



**TEL BESLEMELİ EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ İÇİN KAPALI
DEVRE YIĞMA YOLU PLANLAMASI**

Mohammad Mazen ALHAKEEM

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2023

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.

Mohammad Mazen ALHAKEEM

08/08/2023

TEL BESLEMELİ EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ İÇİN KAPALI DEVRE YIĞMA YOLU PLANLAMASI

(Doktora Tezi)

Mohammad Mazen ALHAKEEM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2023

ÖZET

Eklemeli imalat teknolojisi, uzay, havacılık, savunma ve otomotiv sektörü gibi önemli alanlarda umut vaat eden yöntemlerden biridir. Bu teknolojinin alt dalı olan tel beslemeli ark ergitmeli eklemeli imalat teknolojisinin (WAAM), büyük şekilli yoğun parçaları hızlı ve nispeten kısa bir sürede üretme yeteneği mevcuttur. Isı kaynağı olarak kaynak arkını ve besleme malzemesi olarak çeşitli kimyasal bileşimdeki kaynak tellerini kullanılır. Metal biriktirmede kullanılan yüksek enerjili ısı kaynağı, sıcaklık farkları ve bunun sonucunda oluşan deformasyonlar; ek olarak ısı birikimi ve neticesinde kaynak dikişinin akması gibi olumsuzluklara neden olur. Isı dağılımı doğrudan yığma yoluna bağlı bir olay olduğu bilinmektedir. Termal birikimin etkisini azaltmak için şu ana kadar sunulan tüm çözümler, önceden tanımlanmış birçok yığma modelinin test edilmesine ve en iyi sonucu veren modelin seçilmesine dayanmaktadır. Çeşitli olasılıkları test etmek maliyetli olduğundan, belirli modellerin sayısal olarak test edilmesi, özellikle üretilecek parçaların boyutları büyükse maliyeti arttırıcı unsur olmaktadır. Bunun nedeni, analiz yapmanın birçok zorluğu beraberinde getirmesidir. Yığma yolu oluşturma ve analiz için iki farklı araç kullanılmaktadır. Bu, kullanıcı için zorluklarla beraber yöntemin etkinliğini azaltır. Bu tez çalışmasında parçadaki ısı dağılımına göre yığma yolu üretebilen bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma, geliştirilen atlama stratejisine göre parçadaki sıcaklık varyansının en az değerini temel alarak yığma yolu (paterni veya deseni) vermektedir. Geliştirilen yaklaşımda, yığma yolu üretimi ve termal analiz için bölümler geliştirilmiştir. Böylece kullanıcı, tek adımlı yığma yolunu kolaylıkla oluşturabilecektir. Önerilen algoritma endüstride kullanılan bir parçanın WAAM ile üretilmesi aşamasında kullanılmış ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Üretilen parça üzerinde gerçekleştirilen boyutsal ölçümler sonucunda, normal WAAM stratejileriyle üretilen parça geometrilerine oranla parçada oluşan boyutsal deformasyonun %37 ve kaynak dikişi akmasının %21 oranında azalttığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Tel ark ergitmeli eklemeli imalat, Yığma yolu planlaması, Isıl analiz
Sayfa Adedi : 114
Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

OFF-LINE DEPOSITION PATH PLANNING FOR WIRE FED ADDITIVE
MANUFACTURING PROCESSES

(Ph. D. Thesis)

Mohammad Mazen ALHAKEEM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2023

ABSTRACT

Additive manufacturing technology is one of the promising methods in important fields such as aerospace, aviation, defense, and automotive industries. The subfield of this technology, known as wire-arc additive manufacturing (WAAM), has the capability to quickly and relatively easily build large and dense parts. WAAM utilizes a welding arc as the heat source and welding wire with various chemical compositions as the feed material. The high-energy heat source used for metal deposition results in temperature differences, leading to deformations, heat accumulation, and negative effects such as the flow of the bead. The heat distribution is directly dependent on the deposition path. To reduce the impact of thermal accumulation, all the solutions proposed so far rely on testing numerous predefined deposition patterns and selecting the best-performing pattern. Testing various possibilities is costly, so models generally are numerically tested, which can be particularly expensive when dealing with large-sized parts. This is due to the numerous challenges involved in conducting the analysis. Two different tools are used for deposition path generation and analysis, which reduces the effectiveness of the method and presents difficulties for the user. In this thesis, an algorithm is developed to generate a deposition path based on the heat distribution in the part. The algorithm can provide a deposition pattern by considering the minimum value of temperature variance in the part, according to the developed jumping strategy. Codes are written within the algorithm for deposition path generation and thermal analysis. As a result, the user can easily create a single-step deposition path. The algorithm was experimentally evaluated by depositing a part used in aircraft using a deposition path generated by the algorithm. Measurements showed that the algorithm was able to reduce deformation in the part by 37% and weld seam flow by 21%.

Science Code : 91438

Key Words : Wire-arc additive manufacturing, Deposition path planning, Thermal analysis

Page Number : 114

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlığı sürecinde sunduğu değerli rehberlik ve yönlendirmeler için tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a, bana sürekli akademik ve profesyonel destek sağladığı, araştırma hedeflerimi gerçekleştirmeme yardımcı olduğu için en derin teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca tez izleme komitemde yer alan Prof. Dr. Rahmi ÜNAL ve Prof. Dr. Erhan İlhan KONUKSEVEN'e tez çalışması süresince, yapmış olduğumuz dönemlik toplantılarda geri bildirimleri ile sağladıkları değerli yorumlar ve öneriler sunarak araştırmama katkıları için ayrı ayrı teşekkürleri sunarım... Ayrıca, yardım ve destekleri için arkadaşlarım Dr. Mehmet MOLLAMAHMUTOĞLU ve Ebubekir DOĞAN'a da teşekkür ederim. Deneylerin gerçekleştirilmesi için gerekli altyapıyı sağlayan INTECRO Robotik A.Ş. yöneticileri ve kıymetli çalışanı Ar-Ge mühendisi Nevzat BOL'a teşekkür ederim. Zorlu zamanlarda ve yoğun çalışmalarda yanımda güçlü bir destek olan aileme derin şükranlarımı sunarım. Son olarak bu araştırma sürecimde ve doktora tezimi tamamlamamda katkıda bulunan tüm insanlara içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
2.1. WAAM'ın Tarihsel Gelişimi	6
2.2. WAAM İşleminin Çalışma Prensibi:	8
2.2.1. WAAM işlemindeki kullanılan ısı kaynakları:	9
2.2.2. WAAM işlemindeki kullanılan metaller:.....	9
2.3. WAAM'daki Yığma Yolu Planlamanın Genel Aşamaları:	10
2.3.1. Tek dikiş modellenmesi	10
2.3.2. Yığma örüntüleri	15
2.3.3. Isı birikiminin yığılmış parça üzerindeki etkisi	24
2.3.4. Sıcaklık farklılıklarının deformasyon ve kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisi	26
2.3.5. Yığma yolu oluşturma ve termal ve yapısal analiz yazılımları.....	30
3. YIĞMA YOLU ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ	35
3.1. CAD Modeli Okuma Aşaması ve Dilimleme	36
3.2. Katmanlar İçinde Nokta Matrisi Oluşturma Yöntemi.....	37
3.3. Kesit Sınırları Dışında Kalan Noktaların Çıkarılması	38

	Sayfa
3.4. Raster Veya Zikzak Örüntülerine Göre Yığma Yollarının Oluşturulması.....	39
3.4.1. Kısa ve uzun yığma yollarını bulması.....	40
3.5. Kontur Örüntüsüne Göre Yığma Yollarının Oluşturulması.....	42
3.6. Yığma Yolu Oluşturma İçin Kullanıcı Arayüzü	44
4. TERMAL ANALİZE DAYALI YIĞMA YOLLARININ PLANLANMASI	47
4.1. Isıl Analiz Yaklaşımlarına Giriş.....	47
4.2. Geliştirilen Isıl Analizi Prensibi.....	48
4.2.1. Modelin sonlu hacimlerinin oluşturulması.....	48
4.2.2. Isıl analizin çözüm denklemleri	51
4.2.3. Isıl analizinde kullanılan ısı kaynağı modeli.....	54
4.2.4. Malzeme ekleme yaklaşımı.....	55
4.3. En Az Sıcaklık Varyansı Veren Yığma Yolunun Atlama Stratejisi İle Bulunması	55
4.3.1. Yığma yönünün sıcaklık varyansı üzerindeki etkisi	56
4.3.2. Atlamanın sıcaklık varyansı üzerindeki etkisi	56
4.3.3. Atlamalı raster stratejisinin adımları.....	58
4.4.4. Geliştirilen algoritmanın sıcaklık varyansı üzerindeki etkisini incelenmesi.....	60
4.5. Raster ve kontur örüntüleri arasındaki karşılaştırma	63
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	67
5.1. Deneysel Çalışmada Seçilen Parça Ve Deney Düzeneği	67
5.2. Parçanın Yığılmasında Kullanılan Stratejiler.....	68
5.3. Yığma Stratejisinin Sıcaklık Varyansı Üzerindeki Etkisi	73
5.4. Kullanılan Yığma Stratejisinin Üretilen Parçadaki Deformasyonlara Etkisi.....	80
5.4.1. A kısmının değerlendirilmesi	81
5.4.2. B kısmının değerlendirilmesi	87

	Sayfa
5.5. A kısmının İçyapısının Değerlendirilmesi	89
6. ALGORİTMADA GELİŞTİRİLEN ISIL MODEL DOğRULAMA	95
6.1. Hejripour'un çalışmasıyla Modelin Karşılaştırılması	95
6.2. Pirometre İle ölülen Sıcaklık İle Model Sıcaklığı Karşılaştırılması.....	96
6.3. Termal Kamera İle Doğrulama	97
6.3.1. U şeklinde ince cidarlı parça ile doğrulama	97
6.3.2. Kutu şeklinde parça ile doğrulama.....	99
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	105
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŐ	114

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. WAAM’da kullanılan ısı kaynakların avantajları ve dezavantajları	10
Çizelge 2.2. Yığma örüntülerinin avantajları ve dezavantajları	19
Çizelge 2.3. Denenen örüntülerin özeti.....	30
Çizelge 5.1. Proses verileri	68
Çizelge 5.2. Proses parametreleri.....	72
Çizelge 5.3. ER70S-6 ısı özellikleri.....	73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal eklemeli imalat ana yöntemleri	5
Şekil 2.2. WAAM teknolojisinin şematik çalışma prensibi.....	9
Şekil 2.3. Yığılmış dikişin kesit profili.....	12
Şekil 2.4. Modellerin deneysel dikiş alanına göre performansları.....	13
Şekil 2.5. Tel besleme hızının kaynak hızına oranının nispi dikiş profil alanı hata üzerindeki etkisi	13
Şekil 2.6. İki dikiş arasındaki oluşan boşluk (a) $d = w$ ve (b) $d < w$ olduğunda.....	14
Şekil 2.7. Düz üst örtüşüm modeli.....	15
Şekil 2.8. Teğet örtüşüm modelinde d mesafesine göre dikiş geometrisi değişimi	15
Şekil 2.9. Dikişin başlangıcı ve sonunun şekli	17
Şekil 2.10. Deformasyonu daha az olan raster (a) ve sarmal (c) örüntülerine kıyasla zikzak örüntüsünde büyük köşe deformasyonu (b)	18
Şekil 2.11. Kontur örüntüsünü kullanılırken parçada oluşan boşluklar.....	18
Şekil 2.12. Kaynak dikişinin yayılması	20
Şekil 2.13. Büyük parçalarda meydana gelen duvar çökmesine yol açan malzeme eksikliği	20
Şekil 2.14. Köşe şeklindeki parçada oluşan boşluklar	21
Şekil 2.15. Venturini'nin metodu.....	22
Şekil 2.16. Yığma yapılırken parçanın aktif olarak soğutulması.....	23
Şekil 2.17. (a) Kirişte kullanılan raster örüntüleri (b) levhada kullanılan biriktirme örüntüleri.....	27
Şekil 2.18. Yığma yolu stratejileri a) uzun zikzak, b) kısa zikzak, c) içeriye doğru spiral, d) dışarıya doğru spiral	27
Şekil 2.19. Yığma yolu stratejileri	28
Şekil 2.20. Üç farklı yığma yolu örüntüsü a) raster, b) sarmal (içeriye doğru) , c) sarmal (dışarıya doğru)	28
Şekil 2.21. Dört farklı yığma yolu sıralaması	29

Şekil	Sayfa
Şekil 2.22. WAAM yığma yolunu oluşturmak için Ding tarafından geliştirilen arayüz	31
Şekil 2.23. Ferreira tarafından geliştirilen programın arayüzü	32
Şekil 2.24. WAAM üretiminde Powermill yazılımının kullanımına iki örnek a) ve b)	33
Şekil 3.1. Dilimleme algoritmanın adımları (a) STL modeli, (b) üçgenlerin kenarları, (c) katmanların düzlemleri, (d) kenar-düzlem kesişmesi, (e) fazla noktaların silinmesi, (f) ortaya çıkan katman profili	35
Şekil 3.2. Yığma yolunun oluşumunun adımları	36
Şekil 3.3. Nokta matrisi oluşturmak için bilinmesi gereken boyutlar.....	37
Şekil 3.4. Nokta matrisi ile dış sınır ile arasında fark, y_1 büyük (a) y_1 küçük (b).....	38
Şekil 3.5. Kesitin içinde yer alan noktaların İNPOLYGON komutu ile tespit edilmesi	39
Şekil 3.6. Kesit içinde kalan noktalardan oluşan zikzak örüntüsü.....	39
Şekil 3.7. İki tip kesiti olan parçanın zikzak örüntüsü, parçanın STL modeli a) ve katmanlar içindeki yığma yolları b)	40
Şekil 3.8. Deneme yanılma metoduyla altıgen için; en kısa yığma yolu (a) en uzun yığma yolu (b) kapalı eğri için; en kısa yığma yolu (c) ve en uzun yığma yolu (d) bulunması	41
Şekil 3.9. İki doğru parçası olan AB ve BC'nin kaydırılması sonucu çıkan de ve fg doğru parçaları (a), budama yapıldıktan sonra oluşturulan nihai ofset doğru parçaları dh ve hg (b)	43
Şekil 3.10. Dikdörtgen (a), çokgen (b) ve dörtgen (c) kesit sınırlarına (mavi) göre kontur örüntüsüyle oluşturulan yığma yolları (kırmızı)	43
Şekil 3.11. Yığma yolu oluşturma programın arayüzü	44
Şekil 3.12. Modelin STL dosyasının yüklenmesi	45
Şekil 3.13. Katman yüksekliğine göre oluşturulan katmanlar	45
Şekil 3.14. Zikzak stratejisine göre oluşturulan yığma yolları	46
Şekil 4.1. Oluşturulacak sonlu hacmin boyutları	49
Şekil 4.2. Sonlu hacimlerin matrisi.....	49
Şekil 4.3. Altılığın sonlu hacimleri oluşturulması, ince hacimli altlık a), kaba hacimli altlık b)	50

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. Yığma yolu (a) ve altlık sonlu hacimlerinin (b) oluşturulması.....	51
Şekil 4.5. İki bitişik sonlu hacim şeması.....	52
Şekil 4.6. Z sayıda sonlu hacme sahip bir model.....	53
Şekil 4.7. Isı kaynağı modeli şeması: eklenen hacme geçen enerji (Q_d) ve komşu hacimlere geçen enerji (Q_r)	54
Şekil 4.8. Malzeme yığması sırasında ısı değerlerinin değişiminin gösterimi	55
Şekil 4.9. Simetrik parça ve altlık (b) üzerindeki yığma yönlerinin (a) incelenmesi ve altlıktaki ortalama sıcaklık varyansları(c)	57
Şekil 4.10. Dikdörtgen parçanın farklı bölümlere bölünmesi üç (a), dört (b), beş (c) on (d) ile denenmiş atlama senaryoları	58
Şekil 4.11. Bölüm sayısına göre sıcaklık varyansının değişimi.....	58
Şekil 4.12. Her pasonun önceki katmandan ona bitişik olan hacimlerle gruplandırılması.....	59
Şekil 4.13. Algoritma ile değerlendirilmiş parça	60
Şekil 4.14. Her katmanda denenen 12 yığma açısının yönü	61
Şekil 4.15. Sıralı raster ve atlamalı raster uygulandığında ortalama sıcaklık varyansı arasındaki karşılaştırma	62
Şekil 4.16. Parçada ısı dağılımı, sıralı (a) veya atlamalı (b) raster	62
Şekil 4.17. Atlama raster ile atlamalı konturu karşılaştırmak için seçilen parçalar: (a) iç bükey, (b) dikdörtgen ve (c) dış bükey	63
Şekil 4.18. (a) iç bükey, (b) dikdörtgen ve (c) dış bükey çokgenler içinde oluşturulan kontur yığma yolları	64
Şekil 4.19. İç bükey parça için önceki katmanın ortalama sıcaklık varyansı	64
Şekil 4.20. Dikdörtgen parça için önceki katmanın ortalama sıcaklık varyansı.....	65
Şekil 4.21. Dış bükey parça için önceki katmanın ortalama sıcaklık varyansı.....	65
Şekil 4.22. İç bükey Parçadaki ısı dağılımı, (a) atlamalı raster, yığma açısı=150° (b) atlamalı kontur	66
Şekil 4.23. İç Dikdörtgen Parçadaki ısı dağılımı, (a) atlamalı raster, yığma açısı=30° (b) atlamalı kontur	66
Şekil 4.24. Dış bükey Parçadaki ısı dağılımı, (a) atlamalı raster, yığma açısı=60° (b) atlamalı kontur.....	66

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Deneysel çalışma için seçilen parça ve ebatları.....	67
Şekil 5.2. Üç kısmın katman sayıları	69
Şekil 5.3. Pasolar arasında geçiş yapılırken kat edilen mesafe SR'de (a), AR'de (b)	70
Şekil 5.4. Katmanlar arası bekleme zamanı.....	71
Şekil 5.5. Birinci katmanın paso sırası.....	71
Şekil 5.6. AR'de A kısmının katmanlar yönleri	72
Şekil 5.7. Mevcut katmanın önceki katmanındaki ani sıcaklık varyansı	73
Şekil 5.8. Mevcut katmanın önceki katmanındaki ortalama sıcaklık varyansı.....	74
Şekil 5.9. Yığılmış katmanın ortalama sıcaklık varyansı	75
Şekil 5.10. İlk katmanın yığılması sırasında SR ve AR kullanıldığında altlığın ortalama sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması	75
Şekil 5.11. Isı dağılımı ilk 5 paso yığıldıktan sonra a) SR b) AR	76
Şekil 5.12. Birinci katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR	76
Şekil 5.13. İkinci katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR	77
Şekil 5.14. Üçüncü katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR	77
Şekil 5.15. Dördüncü katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR	77
Şekil 5.16. Beşinci katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR	78
Şekil 5.17. Altıncı katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR	78
Şekil 5.18. Yedinci katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR.....	78
Şekil 5.19. A kısmı yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR.....	79
Şekil 5.20. Her bir katmanın yığılmasından sonra bir önceki katmanın ortalama sıcaklık varyansı	79
Şekil 5.21. SR ile karşılaştırıldığında AR kullanılarak yığma sırasında sıcaklık varyansındaki azalma yüzdesi	79
Şekil 5.22. SR (a) ve AR (b) ile üretilen parçalar için 3d tarama ile oluşturulan CAD dosyaları	81
Şekil 5.23. Kesit konumu (a) ve iki parçada yüzeyin deformasyonu (b).....	82
Şekil 5.24. (a) SR'de ve (b) AR'de yüzeyin yükseklik farkı	82

Şekil	Sayfa
Şekil 5.25. SR (a) ve AR (b) ile yığma yapıldığında deforme olmuş bölümlerin uzunluğu arasındaki fark	83
Şekil 5.26. Birinci katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı a) SR b) AR yöntemleri ile	84
Şekil 5.27. İkinci katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı a) SR b) AR yöntemleri ile	84
Şekil 5.28. Üçüncü katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı a) SR b) AR yöntemleri ile	84
Şekil 5.29. Dördüncü katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı a) SR b) AR yöntemleri ile	85
Şekil 5.30. Beşinci katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı a) SR b) AR yöntemleri ile	85
Şekil 5.31. Altıncı katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı a) SR b) AR yöntemleri ile	85
Şekil 5.32. Yedinci katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı a) SR b) AR yöntemleri ile	86
Şekil 5.33. Sekizinci katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı a) SR b) AR yöntemleri ile	86
Şekil 5.34. SR'de A yüzeyinin deformasyonu sonucu C ekseninin sapması (a) ve AR'de C ekseninin dikey kalması (b).....	87
Şekil 5.35. SR (a) ve AR (b) kullanılarak yığma yapıldığında B bölümünün duvar profilindeki fark.....	88
Şekil 5.36. Her katman yığılması sonrası maksimum sıcaklık	89
Şekil 5.37. Her katman yığılması sonrası minimum sıcaklık	89
Şekil 5.38. Her katman yığılması sonrası sıcaklık farkı	89
Şekil 6.1. Kontrol noktasının konumu	95
Şekil 6.2. Deneysel ve model sıcaklığı	96
Şekil 6.3. Pirometre ile ölçülecek noktanın konumu	97
Şekil 6.4. Pirometre ve model sıcaklığı	97
Şekil. 6.5. Termal kamera görüntülemesi için yığılan parçanın geometrisi, a= 207 mm, d=52.5 mm, b=86 mm, c=7.7 mm.....	98

Şekil	Sayfa
Şekil 6.6. Onuncu katmanın yığılmasından sonra, termal kamera ölçülen (a) ile tahmin edilen (b) sıcaklığın karşılaştırılması	98
Şekil 6.7. Yirminci katmanın yığılmasından sonra, termal kamera ölçülen (a) ile tahmin edilen (b) sıcaklığın karşılaştırılması	99
Şekil 6.8. Kontrol noktasının konumu (p1) ve ilk katmanın yığma pasoları.....	100
Şekil 6.9. p1 kontrol noktasının simülasyon ve ölçülen sıcaklıkları.....	100
Şekil 6.10. İkinci kontrol noktasının konumu (p2) ve ikinci katmanın yığma pasoları	101
Şekil 6.11. p2 kontrol noktasının simülasyonu ve ölçülen sıcaklıkları.....	101
Şekil 6.12. p2 İkinci katman yığıldıktan sonra ölçülen 5 kontrol noktaları (L1- L2- L3- L4- L5) konumları	102
Şekil 6.13. Paso orta kontrol noktalarının karşılaştırılması	103

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Paslanmaz çelik yığılarak WAAM ile üretilen 10,5 metre uzunluğunda bir köprü	6
Resim 2.2. 1925 yılında Baker'in ürettiği dekoratif parçalar	7
Resim 2.3. WAAM'ın farklı alanlarda kullanımına dair bazı örnekler	8
Resim 2.4. Farklı hız değerleri kullanıldığında ortaya çıkan kaynak dikişi Morfolojileri	11
Resim 2.5. Farklı parametrelere bağlı dikiş şeklinin değişmesinin OM altında görünümü	12
Resim2.6. Yığman başlangıcında aşırı malzeme birikimi ve yığma sonunda ince duvarın çökmesi	21
Resim 2.7. Kesişen cidarlardaki hatalar: a) tepeleme b) çökme	22
Resim 2.8. İlk dikişin genişliği (kırmızı hat) ile diğer dikişlerin genişliği arasındaki akmadan kaynaklanan fark	24
Resim 2.9. Soğutmasız yığma (a) altlığın soğutulmasıyla yığma (b)	25
Resim 2.10. Aşırı ısı birikimi yüzünden duvarın çökmesi	25
Resim 2.11. Katmanlar arasında bekleme zamanının (a) 15 s (b) 0 s olması sonucu yanal yüzey pürüzlülüğündeki fark, Malzeme: çelik ER70S-6	26
Resim 2.12. Katmanlar arasında bekleme zamanının (a) 120 s (b) 5 s olması sonucu yanal yüzey pürüzlülüğündeki fark, Malzeme: paslanmaz çelik ER 316LSi	26
Resim 5.1. Deneyde kullanılan CMT makinesi ve robot.....	68
Resim 5.2. (a) SR'de, metalin aşırı ısıtılması sonucunda ısıma meydana gelirken, (b) AR'de metal ısıma yapmamaktadır	80
Resim 5.3. KSCAN20 3B lazer tarayıcı	81
Resim 5.4. C kısmının ortasından olacak şekilde iki parçanın kesildiği yer	90
Resim 5.5. SR ile üretilen parçanın (solda) ve AR ile üretilen parçanın (sağda) kesiti	91
Resim 5.6. OM ile SR kesitinden elde edilen iki resim (50x)	91
Resim 5.7. OM ile AR kesitinden elde edilen iki resim (50x).....	92

Resim	Sayfa
Resim 5.8. SR parçasının mikro yapı görüntüleri (200x)	92
Resim 5.9. AR parçasının mikro yapı görüntüleri (200x)	93
Resim 6.1. Modeli doğrulamak için yığılmış kutu şeklindeki parça	99
Resim 6.2. Kontrol noktaların sıcaklıkları, ikinci katman yığıldıktan sonra (a) deneysel, (b) tahmin edilen.....	102

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

T	Sıcaklık, °C
T_∞	Ortam sıcaklığı, °C
I	Akım
V	Voltaaj
k	Isı iletim katsayısı, W/(m.K)
h	Taşınım ile ısı transferi katsayısı, W/(m ² .K)
Q	Güç, W
t	Zaman, sn
m	kütle, kg
C	Öz ısı kapasitesi, J/(kg.K)
H	Verim

Kısaltmalar

Açıklamalar

AR	Atlamaalı Raster
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CMT	Soğuk metal transfer
ÇKÇD	Çok katmanlı Çok Dikişli
DMY	Doğrudan Metal Yığma
DÜM	Düz Üst Örtüşüm Modelinin
Eİ	Eklemeli İmalat
OM	Optik mikroskop
SR	Sıralı Raster
STL	Standard Tessellation Language
TÖM	Teğet Örtüşüm Modeli
TYF	Toz Yatağı Füzyon
WAAM	Tel Ark Ergitmeli Eklemeli İmalat

Kısaltmalar**Açıklamalar****Y E Y**

Yönlendirilmiş Enerji Yığma

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) yöntemi, 4. Sanayi devriminin başlıca unsurlarından sayılmaktadır. Çünkü Eİ yöntemi geleneksel üretim yöntemlerinin başa çıkamadığı veya zorlandığı durumlarda çözümler sağlamaktadır. Bunun başlıca nedeni bu yöntemin, özel ve karışık yapıya sahip parçaların üretiminde birtakım kolaylıklar sunmasıdır. Bunun sonucu olarak, Eİ yaklaşımı günümüzde birçok alanda yaygınlaşmıştır. Bu alanlara prototipleme, havacılık, otomotiv ve biyomedikal uygulamalar gibi birçok örnek verilebilir.

