



**SERBEST FORMLU PARÇA YÜZEYLERİ İÇİN TEL ARK EKLEMELİ
İMALATA UYGUN TAKIM YOLU GELİŞTİRİLMESİ**

Bayram KALENDER

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2024

ETİK BEYAN

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

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

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

Bayram KALENDER

18/10/2024

SERBEST FORMLU PARÇA YÜZEYLERİ İÇİN TEL ARK EKLEMELİ İMALATA UYGUN TAKIM YOLU GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Bayram KALENDER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2024

ÖZET

Tel ark eklemeli imalat (WAAM), kaynak teknolojisinin temelleri üzerine inşa edilen ve kaynakla ilgili yapılan çalışmalardan faydalanılarak geliştirilen bir eklemeli imalat (Eİ) yöntemidir. Tel besleme sistemine sahip olması, atık malzeme oluşturmadan evre dostu ve maliyet etkin imalat yapılabilmesini sağlamaktadır. Geleneksel yöntemlere kıyasla, büyük boyutlu parçaların imalatında zaman ve maliyet avantajları sunan bu yöntem, geliştirmeye açık birçok alana sahiptir. Bu çalışmada, serbest yüzeyli bir parça farklı takım yolu stratejileri ile WAAM sisteminde imal edilip geometrik doğruluk analizi yapılarak, serbest yüzeyli parçaların imalatında hangi takım yolu stratejisinin hangi yüzey yapısı için uygun olduğunun tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Yan yana kaynak dikişi uygulandığında ortaya çıkan girintili ve çıkıntılı görünümün iyileştirilerek düzgün bir yüzeyin elde edilmesi amacıyla ilk olarak ideal bindirme oranı belirlenmiş ve bu oran yüzey pürüzlülüğünü azaltacak şekilde takım yolunun iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Üç farklı takım yolu deseni geliştirilmiş ve parça bu desenlere göre imal edilmiştir. Bu parçalar optik tarayıcı ile taranıp, elde edilen modeller bilgisayar destekli tasarım (CAD) modeli ile örtüştürölerek, ortalama geometrik sapma oranları hesaplanmıştır. Modeller üzerinde aynı bölgelerden alınan üç kesit alanın üzerinden alınan beş noktanın geometrik sapma miktarları karşılaştırıldığında, lineer takım yolu stratejisi ile üretilen parçada 2,657 mm ortalama ile en düşük sapma elde edilmiştir. Bu değeri, 3,396 mm ile offset takım yolu stratejisi, 5,039 mm ile hexagon takım yolu stratejisi takip etmektedir.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, tel ark eklemeli imalat, WAAM, takım yolu geliştirme
Sayfa Adedi : 93
Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING TOOL PATH GENERATION FOR FREE-FORM SURFACED PARTS

(M. Sc. Thesis)

Bayram KALENDER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2024

ABSTRACT

Wire-arc additive manufacturing (WAAM) is an additive manufacturing (AM) method built upon the foundations of welding technology and developed using insights from welding studies. Its wire feed system facilitates environmentally friendly and cost-effective manufacturing without producing waste material. Compared to traditional methods, this technique offers time and cost advantages in the production of large-sized parts, with numerous areas open to further development. In this study, a freeform surface part is manufactured using different toolpath strategies in a WAAM system, with a geometric accuracy analysis conducted to determine which toolpath strategy is suitable for which surface structure in the production of freeform parts. To improve the undulating appearance caused by adjacent weld beads and achieve a smooth surface, the ideal overlap ratio was initially determined and used to optimize the toolpath to reduce surface roughness. Three different toolpath patterns were developed, and the part was manufactured according to these patterns. The parts were scanned using an optical scanner, and the obtained models were aligned with the computer-aided design (CAD) model to calculate the average geometric deviation ratios. The geometric deviation amounts of five points taken from three cross-sectional areas taken from the same regions on the models were compared and the lowest deviation was obtained with an average of 2.657 mm in the part produced with the linear tool path strategy. This value is followed by the offset tool path strategy with 3.396 mm and the hexagon tool path strategy with 5.039 mm.

Science Code : 91438

Key Words : Additive manufacturing, wire arc additive manufacturing, WAAM, toolpath development

Page Number : 93

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum çalışma boyunca; sabırla bana yol gösterip tüm sorularıma öğretici cevaplar verdiği, eklemeli imalata olan merakımı eklemeli imalat sevgisine dönüştürmemi sağladığı ve zor dönemlerde yola devam etmeme destek olduğu için danışmanım Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ' a en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Haftalık toplantılarda, WAAM başta olmak üzere El çeşitleri üzerine yaptıkları çalışmaları büyük bir hevesle paylaştıkları ve sorularıma büyük bir içtenlik ve yardımseverlik ile cevapladıkları için, AMTRG ekibinin birlikte çalışma fırsatı bulduğum öğrencilerine teşekkür ederim. MetalWorm Eklemeli İmalat Teknolojileri A.Ş.'ye de alt yapı kullanımı için teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca beni cesaretlendiren ve destek olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Son olarak, bu tezin hazırlanma sürecinde, manevi desteğini bir an bile üzerimden eksik etmeyen eşim Bihter'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. YÜZEY DÜZLEMSELLİĞİNİN OPTİMİZASYONU	55
4. TAKIM YOLU GELİŞTİRİLMESİ	61
5. WAAM UYGULAMALARI	69
5.1. WAAM Altyapısı ve İmalat Parametreleri	69
5.2. Kaynak Dikişi İncelemesi	70
5.3. Lineer Takım Yolu Stratejisi ile İmalat	71
5.4. Offset Takım Yolu Stratejisi ile İmalat.....	72
5.5. Hexagrid Takım Yolu Stratejisi ile İmalat	74
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	77
7. SONUÇLAR.....	83
KAYNAKLAR	85
EKLER.....	89
ÖZGEÇMİŞ	93

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Giriş parametreleri	5
Çizelge 2.2. Kaynak işlemi giriş parametreleri ve çıktılar	6
Çizelge 5.1. WAAM ile üretim parametreleri	69
Çizelge 5.2. WAAM ile üretimde kullanılan malzemeler	70
Çizelge 5.3. Lineer takım yolu stratejisi ile imalatın ortalama parametre verileri	71
Çizelge 5.4. Offset takım yolu stratejisi ile imalatın ortalama parametre verileri	73
Çizelge 5.5. Hexagrid takım yolu stratejisi ile imalatın ortalama parametre verileri	74
Çizelge 6.1. Takım yolu stratejilerinin, kesit bazlı geometrik sapma ortalamaları	81

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kaynak dikiş geometrisi	5
Şekil 2.2. Çokgen ayrıştırmanın adım adım süreçleri	7
Şekil 2.3. Dışbükey bir çokgen için takım yolu oluşturma örneği	7
Şekil 2.4. Nihai takım yolu bağlantısı	8
Şekil 2.5. Karmaşık geometriye sahip serbest formlu tüp modeli.....	8
Şekil 2.6. Bıçak modeli geometrisi.....	9
Şekil 2.7. Bıçak modeline uygulanan spiral takım yolu	10
Şekil 2.8. Bıçak modeline uygulanan zikzak takım yolu	10
Şekil 2.9. (a) Geometri-1, (b) geometri-2, (c) geometri-3 için algoritmanın etkinliğinin doğrulanmasında yer alan araç yolları	13
Şekil 2.10. (a) 5 SD Eİ yaklaşımının sonuçları, (b) 3 SD İE yaklaşımının sonuçları, (c) 5 SD yaklaşımının mikroskobik sonuçları, (d) 3 SD yaklaşımının mikroskobik sonuçları, (e) sonuçların ölçekle karşılaştırılması.....	15
Şekil 2.11. Kılavuz eğrileriyle takım yolu oluşturma (a) 15° koni, (b) Değişken eğimli duvar.....	16
Şekil 2.12. Kesişim geçişi örnekleri	16
Şekil 2.13. İki duvarın döner kavşak tipi kesiştiği kesişim geçişi (a) imalat takım yolu, (b) imal edilmiş kesişim	17
Şekil 2.14. Bir desen düzeneğinde Schwarz-P deseni (yeşil renkli)	17
Şekil 2.15. Yapı yön vektörleri (desenin yarısı için her üç kaymanda bir gösterilir).....	18
Şekil 2.16. Takım yolu planlama ve yapı yön vektörleri	19
Şekil 2.17. Takım yolu ve yapı yön vektörleri (a) küre, (b) laval bozul (c) giriş hunisi	20
Şekil 2.18. T-geçiş özelliğinin adlandırılması.....	21
Şekil 2.19. Strateji-1, strateji-2, strateji-3 ve strateji-4.....	22

Şekil	Sayfa
Şekil 2.20. Başlangıç (yeşil)/durdurma (kırmızı) özellikleri ve imal edilen numunelerde araştırılan biriktirme desenleri (a) menderes deseni; (b) spiral desen; (c) S deseni. Kırmızı çizgiler mikroyapısal analizin bölümlerini işaret eder; mavi çizgiler sertlik eşlemelerinin kesitlerini işaret eder	24
Şekil 2.21. T2 ölçüm konumunda tam biriktirme dizisi sırasında sıcaklık profillerinin karşılaştırılması	24
Şekil 2.22. Bağımsız bir katmanda hibrit strateji (a) zikzak desende yapılan ayrıştırma hatası nedeniyle iki strateji arasındaki ayrım (b) sabit bindirmeyi sağlayan optimize edilmiş takım yolu	25
Şekil 2.23. Bindirme tanım şeması.....	28
Şekil 2.24. Gauss filtreli kesit profili.....	29
Şekil 2.25. Gauss fonksiyonu ile eğri oturtma	29
Şekil 2.26. Lojistik fonksiyonu ile eğri oturtma.....	30
Şekil 2.27. Parabol fonksiyonu ile eğri oturtma	30
Şekil 2.28. Sinüs fonksiyonu ile eğri oturtma	30
Şekil 2.29. Bindirme katsayılarının sonuçları (a) $\eta=0$, (b) $0<\eta<\lambda$, (c) $\eta=\lambda$, (d) $\lambda<\eta<1$	31
Şekil 2.30. Teğet örtüşen modelin şematik diyagramları	32
Şekil 2.31. Bindirme alanı, kritik vadinin alanı ve merkez mesafesi d'nin bir fonksiyonu olarak f(d).....	32
Şekil 2.32. Yer çekimi ve kaynak yönü arasındaki ilişkinin şematik diyagramı	33
Şekil 2.33. Zikzak kaynak dikişi modeli	33
Şekil 2.34. Kaynak dikişinin şekillendirme özellikleri ve morfolojisi	34
Şekil 2.35. (a) “Fil Hortumu” adlı açık parça, (b) “Fil Ayağı” adlı kapalı parça, (c) Simetrik olmayan çok dallı parça.....	35
Şekil 2.36. (a) Pervanenin tamamının dilimleri; (b) Çarkın tamamının takım yolu; (c) 2. dilimde elde edilen kontur; (d) 5. dilimde elde edilen kontur; (e) Son İşlem Freze takım yolu; (f) Frezelenmiş parçanın nihai CAD modeli	36
Şekil 2.37. (a) Alt tabakanın destek geometrisi; (b) dikmeler için yerleştirme sırasının şeması	38
Şekil 2.38. (a) Kafes yapısı için sonlu eleman modeli ve (b) WAAM ile üretilmiş basit bir model	38

Şekil	Sayfa
Şekil 2.39. Özellik tanıma prosedürünün sonucu: her farklı özellik, farklı bir renk kullanılarak vurgulanır	39
Şekil 2.40. Önerilen bilgisayar destekli üretim yazılımında uygulanan doğrudan geçiş için takım yolunu hesaplama prosedürü.....	39
Şekil 2.41. Düz bir duvar için serbest uç duvarlar için takım yolu uzantılarının önemi (a) uzantısız takım yolu, (b) uzantıları olan takım yolu, (c) beklenen sonuç ve etkin sonuç uzantılar durumu, (d) uzantılı bir takım yolu durumunda beklenen sonuç ve etkili sonuç.....	39
Şekil 2.42. Borular için biriktirme stratejileri	40
Şekil 2.43. MAT'tan oluşturulan yolun çizimi. (a) yukarı: orijinal geometri (yeşil bölge) ve geometrinin MAT'si (siyah çizgi) ve aşağı: ortada boşluklar bulunan kontur yolu desenleri açıkça görülüyor; (b) yukarı: kırmızı bölge aşırı malzeme birikmesidir ve aşağı: boşluksuz MAT yolu desenleri	41
Şekil 2.44. İki delikli şeklin örneği. (a) noktalı çizgilerle temsil edilen hesaplanan MAT; (b) kırmızı çizgilerle tanımlandığı üzere birden fazla dal; ve (c) saat yönünün tersine yönde bir dallanma döngüsü ve saat yönünde içeride diğer iki dallanma döngüsü oluşturdu	41
Şekil 2.45. İnce duvarlı kavisli yapı. (a) geometri siyah çizgilerle temsil edilir, MAT noktalı kırmızı çizgilerle temsil edilir ve kırmızı düz çizgiler dalları temsil eder. (b) oluşturulan kırılmış yol	41
Şekil 2.46. Algoritmanın genel iş akışı	43
Şekil 2.47. Çakışma matrisi C'nin yapısı	43
Şekil 2.48. Katman biriktirme sırası, alttan üste doğru yeniden düzenlendi.....	44
Şekil 2.49. (a) Rz etrafındaki meşale dönüşü ve (b) ayarlanmış meşale açısıyla simülasyon sonuçları.....	44
Şekil 2.50. İlk vaka simülasyon sonucunun deneyle karşılaştırılması	45
Şekil 2.51. İkinci vaka simülasyon sonucunun deneyle karşılaştırılması	45
Şekil 2.52. Üçüncü vaka simülasyon sonucunun deneyle karşılaştırılması	45
Şekil 2.53. Üretilen ince duvarların mikro sertlik profilleri.....	46
Şekil 2.54. Tüm sürecin akış şeması	48
Şekil 2.55. Çıkıntılı yapının düzlemsel tabana eşlenmesinin şeması: (a) döndürülmüş parça; (b) silindirik koordinat; (c) dilimin çıkıntılı yapı ile kesişim konturu; (d) Kartezyen koordinatta eşlenen çıkıntılı yapı.....	48

Şekil	Sayfa
Şekil 2.56. Dilimlerin taban yüzeyi (a) çekirdek hacmi için ve (b) çıkıntılı yapılar için.....	49
Şekil 2.57. (a) Pervanenin CAD modeli ve (b) lazer tabanlı doğrudan metal biriktirme sisteminde basılmış pervane.....	49
Şekil 2.58. Tek iç deliğe ve değişken duvar kalınlığına sahip ince duvarlı bir yapı	50
Şekil 2.59. Deliksiz yekpare bir yapı.....	50
Şekil 2.60. (a) Biriktirilecek CAD modeli; (b) MATLAB tarafından oluşturulan takım yolu; (c) 212 mm yükseklik, 60 mm çap ve 129 katmandan oluşan son biriktirilmiş bileşen	52
Şekil 3.1. Bindirme grafiği; w: kaynak dikişi genişliği, h: kaynak dikişi yüksekliği, d: kaynak dikişi tepeleri arası mesafe, o: bindirme mesafesi	55
Şekil 3.2. İdeal bindirme oranı grafiği.....	56
Şekil 3.3. Sinüs fonksiyonu grafiği; a = 1.4, b = 6.26, c = 8.56	57
Şekil 3.4. Alanların dikme ile bölünmesi grafiği.....	57
Şekil 3.5. Bindirme katsayısı.....	58
Şekil 3.6. Bindirme oranı değişimi ile değişen kaynak dikişi adedi	59
Şekil 4.1. Konveks, konkav ve düz yüzeylerin bir araya getirilmesi ile tasarlanan serbest yüzeyli parça, kenar ölçüleri ve kesit görüntüleri	62
Şekil 4.2. Yüzey eğrilik analizi (a) isometrik (b) üstten görünüş.....	63
Şekil 4.3. Yüzey eğrilik çizgileri: dikme uzunluğu ile eğrilik yarıçapı test orantılı ilişkilidir	64
Şekil 4.4. Lineer takım yolu stratejisi.....	65
Şekil 4.5. Lineer takım yolu stratejisi (a) birinci katman, (b) ikinci katman, (c) üçüncü katman, (ç) dördüncü katman, (d) beşinci katman, (e) altıncı katman	65
Şekil 4.6. Offset takım yolu stratejisi	66
Şekil 4.7. Offset takım yolu stratejisi (a) birinci katman, (b) ikinci katman, (c) üçüncü katman, (ç) dördüncü katman, (d) beşinci katman, (e) altıncı katman	66
Şekil 4.8. Hexagrid takım yolu stratejisi	67
Şekil 4.9. Hexagrid takım yolu stratejisi (a) birinci katman, (b) ikinci katman, (c) üçüncü katman, (ç) dördüncü katman, (d) beşinci katman, (e) altıncı katman	67

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. İnce duvarlı yapılarda çapraz geçiş (a) doğrudan geçişin neden olduğu tepe noktası (b) zıt açılarının yol deseni	6
Resim 2.2. (a) İmal edilmiş serbest biçimli parça (b) bağlantı noktası.....	9
Resim 2.3. Singapur Teknoloji ve Tasarım Üniversitesi'nde bulunan H-WAAM sistemi	11
Resim 2.4. WAAM ile üretilen pervane.....	11
Resim 2.5. H-WAAM ile üretilen pervane	12
Resim 2.6. (a) Talaşlı işlemde önce basılmış yüzey, (b) talaşlı işlemde sonra basılmış yüzey.....	12
Resim 2.7. En iyi başlangıç takım yolu ve optimize edilmiş takım yolu ile üretilen parçaların şekillendirme kalitesi	14
Resim 2.8. Üretilen parça.....	18
Resim 2.9. Deneysel sonuçlar (a) küre, (b) laval bozul (c) giriş hunisi	21
Resim 2.10. Strateji-3 ile imal edilmiş T-geçiş, merkezi bölgede biriktirme başarısızlığı var	23
Resim 2.11. Strateji-3_I2 kullanılarak oluşturulmuş bir T-geçiş	23
Resim 2.12. Test A: Hibrit takım yolu ve geleneksel strateji aracılığı ile doğru yapı ...	26
Resim 2.13. Test B: Geleneksel strateji ile çıkıntı özelliklerine düşen malzeme	26
Resim 2.14. Test C: Çok eksenli strateji ile çıkıntı özelliklerine sahip bir parçanın doğru üretimi.....	26
Resim 2.15. Test D: Çok eksenli stratejiye uygulanan uyarlanabilir dilimleme yoluyla çıkıntı duvarlı içi boş kısım.....	27
Resim 2.16. Parametre seti 25–2 için farklı kaynak dikişi bindirmeleri/boncuk mesafeleri için makro kesitler	28
Resim 2.17. Parametre seti 45–3 için farklı kaynak dikişi bindirmeleri/boncuk mesafeleri için makro kesitler	28
Resim 2.18. Parametre seti 45–4 için farklı kaynak dikişi bindirmeleri/boncuk mesafeleri için makro kesitler	28
Resim 2.19. Parametre seti 45–6 için farklı kaynak dikişi bindirmeleri/boncuk mesafeleri için makro kesitler	28

Resim	Sayfa
Resim 2.20. $\eta=\lambda$ olduğunda bitişik dikişlerin bindirme sonucu	31
Resim 2.21. İmal edilmiş parçalar; (a) açık, (b) kapalı, (c) simetrik olmayan çok dallı parça	35
Resim 2.22. (a) Basılmış 2. katman; (b) Yüzey frezelemekten sonraki ara katman; (c) Bıçakların basılması; (d) 3 eksenli GMAW tabanlı hibrit TAEİ kurulumu kullanılarak pervanenin nete yakın nihai şekli	37
Resim 2.23. Sunulan üç biriktirme stratejisiyle üretilen üç farklı borunun üst yüzeyleri	40
Resim 2.24. Önerilen MAT yol desenleri ve geleneksel kontur yol desenleri tarafından üretilen katmanların deneysel olarak karşılaştırılması. (a) önerilen MAT yolu desenleri tarafından üretilen katmanlar, (b) geleneksel kontur yolu desenleri tarafından üretilen katmanlar, (c) önerilen yol desenleri tarafından üretilen katmanların bitmiş yüzeyi ve (d) MAT yolu desenleri tarafından üretilen katmanların bitmiş yüzeyi geleneksel kontur yolu desenleri	42
Resim 2.25. İnce duvarlı yapıların eklemeli imalatı	47
Resim 2.26. (a) 15 katmandan sonra net şekle yakın bir şekilde biriktirilmiş (b) yüzey frezelemekten sonra boşluksuz tamamlanmış parça	51
Resim 2.27. a) 15 katmandan sonra net şekle yakın bir şekilde biriktirilmiş, b) yüzey frezelemekten sonra boşluksuz tamamlanmış parça	51
Resim 2.28. Üretiminin farklı aşamalarındaki ters Y şekilli ince duvarlı silindirik bileşen	52
Resim 2.29. 5-eksenli eğimli biriktirme kullanılarak üretilen karmaşık ince duvarlı bileşenler	53
Resim 5.1. MetalWorm Eklemeli İmalat Teknolojileri A.Ş. altyapısı	70
Resim 5.2. WAAM düzeneği ile imalat ekipmanları ve kaynak dikişi	71
Resim 5.3. Lineer takım yolu stratejisi ile imal edilen parçanın tüm katmanlarının yandan ve üstten görünüşleri	72
Resim 5.4. Offset takım yolu stratejisi ile imal edilen parçanın tüm katmanlarının yandan ve üstten görünüşleri	73
Resim 5.5. Hexagrid takım yolu stratejisi ile imal edilen parçanın tüm katmanlarının yandan ve üstten görünüşleri	74
Resim 6.1. Lineer takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parçanın renk haritası analizi ve kesit alanları konumları	78

Resim	Sayfa
Resim 6.2. Lineer takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parça üzerinde konumlandırılan kesit alanlar üzerinden alınan net geometrik sapma verileri	78
Resim 6.3. Offset takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parçanın renk haritası analizi ve kesit alanları konumları	79
Resim 6.4. Offset takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parça üzerinde konumlandırılan kesit alanlar üzerinden alınan net geometrik sapma verileri	79
Resim 6.5. Hexagon takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parçanın renk haritası analizi ve kesit alanları konumları	80
Resim 6.6. Hexagon takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parça üzerinde konumlandırılan kesit alanlar üzerinden alınan net geometrik sapma verileri	80

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
a	Genlik
b	Periyot
c	Genişliğin iki katı
d	İki kaynak dikişi tepesi arası mesafe
h	Genlik
o	Bindirme mesafesi
o(%)	Bindirme oranı yüzdesi
S₁	Bindirme üst alanı
S₂	Bindirme alt alanı
S_a	Bindirme üst alanı yarısı
S_b	Bindirme üst alanı yarısı
S_c	Bindirme alt alanı yarısı
S_d	Bindirme alt alanı yarısı
w	Kaynak dikişi genişliği
x₀	Bindirme kesişim noktası
η	Bindirme katsayısı

Kısaltmalar	Açıklamalar
2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
Eİ	Eklemeli İmalat
GMAK	Gaz Metal Ark Kaynağı
GTAK	Gaz Tungsten Ark Kaynağı

Kısaltmalar**Açıklamalar****H-WAAM**

Hibrit WAAM

LMD

Laser Metal Deposition

MAG

Metal Aktif Gaz

MPC

Model-Predictive Control

PAK

Plazma Ark Kaynağı

PID

Proportional Integral Derivative

PLA

Polilaktik Asit

SD

Serbestlik Dereceli

STL

Standart Üçgen Dil

WAAM

Tel Ark Eklemeli İmalat

WYSIWYB

What You See Is What You Build

YEY

Yönlendirilmiş Enerji Yığma

1. GİRİŞ

Eİ; sanal ortamda üretilmiş katı modellerin eklemeli imalata yönelik geliştirilmiş olan teknolojiler sayesinde, hızlı bir süreç ile fiziksel model olarak elde edildiği imalat yöntemlerini ifade etmektedir. Bu yöntemde model, belirli bir kalınlıktaki iki boyutlu (2B) kesitlerden oluşan parçalara ayrılmaktadır. Eİ yöntemi, geometriler karmaşıktıkça daha da değerli olan bir “What You See Is What You Build” (WYSIWYB) süreci olarak tanımlanabilmektedir [1].

Yönlendirilmiş enerji yığma (YEE), sıradaki 2B kesiti oluşturmak için, hedef alanda biriktirilen malzemenin eritilmesi ile imalata yönelik yöntemleri kapsayan bir tanımdır. Bu yöntemde tel veya toz formunda malzemeler kullanılmaktadır. Malzeme ilgili alana biriktirilirken, onu eritmek için ihtiyaç duyulan enerji de aynı alana verilir. YEE sağladığı avantajlar nedeniyle, mevcut bir parçanın onarımı ve mevcut bir parçaya ek yapma konularında da kullanılmaktadır. Aynı zamanda, net şekle yakın parçalar üretmek için kullanılan geleneksel yöntemlerden döküm metoduna kıyasla daha maliyet etkin olması nedeniyle, büyük boyutlu ve serbest biçimli parçaların üretiminde tercih edilmektedir [1].

Tel besleme kullanılan yöntemlerde, birikintinin hacmi her zaman beslenen telin hacmidir ve eriyik havuzundan bir miktar sıçramayı hariç tutarsak %100 ham madde yakalama verimliliği vardır [1]. Tel besleme YEE yöntemi, blok şeklinde parçalar ve yüzey kaplaması ihtiyaçlarını karşılamak için en etkili yöntemlerden grubuna dahil edilmektedir.

Çeşitli araştırma grupları, YEE için bir ısı kaynağı olarak kaynak ve/veya plazma bazlı teknolojilerin kullanımını araştırmıştır [1]. Yapılan çalışmalar, ark enerjisinin kullanımının, lazer ve elektron ışını enerjisine kıyasla daha maliyet etkin bir yöntem olduğunu göstermiştir. Böylece, enerji kaynağı olarak elektrik arkını kullanan ve besleme malzemesi olarak kaynak teli kullanan bir yöntem olan WAAM yöntemi ortaya çıkmıştır. WAAM sistemi, endüstride hali hazırda mevcut olan kaynak ekipmanlarından oluşmaktadır.

WAAM yönteminin avantajlarına rağmen; gözeneklilik, artık gerilim, katman ayrılması, oksitlenme, çatlama, zayıf yüzey kalitesi ve deformasyon sorunları dahil olmak üzere, diğer YEE teknikleriyle benzer kusur ve özelliklere sahiptir [1]. Yüzey pürüzlülüğü uygunsuzluğu beraberinde geometrik doğruluk sağlanamamasına da sebep olacağı için, bu iki konu birlikte

ele alınmalıdır. Yan yana üretilen iki kaynak dikişi arasındaki boş alan nedeniyle, yüzey tırtıklı bir görünüme sahip olmaktadır. Bununla birlikte, ilk kaynak dikişi imal edildikten sonra ikinci kaynak dikişi imal edilirken, oluşan eriyik havuzunun etkisiyle birinci kaynak dikişinde de bir miktar erime görülebilmektedir. Bu sırada ikinci kaynak dikişi hali hazırda eriyik olduğu için bu kesit görüntüsünde bir miktar daha yayılma olabilmektedir. Bu nedenle yüzey tırtıklı bir görünümünden öte pürüzlü bir yüzeye sahip olmaktadır. Aynı zamanda kaynak dikişlerinin yüksekliklerinde de değişim yaşandığı için imal edilen parçanın hedeflenen geometrik ölçülerinde sapma meydana gelmektedir.

Yapılan bu çalışmanın ilk aşamasında, WAAM metodu ile üretilen parçaların katman yüksekliklerinin ve kaynak dikişi mesafelerinin optimizasyonu hedeflenmiştir. Bu hedefe ulaşmak için kaynak dikişlerinin hangi oranlarda üst üste bindirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. İkinci aşamasında ise, tasarlanmış olan serbest yüzeyli bir parçanın geometrik doğruluğunu artırmak için takım yolu geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedefe ulaşmak için tasarlanan parçanın imalatı için üç farklı takım yolu stratejisi geliştirilerek fiziksel ortamda imalatı gerçekleştirilmiştir.

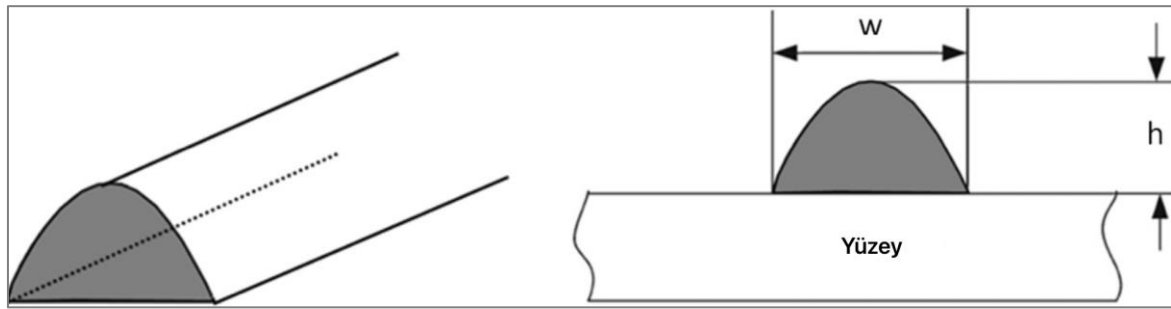
WAAM metodu, bir başka net şekle yakın imalat metodu olan döküm metodunun, özellikle hızlı prototipleme amacıyla, alternatifi olabilecek yeteneklere sahiptir. Modellenmiş bir parçanın prototip üretimi yapılacağı zaman döküm metodu kullanılır ise; parçanın bozulabilir kalıbının üretilmesi ve bunun için direkt parçanın modelinin üretilmesi, döküm yapılacak malzemenin eritilmesi, kalıpta bulunan dökme boşluğundan eriyik malzemenin dökülmesi, katılaştırma ve soğutma işlemlerinin ardından son olarak kalıbın dağıtılması ile parça elde edilebilmektedir. Üretilen parça tasarımında bir değişiklik yapılması durumunda bu süreçler tekrarlanır ve aynı maliyetin tekrar karşılanması gerekmektedir. Bu uygulamada döküm yerine WAAM metodu tercih edilir ise, ilk üretimde olduğu gibi tasarım değişikliği sonrası direkt olarak parça üretilmektedir. Eğer tasarım değişikliği mevcut modelin üzerine eklenti şeklinde gerçekleştirildi ise, baz modelin imalat maliyetinin karşılanmasına gerek kalmadan sadece mevcut parçaya yeni eklentinin basılması süreci işletilmektedir. WAAM gelecekte, daha yüksek geometrik doğruluk elde edilebildiği durumda, sanayii de döküme alternatif olarak daha yaygın olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, yönlendirilmiş enerji yığma (YFY) teknolojisinin bir yöntemi olan WAAM sürecinde parçaların, yüzey kalitesinin artırılarak geometrik doğruluklarını geliştirmektir. Bu doğrultuda aşağıdaki hedefler belirlenmiştir:

- WAAM ile üretilen parçaların kaynak dikişi yükseklikleri ve genişliklerinin kullanılabilmesi için kaynak dikişi matematik modeli geliştirilmesi,
- Geometrik doğruluğu artırmak için ideal bindirme oranının belirlenmesi,
- Serbest yüzeyli bir parçanın geometrik doğruluğunu artırmak üzere farklı takım yolları stratejilerinin geliştirilmesi,
- Geometrik doğruluğun artırılarak, gereksiz imalat miktarının azalması sayesinde daha hızlı imalat süresi, harcanan enerjinin ve sarf edilen hammaddenin azalması sayesinde daha maliyet etkin üretim imkanı elde edilmesi.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Pan ve diğerleri (2015) tarafından, WAAM için otomatik üretim sistemi geliştirilmesi üzerine yapılan bir çalışmada; kaynak dikişi modelleme, dilimleme, biriktirme yolu planlama, kaynak ayarı ve tamamlayıcı talaşlı işlem modülleri geliştirilmiş [3]. Şekil 2.1’de, kaynak dikişi yüksekliği ve kaynak dikişi genişliği, tipik kaynak dikişi geometrisi üzerinde gösterilmiştir. Tel besleme hızı ve hareket hızı gibi işlem parametrelerinin ayarlanması yoluyla farklı kaynak dikişi profilleri elde edilebileceği gösterilmiş [2].



Şekil 2.1. Kaynak dikiş geometrisi [2]

Proses değişkenlerinin çeşitli seviyelerdeki değerleri Çizelge 2.1’de, kaynak işlemi girdi parametreleri ve çıkan kaynak dikişi değerleri Çizelge 2.2’de sunulmuştur.

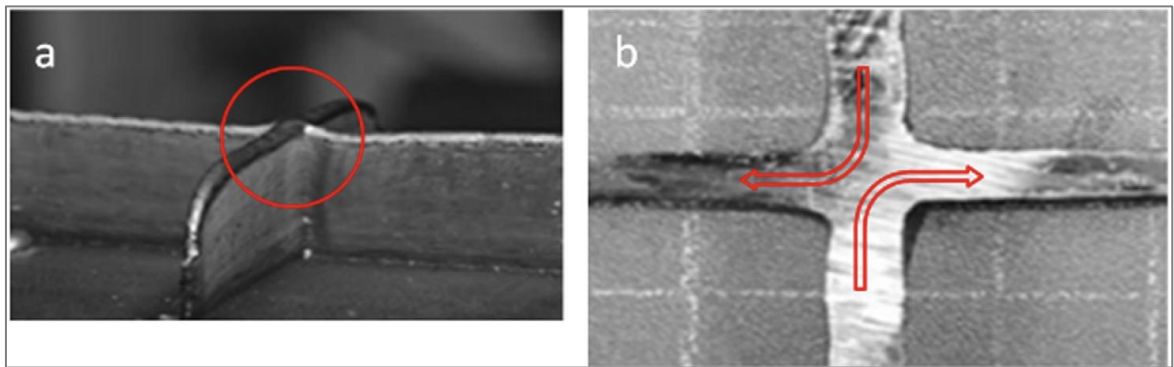
Çizelge 2.1. Giriş parametreleri [2]

Parametreler	Faktör Seviyeleri			
	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
Tel Besleme Hızı [m/dk]	5,0	5,7	6,4	7,0
Seyahat Hızı [m/dk]	0,35	0,46	0,58	0,7
Çıkıntı Miktarı [mm]	9	11	13	15

İnce duvarlı yapılardaki çapraz geçişlerin, yol planlamasını daha karmaşık hale getirdiği belirtilmiştir. Resim 2.1’de çapraz geçiş olan bölgelerden direkt olarak kesişen takım yolu ile imal edilen parçalarda üst üste binme nedeniyle tepe noktaları oluştuğu, buna karşılık zıt açılı takım yolu modelinin köşelerde düzdün yarıçaplı en iyi geçişleri ürettiği gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Kaynak işlemi giriş parametreleri ve çıktılar [2]

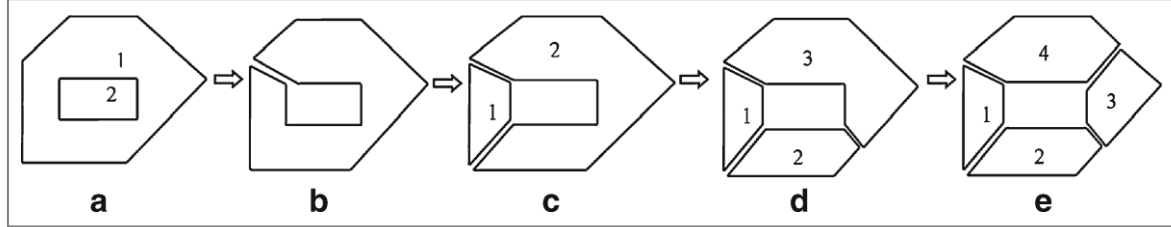
No	Parametre Tasarımı			Dikiş Yüksekliği (h) [mm]	Dikiş Genişliği (w) [mm]
	Tel Besleme Hızı [m/dk]	Seyahat Hızı [m/dk]	Çıkıntı Miktarı [mm]		
1	5,0	0,35	9	3,43	6,74
2	5,0	0,46	11	2,96	5,97
3	5,0	0,58	13	2,59	5,48
4	5,0	0,70	15	2,33	5,32
5	5,7	0,35	11	3,36	7,70
6	5,7	0,46	9	2,82	6,81
7	5,7	0,58	15	2,57	6,19
8	5,7	0,70	13	2,21	5,70
9	6,4	0,35	13	3,42	8,53
10	6,4	0,46	15	2,91	7,53
11	6,4	0,58	9	2,38	7,07
12	6,4	0,70	11	2,11	6,39
13	7,0	0,35	15	3,21	9,22
14	7,0	0,46	13	2,86	8,17
15	7,0	0,58	11	2,56	7,79
16	7,0	0,70	9	2,29	7,28
17	6,0	0,50	12	2,75	7,04
18	6,5	0,60	10	2,50	7,27
19	5,5	0,40	11	2,94	7,34
20	5,8	0,48	11	2,56	7,12
21	6,2	0,52	10	2,49	7,45
22	6,2	0,35	13	3,26	8,86
23	6,2	0,70	11	2,17	6,65



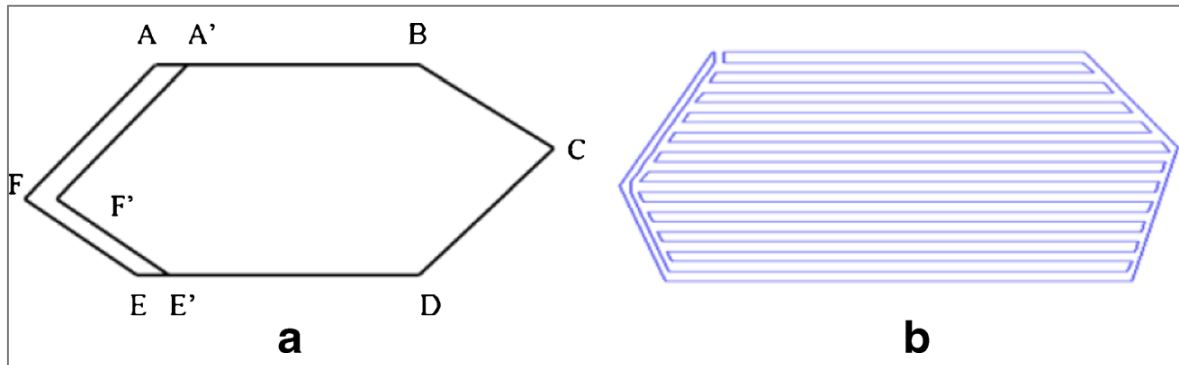
Resim 2.1. İnce duvarlı yapılarda çapraz geçiş (a) doğrudan geçişin neden olduğu tepe noktası (b) zıt açılarının yol deseni [2]

Ding, Pan, Cuiuri ve Li (2013) tarafından, WAAM prosesi için en uygun takım yollarının otomatik olarak oluşturulmasına yönelik algoritma geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmada, böl ve yönet stratejisine dayalı olarak 2B geometriler bir dizi dışbükey çokgenlere

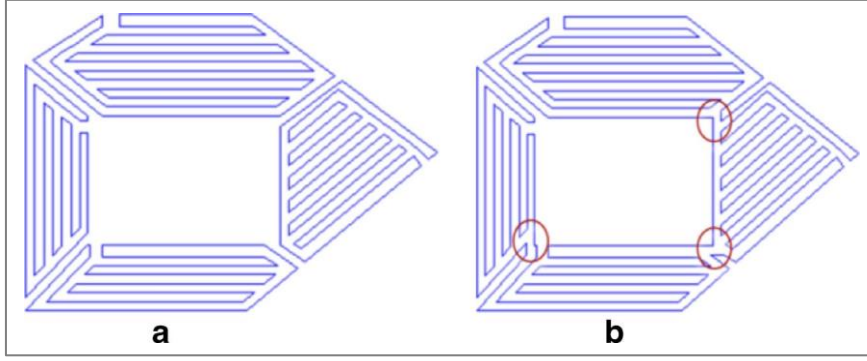
ayrıştırılmış. Bu dışbükey çokgenler için en uygun tarama yönü tanımlandıktan sonra takım yolunun sürekliliğini sağlayacak şekilde, zikzak ve kontur deseni stratejilerinin bir kombinasyonu kullanılarak takım yolu oluşturulmuş. Son aşamada tüm çokgenler birbirine bağlanmış. Bu takım yolu oluşturma stratejisi; uygulama basitliği, başlama ve durma noktalarının sayısını azaltma ve yüksek yüzey doğruluğu sağlamış. Bu çalışmada takım yolu geliştirilirken; kontur deseni kullanılarak geometrik doğruluğun artırılması, takım yolu geçişlerinin sayısı azaltılarak sürekli bir takım yolu oluşturulması, takım yolu ilerleme yönünün hızlı bir şekilde değişmesinden kaynaklanan birikme hatasını önlemek için takım yolu elemanlarının sayısının azaltılması ve dilimlenmiş yapının oluşturulmasında iç alanın doldurulma işleminin zikzak deseni gibi algoritması nispeten basit bir yöntemle yapılarak algoritmanın basitleştirilmesi konularına öncelik verilmiş. Bir katmanın çokgenlere ayrıştırılmasının adım adım süreçleri Şekil 2.2’de paylaşılmıştır. Bir dışbükey çokgenin dış hattının kontur, iç alanının ise zikzak deseni ile oluşturulan takım yolu, Şekil 2.3’te paylaşılmıştır. Final aşamasında çokgenlerin birbirlerine bağlandığı nihai takım yolu bağlantısına ait takım yolu ise Şekil 2.4’te paylaşılmıştır.



