüzeyleri referans olarak alınarak ikinci hizalama yapılmıştır. Gerçekleştirilen hizalama işlemi sonucunda STL model ile CAD kabuk modelin üst üste bindirilmiş görüntüleri Resim 6.2’de sunulmaktadır.



Resim 6.2. STL model ile kabuk modelin üst üste bindirilmesine ait görsel

Hizalama işleminin tamamlanmasının ardından, üretilen parçanın yüzey deformasyonlarının belirlenmesine yönelik sapma analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, tarama verisinden elde edilen STL model ile referans olarak kabul edilen CAD kabuk modelin yüzeyleri karşılaştırılarak sapma miktarları mm cinsinden renk skalası üzerinden görselleştirilmiş ve elde edilen deformasyon dağılımları Resim 6.3'te farklı açılardan sunulmuştur. Görsellerde yer alan renk dağılımları, üretim sırasında meydana gelen geometrik sapmaların hem büyüklüğünü hem de yönünü nicel olarak temsil etmektedir. Bu bağlamda, pozitif sapmalar STL modelin referans modele göre dışarı doğru konumlandığını; negatif sapmalar ise STL model yüzeyinin, referans yüzeyin içerisinde kaldığını göstermektedir. Yeşil ve turkuaz tonlarının yoğunlukta olduğu bölgeler geometrik uyumun yüksek olduğu alanları temsil ederken; mor tonlar içe yönlü, kırmızı tonlar ise dışa yönlü belirgin sapmaların gözlemlendiği bölgeleri ifade etmektedir.



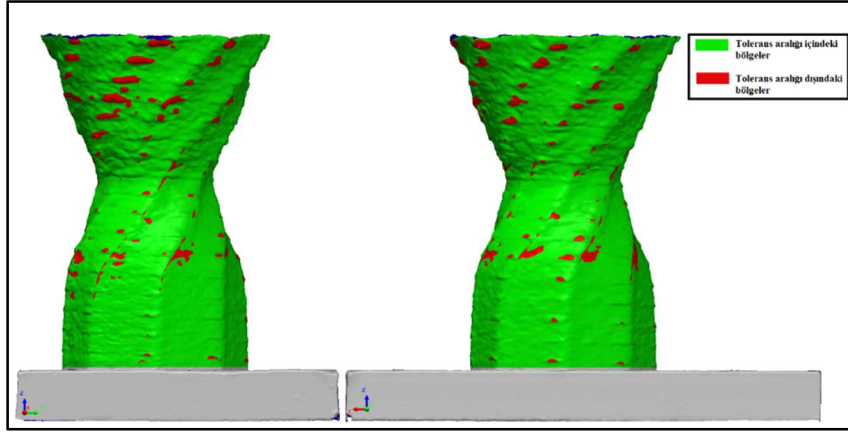
Resim 6.3. CAD kabuk model referans alınarak gerçekleştirilen tüm parçanın yüzey sapma analizine ait renk haritası görselleri

Yaklaşık 1 101 708 adet ölçüm noktası üzerinden yapılan analiz sonucunda elde edilen istatistiksel veriler Çizelge 6.1'de sunulmaktadır. Analiz bulgularına göre, pozitif yönde tespit edilen maksimum sapma değeri 2,538 mm iken, negatif yönde gözlemlenen maksimum sapma değeri -1,788 mm olarak belirlenmiştir. Ortalama sapma değeri ise -0,006 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer, tasarlanan CAD model ile üretimden elde edilen STL model arasında deformasyonların genel olarak belirli bir yönde yoğunlaşmadığını; aksine sapmaların dengeli ve çift yönlü dağıldığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.1. Tüm parçanın yüzey deformasyon analizine ait istatistiksel değerlendirme sonuçları

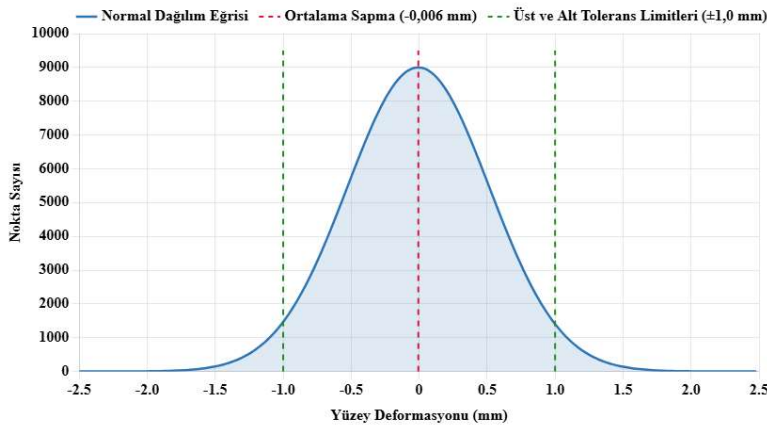
Parametre	Değer
Maksimum pozitif sapma (mm)	2,538
Maksimum negatif sapma (mm)	-1,788
Ortalama sapma (mm)	-0,006
Standart sapma (mm)	0,522
Toplam nokta sayısı	1 101 708
±1 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	775 403 adet (%70,382)
±2 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	1 049 700 adet (%95,279)
±3 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	1 094 393 adet (%99,336)
±4 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	1 100 601 adet (%99,900)
±5 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	1 101 708 adet (%100,000)
Üst Tolerans Limiti (mm)	1,000
Alt Tolerans Limiti (mm)	-1,000
Tolerans Dışı Yüzey Oranı (%)	5,170

Gerçekleştirilen deformasyon analizinde, boyutsal uygunluğun nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla kabul edilebilir sapma tolerans aralığı $\pm 1,0$ mm olarak belirlenmiştir. Resim 6.4'te, analiz edilen parçanın iki farklı bakış açısından tolerans içi ve dışında kalan yüzey bölgeleri görsel olarak sunulmuştur. İlgili görselde, yeşil renkle gösterilen bölgeler $\pm 1,0$ mm tolerans aralığı içerisinde kalan yüzey bölgelerini temsil ederken, kırmızı renkle gösterilen bölgeler ise bu sınırların dışında kalan deformasyonları göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre, toplam ölçüm noktalarının %94,83'ünün belirlenen kabul edilebilir tolerans aralığında kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, üretim sürecinin genel olarak yüksek geometrik doğrulukla tamamlandığını ve elde edilen parçanın yüzey geometrisinin büyük ölçüde tasarlanan CAD modeline uygunluk gösterdiğini ortaya koymaktadır.



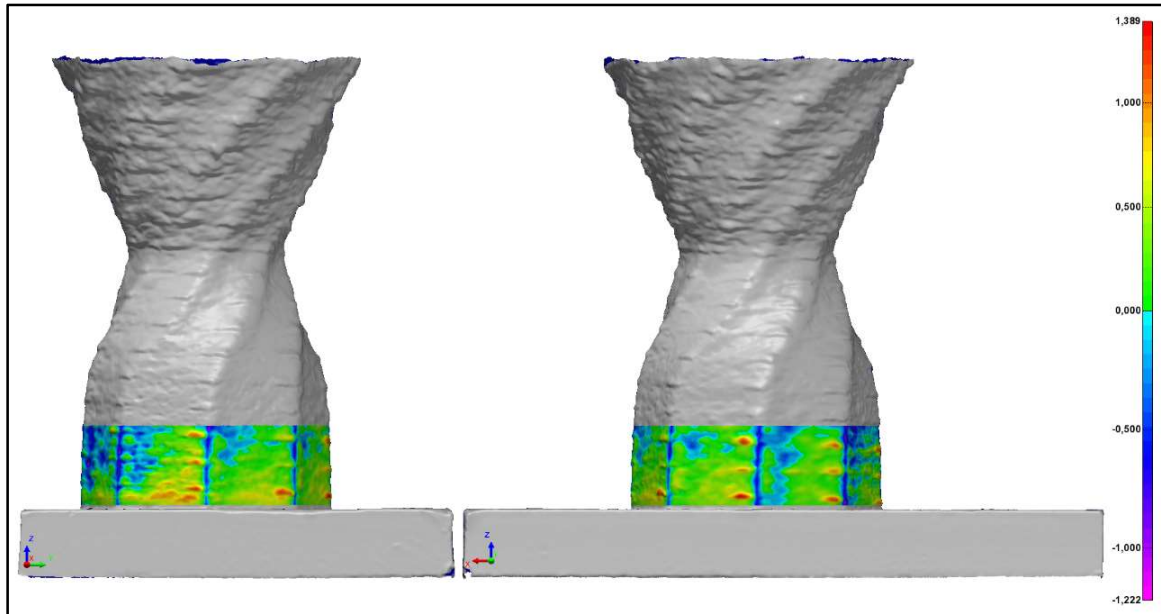
Resim 6.4. Üretilen parçanın iki farklı bakış açısından $\pm 1,0$ mm tolerans bandı içerisindeki (yeşil) ve dışındaki (kırmızı) yüzey bölgelerinin görsel gösterimi

Şekil 6.1'de, Çizelge 6.1'de sunulan istatistiksel verilere dayanarak oluşturulan normal dağılım eğrisi sunulmakta olup, ölçüm verilerinin çok büyük oranda normal dağılıma uyum gösterdiği gözlenmektedir. Bu eğri, tüm ölçüm noktalarına karşılık gelen yüzey deformasyonu değerlerinin istatistiksel dağılımını temsil etmektedir. Görsel üzerinde, $\pm 1,0$ mm olarak tanımlanan üst ve alt tolerans limitleri yeşil kesikli çizgilerle işaretlenmiş; tolerans aralığında kalan noktaların, dağılım eğrisi üzerindeki yoğunluğu burada da açık biçimde gözlemlenmektedir. Dağılım eğrisinin simetrik bir profile sahip olması ve dar bir yayılım göstermesi, üretim sonrası oluşan yüzey sapmalarının çoğunluğunun lokal sapmalardan ziyade büyük ölçüde rastlantısal dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, ölçüm noktalarının %5,17'lik kısmının belirlenen tolerans aralığının dışında kalması, parçanın sınırlı bazı bölgelerinde yerel imalat problemlerinin mevcut olduğunu da göstermektedir.