Eİ yönteminde muhtelif mühendislik malzemeleri kullanılabilir. Bunların arasında polimerler en yaygın kullanılanlar olsa da özellikle sıcak koşullarda çalışabilecek ve yüksek dayanıma sahip olan metal ve metal alaşımları birçok alanda önem arz etmektedir. Bu nedenle metal eklemeli imalat (MEİ) yöntemi, Eİ yöntemleri arasında önemli bir yer tutmaktadır. Toz yatağı füzyon (TYF), yönlendirilmiş enerji yığılma (YFY) dâhil olmak üzere çeşitli üretim yöntemleri MEİ adı altında yer almaktadır. Bu yöntemler, metali ergiterek birbirine kaynaştırdığı için güçlü bir ısı kaynağı gerektirir. Çünkü metallerin ergime sıcaklığı son derece yüksektir. Bu nedenle metallerin Eİ yöntemi ile üretilmesi genel olarak polimerlere göre daha maliyetli ve zordur. Sonuç olarak MEİ yöntemlerine yönelik olarak üretim parametreleri, işlemin kontrolü ve üretilen parçaların kalitesi açısından araştırmalar elzem hale gelmektedir.

MEİ yöntemi kullanılan malzemenin formu, kullanılma biçimi ve kullanılan ısı kaynağına göre değişik şekillerde sınıflandırılabilir. Burada malzeme formu olarak tel veya toz kullanılmaktadır. Toz malzeme, toz yatak veya yönlendirilmiş halde işlev görmektedir. Tel malzeme ise sadece yönlendirilmiş olarak uygulanmaktadır. Kullanılan ısı kaynakları ise lazer, elektron tabancası ve elektrik ark kaynakları olarak sıralanabilir. MEİ yöntemi içinde yer alan TYF, karmaşık parçalar üretme kabiliyetine sahip olsa da yüksek maliyet, düşük üretim hızı ve üretilen parça boyutlarının küçük olması gibi bazı dezavantajları bünyesinde barındırmaktadır. Diğer taraftan bir çeşit YFY tekniği olan tel ark ergitmeli eklemeli imalat (WAAM), TYF ile karşılaştırıldığında, düşük maliyet, büyük parça boyu ve üretim hızıyla göze çarpmaktadır. Buna mukabil ısı kaynağı olarak tercih edilen ark kaynağı, üretim sürecinde yüksek ısı girdisi sağlamaktadır. Bu durum genel olarak sıcaklığı yükseltmekte, akma deformasyon ve artık gerilme gibi birçok soruna neden olmaktadır. Bu bağlamda sürecin ısısal davranışın kontrolü önem arz etmektedir.

WAAM teknolojisi, kabaca kaynak makinesi, tel besleyici, alt levha ve hareketli bir araç üzerine monte edilmiş bir torçtan oluşmaktadır. Torçun hareketi ile birlikte, malzeme yan yana veya üst üste yığılarak istenilen parça üretilmektedir. Torçun yörüngesini, genellikle parça geometrik şekline göre yapılan yol planlama stratejisi tayin etmektedir. Ancak torçun hareket ettirilmesiyle sadece malzeme yığılmaz, aynı zamanda sisteme büyük bir ısı girdisi olmaktadır. Bunun neticesinde meydana gelen sıcaklık farklılıkları ne kadar büyük olursa, artık gerilmeler ve deformasyonlar da o kadar büyük olur. Buna ilaveten sistem, genel olarak ısınmaya başlar. Bazı durumlarda parçanın bazı bölgelerinde veya genelinde sıcaklık ergime sıcaklığına yaklaşır. Netice olarak parçada akma meydana gelebilir. Geleneksel yığma yolu planlama stratejilerinde, genellikle ısı dağılımı dikkate alınmayarak yığma yolu planlanmaktadır. Zira aynı anda hem yığma yolu planlaması hem de ısı analizinin yapılması istenirse, birden fazla araca (hazır program veya kod) ihtiyaç duyulacaktır. Sonuç olarak birden çok aracın kullanılması, yığma yolu planlama sürecinde güçlükler ortaya çıkarmaktadır.

Bu tezin amacı, WAAM prosesiyle üretilen parçada oluşan ısı farklılıkları mümkün olan en aza indirmek için, sayısal modelleme ile oluşturulan ısı dağılımına göre bir yığma stratejisi geliştirmektir.

Yukarıdaki bilgilerin ışığında bu tezin ana hedefleri şu şekilde özetlenebilir:

- WAAM'da üretilen parçalara yönelik yığma yolu planlanması için bir program geliştirilmesi: Bu program, CAD modeli okuyabilmelidir ve girilen süreç parametrelerine göre yığma yolları oluşturabilmelidir.
- Bu programla bütünleşmiş bir şekilde eşzamanlı olarak çalışan ve parçada termal analiz yapan bir kodun geliştirmesi.
- Sıcaklık varyansının azaltılması prensibine dayanan yeni bir yığma yolu stratejisi oluşturmak amacıyla, ilk iki maddedeki araçların birleştirilmesi ve bir algoritma geliştirilmesi: Bu algoritmada süreç, CAD modelinden başlayıp parçanın üretilebileceği G-Code dosyasının verilmesiyle sona erecektir. Dolayısıyla insan müdahalesinin azaltılması hedeflenmektedir.

Tezin ikinci bölümünde literatürde yığma yolu planlaması için kullanılan yöntemler ele alınmıştır. Tezin üçüncü bölümünde algoritmanın nasıl yığma yolu oluşturduğu anlatılacaktır. Tezin dördüncü bölümünde, algoritmada kullanılan termal analiz metodu

tanıtılacaktır. Beşinci bölümde havacılıkta kullanılan bir parçanın üretilmesinde, algoritmanın uygulamasını içermektedir. Parça, geleneksel yığma stratejisi ve önerilen strateji kullanılarak iki kez üretilmiştir. Daha sonra her iki stratejinin de üretilen parça üzerindeki etkileri incelenmiş ve kıyaslanmıştır. Altıncı bölümde, modelin ısı hesaplamadaki doğruluğu test edilmiş ve geliştirilen modelin hızı, sonlu elemanlar yönteminin hızı ile karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

MEİ günümüzde hala gelişmekte olan üretim yöntemleridir. Temel olarak metal bir malzemenin ergime-katılaşma yoluyla, yan yana veya üst üste parçalar halinde birleşmesi prensibine dayanır. Dolayısıyla bu yöntemlerde sınıflandırma, ilk olarak ısı kaynaklarına göre yapılmaktadır. Burada başlıca şart ısı kaynağının, yüksek ergime sıcaklarına sahip metal alaşımlarını ergitecek güce sahip olmasıdır. Bu bağlamda lazer, elektron tabancası, muhtelif kaynak torçları, fırın veya Joule ısıtması gibi değişik ısı kaynakları kullanılmaktadır. Sınıflandırmada ikinci önemli bir husus üretim malzemesinin formu ve uygulama şeklidir. Malzeme toz, tel veya sac formunda, uygulama şekli olarak ise yatak, yığma veya püskürtme olabilir. Bu bilgiler ışığında Şekil 2.1’de MEİ yöntemleri sunulmuştur.



Şekil 2.1. Metal eklemeli imalat ana yöntemleri

Her bir MEİ yönteminin avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Örneğin yüksek maliyet ve nispeten küçük parça boyutu, TYF’in ana dezavantajlarıdır. Bağlayıcı püskürtmenin

maliyeti TYF'ye göre düşük olmasına rağmen, daha düşük mekanik özelliklere sahip parçalar üretmesi [1] ve karmaşık ikincil işlem gerektirmesi [2] dezavantajlarındandır. Sac laminasyonunda ise parçalar heterojen, yüksek anizotropik özellikler göstermektedir [3]. Malzeme ile bağlayıcı püskürtme arasındaki fark, birincisi malzemeyi altlığa, ikincisi ise bağlayıcıyı bir toz yatağı üzerine püskürtmesidir. Bu durum, üretilecek parçanın maksimum boyutunu, yatak veya altlık boyutuyla sınırlandırır. Diğer taraftan YYY yönteminde ise parça boyutu, ısı kaynağını tutan makine tezgâhının genişliği ile ilişkilidir. Bu nedenle, geniş bir tezgâh kullanılırsa, birkaç metre uzunluğunda parçalar üretmek mümkündür. Buna ek olarak yüksek biriktirme hızı, DMY yönteminin diğer üretim yöntemlerinden üstün kılan bir avantajdır. Resim 2.1'de WAAM teknolojisi kullanılarak üretilmiş 10,5 metre uzunluğunda metal bir köprü gösterilmektedir [4].



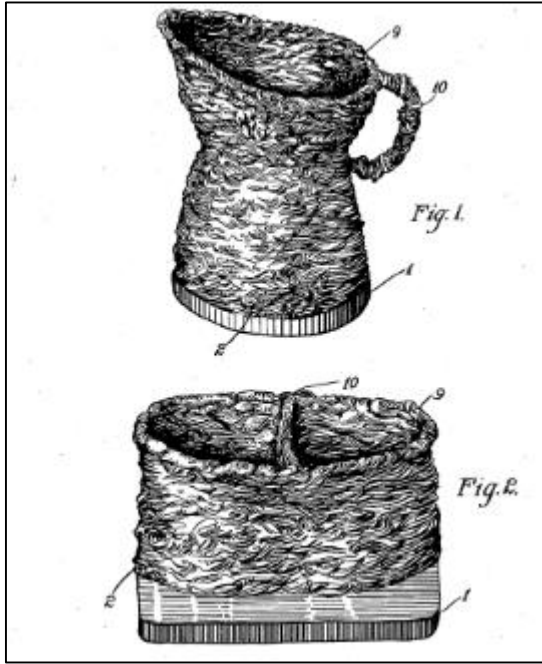
Resim 2.1. Paslanmaz çelik yığılarak WAAM ile üretilen 10,5 metre uzunluğunda bir köprü [4]

YYY yönteminde hammadde iki şekilde beslenir: tel veya toz. Biriktirme hızı telli teknolojilerde 2-3 kg/saat [5] iken tozlularda ise 0,5 kg/saat'e ulaşabilir [6]. YYY yöntemleri karşılaştırıldığında, WAAM'ın maliyeti toz biriktirmeden daha azdır. Bunun başlıca iki sebebi vardır. İlk olarak toz biriktirmede kullanılan lazere kıyasla elektrik arkının maliyeti daha düşüktür. İkinci olarak üretimleri nedeniyle toz, tele göre daha maliyetlidir [5]. Bu veriler WAAM'ı büyük metal parça üretiminde daha cazip hale getirmektedir.

2.1. WAAM'ın Tarihsel Gelişimi

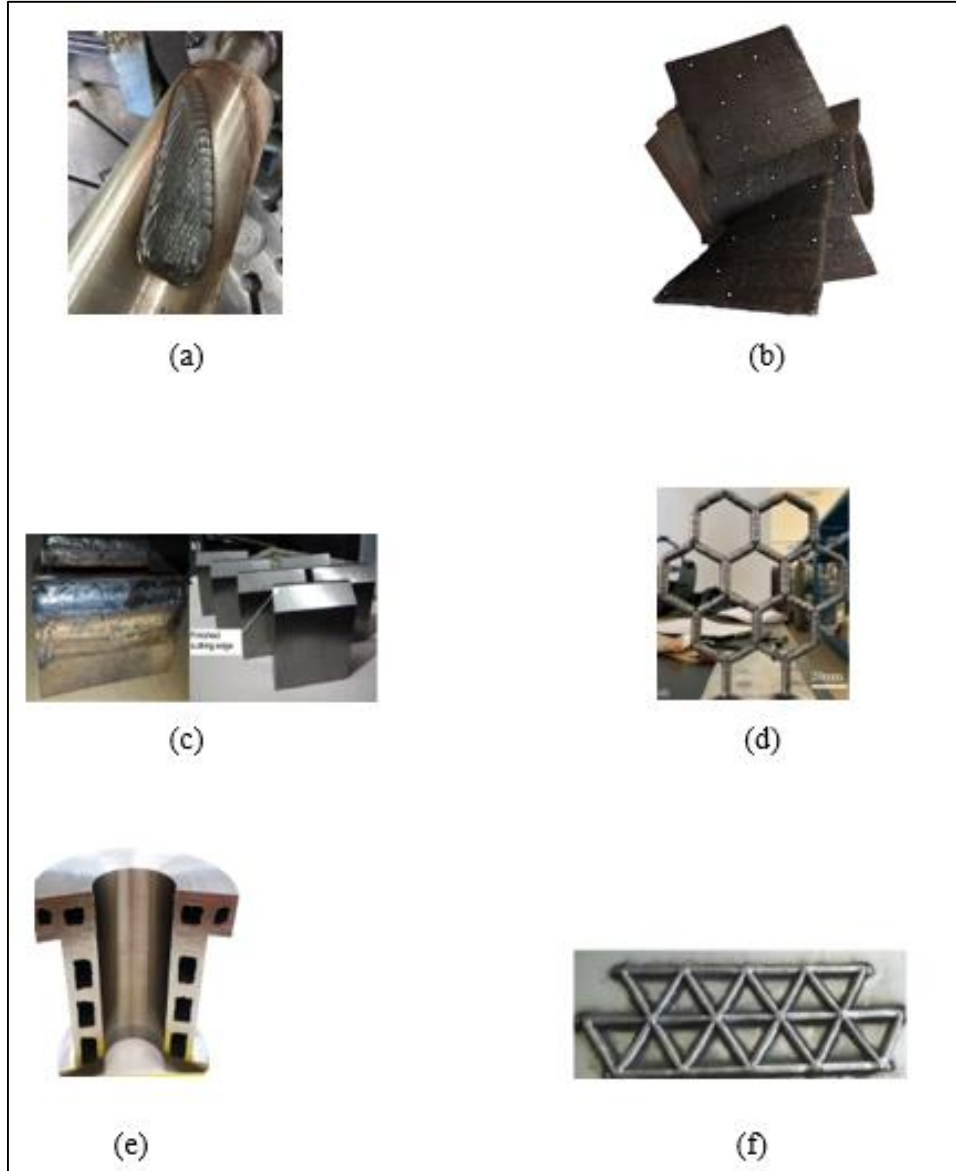
Kaynak yöntemle metal bir parça üretmeye yönelik ilk girişim 1920'lere kadar uzanmaktadır. Ralph Baker [7], metallerin kaynaklanmasıyla dekoratif parçalar üretmek için patent almıştır (Resim 2.2). Ancak kaynak ile parça üretiminin asıl gelişimi, 3B baskı devriminden sonra

başlamıştır. Son otuz yılda araştırmacılar bu teknoloji için muhtelif isimlendirmeler yapmışlardır. Bunlardan biri olan Solid freeform fabrication terimi, hem seramik hem de metal parçaların kalıpsız şekilde üretimini belirtmek için kullanılmıştır. Bir diğer kullanılan terim ise Shaped metal deposition'dır [8]. Daha sonra 2010 yılında Almeida [9], (Wire + Arc Additive Layer Manufacture) WAALM adını vermiştir. WAAM terimi ise, 2011 yılında Kazanas [10] tarafından kullanıldıktan sonra araştırmacılar arasında yaygın hale gelmiştir.



Resim 2.2. 1925 yılında Baker'in ürettiği dekoratif parçalar [7]

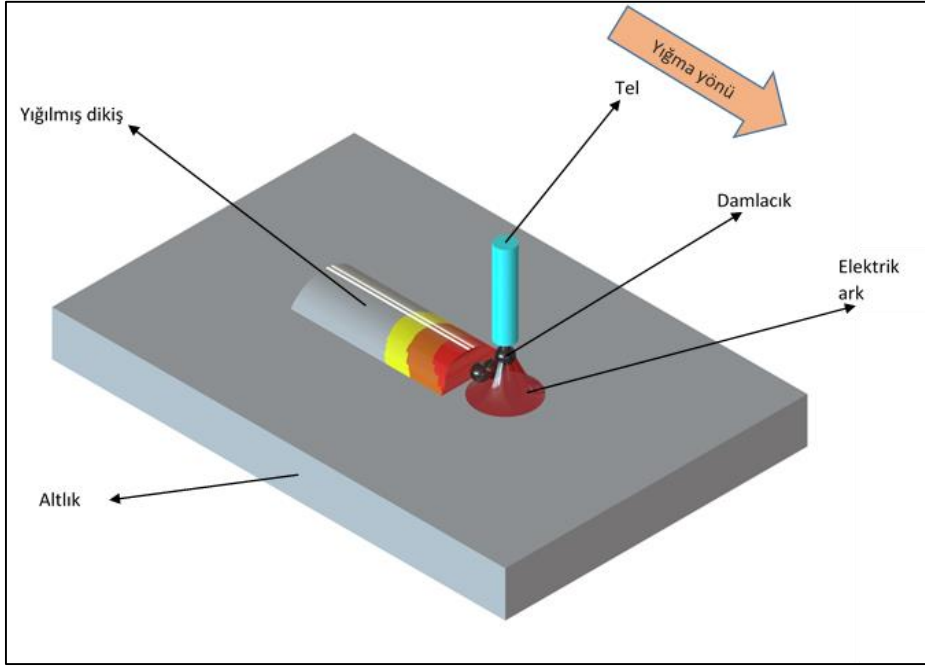
WAAM'ın ilk zamanlarında, torç CNC makinesine bağlanarak hareket ettirilmekteydi. Böylece, orta karmaşıklıkta parçalar üretmek mümkündü. Daha sonraları torçu hareket ettirmek için robot kullanılmaya başlandı. Robotun sağladığı hareket esnekliği, daha karmaşık ve daha uzun parçaların üretilmesine olanak sağladı. Resim 2.3'te WAAM kullanılarak üretilen bazı örnek parçalar gösterilmiştir: bir pervanenin silindirik bir altık üzerine yığılması (Resim 2.3.a) [11], bir silindir ve pervane kanatlarının tamamı (Resim 2.3,b) [12], freze bıçak ağzı (Resim 2.3,c) [13], tel yapılar (Resim 2.3,d) [14], konformal soğutma kanalları Resim 2.3,d) [15] ve güçlendirilmiş panel (Resim 2.3,f) [16].



Resim 2.3. WAAM'ın farklı alanlarda kullanımına dair bazı örnekler [11-16]

2.2. WAAM İşleminin Çalışma Prensibi:

WAAM işleminin çalışma prensibi, elektrik arkı oluşturulup telin ark bölgesine yönlendirilmesine dayanmaktadır. Böylece tel ergir ve damlacıklar halinde düşmeye başlar. Torç ile altlık arasındaki göreceli hareket ve ark bölgesinde oluşan karmaşık kuvvetler sayesinde damlacıklar üst üste yığılır ve kaynak dikişi oluşur. Daha sonra dikişler yan yana veya üst üste istiflenerek parça elde edilir. Proses şematığı, Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. WAAM teknolojisinin şematik çalışma prensibi

2.2.1. WAAM işlemindeki kullanılan ısı kaynakları:

WAAM işlemi aslında bir kaynak işlemidir. Dolayısıyla kaynakta kullanılan ısı kaynakları WAAM’da kullanılabilir. Kullanılan ısı kaynakları üç ana kategoriye ayrılabilir: Gaz metal ark kaynağı (GMAW), gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) ve plazma ark kaynağı [5]. GMAW, tüketilebilir bir tel elektrot ile iş parçası metali arasında oluşan bir elektrik arkı yardımıyla gerçekleşen bir kaynak işlemidir. GTAW ve PAW yönteminde ise tükenmez bir tungsten elektrot kullanılarak kaynak gerçekleştirir. PAW ve GTAW'daki kaynak kalitesi GMAW'dan daha yüksek olmasına rağmen, yol planlama özgürlüğünün daha fazla olduğu ve daha yüksek biriktirme oranlarına sahip olan GMAW'nın aksine yandan tel besleme, yol planlamada zorluklar yaratır. GMAW'dan türetilen soğuk metal transferi (CMT) teknolojisi daha sonra geliştirilmiştir. Bu süreçte elektrik arkı söner ve kısa devre olarak adlandırılan olay sırasında tel geri çekilmektedir. Dolayısıyla yığıma süreci daha düşük bir termal girdiye ve daha yüksek bir hassasiyete sahip hale gelmektedir. Çizelge 2.1, her işlemin avantajlarını ve dezavantajlarını özetlemektedir.

2.2.2. WAAM işlemindeki kullanılan metaller:

Kaynakta kullanılan tüm metaller WAAM işleminde de kullanılmaktadır. Alüminyum ve

çelik en çok kullanılan metallerdir. WAAM işlemi, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla yüksek bir malzeme/parça ağırlığı değerlerine (Buy-to-Fly oranı) sahiptir. Bu özellik WAAM'ı değerli metaller olan titanyum, nikel ve alaşımlarının üretimi için umut verici bir teknoloji haline getirmektedir. Buna ilave olarak bakır ve magnezyum gibi diğer alaşımlar da kullanılabilir.

Çizelge 2.1. WAAM'da kullanılan ısı kaynaklarının avantajları ve dezavantajları

Kaynak İşlemi	Avantajlar	Dezavantajlar
Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAW)	Yüksek yığma oranları, Yol planlama özgürlüğü	Yüksek ısı girdisi, Düşük kaynak kalitesi
Gaz Tungsten Ark Kaynağı (GTAW)+ Plazma Ark Kaynağı (PAW)	Yüksek kaynak kalitesi	Daha düşük yığma oranları, Yol planlamada zorluklar
Soğuk Metal Transferi (CMT)	Düşük termal girdi, yüksek hassasiyet	Yüksek maliyet

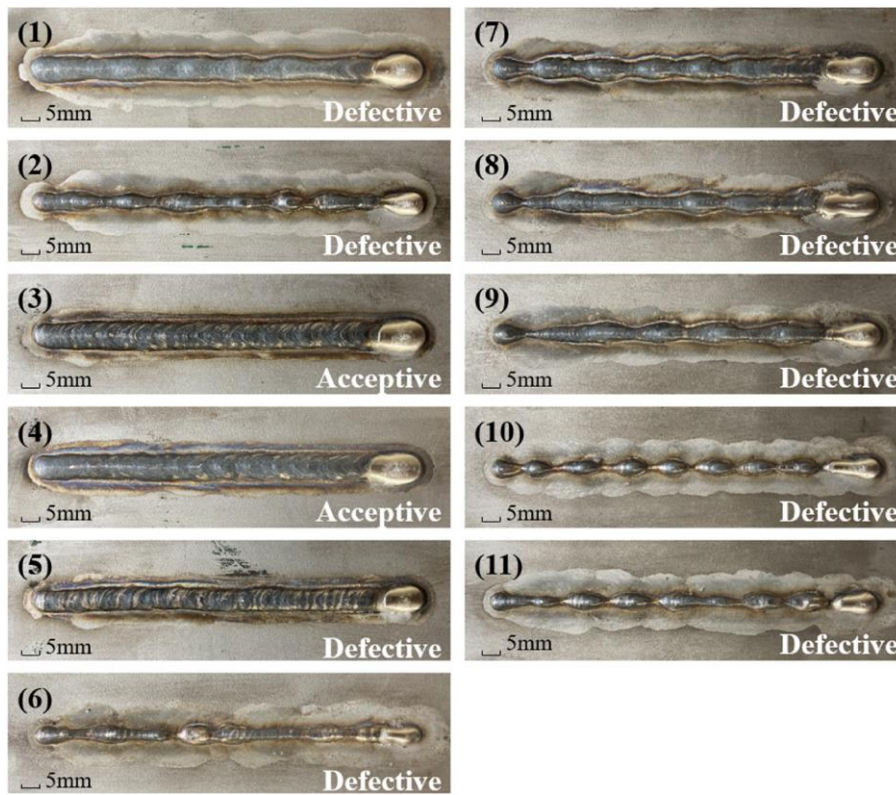
2.3. WAAM'daki Yığma Yolu Planlamanın Genel Aşamaları:

WAAM'daki yol planlama aşamaları, bazı yönlerden farklılıklarla birlikte diğer katmanlı üretim süreçlerine benzemektedir. Yığma yolu planlama süreci, üretilecek parça için CAD modelinin hazırlanması ile başlamaktadır. Sonra bu model belirli bir kalınlığa göre katmanlar halinde bölünür. Daha sonra yığma yolu, dikiş genişliğe ve iki bitişik dikiş arasındaki adım mesafesine göre her katmanda oluşturulur. Sonunda yığma yollarının koordinatları çıkarılır ve bir dosyada kaydedilir. İstenilen parçayı üretmek için çıkarılan dosya bir robota veya CNC makinesine aktarılır. Bu bağlamda kaynak dikişinin geometrisini bilmek, yığma yolu planlamasında önemli bir adımdır.