Şekil 2.2. Çokgen ayrıştırmanın adım adım süreçleri [3]

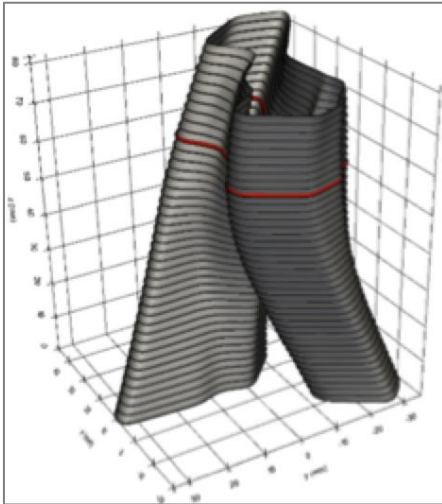


Şekil 2.3. Dışbükey bir çokgen için takım yolu oluşturma örneği [3]



Şekil 2.4. Nihai takım yolu bağlantısı [3]

Mu ve diğerleri (2021) tarafından, ince duvarlı yapıların WAAM ile üretilmesi için model tabanlı katman-katman uyarlanabilir kontrol metodunun geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmada, birisi PID algoritması diğeri MPC algoritması olmak üzere iki kontrol stratejisi değerlendirilmiş. Her katman oluşturulduktan sonra geometri bir lazer tarayıcı ile ölçülerek CAD modeli ile karşılaştırılmış ve tespit edilen hatalar, kontrolcü tarafından bir sonraki katman için yeni bir kaynak parametreleri seti oluşturularak telafi edilmiş. Uygulanan kontrol algoritmasının karmaşıklığının artırılmasıyla; test bileşenindeki kontrollü geometrik dalgalanmalar, çeşitli kaynak koşulları altındaki dalgalanmaların 3 mm'lik bir limit dahilinde korunmasına rağmen, %200 azaltılmış. Geliştirilen kontrol sistemi için zorlayıcı bir test sunmak amacıyla, Şekil 2.5'te gösterilen serbest formlu tüp yapının imalatı gerçekleştirilmiş. Resim 2.2'de görülen imalat sonucunda; tasarlanan kontrol sisteminin dikkate değer bir genel geometrik doğruluk düzeyine ulaşılmasını sağladığı ve bağlantı geometrisinin iyi bir şekilde kontrol edildiği sonucuna ulaşılmış.

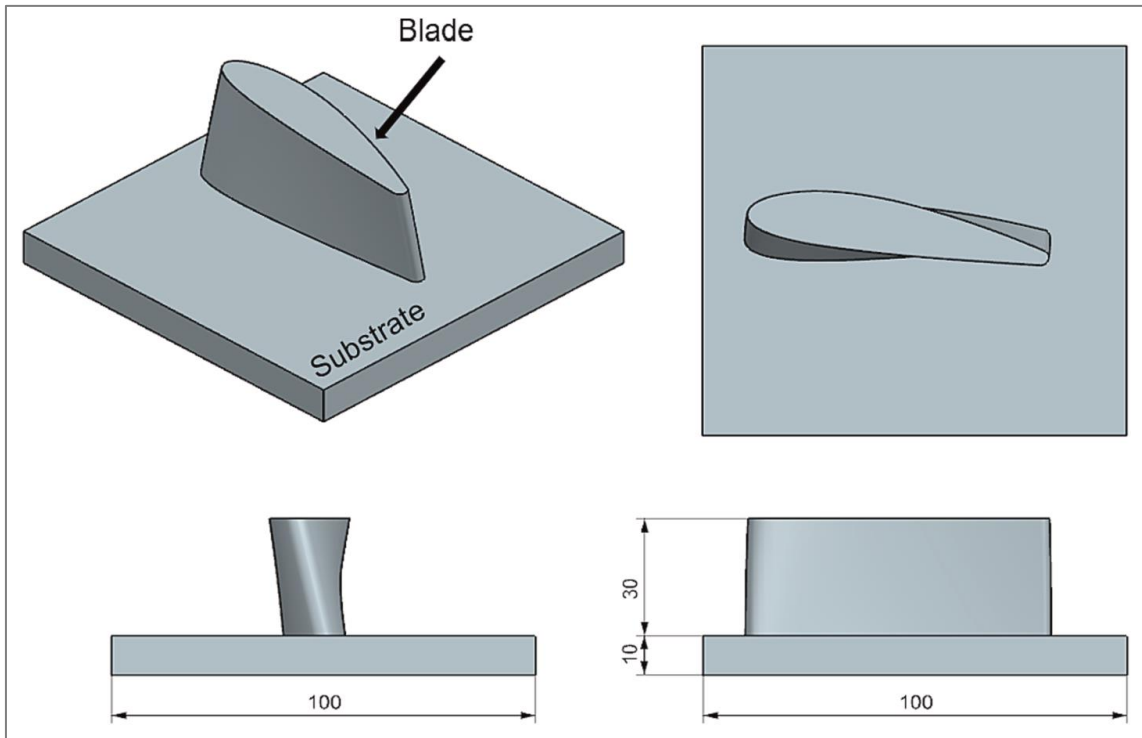


Şekil 2.5. Karmaşık geometriye sahip serbest formlu tüp modeli [4]

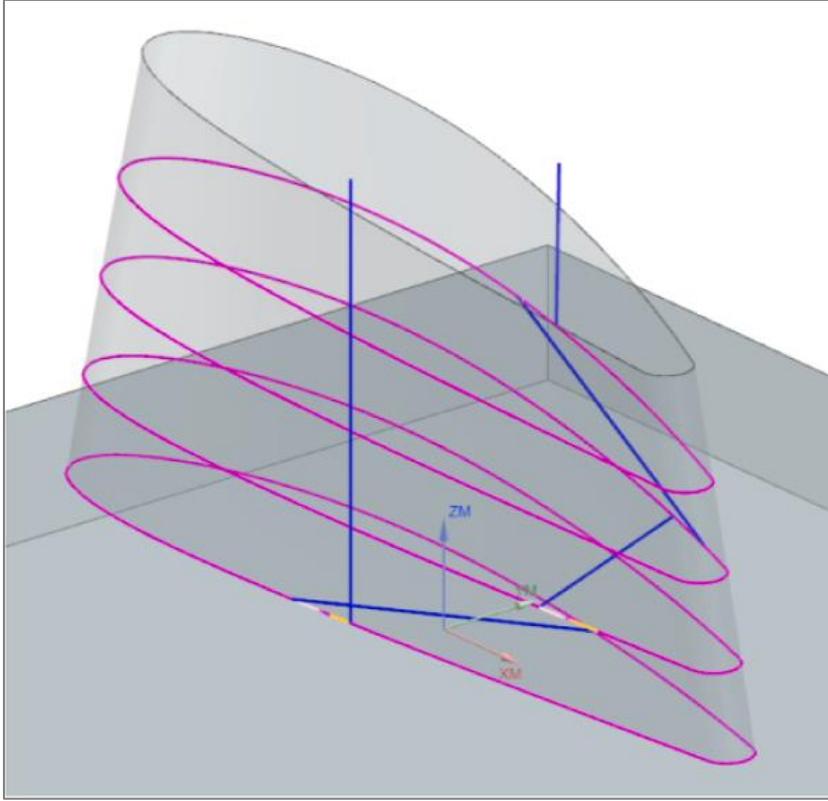


Resim 2.2. (a) İmal edilmiş serbest biçimli parça (b) bağlantı noktası [4]

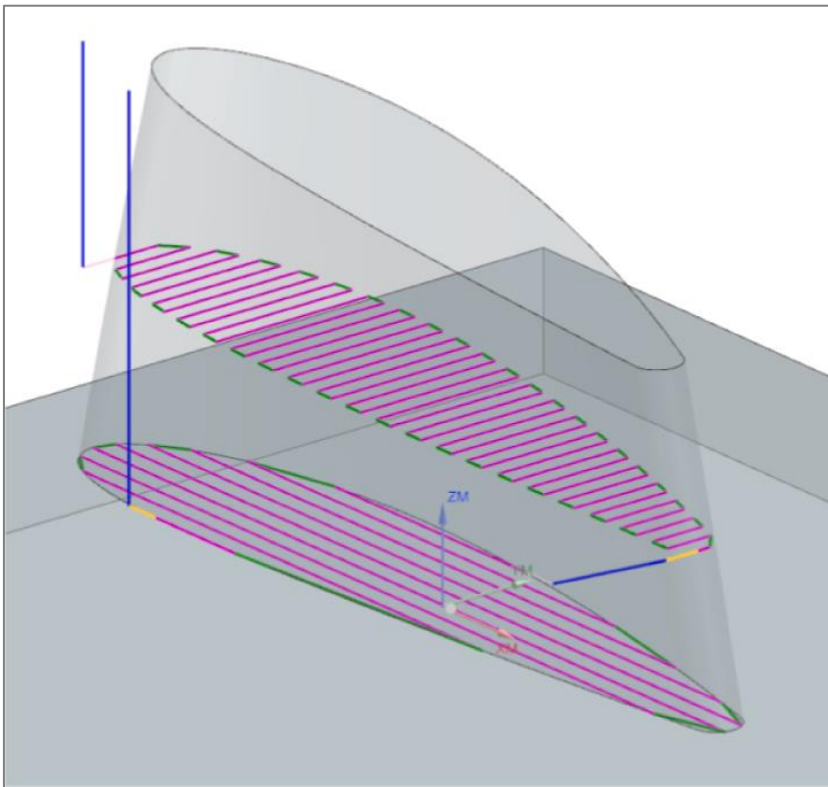
Chang, Qiu, Chen ve Hwang (2023) tarafından, YEH için takım yolu planlaması ve lazer kafasının yükselen yükseklik ayarı üzerine yapılan çalışmada, bir kanat kesitinin dilimlenmesi ve aynı anda 10° döndürülmesi ile hem sarkma hem de eğilme özelliklerine sahip Şekil 2.6'da paylaşılan kanat modeli oluşturulmuş. Kontur takım yolları için spiral desen (Şekil 2.7), iç alanı doldurmak için ileri geri hareket eden zikzak desen (Şekil 2.8) ve kaplama açısının parçanın kesitine uyacak şekilde ayarlanması gerektiği tespit edilmiş.



Şekil 2.6. Bıçak modeli geometrisi [5]

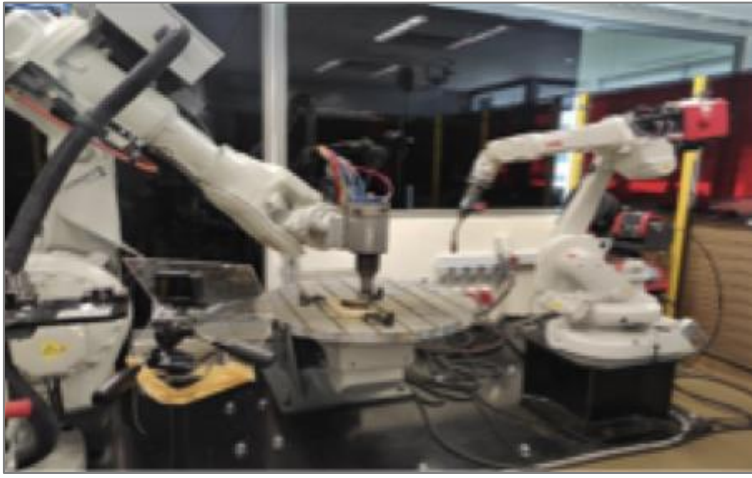


Şekil 2.7. Bıçak modeline uygulanan spiral takım yolu [5]



Şekil 2.8. Bıçak modeline uygulanan zikzak takım yolu [5]

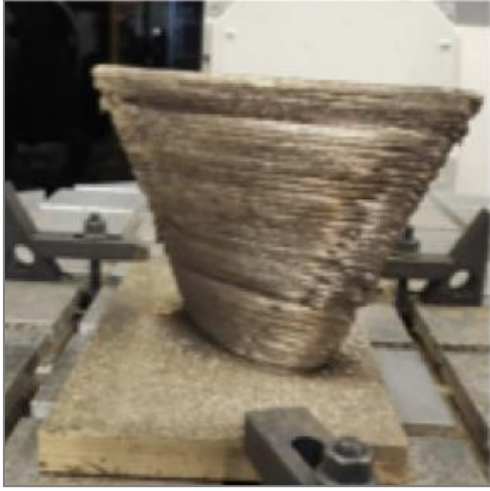
Elkhouly, Lim, Dharmawan ve Son (2022) tarafından, hibrit WAAM (H-WAAM) kullanılarak bir pervanenin kontur deseni ile basılması üzerine yapılan çalışmada, ŞResim 2.3'te görülen hem eklemeli hem de talaşlı imalat işlemleri gerçekleştirilebilen H-WAAM sistemi kullanımının avantajları gösterilmiş. Takım yolu planlaması, seviye ayarlı uyarlanabilir kontur deseni ile yapılmış. Pervane hem hibrit yöntem kullanılmadan (Resim 2.4) basılmış hem de H-WAAM ile (Resim 2.5) basılarak karşılaştırılmış ve H-WAAM metodunun daha tutarlı geometri elde edilmesini sağladığı sonucuna ulaşılmış. Resim 2.6'da ise talaşlı işlemden önce ve sonrası gösterilmiş.



Resim 2.3. Singapur Teknoloji ve Tasarım Üniversitesi'nde bulunan H-WAAM sistemi [6]



Resim 2.4. WAAM ile üretilen pervane [6]

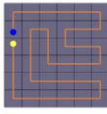
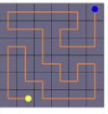
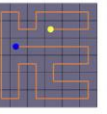
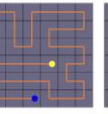
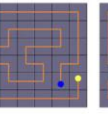
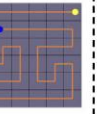
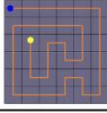
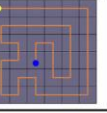
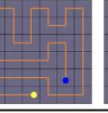
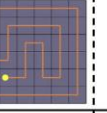
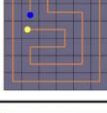
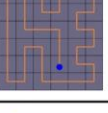
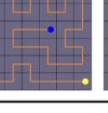
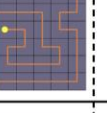
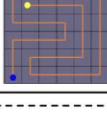
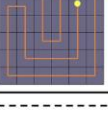
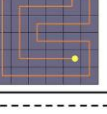
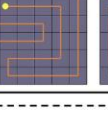
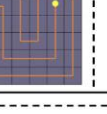
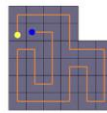
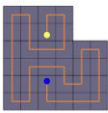
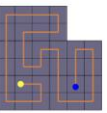
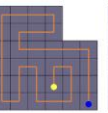
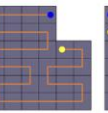
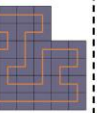
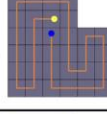
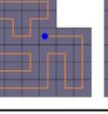
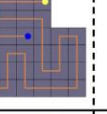
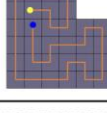
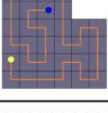
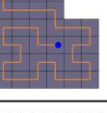
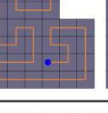
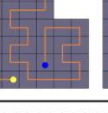
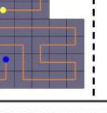
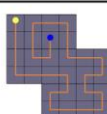
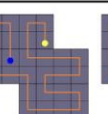
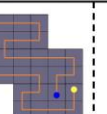
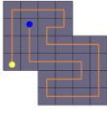
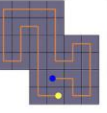
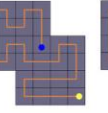
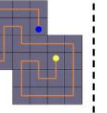
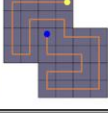
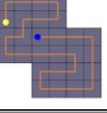
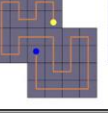
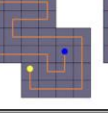
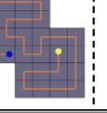


Resim 2.5. H-WAAM ile üretilen pervane [6]

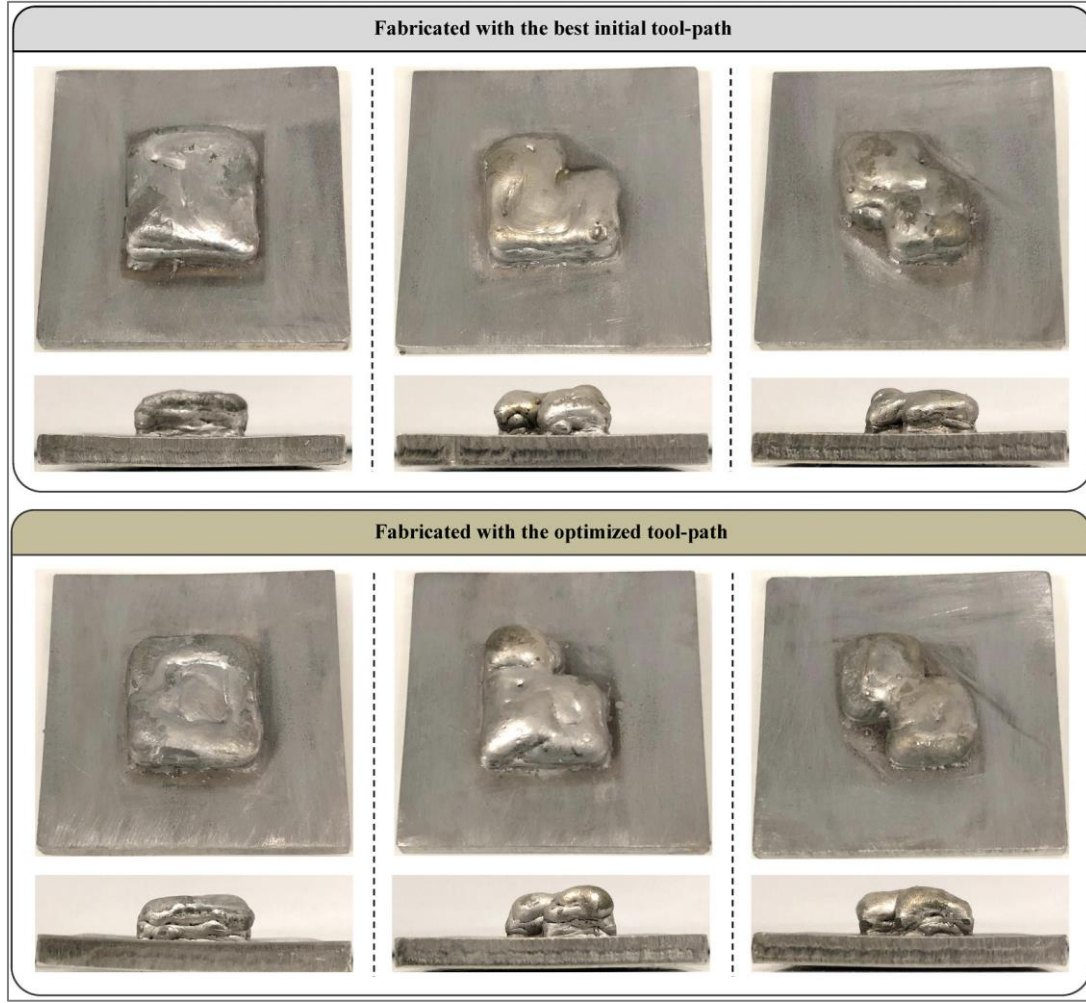


Resim 2.6. (a) Talaşlı işlemden önce basılmış yüzey, (b) talaşlı işlemden sonra basılmış yüzey [6]

Zhou, Shen, Lin, Liu ve Sheng (2022) tarafından, WAAM’da termo-mekanik özellikleri optimize etmek için devamlı takım yolu planlaması üzerine yapılan çalışmada; WAAM’da şekillendirme kalitesini ve biriktirme verimliliğini artırmak için sıklıkla kullanılan aralıksız takım yolu deseninin, bitişik takım yolu nedeniyle termo-mekanik özelliklerinin zayıflamasına çözüm olarak, takım yolunun verimli bir şekilde planlanmasına odaklanan genetik algoritmaya dayalı bir yöntem önerilmiş. Devamlı bir takım yolunun uygunluğu, planlama sürecinin verimliliğini sağlayan hızlı termo-mekanik alan tahmin modeli kullanılarak birkaç saniyede değerlendirilmesine ek olarak, kaliteyi sağlamak için şekillendirilebilirlik kısıtlaması getirilmiş. Şekil 2.9’da, tasarlanan evrimsel algoritmanın etkinliğinin doğrulanması için geliştirilen takım yolları ve parça özellikleri görülmektedir. Resim 2.7’de ise en iyi başlangıç takım yolu ile üretilen ve optimize edilmiş takım yolu ile üretilen parçaların karşılaştırılmaları görülmektedir.

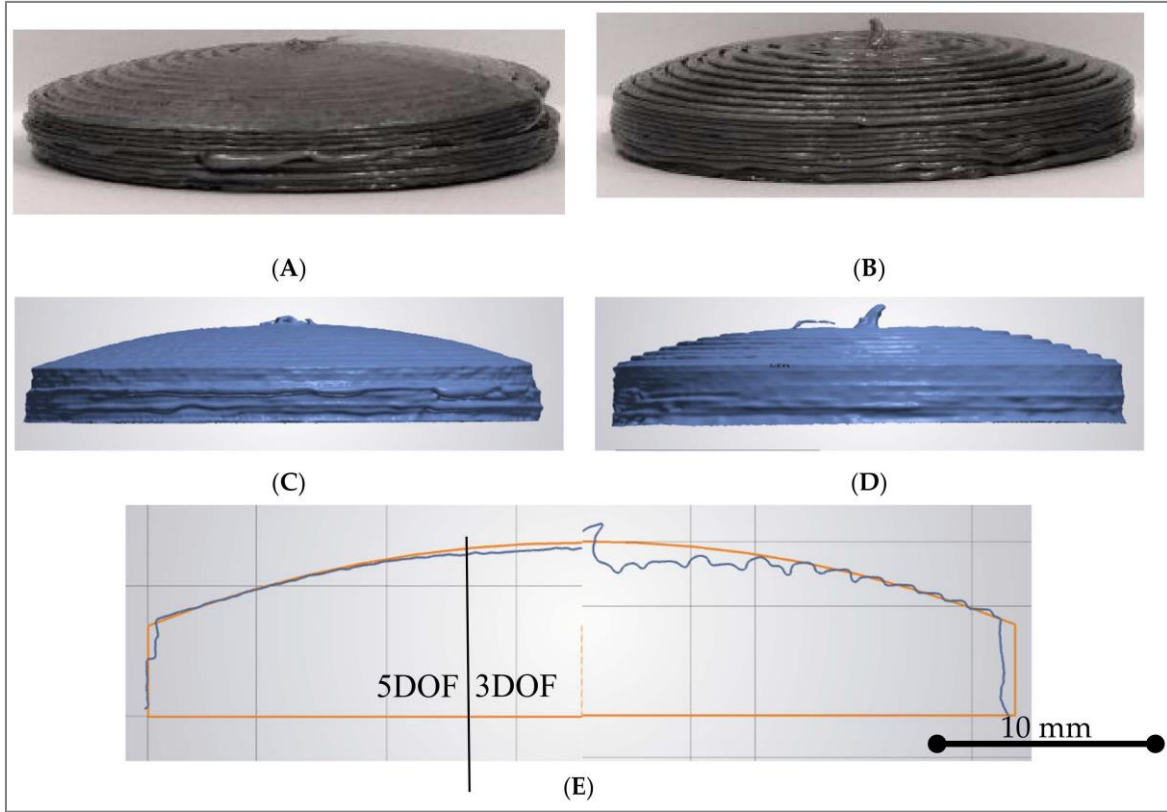
(a)	Tool-path						Form-ability index	Sum of thermal gradient	Average stress	Fitness value
	Layer-1	Layer-2	Layer-3	Layer-4	Layer-5	Layer-6				
Best initial							16	8013882 K	289.08 Mpa	1.1318
Optimized (DFS-based)							16	7774000 K	243.42 Mpa	0.0913
Optimized (Set-based)							16	7767009 K	249.56 Mpa	0.1441
Compared							12	8015791 K	285.84 Mpa	1.0965
(b)	Tool-path						Form-ability index	Sum of thermal gradient	Average stress	Fitness value
	Layer-1	Layer-2	Layer-3	Layer-4	Layer-5	Layer-6				
Best initial							16	6967135 K	281.56 Mpa	1.0852
Optimized (DFS-based)							16	6686806 K	259.74 Mpa	0.2128
Optimized (Set-based)							16	6770631 K	257.46 Mpa	0.3478
(c)	Tool-path						Form-ability index	Sum of thermal gradient	Average stress	Fitness value
	Layer-1	Layer-2	Layer-3	Layer-4	Layer-5	Layer-6				
Best initial							16	5555212 K	282.17 Mpa	1.0492
Optimized (DFS-based)							15	5414185 K	248.93 Mpa	0.1427
Optimized (Set-based)							16	5383363 K	251.24 Mpa	0.1041

Şekil 2.9. (a) Geometri-1, (b) geometri-2, (c) geometri-3 için algoritmanın etkinliğinin doğrulanmasında yer alan araç yolları [7]



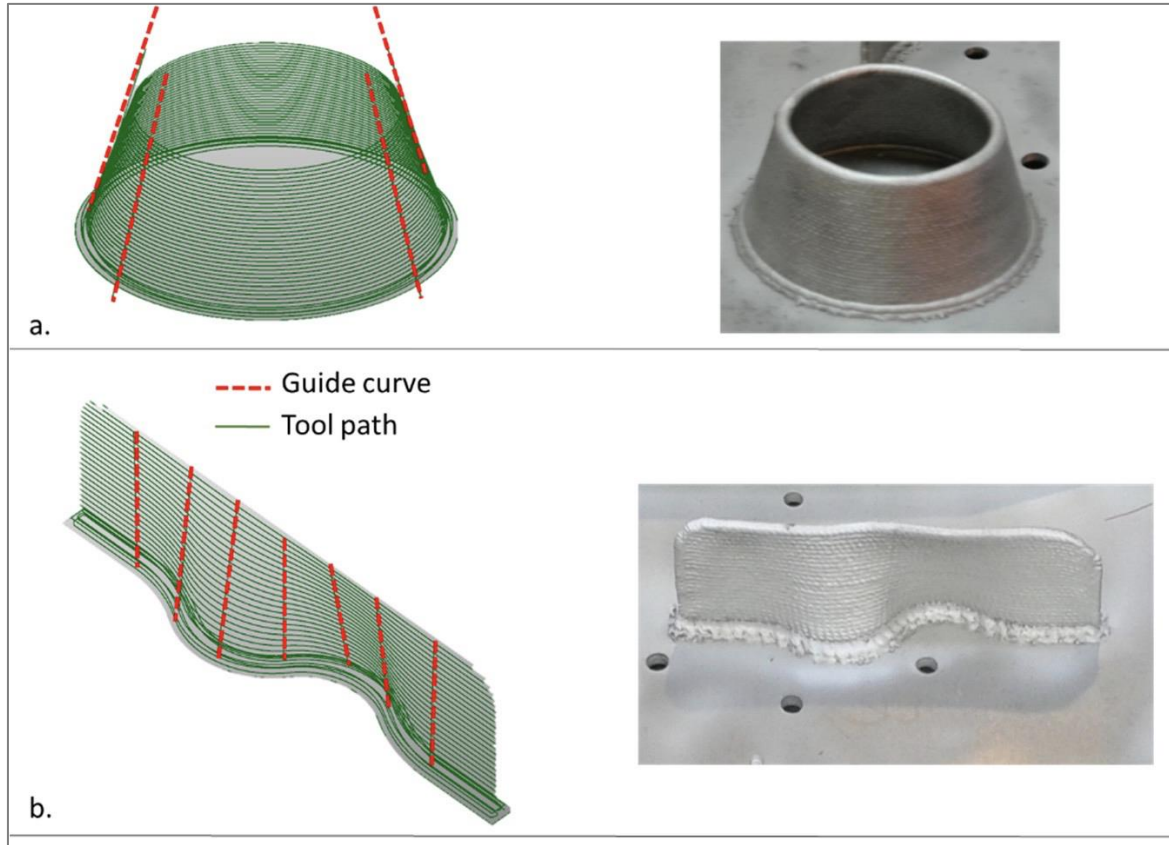
Resim 2.7. En iyi başlangıç takım yolu ve optimize edilmiş takım yolu ile üretilen parçaların şekillendirme kalitesi [7]

Jensen ve diğerleri (2019) tarafından, 5 ve 6 serbestlik dereceli (SD) ekstrüzyon tabanlı eklemeli imalat için takım yolu stratejileri üzerine yapılan çalışmada, takım yolu projeksiyonu ve ebeveyn-çocuk yaklaşımı olarak adlandırılan iki yeni birleştirme stratejisi sunulmuş. Otomatikleştirilebilen ve eş merkezli kabuk katmanlarının oluşturulmasına izin veren takım yolu projeksiyon metodu, 3 SD Eİ işlemlerinde tipik olarak görülen ve ikincil son işlem gerektiren geometrik sapmaları (merdiven etkisi) giderilmesini sağlamış. Tasarımcı, ebeveyn-çocuk yaklaşımında her bir farklı özellik için üretim yönünü belirleyerek, hem destek malzemesine olan ihtiyacın ortadan kalkmasına yardımcı olur, hem de parçaya dinamik olarak yeni özelliklerin eklenmesine olanak sağlamış. 5 SD Eİ yaklaşımının sonucu Şekil 2.10(a)'da, 3 SD Eİ yaklaşımının sonucu Şekil 2.10(b)'de, mikroskobik sonuçlar Şekil 2.10(c, d)'de ve sonuçların ölçeklerle karşılaştırılması ise Şekil 2.10(e)'de görülmektedir.

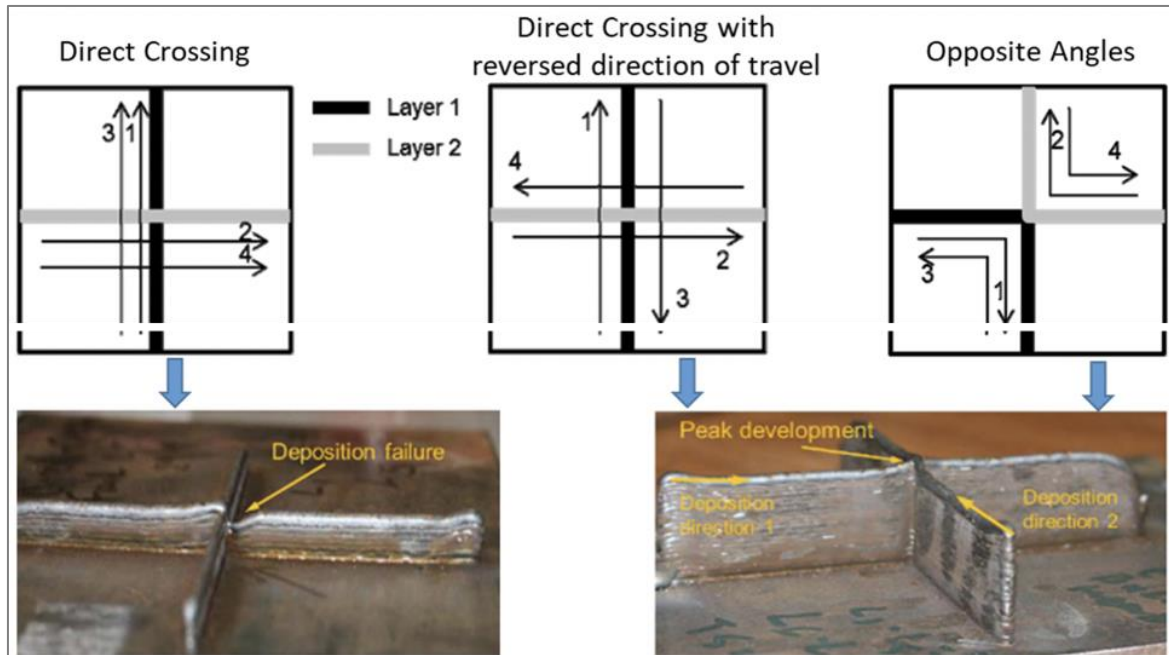


Şekil 2.10. (a) 5 SD Eİ yaklaşımının sonuçları, (b) 3 SD İE yaklaşımının sonuçları, (c) 5 SD yaklaşımının mikroskobik sonuçları, (d) 3 SD yaklaşımının mikroskobik sonuçları, (e) sonuçların ölçekle karşılaştırılması [8]

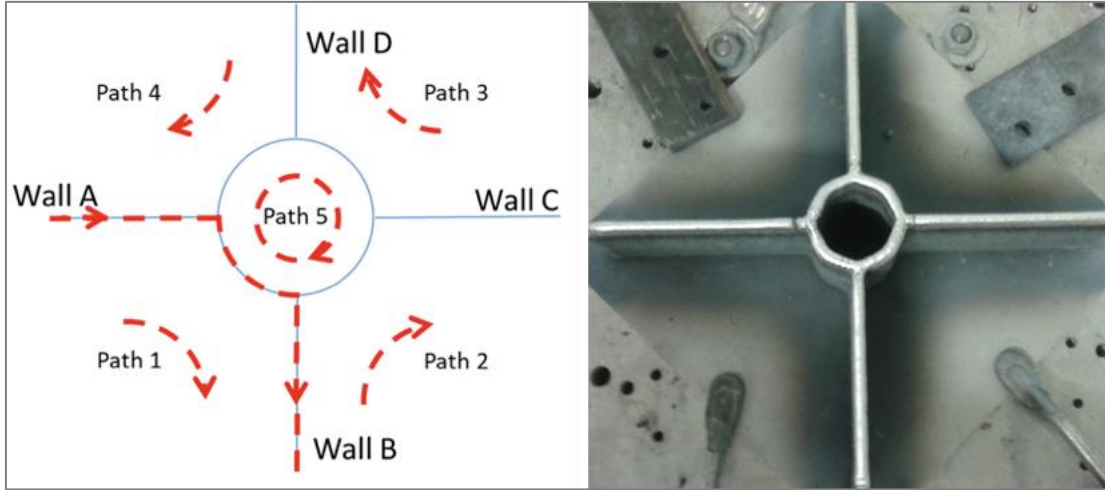
Rauch, Hascoet ve Querard (2021) tarafından, WAAM ile yapılan ince duvar yapıları için çok eksenli takım yolu oluşturma yaklaşımı üzerine yapılan çalışmada, düzlemsel olmayan ve paralel olmayan dilimleme yaklaşımları ile birlikte parçanın çalışma alanındaki yerleşimi gibi hususlar odak noktasına alınarak, geliştirilen yöntemle entegre edilmiş. Karmaşık şekiller için değişken torç oryantasyon kontrolünün önemi ile birlikte, Eİ için tasarım hususlarını temel alan yeni bir kesişim aracı yolu yöntemi detaylandırılmış. Şekil 2.11’de, kılavuz eğrileriyle takım yolu oluşturulmuş parçaların, Şekil 2.12’de ise kesişim geçişi örnekleri paylaşılmıştır. Şekil 2.13’te iki duvarın döner kavşak tipi şeklinde kesişim örneği paylaşılmıştır.



Şekil 2.11. Kılavuz eğrileriyle takım yolu oluşturma (a) 15° koni, (b) Değişken eğimli duvar [9]

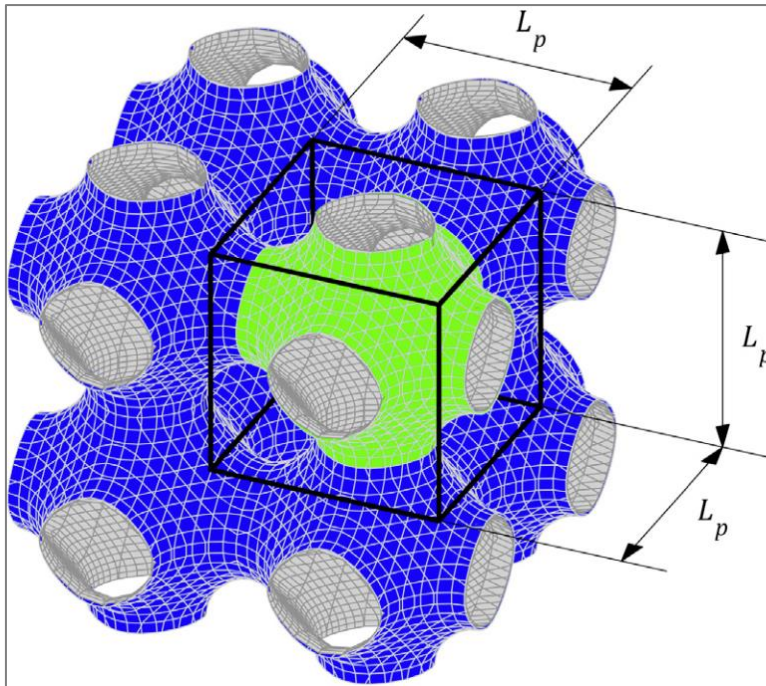


Şekil 2.12. Kesişim geçişi örnekleri [9]

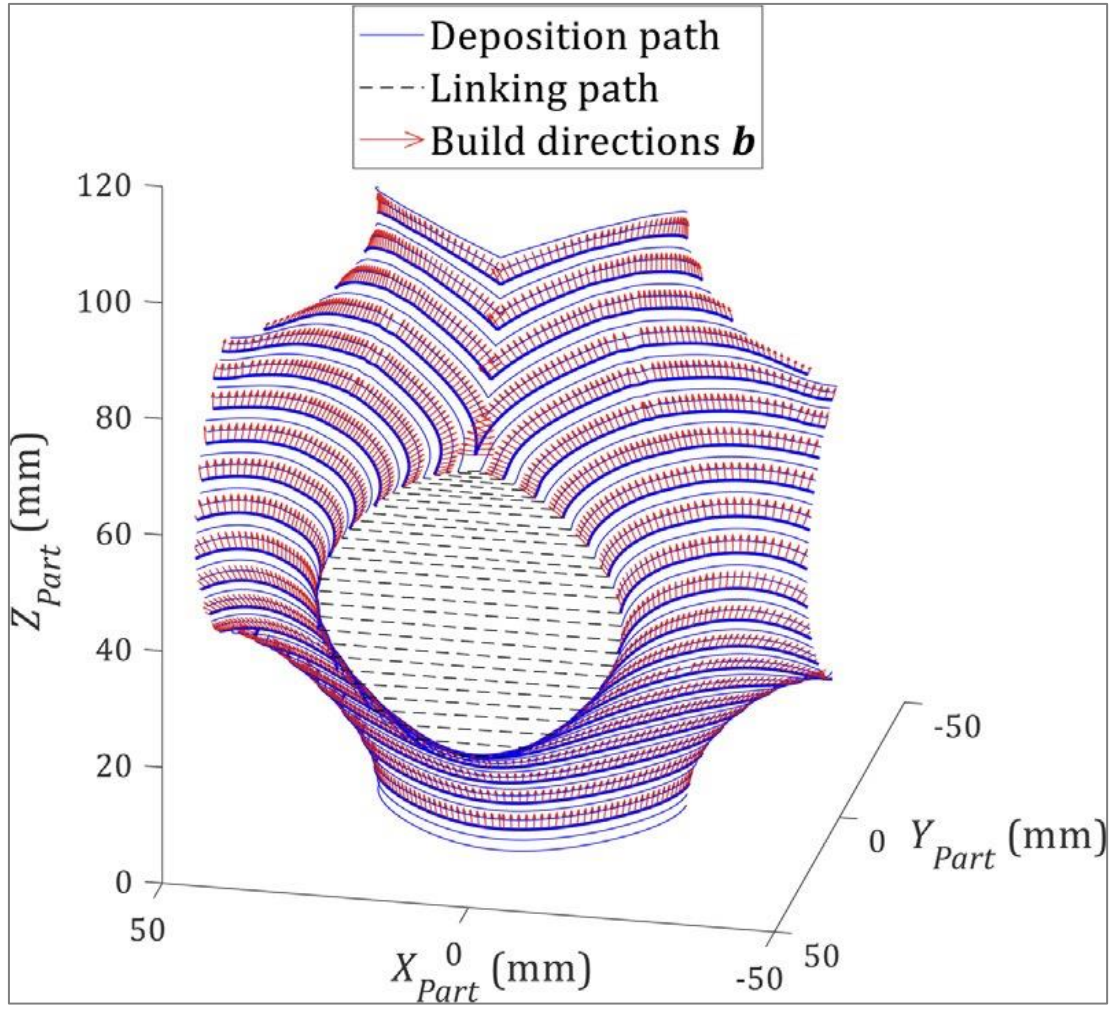


Şekil 2.13. İki duvarın döner kavşak tipi kesiştiği kesişim geçişi (a) imalat takım yolu, (b) imal edilmiş kesişim [9]

Campocasso, Chalvin, Bourgon, Hugel ve Museau (2023) tarafından, çok eksenli WAAM ile Schwarz-P modelinin üretilmesi üzerine yapılan çalışmada, bir Schwarz-P (Şekil 2.14) modelinin WAAM ile çok eksenli imalatına olanak sağlamak için izo-yükseklik katmanlarına dayalı (Şekil 2.15) bir çerçeve önerilmiş. Bununla birlikte bilgisayar destekli imalat zincirinde yer alan adımlar anlatılarak, 8 eksenli sistemde imal edilmiş edilmiş bir hücre üzerinde deneysel doğrulama (Resim 2.8) yapılmış.