Şekil 6.1. Yüzey deformasyonu verilerinin istatistiksel dağılımını temsil eden normal dağılım eğrisi

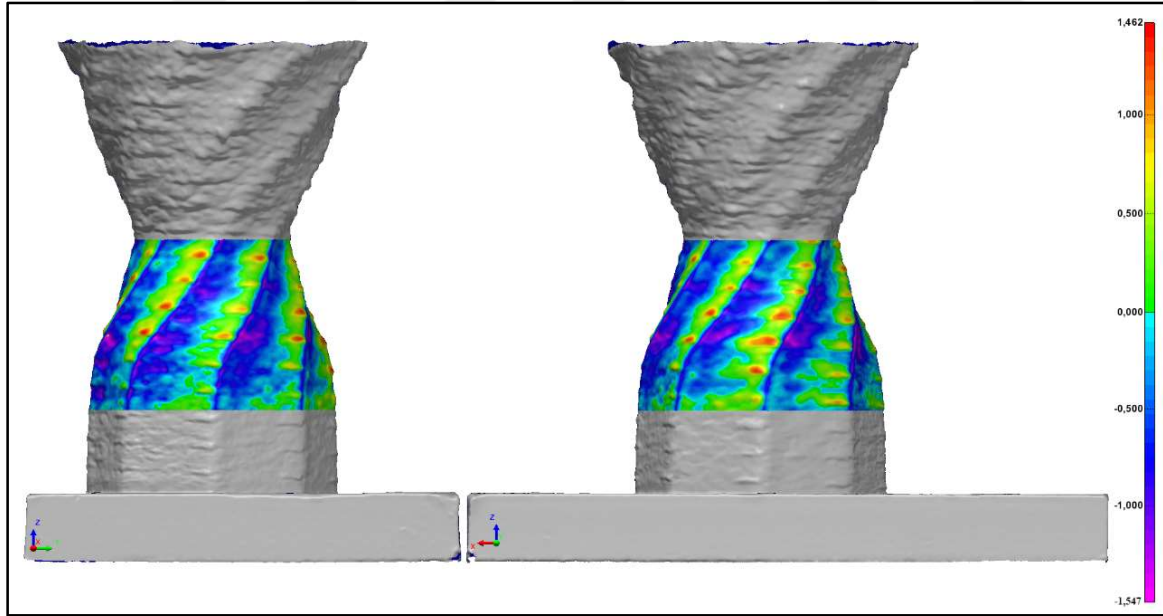
Üretimi yapılan ve toplam 140 katmandan oluşan Model A, geometrik özelliklerine bağlı olarak üç farklı karakteristik bölgeye sahiptir. İlk bölge olan 1–26. katmanlar arasında parça, sabit kesitli ve eksenel doğrultuda doğrusal bir şekilde yükselen bir yapıdadır. İkinci bölge olan 27–79. katmanlar arasında, yapı 13° 'lik sabit bir açıyla eksenel olarak bükülmekte ve aynı zamanda kesit geometrisi daralmaktadır. Üçüncü bölge olan 80–140. katmanlar arasında ise yapının 13° 'lik sabit açı ile bükülmesi devam etmekte, ancak bu kez kesit yapısı genişleyen bir forma ulaşmaktadır. Üretilen parça geometrisinin bazı bölgelerde daralan, bazı bölgelerde genişleyen, bazı bölgelerde ise 13° 'lik sabit bir açı ile bükülen kesit profiline sahip olması, üretim süreci boyunca ortaya çıkan geometrik sapmaların yalnızca genel ölçekte değil, bölgesel ölçekte de incelenmesini gerekli kılmaktadır. Bu doğrultuda söz konusu üç bölge için yüzey sapma analizleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, üretim süreci boyunca parça geometrisindeki değişimlerin deformasyon davranışlarına olan etkisinin bölgesel düzeyde kapsamlı biçimde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Resim 6.5, Resim 6.6 ve Resim 6.7'de sırasıyla 1–26. katmanları kapsayan sabit kesitli bölgenin, 27–79. katmanlar arasındaki daralan ve bükülen bölgenin, ve son olarak 80–140. katmanlar arasında yer alan genişleyen ve bükülen bölgenin yüzey deformasyon analiz sonuçları mm cinsinden sunulmaktadır. Bu bölgelere ait deformasyon analiz sonuçları da yine sırasıyla Çizelge 6.2, Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4'de gösterilmektedir.



Resim 6.5. CAD kabuk model referans alınarak gerçekleştirilen 1-26. katmanlar arası yüzey sapma analizine ait renk haritası görselleri

Çizelge 6.2. 1-26. katmanlar arası yüzey deformasyon analizine ait istatistiksel değerlendirme sonuçları

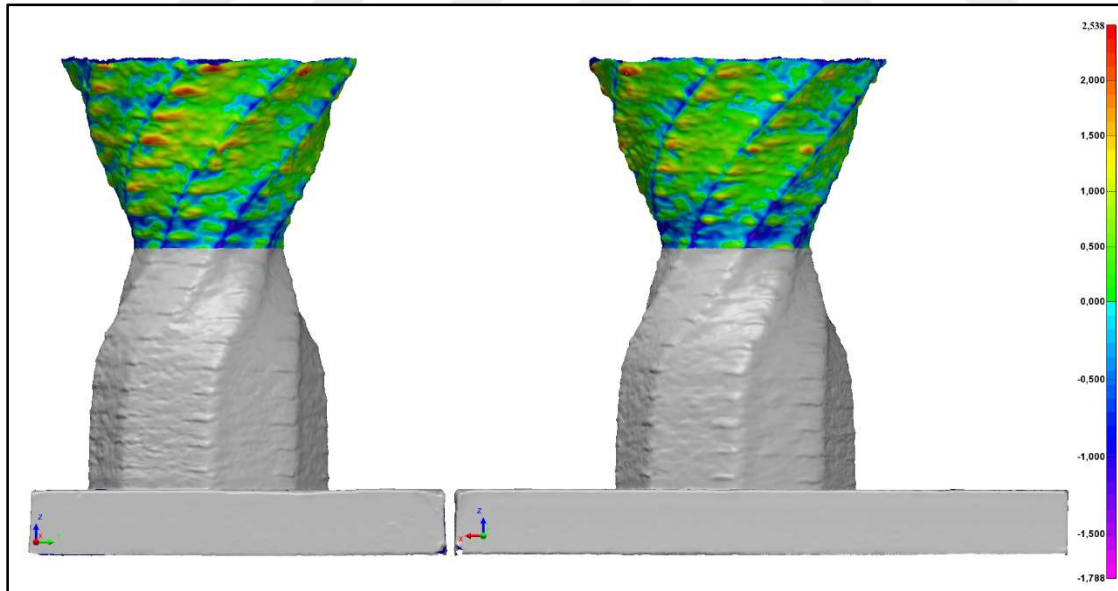
Parametre	Değer
Maksimum pozitif sapma (mm)	1,389
Maksimum negatif sapma (mm)	-1,222
Ortalama sapma (mm)	0,044
Standart sapma (mm)	0,361
Toplam nokta sayısı	215 866
± 1 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	148 352 adet (%68,724)
± 2 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	205 851 adet (%95,361)
± 3 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	215 282 adet (%99,729)
± 4 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	215 866 adet (%100,000)
Üst Tolerans Limiti (mm)	1,000
Alt Tolerans Limiti (mm)	-1,000
Tolerans Dışı Yüzey Oranı (%)	0,565



Resim 6.6. CAD kabuk model referans alınarak gerçekleştirilen 27-79. katmanlar arası yüzey sapma sapma analizine ait renk haritası görselleri

Çizelge 6.3. 27-79. katmanlar arası yüzey deformasyon analizine ait istatistiksel değerlendirme sonuçları

Parametre	Değer
Maksimum pozitif sapma (mm)	1,462
Maksimum negatif sapma (mm)	-1,547
Ortalama sapma (mm)	-0,233
Standart sapma (mm)	0,499
Toplam nokta sayısı	351 589
± 1 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	234 293 adet (%66,638)
± 2 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	337 676 adet (%96,043)
± 3 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	351 016 adet (%99,837)
± 4 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	351 589 adet (%100,000)
Üst Tolerans Limiti (mm)	1,000
Alt Tolerans Limiti (mm)	-1,000
Tolerans Dışı Yüzey Oranı (%)	5,803

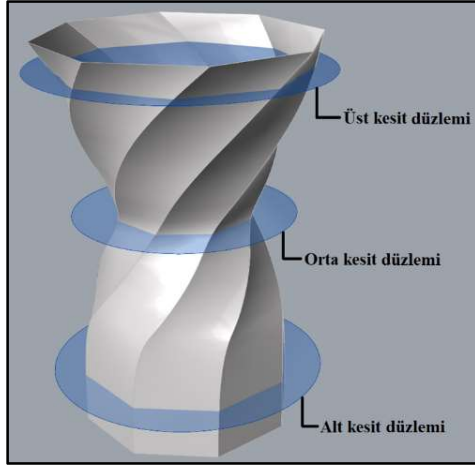


Resim 6.7. CAD kabuk model referans alınarak gerçekleştirilen 80-140. katmanlar arası yüzey sapma sapma analizine ait renk haritası görselleri

Çizelge 6.4. 80-140. katmanlar arası yüzey deformasyon analizine ait istatistiksel değerlendirme sonuçları