2.3.1. Tek dikiş modellenmesi

Yığılan kaynak dikişinin şeklini çeşitli faktörler etkilemektedir. Yığma ve tel besleme hızları[17] bu faktörlerin en önemlileridir. Yığma hızı arttıkça ve tel besleme hızı düştükçe kaynak dikişinin kesit alanı azalır. Hatta bazı hızlarda yığma hatası meydana gelebilir.

Örneğin yığma hızı çok yüksek ise sürekli ve düzenli yığma oluşamaz. Dikiş, aralarında boşluklar bulunan küreciklere dönüşebilir. Bu nedenle, genellikle ilk başta farklı hız kombinasyonları denenmektedir. Resim 2.4, farklı hız kombinasyonları kullanılarak elde edilen yığmaları göstermektedir[18]. Resimden de anlaşılacağı üzere yığma ve tel besleme hızlarının sadece iki değeri kabul edilebilir yığmaya olanak vermektedir. Yığma ve tel besleme hızlarına ilaveten elektrik arkının akımı ve voltajı gibi diğer faktörler de kaynak dikişinin şeklini etkiler. Örnek olarak voltajın artmasıyla kaynak dikişinin genişliği, akımın artmasıyla ise kaynak dikişinin yüksekliği artmaktadır[19] [17] .



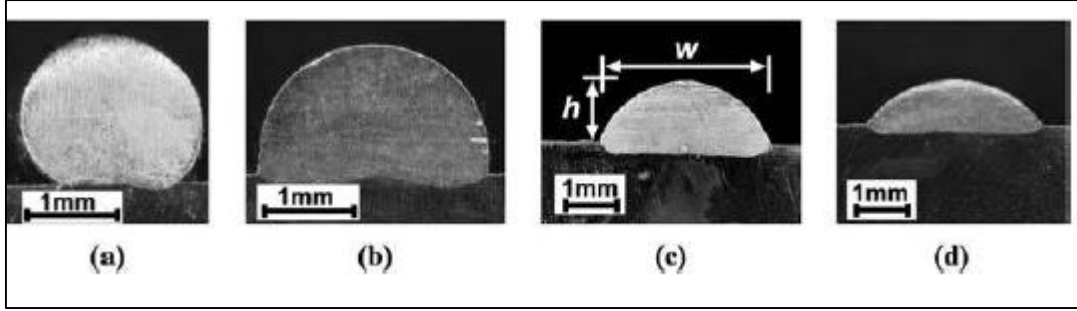
Resim 2.4. Farklı hız değerleri kullanıldığında ortaya çıkan kaynak dikişi Morfolojileri [18]

Kaynak dikişinin geometrik şeklini modellemek için kullanılan yöntemler

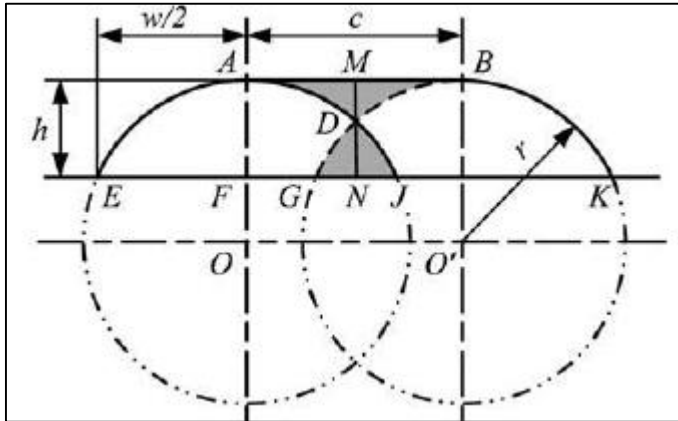
Dikiş boyutlarının belirlenmesi son derece karmaşık bir işlemdir. Çünkü dikiş boyutları birçok faktörden etkilenmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için basit modeller geliştirilmiştir. Modelleme için kullanılan yöntemler iki ana kısma ayrılabilir: ilk kısım tek kaynak dikişinin modellenmesi ve ikinci kısım birbiri üzerine bindirilmiş çoklu kaynak dikişlerinin modellenmesidir.

İlk kısımda kullanılan modellerin temel amacı, dikiş kesitin geometrisine uygun

matematiksel ifadeyi bulmaktır. Bu nedenle araştırmacılar, parabol, dairesel ve sinüzoidal gibi muhtelif matematiksel fonksiyonları denemişlerdir. Örnek olarak Aiyiti ve arkadaşları, [20] dikiş kesiti şeklinin, tel besleme hızı, yığma hızı ve elektrik akımından etkilendiğini gözlemledi ve mikro plazma ark kaynağı için bir model sundu (Resim 2.5). .Bu modelde dikiş kesitinin ark şekline sahip olduğu farz edilmiştir (şekil 2.3).

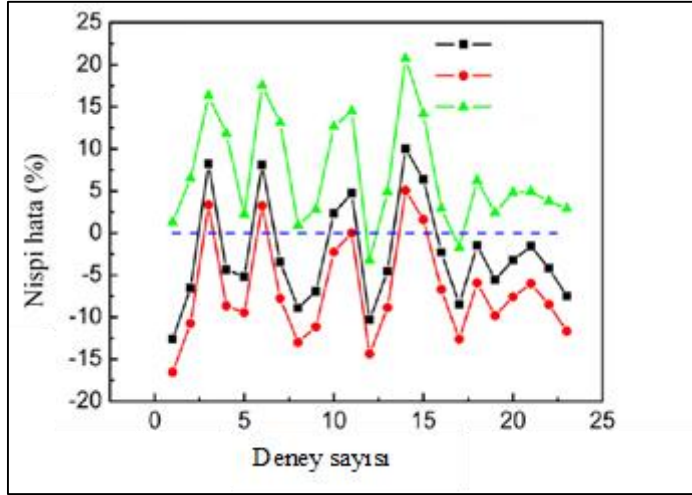


Resim 2.5. Farklı parametrelere bağı dikiş şeklinin değişmesinin OM altında görünümü [20]

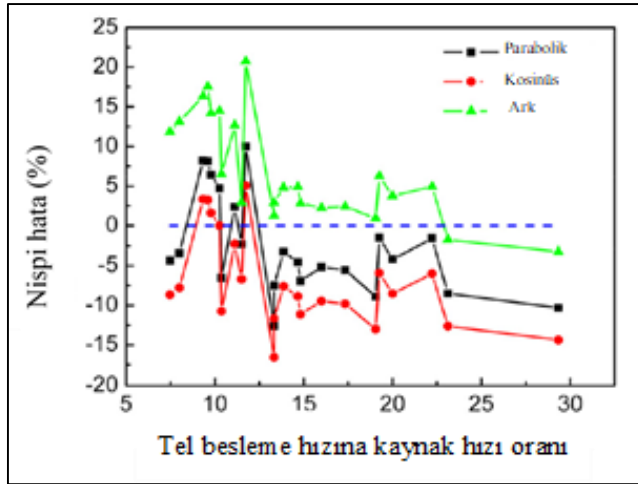


Şekil 2.3. Yığılmış dikişin kesit profili [20]

Xiong ve arkadaşları [21] sonraları dikiş modellemesinde sıkça kullanılacak olan üç fonksiyon önermiştir: dairesel ark, parabol ve kosinüs. Xiong bu üç modeli yapmış olduğu 23 deneyle kıyaslayarak, her bir model için hata yüzdesini hesaplamıştır (şekil 2.4). Dikiş alanı bağlamında parabol modelinin diğer iki modelden daha iyi performans sergilediği görölmüştür. Aynı makalede, tel besleme hızının kaynak hızına oranının, dikiş profili şekli üzerindeki etkisi de incelemiştir. Bu oranın 12,5 ten büyük olması durumunda ark modelinin diğer iki modelden daha başarılı olduğu görölmüştür. RWFRWS oranının 12,5 ten küçük olması durumunda ise Şekil 2.5'te görüleceği üzere parabol modeli ön plana çıkmaktadır.



Şekil 2.4. Modellerin deneysel dikiş alanına göre performansları [21]



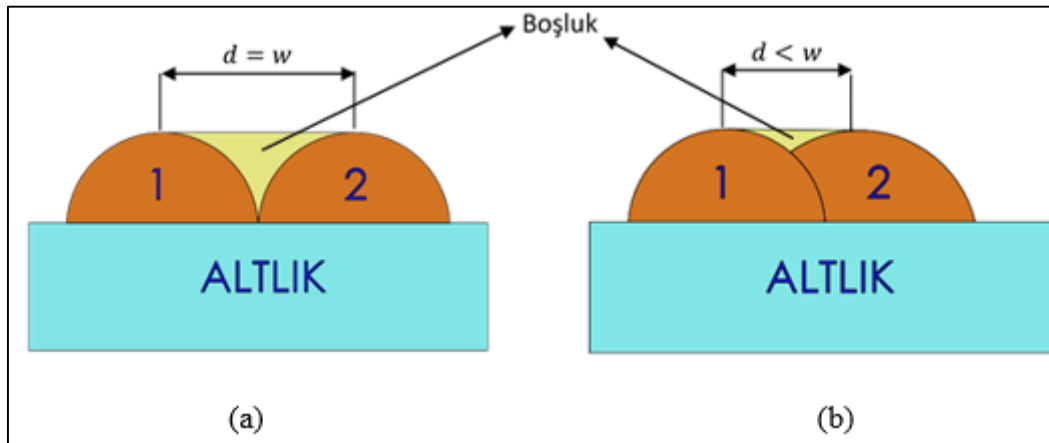
Şekil 2.5. Tel besleme hızının kaynak hızına oranının nispi dikiş profil alanı hata üzerindeki etkisi [21]

Cao ve arkadaşları [22] kaynak dikiş sınırını Gauss, lojistik, parabol ve sinüs fonksiyonlarını kullanarak tanımladı. Sinüs fonksiyonunun deneysel verilerle en yüksek oranda örtüştüğünü gördüler. Suryakumar ve arkadaşları [23] simetrik parabol modelini kullanmayı tercih etti. Burada dikiş profili ölçülen dikiş yüksekliği(h), tel çapı(d), kaynak hızı ve tel besleme hızına bağlı olarak parabol denklemi biçiminde ifade edilmiştir. Ding ve arkadaşları [24] tek kaynak dikişi modelinde parabol, kosinüs ve ark fonksiyonlarını kullandı. Yaptıkları deneyde sabit besleme hızı için 8 farklı kaynak hızı denemişlerdir. Ardından her bir dikiş profili lazer kamera yardımıyla 200 kez taranmış ve deneysel dikiş profili geometrileri elde edilmiştir. Modellere ait parametreler deney verileri kullanılarak regresyon yardımıyla bulunmuştur. Çalışmalarında tel besleme hızının kaynak hızına oranını λ olarak

tanımlamışlardır. λ değeri 9.1'den 25'e kadar olan aralıklarda tüm modeller iyi sonuç vermiştir. Buna ilave olarak kosinüs ve parabol modelleri ark modeline göre daha başarılı bulunmuştur.

Modellemenin ikinci temel kısmı, üst üste binen kaynak dikişlerinin modellenmesidir. Yan yana birkaç dikişten oluşan bir parça üretilecekse ve bitişik kaynak dikişlerinin merkezleri arasındaki mesafe, tek kaynak dikişinin genişliğine eşitse, parçanın üst yüzeyinde çok büyük boşluklar ve yüksek pürüzlülük oluşacaktır. Bu nedenle, pürüzlülüğü azaltmak ve üst yüzeyin kalitesini iyileştirmek için, bitişik iki kaynak dikişinin merkezleri arasındaki mesafe, kaynak dikişinin genişliğinden daha az olacak şekilde azaltılır. Bu sayede üst üste binen alanlar iki dikiş arasındaki boşluğu doldurmaktadır.

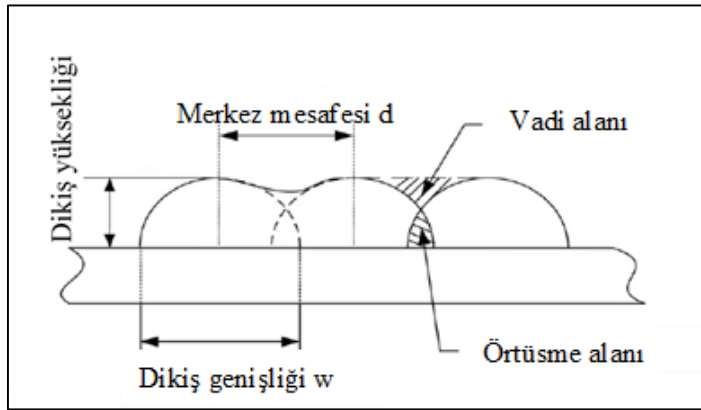
Şekil 2.6'da d mesafesinin kaynak dikişi genişliği w 'ye eşit ve w 'den küçük olduğunda oluşan boşluk gösterilmektedir. Üst yüzeyin pürüzlülüğü, bu yüzeyin en yüksek noktası ile en alçak noktası arasındaki mesafe (f) ile belirlenir. Anlaşılabacağı üzere f değeri, d değerindeki değişikliklerle değişmektedir. Bu bağlamda geliştirilen modellerin amacı, f 'i minimize edecek değeri bulmaktır.



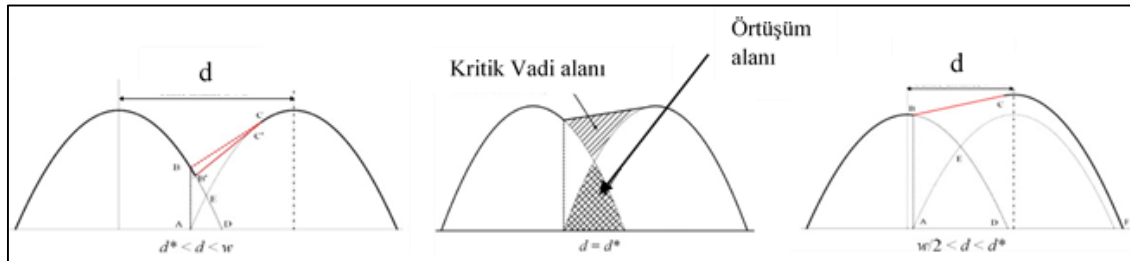
Şekil 2.6. İki dikiş arasındaki oluşan boşluk (a) $d = w$ ve (b) $d < w$ olduğunda

Yukarıdaki amaca yönelik olarak düz üst örtüşüm modelinin (DÜM) yaklaşımı [21], d 'nin optimal değerinin, üst yüzey tamamen düz olduğunda belirlenmesine dayanmaktadır. Bunun için örtüşüm alanı vadi alanına eşit olmalıdır (şekil 2.7). Bu yaklaşımda $d = 0,667w$ kabul edilmektedir.

Teğet örtüşüm modeli (TÖM) [24], DÜM'ün gelişmişidir. Bu modelde, sonraki dikişin bir kısmı mevcut dikişin eğrisine düz teğettir. Zira deneyler, yüzeyin tamamen düz olamayacağını göstermektedir. fi mümkün olduğu kadar düşük tutacak kritik mesafe d^* olarak adlandırılır ($d^* = 0,738w$). d değeri kritik değeri geçerse bitişik iki dikiş arasındaki vadi alanı artar. Diğer taraftan kritik mesafeden daha az ise bu ardışık dikişlerin yüksekliğinde bir artışa yol açacaktır ki bu istenmeyen bir durumdur. Şekil 2.8'de $d^* < d < w$, $d^* = d$ ve $w/2 < d < d^*$ durumları gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Düz üst örtüşüm modeli [21]



Şekil 2.8. Teğet örtüşüm modelinde d mesafesine göre dikiş geometrisi değişimi [24]

2.3.2. Yığma örüntüleri

Yığma stratejisinin belirlenmesi kaynak dikiş boyutlarının belirlenmesinden sonra gelmektedir. Üretilen parçaların kalitesi, kullanılan yığma strateji ile yakından ilişkili olduğu için yığma stratejisi seçme süreci son derece kritik bir basamaktır. Bu nedenle yığma stratejilerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Aslında, WAAM'da kullanılan yığma örüntüleri, talaşlı imalat tekniğinden alınmıştır. Zira talaş kaldırma örüntüleri, 3B baskı tekniklerinin ortaya çıkmasından önce geliştirilmiştir. Dolayısıyla araştırmacılar bu örüntüleri geliştirmeye, değiştirmeye ve WAAM doğasına

uygun yeni örüntüler türetmeye çalışmaktadır.

Bugüne kadar muhtelif yığma örüntüleri geliştirilmiştir. Bunlar oluşturulma yöntemine ya da ayarlanabilirliklerine göre sınıflandırılabilirler.

Oluşturulmasının yöntemine göre üçe ayrılabilir:

1. kategori: kesit içinde oluşturulan paralel çizgiler aracılığıyla elde edilen örüntüler.
2. kategori: paralel konturlar oluşturularak elde edilen örüntüler.
3. kategori: önceki iki kategoriden elde edilen melez örüntüler.

1. kategori aşağıdaki örüntüler içerir

- Tek yönlü raster: kesit içinde düz çizgiler oluşturulur. Pasoların başlangıçları bir uçta ve sonları karşı uçta.
- İki yönlü raster: önceki örüntüye benzer, ancak pasoların yönleri dönüşümlü olarak değişir.
- Zikzak: iki yönlü raster pasolarının birbirine bağlanmasıyla oluşturulur.

2. kategori ise aşağıdaki örüntüler içerir

- Kontur
- Sarmal
- Orta eksen

Ayarlanabilirliklerine göre ise aşağıdaki gibi sınıflandırma yapılabilir:

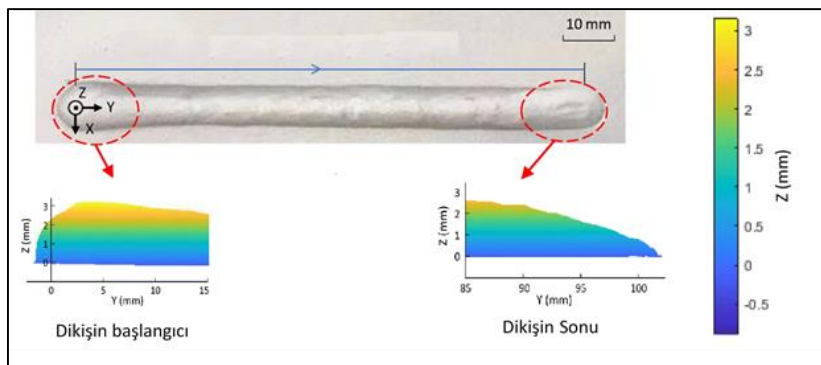
- Kesitlerin değişmesiyle değişmeyen ve tüm kesitlere uygulanan hazır örüntüler.
- Kesitlere göre değişebilen örüntüler.
- Sadece bazı özel kesitler için geçerli örüntüler.

Yığma örüntülerinin avantajları ve dezavantajları

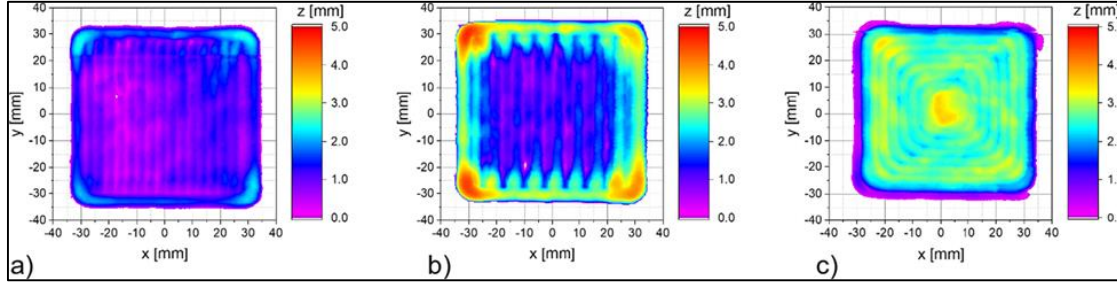
Yukarıdaki yığma örüntülerinin her birinin avantajları ve dezavantajları vardır. Tek yönlü ve iki yönlü raster örüntüleri, gelmiş geçmiş en basit örüntülerden biri olarak kabul edilir ve tüm kesitlere uygulanabilir. Bu nitelik bu örüntüyü çok yaygın hale getirmiştir. Ancak parçanın deformasyonunun diğer örüntülerden daha büyük olması ana dezavantajıdır. Bu durumun iki sebebi vardır: Birincisi, parça bir yönde yığıldığı için ısı ve dolayısıyla hatalar

yöne bağlı birikir. İkinci sebep ise elektrik arkının her pasoda açılıp kapanmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi, kaynak dikişinin başlangıç ve sonunun geometrik şekli, kaynak dikişinin geri kalanından farklıdır. Kaynak dikişinin başlangıcındaki geometrik şekli daha geniş bir alana sahiptir. Çünkü torç hareketi sıfırdan başlar ve hızlanır. Kaynak dikişinin sonuna gelindiğinde dikiş alanı ve biriken malzeme miktarı dikişin geri kalanından daha azdır. Çünkü malzeme yığılma yönü torç istikametinin tersine doğrudur. Şekil 2.9, kaynak dikiş şekli ile pasonun başı ve sonu kesit değişimini göstermektedir [25].

Zikzak örüntüsü, pasoların hepsinin birbirine bağlı olmasıyla rasterden ayırt edilir. Bu, elektrik arkının tek bir tutuşturulması ve söndürülmesi ile tüm katmanın biriktirilebileceği anlamına gelir. Dolayısıyla elektrik arkının zikzak örüntüsünde açılıp kapatılması sonucunda ortaya Zikzak örüntüsünde tüm pasolar birbirine bağlıdır. Bu durum, tek sefer kaynak ile tüm katmanın biriktirilebileceği anlamına gelir. Dolayısıyla elektrik arkının açılıp kapatılması sonucunda ortaya çıkabilecek hatalar azaltılabilir. Ancak bu örüntüde ortaya çıkan sorunlardan biri pratikte makine veya robot hareket yönünü değiştirdiğinde harekette bir yavaşlama meydana gelmesidir. Bu durum, bir pasodan diğerine geçerken tekrarlanır ve iki tür hataya neden olur: Birincisi, özellikle köşelerde dikiş alanının artmasıdır. İkincisi ise, hareketin yavaşladığı bölgelerde ısının daha fazla birikmesi sonucu deformasyonların artmasıdır. Şekil 2.10, zikzak örüntüde oluşan deformasyonun, rasterdekinden daha büyük olduğunu göstermektedir [26].



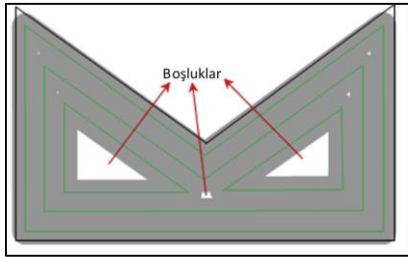
Şekil 2.9. Dikişin başlangıcı ve sonunun şekli [25]



Şekil 2.10. Deformasyonu daha az olan raster (a) ve sarmal (c) örüntülerine kıyasla zikzak örüntüsünde büyük köşe deformasyonu (b) [26]

Kontur örüntüsü, deformasyonların raster ve zikzaktakine göre daha az olmasıyla bilinir. Çünkü yığma sırasında ısı, parça içinde daha iyi bir şekilde dağılır. Ancak dezavantajlarından biri, kontur örüntüsünün tüm kesitler için uygun olmamasıdır. Kesit biraz karmaşıksa, içinde malzeme biriktirilemeyen boşluklar kalabilir. Şekil 2.11, kontur örüntüsü sonucu parçada kalan boşluğu göstermektedir [27]. Sarmal örüntüsünün kullanımı ise, sadece daire veya dikdörtgen gibi basit şekillere uygulanabildiği için kısıtlıdır.

Orta eksen örüntüsü [27], ısıнын parça içinde dağıtılmasında kontur örüntüsünün özelliğinden yararlanmak, böylelikle deformasyonları azaltmak ve kontur örüntüsünün boşluk bırakma dezavantajından kaçınmak için geliştirilmiştir. Bu örüntü, tam parçanın ortasında bir eksen oluşturulur, ardından tüm kesit kaplanana kadar bu eksene paralel konturlar oluşturulur. Daha sonra kesitin dışında kalan kontur çizgileri kesilir. Bu örüntü, boşluk sorununu çözse de elektrik arkının sıklıkla açılıp kapatılması bir dezavantajdır. Örüntülerin avantaj ve dezavantajları çizelge 2.2'de özetlenmiştir.