Şekil 2.14. Bir desen düzeneğinde Schwarz-P deseni (yeşil renkli) [10]

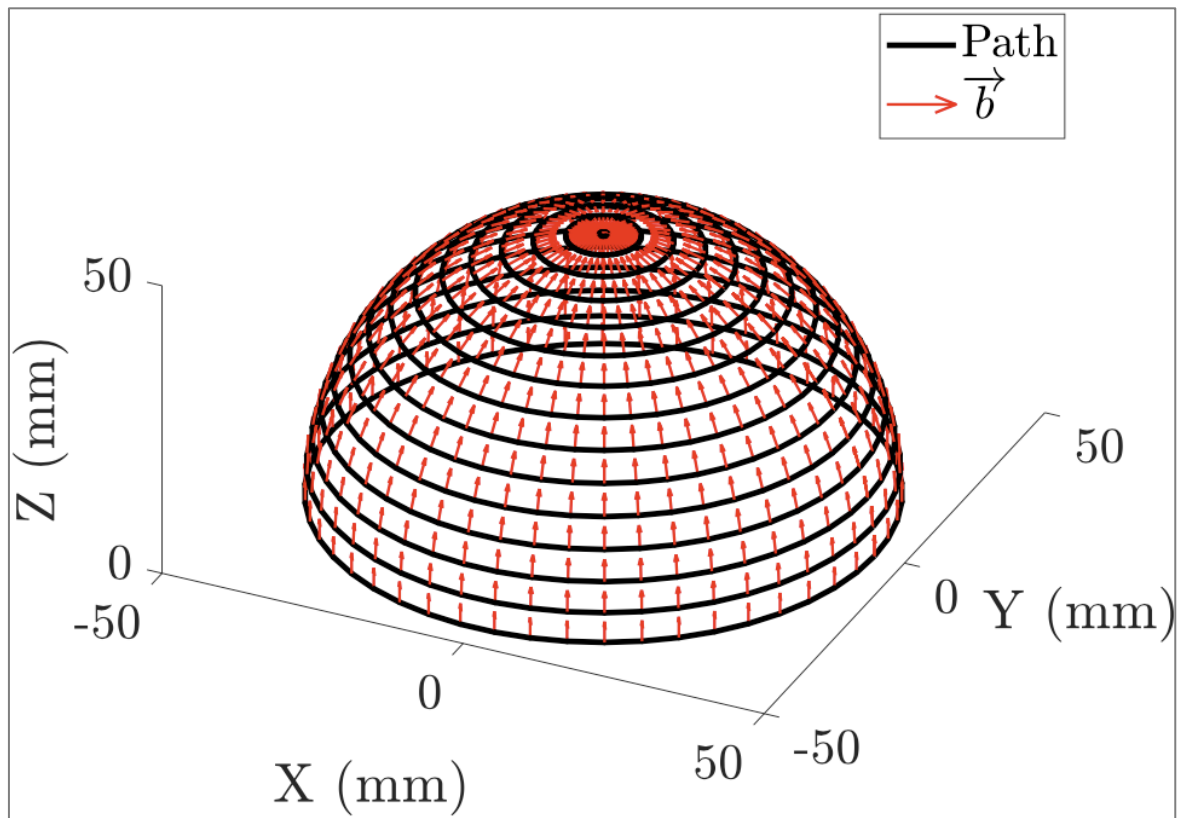


Şekil 2.15. Yapı yön vektörleri (desenin yarısı için her üç kaymanda bir gösterilir) [10]

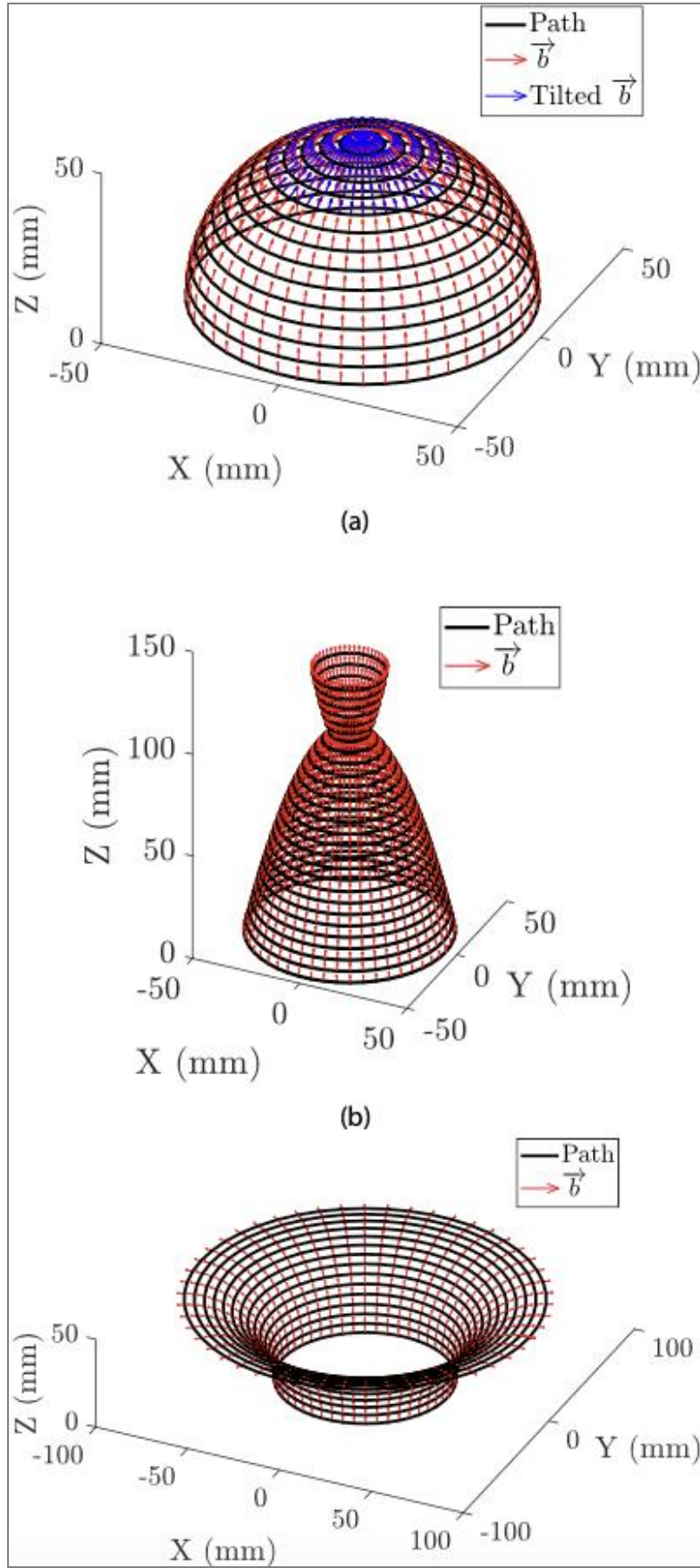


Resim 2.8. Üretilen parça [10]

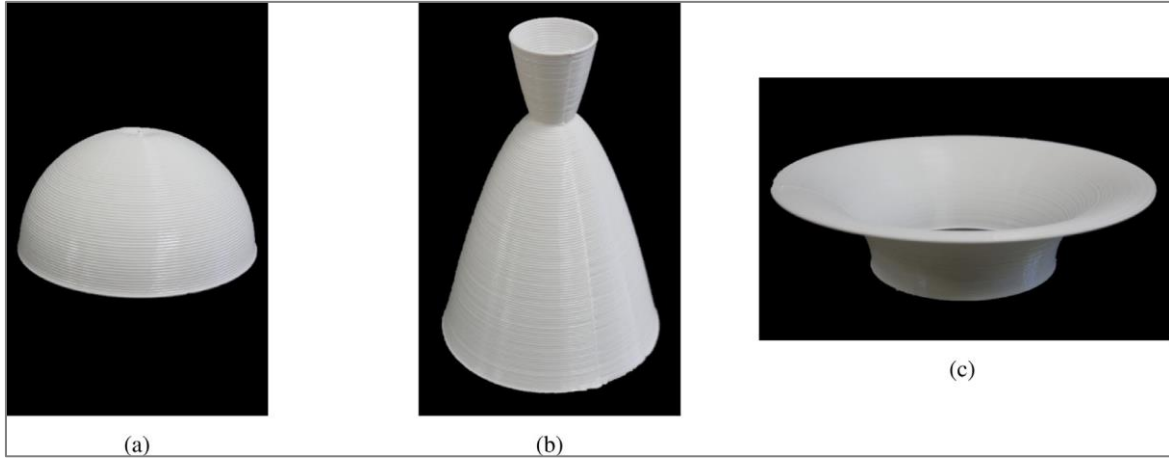
Chalvin, Campocasso, Hugel ve Baizeau (2020) tarafından, parçaların çok eksenli robotik Eİ için optimize edilmiş eklem yörüngesinin katman-katman oluşturulması üzerine yapılan çalışmada, YEY yoluyla Eİ'a odaklanılarak, ortak eksenli biriktirme sistemiyle üretilen döner parçalar için eksen fazlalığını hesaba katarak eklem alanında optimize edilmiş (Şekil 2.16) bir yörünge oluşturulmuş. Yörünge kısıtlı optimizasyon ile yeni bir katman-katman metodu birleştirilerek, optimize edilmemiş bir yörünge ve nokta-nokta optimize edilmiş bir yörünge teorik olarak karşılaştırılmış. Optimize edilmiş yörüngelerin katman-katman oluşturulması, polilaktik asit (PLA) ekstrüzyon sistemi kullanılarak 6 SD bir robot üzerinde deneysel olarak (Şekil 2.17 ve Resim 2.9) doğrulanmış. Deneysel sonuçlar, geliştirilen optimizasyon stratejisinin, optimize edilmemiş çözümlerle karşılaştırıldığında daha iyi geometrik doğruluk sağladığını göstermiş.



Şekil 2.16. Takım yolu planlama ve yapı yön vektörleri [11]

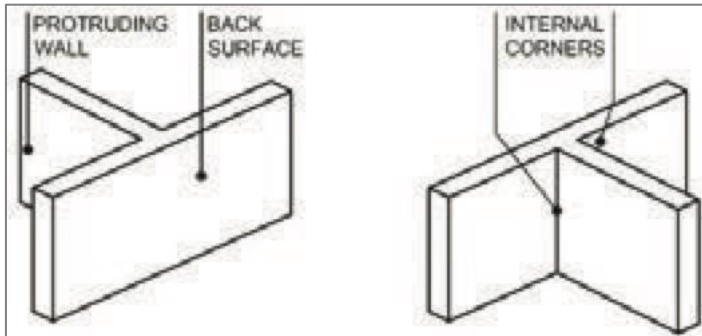


Şekil 2.17. Takım yolu ve yapı yön vektörleri (a) küre, (b) laval bozul (c) giriş hunisi [11]

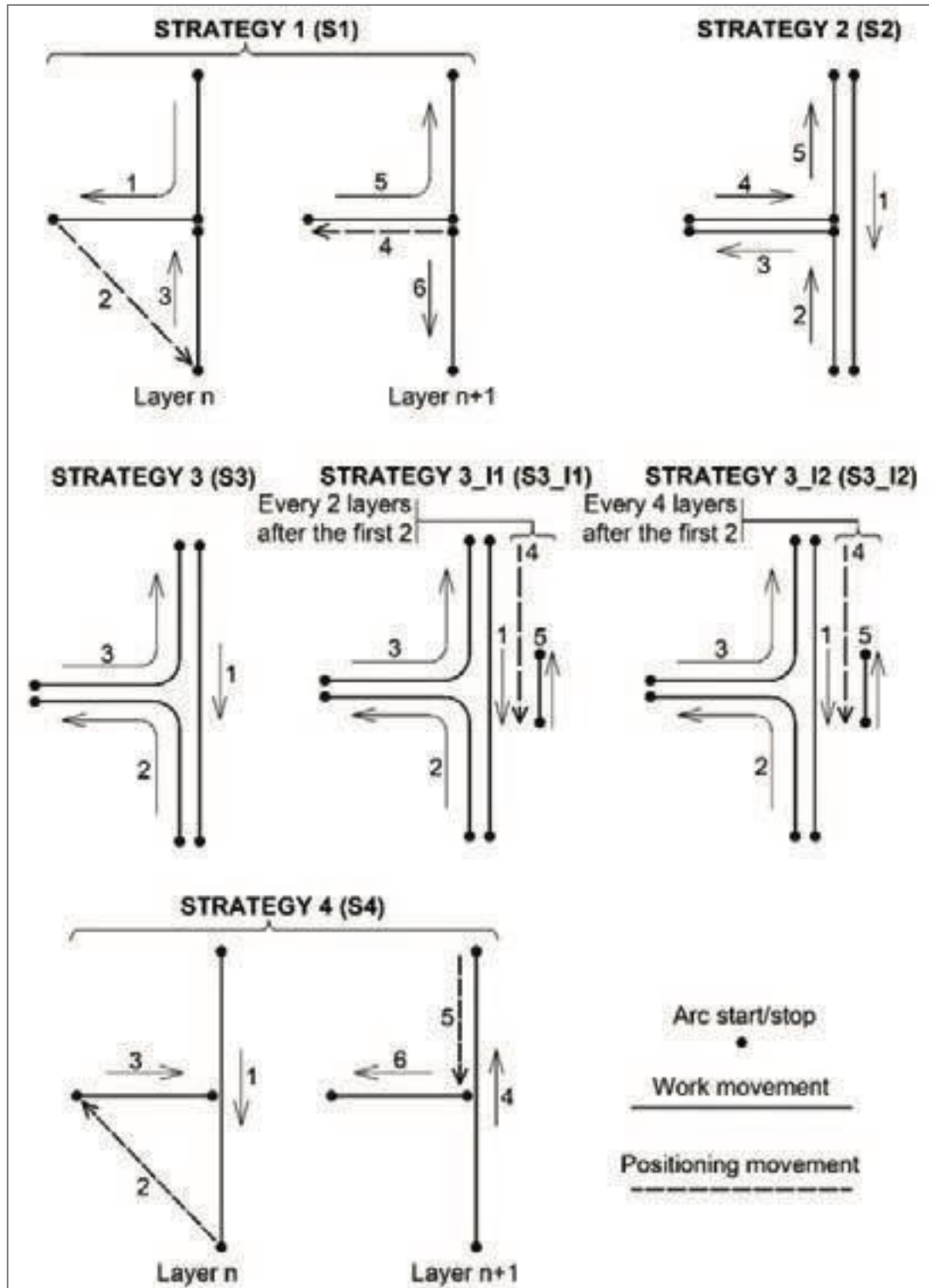


Resim 2.9. Deneysel sonuçlar (a) küre, (b) laval bozul (c) giriş hunisi [11]

Venturini, Montevicchi, Scippa ve Campatelli (2016) tarafından, T-geçiş (Şekil 2.18) özellikleri için WAAM biriktirme modellerinin optimizasyonu üzerine yapılan çalışmada, artık gerilim ve gerinimleri mümkün olduğunca azaltmak için, manuel olarak optimize edilmesi gereken katman biriktirme stratejisi (Şekil 2.19) geliştirilmiş. Her katman için sabit bir yükseklik oluşturmak ve sağlamak için bileşenin geometrik özellikleri verimli bir şekilde eşleştirilmiş. Bir takım yolu seçiminin, verimlilik ve malzeme kullanım verimliliği arasında bir uzlaşma olarak gerçekleştirilmesi gerektiği belirtilmiş. T-geçiş parça üretimi (Resim 2.10 ve Resim 2.11) için optimize edilmiş bir strateji seçme süreci çalışılmış.



Şekil 2.18. T-geçiş özelliğinin adlandırılması [12]



Şekil 2.19. Strateji-1, strateji-2, strateji-3 ve strateji-4 [12]

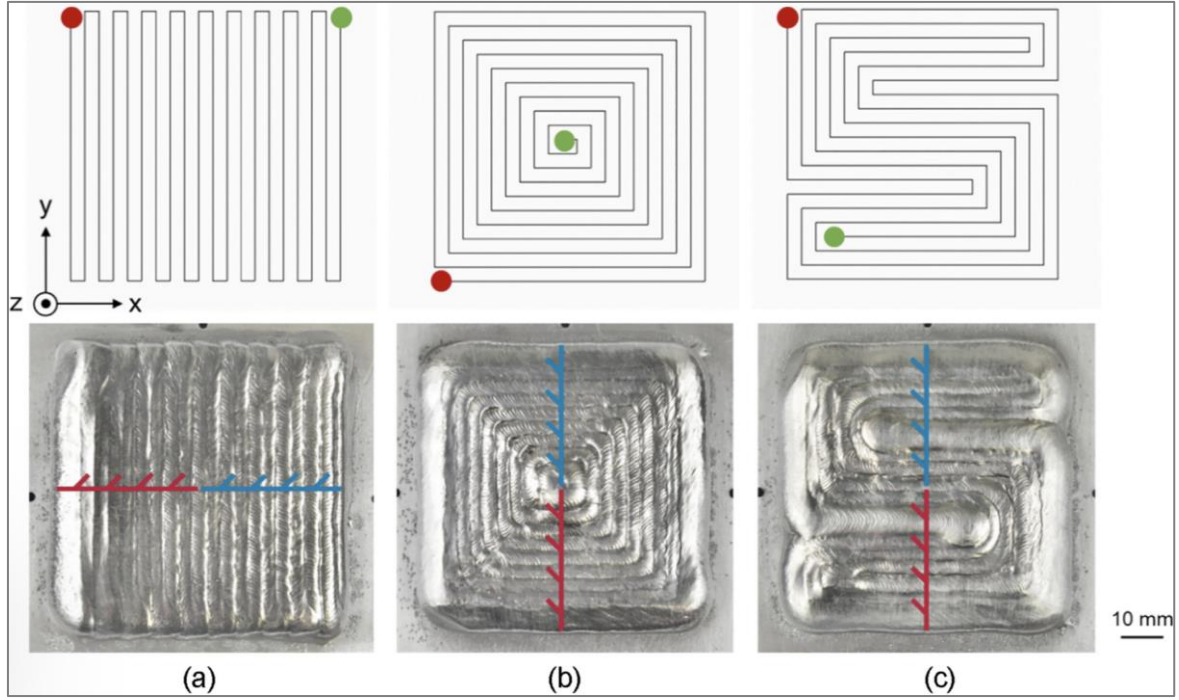


Resim 2.10. Strateji-3 ile imal edilmiş T-geçiş, merkezi bölgede biriktirme başarısızlığı var [12]

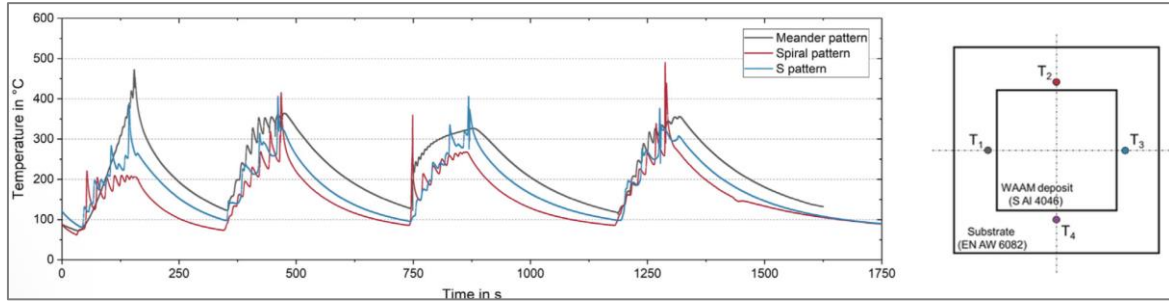


Resim 2.11. Strateji-3_I2 kullanılarak oluşturulmuş bir T-geçiş [12]

Köhler ve diğerleri (2021) tarafından, Al-4046'nın YEY-arc EI için biriktirme modellerinin karşılaştırılması üzerine yapılan çalışmada; biriktirme modelinin üretim sürecindeki sıcaklık dağılımı ve artık gerilim oluşumuna olan etkinin karmaşık ilişkisini araştırmak için, YEY-arc EI'taki üç farklı biriktirme modeli olan kıvrımlı model, spiral model ve s modeli (Şekil 2.20) ile ortaya çıkan sıcaklık dağılımı (Şekil 2.21), tane boyutu, gözeneklilik ve artık stres oluşumu açısından deneysel ve sayısal olarak incelenmiş. Bununla birlikte, biriktirme yollarındaki varyasyonun, biriktirme kalitesini belirleyen farklı bölgesel tepe sıcaklıklarına sahip karakteristik sıcaklık alanları ve gradyanlarla sonuçlandığını ve aynı zamanda optimum desen tasarımı için büyük serbestlik dereceleri sunduğu ortaya koyulmuş. Sonuçlar karşılaştırıldığında, geliştirilen s-modeli daha homojen bir sıcaklık dağılımına yol açarak, biriktirilen Al-4046 malzemesinin; mikro yapısı, gözenekliliği ve artık gerilim oluşumu üzerine faydalı etkiler göstermiş ve üretilen parçaların kalitesinde ilave iyileştirmeler sağlaması üzerine uygun bir alternatif olarak tespit edilmiş.



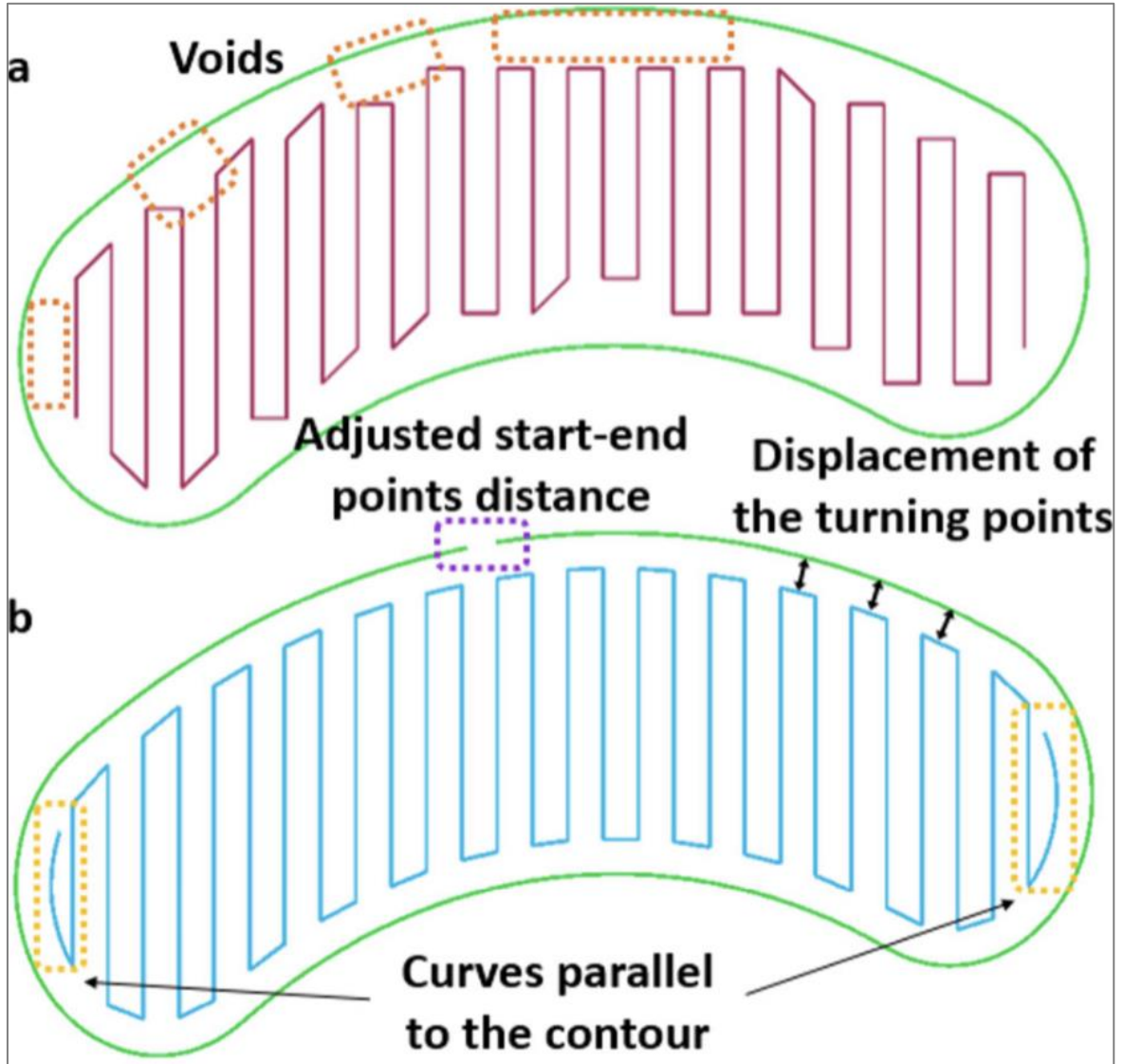
Şekil 2.20. Başlangıç (yeşil)/durdurma (kırmızı) özellikleri ve imal edilen numunelerde araştırılan biriktirme desenleri (a) menderes deseni; (b) spiral deseni; (c) S deseni. Kırmızı çizgiler mikroyapısal analiz bölümlerini işaret eder; mavi çizgiler sertlik eşlemelerinin kesitlerini işaret eder [13]



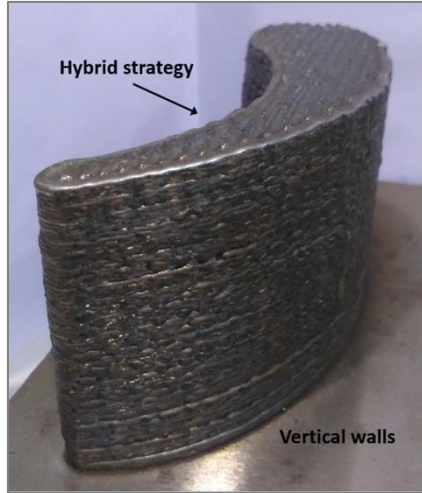
Şekil 2.21. T2 ölçüm konumunda tam biriktirme dizisi sırasında sıcaklık profillerinin karşılaştırılması [13]

Flores, Garmendia ve Pujana (2018) tarafından, lazer metal biriktirme tekniği aracılığı ile metalik bileşenlerin üretimi için takım yolu geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmada, eş merkezli lazer metal biriktirme teknolojisi için yeni bir takım yolu (Şekil 2.22) oluşturma yaklaşımı önerilmiştir. Çalışmada; kontur eğrilerini ve zikzak doldurma desenlerini birleştiren ve sabit bir bindirme parametresi ile her katman için düzgün bir Z ekseninde büyüme sağlayan optimize edilmiş bir hibrit biriktirme stratejisi, çıkıntı duvarlarında önceki katmanda birikmeyi garanti eden çok eksenli bir hareket stratejisi ve katmanları değişken eğimlere ve çok eksenli biriktirme stratejisine sahip tek kaynak dikişli duvar yapılarında

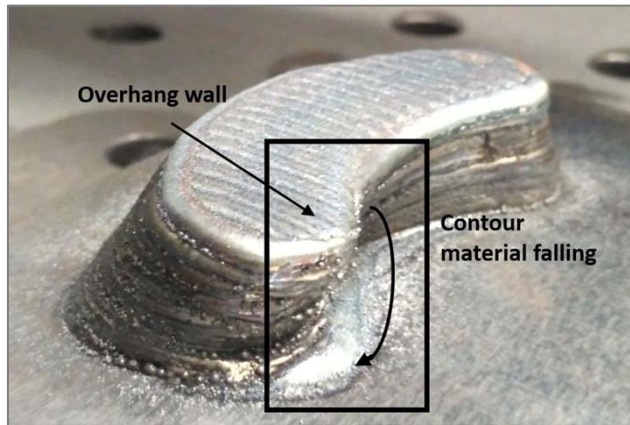
değişken dikey büyümeye uyarlayan düzlemsel olmayan bir dilimleme stratejisi sağlayan takım yolu üretici sunulmuş. Oluşturulan takım yollarının etkinliği, farklı üç boyutlu geometrilerin (Resim 2.12, Resim 2.13, Resim 2.14 ve Resim 2.15) oluşturulmasıyla LMD teknolojileri üzerinde uygulama ve doğrulama yoluyla kanıtlanmış.



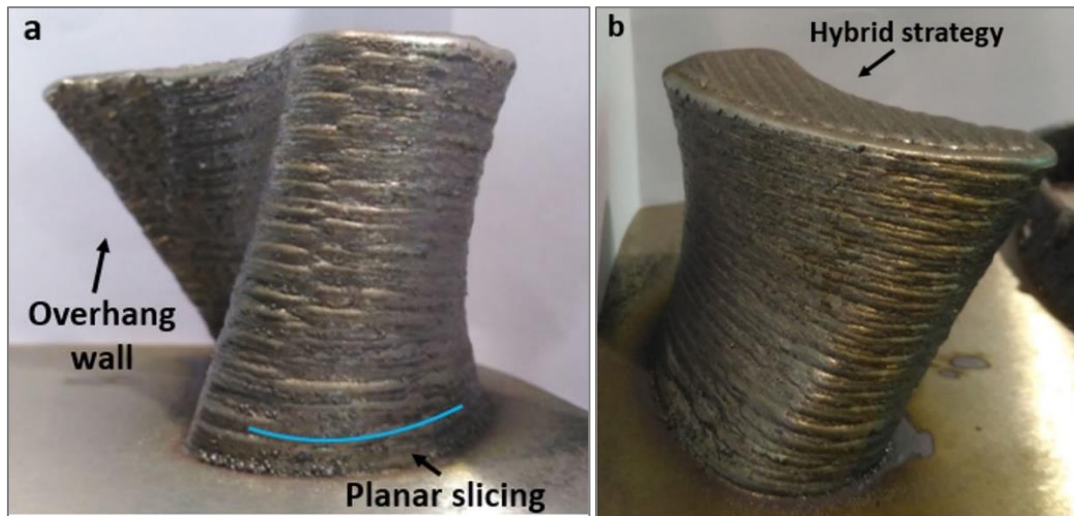
Şekil 2.22. Bağımsız bir katmanda hibrit strateji (a) zikzak desende yapılan ayrıştırma hatası nedeniyle iki strateji arasındaki ayrım (b) sabit bindirmeyi sağlayan optimize edilmiş takım yolu [14]



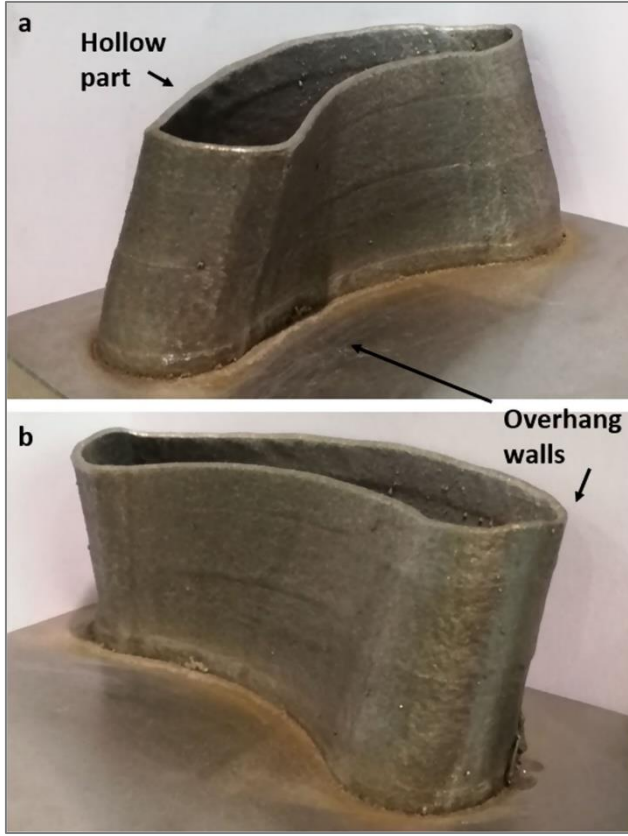
Resim 2.12. Test A: Hibrit takım yolu ve geleneksel strateji aracılığı ile doğru yapı [14]



Resim 2.13. Test B: Geleneksel strateji ile çıkıntı özelliklerine düşen malzeme [14]

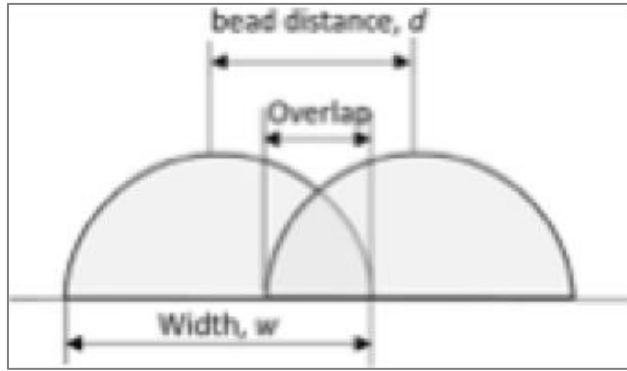


Resim 2.14. Test C: Çok eksenli strateji ile çıkıntı özelliklerine sahip bir parçanın doğru üretimi [14]

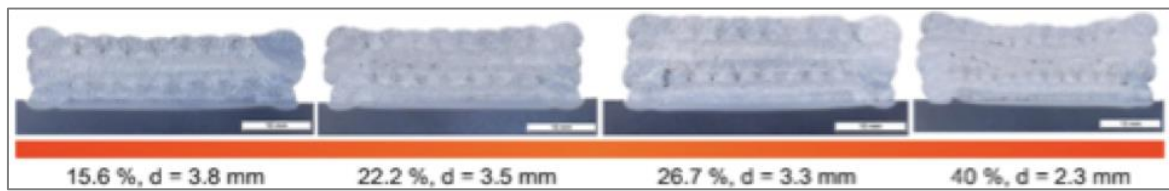


Resim 2.15. Test D: Çok eksenli stratejiye uygulanan uyarlanabilir dilimleme yoluyla çıkıntı duvarlı içi boş kısım [14]

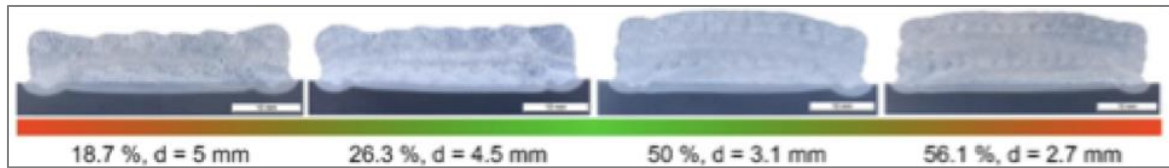
Müller ve Hensel (2022) tarafından, değişen duvar kalınlıkları için üretim stratejileri üzerine yapılan çalışmada; duvar kalınlığı kaynak dikişinin genişliğinden daha küçük artışlarla değişirse, üretilmek istenen şekil mevcut biriktirme stratejilerinden biri seçilerek imal edilemeyeceği için, kaynak dikişleri arasındaki mesafenin yani bindirmenin (Şekil 2.23) değiştirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmış. Kaynak dikişlerinin bindirmesindeki bir değişikliğin boşluklar nedeniyle yapı kalitesinin bozulmasına yok açabileceği için, değişken dikiş bindirmesinin kullanılmasının, dikişler veya katmanlar arasında boşluk oluşması riskini taşımadan, tanımlanan bindirme değerlerinden sapmaya izin veren bir biriktirme parametre seti geliştirilmiş. Çalışmada, kaynak dikiş geometrisine ilişkin dört parametre seti (Resim 2.16, Resim 2.17, Resim 2.18 ve Resim 2.19) analiz edilmiş ve her parametre seti için kaynak dikişi bindirmesine ilişkin tolerans aralıkları belirlenmiş. Parametre setine ve buna karşılık gelen kaynak dikiş geometrisine bağlı olarak bindirme değerinin %15 ile %50 arasında değişiklik gösterdiği bulunmuş. Son katmanın yüzeyinin geometrisi yükseklik farkına göre değerlendirilmiş olup, tel besleme miktarının azalmasıyla son katmanın yüzeyinin daha pürüzsüz hale geldiği ifade edilmiş.