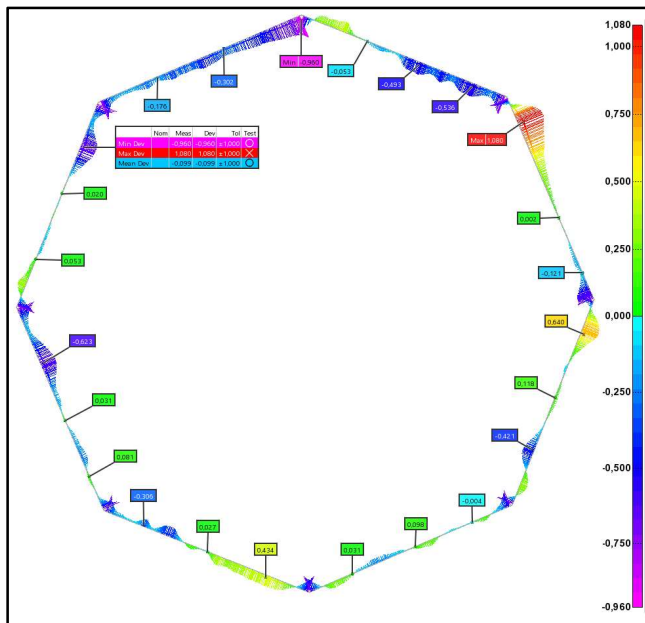
Parametre	Değer
Maksimum pozitif sapma (mm)	2,538
Maksimum negatif sapma (mm)	-1,788
Ortalama sapma (mm)	0,123
Standart sapma (mm)	0,542
Toplam nokta sayısı	534 276
±1 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	379 592 adet (%71,048)
±2 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	506 984 adet (%94,892)
±3 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	529 969 adet (%99,194)
±4 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	533 901 adet (%99,930)
±5 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	534 276 adet (%100,000)
Üst Tolerans Limiti (mm)	1,000
Alt Tolerans Limiti (mm)	-1,000
Tolerans Dışı Yüzey Oranı (%)	6,514

Üç karakteristik bölge için gerçekleştirilen yüzey deformasyon analizlerinin ardından parçanın bu bölgelerindeki deformasyon davranışlarının daha ayrıntılı şekilde analiz edilebilmesi amacıyla belirli kesit düzlemleri üzerinden karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Parçanın tabanından itibaren Resim 6.8’de gösterildiği gibi 30 mm, 118 mm ve 190 mm yüksekliklerinde üç farklı yatay kesit düzlemi tanımlanmış; her bir düzlemde elde edilen STL model kesitleri ile referans CAD kabuk modelin karşılık gelen kesitleri karşılaştırılmıştır.

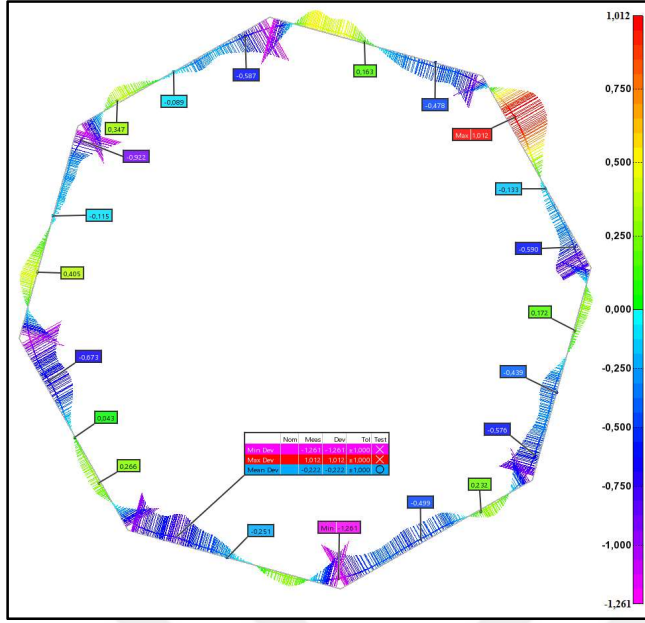


Resim 6.8. Üretilen parçanın alt, orta ve üst bölgelerini temsil eden kesit düzlemlerinin gösterimi

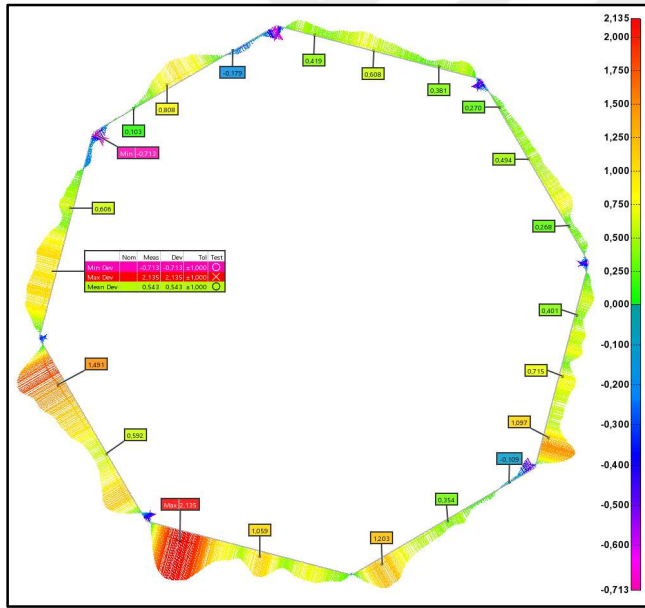
Resim 6.9, Resim 6.10 ve Resim 6.11’de sırasıyla alt, orta ve üst bölgelere karşılık gelen kesit düzlemlerinde elde edilen deformasyon sonuçları sunulmuştur. Her bir kesitte, üretim sonrası oluşan geometrik sapmalar, hem pozitif hem de negatif yönlü deformasyonları ifade edecek şekilde iki yönlü olarak yüzeye dik doğrultudaki sapma vektörleri ile temsil edilmiştir. Sapma vektörleri, grafiksel temsilde görünürlüğün artırılması amacıyla 5 kat ölçeklendirilmiştir. Her bir kesitte, ölçülen minimum ve maksimum sapma değerleri, ortalama deformasyon miktarları ve belirli aralıklarla rastgele alınan ölçümler görsellerde sunulmuştur.



Resim 6.9. Alt kesit düzlemine ait deformasyon analizinde elde edilen yüzey sapmaları ve vektörel gösterimi



Resim 6.10. Orta kesit düzlemine ait deformasyon analizinde elde edilen yüzey sapmaları ve vektörel gösterimi



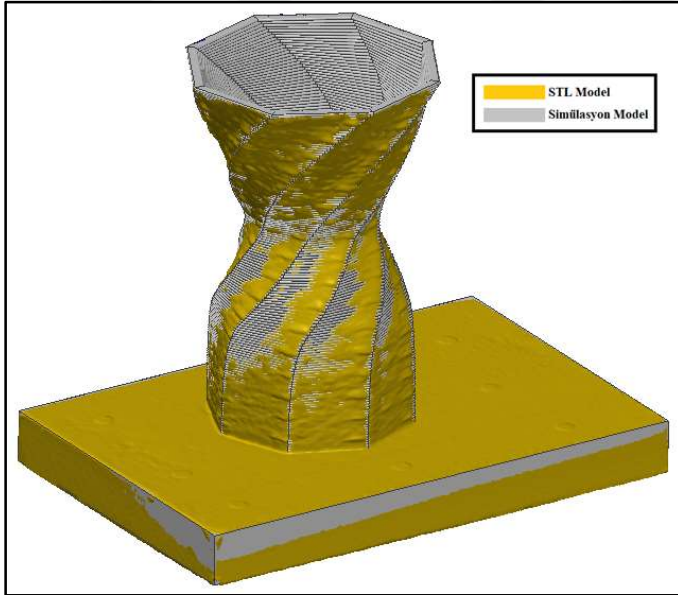
Resim 6.11. Üst kesit düzlemine ait deformasyon analizinde elde edilen yüzey sapmaları ve vektörel gösterimi

6.3. Üretilen Parçanın Malzeme Yığma Simülasyonundan Elde Edilen Model İle Boyutsal Karşılaştırılması

Bu bölümde, üretilen parçanın 3D tarayıcı ile taranması sonrasında oluşturulan STL model ile 4.5 numaralı alt başlıkta Model A için malzeme yığma simülasyonu sonucu oluşturulan CAD modelin boyutsal olarak karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırmanın

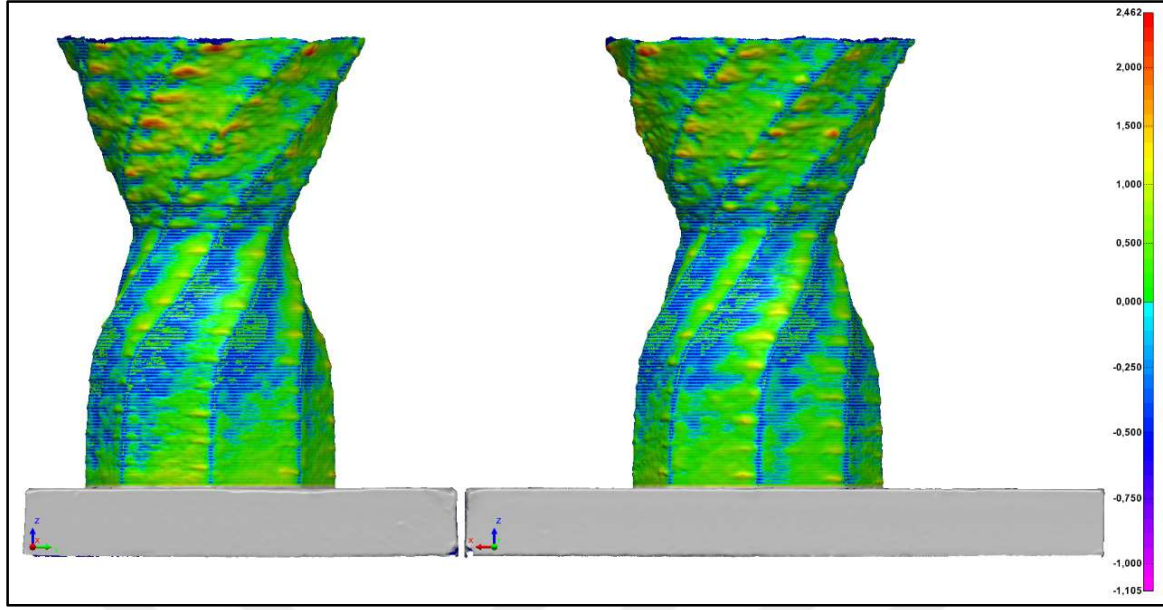
temel amacı, üretim öncesi simülasyon çıktılarının gerçek üretim sonuçları ile ne ölçüde örtüştüğünü nicel olarak değerlendirmek ve geliştirilen yığma stratejisinin doğruluğunu ortaya koymaktır.