Şekil 2.11. Kontur örüntüsünü kullanılırken parçada oluşan boşluklar [27]

Çizelge 2.2. Yığma örüntülerinin avantajları ve dezavantajları

Yığma Örüntüsü	Avantajlar	Dezavantajlar
Tek ve İki Yönlü Raster	Uygulanması kolay. Tüm kesitlere uygulanabilir.	Isı ve hataların yöne bağlı birikmesi nedeniyle deformasyon artabilir.
Zikzak	Arkın tek bir tutuşturulmasıyla dikiş tamamlanabilir.	Dikiş alanı ve ısı birikimi köşelerde artabilir, Hareket yavaşlamaları ve ısı birikimi deformasyonu artırabilir.
Kontur	Isı parça içinde daha iyi dağıldığından deformasyon azalır.	Tüm kesitler için uygun olmayabilir, boşluklar kalabilir.
Sarmal	Arkın tek bir tutuşturulmasıyla dikiş tamamlanabilir.	Karmaşık şekillerde uygulanması zordur.
Orta Eksen	Hem deformasyonu azaltıp hem de boşluk sorununu giderebilir.	Arkın birkaç kez açılıp kapatılması.

Yığma örüntülerinden kaynaklanan hatalar

WAAM teknolojisinde meydana gelen büyük gelişmelere rağmen, bazı parçaların imalatında kullanımını sınırlayan bazı hatalar hala mevcuttur. Bu hataların çoğu, yol planlama süreciyle ilgilidir. Çünkü malzemenin ve ısıнын nasıl dağıtılacağını belirleyen yığma örüntüsüdür. Bu bağlamda hatalar iki ana bölüme ayrılabilir:

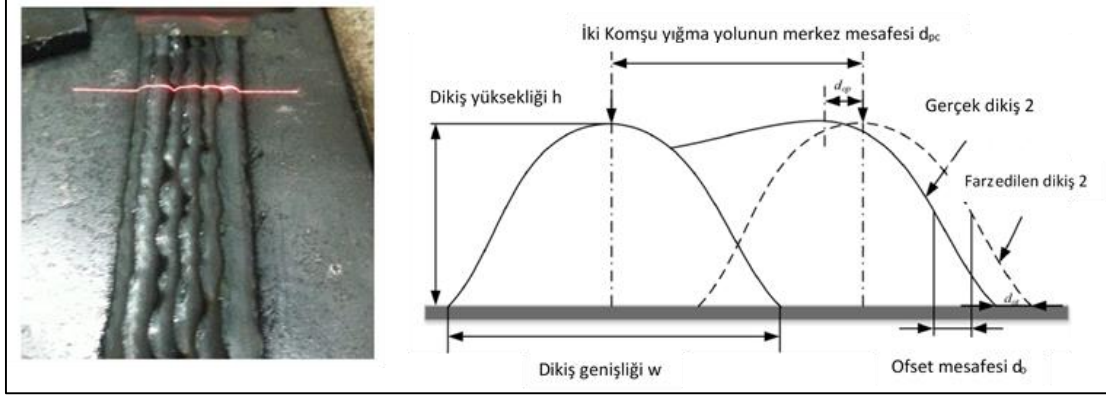
- 1- Yığılan metalin belirtilen model ile tutarsızlığından kaynaklanan hatalar.
- 2- Yığma işlemi sırasında ısıнын parçada birikmesinden kaynaklanan hatalar.

Yığılan metalin belirtilen model ile tutarsızlığından kaynaklanan hatalarda ısı birikimi etkisi yoktur. Dolayısıyla pasolar ve ardışık katmanlar arasında yeterli soğuma süresi verilse bile, bu hatalar parçada görünecektir. Bu hatalar iki ana kategori altında sınıflandırılabilir.

- Büyük parçalarda oluşan hatalar.
- İnce cidarlı parçalarda oluşan hatalar.

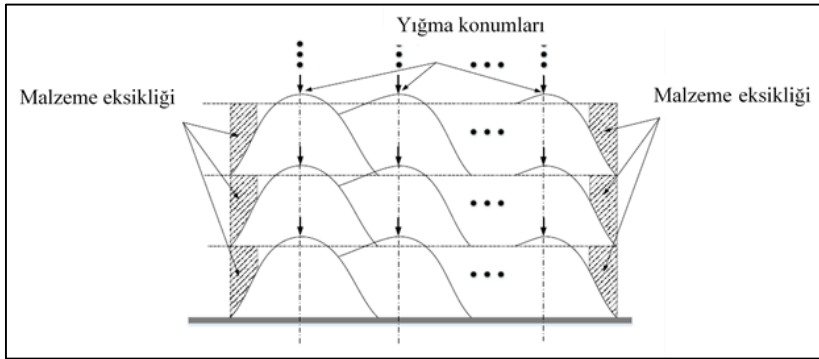
Çok katmanlı ve çok dikişli büyük parçalar (ÇKÇD) üretilirken, dikiş merkezleri daha önce açıklanan modellere (DÜM, TÖM) göre hesaplanmış olsa da bazen kaynak dikişinin yayıldığı ve planlanan şeklini koruyamadığı fark edilir. Bu yayılma, bitişik dikişler arasında

boşluklar oluşturur. Şekil 2.12 planlanan dikiş geometrisini ve yayılma olduktan sonraki gerçek dikiş geometrisini göstermektedir [28].



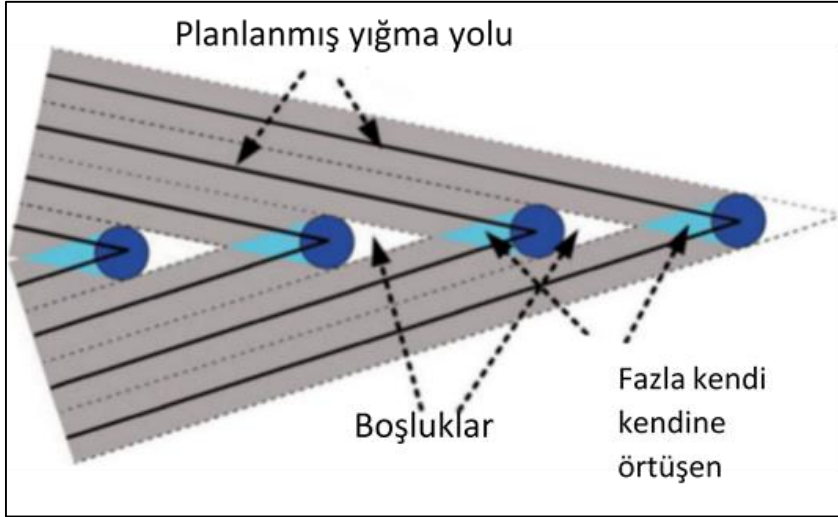
Şekil 2.12. Kaynak dikişinin yayılması [28]

Büyük parçalar üretilirken gözlemlenen hatalardan bir diğeri de yığma yönüne paralel olan yan duvarların çökmesidir. Burada ilk katmandaki ilk ve son kaynak dikişlerinin etkisi, sonraki katmanlarda her ilk ve son dikişte duvarın azar azar çökmesine neden olur. Bu duvarların içe doğru çökmesi şekil 2.13'te gösterilmiştir [29].



Şekil 2.13. Büyük parçalarda meydana gelen duvar çökmesine yol açan malzeme eksikliği [29]

Ortaya çıkan bir diğr kusur ise köşe şeklindeki bir parça yığılırken oluşan boşluklardır [30]. Şekil 2.14, planlanan yığma yolu ve köşe başları arasında oluşan boşlukları göstermektedir. Bu boşlukların nedeni, o köşelerin başları arasındaki mesafenin, iki komşu dikiş arasında belirtilen adım mesafesinden [30] daha büyük olmasıdır.



Şekil 2.14. Köşe şeklindeki parçada oluşan boşluklar [30]

İnce cidarlı parça yığıldığında ortaya çıkan hatalar, büyük parçalardakinden farklıdır. Örneğin, tek dikişli tek yönlü düz bir duvar yığıldığında, malzeme başlangıç noktasında birikir ve bitiş noktasında azalır, bu da duvarın başında ve sonunda yığmanın bozulmasına yol açar (Resim2.6) [31].



Resim 2.6. Yığman başlangıcında aşırı malzeme birikimi ve yığma sonunda ince duvarın çökmesi [31]

Köşe şeklinde İnce cidarlı parçalar yığıldığında, yığma hızının azalması [32] ve yığma yolunun yön değiştirmesi, köşeye yakın olan bölgelerde malzemenin üst üste yığılmasına neden olur [33]. İnce cidarlı parçalarda, ince cidarların kesişmesi neticesinde ve şeklindeki parçalarda en sık karşılaşılan hatalar bu nedenledir. Bu parçalarda dikişler normal olarak biriktirilirse, kesişme noktalarının üzerinde biriken malzeme iki katına çıkar, çünkü bu nokta

iki kesişme dikişinin her birinden malzeme alır. Resim 2.7 (a)'da, kesişme noktasında malzemenin yığılmasından kaynaklanan yığılma hatasına bir örnek verilmiştir [34]. Bu sorunu çözmek için bir dikişin tamamının önce yığılması ve ardından diğer dikişin iki ayrı yarım olarak yığılması gerekir. Fakat bu durumda da iki dikiş arasında Resim 2.7(b)'de gösterildiği üzere bir boşluk oluşacaktır.



Resim 2.7. Kesişen cidarlardaki hatalar: a) tepeleme b) çökme [34]

Yukarıda belirtilen hatayı çözmek için Venturini ve arkadaşları [35] kesişim bölgesini dört bölüme (şekil 2.15) bölmüş ve bu bölümlerin kesişimini dairesel bir şekle dönüştürmüştür. Bir başka çalışmada ise Venturini ve arkadaşları [36], T şeklinde bir parça için muhtelif örüntüler denemiştir.

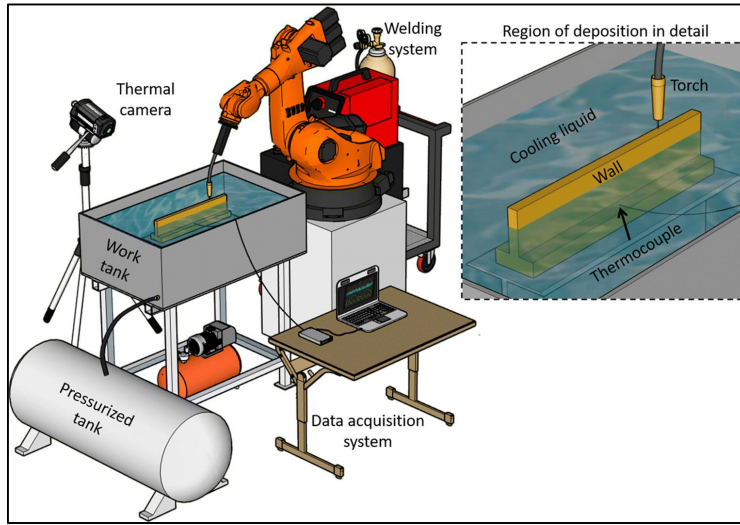


Şekil 2.15. Venturini'nin metodu [35]

Isı birikmesinden kaynaklanan hatalar

WAAM, en hızlı metal katmanlı imalat yöntemlerinden biri haline getiren yüksek yığılma oranlarına sahip olmasıdır. Ancak yüksek oranda metali eritmek, çok yüksek bir enerji gerektirir ve enerji kullanımı birkaç bin watt'a ulaşabilir. Bu büyük miktardaki enerji, yığılma işlemi sırasında parçada ısı birikmesine yol açar. Isı birikimi, üretim sırasında parçadaki sıcaklığın artmasıyla gözlemlenir. Sıcaklıktaki bu artış belirli bir noktada yani yerel veya

yığıma sırasında ardışık katmanlardaki ortalama sıcaklık yükselmeye istinaden genel olabilir. Isı birikimi, yığıma işlemini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, biriken ısıdan kurtulmak için çeşitli yöntemler izlenmektedir. Bu yöntemler aktif, pasif ve doğal soğutma olarak sınıflandırılabilir[37]. Aktif soğutmada, altlık ile tüm parça üretim boyunca soğutulur. Örnek olarak Şekil 2.16’da görüldüğü üzere parça bir hazne içerisine yerleştirilir ve su ile soğutulur.



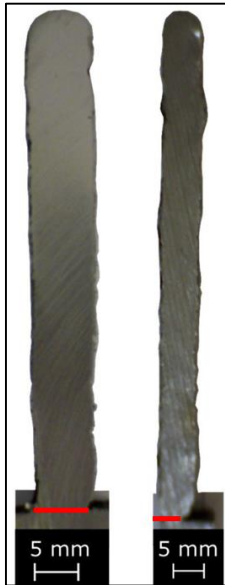
Şekil 2.16. Yığıma yapılırken parçanın aktif olarak soğutulması [37]

Pasif soğutmada ise sadece parçanın üzerine yığıldığı altlık soğutulur. Bu iki soğutma metodu pahalı ve özel donanım gerektirir. Ayrıyeten bu yöntemler her parça için uygulanamayabilir. Bu nedenle, her katmanın yığılmasından sonra parçanın soğuması için yeterli bekleme süresi sağlayabilen doğal soğutma yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, kontrol noktasının sıcaklığı istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra yığıma devam etmektedir. Dolayısıyla parçada biriken ısı miktarı azalır. Bu yöntem basittir ve şekli ne olursa olsun tüm parçalara uygulanabilir. Ancak bu yöntem bekleme süresine bağlı olarak üretim süresini ciddi oranda uzatabilir. Bir diğer önemli husus da sıcaklık kontrol noktalarının seçimidir. Sıcaklığı izlemek için seçilecek kontrol noktası parçanın birkaç yerinde olabilmektedir. Örnek olarak yığılmış tabakada son yığılan noktanın sıcaklığı takip edilebilir. Altlıktan bir noktanın sıcaklığının termokupl ile izlenmesi de mümkündür [38]. Bu durumda yığıma, bu noktanın sıcaklığına göre durdurulup devam ettirilebilir. Fakat bu yöntemde parçanın yüksekliği büyük olduğunda, kontrol noktası altlıktan uzaktaki üst katmanlardaki ısı birikimi hakkında doğru bilgi vermeyebilir. Kullanılan diğer bir yöntem de en son yığılan katmanın ortalama sıcaklığını izlemektir. Örneğin, Tanvir’in

çalışmasında[39], bir sonraki katmanın yığılmasına geçiş, mevcut katmanın sıcaklığı 200°C'ye düştüğünde gerçekleştirilmiştir. Görüleceği üzere takip edilecek noktaya göre değişik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Aslında genel olarak hedeflenen katmanların ısı denge durumuna ulaşılabilmesidir. Katman sayısının artmasıyla parça alanı artar ve bununla birlikte bu alandan konveksiyon ve radyasyon yoluyla ısı dağılımı artar. Sonuç olarak belirli bir sayıda katmandan sonra katmanlar arası sıcaklığın sabit hale gelmesi beklenmektedir [40].

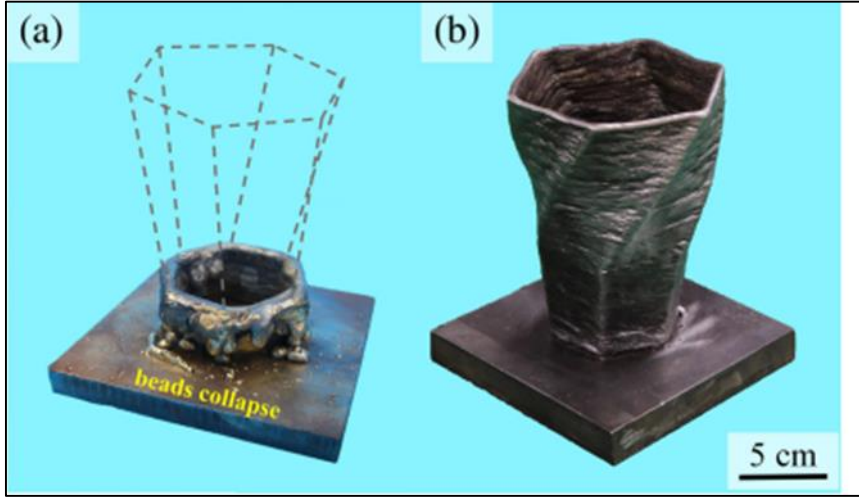
2.3.3. Isı birikiminin yığılmış parça üzerindeki etkisi

Ergimiş metal, yığma işlemi sırasında katılaşırken bazı kuvvetler etkisi altında dikiş şeklini almaktadır. Burada sıcaklık hemen ergime sıcaklığının altına düşerse, metal yığıldığı şekilde kalır. Fakat parçada ısı birikimi varsa, dikiş hemen soğumaz ve bir süre ergime sıcaklığının üzerinde kalabilir, bu da dikişin akmasına neden olabilir. Tek pasolu parçalarda dikiş aktığında cidar genişliği artarken yüksekliği azalmaktadır[41]. Resim 2.8, ilk dikiş ile üstündeki dikişlerin genişliği ve yüksekliği arasındaki farkı göstermektedir [42]. Yığma sırasında ilk dikiş, diğer dikişlerden daha hızlı soğur, bu nedenle müteakip dikişlerin yükseklikleri daha az ve genişlikleri daha büyük olacaktır.



Resim 2.8. İlk dikişin genişliği (kırmızı hat) ile diğer dikişlerin genişliği arasındaki akmadan kaynaklanan fark [42]

Parçadaki ısı birikimi arttıkça akma da artar ve dolayısıyla dikiş şekli daha fazla değişir. Resim 2.9, ısı birikiminin parça yüksekliğini nasıl önemli ölçüde etkileyebildiğini göstermektedir [43].



Resim 2.9. Soğutmasız yığma (a) altlığın soğutulmasıyla yığma (b) [43]

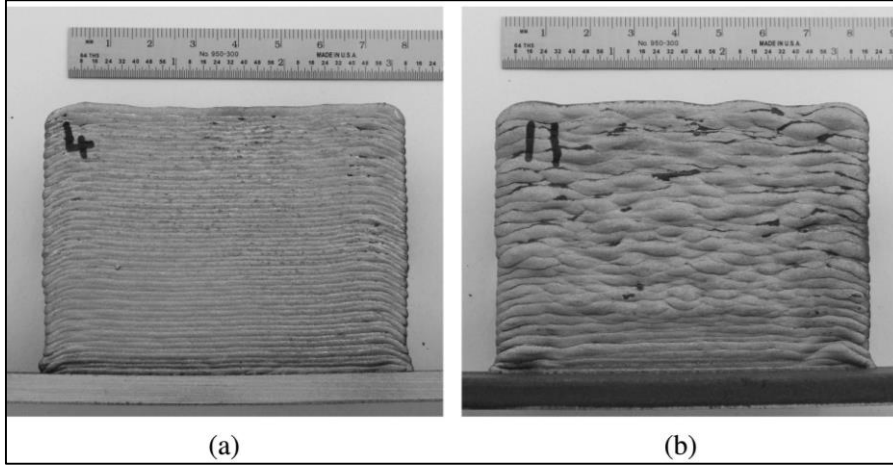
Isı birikimi ayrıca yığmanın tamamen başarısız olmasına da neden olabilir. Resim 2.10'da gösterildiği üzere katmanlar arasında herhangi bir bekleme süresi verilmeden birkaç katman üst üste yığılmıştır [44]. Isı birikimi, ergiyik havuz boyutunda bir artışa ve sonunda yığmanın çökmesine yol açmıştır.



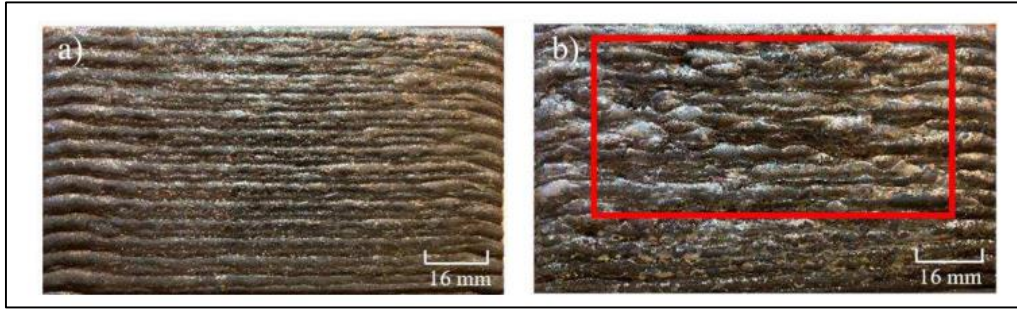
Resim 2.10. Aşırı ısı birikimi yüzünden duvarın çökmesi [44]

Ergiyik havuzun hacminin artması, ergiyik bölgenin bir kısmının, koruyucu gaz atmosferi dışında kalmasına yol açabilmektedir [45]. Ergiyik bölge boyutunun artması ergimiş metalin dalgalanmasında da artışa neden olur ve bu yüzden yüzey daha pürüzlü hale gelmektedir. Resim 2.11 [46] ve 2.12 [47], bekleme süresinin yan yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini göstermektedir. Bekleme süresinin azaltılması (yani ısı birikiminin artması) daha büyük

yüzey pürüzlülüğüne yol açmıştır.



Resim 2.11. Katmanlar arasında bekleme zamanının (a) 15 s (b) 0 s olması sonucu yanıl yüzey pürüzlülüğündeki fark, Malzeme: çelik ER70S-6 [46]

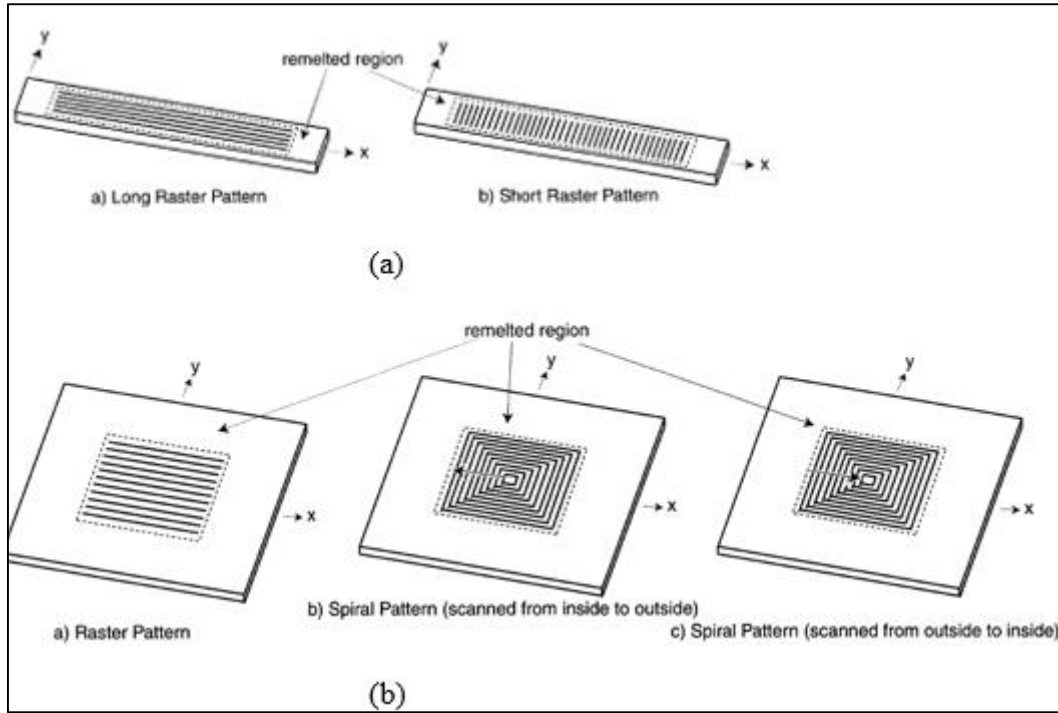


Resim 2.12. Katmanlar arasında bekleme zamanının (a) 120 s (b) 5 s olması sonucu yanıl yüzey pürüzlülüğündeki fark, Malzeme: paslanmaz çelik ER 316LSi [47]

2.3.4. Sıcaklık farklılıklarının deformasyon ve kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisi

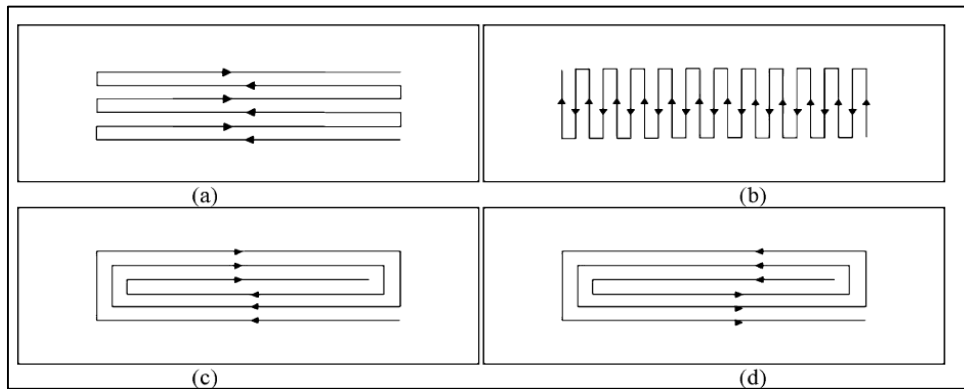
Diğer metal ergitme işlemlerinde olduğu gibi, WAAM ile üretilen parçalarda da sıcaklık farklılıkları kaçınılmazdır. Bu farklılıklar, oluşan deformasyon ve kalıntı gerilmelerden sorumludur. Yığıma yolu örüntüsü, birincil olarak ısı dağılımından sorumludur. Bu nedenle araştırmacılar, yığıma örüntülerinin deformasyon ve artık gerilmeler üzerindeki etkisini incelemeye ve analiz etmeye odaklanmıştır. Raster, zikzak, kontur ve sarmal örüntüler gibi muhtelif birçok örüntü incelenmiştir. Nickel ve arkadaşları [48], Lazer Metal Biriktirme ile üretilen çelik kiriş ve levha için dekaple olacak şekilde termal ve yapısal sayısal analiz gerçekleştirmiştir. Kirişte, kirişin uzun ekseninden 90° dönen raster örüntüsü, levhada ise dışarıdan içeriye doğru giden sarmal örüntü eğilme bakımından düşük değerler göstermiştir

(şekil 2.17 a,b).