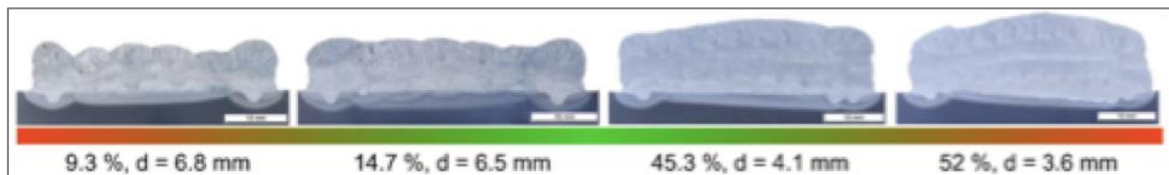
Şekil 2.23. Bindirme tanım şeması [15]



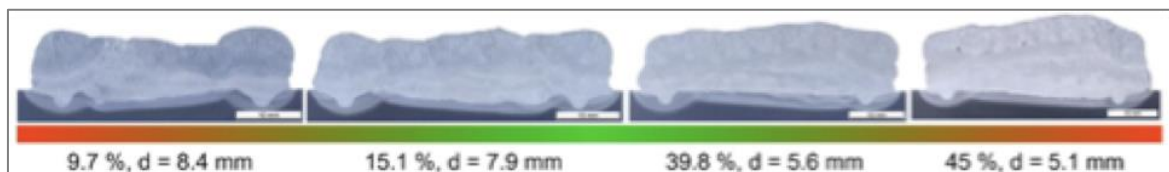
Resim 2.16. Parametre seti 25–2 için farklı kaynak dikişi bindirmeleri/boncuk mesafeleri için makro kesitler [15]



Resim 2.17. Parametre seti 45–3 için farklı kaynak dikişi bindirmeleri/boncuk mesafeleri için makro kesitler [15]

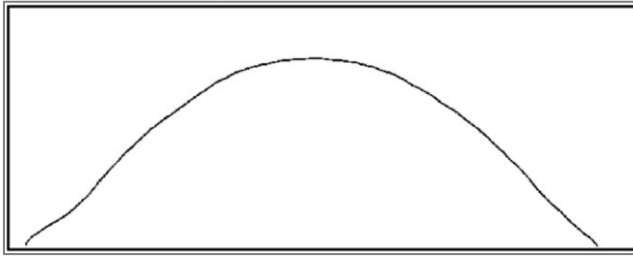


Resim 2.18. Parametre seti 45–4 için farklı kaynak dikişi bindirmeleri/boncuk mesafeleri için makro kesitler [15]

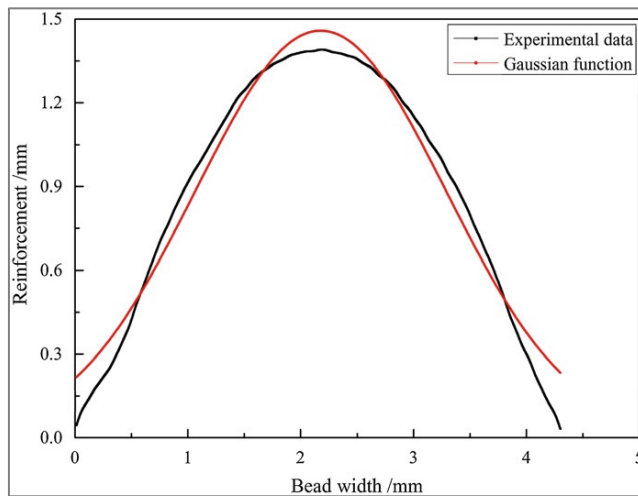


Resim 2.19. Parametre seti 45–6 için farklı kaynak dikişi bindirmeleri/boncuk mesafeleri için makro kesitler [15]

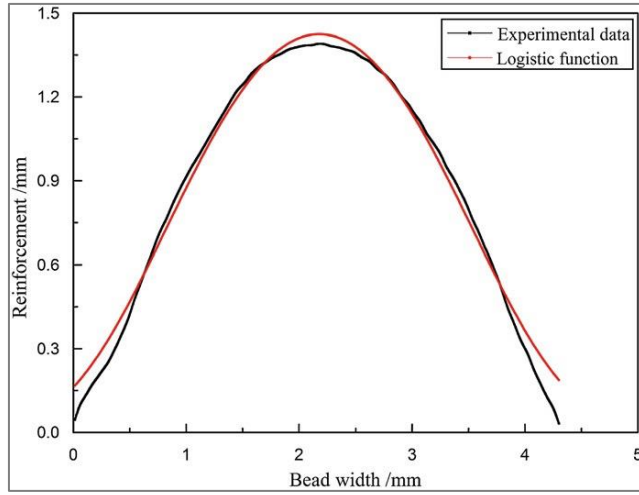
Cao, Zhu, Liang ve Wang (2008) tarafından, robotik metal aktif gaz (MAG) kaynağı ile hızlı üretim için dikişlerin bindirme modeli ve kaynak dikiş kesitinin eğri uyumu üzerine yapılan çalışmada, robotik MAG kaynak dikişlerinin Canny kenar tespiti gerçekleştirilerek veriler bir Gauss filtresi (Şekil 2.24) ile yumuşatılmış ve sırasıyla; Gauss fonksiyonu (Şekil 2.25), lojistik fonksiyonu (Şekil 2.26), parabol fonksiyonu (Şekil 2.27) ve sinüs fonksiyonu (Şekil 2.28) ile üst üste oturtularak karşılaştırılmış. Bu karşılaştırma sonucunda, sinüs fonksiyonu grafiğinin kaynak dikişi kesitini daha yüksek doğrulukla temsil ettiği tespit edilmiştir. Dikiş geometrisini analiz etmek için dikiş kesitinin matematiksel bir modeli geliştirilmiş. “Eşdeğer alanın yüzeye çıkarılması” yöntemine dayalı olarak bindirme katsayısı ve optimum bindirme katsayısı kavramları (Şekil 2.29) ortaya atılarak, bindirme modeli analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada, optimum bindirme katsayısı %63,66 olarak hesaplanmış. “Eşdeğer alanın yüzeye çıkarılması” olgusunun rasyonel ve uygulanabilir olduğu deneyler (Resim 2.20) ile gösterilmiş.



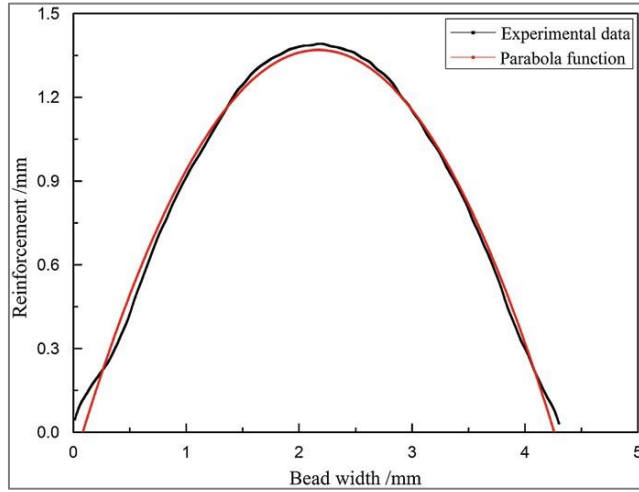
Şekil 2.24. Gauss filtreli kesit profili [16]



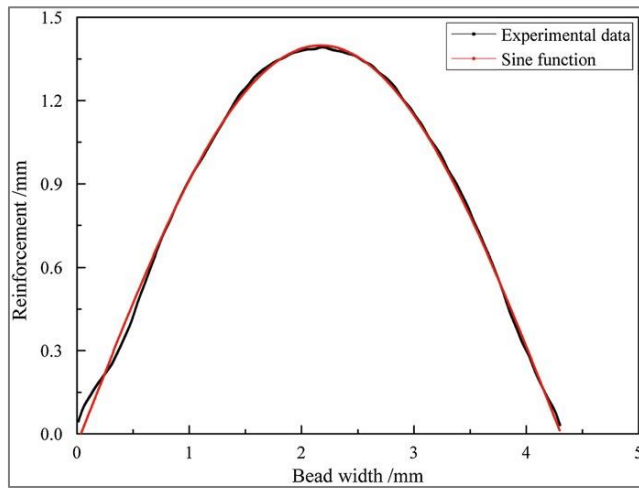
Şekil 2.25. Gauss fonksiyonu ile eğri oturtma [16]



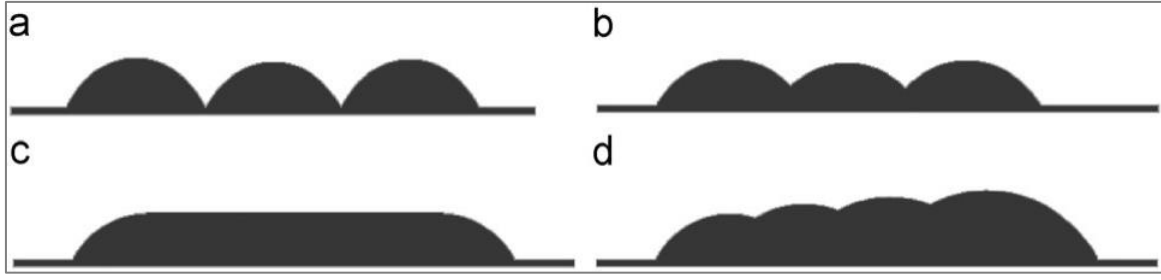
Şekil 2.26. Lojistik fonksiyonu ile eğri oturtma [16]



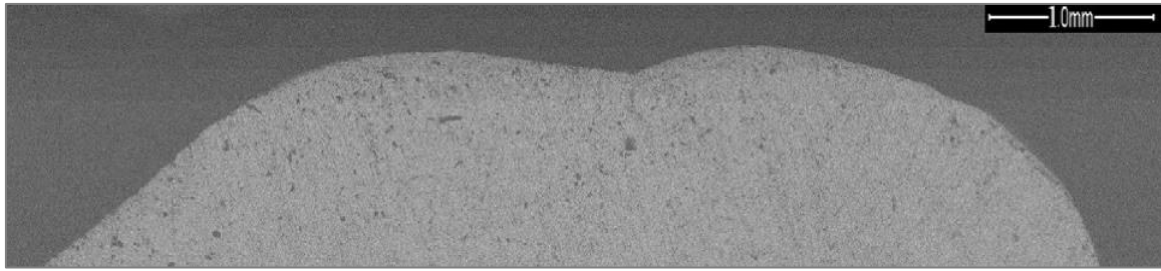
Şekil 2.27. Parabol fonksiyonu ile eğri oturtma [16]



Şekil 2.28. Sinüs fonksiyonu ile eğri oturtma [16]

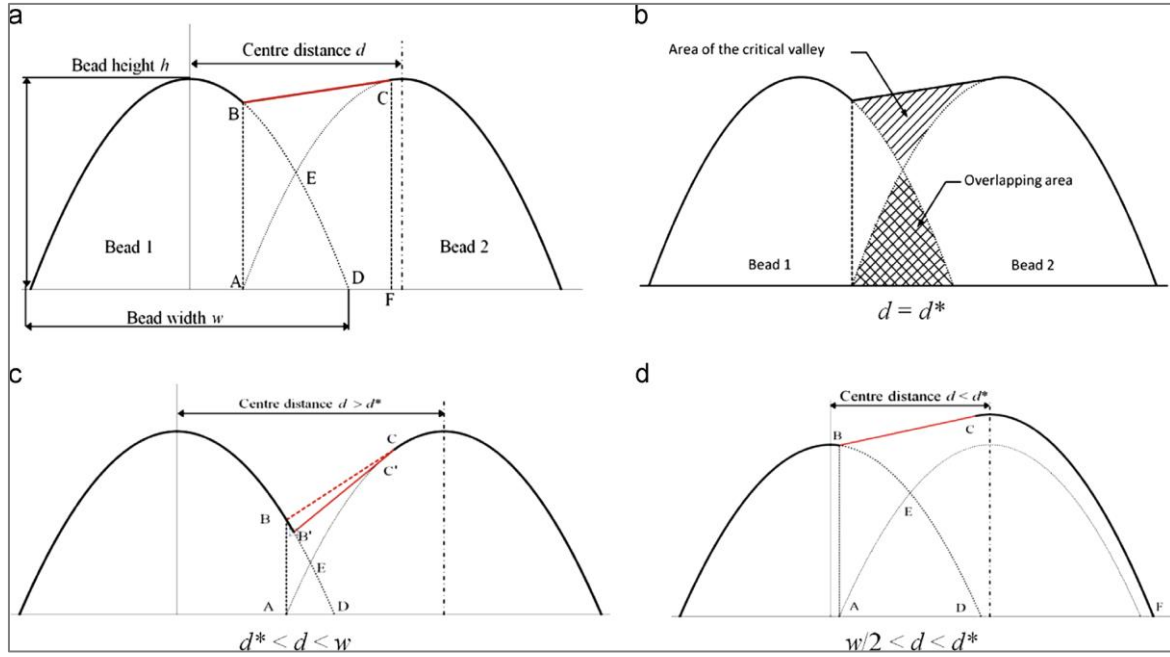


Şekil 2.29. Bindirme katsayılarının sonuçları (a) $\eta=0$, (b) $0<\eta<\lambda$, (c) $\eta=\lambda$, (d) $\lambda<\eta<1$ [16]

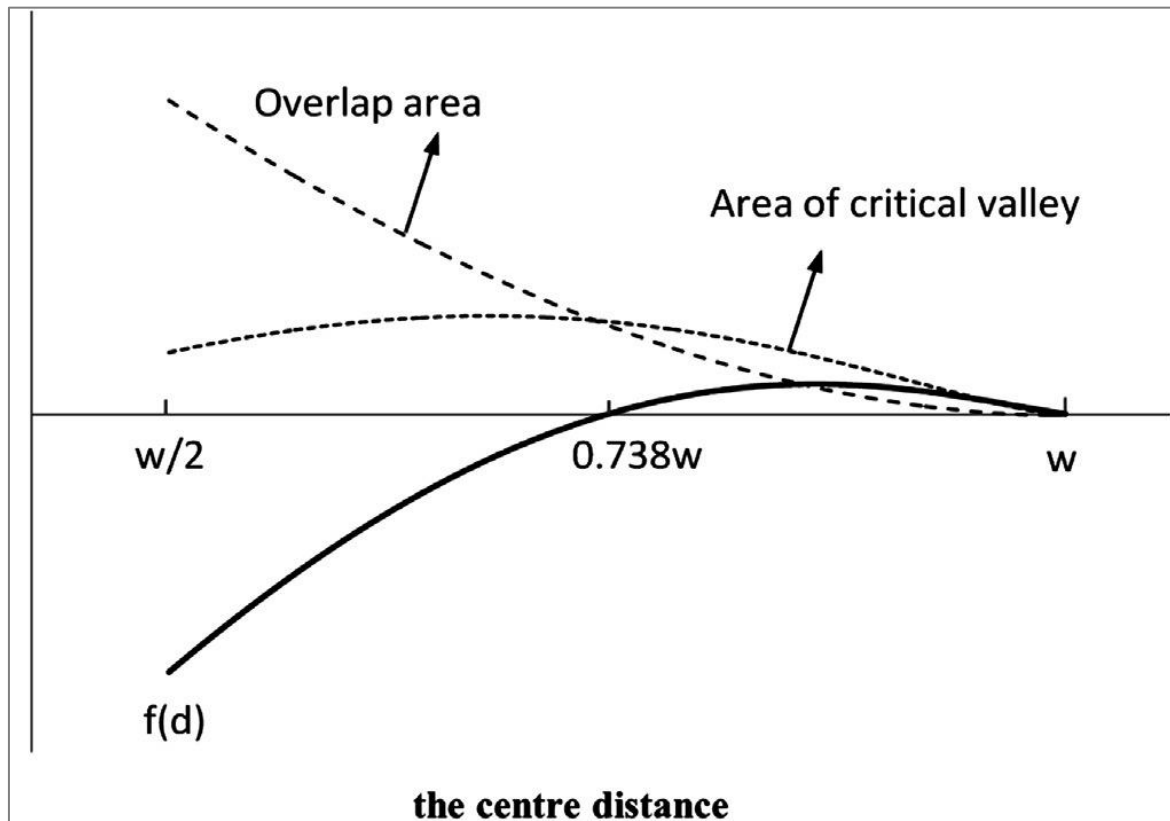


Resim 2.20. $\eta=\lambda$ olduğunda bitişik dikişlerin bindirme sonucu [16]

Ding, Pan, Cuiuri ve Li (2014) tarafından, robotik WAAM için çok dikişli bindirme modeli üzerine yapılan çalışmada; üretilen parçalarda yüksek yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluğun elde edilmesi için, çoklu kaynak dikişi bindirmesi prosesinin modellenmesinin önemi aktarılmış. İlk adım olarak tek bir kaynak dikişi kesitinin eğri oturtma yöntemleri kullanılarak modeli oluşturulmuş. Deneyler sonucunda hem parabol fonksiyonu hem de kosinüs fonksiyonu grafiklerinin, dikiş kesiti profilini doğru şekilde temsil ettiği gösterilmiş. Bindirme ilkesi, daha sonra birden fazla dikişin bindirmesi geometrisini modellemek için detaylandırılmış. Teğet örtüşen model oluşturulmuş (Şekil 2.30) ve kritik merkez mesafesi kavramı (Şekil 2.31) sunulmuş.

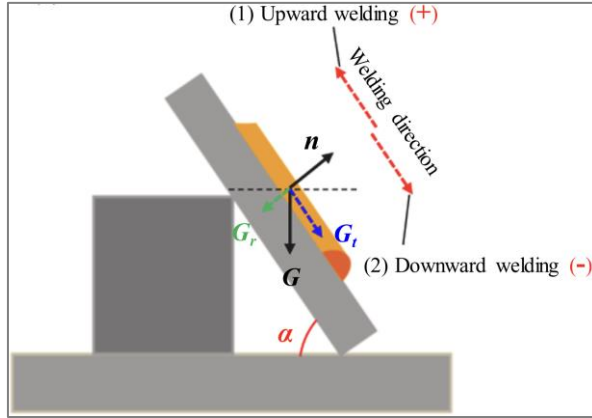


Şekil 2.30. Teğet örtüşen modelin şematik diyagramları [17]

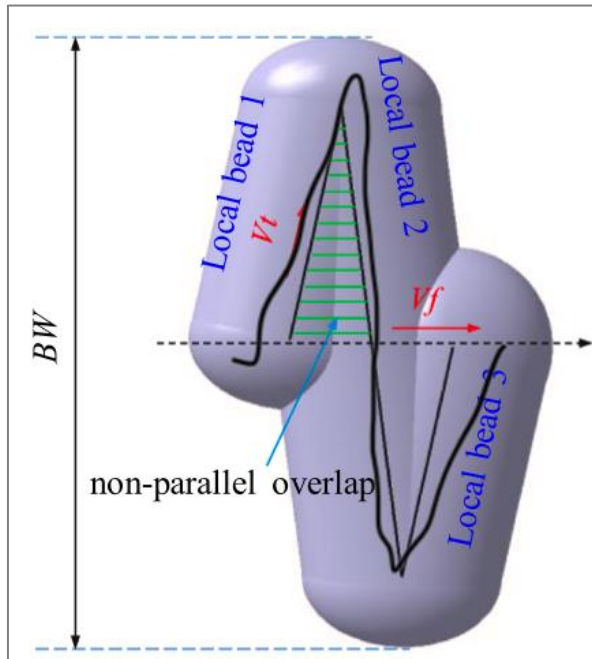


Şekil 2.31. Bindirme alanı, kritik vadinin alanı ve merkez mesafesi d 'nin bir fonksiyonu olarak $f(d)$ [17]

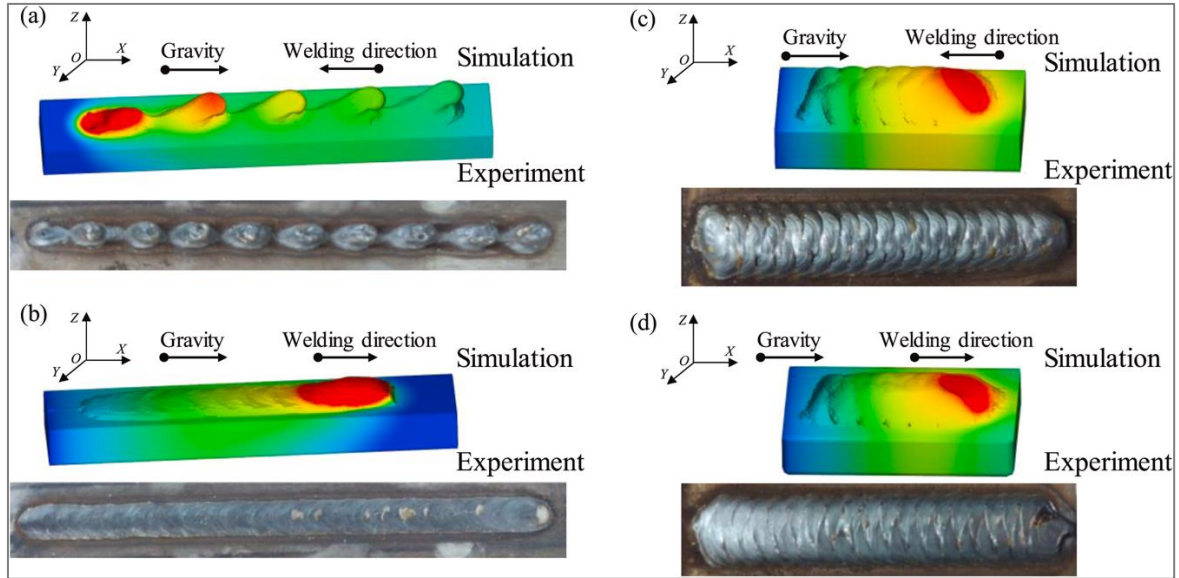
Ni ve diğeri (2023) tarafından, kavisli yüzeylerde zikzak biriktirme ile WAAM için şekillendirme optimizasyonu üzerine yapılan çalışmada, WAAM yöntemiyle kavisli yüzey üzerindeki bileşenlerin imalatında kaynak dikişinin sabit ve tutarlı boyutta olmasının önemine değinilerek, kavisli yüzeylerde yer çekimi etkisinin (Şekil 2.32) neden olduğu şekillendirilebilirlik güçlüğünün üstesinden gelmek amacıyla, WAAM için yeni bir kaynak dikişi biriktirme stratejisi (Şekil 2.33) geliştirilmiş. Kaynak dikişi işlem parametreleri ile tepki parametreleri arasındaki ilişki, yüzey metodolojisi aracılığıyla istatistiksel olarak modellenerek şekillendirme parametrelerinin, kaynak dikişi geometrisine ve şekillendirilebilirliği üzerindeki etkileri araştırılmış (Şekil 2.34).



Şekil 2.32. Yer çekimi ve kaynak yönü arasındaki ilişkinin şematik diyagramı [18]



Şekil 2.33. Zikzak kaynak dikişi modeli [18]

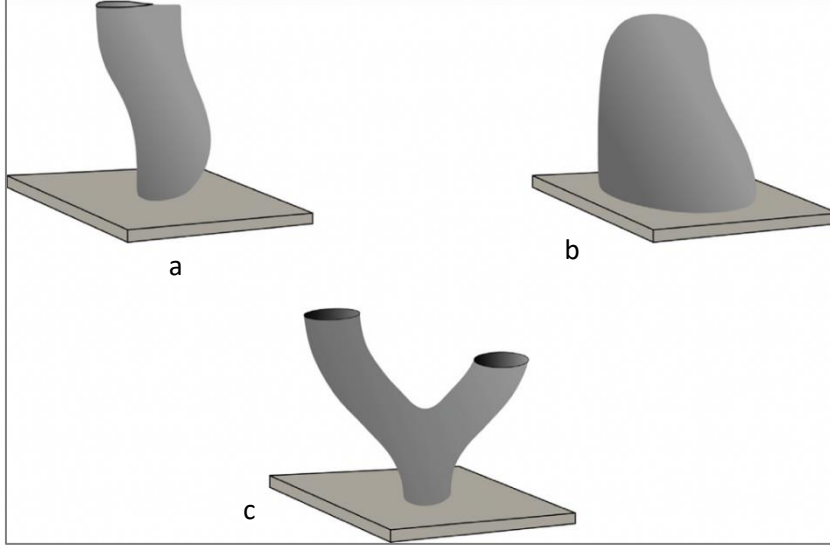


Şekil 2.34. Kaynak dikişinin şekillendirme özellikleri ve morfolojisi [18]

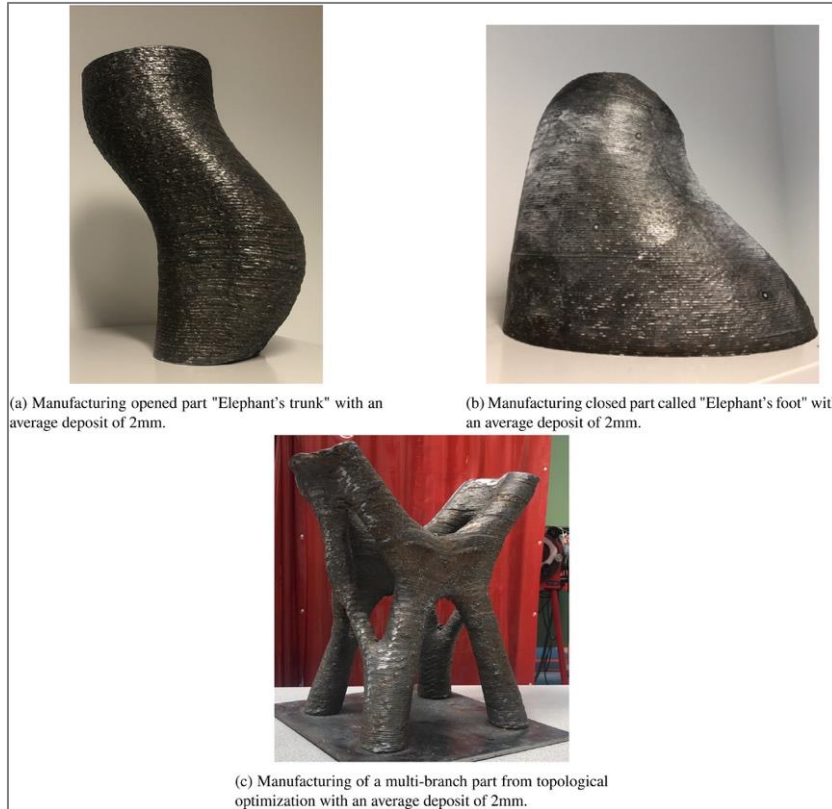
Optimum parametre ile biriktirildiğinde, kavisli bir yüzey üzerinde kaynak dikişinin yüzeyinin boyutsal sapması %1,55'ten ve düzgünlük indeksi 0,035'ten az olan stabil ve tutarlı bir kaynak dikişinin elde edilebileceği belirtilerek; kavisli yüzeylerdeki kaynak dikişlerinin ortalama yüksekliklerinde, bitişik kaynak dikişlerinin tepe yükseklikleri ve kesişim yükseklikleri arasında en fazla 0,5 mm'ye kadar değişiklik görülmüş.

Giordano, Diourte, Bordreuil, Bugarin ve Segonds (2022) tarafından, serbest yüzeyli ince parçalar için WAAM kullanılarak devamlı 3B takım yolu stratejisi için termal skalar alan üzerine yapılan çalışmada; 2,5 boyut tekniği ile birbirine paralel düzlemsel katmanlar kullanılarak bir 3B modelin dilimlere ayrılması stratejisinin, üretilecek geometrilerin karmaşıklığını sınırlamasına çözüm aranmış. Bir katmandan üstteki bir katmana geçiş sırasında arkin bir veya daha fazla sayıda duraklayıp tekrar başlaması ihtiyacı nedeniyle kalite düşüşünü azaltma hedefiyle, devamlı bir takım yolu oluşturulması ve parça geometri kalitesinin artırılması yönünde etkili bir takım yolu planlama stratejisi geliştirilmiş. Kaynak torçunun hareket hızının, sabit tel besleme hızını sağlayacak şekilde kontrol edilmesiyle, imalat boyunca malzemenin biriktirilmesinin devamlılığına olanak sağlayan bu strateji, ince şekilli parçalar için devamlı bir spiral takım yolu geliştirilmesi ile çözüm sağlamış. Yöntemin temel noktası, optimal kapanma noktasının belirlenmesinden sonra, kapalı parçaların imalatına veya düzlemsel olmayan serbest kenarlara sahip açık parçaların doğrudan imalatına olanak sağlayan 6 eksenli robotik kol kinematiği ile ilişkili bir termal skalar alanının kullanılmasıdır [19]. Geliştirilen yöntemin; açık (Şekil 2.35 a), kapalı (Şekil

2.35 b) ve çok dallı (Şekil 2.35 c) olan üç parçanın üretilmesi (Resim 2.21) ve parçaların hassas ölçümünün yapılması ile sağlaması yapılmış.

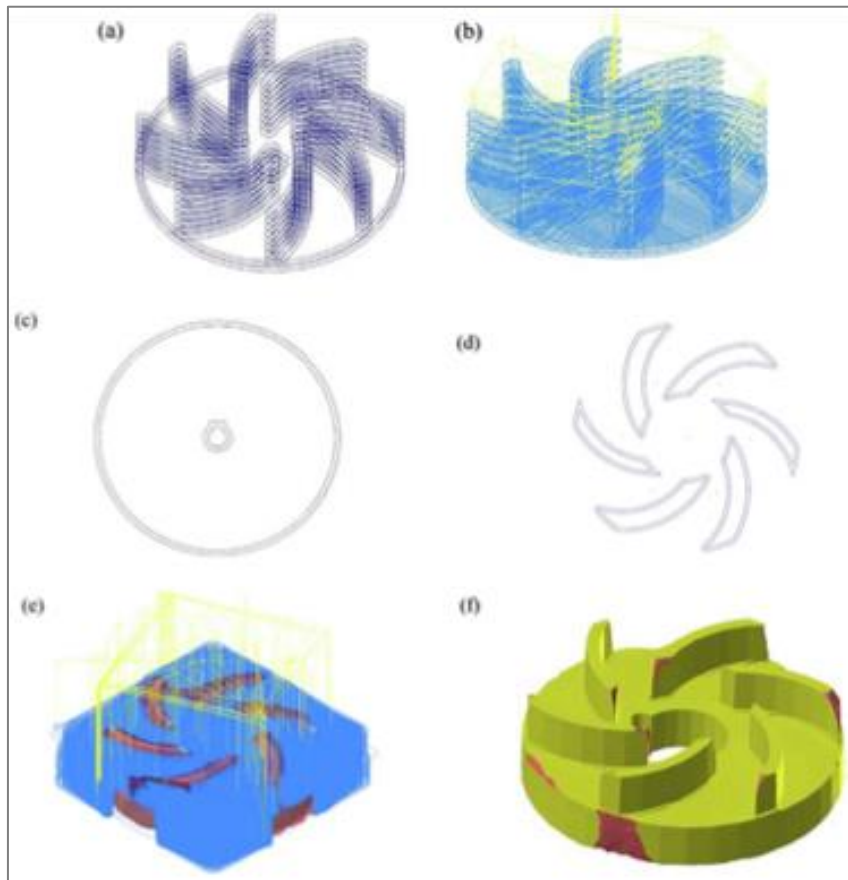


Şekil 2.35. (a) “Fil Hortumu” adlı açık parça, (b) “Fil Ayağı” adlı kapalı parça, (c) Simetrik olmayan çok dallı parça [19]

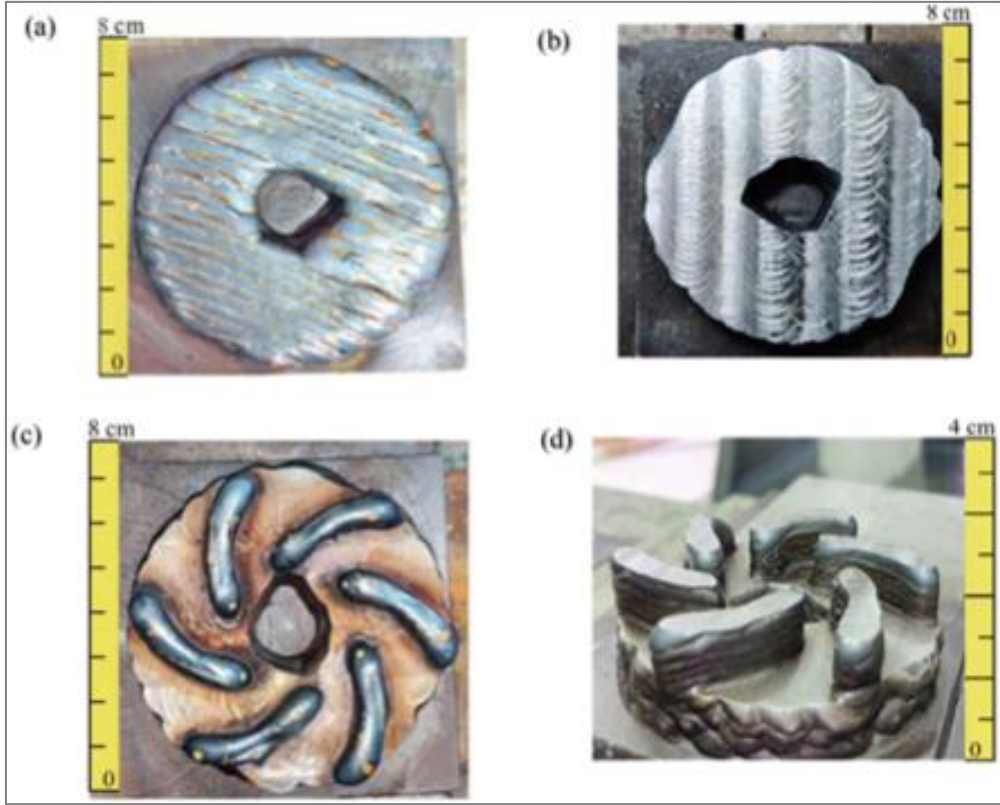


Resim 2.21. İmal edilmiş parçalar; (a) açık, (b) kapalı, (c) simetrik olmayan çok dallı parça [19]

Sarma, Kapil, ve Joshi (2022) tarafından, CAD ve üç eksenli hibrit WAAM ile üretim için yapı geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmada; üretilen parçanın kalitesini artırmaya yardımcı olan bilgisayar destekli proses planlamada, geleneksel çözümler standart üçgen dil (STL) dosya formatıyla sınırlı olduğu için proses parametrelerine sınırlı erişim sağladığı belirtilmiş. Talaşlı imalat için geliştirilen bir CAD/ bilgisayar destekli imalat (CAM) sistemi eğer gerekli koşulları karşılıyor ise hibrit WAAM'ın, bilgisayar destekli proses planlaması için kullanılabileceği varsayımı üzerine, planlamanın herhangi bir CAD/CAM sisteminin kullanılmasına yönelik genelleştirilmiş bir yapı önerilmiş. Çeşitli üretim stratejileri seçilmesine olanak tanıyan ve çeşitli CAD formatlarını destekleyen bu yapı sayesinde, WAAM takım yolu ile talaşlı imalat takım yolunun ortak bir koordinat sisteminde oluşturulabilmesi hedeflenmiş. Parçanın üretim sırasında platformlar arasında taşınması için harcanan zaman maliyetinin ortadan kaldırılmasını sağlayan bu yapının doğrulanması için bir pervane imal edilmiş (Şekil 2.36 ve Resim 2.22).

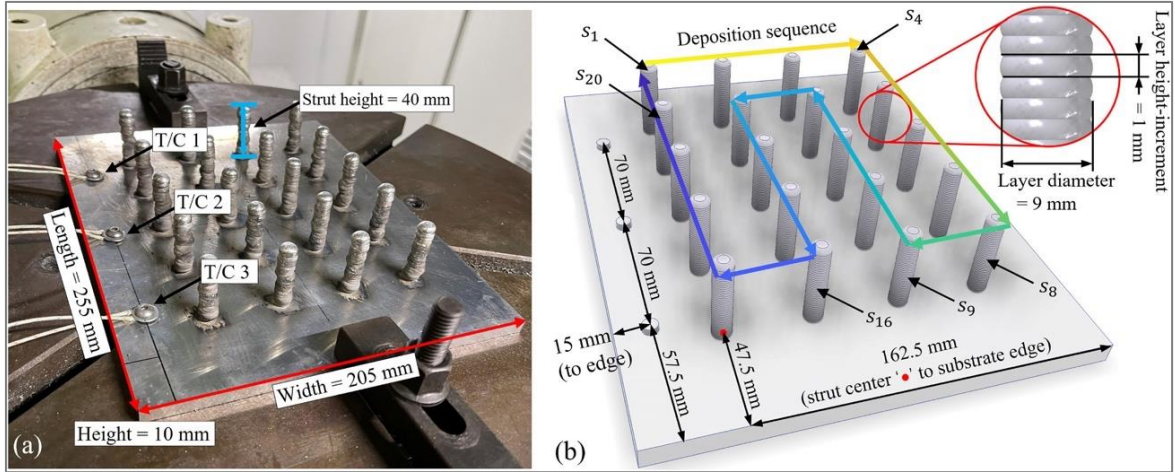


Şekil 2.36. (a) Pervanenin tamamının dilimleri; (b) Çarkın tamamının takım yolu; (c) 2. dilimde elde edilen kontur; (d) 5. dilimde elde edilen kontur; (e) Son İşlem Freze takım yolu; (f) Frezelenmiş parçanın nihai CAD modeli [20]

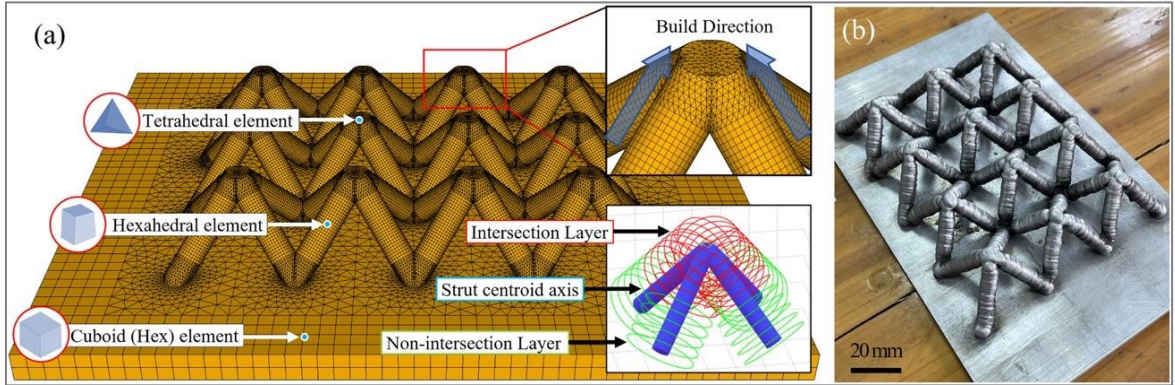


Resim 2.22. (a) Basılmış 2. katman; (b) Yüzey frezelemeden sonraki ara katman; (c) Bıçakların basılması; (d) 3 eksenli GMAW tabanlı hibrit TAEİ kurulumu kullanılarak pervanenin nete yakın nihai şekli [20]

Yu ve diğerleri (2022) tarafından, kafes yapıların WAAM ile imalatı için dikme düzeni kontrolü ve imal süresi optimizasyonu üzerine yapılan çalışmada; alüminyum alaşımlarının daha yüksek ısı iletkenlikleri nedeniyle, orta ve büyük ölçekli serbest biçimli metalik kafes yapılarının imalatında tercih edilmesine rağmen, desteklerin (Şekil 2.37) oluşturulmasında katmanlar arası sıcaklıktan daha kolay etkilendiği belirtilmiştir. Isılçift ve termal görüntüleme cihazı ile yapılan sıcaklık ölçümleri yoluyla kalibre edilip doğrulanan sonlu elemanlar modeli (Şekil 2.38), alüminyum alaşımlı kafes yapısının WAAM termal sürecinin sayısal simülasyonu için geliştirilmiştir. İstikrarlı destek yapısını elde ederken imalat süresini optimize etmek hedefiyle katmanlar arası sıcaklık dağılımını sabit tutabilmek için yeni bir imalat sırası planlama stratejisi geliştirilmiştir.