Karşılaştırma sürecinde, üretim sonrası taranan parçaya ait STL model ile malzeme yığma simülasyonundan elde edilen CAD modelin, bir önceki başlıkta olduğu gibi önce en iyi uyum yöntemi ile ön hizalama işlemi gerçekleştirilmiş; ardından, boyutsal özellikleri bilinen altlık malzemesinin yüzeyleri referans alınarak ikinci bir hizalama yapılmıştır. Gerçekleştirilen hizalama işlemi sonucunda STL model ile simülasyona ait CAD modelin üst üste bindirilmiş görüntüleri Resim 6.12’de sunulmaktadır.



Resim 6.12. STL model ile simülasyon CAD modelin üst üste bindirilmesine ait görsel

Hizalama işleminin ardından her iki modelin dış yüzeyleri arasındaki geometrik sapmaların tespiti için sapma analizi gerçekleştirilmiş, sapma miktarları mm cinsinden renk skalası üzerinde görselleştirilmiş ve elde edilen deformasyon dağılımları Resim 6.13’te farklı açılardan gösterilmiştir. Yapılan analiz sonucunda elde edilen istatistiksel veriler ise Çizelge 6.5’te sunulmaktadır.



Resim 6.13. Simülasyon CAD modeli referans alınarak gerçekleştirilen yüzey sapma analizine ait parçanın renk haritası görselleri

Çizelge 6.5. Simülasyon modeli için yüzey deformasyon analizine ait istatistiksel değerlendirme sonuçları

Parametre	Değer
Maksimum pozitif sapma (mm)	2,462
Maksimum negatif sapma (mm)	-1,105
Ortalama sapma (mm)	0,111
Standart sapma (mm)	0,407
Toplam nokta sayısı	1 105 786
±1 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	779 063 adet (%70,453)
±2 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	1 061 640 adet (%96,008)
±3 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	1 095 839 adet (%99,100)
±4 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	1 102 997 adet (%99,748)
±5 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	1 105 424 adet (%99,967)
±6 Standart sapma içinde kalan noktalar (%)	1 105 786 adet (%100,000)
Üst Tolerans Limiti (mm)	1,000
Alt Tolerans Limiti (mm)	-1,000
Tolerans Dışı Yüzey Oranı (%)	2,346

6.4. Deformasyon Analizi Sonuçlarının Tartışılması

Bu bölümde, 6.2 ve 6.3 numaralı başlıklar altında gerçekleştirilen boyutsal karşılaştırma analizlerinden elde edilen deformasyon verileri yorumlanmakta; ayrıca geliştirilen malzeme yığıma simülasyonunun üretim sonuçlarını ne ölçüde temsil edebildiği değerlendirilmektedir.

1-26. Katmanlar arasında kalan alt bölgedeki deformasyonların değerlendirilmesi

Üretilen parçanın 1–26. katmanlar arasında yer alan alt bölgesi, eksenel doğrultuda doğrusal olarak yükselmekte ve kesit geometrisi boyunca hiçbir daralma ya da genişleme içermemektedir. Bu nedenle bu bölge geometrik karmaşıklık açısından modelin en düşük karmaşıklığa sahip bölgesidir. Bahsi geçen bu yapısal özellikler üretim doğruluğuna doğrudan olumlu yansımış ve yapılan deformasyon analizlerinde açıkça gözlemlenmiştir.

Yüzey deformasyon analizi sonuçlarına göre bu bölgede ölçülen maksimum pozitif sapma 1,389 mm, maksimum negatif sapma ise -1,222 mm olarak belirlenmiş olup, ortalama deformasyon değeri yalnızca 0,044 mm'dir. Bu durum, deformasyonların parçanın belirli bir yönünde sistematik bir eğilim sergilemediğini göstermektedir. Ayrıca 215 866 adet ölçüm noktasından yalnızca %0,565'lik kısmının $\pm 1,0$ mm tolerans aralığının dışında kalmış olması, bu bölgenin üretim açısından yüksek doğrulukla tamamlandığını ortaya koymaktadır. Resim 6.5'te yer alan deformasyon renk haritası incelendiğinde, yeşil ve turkuaz tonlarının bu bölgede baskın olduğu görülmektedir. Bu renk dağılımı, STL model yüzeyinin referans model ile yüksek oranda örtüştüğünü ve deformasyonların minimum seviyede gerçekleştiğini görsel olarak da doğrulamaktadır. Bu bulgular, Resim 6.9'da sunulan alt kesit düzlemine ait deformasyon analizi ile de desteklenmektedir. Söz konusu kesitte, sapma vektörlerinin çoğunluğunun $\pm 0,5$ mm aralığında yoğunlaştığı; maksimum deformasyonun 1,080 mm, minimum deformasyonun ise -0,960 mm olduğu görülmektedir. Ayrıca, parçanın farklı bölgeleri için ayrı ayrı yürütülen yüzey deformasyon analizlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi sonucunda, 1–26. katmanlar arasında kalan bölgenin, diğer bölgelere kıyasla $\pm 1,0$ mm tolerans aralığında kalma oranı en yüksek olan bölge olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak, yığıma işleminin düşük sıcaklığa sahip altlık malzeme üzerine gerçekleştirilmiş olması, bu bölgede ısıl birikime bağlı deformasyon etkilerinin sınırlı kalmasında etkili olmuştur. Alt bölgede gözlemlenen düşük seviyedeki deformasyonların bir diğer olası nedeni, proses parametrelerinde zamanla meydana gelen küçük ölçekli

dalgalanmalardır. WAAM sürecinde, tekil kaynak dikişinin genişliği ve yüksekliği, doğrudan uygulanan kaynak parametrelerinin (akım, voltaj, ısı girdisi, tel besleme hızı vb.) etkisi altındadır. MetalWorm ticari yazılımı aracılığıyla elde edilen analiz sonuçları, bu parametrelerde zaman içerisinde düşük genlikli dalgalanmalar yaşandığını göstermektedir. Her ne kadar proses parametrelerinde meydana gelen bu dalgalanmalar minimal düzeyde olsa da, kaynak profilini etkileyecek nitelikte olup, yığma yapılan katman boyunca dikiş genişliğinin sabit kalmamasına sebebiyet vermektedir. Bu durumun, yüzey deformasyonlarında $\pm 1,0$ mm tolerans aralığında kalan küçük sapmaların oluşmasına katkı sağlamış olabileceği değerlendirilmektedir.

Tüm bu değerlendirmeler doğrultusunda, üretimin başlangıç bölgesi olan 1–26. katmanlar arasında oluşan deformasyonların oldukça düşük seviyede olduğu; dolayısıyla uygulanan üretim stratejisinin bu bölgede yüksek geometrik hassasiyet sağladığı sonucuna ulaşılabilir. Bu da, hem sabit kesit geometrisinin hem de düşük ısı birikimin üretim kalitesine olumlu katkı sunduğunu göstermektedir.

27-79. Katmanlar arasında kalan orta bölgedeki deformasyonların değerlendirilmesi

Modelin 27–79. katmanları arasında kalan orta bölgede, alt bölgedeki sabit kesit yapısının aksine, parçanın kesit geometrisi daralmakta ve eksenel doğrultuda belirli bir açıyla bükülmektedir. Bu yapısal değişkenlikler, orta bölgenin geometrik karmaşıklığını belirgin biçimde artırmakta; dolayısıyla da yığma sürecinde proses doğruluğunun hassas biçimde kontrol edilmesini zorlaştırmaktadır.

Yüzey deformasyon analizi sonuçlarına göre, parçanın orta bölgesinde ölçülen maksimum pozitif sapma 1,462 mm, maksimum negatif sapma ise -1,547 mm olarak ölçülmüştür. Ortalama deformasyon değeri -0,233 mm olup, bu durum parçanın genel eğiliminin CAD kabuk modeline göre içe doğru yani negatif yönde bir sapma sergilediğini göstermektedir. Toplam 351 589 ölçüm noktasının %5,803'ünün $\pm 1,0$ mm tolerans aralığının dışında kalması, bu bölgedeki üretim doğruluğunun alt bölgede elde edilen seviyeye göre düştüğünü, ancak yine de kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca parçanın en küçük kesit alanına karşılık gelen orta kesit düzlemine ait deformasyon analizi incelendiğinde (bkz. Resim 6.10), sapma vektörlerinin daha geniş bir aralığa yayıldığı ve lokal bölgelerde $\pm 1,5$ mm'yi aşan deformasyonların olduğu gözlemlenmiştir.

Elde edilen deformasyon analizi sonuçlarına göre, orta bölgedeki deformasyonların alt bölgeye kıyasla daha yüksek seviyede ve içe doğru yönelme eğiliminde olmasının temel nedenlerinden birisi, bu bölgede parçanın daralan bir kesit geometrisine sahip olmasıdır. Bu yapısal özellik, parçanın merkezine doğru eğimli yüzeylerin oluşmasına yol açmaktadır. Ayrıca, üretilen parçanın CAD modelinin tüm katmanları sabit kalınlıkta olacak şekilde 2,5 boyutlu dilimleme yöntemiyle katmanlara ayrılması, Model A örneğinde de gözlemlendiği gibi (bkz. Resim 6.12), özellikle çıkıntılı veya eğimli yüzeylere sahip parçalarda basamak etkisi (ing. stair effect) olarak tanımlanan ve boyutsal hassasiyeti sınırlayan bir yapının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu etki, katmanlı üretim sırasında yüzey düzgünlüğünü olumsuz etkileyerek geometrik sapmalara zemin hazırlamaktadır. Buna ek olarak eğimli yüzeylerde biriktirilen ergimiş metal, yerçekiminin etkisiyle aşağı yönde akma eğilimi göstermektedir [76, 77].