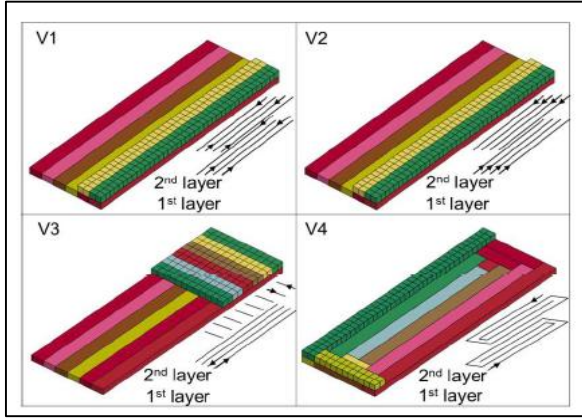
Şekil 2.17. (a) Kirişte kullanılan raster örüntüleri (b) levhada kullanılan biriktirme örüntüleri [48]

Foroozmehr ve arkadaşları [49] , biriktirme örüntüsüne bağlı olarak termal geçmişin ve bunun sonucu olarak üretilen parçanın nihai özelliklerinin değiştirilebileceğini belirtmiştir. Foroozmehr tarafından dört farklı yığma örüntüsü incelenmişti (Şekil 2.18) Ve kısa yığma yolunun minimum artık gerilme gösterdiği görülmüştür.



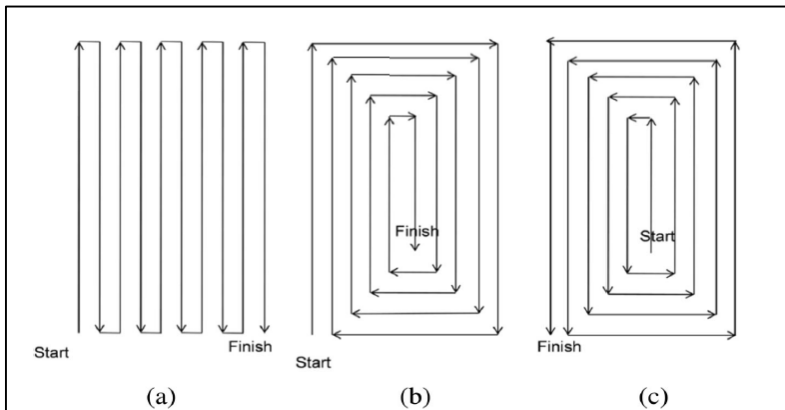
Şekil 2.18. Yığma yolu stratejileri a) uzun zikzak, b) kısa zikzak, c) içeriye doğru spiral, d) dışarıya doğru spiral [49]

İsrar ve arkadaşları [50], WAAM için 4 farklı yığma yolu stratejisini simülasyon yoluyla kıyaslamıştır (şekil 2.19) . 1. Strateji: çift yönlü(V1), 2. Strateji: tek yönlü (V2), 3. Strateji: çapraz (V3) ve 4. Strateji: sarmal (V4). Çapraz stratejisi en iyi sonucu vermiştir.



Şekil 2.19. Yığma yolu stratejileri [50]

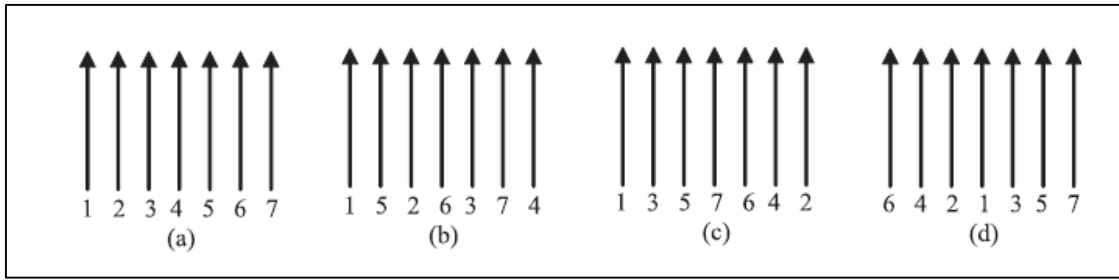
Somashekara [51], kaynak simülasyonları ile termal gradyan dağılımının, hareket eden ısı kaynağına bağlı olduğunu ve bunun neticesi olarak düzenli olmayan ısı dağılımının artık gerilmelere sebep olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada üç yığma örüntüsü incelenmiştir (Şekil 2.20). Üç örüntüden raster örüntüsü, sarmal örüntülere göre daha düşük artık gerilme göstermiştir.



Şekil 2.20. Üç farklı yığma yolu örüntüsü a) raster, b) sarmal (içeriye doğru) , c) sarmal (dışarıya doğru) [51]

Wu ve arkadaşları [52], Inconel 718 ve Ti-6Al-4V malzemeleri ile birer dikdörtgen parça üretti. Her iki parçada da kısa raster hem deformasyon hem de kalıntı gerilme için en düşük değeri verdi. Li ve arkadaşları [53], yığma sırasındaki gerçek deformasyonu ölçtü. Dıştan

içe doğru sarmalın en az deformasyon verdiği görüldü. Aynı çalışmada sıralı raster ile simetrik raster karşılaştırılmış ve sıralı rasterdeki deformasyonun daha büyük olduğu belirtildi. Mughal ve arkadaşları [54] , altlık üstünde tek katmanlı yedi pasodan oluşan bir parçada (80*40*3mm) değişik yığma sırasının etkilerini incelemiştir. Dört farklı kombinasyon denenmiştir (şekil 2.21). Pasolar arası geçiş zamanı 60 s olarak seçilmiştir. Dış taraftan başlayıp merkezde biten sıralama (şekil 2.21,c) deformasyon bakımından en iyi neticeyi vermiştir, öyle ki bu sıralama, minimum çarpıklık, en az oranda ve simetriğe yakın termal ve yapısal etkileri vermiştir.



Şekil 2.21. Dört farklı yığma yolu sıralaması [54]

Ren ve arkadaşları uzun zikzakların en az deformasyon değeri verdiğini buldu. Değişik yığma modelleri deneyen Sun ve arkadaşları [55], artık gerilme ve deformasyonların, altlığın köşelerindeki sıcaklıkların ortalama ve minimum değerleri ile ilişkili olduğu sonucuna vardı. Çizelge 2.3'te ilgili çalışmalar özetlenmiştir. Çizelgede her çalışma için en iyi sonucu veren örüntülerin yanı sıra, denenilen tüm örüntüler de listelenmiştir. Her bir çalışmada farklı örüntüler test edilmiş ve en iyi sonuç veren örüntüler belirlenmiştir.

Deneylerin de gösterdiği üzere her zaman en düşük deformasyon ve artık gerilme değerlerini veren belirli bir örüntü yoktur. Hatta bazı araştırmacıların sonuçları birbiriyle çelişmektedir. Örneğin Ren, uzun örüntüyü Wu ve Foroozmehr ise kısa örüntüyü en iyi örüntü olarak bulmuştur. Aslında, yığma sırasında parçada meydana gelen bozukluklar, örüntü şekli ile ilgili değil, daha çok bu örüntüler neticesinde oluşan sıcaklık farklılıklarıyla ilgilidir. Ren'in çalışmasında, en düşük sıcaklık değişimini veren uzun modeldi. Diğer taraftan Foroozmehr'in çalışmasında, kısa model en az sıcaklık değişimi verdi.

Çizelge 2.3. Denenen örüntülerin özeti

Çalışma	Denenen Tüm örüntüler	En İyi Sonuç Veren örüntü
Nickel [48]	Raster, Zikzak, Kontur, Sarmal vb.	Kiriş: Raster Örüntüsü, Levha: Sarmal Örüntüsü
Foroozmehr [49]	Uzun Zikzak, kısa Zikzak, Sarmal	Kısa Yığma Yolu
Israr [50]	Çift Yönlü, Tek Yönlü, Çapraz, Sarmal	Çift Yönlü
Somashekara [51]	Raster, Zikzak, Kontur	Raster
Wu [52]	Raster, Zikzak, Kontur, Sarmal	Kısa Raster
Li [53]	Sıralı Raster, Simetrik Raster, Dıştan İçe Doğru Sarmal vb.	Dıştan İçe Doğru Sarmal
Mughal [54]	Farklı Kombinasyonlar	Dıştan Başlayıp Merkezde Biten
Ren [56]	Raster, Zikzak, Kontur, Sarmal vb.	Uzun Zikzak
Sun [55]	Zikzak, Raster, paso atlayarak, Dıştan İçe Doğru Sarmal, içten dışa Doğru Sarmal, Hilbert, S Örüntüsü	S Örüntüsü

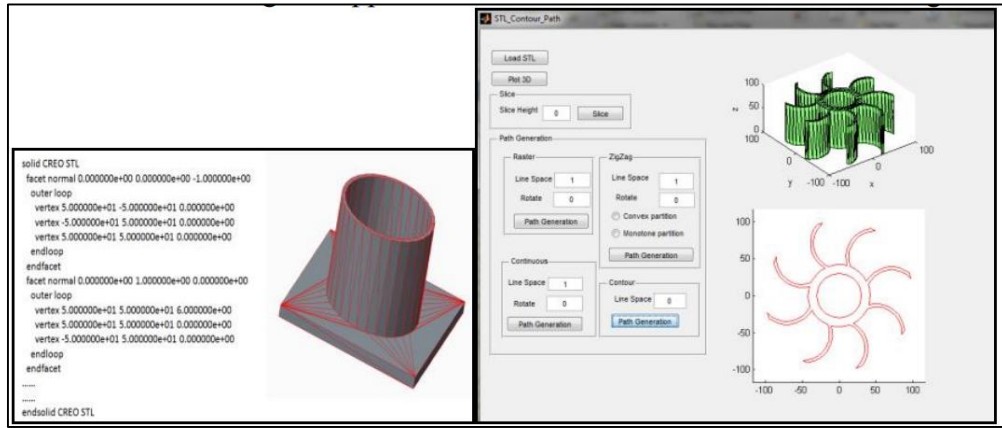
2.3.5. Yığma yolu oluşturma ve termal ve yapısal analiz yazılımları

Yığma yolu planlama ile ilgili programlar, yığma yolu oluşturma programları ve yığma yolu analizi programları olarak ikiye ayrılabilir.

Yığma yolu oluşturma programları

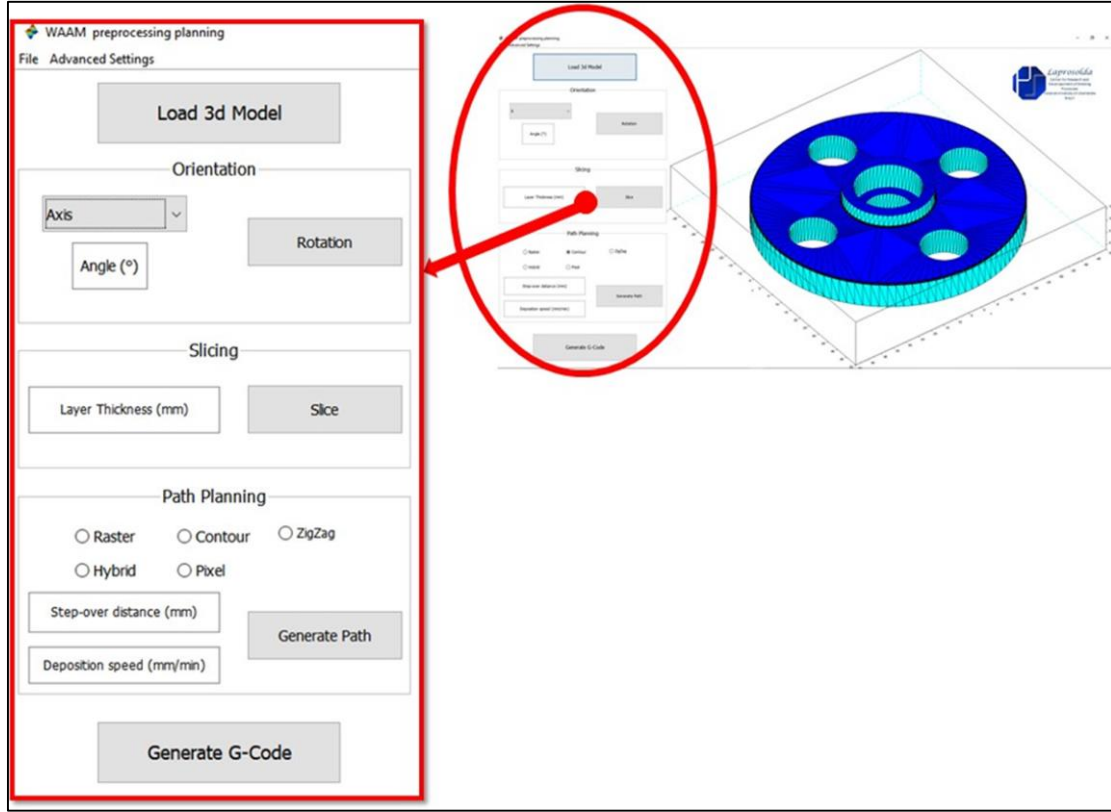
Bir parçanın bir robot veya bir CNC makinesi ile yığılması, makineye hareket emirleri şeklinde iletilen yığma yolunun koordinatlarını içeren bir dosyanın hazırlanmasını gerektirmektedir. Parça basit bir geometrik şekle (duvar veya dikdörtgen) sahip olduğunda, bu durumda yığma programı basit sayıda noktadan oluşur. Bu birkaç noktayı belirlemek fazla çaba gerektirmez ve bu durumda bu programı manuel olarak yazmak mümkündür. Ancak yığma örüntülerinin gelişmesi ve daha büyük boyutlu karmaşık parçalar üretilmeye çalışılmasıyla birlikte, yığma programının on binleri bulan çok sayıda nokta için torcun

koordinatları ve yönünü içermesi gerekmektedir. Bu durumda, bu programı manuel olarak yazmak imkânsız hale gelir ve onu çıkarmak için bir program gerektirmektedir. Bu nedenle, bazı araştırmacılar bu dosyaları hazırlayabilecek programları geliştirmeye çalışmıştır. Ding ve arkadaşları[57], Matlab kullanarak ara yüzlü bir program geliştirmiştir. Bu program, geleneksel yığma örüntülerine göre yığma yolları üretebilmektedir. Şekil 2.22, Ding tarafından geliştirilen ara yüzlü programı göstermektedir.



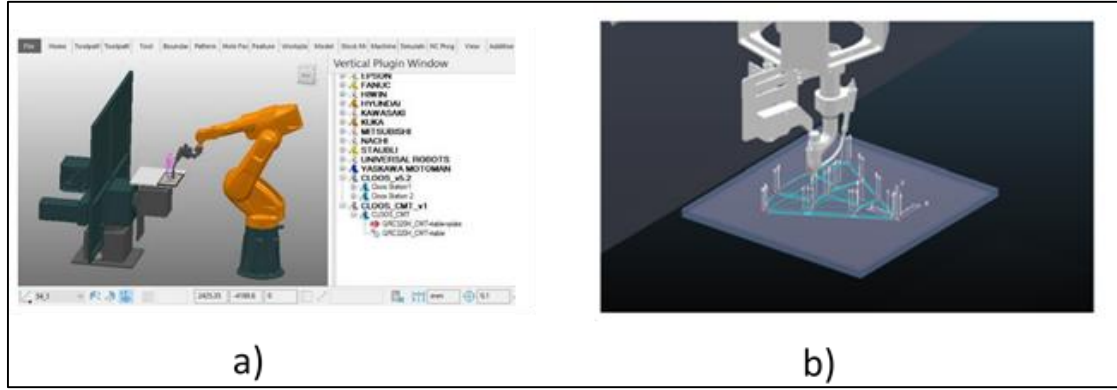
Şekil 2.22. WAAM yığma yolunu oluşturmak için Ding tarafından geliştirilen arayüz [57]

Ferreira ve arkadaşları [58] geliştirdikleri Pixel ve diğer geleneksel stratejilerin yığma yolunu oluşturmak için Scilab yazılımına dayalı bir program geliştirdi. Ferreira'ya göre, Scilab 'nın açık kaynaklı bir program olması ve dolayısıyla bir bütçeye ihtiyaç duymaması Matlab'a kıyaslabir avantajdır. Şekil 2.23, Ferreira tarafından geliştirilen arayüzü göstermektedir.



Şekil 2.23. Ferreira tarafından geliştirilen programın arayüzü [58]

Öte yandan, DMY'in öneminin artmasıyla birlikte, CAM programları geliştiren bazı şirketler, DMY teknolojisi için yığma stratejilerini CAM programlarına eklemiştir. Çünkü bu programlar robot ve CNC makineleri için hazır kütüphaneler ihtiva etmektedir. 2019 yılında ağırlıklı olarak talaşlı imalat yöntemine yönelik olan Powermill programı, DMY stratejilerini de bünyesine eklemiştir. Böylece bu program yığma ve talaş kaldırma yollarını birlikte üretebilmektedir. Bu iki özelliğin bir arada bulunması, programı etkili bir araç haline getirmiştir. Çünkü parça, yığmadan sonra talaş kaldırma işlemi gerektiriyorsa, kullanıcı aynı programda yığma ve talaş kaldırma yollarını oluşturabilir. Şekil 2.24,a'da [59] ve Şekil 2.24,b'de [60] yığma yolunu oluşturmak üzere Powermill yazılımının kullanıldığı iki örnek gösterilmektedir.



Şekil 2.24. WAAM üretiminde Powermill yazılımının kullanımına iki örnek a) [59] ve b) [60]

Yığıma yolu stratejilerinin kullanılabileceği CAM programları arasında Mastercam [61] [62] ve Siemens NX [63] yazılımları yer almaktadır. Siemens NX, Powermill'de bulunmayan Tubing Additive adlı bir strateji içermektedir [64]. Bu strateji, eksen eğimli olan parçaların üretimine, yani düzlemsel olmayan dilimlemeye izin vermektedir.

Termal ve yapısal analiz programları

Ticari sonlu elemanlar paketleri, yığıma yolu analizi için en sık kullanılan araçlar arasında yer almaktadır. Bu paketler genellikle termal geçmişi hesaplamak için kullanılmaktadır. Yapısal analiz ise ikinci bir adım olarak, deformasyon ve artık gerilmeleri incelemek için sıklıkla başvurulmuş bir araçtır. WAAM için yığıma yolu analizinde ANSYS [65], Simufact [66], MSC MARC [67], ABAQUS [68], LS-DYNA [69] ve COMSOL [45] kullanılan başlıca programlardır.

Yığıma yolu oluşturma ile yığıma yolu analizi programları arasındaki uyumsuzluk

Literatüre göre, WAAM ile üretilen parçalardaki deformasyonların ana sorumlusunun sıcaklık farklılıkları olduğu bilinmektedir. Yapılan tüm çalışmalarda, önceden belirlenmiş yığıma örüntülerinin basit şekillerde ortaya çıkardığı deformasyonlar üzerinde durulmuştur. Ardından, en az deformasyonu veren örüntü en iyi örüntü olarak kabul edilmiştir. Parçanın şeklinden bağımsız, parçadaki ısı dağılımına göre yığıma yolu oluşturabilen bir yığıma stratejisi henüz sunulmamıştır. Bunun temel nedeni, sonlu elemanlar programlarının sahip olduğu olumlu özelliklere rağmen yığıma yolu oluşturma programlarıyla birlikte

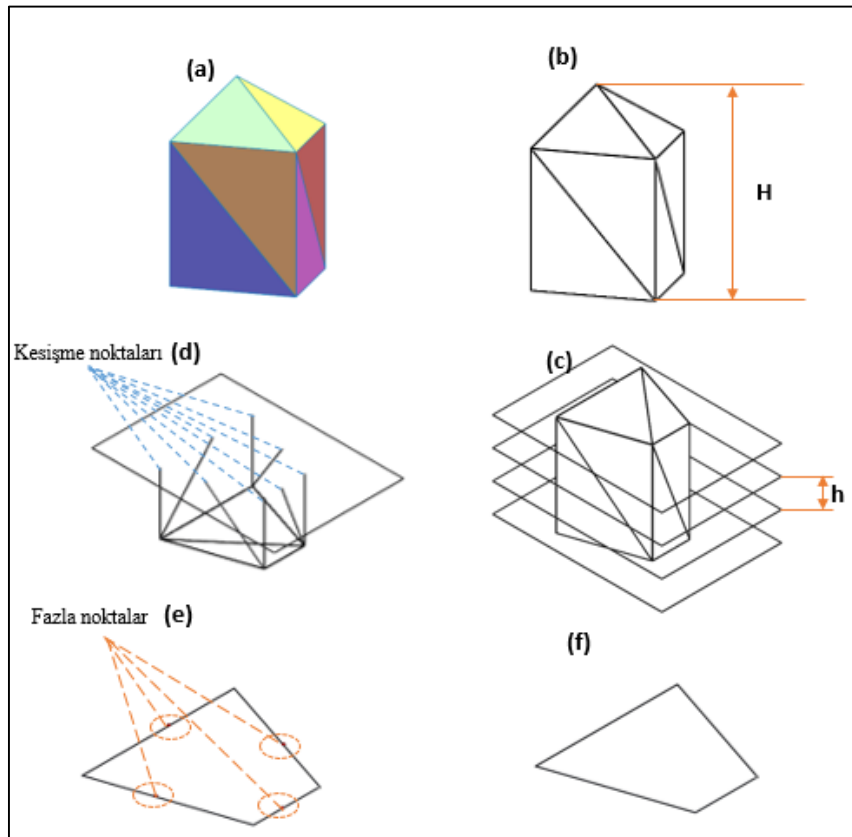
kullanılmalarının bazı zorluklar ve engeller içermesidir. Bu zorluklar, planlama ve ardından analiz yapmak için iki veya daha fazla araç kullanma ihtiyacı ile açıklanabilir. Bir araçta tasarlanan modelin ve verilerin diğer bir araca aktarımı kullanıcının işini zorlamaktadır. Analiz aşamasındaki uzun hesaplama süresi ise bir başka sorun olarak değerlendirilmektedir. Zira WAAM ile üretilen büyük parçalar, çok sayıda sonlu elemana sahip olacaktır. Yığma yolu planlaması için muhtelif olası senaryolar analiz etmek istenilirse, hesaplama maliyeti daha iyi anlaşılmış olunur.

Yukarıda bilgiler ışığında, WAAM teknolojisinde kullanılan yığma yolu planlama stratejilerinin çoğunun sadece parçanın geometrisine göre yapıldığı sonucuna varılabilir. Parçalardaki deformasyon, yığma örüntülerinden kaynaklanan sıcaklık farklılıklarıyla yakından ilişkili olsa da, yığma yolunu ısı dağılımına göre planlamak ve böylece deformasyonları azaltmak için hala belirli bir strateji yoktur. Literatürde deformasyonu azaltmak için kullanılan girişimlerin çoğu, geleneksel örüntülerle deney yapmaya ve en az deformasyonu veren örüntüyü seçmeye dayanmaktadır. Bu yöntemin ana dezavantajı, basit geometrik parçalar üzerinde deney yapılarak çıkarılan örüntülerden, tüm parçalara uygulanabilir genel bir kurala varmanın mümkün olmamasıdır.