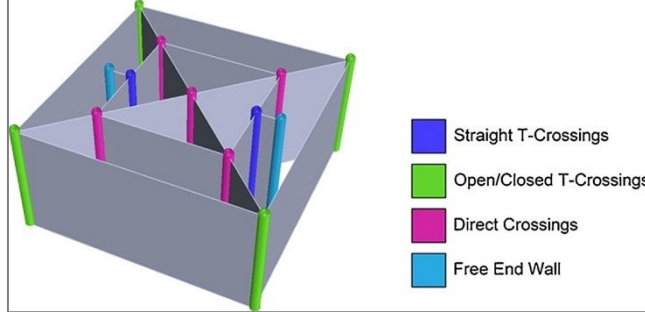
Şekil 2.37. (a) Alt tabakanın destek geometrisi; (b) dikmeler için yerleştirme sırasının şeması [21]



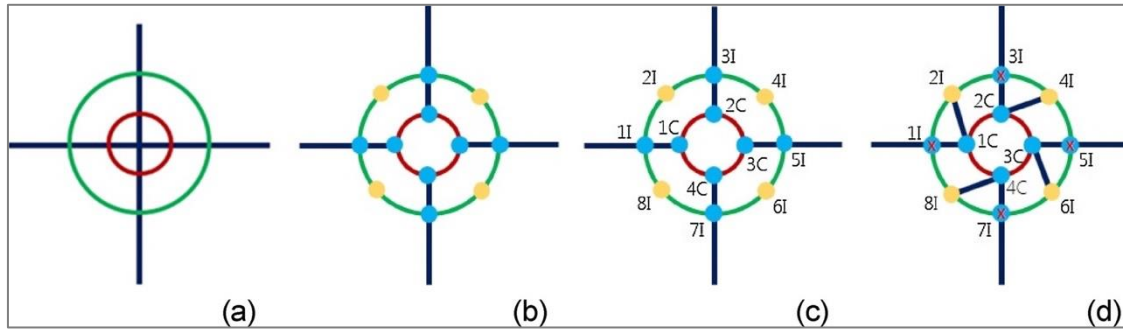
Şekil 2.38. (a) Kafes yapısı için sonlu eleman modeli ve (b) WAAM ile üretilmiş basit bir model [21]

Venturini, Montevecchi, Bandini, Scippa ve Campatelli (2018) tarafından, ince duvarlı bileşenlere özel WAAM için özellik tabanlı üç eksenli CAM yazılımı üzerine yapılan çalışmada, parça kalitesini ve imalat prosesinin verimliliğinin; tel besleme hızına, gerilime, akıma ve tercih edilen takım yoluna bağlı olduğu belirtilmiştir. Mevcut durumda WAAM'a özel CAM yazılımı; birden fazla kaynak geçişinin üst üste binmesiyle yani çok geçişli (Şekil 2.39) bir stratejiyle takım yolu oluşturmasına karşılık, WAAM geniş katmanlar oluşturabildiği için ince duvarlı bileşenlerle çalışırken tek geçiş stratejisi (Şekil 2.40) kullanılarak verimliliğin artırılması hedeflenmiştir. Takım yolunu oluşturmak için parçanın orta yüzey temsilini girdi olarak kullanan ve tek geçişli bir takım yolu stratejisi kullanan WAAM'a özel CAM yazılımı kullanılmış. Geometrik hataları en aza indirmek ve sonraki katman imalatı için gerekli işleme paylarını (Şekil 2.41) sağlamak amacıyla; serbest uç duvarları, t geçişleri, direkt geçişleri, izole borular gibi özelliklerin her biri için özel bir

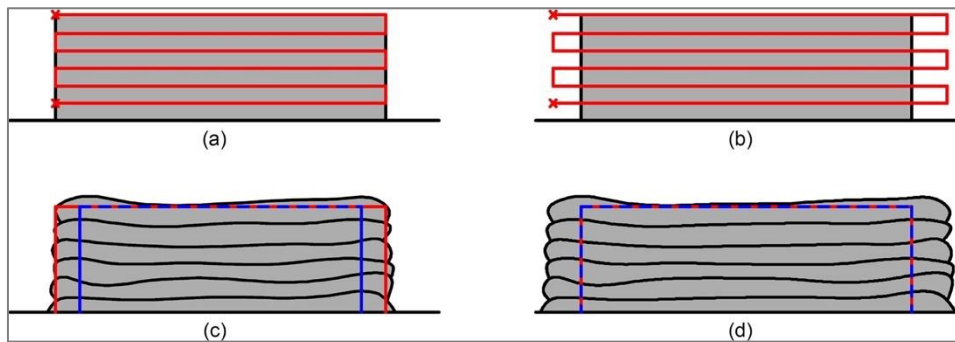
strateji (Şekil 2.42) geliştirilerek, geliştirilen test senaryosu ile çalışma doğrulanmış (Resim 2.23).



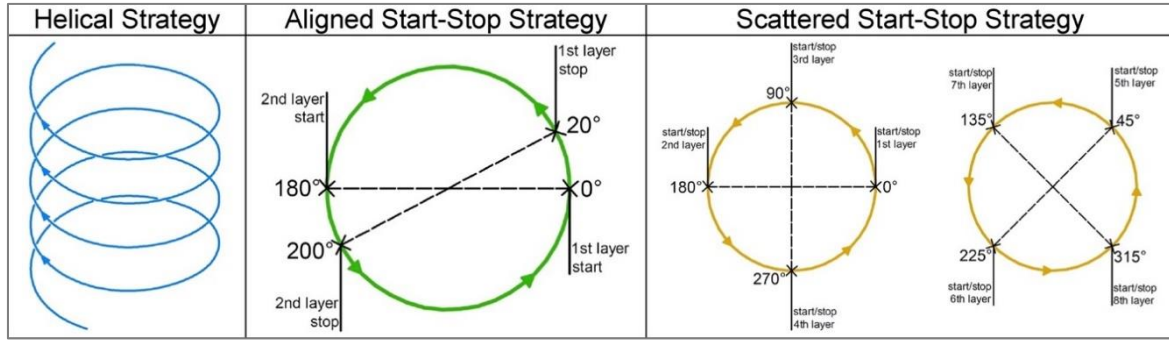
Şekil 2.39. Özellik tanıma prosedürünün sonucu: her farklı özellik, farklı bir renk kullanılarak vurgulanır [22]



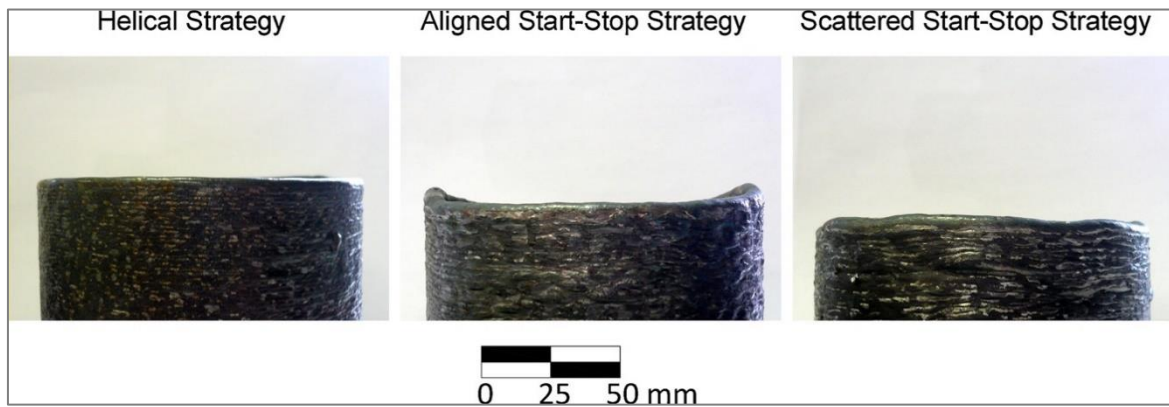
Şekil 2.40. Önerilen bilgisayar destekli üretim yazılımında uygulanan doğrudan geçiş için takım yolunu hesaplama prosedürü [22]



Şekil 2.41. Düz bir duvar için serbest uç duvarlar için takım yolu uzantılarının önemi (a) uzantısız takım yolu, (b) uzantıları olan takım yolu, (c) beklenen sonuç ve etkin sonuç uzantılar durumu, (d) uzantılı bir takım yolu durumunda beklenen sonuç ve etkili sonuç [22]

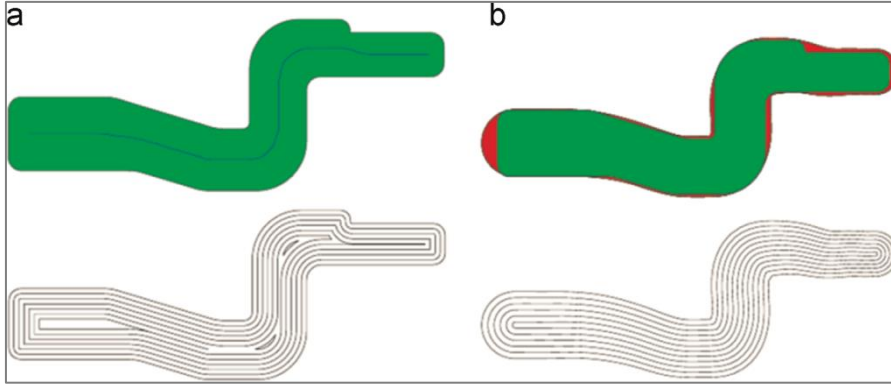


Şekil 2.42. Borular için biriktirme stratejileri [22]

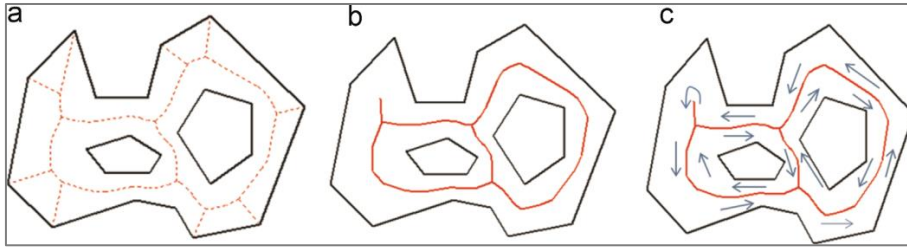


Resim 2.23. Sunulan üç biriktirme stratejisiyle üretilen üç farklı borunun üst yüzeyleri [22]

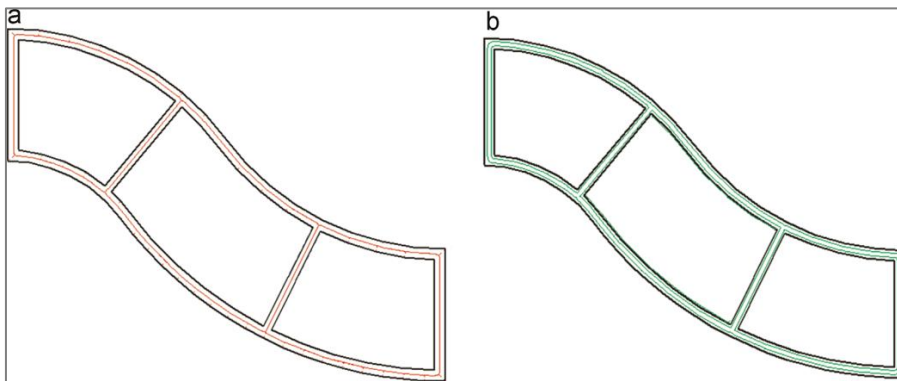
Ding, Pan, Cuiuri ve Li (2015) tarafından, ince duvarlı yapıların WAAM için pratik bir yol planlama metodolojisi üzerine yapılan çalışmada, bir geometrinin iskeletini temsil eden orta eksen dönüşümünü temel alan bir takım yolunun (Şekil 2.43), belirlenen herhangi bir kesit geometrisini boşluklar olmadan tamamen doldurabildiği bir metodoloji sunulmuş. Adım mesafesinin hem ince duvarlı yapılar hem de katı yapılar için malzeme verimliliğini etkilemesi ve ince duvarlı yapıların malzeme verimliliği açısından adım mesafesine daha duyarlı olduğu tespiti üzerine, maksimum malzeme verimliliğine karşılık gelen optimum adım atma mesafesi elde edilebilmiş. Bu da biriktirme parametrelerinin optimizasyonuna olanak tanımış. Geliştirilen metodoloji, katı yapıları (Şekil 2.44) ve ince duvarlı yapıları (Şekil 2.45) içeren karmaşık yapılara ilişkin modellerde kullanılmış. Orta eksen dönüşümü tabanlı takım yolu desenleri ile kontur yol desenleri arasında yapılan karşılaştırmada (Resim 2.24), önerilen takım yolu stratejisinin ince duvarlı yapıların WAAM için faydalı olduğu, boşluksuz kesitler açısından önemli ölçüde performans artışı göstermiş.



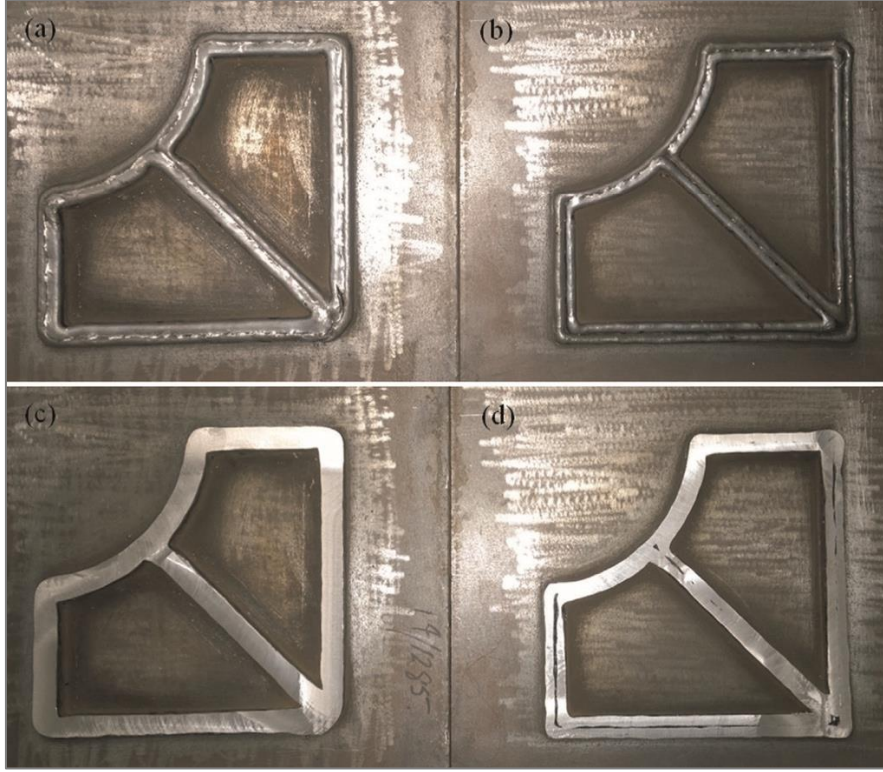
Şekil 2.43. MAT'tan oluşturulan yolun çizimi. (a) yukarı: orijinal geometri (yeşil bölge) ve geometrinin MAT'si (siyah çizgi) ve aşağı: ortada boşluklar bulunan kontur yolu desenleri açıkça görülüyor; (b) yukarı: kırmızı bölge aşırı malzeme birikmesidir ve aşağı: boşluksuz MAT yolu desenleri [23]



Şekil 2.44. İki delikli şeklin örneği. (a) noktalı çizgilerle temsil edilen hesaplanan MAT; (b) kırmızı çizgilerle tanımlandığı üzere birden fazla dal; ve (c) saat yönünün tersine yönde bir dallanma döngüsü ve saat yönünde içeride diğer iki dallanma döngüsü oluşturdu [23]



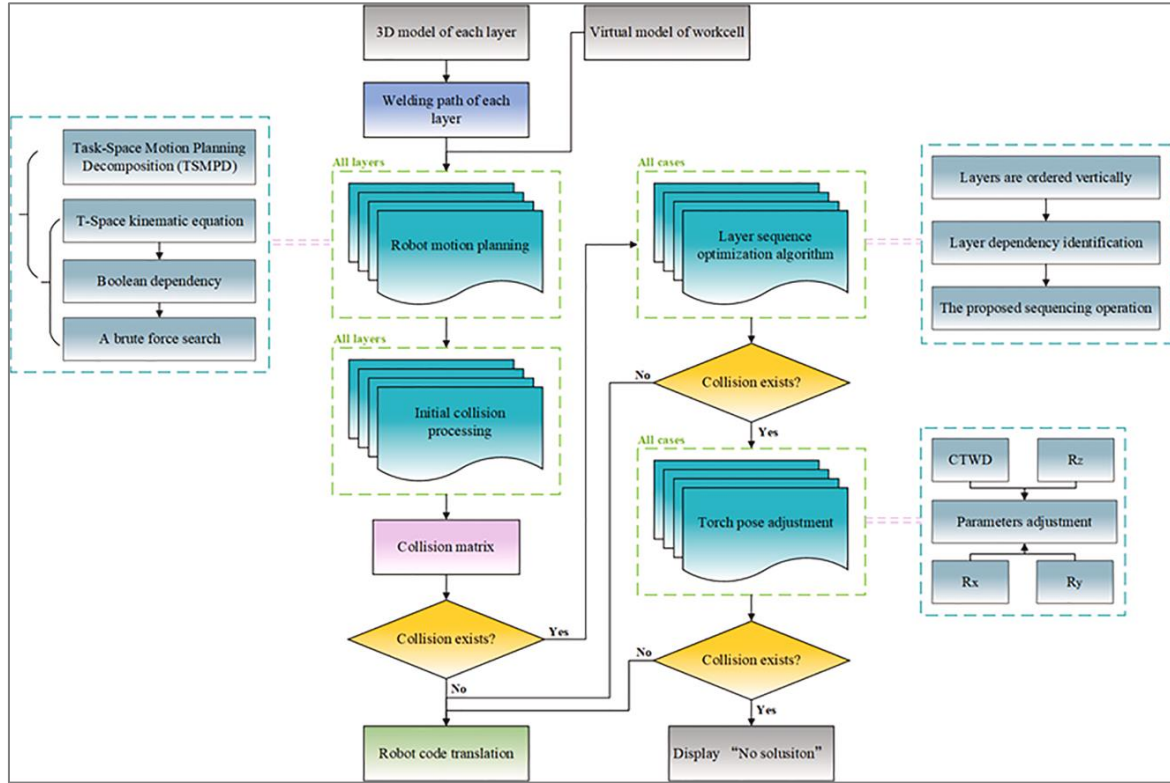
Şekil 2.45. İnce duvarlı kavisli yapı. (a) geometri siyah çizgilerle temsil edilir, MAT noktalı kırmızı çizgilerle temsil edilir ve kırmızı düz çizgiler dalları temsil eder. (b) oluşturulan kırılmış yol [23]



Resim 2.24. Önerilen MAT yol desenleri ve geleneksel kontur yol desenleri tarafından üretilen katmanların deneysel olarak karşılaştırılması. (a) önerilen MAT yolu desenleri tarafından üretilen katmanlar, (b) geleneksel kontur yolu desenleri tarafından üretilen katmanlar, (c) önerilen yol desenleri tarafından üretilen katmanların bitmiş yüzeyi ve (d) MAT yolu desenleri tarafından üretilen katmanların bitmiş yüzeyi geleneksel kontur yolu desenleri [23]

Yuan ve diğerleri (2021) tarafından, çok yönlü WAAM sisteminin otomatik bir süreç planlama algoritmasıyla entegrasyonu üzerine yapılan çalışmada; düşük maliyetli ve yüksek verimlilikte üretim talebinin artmasıyla birlikte daha karmaşık hale gelen ileri üretim sistemlerinin geliştirilmesine odaklanılarak, WAAM teknolojisinin taşınabilir bileşenlerin doğrudan imalatı için sunduğu potansiyel belirtilmiş. Bu kapsamda, çok yönlü WAAM işlemi için otomatikleştirilmiş bir proses planlama algoritması (Şekil 2.46) geliştirilerek, bu algoritmanın çevrimdışı otomatik robot programlama motoru ve WAAM ekipmanı ile entegrasyonu tanıtılmış. Geleneksel WAAM süreçlerinde, dikey yönde ilerleme yapılırken ek destek yapılarına ihtiyaç duyulduğu ve çözüm olarak ilave serbestlik dereceleri ile yeni robotik sistemlerin entegre edilmesi yönünde çabaların sistemin karmaşıklığını artırdığı ifade edilmiş. Çözüm olarak; robot hareket planlaması, başlangıç çakışma işleme (Şekil 2.47), katman sırası optimizasyonu (Şekil 2.48) ve kaynak torcu poz ayarlamasından (Şekil 2.49) oluşan dört aşamalı algoritma önerilmiş. Geliştirilen sistemi doğrulamak için

kullanılan yazılım ve donanım bileşenleri ayrıntılı bir şekilde aktarılarak, çıkıntılı özelliklere sahip bir parçanın üretilmesini içeren bir vaka çalışması yapılmış.

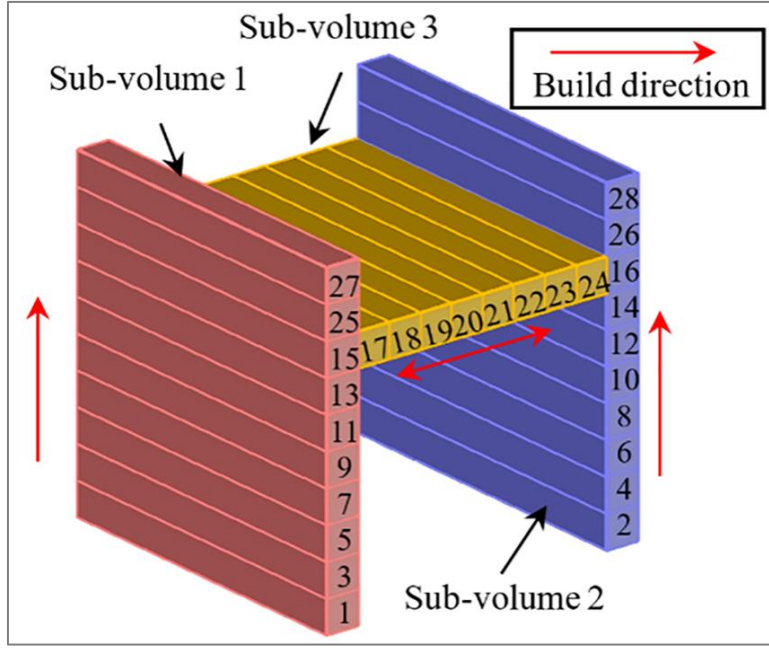


Şekil 2.46. Algoritmanın genel iş akışı [24]

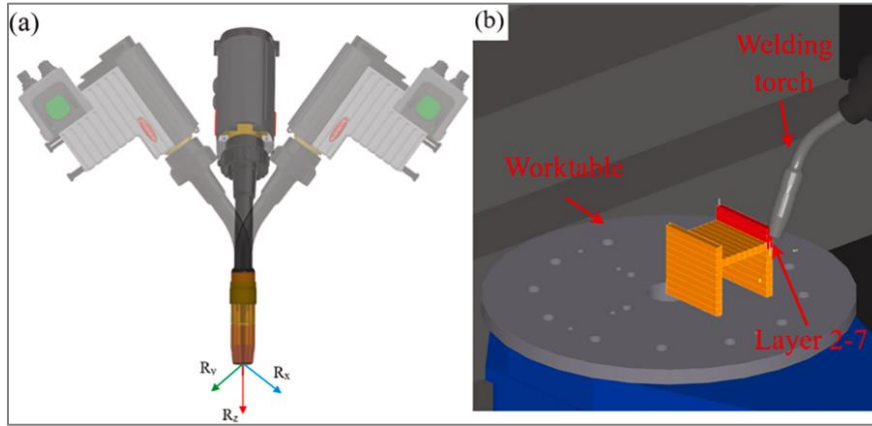
	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer n
Weld path of Layer 1	0	×	×	0
Layer 2	0	×	0	0
Layer 3	×	0	×	0
Layer 3	0	0	0	×

0 Collision free × Collision occurs

Şekil 2.47. Çakışma matrisi C'nin yapısı [24]



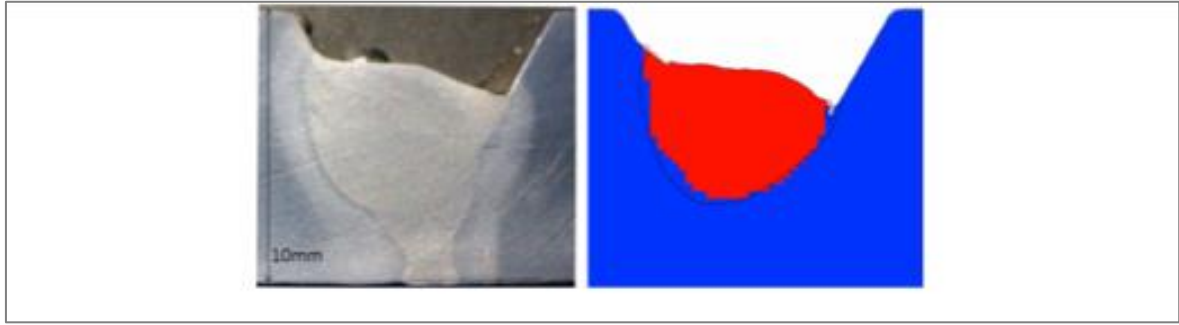
Şekil 2.48. Katman biriktirme sırası, alttan üste doğru yeniden düzenlendi [24]



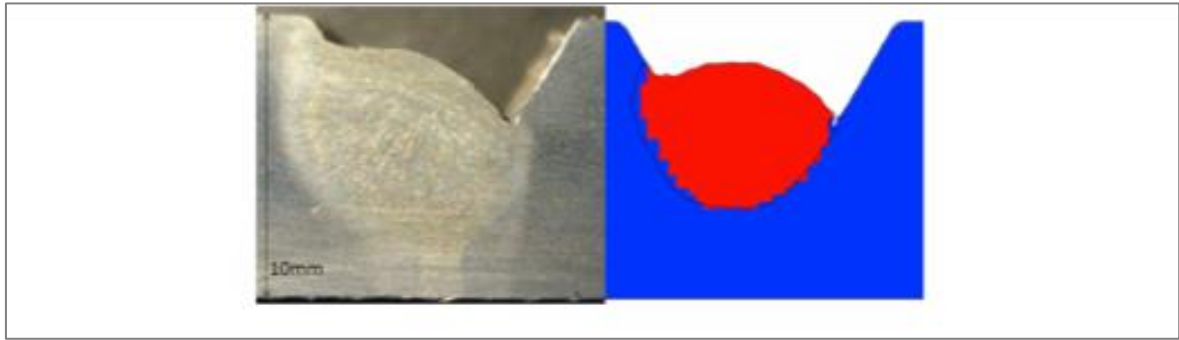
Şekil 2.49. (a) R_z etrafındaki meşale dönüşü ve (b) ayarlanmış meşale açısıyla simülasyon sonuçları [24]

Cho ve Na (2015) tarafından, V-oluklu gaz metal ark kaynağında ikinci geçiş için erimiş havuz davranışları üzerine yapılan çalışmada; eriyik havuz davranışları çeşitli kaynak pozisyonlarında incelenerek, ortaya çıkan termal ve hidrodinamik etkiler tartışılmış ve simülasyon sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmış. İlk vaka çalışmasında (Şekil 2.50), düz pozisyon kaynak işleminde eriyik havuz uzunluğunun ve sıcaklık profillerinin analizi yapılmış. İkinci vaka çalışmasında (Şekil 2.51), ters pozisyonda yapılan kaynak işleminin dinamik akış ve sıcaklık desenleri üzerindeki etkileri belirtilerek, eriyik havuzun yerçekiminin etkisiyle daha uzun süre sıvı kaldığı ve katılaşmış kaynak dikişlerinin daha

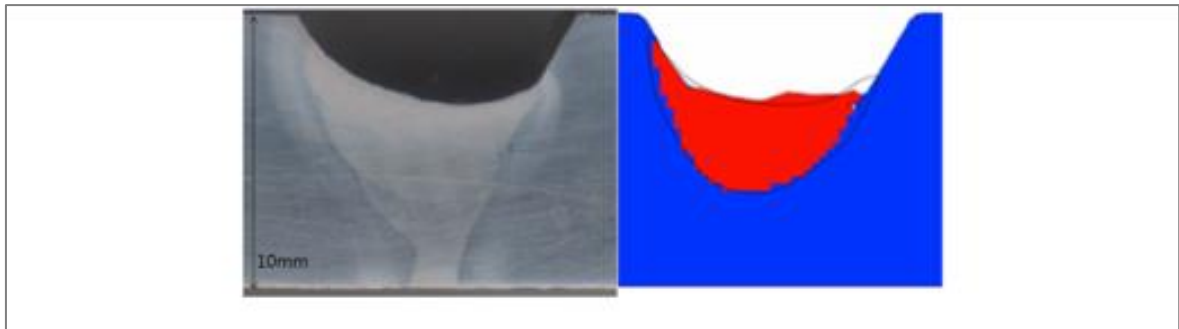
konveks olduğu gösterilmiş. Üçüncü vaka çalışmasında (Şekil 2.52) ise, dikey aşağı pozisyonundaki kaynak işlemi sırasında yerçekimi etkisiyle eriyik havuzun öne doğru itilerek hızla katılaştığı ve kaynak dikişinin konkav şeklini alarak eriyik havuzun yerçekimi tarafından yatay yönde itildiğı gösterilmiş.



Şekil 2.50. İlk vaka simülasyon sonucunun deneyle karşılaştırılması [25]



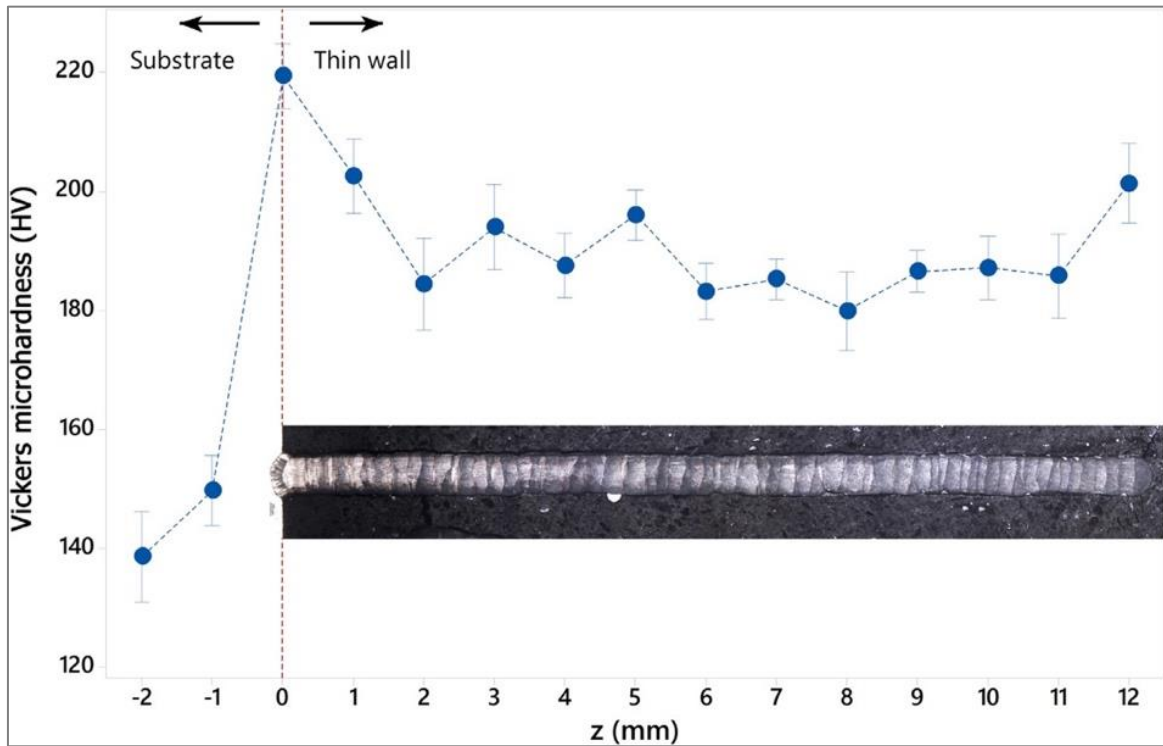
Şekil 2.51. İkinci vaka simülasyon sonucunun deneyle karşılaştırılması [25]



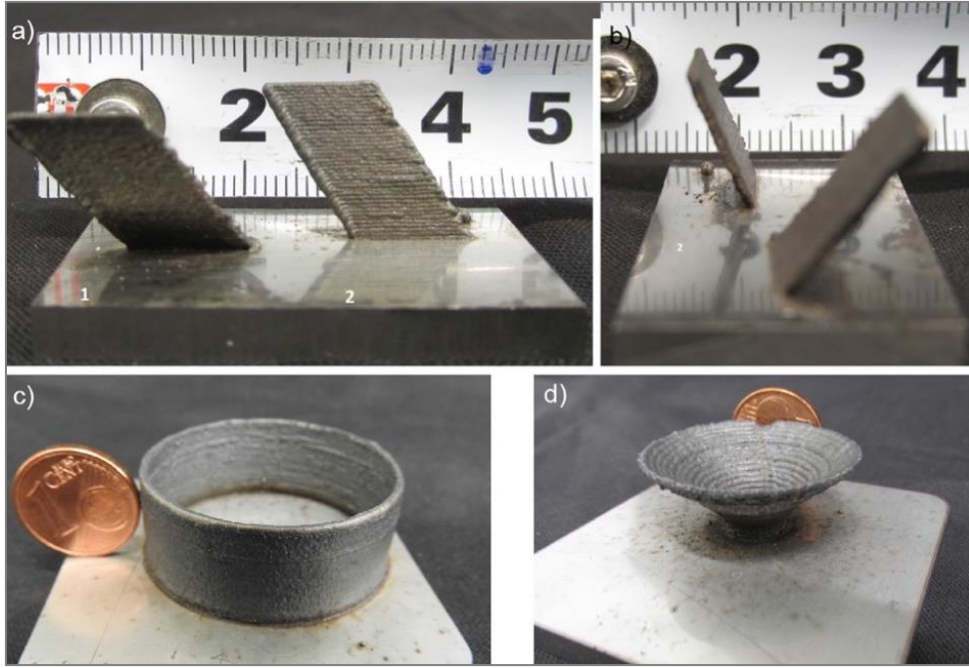
Şekil 2.52. Üçüncü vaka simülasyon sonucunun deneyle karşılaştırılması [25]

Demir (2017) tarafından, ince duvarlı yapıların eklemeli imalatı için mikro lazer metal tel biriktirme üzerine yapılan çalışmada; mikro metal tel biriktirme sürecinin geometrik özellikleri, malzeme kullanım verimliliğı ve ince duvarlı yapıların üretimi üzerindeki etkileri

(Şekil 2.53) incelenmiş. Farklı parametrelerin tek katmanlı biriktirme üzerindeki etkileri incelenerek, mikro yapı ve nüfuziyet derinlikleri analiz edilmiş. Yine farklı parametrelerin farklı yükseklik artışlarının etkisiyle çok katmanlı biriktirme üzerindeki etkileri incelenerek, üretilen yapıların ortalama yükseklik ve genişlikleri incelenmiş. Bu çalışmalar sonucunda; tek katmanlı biriktirme işlemlerinde verimlilik değerinin %50 ile %90 arasında değiştiği, çok katmanlı biriktirme işlemlerinde ise bu oranın %95 ile %99 arasında olduğu tespit edilmiş. İnce duvar yapıların (Resim 2.25) üretilmesinde stabil bir biriktirme sürecinin elde edilmesi için en uygun yükseklik artış aralığı tespit edilmiş.

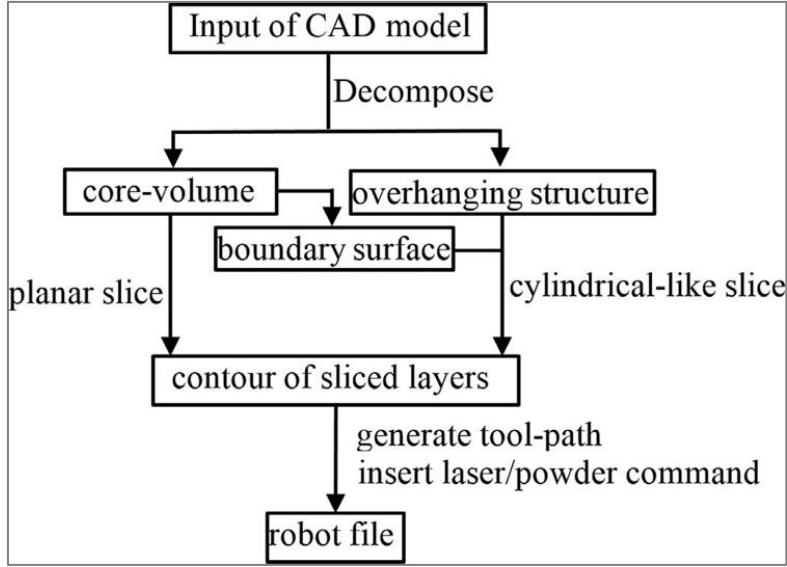


Şekil 2.53. Üretilen ince duvarların mikro sertlik profilleri [26]

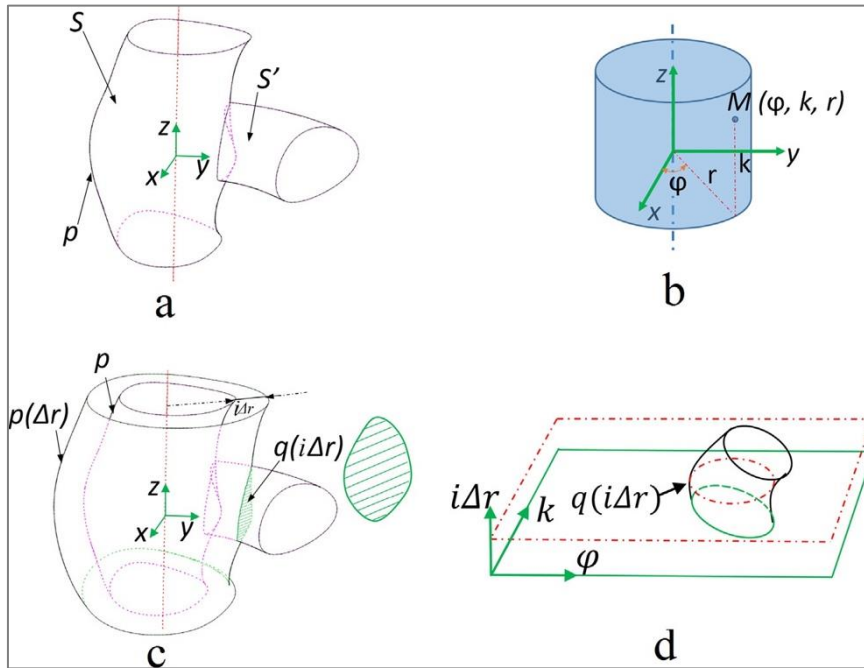


Resim 2.25. İnce duvarlı yapıların eklemeli imalatı [26]

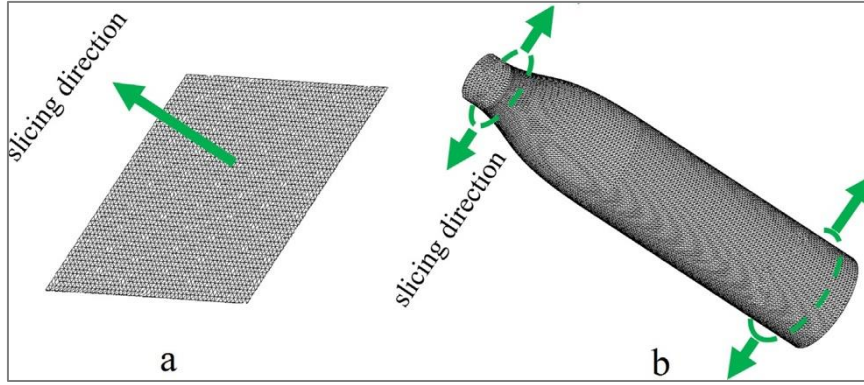
Ding, Dwivedi ve Kovacevic (2016) tarafından, 8 eksenli robotik lazer tabanlı doğrudan metal biriktirme sistemi için proses planlaması (Şekil 2.54) üzerine yapılan çalışmada; robot kontrollü lazer tabanlı doğrudan metal biriktirme sürecinin etkinliğini artırmak amacıyla, işlem planlaması hedeflenmiş. Karmaşık döner parçaların üretilmesi için hibrit bir dilimleme yöntemi ve bu yöntemin takım yolu oluşturma algoritması tanıtılmış. Döner parçaların imalatı için uygun olan temel ve üst yüzeylerin belirlenmesi ve üretim zorluklarına göre çekirdek hacim ve çıkıntılı yapılar gibi bölümlere ayrılması işlemleri için uzaysal haritalama (Şekil 2.55) çalışması yapılmış. Parmak dişli kenar ve yüzeylerin dilimlenmesi için ve çıkıntılı yapılar için dilimleme tabanı olarak çekirdek hacmin dış yüzeyinin (Şekil 2.56) kullanılması ile birlikte, dilim kalınlığının nasıl belirlendiği ve dilimler arasındaki etkileşimin nasıl optimize edildiği gösterilmiş. Dilimlemelerden elde edilen kesit konturları ile takım yolu üretilerek, yatay düzlemdeki konumlama ve eğme hareketlerinin senkronizasyonunun sağlanması ve bu hareketlerin algoritmik olarak optimize edilmesi hedeflenmiş. Teorik çalışmaların doğruluğunu göstermek amacıyla pervane (Şekil 2.57) imalatı yapılmış.