Orta bölgede deformasyonların daha yüksek düzeyde ve içe doğru gerçekleşmesinin bir diğer önemli nedeni ise WAAM prosesine özgü ısıl davranışların etkisidir. Bu çalışmada, katmanlar arası sıcaklık değişimleri termal kamera ile sürekli olarak izlenmiş ve katmanlar arası sıcaklıkların 250 °C'nin altında tutulmasını sağlamak amacıyla, operatör tarafından sezgisel olarak belirlenen bir katmanlar arası bekleme süreleri uygulanmıştır. Ancak, bu katmanlar arası bekleme sürelerinin uygun şekilde belirlenmemesi durumunda, her bir katmanda ısı birikimi artış gösterebilmekte ve bu durum, ergime ve katılaşma süreçlerinin termal açıdan kontrolsüz hâle gelmesine neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra, literatürde yapılan çalışmalar, WAAM süreçlerinde üretim ilerledikçe parçanın hacim ve kütlesinin artmasına bağlı olarak ısı birikiminin belirgin şekilde yükseldiğini; buna karşın, yüzey alanındaki artışın bu ısyı ortamdan uzaklaştırmakta yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır [76, 78–80]. Oluşan ısı birikimi, ergime–katılaşma dengesini bozarak katılaşma hızının azalmasına ve ergimiş havuz hacminin artmasına neden olabilmektedir [76]. Bu durum, özellikle eğimli yüzeylerde metalin kontrollü bir şekilde katılaşmasını zorlaştırmakta; buna bağlı olarak, yerçekiminin etkisiyle ergimiş metalin aşağı yönde akma eğilimi göstermesine yol açmaktadır.

Model A'nın üretim sürecinde pozisyonerin aktif olarak kullanılmaması ve kaynak torcunun yöneliminin sabit tutulması da bu deformasyon eğilimine katkı sunan önemli bir diğer etkidir. Pozisyoner kullanılmadığı için, özellikle eğimli yüzeylerde torcun yönelimi, yüzey normallerine göre optimize edilememiştir. Bu durum, hem merdiven etkisinin hem de termal

birikimin parça hacminin iç kısmına doğru deformasyon oluşturma potansiyelini artırmış ve geometrik bütünlük üzerindeki olumsuz etkileri derinleştirmiştir.

Sonuç olarak, orta bölgede gözlemlenen deformasyonlar; daralan kesit geometrisi, basamak etkisi, yerçekiminin etkisi, termal birikim ve sabit torç yönelimi gibi çoklu etmenlerin birleşik etkisiyle açıklanabilir. Bu bulgular, WAAM süreçlerinde geometrik karmaşıklığın arttığı bölgelerde proses parametrelerinin adaptif biçimde optimize edilmesi gerektiğini ve üretim stratejisinin bölgeye özgü biçimde yapılandırılmasının, geometrik doğruluk açısından kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. Orta bölgedeki deformasyonların alt bölgeye göre artmış olmasına rağmen, ortalama sapmanın halen nispeten düşük seviyede kalması ve büyük çoğunluğun tolerans aralığında yer alması, uygulanan üretim stratejisinin genel anlamda başarısını koruduğunu göstermektedir.

80-140. Katmanlar arasında kalan üst bölgedeki deformasyonların değerlendirilmesi

Model A'nın 80–140. katmanları arasında kalan üst bölgesi, orta bölgeye benzer şekilde parçanın aksel olarak bükülmeye devam ettiği, buna karşın orta bölgenin aksine kesit geometrisinin kademeli olarak genişlediği bir bölgedir.

Üst bölge için gerçekleştirilen yüzey deformasyon analiz sonuçlarına göre, ölçülen maksimum pozitif sapma 2,538 mm, maksimum negatif sapma -1,788 mm, ortalama deformasyon değeri ise 0,123 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer, orta bölgede gözlemlenen negatif yönlü ortalama deformasyonun aksine, pozitif yönde bir eğilim göstermekte olup, yüzeyin referans modele göre dışa doğru genişleme eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, Resim 6.11'de sunulan üst kesit düzlemine ait deformasyon analizi ile de desteklenmektedir. Söz konusu kesitte, sapma vektörlerinin büyük çoğunluğunun dışa doğru yöneldiği ve bu doğrultuda yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca toplam 534 276 ölçüm noktasının %6,514'ünün $\pm 1,0$ mm tolerans aralığının dışında kalması, bu bölgedeki üretim doğruluğunun, parçanın diğer bölgelerine kıyasla en düşük seviyede gerçekleştiğini göstermektedir. Bu oran, üst bölgenin üretim doğruluğu açısından en kritik bölge olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Elde edilen deformasyon analizi sonuçları, üst bölgede gözlemlenen deformasyonların yön olarak dışa doğru bir eğilim sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu yönelimin, orta bölgede

tespit edilen içe doğru deformasyonlarla karşıt bir karakteristik sergilemesine karşın, her iki bölgede de deformasyonların oluşumuna etki eden temel mekanizmaların büyük ölçüde benzer olduğu değerlendirilmektedir. Üst bölge, orta bölgenin aksine dışa doğru eğimli yüzeylerden ve genişleyen kesit yapısından oluşmaktadır. Bu nedenle, orta bölgede içe doğru deformasyonlara neden olan yapısal etmenlerin, üst bölgede bu kez dışa yönelimli deformasyonlara neden olduğu değerlendirilmiştir. Üst bölgede yüzey eğimi yer yer 35°'ye kadar ulaşmakta olup, bu değer parça genelinde gözlemlenen en yüksek eğim değerini temsil etmektedir. Ayrıca katman sayısının artmasına bağlı olarak parçanın hacimsel kütlesi belirgin ölçüde artmış ve bu durum, özellikle üst katmanlarda ısı birikiminin etkisini daha kritik hâle getirmiştir. Bu sebeple artan yüzey eğimi ve ısı davranışının etkileri üst bölgede tespit edilen geometrik sapmaların, alt ve orta bölgeye kıyasla daha yüksek düzeylerde gerçekleşmesine zemin hazırlamıştır.

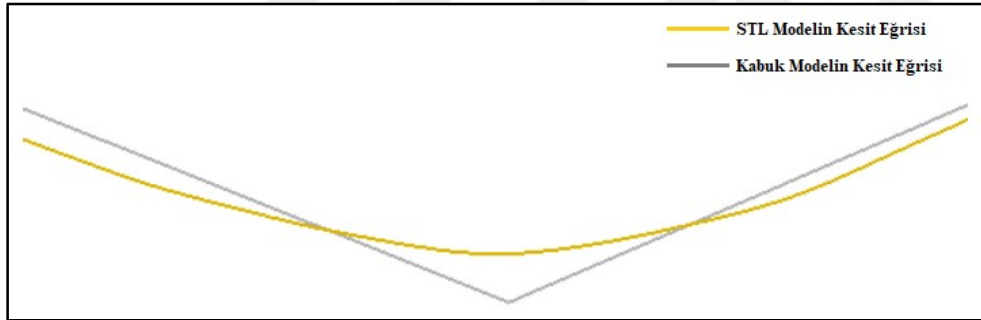
Sonuç olarak basamak etkisi, ısı birikim, sabit torç yönelimi ve yerçekimi kaynaklı metal akışı gibi faktörler, orta bölgede olduğu gibi bu bölgede de yüzey bütünlüğünü bozan başlıca etkenler olarak öne çıkmaktadır.

Parça geometrisindeki deformasyonların genel değerlendirilmesi

Parçanın hem genel (bkz. Resim 6.3) hem de bölgesel (bkz. Resim 6.5, Resim 6.6, Resim 6.7) yüzey deformasyon analizlerine ait renk haritalarında açıkça görüldüğü üzere, turuncu-kırmızı tonlar ile temsil edilen maksimum pozitif sapmaların büyük bölümü, kaynak dikişlerinin başlangıç noktalarına karşılık gelmektedir. Bu durum, tüm katmanlarda tekrarlanan yapısal bir karakteristik olup, her bir katman başlangıcında yığma işleminin başlatıldığı bölgelerde belirgin bir malzeme birikiminin meydana geldiğini göstermektedir. Söz konusu pozitif sapmaların oluşumuna neden olan başlıca etkenler, daha önce 2.5.1. numaralı başlık altında detaylı olarak açıklanan literatür taramasında belirtildiği üzere iki temel faktöre dayanmaktadır. İlk olarak, kaynak işleminin başlangıcında robot kolun ivmelenme fazında olması nedeniyle torç ilerleme hızının düşük kalması, arkın aynı noktada daha uzun süre etki göstermesine yol açmakta; bu da bölgedeki ergime hacminin artmasına ve dolayısıyla lokal malzeme yığılmasına neden olmaktadır [43]. İkinci olarak, kaynak işleminin başlangıç noktasında elektrik arkının başlatılması sırasında enerji yoğunluğunun kısa süre içerisinde maksimum seviyeye ulaşması, ilgili bölgeye yüksek miktarda ısı girişinin gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bu yüksek ısı girdisi, daha fazla sıvı metalin

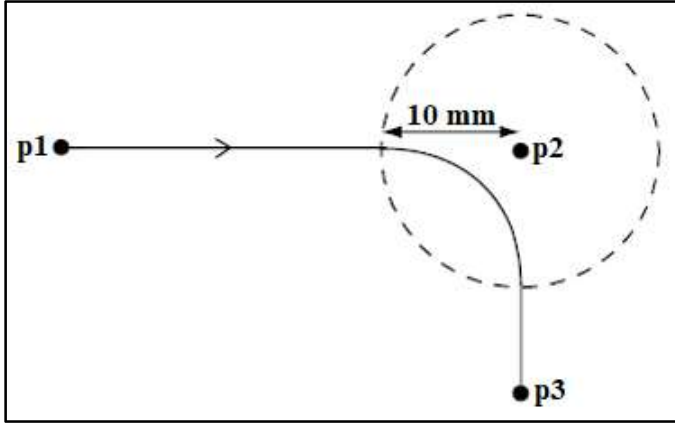
birikmesine zemin hazırlamakta ve kaynak dikişi profilinde genişlemeye yol açmaktadır [44, 77]. Söz konusu iki etmenin birleşik etkisi, deformasyon analizlerinde kaynak başlangıç noktalarında gözlemlenen dikiş genişliğinin artmasını ve buna bağlı olarak oluşan pozitif yüzey deformasyonlarını açıklamaktadır.