3. YIĞMA YOLU ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ

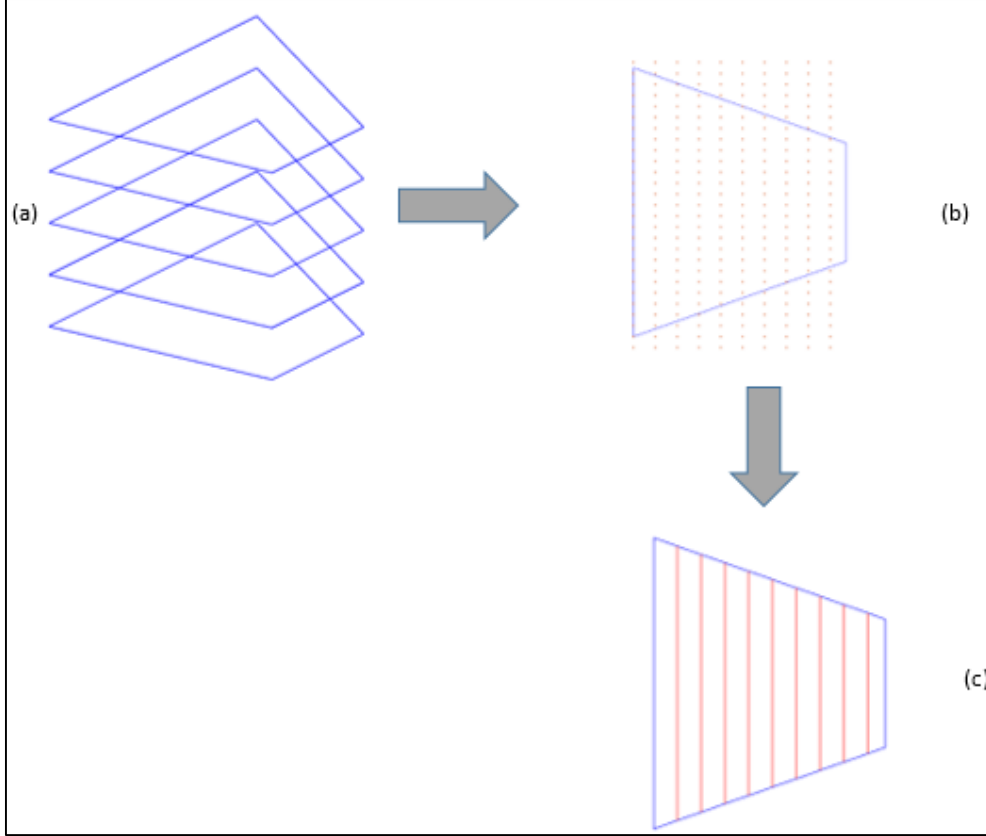
Geliştirilen algoritma, genellikle STL formatında olan CAD modelini okuma işlemiyle başlamaktadır. Model, belirli bir kalınlığa göre katmanlara ayrılmaktadır. Aşağıdaki adımlar modelin dilimlenmesinde kullanılan algoritmanın aşamalarını temsil etmektedir

- STL dosyasından (Şekil 3.1 (a)) üçgen kenarlarının (Şekil 3.1 (b)) belirlenmesi
- Maksimum ve minimum noktalar arasındaki farkı hesaplanması ve model yüksekliğinin (H) belirlenmesi (Şekil 3.1 (b))
- Katman yüksekliğinin (h) girilmesi ve $n=H÷h$ denklemine göre katman sayısının (n) hesaplanması ve her katmanda bir düzlem oluşturulması (Şekil 3.1 (c))
- Düzlemlerle üçgen kenarlarının kesişme koordinatlarının hesaplanması (Şekil 3.1 (d))
- Dilimleme sonucu ortaya çıkan kesitin profilinin çıkarılması ve varsa kenarlardaki fazla noktaların silinmesi (Şekil 3.1 (e))



Şekil 3.1. Dilimleme algoritmanın adımları (a) STL modeli, (b) üçgenlerin kenarları, (c) katmanların düzlemleri, (d) kenar-düzlem kesişmesi, (e) fazla noktaların silinmesi, (f) ortaya çıkan katman profili

Tüm katmanlar profilleri oluşturulduktan sonra (Şekil 3.2 (a)), her katman için bir nokta matrisi oluşturulmaktadır (Şekil 3.2 (b)). Ardından, model kesitinin dışında kalan noktalar silinmektedir. Daha sonra, belirlenen yol içinde kalan noktalardan yığma yolları oluşturulmaktadır (Şekil 3.2 (c)).



Şekil 3.2. Yığma yolunun oluşumunun adımları

3.1. CAD Modeli Okuma Aşaması ve Dilimleme

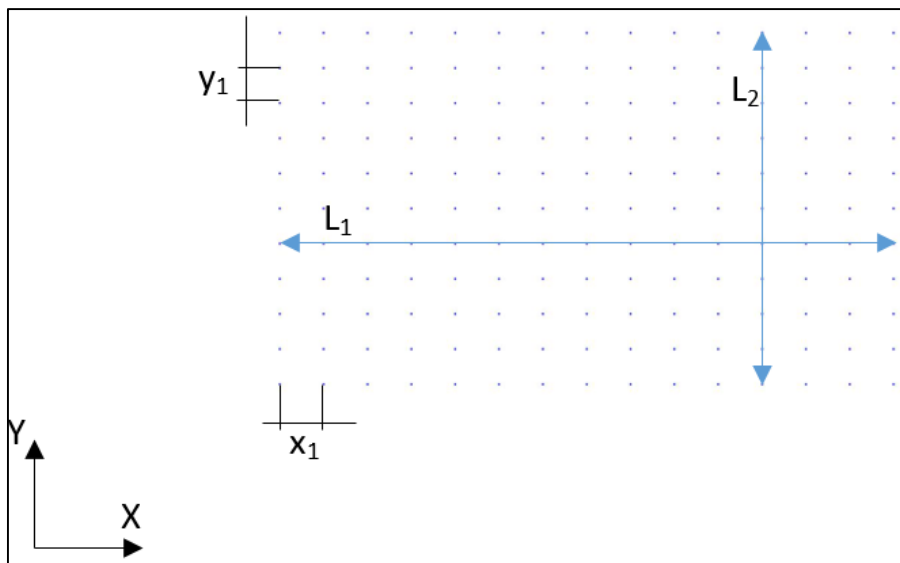
STL (Standard Tessellation Language) dosyaları, CAD modellerini taşımak için Eİ işlemlerinde en yaygın kullanılanlardır [69]. Bu dosyalar iki şekilde gelir: ikili biçim ve ASCII (American Standard Code for Information Interchange) kodlu biçim. CAD model verileri ASCII kodlu dosyadan okunabilirken, ikili dosyadan okunamaz. Bununla birlikte, büyük modellerde, ikili dosyanın kullanımı tercih edilir çünkü dosyanın boyutu daha küçüktür.

Algoritma, dilimleme işlemi sırasında farklı kesitleri tanıma ve bu kesitleri ayrı ayrı ayırma yeteneğine sahiptir. Bunu yapabilmek için şu yaklaşımı kullanır: Model boyunca çok sayıda

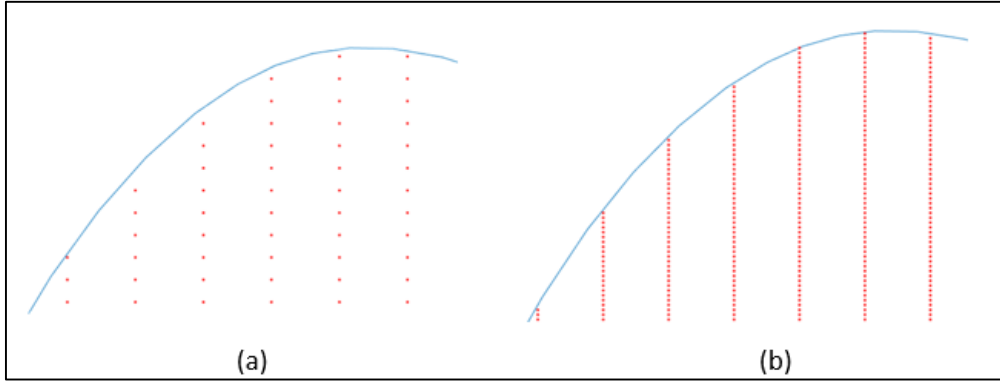
katman oluşturur. Bu katmanların kalınlığı, gerçek katmanın değerinden çok daha küçüktür. Ardından, her tabakanın içinde üretilen nokta sayısını hesaplayarak her tabakanın alanını hesaplar. Daha sonra her tabakanın alanını karşılaştırılır. Ardışık kesitler arasında büyük bir fark bulunursa, her bir kesit ayrı ayrı ayrılır.

3.2. Katmanlar İçinde Nokta Matrisi Oluşturma Yöntemi

2D düzlemde nokta matrisi oluşturmak için dört şeyin bilinmesi gerekmektedir: 1- Yatay yönde noktalar arasındaki mesafe x_1 , 2- Dikey yönde noktalar arasındaki mesafe y_1 , 3- Matrisin genişliği L_1 (X eksenı boyunca), 4- Matrisin yüksekliği L_2 (Y eksenı boyunca). Bu boyutlar Şekil 3.3'te açıklanmıştır. Toplam matris boyutları L_1 ve L_2 , beklenen kesit boyutlarına göre belirlenir. Bu değerler, kesitin tamamen kapsanabilmesi için yeterince büyük olmalıdır. X yönünde, noktalar arasındaki mesafe x_1 , bitişik kaynak dikişleri arasındaki adım mesafesine göre belirlenir. Y yönündeki y_1 değeri, matris noktalarının kesit sınırlarına yeterince yakın olacak kadar küçük olmalıdır. Bu değer nispeten büyükse, oluşturulan çizgiler kesit sınırlarına ulaşmayabilir. Dolayısıyla yığılma yolu geometriyi tam olarak kapsamayabilir (Şekil 3.4). Dikey doğrultuda nokta sayısının artırılması bir çözümdür. Algoritma için y_1 değeri 0,5 mm olarak belirlenmiştir. Bu değer, yığılma hatları ile kesit sınırları arasındaki hata miktarının 0,5 mm olması demektir ve WAAM için kabul edilebilir bir değer olarak görülebilir.



Şekil 3.3. Nokta matrisi oluşturmak için bilinmesi gereken boyutlar



Şekil 3.4. Nokta matrisi ile dış sınır ile arasında fark, y_1 büyük (a) y_1 küçük (b)

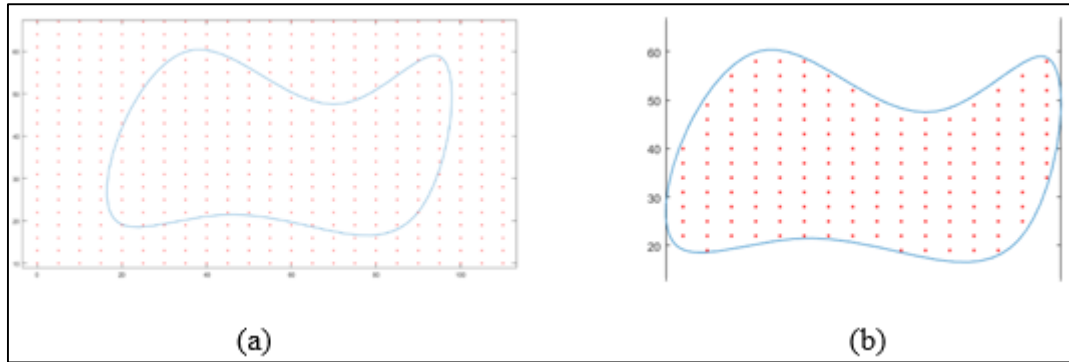
Yukarıdaki boyutların belirlenmesinden sonra, nokta matrisinde oluşturulacak nokta sayısı hesaplanır. Buna göre, nokta sayısına eşit öğeleri olan iki matris oluşturulur. Bu iki matrsten biri, noktaların X eksenindeki koordinatlarını saklamak için kullanılır, diğeri ise noktaların Y eksenindeki koordinatlarını saklamak için kullanılır. İki adet FOR döngüsü kullanılarak nokta koordinatları matrislere doldurulur. Böylece, nokta matrisi oluşturma adımı tamamlanmış olur.

Nokta matrisini oluşturmak için, önceki iki matrisin oluşturulması yerine alternatif olarak MESHGRID [70] komutunu kullanma yöntemi mevcuttur. Bu, MATLAB içinde tanımlı hazır bir fonksiyon olup nokta matrisi bu şekilde de kolayca oluşturulabilir.

3.3. Kesit Sınırları Dışında Kalan Noktaların Çıkarılması

Kesit sınırının dışında yer alan noktaların çıkarılması işleminde ilk adım, noktaları iki kategoriye ayırmaktır. İlk kategori kesit sınırının içinde veya sınırlarının üstünde bulunan noktalardır. İkinci kategori ise çıktı bölgesinin dışında yer alan noktalardır. Bu nedenle, matrisin her bir noktasının kesit sınırının içinde veya dışında olup olmadığı test edilir. Noktanın bir kapalı poligonun içinde olup olmadığını test etmek, hesaplamalı geometrinin geleneksel problemlerinden biridir. Noktaların test edilmesi için MATLAB'deki "INPOLYGON" [70] komutu kullanılmıştır. Bu komut, Hormann ve Agathos'ın [71] makalelerinde belirtilen algoritmayı kullanır. Komutun girdileri, poligonun ve noktaların koordinatlarından oluşur. Çıktısı ise çıktı kesitin içinde veya sınırlarında yer alan noktalardır. Şekil 3.5, "INPOLYGON" komutunun, verilen kesit ve matris noktaları üzerinde nasıl uygulandığını gösteren bir örnek göstermektedir. Komut uygulandıktan sonra,

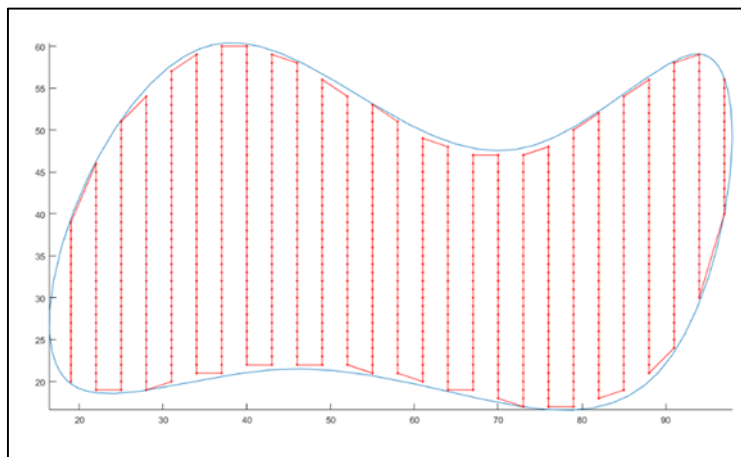
yalnızca kesitin içinde yer alan noktalar kalır (şekil 3.5 (b)).



Şekil 3.5. Kesitin içinde yer alan noktaların İNPOLYGON komutu ile tespit edilmesi

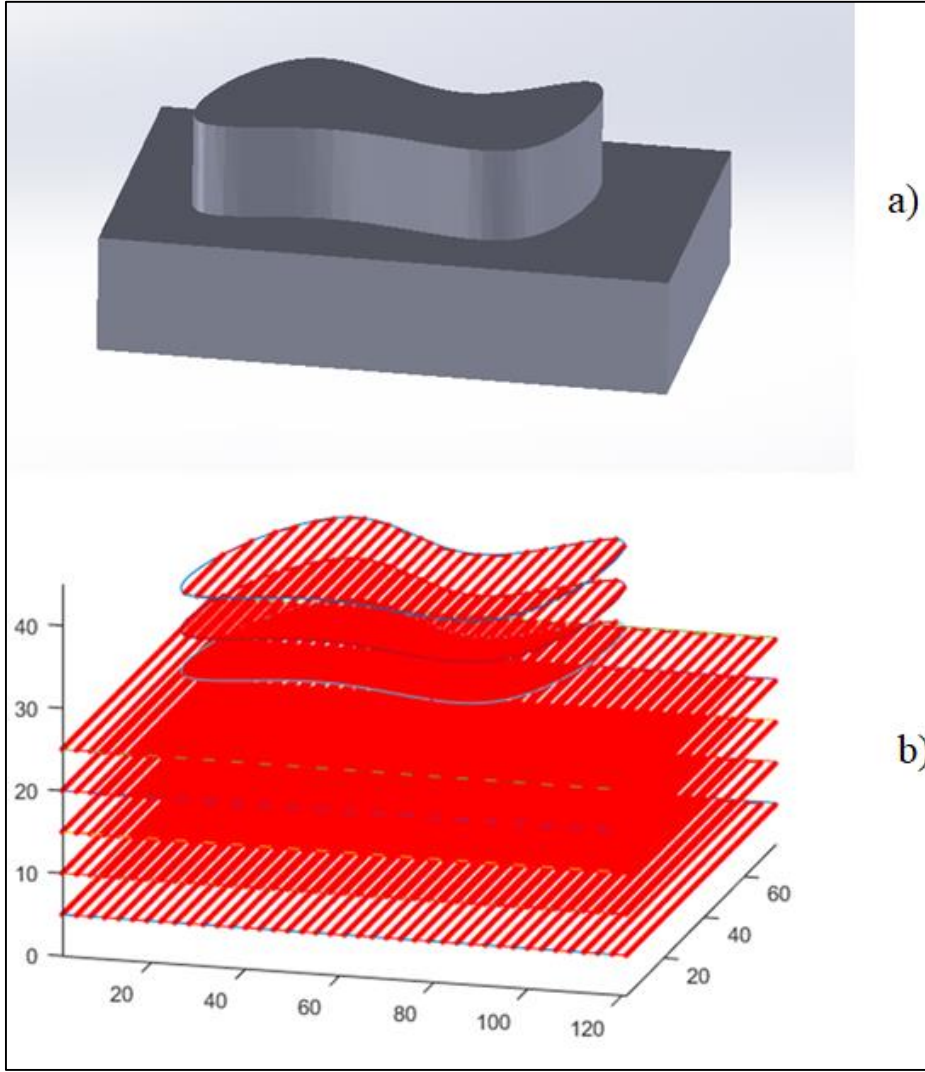
3.4. Raster Veya Zikzak Örüntülerine Göre Yığma Yollarının Oluşturulması

Kesitte bulunan noktalar belirlendikten sonra, bu noktalardan yığma yolları oluşturulur. Eğer istenen örüntü raster ise, aynı doğrultuda bulunan noktalardan ayrı ayrı çizgiler oluşturulur. Bu çizgiler yığma yolu matrisine kaydedilir. Daha sonra, yığma yolları bu matris aracılığıyla ısı analiz aşamasına taşınır. Eğer istenen örüntü zikzak ise, yığma yollarının sonları birbirine karşılıklı olarak bağlanır ve böylece katmanda sürekli bir yol oluşur. Şekil 3.6’da, kesitte kalan noktalar kullanılarak zikzak örüntüsüne göre yığma yolu oluşturulmasına bir örnek sunulmuştur.



Şekil 3.6. Kesit içinde kalan noktalardan oluşan zikzak örüntüsü

Şekil 3.7, iki farklı kesite sahip parça için kodun nasıl zikzak yığma yolu oluşturduğunu göstermektedir.

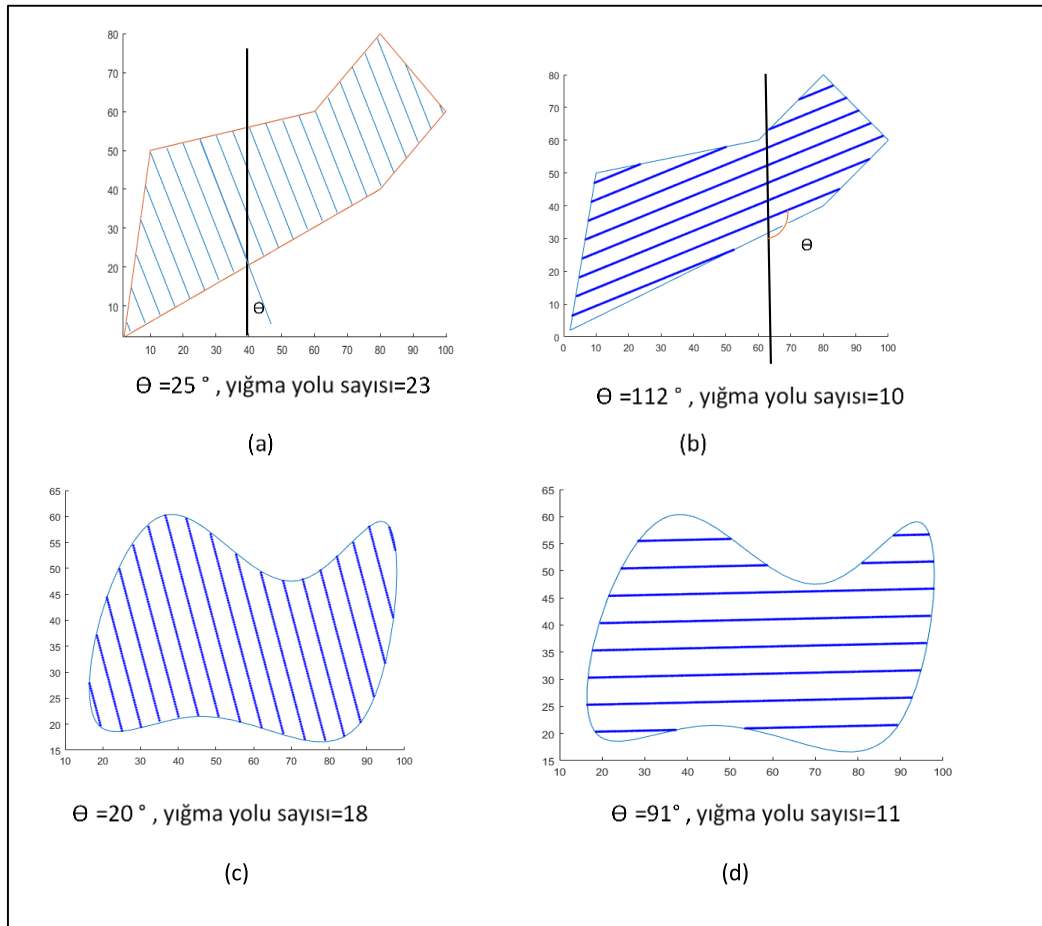


Şekil 3.7. İki tip kesiti olan parçanın zikzak örüntüsü, parçanın STL modeli a) ve katmanlar içindeki yığma yolları b)

3.4.1. Kısa ve uzun yığma yollarını bulması

Her bir kesit için yığma yolu, herhangi bir açıya göre oluşturulabilir. Bu durum sonsuz olasılıkların olduğu anlamına gelir. Yığma yollarının sayısı, yığma açısının değişmesiyle birlikte artabilir veya azalabilir. Fakat yığma yollarının toplam uzunluğu sabit kalır çünkü alanı sabit olan kesiti kapsamaları için oluşturulurlar. Seçilen örüntü zikzak ve yığma yolu sayısı minimum ise, bu durum yığma sırasında olabilecek en az torç yönü değişimi anlamına gelir. Bu da yığılan yüzeyin kalitesinin daha yüksek olmasını sağlar. Yığma yollarının sayısı maksimum ise, yığılan parçada daha az gerilme beklenebilir. Basit şekillerde, yığma yollarının minimum olacağı açı kolayca tahmin edilebilir. Bu, yığma yollarının dikdörtgenin boyuna paralel olacağı açıdır. Yığma yollarının maksimum olduğu açı ise yığma yollarının

dikdörtgenin enine paralel olduğu açıdır. Daha karmaşık şekillerde, bu iki açıyı doğrudan tahmin etmek mümkün olmayabilir. Ding ve arkadaşları [72], çokgenlerde, uzun yığma yollarının, bu çokgende oluşturulan en büyük köşegene paralel olduğunu göstermiştir. Ancak kapalı bir eğriye, bu yöntemi uygulamak mümkün değildir çünkü bu eğri içinde çizilebilecek sonsuz köşegen vardır. Bu nedenle, algoritma için deneme yanılma metoduna dayalı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yöntemde yığma yolları, Y eksenine göre 0'dan 180'e kadar belirli aralıklarla döndürülmektedir. Her aralıkta yığma yollarının sayısı hesaplanıp bu sayılar karşılaştırılarak en kısa ve en uzun yığma yolları ve bu yığma yollarının y eksenine göre açıları elde edilir. Şekil 3.8'de gösterildiği gibi, verilen kesit için, açı $\Theta = 25^\circ$ olduğunda en kısa (Şekil 3.8, a) , $\Theta = 112^\circ$ olduğunda ise en uzun (Şekil 3.8, b) yığma yolu elde edilmiş olacaktır. Şekil (3.8 c, d)'de başka bir kesit gösterilip en kısa ve en uzun yığma yolu sırasıyla çizilmiştir. Bu şekilde kullanıcıya uzun veya kısa adımları seçme seçeneği sunulabilir.



Şekil 3.8. Deneme yanılma metoduyla altıgen için; en kısa yığma yolu (a) en uzun yığma yolu (b) kapalı eğri için; en kısa yığma yolu (c) ve en uzun yığma yolu (d) bulunması

3.5. Kontur Örüntüsüne Göre Yığma Yollarının Oluşturulması

Kontur örüntüsünde, kontur yığma yolu oluşturma yöntemi, raster ve zikzak örüntülerinden farklıdır. Kontur örüntüsünde nokta matrisi oluşturulmaz, ancak kesit sınırları belirlenir ve adım mesafesi değerinde kesiti kaplayacak şekilde kontur kaydırılır. Bu nedenle, öncelik olarak kaydırma için kullanılacak denklemler belirlenmelidir.

AB ve BC iki doğru parçası olsun. AB ve BC için paralel olan de ve fg doğru parçalarını bulmak için aşağıdaki adımlar izlenir:

1-AB ve BC doğru parçalarının eğimleri (m_1, m_2), 3.1 ve 3.2 numaralı denklemler kullanılarak hesaplanır.

2- Doğru çizgi parçalarının eğim açıları (θ_1, θ_2), 3.3 ve 3.4 numaralı denklemlerle hesaplanır.

3-Paralel kaydırılmış doğru parçalarının koordinatları, 3.5 ve 3.6 numaralı denklem setine göre hesaplanır.

4-Şekil 3.9 (a)'da görüldüğü gibi, elde edilen iki doğru parçası kesişecektir, bu nedenle doğru parçalarının denklemleri oluşturularak kesişim noktası hesaplanır ve ardından kesişim noktasından sonraki küçük parçalar kesilir. Sonuç olarak, önceki iki doğru parçasına paralel olan dh ve hg doğru parçaları elde edilir (Şekil 3.9 (b)).