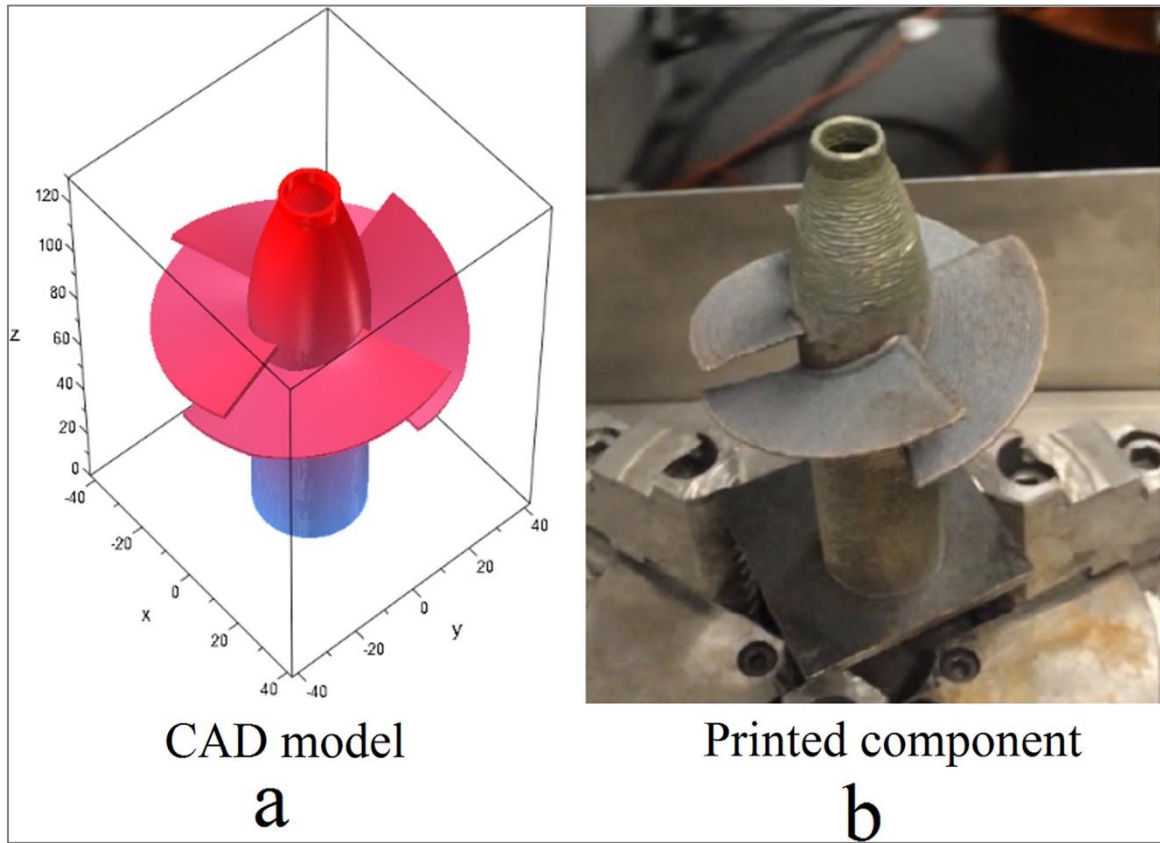
Şekil 2.54. Tüm sürecin akış şeması [27]



Şekil 2.55. Çıkıntılı yapının düzlemsel tabana eşlenmesinin şeması: (a) döndürülmüş parça; (b) silindirik koordinat; (c) dilimin çıkıntılı yapı ile kesişim konturu; (d) Kartezyen koordinatta eşlenen çıkıntılı yapı [27]



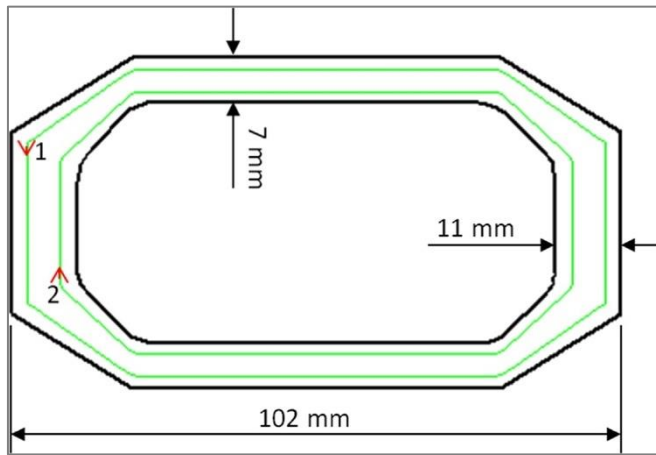
Şekil 2.56. Dilimlerin taban yüzeyi (a) çekirdek hacmi için ve (b) çıkıntılı yapılar için [27]



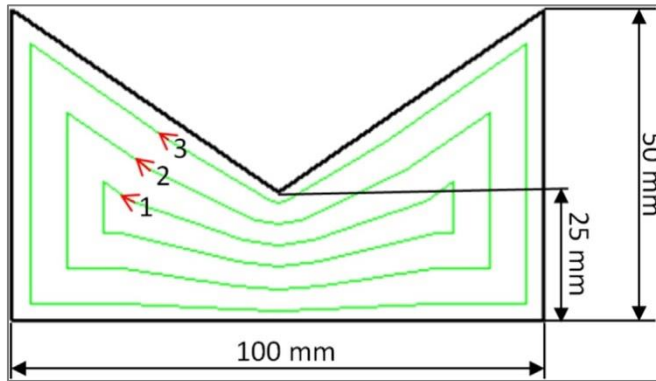
Şekil 2.57. (a) Pervanenin CAD modeli ve (b) lazer tabanlı doğrudan metal biriktirme sisteminde basılmış pervane [27]

Pan ve diğerleri (2016) tarafından, WAAM'da kaynak dikişi modelleme ve uyarlanabilir ortalama eksen dönüşümü yolunun uygulanması üzerine yapılan çalışmada; imalat yapacak operatör kaynaklı, model analizi, takım yolu planlama ve kaynak parametrelerini manuel olarak ayarlama sürecinde oluşabilecek hataların önüne geçebilmek için otomatik bir yol planlama sistemi geliştirilmiş. Adaptif ortalama eksen dönüşümü takım yolu planlama algoritması ve kaynak dikişi modelleri kullanılarak oluşturulan takım yolunun, duvar

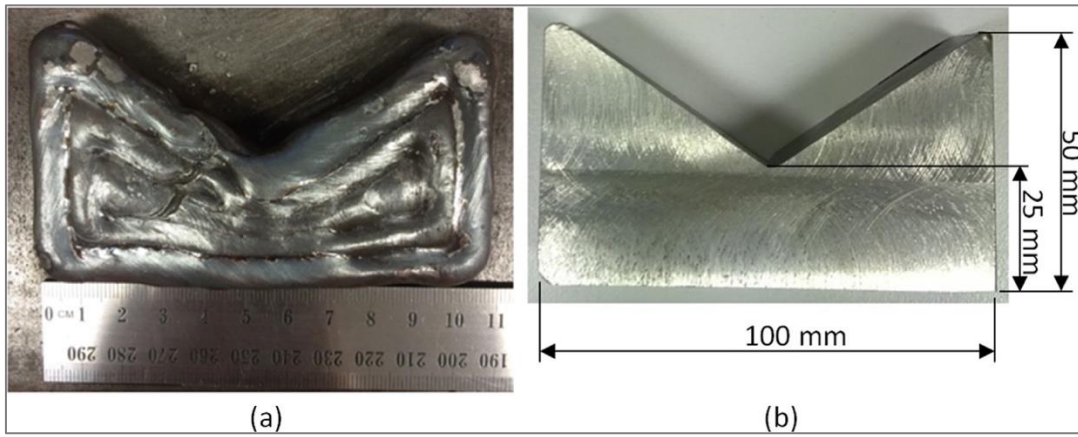
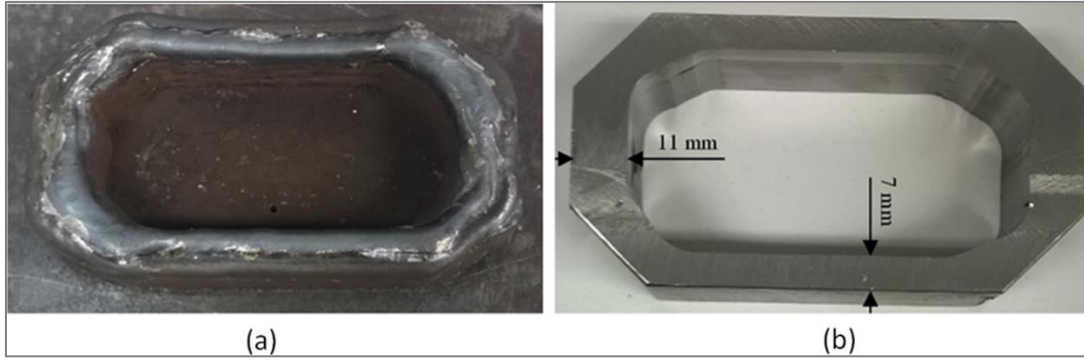
kalınlığında önemli değişiklikler gösteren geometrilerle (Şekil 2.58 ve Şekil 2.59) başa çıkabilmesi ve yüksek kaliteli düşük boşluklu parçaları üretebilmesi hedeflenmiş. İki metal parça üzerinde yapılan deneysel testler (Resim 2.26 ve Resim 2.27) ile algoritmanın, WAAM sisteminin yüksek kalitede, düşük boşluklu ve geometrik doğruluğu yüksek parçalar üretebildiği, değişken duvar kalınlığına sahip geometrilerin optimum kaynak parametreleri ile biriktirilebildiği gösterilmiş. Buna rağmen, algoritmanın her zaman bileşen geometrisine uyum sağlayamadığı ve daha fazla atık materyal çıkarılması gerektiği ve buna kaynak işlemindeki bazı kısıtlamaların neden olduğu belirtilmiş.



Şekil 2.58. Tek iç deliğe ve değişken duvar kalınlığına sahip ince duvarlı bir yapı [28]

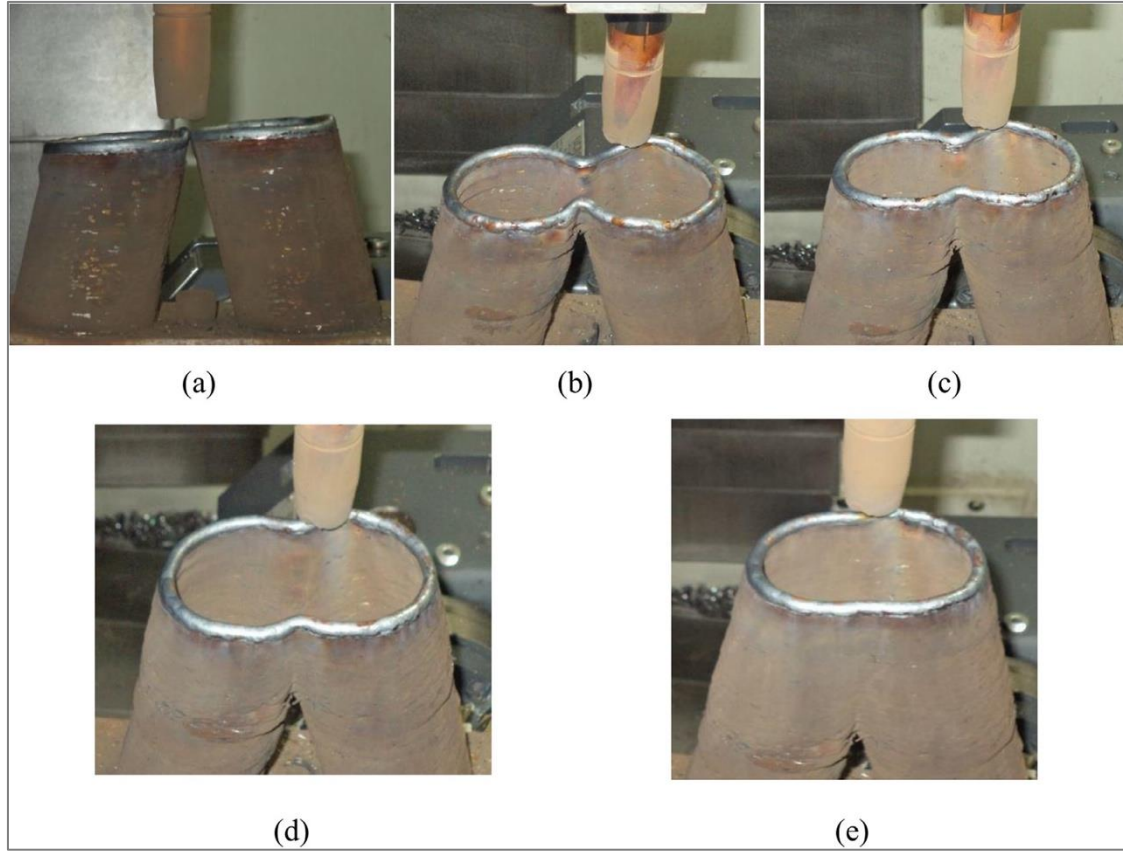


Şekil 2.59. Deliksiz yekpare bir yapı [28]

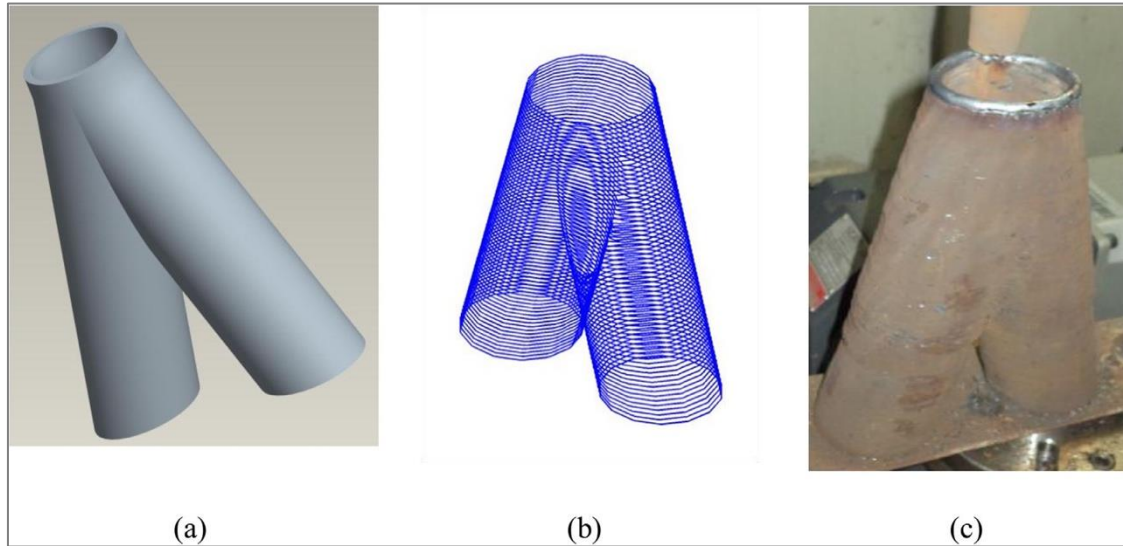


Resim 2.27. a) 15 katmandan sonra net şekle yakın bir şekilde biriktirilmiş, b) yüzey frezelemeden sonra boşluksuz tamamlanmış parça [28]

Panchagnula ve Simhambhatla (2018) tarafından, kaynak biriktirme tabanlı eklemeli imalat kullanılarak karmaşık ince duvarlı metalik nesnelerin imalatı üzerine yapılan çalışmada; destek yapılarına ihtiyaç duymadan alt kesitli ve eğimli geometriler (Resim 2.28) gibi karmaşık ince duvarlı yapıların gaz metal ark kaynağı tabanlı Eİ süreçleri kullanılarak imal edilmesi araştırılmış. Daha iyi ark kararlılığı ve malzeme transferi için soğuk metal transfer ünitesi ile birlikte, kaynak biriktirme ünitesi ve kaynak torcunun konumsal interpolatörünü içeren bir deneysel düzenek kullanılmış. 5 eksenli eğik biriktirme yapılabilmesi için iş parçası ve biriktirme başlığına ekstra serbestlik dereceleri eklenmiş ve MATLAB yazılımı kullanılarak dilimleme (Şekil 2.60) ve takım yolu oluşturulmuş. Kaynak parametrelerinin doğru ayarlanması ve sıradaki katmanın yükseklik ve genişlik özelliklerini tahmin edebilen geometrik model, deneysel verilerle (Resim 2.29) yüksek uyum göstererek, ara katman frezelemesine gerek duyulmayan bir üretim süreci sağlamış.



Resim 2.28. Üretiminin farklı aşamalarındaki ters Y şekilli ince duvarlı silindirik bileşen [29]



Şekil 2.60. (a) Biriktirilecek CAD modeli; (b) MATLAB tarafından oluşturulan takım yolu; (c) 212 mm yükseklik, 60 mm çap ve 129 katmandan oluşan son biriktirilmiş bileşen [29]



Resim 2.29. 5-eksenli eğimli biriktirme kullanılarak üretilen karmaşık ince duvarlı bileşenler [29]

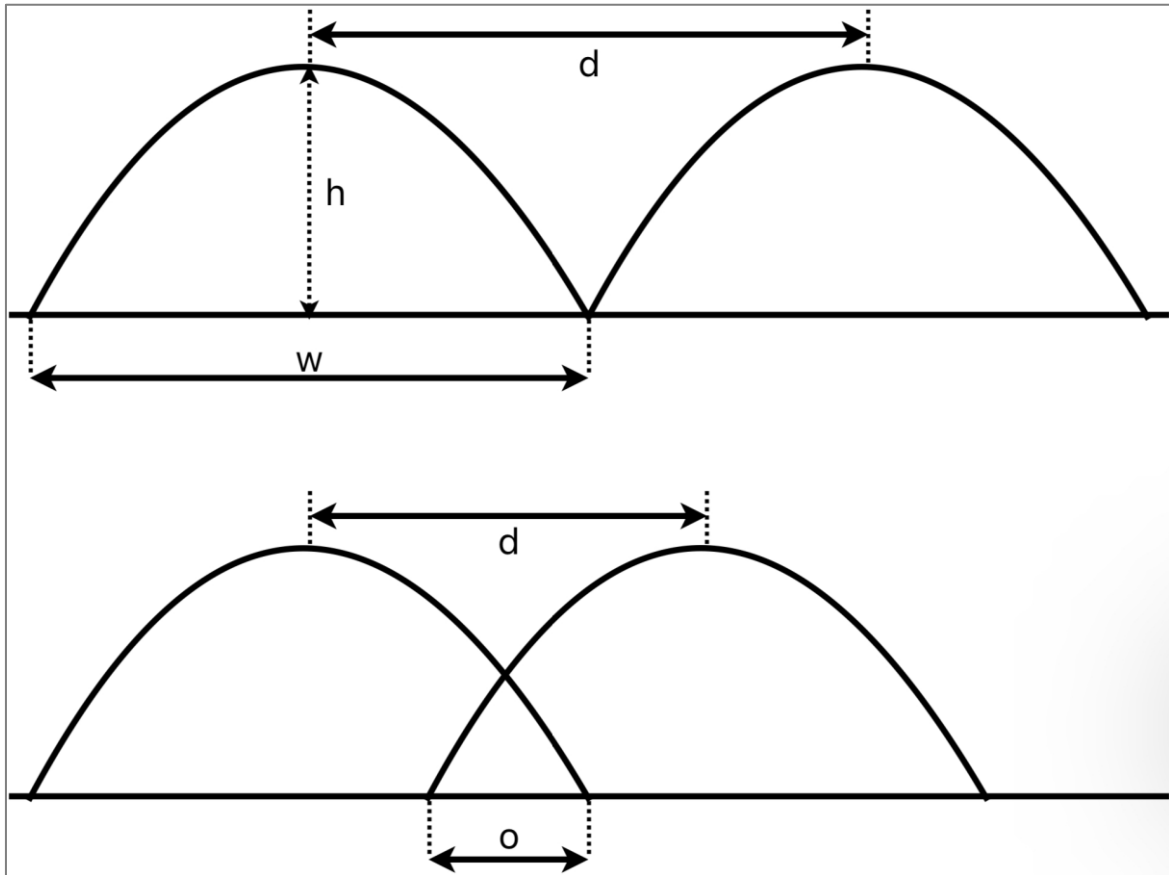
Literatürdeki çalışmalar, Eİ, YEY ve WAAM yöntemlerini çeşitli açılardan incelemiş ve bu alanların bazı güçlü yönlerini vurgulamıştır. Ancak bazı boşluklar da dikkat çekmektedir. WAAM yönteminin geometrik doğruluk, yüzey kalitesi ve gözeneklilik gibi problemleri hala büyük ölçüde çözülmemiş olarak durmaktadır. Ayrıca, üretim süreçlerinin optimizasyonu ve otomasyonu konularında daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle karmaşık geometrik şekillerin daha verimli ve hassas bir şekilde üretilmesine

yönelik takım yolu stratejileri ve kontrol algoritmaları üzerine araştırmaların artırılması gerektiği gözlemlenmiştir. Bunlarla birlikte, malzeme verimliliği ve imalat sonrası işlemlerle ilgili daha fazla metodolojik geliştirmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu boşlukların doldurulması ve WAAM yönteminin daha geniş bir uygulama alanına kavuşmasına katkı sağlamak için geometrik doğruluğun artırılmasına yönelik takım yolu stratejisi geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır.

3. YÜZEY DÜZLEMSELLİĞİNİN OPTİMİZASYONU

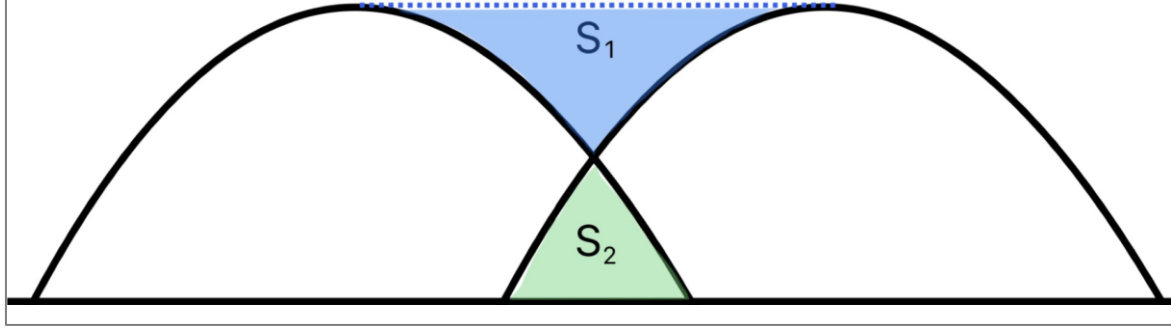
Kaynak dikişlerinin yan yana hizalandığı bir takım yolunda, kaynak dikişi hattının doğal yapısından dolayı yüzeyde tepeler ve çukurlar oluşur. Bu yöntemle üretilen bir yüzeyin pürüzlülüğünü azaltmak için, yan yana hizalanan kaynak dikişleri, kısmi olarak üst üste yığılır. Bu şekilde kısmi üst üste yığma durumu bindirme, hangi oranda üst üste yığıldığı ise bindirme oranı olarak adlandırılır. Bindirme grafiği, Şekil 3.1’de paylaşılmıştır. Burada; h yüksekliği, w genişliği, d tepeler arası mesafeyi ve o bindirme mesafesini göstermektedir. Bu veriler ile ölçülebilen bindirme oranı yüzdesi (3.1) formülü ile hesaplanmıştır.

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



Şekil 3.1. Bindirme grafiği; w: kaynak dikişi genişliği, h: kaynak dikişi yüksekliği, d: kaynak dikişi tepeleri arası mesafe, o: bindirme mesafesi

İdeal bindirme oranı, Şekil 3.2’de paylaşılan S1 alanının S2 alanına eşit olması durumunu sağlamalıdır. Burada; ilk kaynak dikişi doğal şekli ile imal edildikten sonra, ikinci kaynak dikişi basılırken, bu dikişin erimiş malzemesinden S2 alanına denk gelen kısmı, bu alan hali hazırda dolu olduğu için S1 alanına kayar ve S1 alanının dolma miktarına göre yüzey daha düzlemsel görünür.



Şekil 3.2. İdeal bindirme oranı grafiği

Optimum bindirme oranını hesaplayabilmek için, kaynak dikişi geometrisinin matematiksel modeli oluşturulmalıdır. Matematiksel model sinüs fonksiyonu (3.2) ile oluşturulmuştur.

$$y = a \sin\left(\frac{2\pi x}{c} + b\right) \quad (3.2)$$

Bu formülde; a katsayısı genliği, b katsayısı periyodu ve c katsayısı genişliğin iki katını temsil etmektedir. Yapılmış deneysel çalışmalardan elde edilmiş katsayılar doğrultusunda MATLAB programı ile oluşturulan sinüs fonksiyonu grafiği Şekil 3.3’te paylaşılmıştır.

Alan eşitliği (3.3-3.7) formülü oluşturulurken hesap kolaylığı olması için, iki kaynak dikişinin kesişim noktasından bir dikme çizilerek (Şekil 3.4), S1 ve S2 alanları iki parçaya ayrılmıştır.

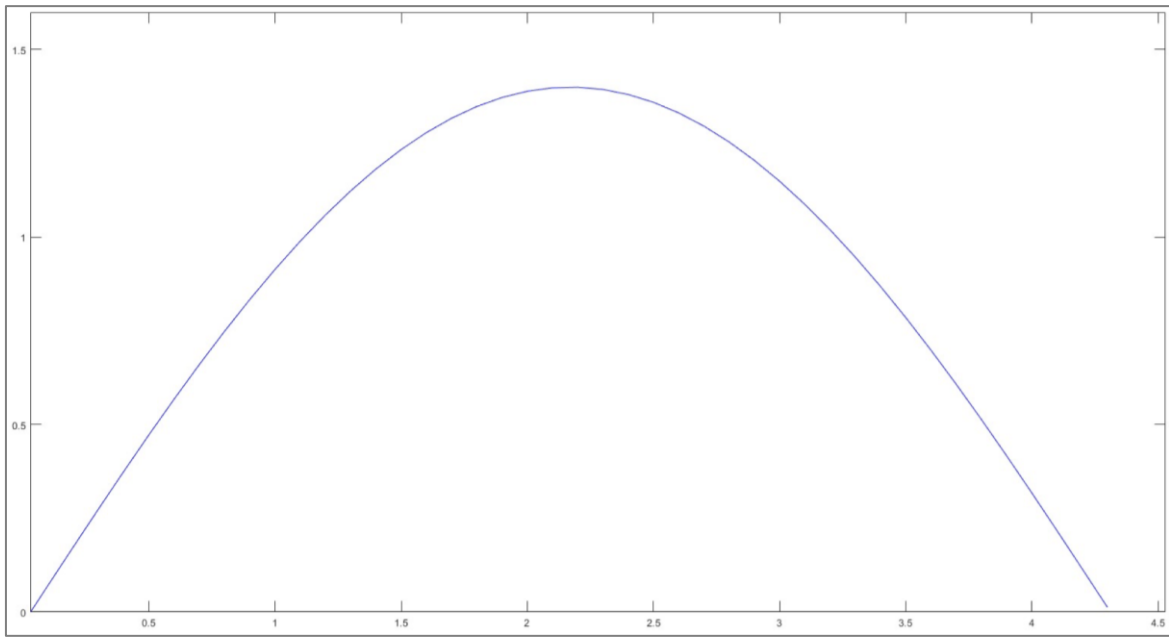
$$S_1 = S_2 \quad (3.3)$$

$$S_1 = s_a + s_b \quad \text{ve} \quad s_a = s_b \quad \text{ise} \quad S_1 = 2s_a \quad (3.4)$$

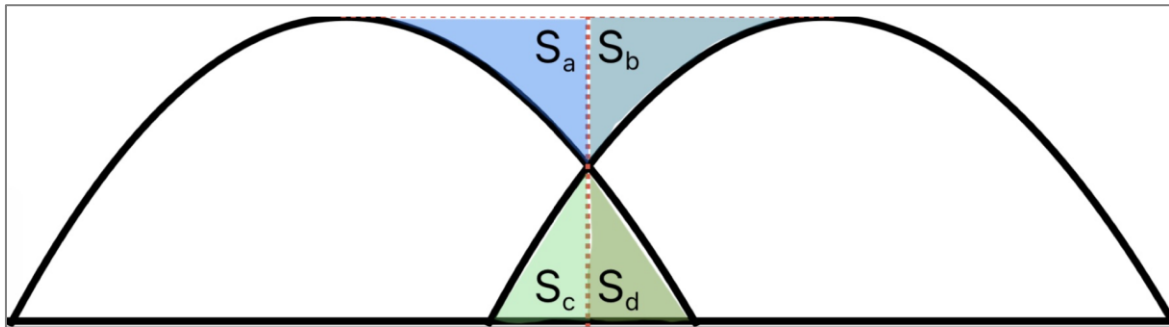
$$s_a = \int_{w/2}^{x_o} h - a \sin\left(\frac{2\pi x}{c} + b\right) dx \quad (3.5)$$

$$S_2 = s_c + s_d \quad \text{ve} \quad s_c = s_d \quad \text{ise} \quad S_2 = 2s_d \quad (3.6)$$

$$s_d = \int_{x_o}^w a \sin\left(\frac{2\pi x}{c} + b\right) dx \quad (3.7)$$



Şekil 3.3. Sinüs fonksiyonu grafiği; $a = 1,4$, $b = 6,26$, $c = 8,56$



Şekil 3.4. Alanların dikme ile bölünmesi grafiği

Şekil 3.5'te paylaşılan grafikte gösterilen ölçüler doğrultusunda, ideal bindirme katsayısı (3.8-3.12) hesaplanır.

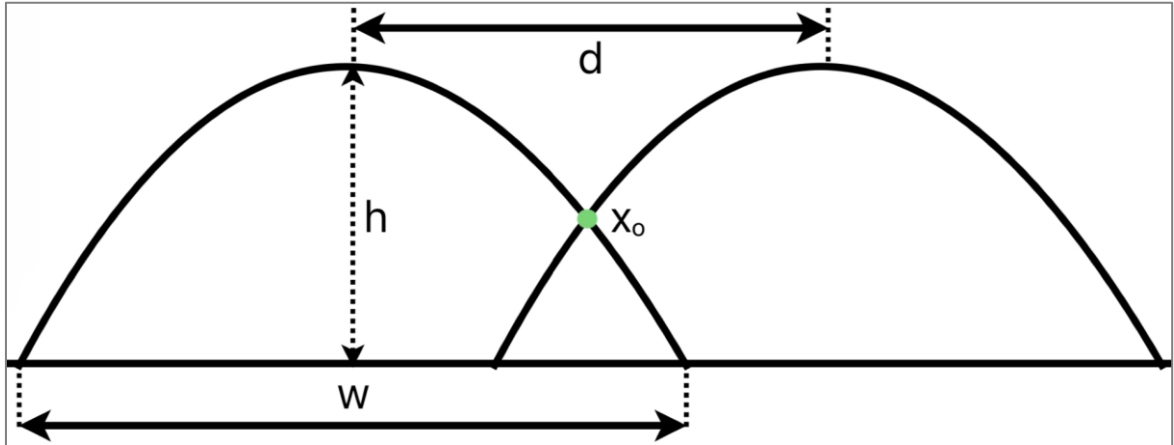
$$x_o = \frac{w}{2} + \frac{ac \left[\cos\left(\frac{w\pi}{c} + b\right) - \cos\left(\frac{2w\pi}{c} + b\right) \right]}{2h\pi} \quad (3.8)$$

$$\eta = \frac{d}{w} = \frac{2 \left(x_o - \frac{w}{2} \right)}{w} \quad (3.9)$$

$$\eta = \frac{ac \left[\cos\left(\frac{w\pi}{c} + b\right) - \cos\left(\frac{2w\pi}{c} + b\right) \right]}{wh\pi} \quad (3.10)$$

$$w = c/2 = 4,28; \quad h = a = 1,4; \quad b = 6,26 \approx 2\pi \quad (3.11)$$

$$\eta \approx \frac{2}{\pi} \approx \%63,66 \quad (3.12)$$



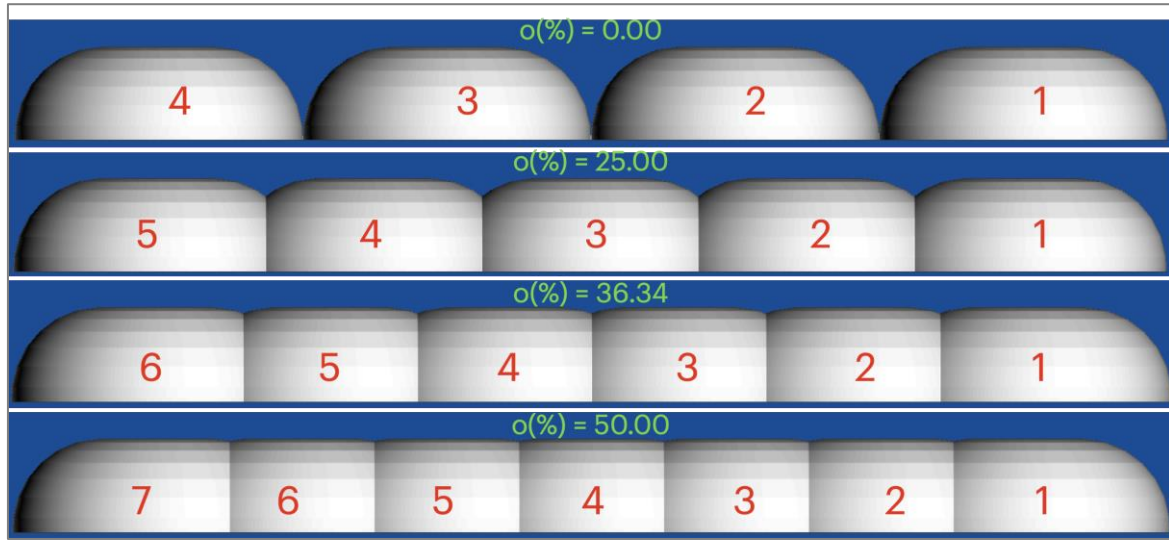
Şekil 3.5. Bindirme katsayısı

İdeal bindirme oranı (3.13), hesaplamalar sonucu %36,34 olarak tespit edilmiştir. Bindirme oranının %15 (Ek-1), %50 (Ek-2) ve %36,34 (Ek-3) olduğu durumlar için MATLAB programı ile oluşturulmuş olan grafikler ekler başlığı altında paylaşılmıştır.

$$1 - \eta = 1 - \%63,66 = \%36,34 \quad (3.13)$$

Bindirme oranı ile parça imalat zaman maliyeti doğru orantılıdır. Torç hareket hızının 0,8 mm/s olarak belirlendiği bir örnekte, 20 mm uzunluğundaki bir kaynak dikişinin imal edilmesi 25 saniye sürmektedir. Bindirme oranının artması ile, kaynak dikişi adeti artmakta ve bu sebeple imalat zamanı da artmaktadır. Şekil 3.6'da görülebileceği üzere, bindirme

oranı 0 olduğu durumda parça 4 kaynak dikişi ile üretilebilmekte ve beklemler hariç imalat süresi 100 saniye olmaktadır. İdeal oran olan %36,34 bindirme oranı olduğu durumda parça 6 kaynak dikişi ile üretilebilmekte ve beklemler hariç imalat süresi 150 saniye olmaktadır. Bu parça özelinde; ideal düzlemsellikte bir yüzey elde etmek için %50 zaman maliyeti artışını karşılamak gerekmektedir. Bu oran parça şekli ve boyutları ile aşağı yönlü veya yukarı yönlü değişebilmektedir.



Şekil 3.6. Bindirme oranı değişimi ile değişen kaynak dikişi adedi

4. TAKIM YOLU GELİŞTİRİLMESİ

Serbest yüzey, matematiksel olarak düzlem, küre, silindir gibi standart geometrik şekillerle ifade edilemeyen, karmaşık eğriler ve yüzeylerden oluşan şekildir. Bu yüzeyler, tasarımın estetik veya fonksiyonel ihtiyaçlarına göre şekillenir ve parametrik olarak kontrol edilebilir.

Serbest yüzeyli bir parçayı matematiksel olarak modellemek için parametrik modelleme tekniklerinden non-uniform rational b-splines (NURBS) yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem serbest yüzeyli parçaların hem de klasik geometrik şekillerin modellemesinde kullanılmaktadır. NURBS yüzeyi (14) genel formülü ile tanımlanmaktadır [30].

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,p}(v) w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,p}(v) w_{i,j}} \quad (4.1)$$

$S(u, v)$: NURBS yüzeyi

u, v : Parametreler

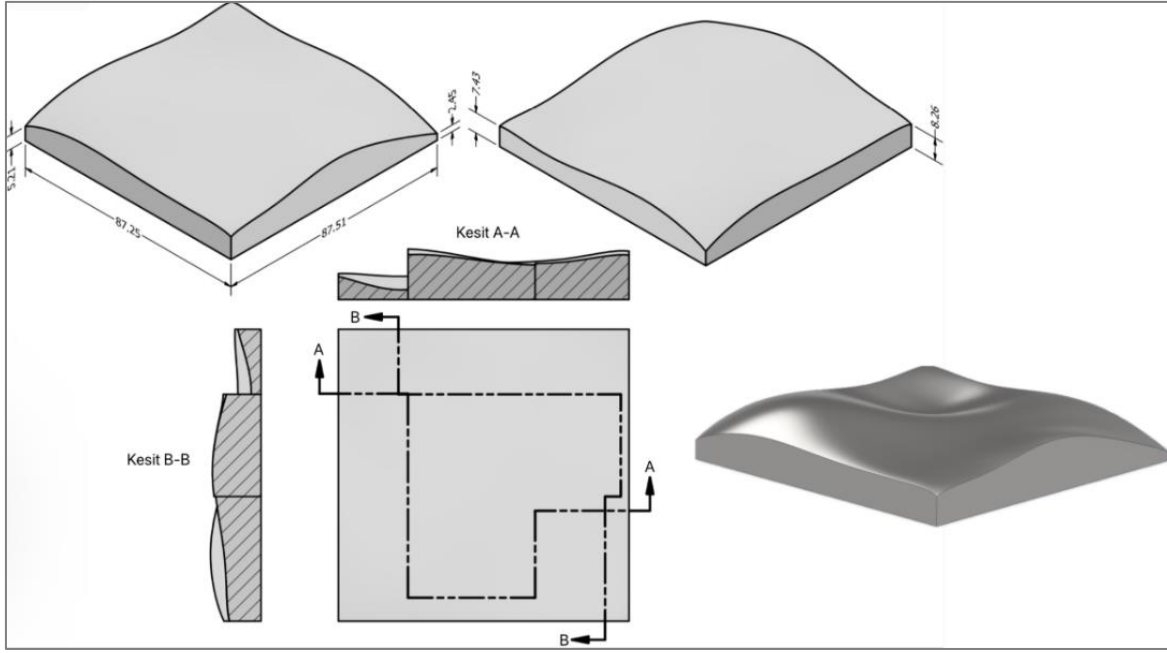
$N_{i,p}(u)$ ve $N_{j,p}(v)$: B-spline temel fonksiyonları

$w_{i,j}$: Kontrol noktalarına atanan ağırlıklar

$P_{i,j}$: Kontrol noktaları

p, q : Dereceler

Çalışma yapılacak yüzey oluşturulurken; konveks, konkav ve düz yüzeylerin bir araya getirilmesi hedeflenerek, Şekil 4.1’de paylaşılan parça tasarlanmıştır. Parçanın bir köşesi düz yüzey kapsamında olup, diğer köşeleri konveks şeklinde oluşturulmuştur.