Parçanın genel deformasyon karakteristiğine ilişkin bir diğer önemli tespit ise, sekizgen kesit geometrisine sahip katmanlarda, kaynak torcunun köşe noktalarına tam olarak erişmediği; bunun yerine, bu noktalara yaklaşırken yön değiştirerek dairesel bir geçiş hareketi sergilediğidir. Orta katman düzlemine ait kesit görüntüsünde sunulan Resim 6.14 incelendiğinde, kaynak torcunun ideal köşe noktasına ulaşmak yerine, belirli bir mesafeye kadar yaklaştıktan sonra yönünü dairesel bir yörüngeyle değiştirdiği açıkça görülmektedir. Bu davranış, üretim sürecinde bilinçli olarak tanımlanmış bir hareket stratejisi olup, robotik üretimin programlanması aşamasında atanan alan parametresinin doğrudan bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.



Resim 6.14. Kaynak torcunun köşe noktasına tam erişmeden yön değiştirmesi sonucu dairesel geçiş hareketi sergilemesinin bir örneği

Robotik kaynak operasyonlarında zone parametresi, robot eksenlerinin bir sonraki hedef pozisyona geçiş yapmadan önce mevcut hedefe ne derece yaklaşması gerektiğini belirleyen bir kontrol parametresidir. Şekil 6.12’de de görüldüğü üzere, zone parametresinin Z10 olarak tanımlanması durumunda, robot kolu p2 noktasına tam olarak ulaşmaksızın, bu noktaya 10 mm mesafeye yaklaştıktan sonra bir sonraki hedef olan p3 noktasına yönelmekte ve bu geçişi çember biçimli bir yörünge izleyerek gerçekleştirmektedir [81, 82].



Şekil 6.2. Alan parametresi nedeniyle hedef noktaya yaklaşmadan yön değiştirme hareketinin şematik gösterimi

Kaynak başlangıç noktalarındaki robot hareketine benzer şekilde, robot kolun köşe noktalarına tam olarak ulaşması, bu noktalarda yavaşlayarak durmasını ve ardından yeniden ivmelenmesini gerektirmektedir. Bu kinematik davranış, kaynak torcunun köşe bölgelerde daha uzun süre kalmasına neden olarak, istenmeyen lokal malzeme birikimlerine yol açabilmektedir. Bu durumun önüne geçilmesi amacıyla, kaynak başlangıç ve bitiş noktaları hariç olmak üzere, diğer tüm köşe noktaları için robot kodunda zone parametresi z1 olarak tanımlanmış ve bu noktalar durma noktası yerine geçiş noktası olarak programlanmıştır. Ancak bu hareket davranışı, torcun köşe noktalarına doğrudan ulaşmaması nedeniyle, Resim 6.14'de de görülebileceği üzere, köşe bölgelerinde sınırlı düzeyde negatif yüzey sapmalarının oluşmasına neden olmaktadır.

Üretilen parçada dikkat çeken bir diğer önemli yüzey bozulması, parçanın tepe bölgesinde gözlemlenen dalgalı formdaki yüzey profilidir. Bu duruma etki eden temel etkenin, parçanın sahip olduğu çokgen kesit geometrisi olduğu değerlendirilmektedir. Daha önce Resim 6.14 ve Şekil 6.2 kapsamında açıklanan robot hareket stratejisinde olduğu gibi, robot kolun köşe noktalarına yaklaşırken ilerleme hızında meydana gelen yavaşlama, kaynak torcunun bu bölgelerde daha uzun süre kalmasına ve bu nedenle lokal olarak fazla malzeme birikmesine neden olmaktadır. Her bir katmanda tekrar eden bu yığılma davranışı, üretim yüksekliğinin artmasıyla birlikte kümülatif bir etki oluşturarak parçanın üst bölgesinde dalga formunda yüzey deformasyonlarının meydana gelmesine yol açmaktadır. Söz konusu yapısal bozulma, üretim sonrası elde edilen parça üzerinde yapılan görsel incelemelerde de net bir şekilde gözlemlenmiş olup, bu duruma ilişkin örnek Resim 6.15'te sunulmaktadır.



Resim 6.15. Üretilen parçanın tepe bölgesinde gözlemlenen dalgalı yüzey formunun görünüşü

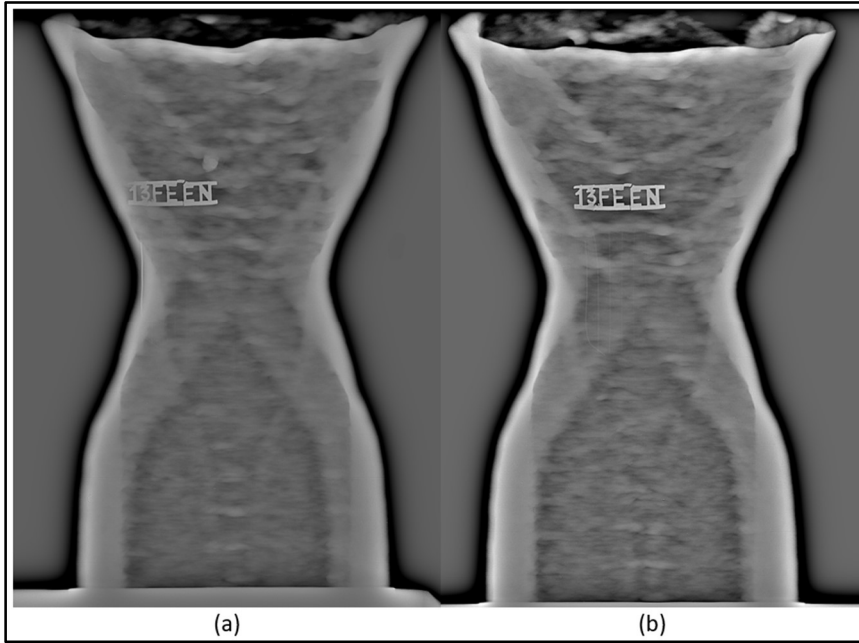
Sonuç olarak, parçanın genel yüzey deformasyonu büyük ölçüde $\pm 1,0$ mm tolerans bandı içerisinde kalmakta; ortalama deformasyon değeri ise sıfıra yakın seyretmektedir. Ancak, geometrik karmaşıklığın arttığı bölgelerde deformasyonların belirgin şekilde yükseldiği ve yönsel eğilimler gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, WAAM sürecinde bölgeye özgü üretim stratejilerinin geliştirilmesinin ve proses parametrelerinin adaptif biçimde optimize edilmesinin üretim doğruluğunu artırmada kritik bir rol oynayacağını ortaya koymaktadır.

Malzeme yığılma simülasyonu deformasyon analizinin değerlendirilmesi

Simülasyon tabanlı CAD modeli ile üretilen parçanın STL modeli arasında gerçekleştirilen karşılaştırma analizinde, maksimum pozitif sapma 2,462 mm, maksimum negatif sapma -1,105 mm olarak hesaplanmış, ortalama sapma değeri ise 0,111 mm olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, ölçüm noktalarının %97,654'lük kısmı belirlenen $\pm 1,0$ mm tolerans aralığında kalırken, yalnızca %2,346'lık yüzey bölgesinin tolerans dışı olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu bulgular, malzeme yığılma simülasyonu sonucunda oluşturulan hacimsel modelin, gerçek üretim geometrisini yüksek doğrulukla temsil ettiğini ve uygulanan yığılma stratejisinin üretime uygun şekilde modellenebildiğini ortaya koymaktadır.

6.5. Dijital Radyografi Yöntemi ile Katmanlar Arası Birleşme Kalitesinin Değerlendirilmesi

WAAM prosesinde, üretim süreci boyunca gözeneklilik, çatlak oluşumu, deformasyon ve ergime eksikliği gibi çeşitli imalat kusurları meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, üretim sonrası parçanın iç yapısal bütünlüğünü değerlendirmek ve katmanlar arası olası kusurları görsel olarak analiz edebilmek amacıyla endüstriyel dijital radyografi yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda, üretilen parçanın farklı yönlerden alınmış radyografik görüntüleri elde edilmiş ve Resim 6.16’da sunulmuştur.



Resim 6.16. Üretilen parçanın (a) yan görünüşten, (b) ön görünüşten alınmış radyografik görüntüleri

Resim 6.16’da sunulan radyografik görüntüler incelendiğinde, üretilen parçanın genelinde ayrışma, boşluk, gözenek ya da eksik ergimeye işaret eden belirgin bir iz gözlemlenmemiştir. Bu durum, söz konusu bölgelerde katmanlar arasında etkin bir metalürjik bağ oluştuğunu göstermektedir. Görsellerdeki gri ton yoğunluk dağılımlarının büyük ölçüde homojen olması, bu bölgelerde iç yapının sürekliliğini koruduğuna ve ciddi düzeyde içsel bir kusura rastlanmadığına işaret etmektedir. Elde edilen bu bulgular, geliştirilen takım yolu oluşturma algoritmalarının etkinliğini, parçanın iç yapı kalitesi açısından da doğrulamaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, WAAM yöntemine yönelik olarak tüm üretim aşamalarını tek bir platformda entegre şekilde yürütebilen, parametrik modelleme tabanlı bir takım yolu oluşturma algoritması geliştirilmiştir. Grasshopper ortamında yapılandırılan sistem; 3B CAD modelin dilimlenmesi, takım yolu stratejisinin planlanması, robotik üretimin programlanması, oluşturulan takım yollarının geliştirilen son işlemci betiğiyle ABB marka robot kollar için RAPID koduna dönüştürülmesi ve malzeme birikimi simülasyonun gerçekleştirilmesi gibi tüm süreçleri entegre biçimde yürütmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar ve elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Geliştirilen parametrik takım yolu planlama algoritması; tek dikişli ve kontur tabanlı çoklu dikişli yığma stratejilerini destekleyerek, dikiş genişliği, örtüşme oranı, ofset sayısı, torç yaklaşma/uzaklaşma mesafesi ve kaynak başlangıç noktalarının istenilen yön ve mesafede ötelenmesi gibi üretim parametrelerinin kullanıcı tarafından esnek biçimde kontrol edilebilmesine imkân tanımaktadır. Ayrıca, kullanıcı tercihlerine bağlı olarak takım yolu çözünürlüğü üç farklı yöntemle uyarlanabilmekte; TTS ve alan parametreleri de tanımlanabilmektedir.
- Dijital ortamda doğrulama amacıyla, tek dikişli ve kontur tabanlı çoklu dikiş yığma stratejilerini içeren iki farklı model tasarlanmış ve geliştirilen algoritmalar bu modeller üzerinde uygulanmıştır. Tek dikişli modelde süreçler sorunsuz tamamlanarak takım yolu algoritmasının geometriyle uyumlu çalıştığı görülmüştür. Kontur tabanlı modelde ise sabit dikiş genişliği ve örtüşme oranı nedeniyle bazı katmanların iç bölgelerinde hacimsel boşluklar oluştuğu belirlenmiştir.
- Model A'nın üretimi sonrası yapılan genel yüzey deformasyon analizlerinde, üretilen modelin yüzeyinin CAD modeline göre %94,83'ü, simülasyon çıktısına göre ise %97,654'ü ± 1 mm tolerans içinde kalmıştır. Bu sonuçlar, geliştirilen algoritmaların yüksek geometrik doğruluk sağladığını ve simülasyon modelinin fiziksel üretim geometrisini etkin biçimde temsil ettiğini göstermektedir.
- Sabit kesitli alt bölgeye ait deformasyon analizlerinde, maksimum pozitif sapma 1,389 mm, maksimum negatif sapma -1,222 mm ve ortalama deformasyon 0,044 mm olarak ölçülmü olup, ölçümlerin %99,435'i $\pm 1,0$ mm tolerans aralığında kalarak yüksek geometrik hassasiyet sağlanmıştır. Sabit kesit geometrisi ve sınırlı ısı girdisi, deformasyonların minimum seviyede kalmasına katkı sağlamıştır.