5-Kaydırma yönü Şekil 3.9'da belirtilen yöne ters ise, doğru parçaları kesişmez, bunlar arasında bir boşluk oluşur. Bu durumda, elde edilen doğru parçalarının kesişim noktası bulunur ve kesme işlemi yerine bu noktalara doğru çizgiler uzatılır.

$$m_1 = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \quad (3.1)$$

$$m_2 = \frac{y_C - y_B}{x_C - x_B} \quad (3.2)$$

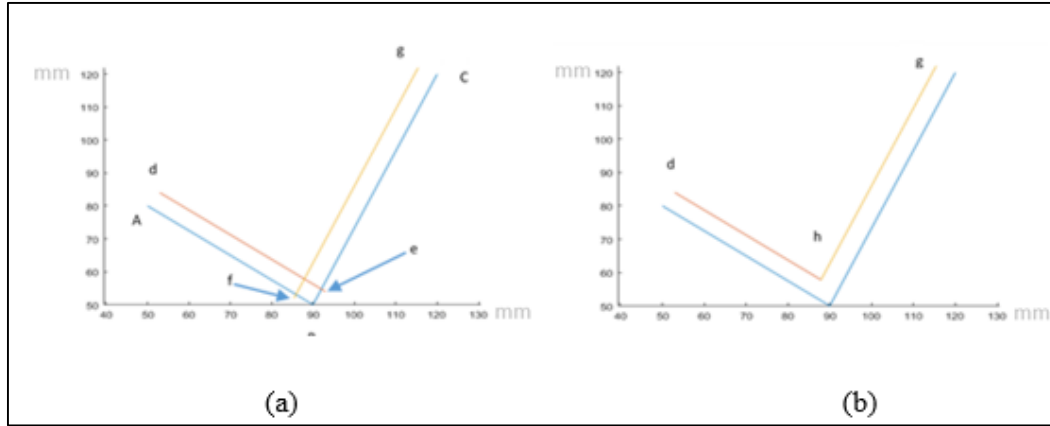
$$\theta_1 = \arctan(m_1) \quad (3.3)$$

$$\theta_2 = \arctan(m_2) \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} x_d = x_A - r \times \sin(\theta_1) \\ y_d = y_A + r \times \cos(\theta_1) \\ x_f = x_B - r \times \sin(\theta_1) \\ y_f = y_B + r \times \cos(\theta_1) \end{cases} \quad (3.5)$$

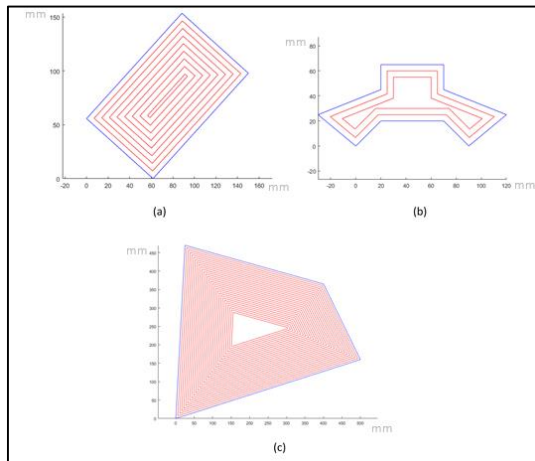
$$\begin{cases} xe = xB - r \times \sin(\theta_2) \\ ye = yB + r \times \cos(\theta_2) \\ xg = xC - r \times \sin(\theta_2) \\ yg = yC + r \times \cos(\theta_2) \end{cases} \quad (3.6)$$

Burada r = Adım mesafesi



Şekil 3.9. İki doğru parçası olan AB ve BC'nin kaydırılması sonucu çıkan de ve fg doğru parçaları (a), budama yapıldıktan sonra oluşturulan nihai ofset doğru parçaları dh ve hg (b)

Ofset örüntüsü, birkaç farklı kesit için denenmiştir (Şekil 3.10 a,b,c).



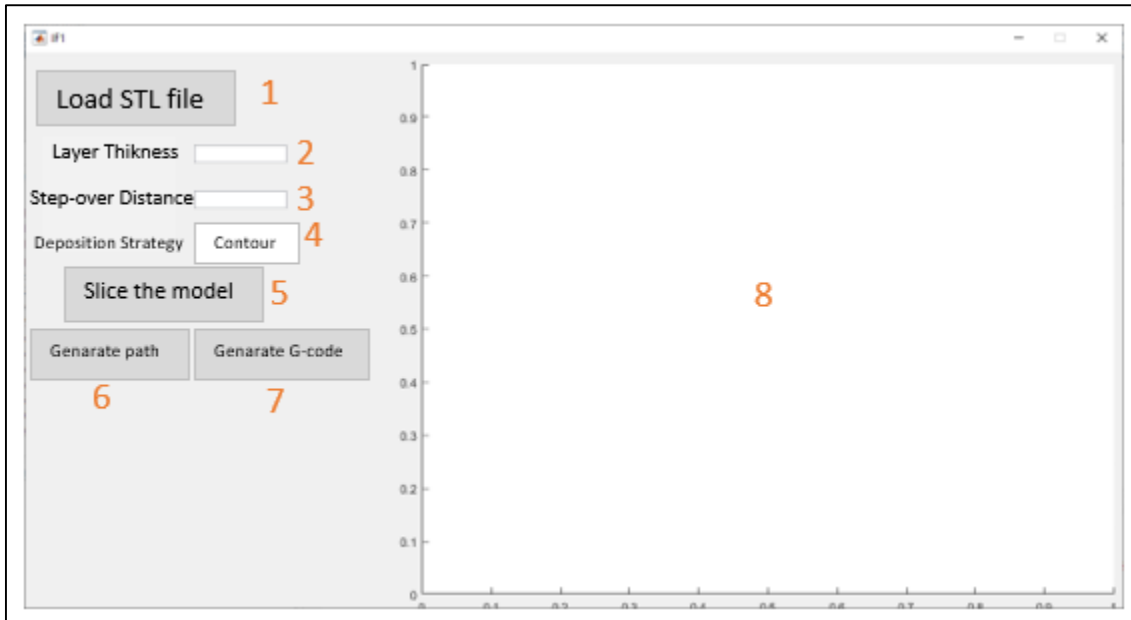
Şekil 3.10. Dikdörtgen (a), çokgen (b) ve dörtgen (c) kesit sınırlarına (mavi) göre kontur örüntüsüyle oluşturulan yığma yolları (kırmızı)

Şekil 3.10 (a)'da gösterildiği üzere ofset yığma yolları kesit alanını tamamen kapsamıştır, ancak bilindiği gibi ofset örüntüsü her kesit için uygun değildir. Örnek olarak Şekil 3.10 (b) ve 3.10 (c)'de boşluk oluşmuştur.

3.6. Yığma Yolu Oluşturma İçin Kullanıcı Arayüzü

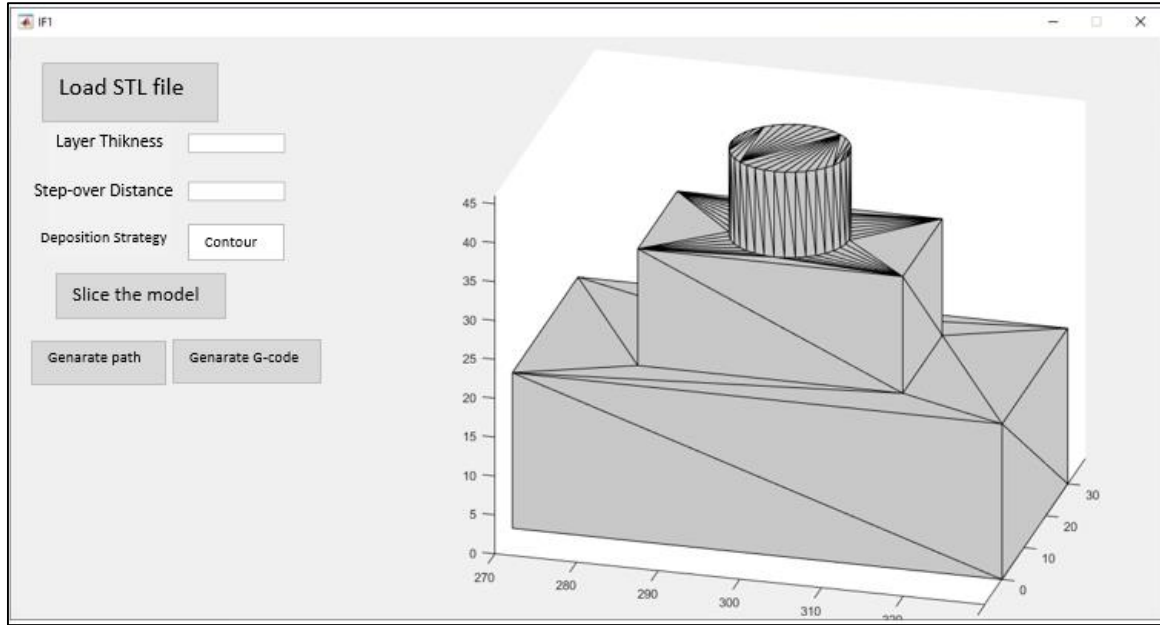
Yığma yolu oluşturma işlemini kolaylaştırmak amacıyla, yığma yolu oluşturma algoritmasının kodunu içeren bir kullanıcı arayüzü oluşturulmuştur. Şekil 3.11, MATLAB kullanılarak geliştirilen kullanıcı arayüzünü göstermektedir. Kullanıcı arayüzü aşağıdaki bölümlerden oluşur:

- 1- CAD modelinin yüklenme bölümü.
- 2- Katman kalınlığı değerinin girildiği bölüm.
- 3- Adım mesafesi değerinin girildiği bölüm.
- 4- Yığma yolu modelinin seçildiği bölüm (raster, zikzak, kontur).
- 5- Modelin dilimlenmesi için bir düğme
- 6- Yığma yollarının oluşturulması için bir düğme
- 7- G-code dosyasının oluşturulması için bir düğme
- 8- Görsel olarak görüntülenebilecek bir alan. Bu alanda, girilen CAD modeli, dilimlenmiş katmanlar ve her katman içinde oluşturulan yığma yolları görüntülenir.



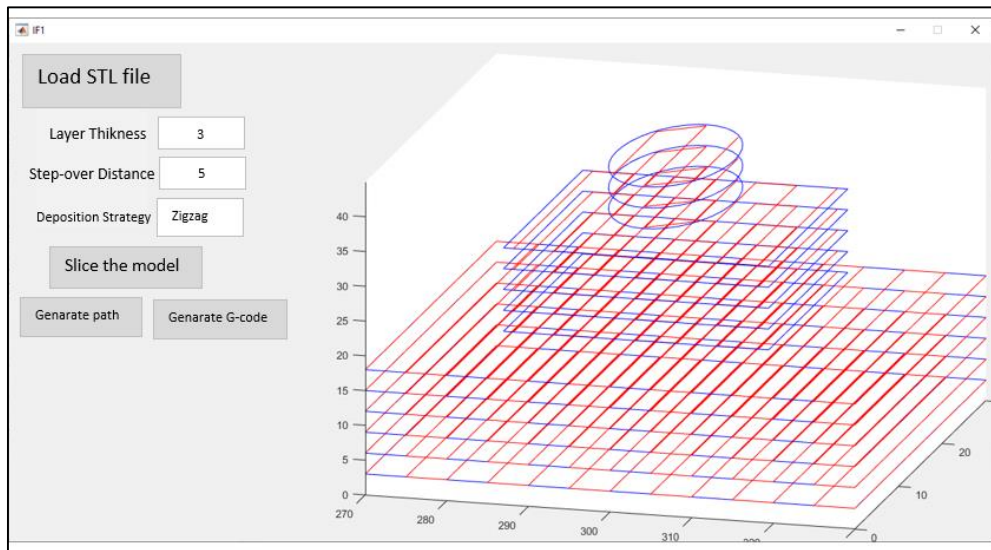
Şekil 3.11. Yığma yolu oluşturma programın arayüzü

Şekil 3.12, kullanıcı arayüzüne yüklenen bir modeli göstermektedir. Model, görsel alanda görsel olarak görüntülenir. Gösterilen üçgenler, STL dosyasının oluşturulduğu üçgenleri temsil etmektedir. Nitekim CAD modelleri, STL dosyalarında üçgenlerle temsil edilir.



Şekil 3.12. Modelin STL dosyasının yüklenmesi

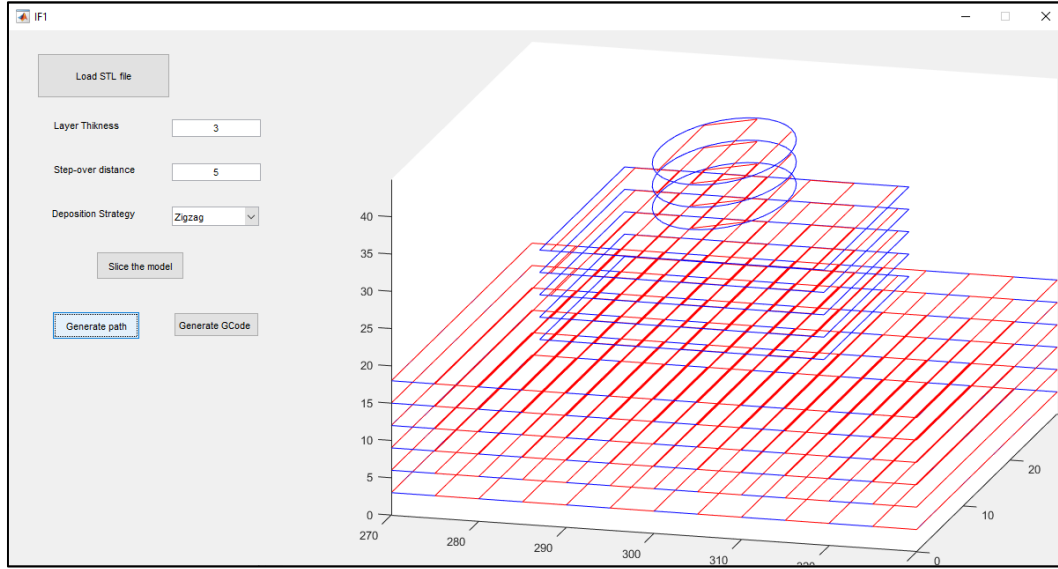
İstenilen katman yüksekliği girildikten sonra “modelidilimle” butonuna basarak katmanlar oluşturulmaktadır (şekil 3.13). Örnek olarak şekilde görünen örnek için, katman kalınlığı olarak 2 mm girildi.



Şekil 3.13. Katman yüksekliğine göre oluşturulan katmanlar

Şekil 3.14'te, örnek olarak adım mesafesi 5 mm ve zikzak örüntüsü seçilmiştir. "yığma yolu oluştur" düğmesine basıldıktan sonra, her katmanda seçilen örüntüye göre yığma yolları

oluşturulur (kırmızı renkle gösterilen çizgiler).



Şekil 3.14. Zikzak stratejisine göre oluşturulan yığma yolları

Bu aşamada elde edilen yığma yolları, geleneksel yöntemlerle parça üretiminde doğrudan uygulanabilir. Alternatif olarak, bu yollar bir sonraki aşamaya, yani ısı dağılımına dayalı yığma yolu planlama aşamasına taşınabilir. Böylelikle yığma yolu planı oluşan ısı dağılımına göre tekrardan düzenlenebilir.

4. TERMAL ANALİZE DAYALI YIĞMA YOLLARININ PLANLANMASI

4.1. Isıl Analiz Yaklaşımlarına Giriş

Isıl analizlerin gerçekleştirilmesi için kullanılan çoğu araç, ticari sonlu eleman paketlerinden oluşmaktadır. Bu araçların kullanılmasının başlıca nedeni, sonlu elemanlar teorisi ve programlamadaki gelişmelerdir. Örneğin, incelenen modelde yükler ve sınır koşullar kolayca uygulanabilir, sonuçlar modele aktarılabilir ve görüntülenebilir. Ancak, ısı analizlerin gerçekleştirilmesinde nispeten ağır hesaplama maliyeti hala önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu hesaplama maliyetinin ağır olmasının nedeni, parçaları temsil eden modellerde çok sayıda eleman ve düğümün bulunmasıdır. Özellikle büyük parça boyutları hesaplama maliyetini ciddi oranda arttırmaktadır. Bu programlar daha çok kapalı bir kutu gibi çalıştığından kullanıcı müdahalesine fazla olanak vermemektedir. Dolayısıyla, bazı araştırmacılar farklı modelleme ve benzetim işlemlerini gerçekleştirmek için farklı kodlar geliştirmişlerdir. Bu kodların yazılması, geliştirici tarafından zaman ve çaba gerektirse de, çözümde sağladığı esneklik birçok olanak sağlamaktadır. Sonlu farklar ve sonlu hacimler yöntemleri, çözüm sürecinde denklemleri ayarlama yeteneği açısından sonlu elemanlar yönteminden daha esnek yöntemlerdir [73]. Özellikle ısısalanı hesaplaması, Explicit olarak yapıldığında, eleman sayısına eşit sayıda bilinmeyen içeren denklemleri çözmeye gerek kalmadan mümkündür [74]. Bu nedenle, Wang ve arkadaşları [75] sonlu hacimler yöntemine dayanarak ısısalanını hesaplama yöntemi geliştirdiler. Wang, bu yöntemde "zaman adımı füzyonu" olarak adlandırılan yeni bir yaklaşım sunmuştur. Hesaplama sürecinde tüm alan aynı zaman adımına tabi tutulmaz, bunun yerine ısı kaynağından uzak bölgelerde daha büyük bir zaman adımı kullanılabilir. Bu yöntem, hesaplama sürecini hızlandırmaya katkıda bulunmuştur. McMillan ve arkadaşları[76], sonlu farklar yöntemi kullanan araştırmacılar arasında yer almıştır. McMillan, seçici lazer ergitme ile üretilen kafeslerdeki sıcaklığı simüle etmek için etkili bir yöntem geliştirdi. Bu yöntemde üç boyutlu kafesler, tek boyutlu bir denklem sistemine dönüştürülmüştür. Stockman ve arkadaşları [77], Eİ işlemlerinde sonlu farklar yöntemini kullanarak termal analizi gerçekleştirmiştir. Stockman, benzetim sırasında eklenecek düğümü etkinleştirmek için yeni bir yöntem bularak hesaplama sürecini hızlandırmıştır. Geliştirilen yöntemde benzetimden önce tüm düğümler oluşturulur, ancak düğüm sadece modelde yığma zamanı geldiğinde hesaplama katılır.

Bu algorithmadaki geliştirilmiş termal analiz bölümü, sonlu hacimler prensibine dayanmaktadır. Yığma yolları sonlu hacimlere dönüştürülmektedir. Ardından, geliştirilen ısı analiz bölümü kullanılarak, sıcaklık varyansının en düşük değerini veren yığma yolunun bulunması için bir yaklaşım uygulanmaktadır. Aşağıdaki bölümler, ısı analiz bölümünün çalışma prensibini ve sıcaklık varyansı açısından en iyi yolun bulunması adımlarını açıklamaktadır.

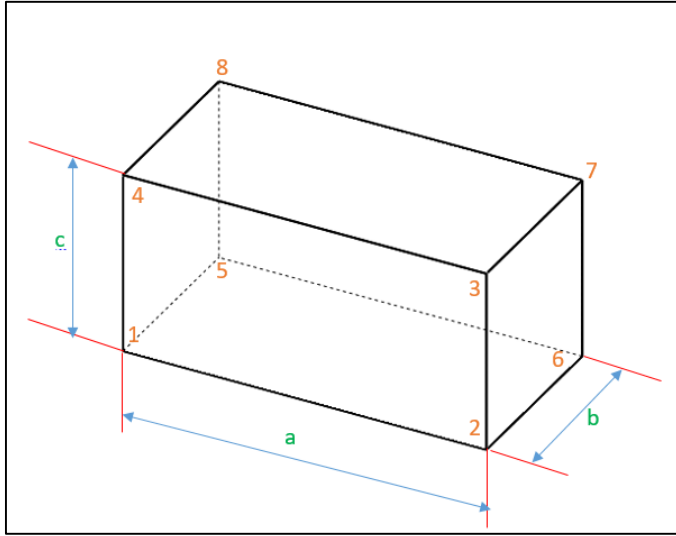
4.2. Geliştirilen Isıl Analizi Prensibi

Bu bölümde termal analiz işlemlerini etkin bir şekilde gerçekleştirebilen bir model geliştirildi. Bu model, yığma yollarını sonlu hacimlere dönüştürme prensibiyle çalışmaktadır. Oluşturulan model, ısıya dayalı olarak yol planlaması için kullanılacaktır.

4.2.1. Modelin sonlu hacimlerinin oluşturulması

Yığma yollarını sonlu hacimlere dönüştürme

Üçüncü bölümde belirtildiği gibi, oluşan yığma yolunun koordinatları özel bir matriste saklanmaktadır. Bu bölümde, bu yollar matrsten alınarak sonlu hacimlere dönüştürülmektedir. Oluşacak hacmin geometrik şekli dikdörtgenler prizma şeklindedir. Bu nedenle, bu hacmi oluşturmak için üç (boy (a), en (b) ve yükseklik (c)) bilinmesi gerekmektedir (Şekil 4.1). Boy, adım mesafesine göre belirlenirken, en, kullanıcı tarafından belirlenirken ve yükseklik katman yüksekliğine bağlı olarak belirlenmektedir. Boyutlar belirlendikten sonra, dikdörtgenin sekiz köşe noktasının koordinatları hesaplanmaktadır. Bu koordinatlar, sonlu hacimler için oluşturulan özel bir matriste saklanmaktadır.



Şekil 4.1. Oluşturulacak sonlu hacmin boyutları

Şekil 4.2, hacimlerin saklanması için kullanılan matrisi göstermektedir. Matris, 25 sütundan oluşmaktadır. Matrisin satırları ise modelin hacim sayısına göre belirlenmektedir. Matrisin ilk sütunu sonlu hacimlerin numaralarını içermektedir. Kalan 24 sütun ise Şekil 4.2'de gösterilen sekiz köşe noktasının koordinatlarını (x, y, z) içerir.

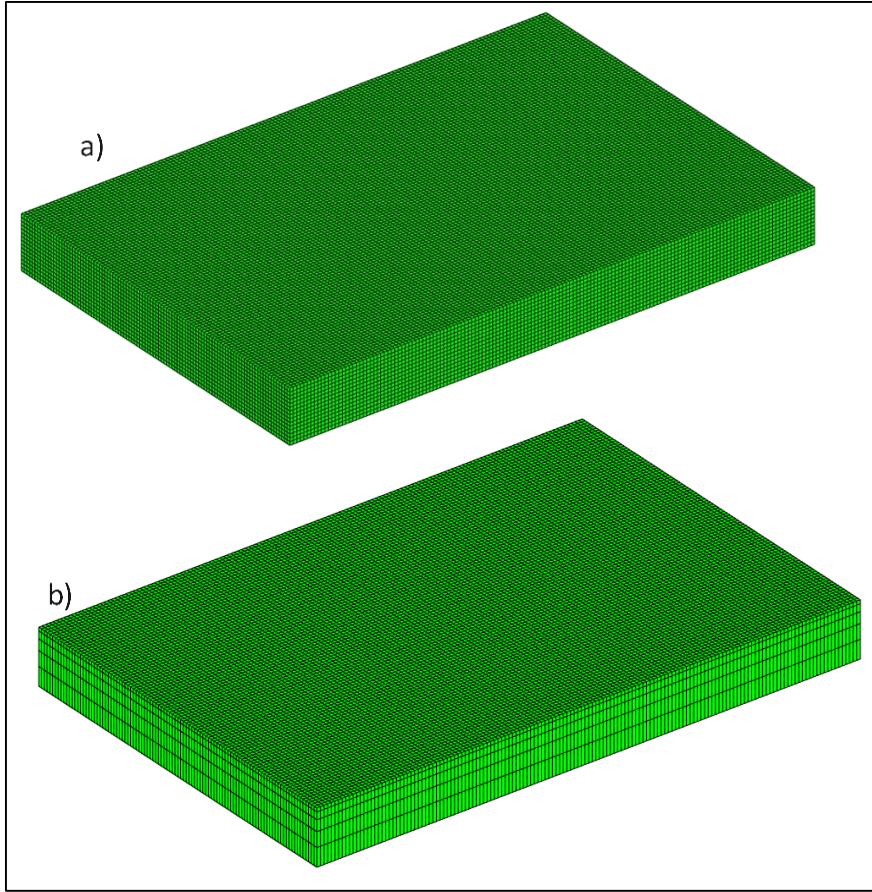
1. Köşe				2. Köşe				
	x	y	z	x	y	z		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1663	41	0	-6	43	0	-6	43	0
1664	41	2	-6	43	2	-6	43	2
1665	41	4	-6	43	4	-6	43	4
1666	41	6	-6	43	6	-6	43	6
1667	41	8	-6	43	8	-6	43	8
1668	41	10	-6	43	10	-6	43	10
1669	41	12	-6	43	12	-6	43	12
1670	41	14	-6	43	14	-6	43	14
1671	41	16	-6	43	16	-6	43	16
1672	41	18	-6	43	18	-6	43	18
1673	41	20	-6	43	20	-6	43	20
1674	41	22	-6	43	22	-6	43	22
1675	41	24	-6	43	24	-6	43	24
1676	41	26	-6	43	26	-6	43	26
1677	41	28	-6	43	28	-6	43	28
1678	41	30	-6	43	30	-6	43	30
1679	41	32	-6	43	32	-6	43	32

Hacimlerin numaraları

Şekil 4.2. Sonlu hacimlerin matrisi

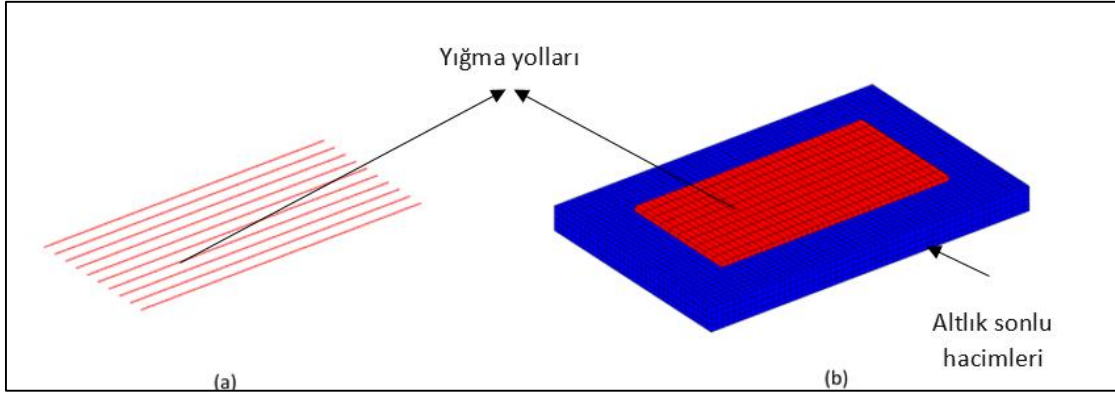
Altlığın sonlu hacimlerini oluşturma

Altlığın sonlu hacimlerini oluşturmak için üç taban boyutu, köşe noktalarından bir noktanın koordinatlarının belirlenmesi ve altlık sonlu hacminin boyutlarının girilmesi gerekmektedir. Şekil 4.3 (a), 300×200×30 mm boyutlarından oluşan bir altlık için 2 mm'lik bir sonlu hacim için oluşturulan sonlu hacimleri göstermektedir. Bu durumda sonlu hacimlerin sayısı 225.000'dir. Bu sayı, çözümü yavaşlatabilir, bu nedenle yüksek sıcaklık gradyanından uzak bölgelerde yani ısı kaynağından uzak bölgelerde daha kaba bir sonlu hacim kullanılabilir. Şekil 4.3 (b), kaba sonlu hacimlere sahip altlığı göstermektedir, bu durumda sonlu hacimlerin sayısı 75.000'e düşmüştür.