Şekil 4.1. Konveks, konkav ve düz yüzeylerin bir araya getirilmesi ile tasarlanan serbest yüzeyli parça, kenar ölçüleri ve kesit görüntüleri

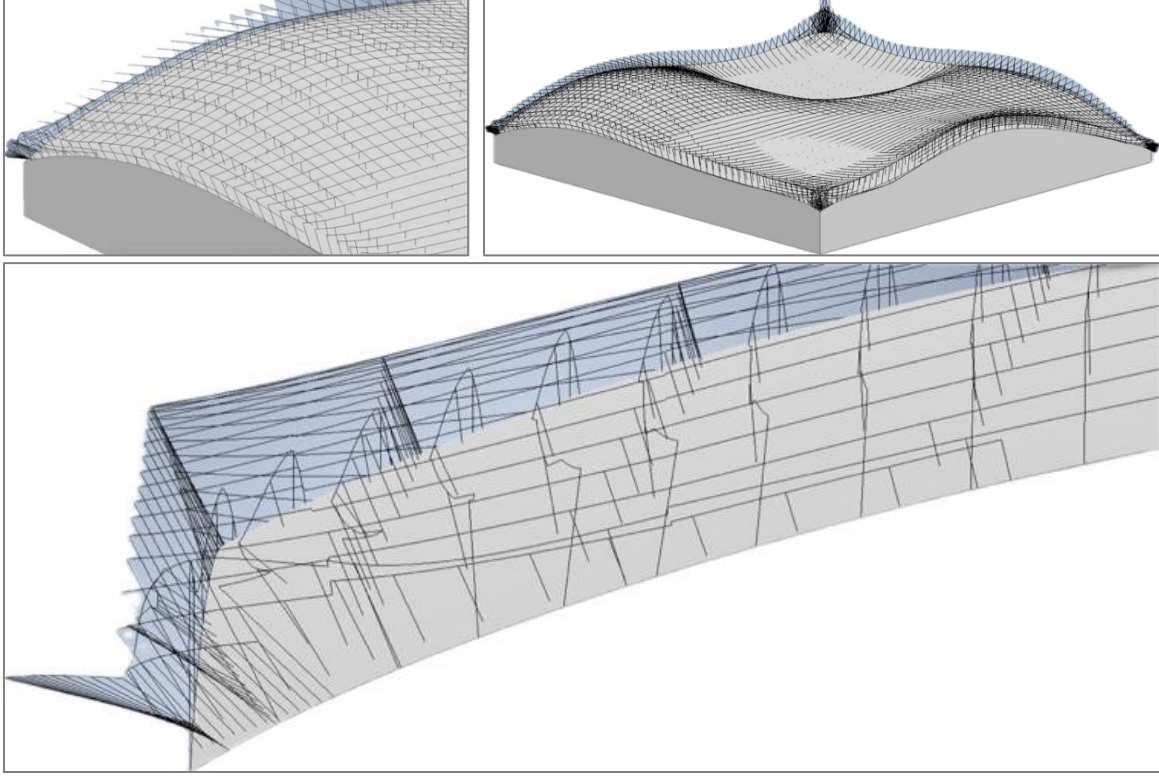
Autodesk Inventor yazılımı, tasarlanmış olan parçanın seçilen yüzeyiyle ilgili eğrilik analizi yapılabilen bir modül sunmaktadır. Bu modül ile modelin yüzey eğriliği hakkında görsel bilgi elde edilebilmektedir. Şekil 4.2’de paylaşılan görselde, yazılım yardımı ile yapılan eğrilik analizinin sonucu olarak, yüzeyin konveks ve konkav bölgeleri görülmektedir.



Şekil 4.2. Yüzey eğrilik analizi (a) isometrik (b) üstten görünüş

Konkav yüzeylerin eğrilik çizgileri parça içerisine doğru olduğu için yüzeyde çizgi bulunmayan bölgeler konkav yüzeyleri göstermektedir. Konveks yüzeylerde ise Şekil 4.3'te görüldüğü üzere, yüzey ile yüzeye offsetli ağ arasında farklı uzunluklarda dik çizgiler bulunmaktadır. Bu çizgilerin uzunlukları bulundukların yüzeyin eğrilik yarıçapı doğrultusunda değişmektedir. Büyük eğrilik yarıçapı olan yüzeylerin eğrilik çizgileri daha kısa, küçük eğrilik yarıçapı olan yüzeylerin eğrilik çizgileri ise daha uzun bir şekilde

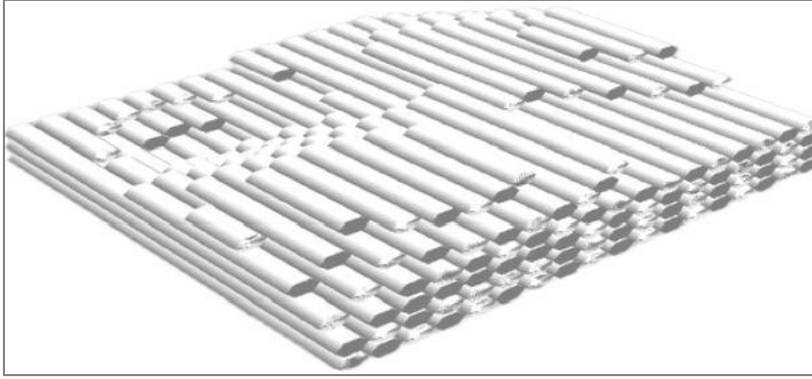
oluşmaktadır. Eğrilik çizgisi kıaldıkça, yüzeyin ilgili bölgesi düzlemselliğe yakınsamakta, eğrilik çizgisi uzadıkça yüzeyin eğrilik yarıçapı büyümektedir.



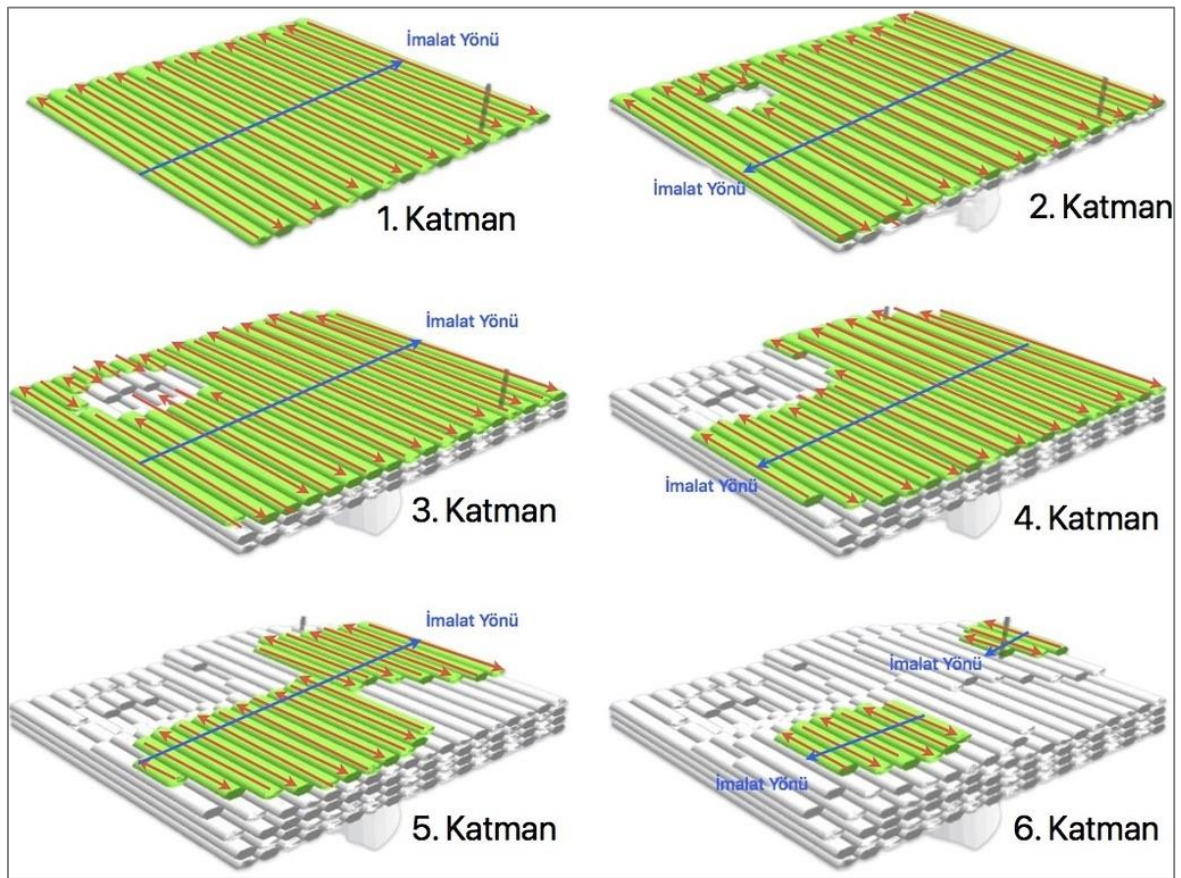
Şekil 4.3. Yüzey eğrilik çizgileri: dikme uzunluğu ile eğrilik yarıçapı test orantılı ilişkilidir

Takım yolu stratejileri olarak; bir çok Eİ sisteminde en yaygın olarak kullanılan lineer takım yolu stratejisi, parçanın dış sınırlarının belirlenip içerisinin doldurulması amacıyla kullanılan kontur yöntemine benzetmekle birlikte konveks ve konkav yüzeyli şekillerde daha iyi sonuç vereceği düşünülerek offset takım yolu stratejisi, literatürde yakın tarihte çalışılan dalgalı takım yolunun bir türü olan hexagon takım yolu stratejisi belirlenmiştir.

Parça üretimi için ilk takım yolu, lineer takım yolu stratejisi ile geliştirilmiştir. Geliştirilen takım yolu Şekil 4.4'te, katmanlar özelinde takım yolları ise Şekil 4.5'de paylaşılmıştır. Bu takım yolu geliştirilirken, %40 bindirme oranı kullanılmıştır. Bu takım yolu stratejisi ile; konveks ve konkav bölgelerin sınır bölgelerinde kaynak dikişi kesileceği için, geometrik doğruluk oranının düşük olması beklenmiştir. Bununla birlikte eğrilik yarıçapı küçük olan bölgelerde, bir üst katmanda hattın başlayacağı yer ile mevcut katmanda hattın başladığı yer arasındaki mesafe yüksek olacağı için, merdiven görünümü oluşması beklenmiştir.



Şekil 4.4. Lineer takım yolu stratejisi

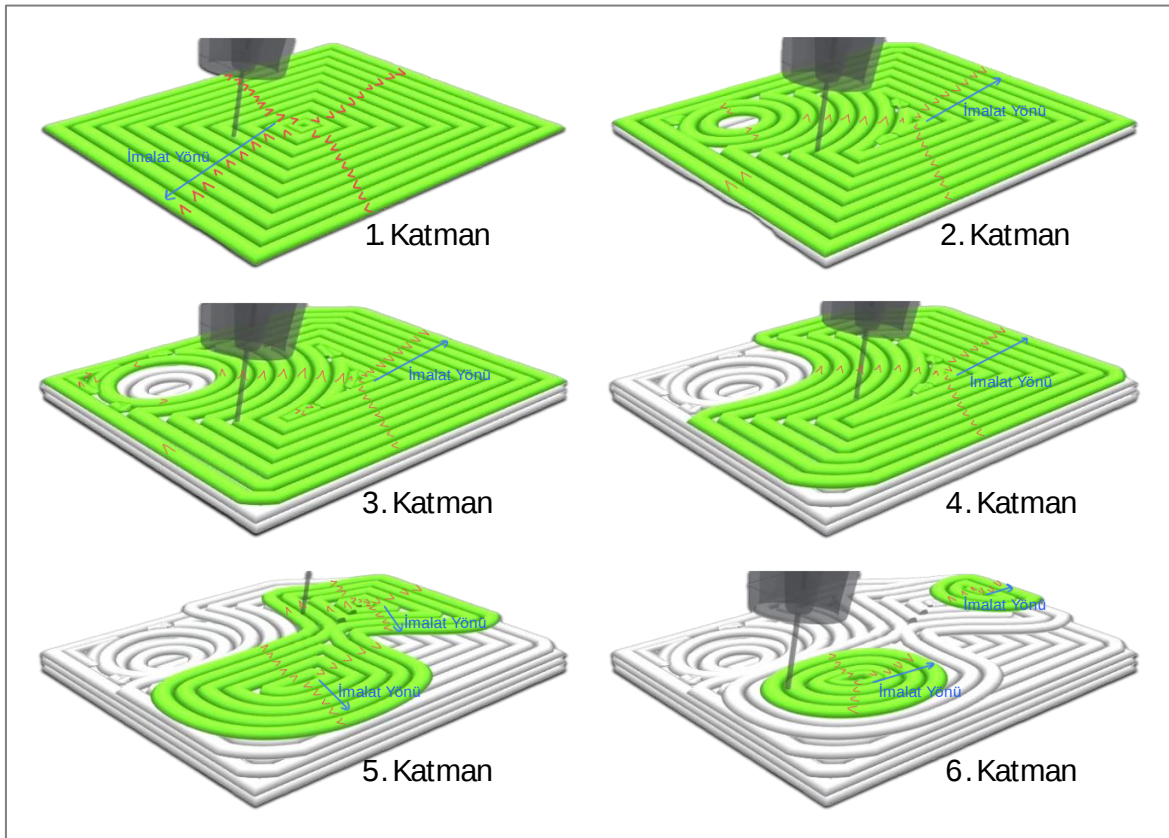


Şekil 4.5. Lineer takım yolu stratejisi (a) birinci katman, (b) ikinci katman, (c) üçüncü katman, (ç) dördüncü katman, (d) beşinci katman, (e) altıncı katman

Parça üretimi için ikinci takım yolu, offset takım yolu stratejisi ile geliştirilmiştir. Geliştirilen takım yolu Şekil 4.6'da, katmanlar özelinde takım yolları ise Şekil 4.7'de paylaşılmıştır. Bu takım yolu stratejisi ile; konveks ve konkav bölgeler dairesel takım yolu ile oluşturulacağı için geometrik doğruluğun yüksek olması beklenmiştir. Takım yolu, iç çeperden başlayıp dış çeperde bitecek şekilde düzenlenmiştir.



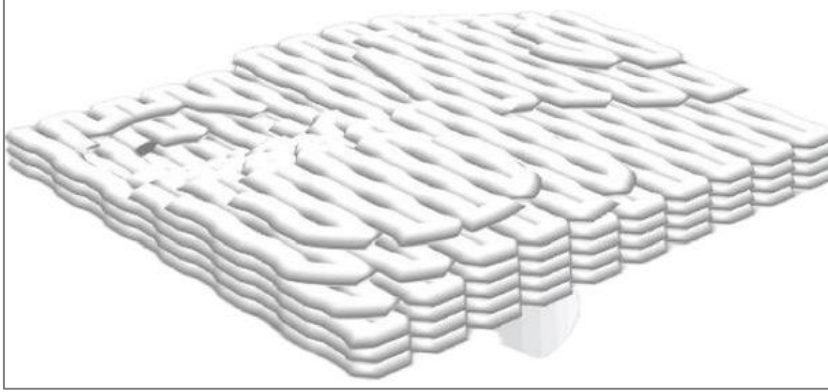
Şekil 4.6. Offset takım yolu stratejisi



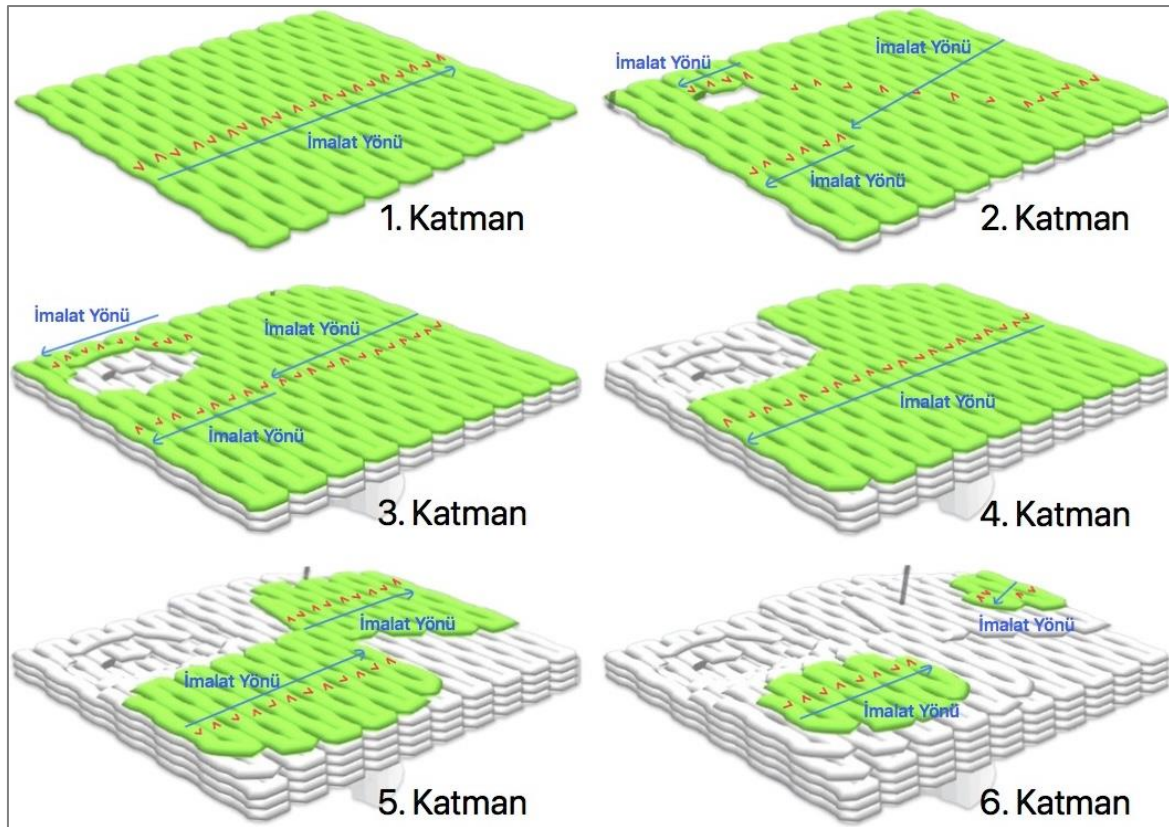
Şekil 4.7. Offset takım yolu stratejisi (a) birinci katman, (b) ikinci katman, (c) üçüncü katman, (ç) dördüncü katman, (d) beşinci katman, (e) altıncı katman

Parça üretimi için üçüncü takım yolu, hexagrid takım yolu stratejisi ile geliştirilmiştir. Geliştirilen takım yolu Şekil 4.8’de, katmanlar özelinde takım yolları ise Şekil 4.9’da paylaşılmıştır. Bu takım yolu stratejisi ile; offset takım yolunda olduğu gibi konveks ve konkav bölgeler dairesel yakın takım yolu ile oluşturulacağı için geometrik doğruluğun

yüksek olması beklenmiştir. Ayrıca hatlar arası devamlılığın etkisi ile, lineer takım yolunun aksine merdiven görünümünün daha az olması beklenmiştir.



Şekil 4.8. Hexagrid takım yolu stratejisi



Şekil 4.9. Hexagrid takım yolu stratejisi (a) birinci katman, (b) ikinci katman, (c) üçüncü katman, (ç) dördüncü katman, (d) beşinci katman, (e) altıncı katman

5. WAAM UYGULAMALARI

Bu bölümde, önceki başlıklarda tartışılan kavramların uygulamasını göstermek amacıyla vaka çalışmaları sunulmaktadır. Yine bu çalışma kapsamında, WAAM yöntemiyle üretimde uygulanan parametreler ve ekipmanlar ile ilgili bilgiler paylaşılarak, yüzey eğriliğinin takım yolu oluşturulması üzerine olan etkileri ile birlikte, sürecin zorlukları ve sonuçları açıklanmaktadır.

5.1. WAAM Altyapısı ve İmalat Parametreleri

WAAM yönteminde; tel besleme hızı, robot hareket hızı, pasolar arası bekleme süresi, tel çapı, katman yüksekliği, kaynak akımı gibi parametreler, imalat süreci ve nihai ürün kalitesi üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu temel parametrelerin her biri, imalat sürecinin verimliliğini ve parçanın mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir.

MetalWorm Eklemeli İmalat Teknolojileri A.Ş. altyapısında bulunan WAAM sistemi; 6 serbestlik dereceli robot kolu, 2 serbestlik dereceli pozisyoner, MIG kaynak makinesi, argon gazı, hücre içi aydınlatma, kapalı devre televizyon (CCTV), MetalWorm yazılımı, termal kaynak kamerası ve termal kameradan oluşmaktadır (Resim 5.1).

Geliştirilmiş olan üç takım yolu için, Çizelge 5.1’de paylaşılan üretim parametreleri ve Çizelge 5.2’de paylaşılan ekipmanlar kullanılmıştır. Bu parametreler ve ekipmanların ortaklaştırılması ile, deneysel çalışmadaki değişken sayısı azaltılarak, takım yolu farklılığının etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu parametreler hedef değerler olup, imalat süresince değişkenlik göstererek, ortalama değerleri alınmıştır.

Çizelge 5.1. WAAM ile üretim parametreleri

Parametreler	Değerler
Tel Sürme Hızı [m/dk]	5,5
Robot Hareket Hızı [mm/s]	7,5
Katman Yüksekliği [mm]	2,18
Kaynak Genişliği[mm]	8,5
Bindirme Oranı [%]	40
Bekleme Süresi [s]	60 – 150
Katmanlar Arası Sıcaklık [°C]	<200

Çizelge 5.2. WAAM ile üretimde kullanılan malzemeler

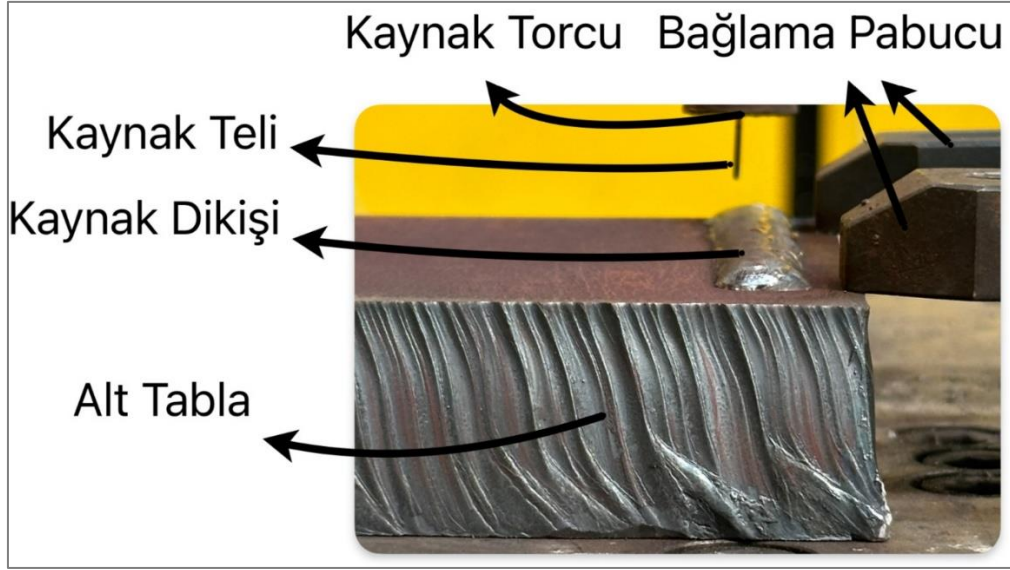
Ekipman	Özellikler
Kaynak Teli	ER70S-6 SG2 1,2 mm çapında
Baskı Plakası	ST52 110x110x30 mm
Koruyucu Gaz	%82 Ar + %18 CO ₂ 18 L/dk



Resim 5.1. MetalWorm Eklemeli İmalat Teknolojileri A.Ş. altyapısı

5.2. Kaynak Dikişi İncelemesi

Lineer takım yolu imalatı kapsamında, imal edilen ve görseli Resim 5.2’de paylaşılan ilk kaynak dikişi şeridi incelenmiştir. Kaynak dikişinin genişliği ve yüksekliği gibi geometrik yapısı ile birlikte, kaynak parametrelerinin belirlenen tel ve robot kolu hızı için uygunluğu da incelenmiştir.



Resim 5.2. WAAM düzeneği ile imalat ekipmanları ve kaynak dikişi

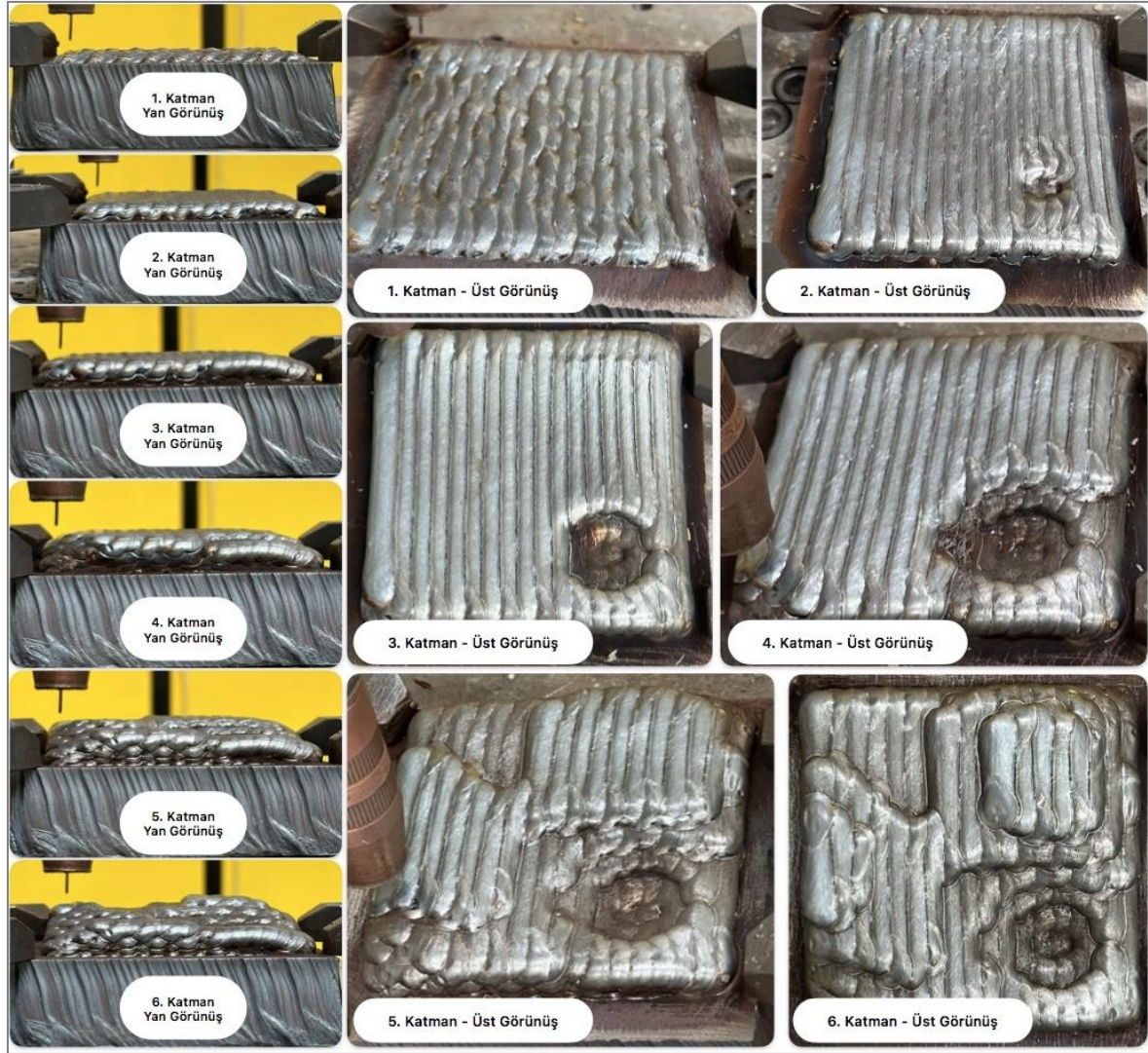
5.3. Lineer Takım Yolu Stratejisi ile İmalat

Parçanın lineer takım yolu stratejisi ile imalatı sonunda; kaynak akım değeri, kaynak voltaj değeri, tel besleme hızı, ısı girdisi ve yığma oranı bilgilerinin ortalama değerleri ile yığma süresi, bekleme süresi, üretim süresi, toplam tel tüketim miktarı ve toplam gaz tüketim miktarları imalatı kullandığı yazılımdan temin edilerek, Çizelge 5.3'te paylaşılmıştır.

İmalat sırasında, deney sonuçlarının daha doğru değerlendirilmesine katkısı olması için her üretilen katmanın yandan yataya yakın bir açıdan ve üstten fotoğrafları çekilerek Resim 5.3'te paylaşılmıştır.

Çizelge 5.3. Lineer takım yolu stratejisi ile imalatın ortalama parametre verileri

Parametre	Değer
Kaynak Akımı	189,48 [A]
Kaynak Voltajı	16,86 [V]
Tel Besleme Hızı	6,09 [m/dk]
Isı Girdisi	391,50 [J/mm]
Yığma Oranı	3,23 [kg/saat]
Yığma Süresi	00:22:03
Bekleme Süresi	02:11:53
Üretim Süresi	02:33:56
Gaz Tüketim Miktarı (Yaklaşık)	0,40 [m ³]
Katman Sayısı	6 [adet]



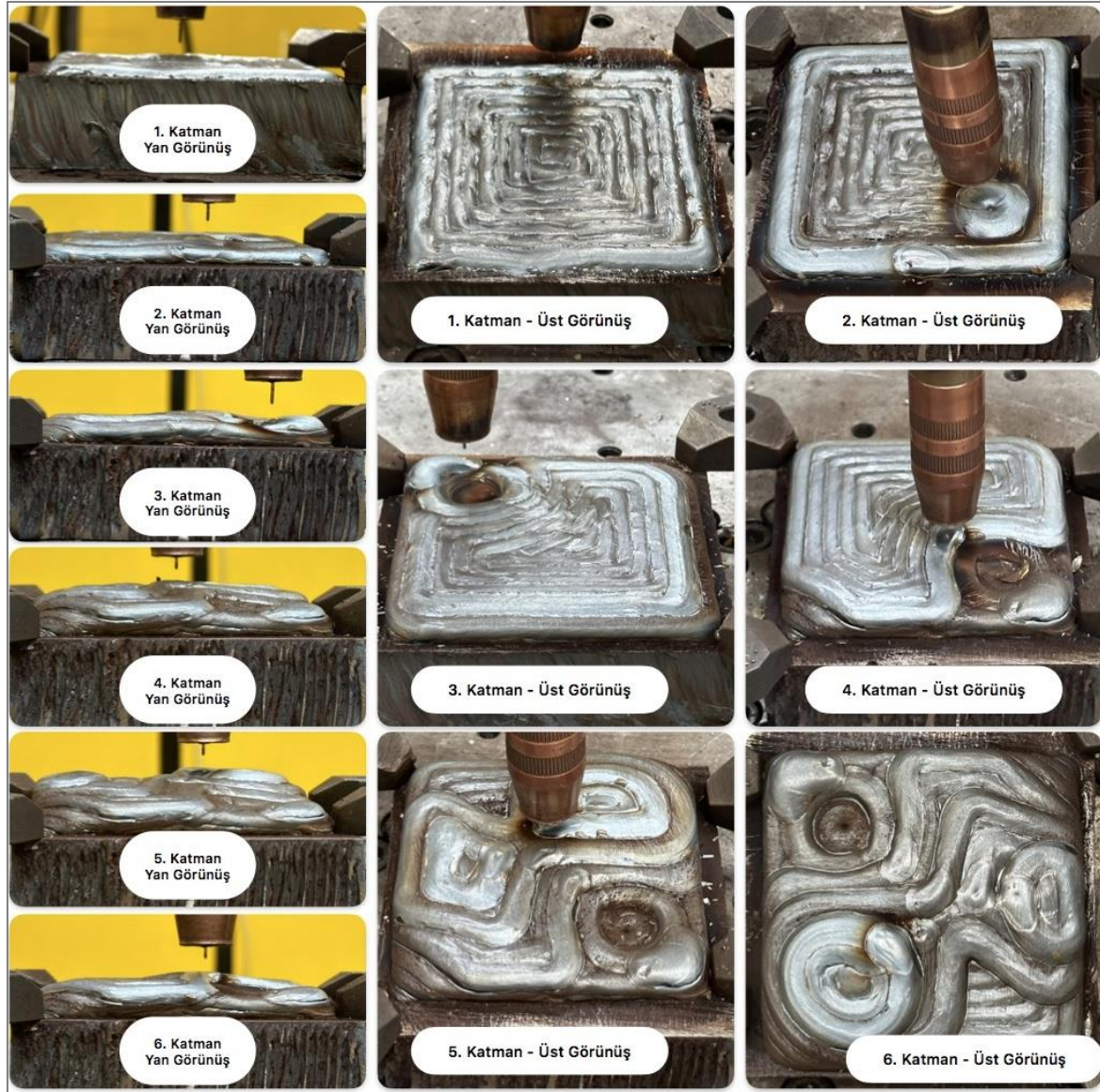
Resim 5.3. Lineer takım yolu stratejisi ile imal edilen parçanın tüm katmanlarının yandan ve üstten görünüşleri

5.4. Offset Takım Yolu Stratejisi ile İmalat

Parçanın offset takım yolu stratejisi ile imalatı sonunda imalatta kullanılan yazılımdan temin edilen veriler, Çizelge 5.4'te, katmanların görselleri ise Resim 5.4'te paylaşılmıştır.

Çizelge 5.4. Offset takım yolu stratejisi ile imalatın ortalama parametre verileri

Parametre	Değer
Kaynak Akımı	195,41 [A]
Kaynak Voltajı	17,15 [V]
Tel Besleme Hızı	6,27 [m/dk]
Isı Girdisi	406,82 [J/mm]
Yığma Oranı	3,33 [kg/saat]
Yığma Süresi	00:21:01
Bekleme Süresi	02:09:06
Üretim Süresi	02:30:07
Gaz Tüketim Miktarı (Yaklaşık)	0,38 [m ³]
Katman Sayısı	6 [adet]



Resim 5.4. Offset takım yolu stratejisi ile imal edilen parçanın tüm katmanlarının yandan ve üstten görüşleri

5.5. Hexagrid Takım Yolu Stratejisi ile İmalat

Parçanın hexagrid takım yolu stratejisi ile imalatı sonunda imalatda kullanılan yazılımdan temin edilen veriler, Çizelge 5.5'te, katmanların görselleri ise Resim 5.5'te paylaşılmıştır.

Çizelge 5.5. Hexagrid takım yolu stratejisi ile imalatın ortalama parametre verileri

Parametre	Değer
Kaynak Akımı	195,59 [A]
Kaynak Voltajı	16,56 [V]
Tel Besleme Hızı	6,03 [m/dk]
Isı Girdisi	396,49 [J/mm]
Yığma Oranı	3,20 [kg/saat]
Yığma Süresi	00:26:16
Bekleme Süresi	03:09:53
Üretim Süresi	03:36:09
Gaz Tüketim Miktarı (Yaklaşık)	0,47 [m ³]
Katman Sayısı	6 [adet]



Resim 5.5. Hexagrid takım yolu stratejisi ile imal edilen parçanın tüm katmanlarının yandan ve üstten görünüşleri

Ortalama tel besleme hızı ve baskı süresi ile birlikte, kullanılan telin çapı ve yoğunluğu bilgileri de kullanılarak, (5.1) numaralı eşitlik ile, her bir takım yolu stratejisi ile imal edilen parçanın kaç kilogram ağırlığı olduğu hesaplanabilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Basılan Ağırlık [kg]} = \text{Tel Besleme Hızı} \left[\frac{m}{dk} \right] \times \text{Baskı Süresi [dk]} \times \\ \text{Telin Kesit Alanı [m}^2] \times \text{Yoğunluk} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \end{aligned} \quad (5.1)$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda; lineer takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parçanın ağırlığı 1,192 kg, offset takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parçanın ağırlığı 1,175 kg, hexagrid takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parçanın ağırlığı ise 1,406 kg olarak bulunmuştur.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

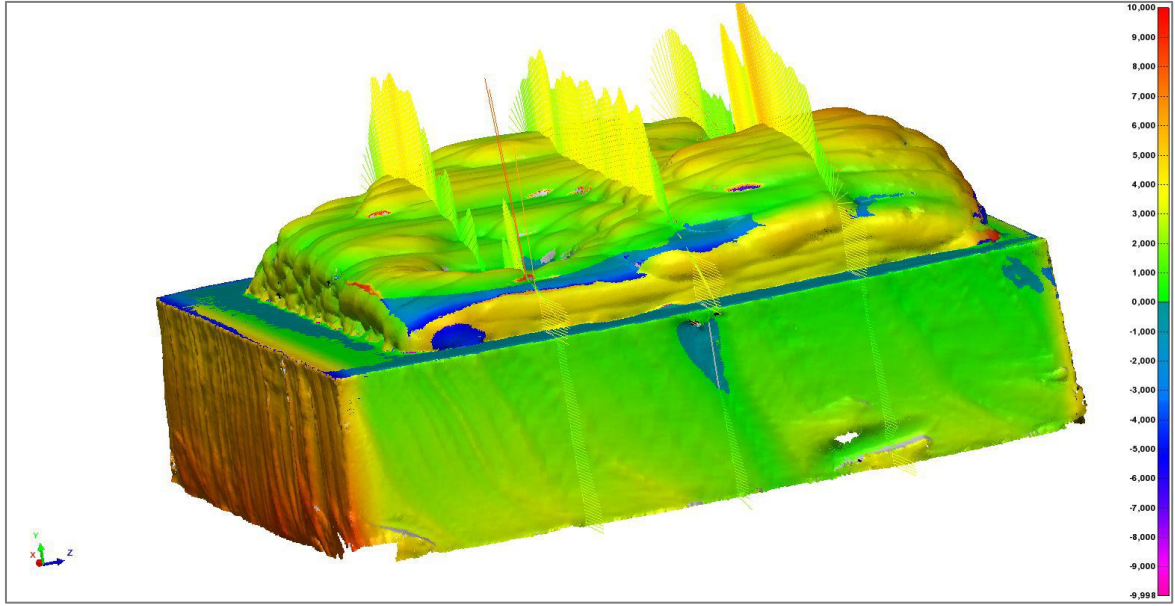
İmal edilen parçaların, tasarlanan parça ile geometrik olarak uyumluluğunun tespit edilmesi için formoloji analizi yapılmıştır. Bu amaçla parçaların optik taramaları yapılarak, PolyWorks yazılımı üzerinde CAD modeli ile tarama sonucu oluşmuş modeller üst üste bindirilerek karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda; ölçüm farkına dayalı renk haritası, her tarama için aynı bölgelerden alınmış kesit için ölçüm farklılıkları grafiği ve noktasal bazda ölçüm farklılıkları verileri kullanılmıştır.