- Daralan ve bükülen yapıdaki orta bölgede, maksimum pozitif sapma 1,462 mm, maksimum negatif sapma -1,547 mm ve ortalama deformasyon -0,233 mm olarak ölçülmüştür. Ölçümlerin %94,197'si $\pm 1,0$ mm tolerans aralığında kalmış, negatif yönlü deformasyonların ise belirgin biçimde arttığı gözlenmiştir. Bu durum; daralan kesit yapısı, sabit katman kalınlığına bağlı basamak etkisi, eğimli yüzeylerde yerçekimi kaynaklı metal akışı, termal birikim ve sabit torç yönelimi gibi etkenlerle ilişkilidir.
- Genişleyen ve bükülen yapıdaki üst bölge, maksimum pozitif sapma 2,538 mm, maksimum negatif sapma -1,788 mm ve ortalama deformasyon 0,123 mm olarak belirlenmiştir. Ölçümlerin %93,486'sı $\pm 1,0$ mm tolerans içinde kalmış, deformasyonların genel olarak dışa yöneldiği ve yüzeyin referans modele göre genişleme eğiliminde olduğu görülmüştür. Deformasyon yönleri orta bölgeyle zıt olsa da, oluşum mekanizmalarının benzer olduğu anlaşılmaktadır.
- Kaynak başlangıç noktalarında tekrarlayan pozitif deformasyonların, robot kolun ivmelenme fazında TTS'in düşük kalması ve arktaki ani yüksek enerji çıkışı sonucu lokal malzeme birikiminin oluşmasından kaynaklandığı belirlenmiştir.
- Parçanın köşe bölgelerinde robotun dairesel geçiş yaptığı alanlarda görülen deformasyonun, alan parametresinden kaynaklandığı tespit edilmiştir.
- Parçanın tepe bölgesindeki dalgalı yüzey formu, torcun köşe noktalarında hızının düşmesiyle oluşan lokal malzeme birikiminin katmanlar boyunca kümülatif etkisinden kaynaklanmaktadır.
- Dijital radyografi incelemesi, üretimin boşluksuz ve hatasız gerçekleştiğini; kaynak dikişleri arasında yeterli metalürjik bağ ile iç yapısal sürekliliğin sağlandığını ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, önerilen çalışmalar aşağıda sıralanmıştır:

- Kontur tabanlı çoklu dikiş stratejisinin uygulandığı parçalarda gözlemlenen hacimsel boşlukların önlenmesi için, katman kalınlığı, dikiş genişliği ve örtüşme oranı gibi parametrelerin katman bazında adaptif biçimde tanımlanması,
- Üretim süreci boyunca katman yüksekliğinin gerçek zamanlı olarak izlenmesine bağlı olarak takım yolunun anlık olarak güncellenmesi,
- WAAM sürecinde oluşabilecek potansiyel kusurların erken tespiti amacıyla, görüntü işleme teknikleri kullanılarak anomali tespiti altyapısının geliştirilmesi.

KAYNAKLAR

1. Dekis, M., Tawfik, M., Egiza, M., ve Dewidar, M. (2025). Challenges and Developments in Wire Arc Additive Manufacturing of Steel: A Review. *Results in Engineering*, 26, 104657.
2. Klenam, D. E. P., McBagonluri, F., Asumadu, T. K., Osafo, S. A., Bodunrin, M. O., Agyepong, L., Osei, E. D., Mornah, D., ve Soboyejo, W. O. (2025). Additive manufacturing: Shaping the future of the manufacturing industry—overview of trends, challenges and opportunities. *Applications in Engineering Science*, 22, 100224.
3. Srivastava, M., Rathee, S., Tiwari, A., ve Dongre, M. (2023). Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour. *Materials Chemistry and Physics*, 294, 126988.
4. Li, Z., Ruan, H., Li, M., Yu, C., Jia, Q., Wang, J., ve Chen, L. (2025). Additive Manufacturing: Prospects and Diverse Applications. *Metals*, 15(2), 158.
5. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., ve Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies*. (2. Baskı). New York: Springer, 10.
6. Badoniya, P., Srivastava, M., Jain, P. K., ve Rathee, S. (2024). A state-of-the-art review on metal additive manufacturing: Milestones, trends, challenges and perspectives. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46(6), 339.
7. Patel, S., Liu, Y., Siddique, Z., ve Ghamarian, I. (2024). Metal additive manufacturing: Principles and applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 131, 1179-1201.
8. Rathee, S., ve Srivastava, M. (2024). *Wire Arc Additive Manufacturing: Fundamental Sciences and Advances*. (1. Baskı). Oxon: CRC Press, 26.
9. Zafar, M. Q., Sajjad, R., Anwar, M. T., Mustafa, M. S., Husnain, N., Aqeel, A. B., ve Khan, M. B. (2025). A review on metal additive manufacturing-types, applications and future trends. *Recent Progress in Materials*, 7(1), 1-24.
10. Ahn, D. G. (2021). Directed energy deposition (DED) process: State of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(2), 703-742.
11. Mu, H., He, F., Yuan, L., Commins, P., Wang, H., ve Pan, Z. (2023). Toward a smart wire arc additive manufacturing system: A review on current developments and a framework of digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 174-189.
12. Kayadelen, A., Ateş, H., ve Yilmaz, O. (2025). Wire Arc Additive Manufacturing (Metal Inert Gas-Cold Metal Transfer) of ER70S-6: Experimental and Computational Analysis on Process, Microstructure, and Mechanical Property Relationships. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34(10), 8917-8933.
13. Feucht, T., Lange, J., Erven, M., Costanzi, C. B., Knaack, U., ve Waldschmitt, B. (2020). Additive manufacturing by means of parametric robot programming. *Construction Robotics*, 4(1), 31-48.

14. Nguyen, Q. L. (2022). *Tool path planning for wire-arc additive manufacturing processes*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, BTU Cottbus-Senftenberg, Senftenberg.
15. Sampaio, R. F. V., Pragana, J. P. M., Bragança, I. M. F., Silva, C. M. A., Nielsen, C. V., ve Martins, P. A. F. (2023). Modelling of wire-arc additive manufacturing–A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 6, 100121.
16. Braumann, J., ve Brell-Cokcan, S. (2015, 16-18 Eylül). *Adaptive Robot Control*. 33rd International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Vienna, 243-250.
17. Tedeschi, A., ve Lombardi, D. (2014). *The algorithms-aided design (AAD)*. (1. Baskı). Brienza: Le Penseur, 20.
18. Moreno Nieto, D., ve Moreno Sánchez, D. (2021). Design for additive manufacturing: Tool review and a case study. *Applied Sciences*, 11(4), 1571.
19. Ellsel, C., Werner, S., Göpfert, J., ve Stark, R. (2021, 27-28 Eylül). *Evaluation of design support tools for additive manufacturing and conceptualisation of an integrated knowledge management framework*. 32nd Symposium Design for X, Bei München, 27.
20. Arslan, E. F., Yilmaz, O., Bol, N., ve Damgaci, B. (2025, 28-30 Nisan). *An integrated parametric approach to toolpath and process management in robotic wire arc additive manufacturing*. The Additive Manufacturing Conference 2025, Antalya, 100.
21. Li, Y., Su, C., ve Zhu, J. (2022). Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects. *Results in Engineering*, 13, 100330.
22. Singh, S. R., ve Khanna, P. (2021). Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials. *Materials Today: Proceedings*, 44, 118-128.
23. Alaboudi, S. F., Khan, M. A. A., Asad, M., ve Djavanroodi, F. (2023). The Innovation in wire arc additive manufacturing (WAAM): A review. *Materials Research Proceedings*, 31, 522-530.
24. Treutler, K., ve Wesling, V. (2021). The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): A review. *Applied Sciences*, 11(18), 8619.
25. İnternet: MetalWorm, Process Library. (t.y.) Web: <https://www.metalworm.com/process-library/> Son Erişim Tarihi: 07.08.2025.
26. İnternet: Ralph, B. (1925). Method of making decorative articles. *U.S. Patent and Trademark Office*. Web: <https://patents.google.com/patent/US1533300A/en> Son Erişim Tarihi: 07.08.2025.
27. İnternet: Shockey, H. K. (1932). Machine for reclaiming worn brake drums. *U.S. Patent and Trademark Office*. Web: <https://patents.google.com/patent/US1886503A/en> Son Erişim Tarihi: 07.08.2025.

28. İnternet: Ujiie, A. (1971). Method of and apparatus for constructing substantially circular cross section vessel by welding. *U.S. Patent and Trademark Office*. Web: <https://patents.google.com/patent/US3558846A/en> Son Erişim Tarihi: 07.08.2025.
29. İnternet: Ujiie, A. (1973). Process and apparatus for triple-electrode mig welding using short-circuit and spray-arc deposition. *U.S. Patent and Trademark Office*. Web: <https://patents.google.com/patent/US3746833A/en> Son Erişim Tarihi: 07.08.2025.
30. Kussmaul, K., Schoch, F. W., ve Luckow, H. (1983). High-quality large components shape welded by a SAW process. *Welding Journal*, 62(9), 17-24.
31. 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.
32. Ye, J., Kyvelou, P., Gilardi, F., Lu, H., Gilbert, M., ve Gardner, L. (2021). An end-to-end framework for the additive manufacture of optimized tubular structures. *IEEE Access*, 9, 165476-165489.
33. Liu, D., Lee, B., Babkin, A., ve Chang, Y. (2021). Research progress of arc additive manufacture technology. *Materials*, 14(6), 1415.
34. Yildiz, A. S., Koc, B., ve Yilmaz, O. (2021). Thermal behavior determination for wire arc additive manufacturing process. *Procedia Manufacturing*, 54, 233-237.
35. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., ve Li, H. (2015). A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 34, 8-19.
36. Singh, S., kumar Sharma, S., ve Rathod, D. W. (2021). A review on process planning strategies and challenges of WAAM. *Materials Today: Proceedings*, 47, 6564-6575.
37. Michel, F., Lockett, H., Ding, J., Martina, F., Marinelli, G., ve Williams, S. (2019). A modular path planning solution for Wire+ Arc Additive Manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 60, 1-11.
38. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., ve Larkin, N. (2016). Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation. *Journal of Cleaner Production*, 133, 942-952.
39. Schmitz, M., Wiartalla, J., Gelfgren, M., Mann, S., Corves, B., ve Hüsing, M. (2021). A robot-centered path-planning algorithm for multidirectional additive manufacturing for WAAM processes and pure object manipulation. *Applied Sciences*, 11(13), 5759.
40. Glasder, M. (2024). *Deep Learning-based deposition modelling and path planning in Wire Arc Additive Manufacturing*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, ETH Zurich, Zurich.
41. Müller, J., ve Hensel, J. (2023). WAAM of structural components—Building strategies for varying wall thicknesses. *Welding in the World*, 67(4), 833-844.

42. Zhang, Y., Chen, Y., Li, P., ve Male, A. T. (2003). Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study. *Journal of Materials Processing Technology*, 135(2-3), 347-357.
43. Viola, R. D. S., Balandraud, X., Poulhaon, F., Michaud, P., ve Duc, E. (2023). Complex interaction between CMT equipment and robot controllers during the WAAM process: Consequences for toolpath accuracy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(11-12), 5611-5631.
44. Shukla, P., Dash, B., Kiran, D. V., ve Bukkapatnam, S. (2020). Arc behavior in wire arc additive manufacturing process. *Procedia Manufacturing*, 48, 725-729.
45. Naseri, B., Bol, N., Yilmaz, O., Kara, O. E., ve Sen, A. A. (2021). Deposition path planning strategy for geometries with varying cross-sections in wire arc additive manufacturing. *Journal of Additive Manufacturing Technologies*, 1(3), 585-585.
46. Ding, D., Yuan, L., Huang, R., Jiang, Y., Wang, X., ve Pan, Z. (2023). Corner path optimization strategy for wire arc additive manufacturing of gap-free shapes. *Journal of Manufacturing Processes*, 85, 683-694.
47. Yaseer, A. (2021). *Process planning of robotic wire arc additive manufacturing (WAAM) using machine learning*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Texas State University, Texas.
48. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., ve Li, H. (2015). A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 31, 101-110.
49. Xiong, J., Zhang, G., Gao, H., ve 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.
50. Yildiz, A. S., Davut, K., Koc, B., ve Yilmaz, O. (2020). Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: Study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(11), 3391-3404.
51. Chan, B., Pacey, J., ve Bibby, M. (1999). Modelling gas metal arc weld geometry using artificial neural network technology. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 38(1), 43-51.
52. Nagesh, D. S., ve Datta, G. L. (2002). Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks. *Journal of Materials Processing Technology*, 123(2), 303-312.
53. Kim, I. S., Son, J. S., Park, C. E., Kim, I. J., ve Kim, H. H. (2005). An investigation into an intelligent system for predicting bead geometry in GMA welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 159(1), 113-118.
54. Suryakumar, S., Karunakaran, K. P., Bernard, A., Chandrasekhar, U., Raghavender, N., ve Sharma, D. (2011). Weld bead modeling and process optimization in hybrid layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, 43(4), 331-344.

55. Cao, Y., Zhu, S., Liang, X., ve 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.
56. Aiyiti, W., Zhao, W., Lu, B., ve Tang, Y. (2006). Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 12(3), 165-172.
57. Harman, M., Çetinkaya, C., Yılmaz, O., ve Bol, N. (2024). Comparative process parameter optimization for wire arc additive manufacturing (WAAM) of E120C-GH4 metal cored and ER120S-G solid wire. *Politeknik Dergisi*, 27(5), 2013-2028.
58. Gu, N., Yu, R., ve Behbahani, P. A. (2018). Parametric design: Theoretical development and algorithmic foundation for design generation in architecture. *Handbook of the Mathematics of the Arts and Sciences*, 1-22.
59. Kalkan, E., Okur, F. Y., ve Altunışık, A. C. (2018). Applications and usability of parametric modeling. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, 1(3), 139-146.
60. İnternet: Adobe, What is Parametric Modeling?. (t.y.). Web: <https://www.adobe.com/products/substance3d/discover/parametric-modeling.html> Son Erişim Tarihi: 07.05.2025.
61. Biedermann, M., ve Meboldt, M. (2020). Computational design synthesis of additive manufactured multi-flow nozzles, *Additive Manufacturing*. 35, 101231.
62. Camba, J. D., Contero, M., ve Company, P. (2016). Parametric CAD modeling: An analysis of strategies for design reusability. *Computer-Aided Design*, 74, 18-31.
63. Kyratsis, P., Tzotzis, A., ve Davim, J. P. (2025). A Review on CAD-Based Programming for Design and Manufacturing. *CAD-based Programming for Design and Manufacturing*, 1-26.
64. Eltaweel, A., ve Yuehong, S. U. (2017). Parametric design and daylighting: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1086-1103.
65. Heimig, T., Kerber, E., Stumm, S., Mann, S., Reisgen, U., ve Brell-Cokcan, S. (2020). Towards robotic steel construction through adaptive incremental point welding. *Construction Robotics*, 4, 49-60.
66. Waldschmitt, B., ve Lange, J. (2023). Robot supported Wire Arc Additive Manufacturing of Steel Columns. *Ce/Papers*, 6(3-4), 696-701.
67. Kerber, E., Fahrendholz, J. L., Brell-Cokcan, S., Dewald, P., Sharma, R., ve Reisgen, U. (2023). Dynamic WAAM: Adaptive processes for equivalent contact surface (ECS) optimization. *Construction Robotics*, 7(3), 309-328.
68. Kerber, E., Knitt, H., Fahrendholz-Heiermann, J. L., Ergin, E., Brell-Cokcan, S., Dewald, P., Sharma, R., ve Reisgen, U. (2024). Variable Layer Heights in Wire Arc Additive Manufacturing and WAAM Information Models. *Machines*, 12(7), 432.

69. Laghi, V., Palermo, M., Gasparini, G., ve Trombetti, T. (2020). Computational design and manufacturing of a half-scaled 3D-printed stainless steel diagrid column. *Additive Manufacturing*, 36, 101505.
70. Mbodj, N. G., Abuabiah, M., Kandaoui, M. E., Yaacoubi, S., ve Plapper, P. (2023). Parametric modeling approach in laser wire additive manufacturing process. *Welding in the World*, 67(4), 885-895.
71. Prakash, V. J. (2025). *Automated Process Planning for Additive Manufacturing with Directed Energy Deposition*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Technischen Universität Hamburg, Hamburg.
72. Sarma, R., Kapil, S., ve Joshi, S. N. (2022). Development of a framework for computer aided design and manufacturing of 3 axis hybrid wire arc additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 62, 7625-7634.
73. Lee, K. S., ve Song, H. K. (2021). Automation of 3D average human body shape modeling using Rhino and Grasshopper Algorithm. *Fashion and Textiles*, 8(1), 23.
74. Kwon, Y. M., Lee, Y. A., ve Kim, S. J. (2017). Case study on 3D printing education in fashion design coursework. *Fashion and Textiles*, 4(1), 26.
75. Nguyen, L., Buhl, J., Israr, R., ve Bambach, M. (2021). Analysis and compensation of shrinkage and distortion in wire-arc additive manufacturing of thin-walled curved hollow sections. *Additive Manufacturing*, 47, 102365.
76. Jafari, D., Vaneker, T. H., ve Gibson, I. (2021). Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Materials & Design*, 202, 109471.
77. Ščetinec, A., Klobčar, D., ve Bračun, D. (2021). In-process path replanning and online layer height control through deposition arc current for gas metal arc based additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 1169-1179.
78. Kerber, E., Fahrentholz, J. L., Brell-Cokcan, S., Dewald, P., Sharma, R., and Reisgen, U. (2023). Dynamic WAAM: Adaptive processes for equivalent contact surface (ECS) optimization. *Construction Robotics*, 7(3), 309-328.
79. Nguyen, L., Buhl, J., Israr, R., ve Bambach, M. (2021). Analysis and compensation of shrinkage and distortion in wire-arc additive manufacturing of thin-walled curved hollow sections. *Additive Manufacturing*, 47, 102365.
80. Dogan, E., Yilmaz, O., ve Mollamahmutoglu, M. (2024). Thermal behavior in wire arc additive manufacturing: A comparative study of the conventional process and infrared heater use. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34, 19715-19738.
81. Evjemo, L. D., Langelandsvik, G., ve Gravdahl, J. T. (2019). Wire arc additive manufacturing by robot manipulator: Towards creating complex geometries. *IFAC-PapersOnLine*, 52(11), 103-109.

82. İnternet: ABB Robotics Technical reference manual. (t.y.). Web: https://library.e.abb.com/public/688894b98123f87bc1257cc50044e809/Technical%20reference%20manual_RAPID_3HAC16581-1_revJ_en.pdf Son Erişim Tarihi: 20.06.2025.







Gazili olmak ayrıcalıktır