Ölçüm farkına dayalı renk haritasında; ölçüm aralığı ± 10 mm olarak ayarlanmıştır. Parçanın yüzeyi olması gerekenden daha yüksek bir bölgede ise sırasıyla; yeşil, sarı, turuncu ve kırmızı renge, eğer daha alçak bir bölgede ise sırasıyla; mavi-yeşil, mavi, lacivert ve pembe renge doğru kademeli şekilde değişen bir yüzey renklendirmesi ile, yüzeyin geometrik sapması görsel olarak tespit edilebilmektedir.

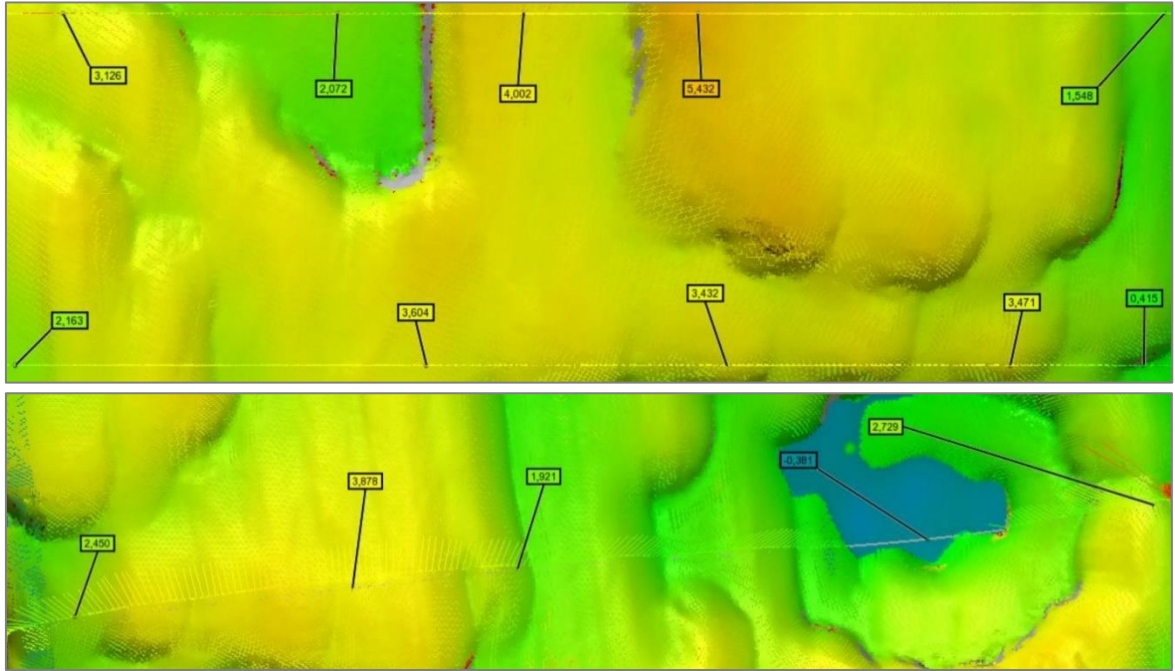
Alınan kesit alanı grafiğinde; yine ölçüm aralığı ± 10 mm olarak ayarlanmıştır. Burada parçayı ikiye ayıran bir kesit alan alınarak, pozitif veya negatif yönde yüzey dikmelerinin uzunlukları ile sapma miktarı gösterilmektedir. Yine bu çizgiler, renk haritasıyla aynı renk skalası ile renklendirildiği için hem boyutlarından hem de renklerinden tespit sağlanabilmektedir. Modellerde, 25 mm aralıklarla aynı bölgelerde bulunan 3 kesit alanı oluşturulmuştur.

Noktasal ölçüm yönteminde ise, işaretlenen noktanın sapma miktarı değeri net şekilde gösterilmektedir. Bu yöntemde net değer elde edilebilmekle birlikte, tüm yüzeyin noktalarla taranma imkanı bulunmamaktadır. Bu nedenle, her bir kesit alanı için 5 farklı noktadan net ölçüm alınarak, kesit için ortalama geometrik sapma miktarı hesaplanmıştır. Bu işlem her bir model için tekrarlanarak, takım yolu bazında da geometrik sapma miktarı hesaplanmıştır.

Lineer takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parçanın taranması ve analizi sonucunda; renk haritası ve sapma miktarı, renkli çubuk haritası ile birlikte kesitlerin konumlarının olduğu grafik Resim 6.1’de, kesitler üzerinde bulunan noktasal net ölçümlerin bulunduğu grafikler de Resim 6.2’de paylaşılmıştır. Kesitler üzerinde bulunan noktasal net ölçüm değerleri Çizelge 6.1’de paylaşılmıştır.



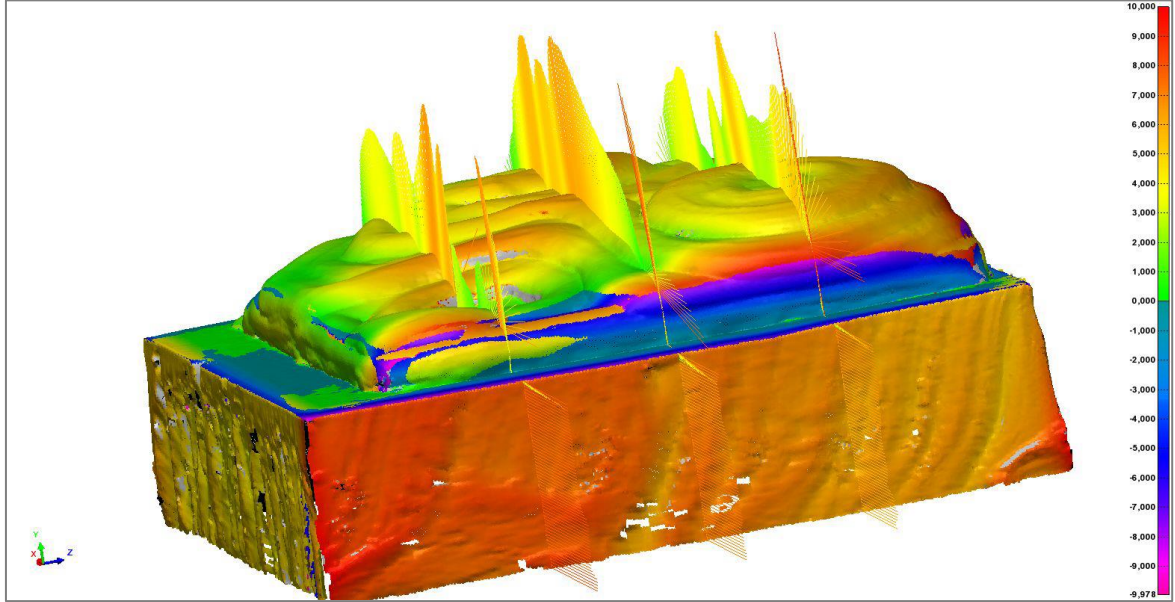
Resim 6.1. Lineer takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parçanın renk haritası analizi ve kesit alanları konumları (1mm'lik renk skalası aralığı)



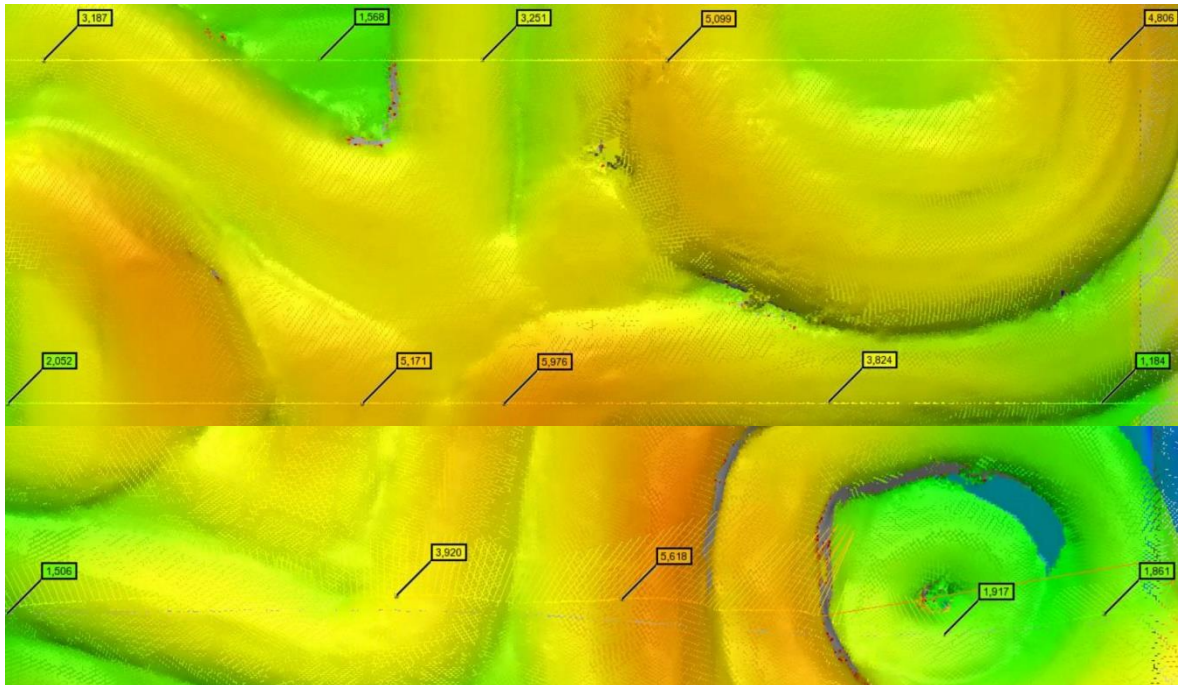
Resim 6.2. Lineer takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parça üzerinde konumlandırılan kesit alanlar üzerinden alınan net geometrik sapma verileri

Offset takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parçanın taranması ve analizi sonucunda; renk haritası ve sapma miktarı, renkli çubuk haritası ile birlikte kesitlerin konumlarının olduğu grafik Resim 6.3'te, kesitler üzerinde bulunan noktasal net ölçümlerin bulunduğu grafikler

de Resim 6.4'te paylaşılmıştır. Kesitler üzerinde bulunan noktasal net ölçüm değerleri Çizelge 6.1'de paylaşılmıştır.

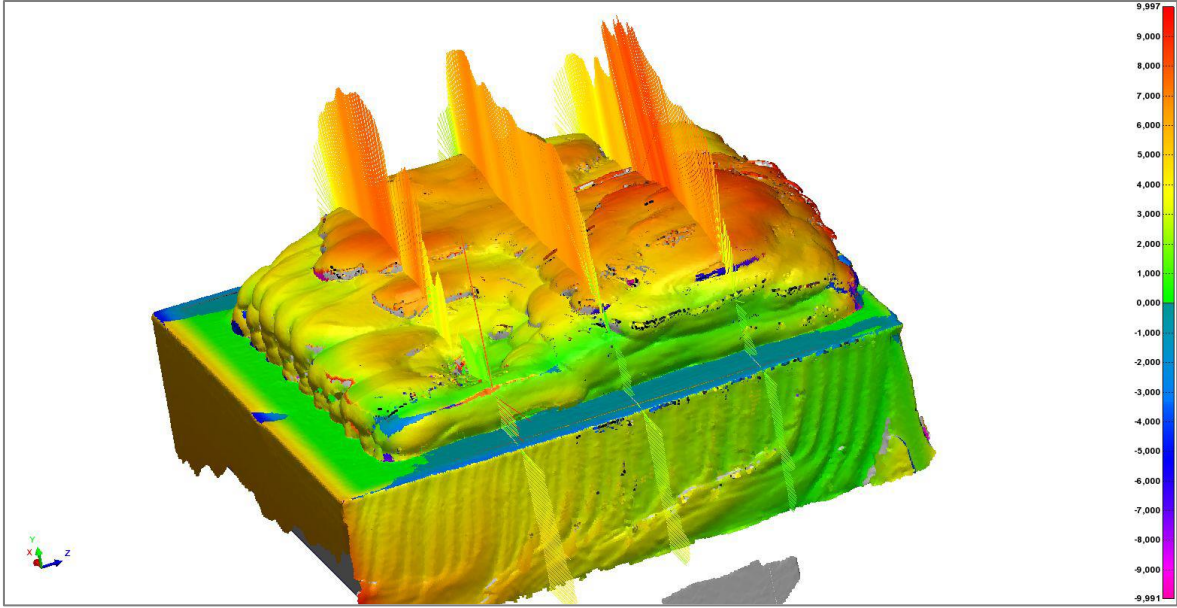


Resim 6.3. Offset takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parçanın renk haritası analizi ve kesit alanları konumları

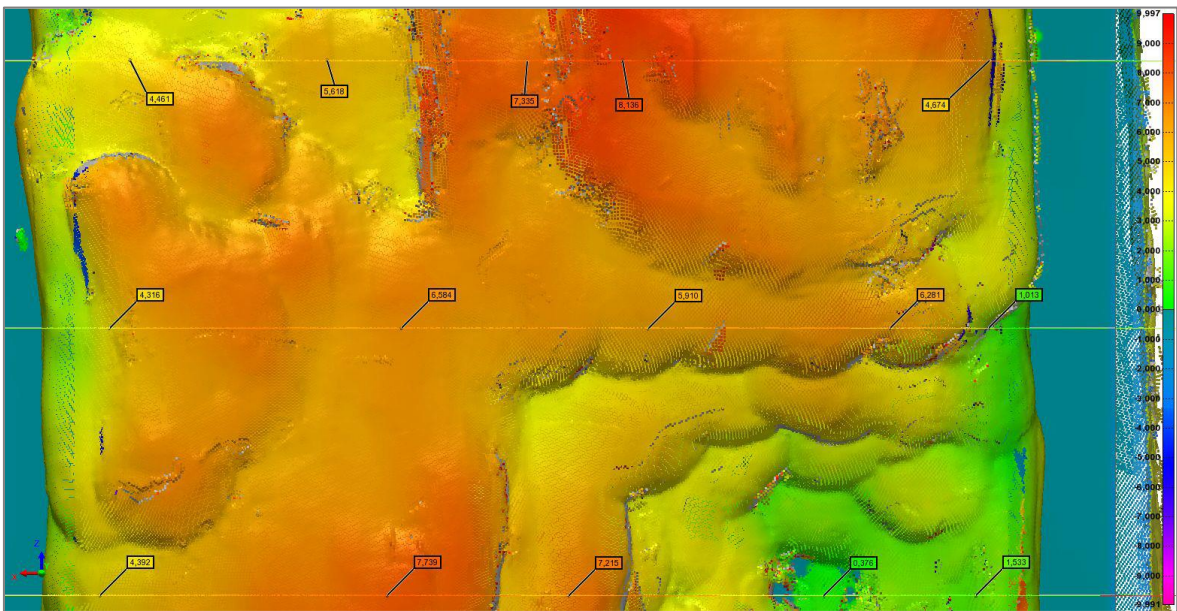


Resim 6.4. Offset takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parça üzerinde konumlandırılan kesit alanlar üzerinden alınan net geometrik sapma verileri

Hexagon takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parçanın taranması ve analizi sonucunda; renk haritası ve sapma miktarı, renkli çubuk haritası ile birlikte kesitlerin konumlarının olduğu grafik Resim 6.5'te, kesitler üzerinde bulunan noktasal net ölçümlerin bulunduğu grafikler de Resim 6.6'da paylaşılmıştır. Kesitler üzerinde bulunan noktasal net ölçüm değerleri Çizelge 6.1'de paylaşılmıştır.



Resim 6.5. Hexagon takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parçanın renk haritası analizi ve kesit alanları konumları



Resim 6.6. Hexagon takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parça üzerinde konumlandırılan kesit alanlar üzerinden alınan net geometrik sapma verileri

Çizelge 6.1. Takım yolu stratejilerinin, kesit bazlı geometrik sapma ortalamaları [mm]

Takım Yolu	Alan	1. Nokta	2. Nokta	3. Nokta	4. Nokta	5. Nokta	Alan Ortalaması	Kesit Ortalaması
Lineer	1. Kesit Alan	2,729	-0,381	1,921	3,878	2,450	2,119	2,657
	2. Kesit Alan	0,415	3,471	3,432	3,604	2,163	2,617	
	3. Kesit Alan	1,548	5,432	4,002	2,072	3,126	3,236	
Offset	1. Kesit Alan	1,861	1,917	5,618	3,920	1,506	2,964	3,396
	2. Kesit Alan	1,184	3,824	5,976	5,171	2,052	3,641	
	3. Kesit Alan	4,806	5,099	3,251	1,568	3,187	3,582	
Hexagon	1. Kesit Alan	1,533	0,376	7,215	7,739	4,392	4,251	5,039
	2. Kesit Alan	1,013	6,281	5,910	6,584	4,316	4,821	
	3. Kesit Alan	4,674	8,136	7,335	5,618	4,461	6,045	

Lineer takım yolu stratejisinde, her katmana aynı köşeden başlandığı için, sıradaki katmanın başlangıç noktasının sıcaklığı düşük olmasına karşılık hexagon takım yolu stratejisinde, son pasonun bittiği yerden sıradaki katmana başladığı için sıcaklık lineer takım yoluna kıyasla daha yüksek olmaktadır. Offset takım yolu stratejisinde ise, içeriden başlayıp dışarı doğru baskı yapıldığı için, sıradaki katmanın başlangıç noktasının sıcaklığının düşük olduğu görülmüştür. İç katmanların kısa olmaları nedeniyle ısı girdisi küçük olmakta buda bekleme süresinin azalmasını sağlar. Bununla birlikte en dış çeper basılırken, tek pasoda 4 kenar uzunluğu kadar ısı girdisi olduğu için bekleme süresi bu pasolarda artmıştır.

Lineer takım yolu stratejisinde, konveks bölgelerde takım yolu kesildiği için, böyle alanlarda geometrik sapma miktarı azalmıştır. Fakat konkav bölgelerde sınır bölgeye gelen kaynak dikişinin genişliği ve yüksekliği nedeniyle geometrik sapma miktarı artmıştır. Hexagon takım yolu stratejisinde, lineer takım yoluna benzer şekilde konveks bölgelerde takım yolu kesilmesine rağmen, zikzaklı yapıda yan yana gelen iki kaynak dikişinin yakınlaşılan bölgede bindirme oranı arttığı için yükseklik olması gerekenin üzerinde oluşmuştur. Offset takım yolu stratejisinde ise, konveks ve konkav bölgelerin sınırların geometrik sapma miktarı az olmakla birlikte, bu bölgelerin merkezlerinde sapma miktarı artmaktadır.

1. kesit alan 2. nokta, parça üzerindeki yüksekliği en küçük bölgenin sınırına tekabül etmektedir. Lineer ve hexagon takım yolu stratejileri ile üretilen parçalarda bu bölgenin geometrik sapması 0,5 mm'nin altında olup, offset takım yolu stratejisi ile üretilen parçada bu değer yaklaşık 2 mm'dir. 3. kesit alan 2. nokta, parça üzerindeki yüksekliği en büyük bölgenin sınırına tekabül etmektedir. Lineer ve hexagon takım yolu stratejileri ile üretilen

parçalarda en yüksek geometrik sapma miktarı sırasıyla 5,5 mm ve 8 mm ile bu bölgede gerçekleşmiştir. Offset takım yolu ile üretilen parçada sapma miktarı 5 mm olup, en yüksek sapma miktarı 6 mm ile 2. kesit 3. noktada oluşmuştur. Burası konveks ve konkav bölgelerin geçiş bölgesine denk gelmektedir.

İmal edilmiş parçaların ağırlıkları karşılaştırıldığında, offset takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parça en düşük ağırlığa sahip olup, lineer takım yolu stratejisi ile imal edilmiş parça 0,018 kg daha yüksek ağırlığa sahiptir. %1,5 sapma oranına tekabül eden bu ağırlık farkının geometrik sapmaya etkisinin düşük olduğu değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, hexagon takım yolu stratejisi ile imal edilmiş olan parça, lineer takım yolu stratejisi ile imal edilmiş olan parçadan 0,214 kg daha yüksek ağırlığa sahiptir. %17,9 sapma oranına tekabül eden bu ağırlık farkının, hexagon takım yolu stratejisi ile imal edilen parçada tespit edilen geometrik sapma miktarındaki en önemli etken olduğu değerlendirilmektedir.

Kesit alan geometrik sapma ortalamaları karşılaştırıldığında, üç kesit alanda ve dolayısı ile genel alanda küçükten büyüğe doğru sırası ile; lineer takım yolu stratejisi, offset takım yolu stratejisi ve hexagon takım yolu stratejisi şeklinde gerçekleşmiştir.

7. SONUÇLAR

Yapılan çalışma ile, takım yolu stratejisinin serbest formlu parçaların imalatında geometrik sapmaya etkileri incelenerek, en uygun takım yolu stratejisi belirlenmeye çalışılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda, genel olarak kaynak dikişleri incelenmiş. Serbest formlu parçalar için de, parça oluşturulduktan sonra, yine kaynak dikişlerinin basılma stratejileri incelenmiş. Bu çalışma ile komple bir parça imal edilerek, malzemenin homojen bir şekilde dağılıp dağılmaması, malzemenin soğuma süreci, bindirme oranının parça kompleksinde etkilediği geometrik sapma gözlemlenebilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- En küçük geometrik sapma değeri lineer takım yolu stratejisi ile imal edilen parçada elde edilmiştir.
- Konveks bölgeler için en uygun takım yolu stratejisi, 0,5 mm'nin altında geometrik sapma ile lineer takım yolu stratejisidir.
- Konveks ve konkav bölgeler arasında geçişin yaşandığı sınır bölgeler için 5 mm'lik geometrik sapma ile en uygun takım yolu stratejisi offsettir.
- Hexagon takım yolu stratejisi ile takım yolu geliştirilirken, daha düşük bindirme oranı ile takım yolu oluşturularak, geometrik sapma oranının azaltılabileceği değerlendirilmektedir.
- Lineer, offset ve hexagon takım yolu stratejileri ile üretim süreleri sırası ile; 2 saat 33 dakika, 2 saat 30 dakika ve 3 saat 36 dakika olup, en hızlı imalatı sağlayan takım yolu stratejisi offsettir.
- Lineer, offset ve hexagon takım yolu stratejileri ile imal edilmiş parçaların ağırlıkları sırası ile; 1,192 kg, 1,175 kg ve 1,406 kg olup, en yüksek parça ağırlığı aynı zamanda en yüksek geometrik sapma miktarı tespit edilen hexagon takım yolu stratejisi ile imal edilen parçadadır.

Geometrik sapma oranının düşürülmesi ile elde edilecek kazanımlar; imalat süresinin kısılması, hammadde miktarı ve maliyetinin azalması, eklemeli imalat sürecinde harcanacak enerji ve fazla parçanın işlenmesi için talaşlı imalatla harcanacak enerji sarfiyatının azaltılması, talaşlı imalat takımının aşınması sonucu ortaya çıkan maliyetin azalması olarak listelenebilir.

Gelecek çalışmalarda, farklı yüzey formları ile takım yolu tasarımı ve imalatı gerçekleştirilerek deney sayısı artırılabilir. Farklı ısıl iletkenliğe sahip malzemeler ile aynı takım yolu stratejileri ile imalat yapılarak, ısıl iletkenliğin geometrik sapmaya etkileri değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

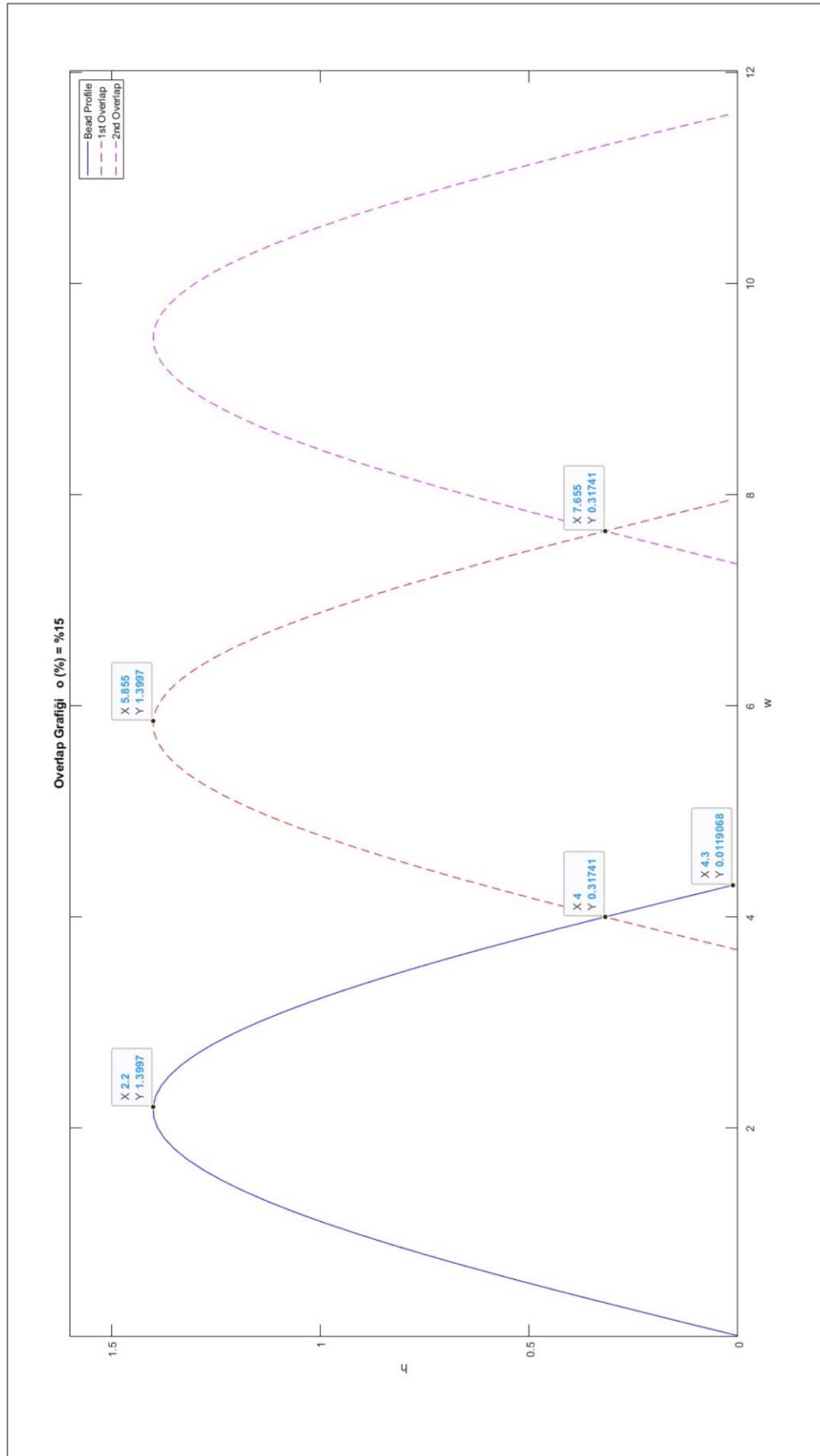
1. Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., and Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies*. Cham, Switzerland: Springer, 285-301.
2. Ding, D., Shen, C., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Larkin, N., and Van Duin, S. (2016). Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part. *Computer-Aided Design*, 73, 66-75.
3. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., and Li, H. (2014). A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *The international Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73, 173-183.
4. Mu, H., Polden, J., Li, Y., He, F., Xia, C., and Pan, Z. (2022). Layer-by-layer model-based adaptive control for wire arc additive manufacturing of thin-wall structures. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(4), 1165-1180.
5. Chang, Y. Y., Qiu, J. R., Chen, Y. X., and Hwang, S. J. (2023). Research on deposition toolpath planning and laser head Z-axis rising height setting for directed energy deposition. *Optics & Laser Technology*, 161, 109198.
6. Elkhoully, Y. M., Lim, W. S., Dharmawan, A. G., and Soh, G. S. (2022). Adaptive contour based printing of a propeller using hybrid-wire arc additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 70, 395-400.
7. Zhou, Z., Shen, H., Lin, J., Liu, B., and Sheng, X. (2022). Continuous tool-path planning for optimizing thermo-mechanical properties in wire-arc additive manufacturing: An evolutionary method. *Journal of Manufacturing Processes*, 83, 354-373.
8. Jensen, M. L., Mahshid, R., D'Angelo, G., Walther, J. U., Kiewning, M. K., Spangenberg, J., ... & Pedersen, D. B. (2019). Toolpath strategies for 5DOF and 6DOF extrusion-based additive manufacturing. *Applied Sciences*, 9(19), 4168.
9. Rauch, M., Hascoet, J. Y., and Querard, V. (2021). A multiaxis tool path generation approach for thin wall structures made with WAAM. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(4), 128.
10. Campocasso, S., Chalvin, M., Bourgon, U., Hugel, V., and Museau, M. (2023). Manufacturing of a Schwarz-P pattern by multi-axis WAAM. *CIRP Annals*, 72(1), 377-380.
11. Chalvin, M., Campocasso, S., Hugel, V., and Baizeau, T. (2020). Layer-by-layer generation of optimized joint trajectory for multi-axis robotized additive manufacturing of parts of revolution. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65, 101960.
12. Venturini, G., Montevecchi, F., Scippa, A., and Campatelli, G. (2016). Optimization of WAAM deposition patterns for T-crossing features. *Procedia Cirp*, 55, 95-100.

13. Köhler, M., Sun, L., Hensel, J., Pallaspuuro, S., Kömi, J., Dilger, K., and Zhang, Z. (2021). Comparative study of deposition patterns for DED-Arc additive manufacturing of Al-4046. *Materials & Design*, 210, 110122.
14. Flores, J., Garmendia, I., and Pujana, J. (2019). Toolpath generation for the manufacture of metallic components by means of the laser metal deposition technique. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 101(5), 2111-2120.
15. Müller, J., and Hensel, J. (2023). WAAM of structural components—building strategies for varying wall thicknesses. *Welding in the World*, 67(4), 833-844.
16. Cao, Y., Zhu, S., Liang, X., and Wang, W. (2011). Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(3), 641-645.
17. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., and Li, H. (2015). A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 31, 101-110.
18. Ni, M., Zhou, Y., Hu, Z., Qin, X., Xiong, X., and Ji, F. (2023). Forming optimization for WAAM with weaving deposition on curved surfaces. *International Journal of Mechanical Sciences*, 252, 108366.
19. Giordano, A., Diourté, A., Bordreuil, C., Bugarin, F., and Segonds, S. (2022). Thermal Scalar Field for Continuous three-dimensional Toolpath strategy using Wire Arc Additive Manufacturing for free-form thin parts. *Computer-Aided Design*, 151, 103337.
20. Sarma, R., Kapil, S., and 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.
21. Yu, Z., Pan, Z., Ding, D., Rong, Z., Li, H., and Wu, B. (2022). Strut formation control and processing time optimization for wire arc additive manufacturing of lattice structures. *Journal of Manufacturing Processes*, 79, 962-974.
22. Venturini, G., Montevecchi, F., Bandini, F., Scippa, A., and Campatelli, G. (2018). Feature based three axes computer aided manufacturing software for wire arc additive manufacturing dedicated to thin walled components. *Additive Manufacturing*, 22, 643-657.
23. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., and 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.
24. Yuan, L., Pan, Z., Polden, J., Ding, D., van Duin, S., and Li, H. (2022). Integration of a multi-directional wire arc additive manufacturing system with an automated process planning algorithm. *Journal of Industrial Information Integration*, 26, 100265.
25. Cho, D. W., and Na, S. J. (2015). Molten pool behaviors for second pass V-groove GMAW. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88, 945-956.

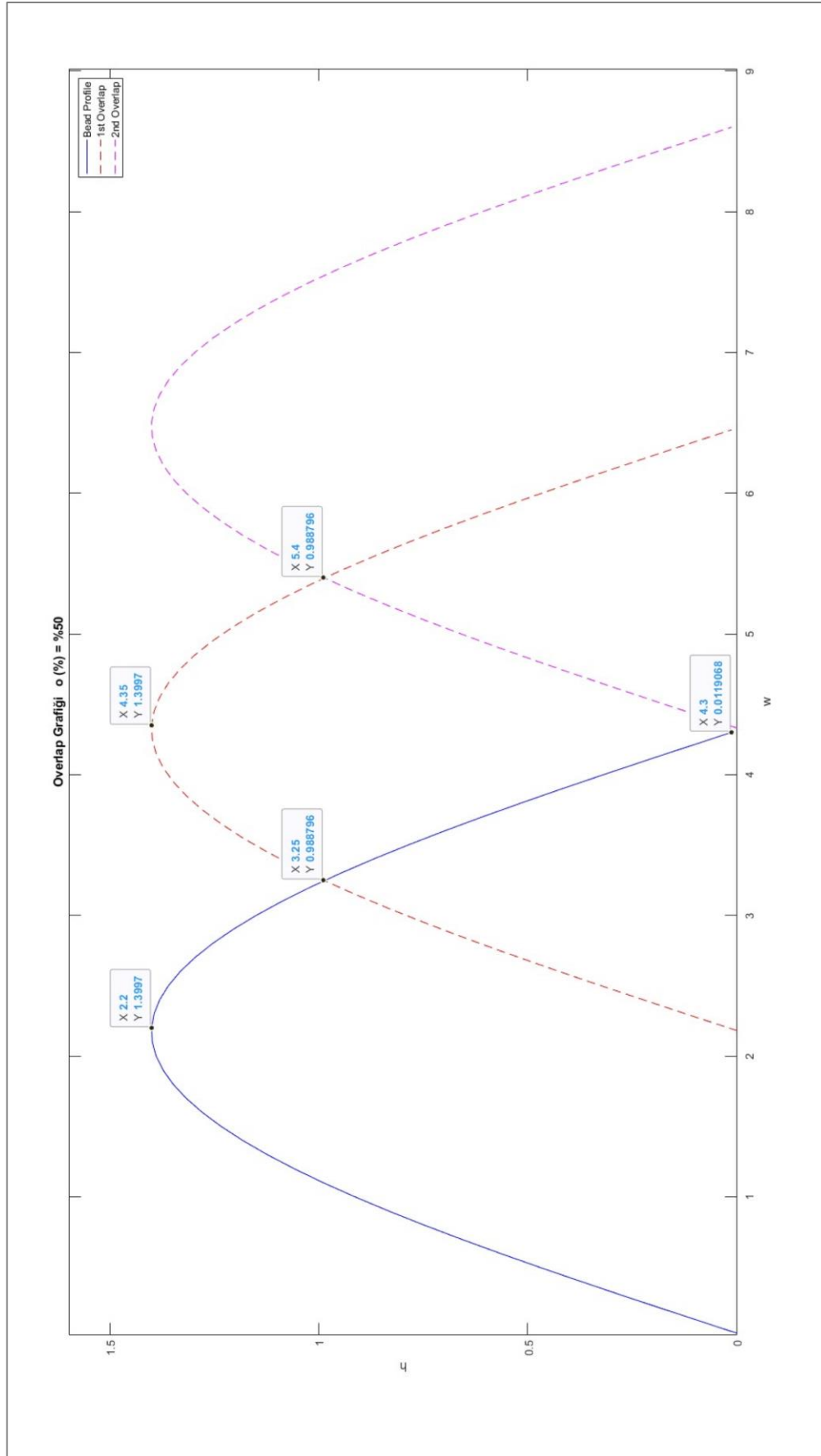
26. Demir, A. G. (2018). Micro laser metal wire deposition for additive manufacturing of thin-walled structures. *Optics and Lasers in Engineering*, 100, 9-17.
27. Ding, Y., Dwivedi, R., and Kovacevic, R. (2017). Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 44, 67-76.
28. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Van Duin, S., and Larkin, N. (2016). Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 39, 32-42.
29. Panchagnula, J. S., and Simhambhatla, S. (2018). Manufacture of complex thin-walled metallic objects using weld-deposition based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 194-203.
30. Piegl, L., and Tiller, W. (2012). *The NURBS book*. Berlin: Springer Science & Business Media, 00-00.

EKLER

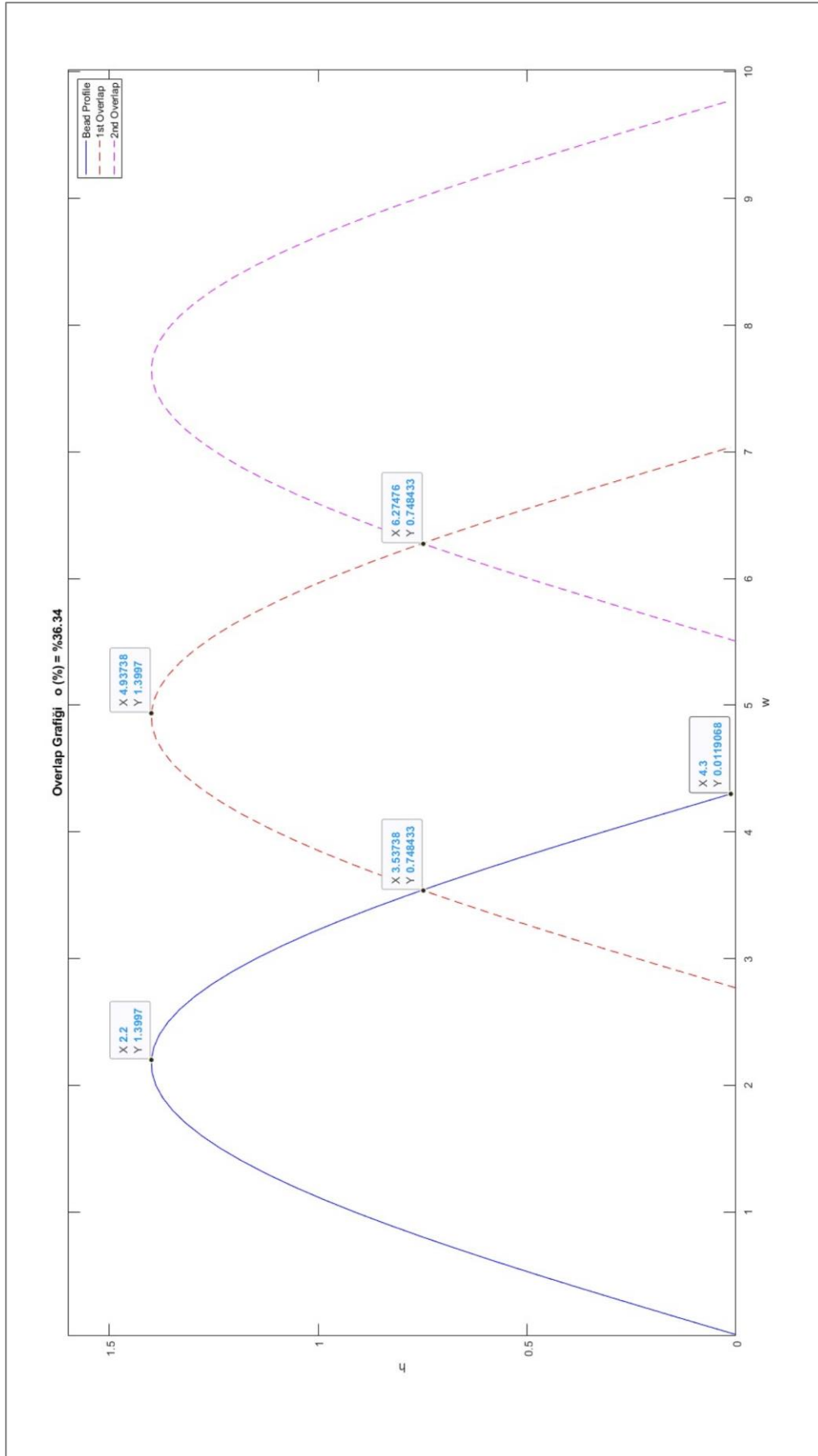
EK-1. %15 Bindirme Oranı ile Oluşturulmuş Üç Kaynak Dikişi Grafiği



EK-2. %50 Bindirme Oranı ile Oluşturulmuş Üç Kaynak Dikişi Grafiği



EK-3. %36,34 Bindirme Oranı ile Oluşturulmuş Üç Kaynak Dikişi Grafiği





Gazili olmak ayrıcalıktır