Şekil 4.3. Altlığın sonlu hacimleri oluşturulması, ince hacimli altlık a), kaba hacimli altlık b)

Şekil 4.4, yığma yollarının ve altlık hacimlerinin sonlu hacimlere dönüştürülmesine ilişkin bir örneği göstermektedir.



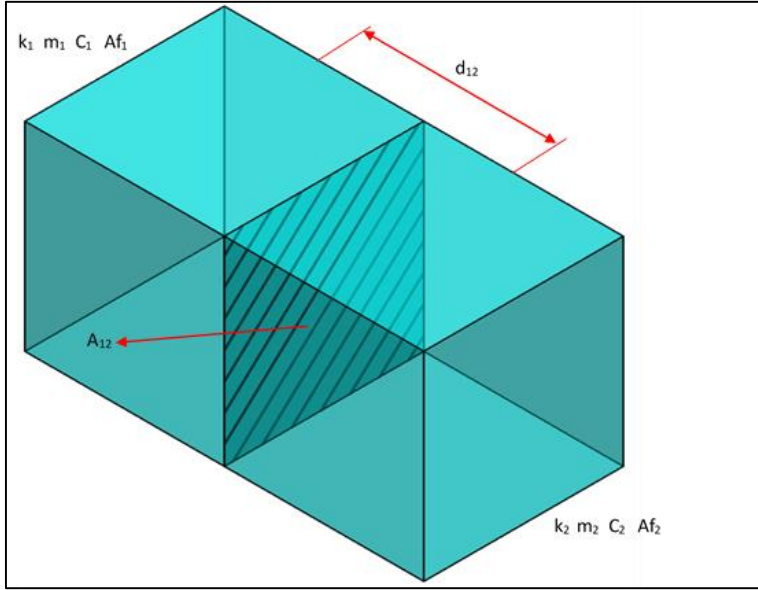
Şekil 4.4. Yığma yolu (a) ve altlık sonlu hacimlerinin (b) oluşturulması

Sonlu hacimler arasındaki ortak alanı ve mesafeyi bulma

Isı transferi denklemlerini çözmek için, sonlu hacimler arasındaki ortak yüzey alanının ve mesafenin bilinmesi gerekmektedir. Her bir sonlu hacim altı yüzeye sahiptir. Tüm hacimler için kesişen yüzeyleri bulmak suretiyle ortak yüzey alanı hesaplanmaktadır. Ancak bir hacim için ortak yüzey alanını bulmak bu hacimle modelin diğer tüm hacimleri arasında arama yapmak uzun bir süre gerektirebilir. Arama sürecini hızlandırmak için, bir hacimle diğer hacimler arasındaki ortak alanı belirlemek ve öncelikle bu hacme yakın olan hacimler belirlenir, ardından yakın hacimler arasında arama yapılmaktadır.

4.2.2. Isıl analizin çözüm denklemleri

Şekil 4.5'te gösterildiği gibi iki sonlu hacim olsun. Bu iki hacim için ısı geçmişi ya açık (Denklemler 1 ve 2) ya da kapalı sistem yaklaşımına göre (Denklemler 3 ve 4) hesaplamak mümkündür.



Şekil 4.5. İki bitişik sonlu hacim şeması

$$\left\{ \frac{k_1 k_2}{2(k_1 + k_2)} \frac{A_{12}}{d_{12}} (T_2^i - T_1^i) + h A f_1 (T_\infty - T_1^i) + Q_1 \right\} dt = m_1 c_1 (T_1^{i+1} - T_1^i) \quad (4.1)$$

$$\left\{ \frac{k_2 k_1}{2(k_2 + k_1)} \frac{A_{21}}{d_{21}} (T_1^i - T_2^i) + h A f_2 (T_\infty - T_2^i) + Q_2 \right\} dt = m_2 c_2 (T_2^{i+1} - T_2^i) \quad (4.2)$$

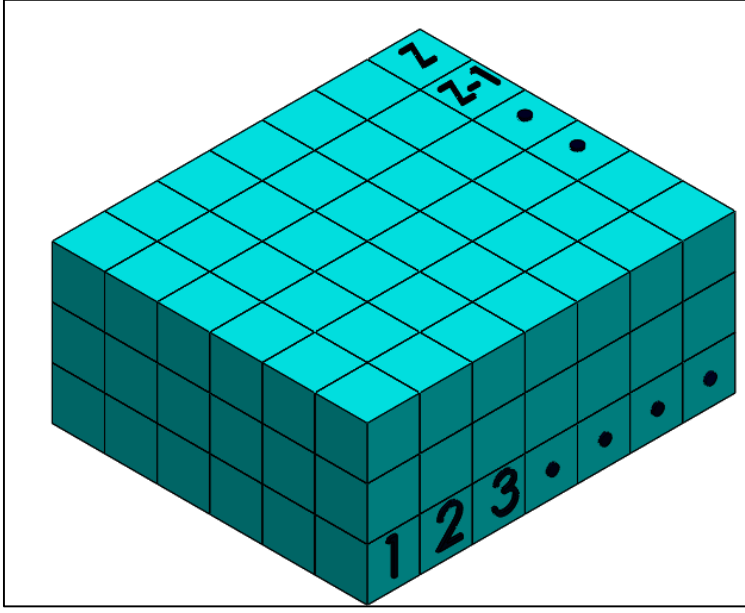
$$\left\{ \frac{k_1 k_2}{2(k_1 + k_2)} \frac{A_{12}}{d_{12}} (T_2^{i+1} - T_1^{i+1}) + h A f_1 (T_\infty - T_1^{i+1}) + Q_1 \right\} dt = m_1 c_1 (T_1^{i+1} - T_1^i) \quad (4.3)$$

$$\left\{ \frac{k_2 k_1}{2(k_2 + k_1)} \frac{A_{21}}{d_{21}} (T_1^{i+1} - T_2^{i+1}) + h A f_2 (T_\infty - T_2^{i+1}) + Q_2 \right\} dt = m_2 c_2 (T_2^{i+1} - T_2^i) \quad (4.4)$$

Burada

k_1, k_2 : hacim 1 ve hacim 2'nin ısı iletkenlikleri. A_{12}, A_{21} : hacim 1 ve hacim 2'nin arasındaki ortak alan. d_{12}, d_{21} : hacim 1 ve hacim 2'nin arasındaki mesafe. h : taşınım ısı aktarım katsayısı. Af_1, Af_2 : hacim 1 ve hacim 2'nin boş alanlarının toplamı. T_∞ : oda sıcaklığı. dt : zaman adımı. m_1, m_2 : hacim 1 ve hacim 2'nin kütlesi. C_1, C_2 : hacim 1 ve hacim 2'nin özgül ısı kapasiteleri. T_1^i, T_2^i : i zamanında hacim 1 ve hacim 2'nin sıcaklığı. T_1^{i+1}, T_2^{i+1} : $i+1$ süresinde hacim 1 ve hacim 2'nin sıcaklığı. Q_1, Q_2 : hacim 1 ve hacim 2'ye iletilen güç. Bu modelde sadece konveksiyondan kaynaklanan ısı kayıpları dikkate alınmıştır.

Model, z sayıda sonlu hacimden oluşuyorsa (Şekil 4.6), önceki denklemleri z sayıda denklemden oluşan bir diziye genelleştirmek mümkündür. Denklemler 4.5 ve Denklemler 4.6 sırasıyla açık ve kapalı sistem çözüm genelleştirilmiş denklemleridir.



Şekil 4.6. Z sayıda sonlu hacme sahip bir model

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_1^n \frac{k_n k_m}{2(k_n + k_m)} \frac{A_{mn}}{d_{mn}} (T_n^i - T_m^i) + h A f_m (T_{inf} - T_m^i) + Q_m \} dt = m_m c_m (T_m^{i+1} - T_m^i) \\ \vdots \\ \sum_1^n \frac{k_n k_z}{2(k_n + k_z)} \frac{A_{zn}}{d_{zn}} (T_n^i - T_z^i) + h A f_z (T_{inf} - T_z^i) + Q_z \} dt = m_z c_z (T_z^{i+1} - T_z^i) \end{array} \right. \quad (4.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_1^n \frac{k_n k_m}{2(k_n + k_m)} \frac{A_{mn}}{d_{mn}} (T_n^{i+1} - T_m^{i+1}) + h A f_m (T_{inf} - T_m^{i+1}) + Q_m \} dt = m_m c_m (T_m^{i+1} - T_m^i) \\ \vdots \\ \sum_1^n \frac{k_n k_z}{2(k_n + k_z)} \frac{A_{zn}}{d_{zn}} (T_n^{i+1} - T_z^{i+1}) + h A f_z (T_{inf} - T_z^{i+1}) + Q_z \} dt = m_z c_z (T_z^{i+1} - T_z^i) \end{array} \right. \quad (4.6)$$

Burada n, m hacmine bitişik hacim sayısıdır.

Genellikle açık sistemde çözüm, doğrudan sıcaklıkların hesaplanmasından dolayı daha kolaydır. Kapalı sistemde ise sıcaklıkların hesaplanması, sistem denklemlerinin çözülmesini gerektirir, bu da hesaplamanın daha yavaş olmasına neden olur. Ancak, açık bir sistemin ana dezavantajı, sonuçların negatif veya sonsuz sıcaklık değerleri vererek salınım yapabilesidir. Salınım genellikle zaman adımı nispeten büyükse ortaya çıkar. Bu nedenle, salınım oluşmamasını sağlamak için açık sistemde zaman adımları küçük olmalıdır. Açık sistemde kullanılabilecek zaman adımının en büyük değeri denklem 4.7 ile hesaplanabilir [78]. Kapalı sistemin avantajlarından biri ise, zaman adımı ne kadar büyük olursa olsun sonuçları asla salınmamasıdır.

$$dt \leq \min \left(\frac{m_m c_m}{\frac{k_n k_m}{2(k_n + k_m)} \frac{A_{mn}}{d_{mn}} + h A f_m} \right) \quad (4.7)$$

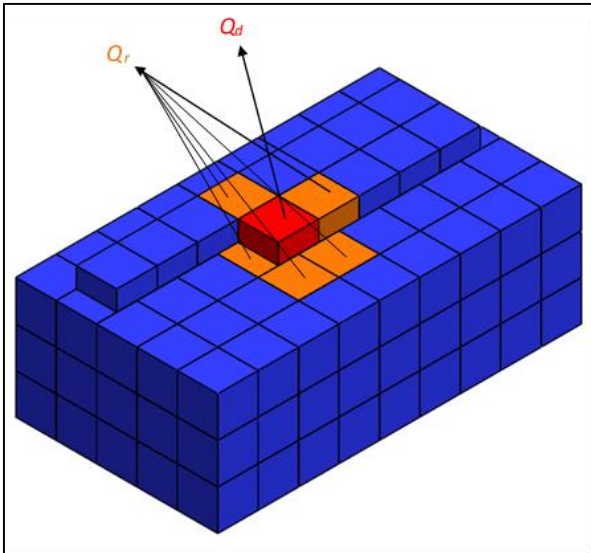
4.2.3. Isıl analizinde kullanılan ısı kaynağı modeli

Isıl analizde kullanılan yaygın ısı kaynağı modelleri Gauss [79] ve çift elipsoiddir [80]. Ancak bu modellerin kullanılması, sınır koşullarının sürekli olarak güncellenmesi nedeniyle hesaplama maliyetini arttırabilir [74] [81]. Bu nedenle, bazı araştırmacılar, daha etkili olan ve simülasyon süresini önemli ölçüde azaltabilen, önceden belirlenmiş sıcaklık ısı kaynağının kullanılmasını önermiştir [77] [74]. Ancak bunun en büyük dezavantajı, süreç parametrelerinin sıcaklık üzerindeki etkisini incelemenin mümkün olmamasıdır. Çünkü bu modelde ısı kaynağı, eklenen elemana sabit sıcaklık olarak verilir. Örneğin, böyle ısı kaynağı modellerinde ısı birikimini incelemek mümkün değildir. Bu algorithmada kullanılan ısı kaynağı modelinde, ark ısısı iki kısma ayrılmaktadır. Bir kısım (Q_d) ergimiş havuza (eklenen hacim) aktarılır ve diğer kısım (Q_r), eklenen hacmin komşu hacimlerine eşit olarak aktarılır (Şekil 4.7). Eklenen elemana geçen enerji (Q_d) denklem 4.8 ile hesaplanmaktadır [82].

$$Q_d = I \cdot V \cdot \eta \cdot \eta_d \quad (4.8)$$

Burada

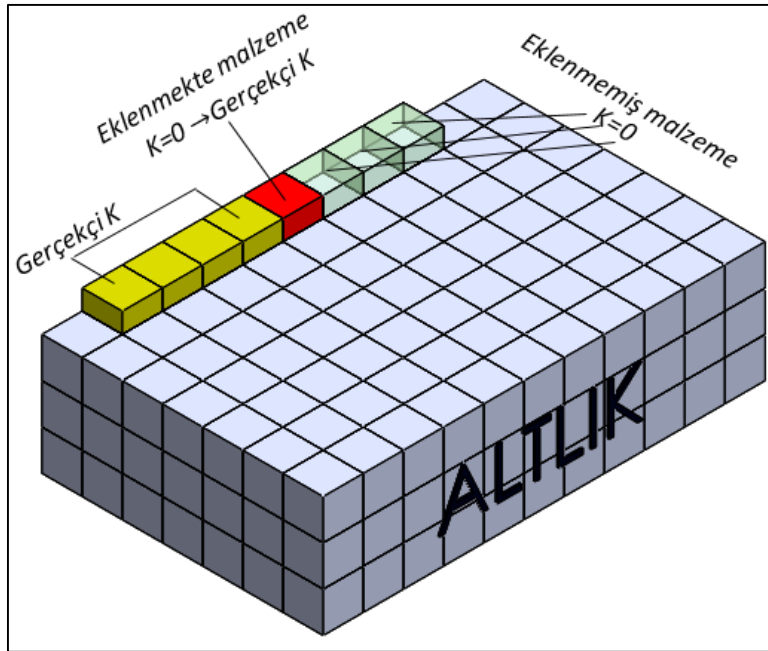
I : Akım, V : Voltaj, η : Ark verimliliği, η_d : dikişe geçen ısı enerjisinin toplam ark enerjisine oranı



Şekil 4.7. Isı kaynağı modeli şeması: eklenen hacme geçen enerji (Q_d) ve komşu hacimlere geçen enerji (Q_r)

4.2.4. Malzeme ekleme yaklaşımı

Malzeme ekleme, Eİ simülasyonlarında iki teknikle modellenmektedir. Birincisi olan sessiz eleman yönteminde tüm elemanlar model hazırlanırken oluşturulur ve onlara düşük ısı değerleri verilir. Bu yöntemde elemanın ekleme zamanı geldiğinde, düşük olan değerler gerçekçi değerlere dönüşmektedir. İkinci yöntem ise pasif eleman yöntemidir, burada eleman, sadece ekleme zamanı gelince, elemanlar matrisinde oluşturulmaktadır [77]. Geliştirilen algoritmada malzeme, sessiz eleman tekniğine göre eklenmektedir [83]. Şekil 4.8, malzeme ekleme şemasını göstermektedir.



Şekil 4.8. Malzeme yığılması sırasında ısı değerlerinin değişiminin gösterimi

4.3. En Az Sıcaklık Varyansı Veren Yığma Yolunun Atlama Stratejisi İle Bulunması

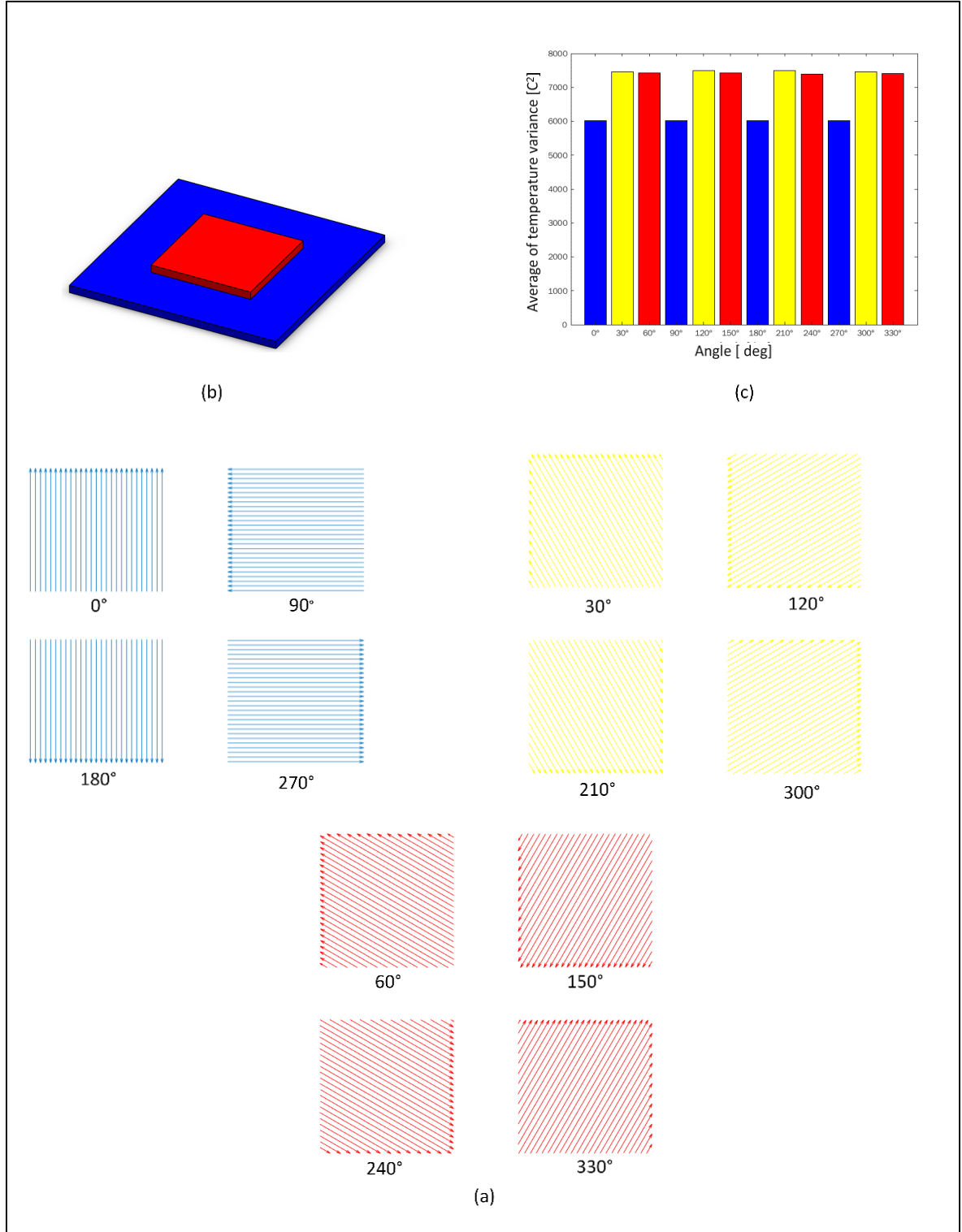
En düşük sıcaklık varyansı veren yığma yolu iki aşama ile bulunur. İlk aşama, optimum yığma yönünü belirlenmektir. İkinci aşama, her bir sonraki paso, atlama stratejisiyle bir önceki katmanın en soğuk bölgesine göre belirlenerek yığma yolunu yeniden düzenlemektedir. Bu iki aşama her katmanda aynı anda gerçekleştirilmektedir. Sonraki iki bölümde, yığma yönü ve atlamanın sıcaklık varyansı üzerindeki etkisi gösterilecektir.

4.3.1. Yığma yönünün sıcaklık varyansı üzerindeki etkisi

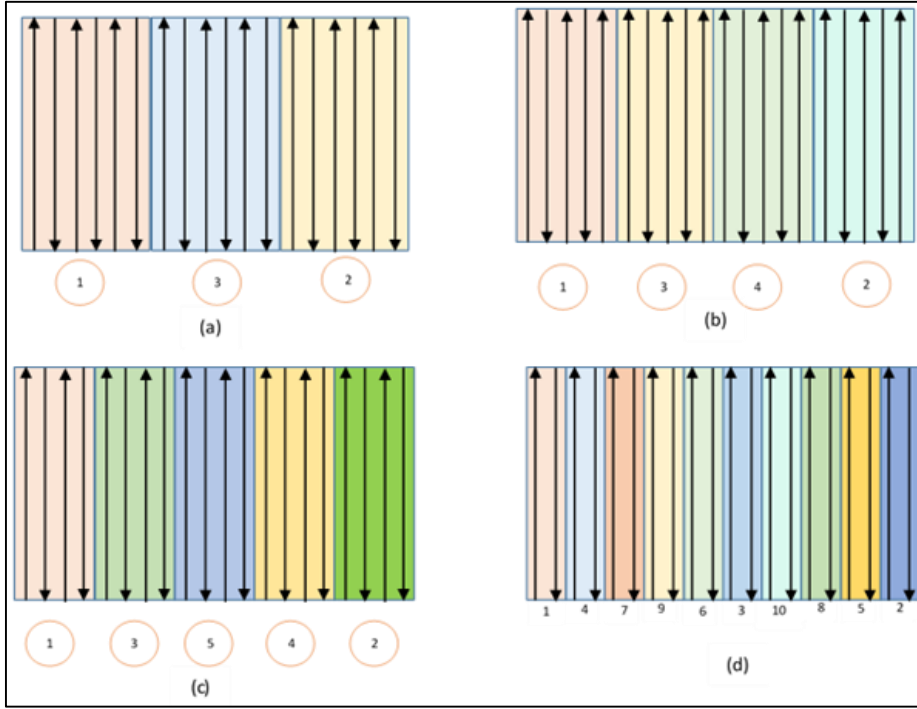
Şekil 4.9 (b)'da gösterilen tek katmanlı kare şeklinde parça için Şekil 4.9 (a)'de gösterilen 12 farklı yığma açısı için atlamasız simülasyonu yapılmıştır. Her açıda altlığın ortalama sıcaklık varyansı hesaplanmıştır. Şekil 4.9 (c)'de, her açıda bu ortalamaların değerini göstermektedir. Sonuçları karşılaştırıldığında şu neticeye ulaşılabilir, ortalama sıcaklık varyansı simetri nedeniyle her 90° derecede tekrarlanır. Bu sonuçlar üç grupta sınıflandırılabilir. Her bir grup $\{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ\}$, $\{30^\circ, 120^\circ, 210^\circ, 300^\circ\}$, $\{60^\circ, 150^\circ, 240^\circ, 330^\circ\}$ aynı sıcaklık varyansına sahiptir. Birinci grup, üç grup arasında en düşük sıcaklık varyansına sahiptir. Sıcaklık varyansının değerlerindeki fark, yığma yönünün en basit simetrik geometrilerde bile sıcaklık varyansını etkileyebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, altlık boyutları eşit olmadığında ve geometriler asimetrik olduğunda, yığma yönünün değiştirilmesinin sıcaklık varyansı üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olabilir.

4.3.2. Atlamanın sıcaklık varyansı üzerindeki etkisi

Bölgeler arasında atlamanın sıcaklık varyansı üzerindeki etkisini incelemek için dikdörtgen bir parça yığılması simüle edilmiştir. Yığma simülasyonunda dört senaryo test edilmiştir. Parça, bu senaryolarda 3, 4, 5 ve 10 bölüme bölünmüştür. Atlama, her simülasyonda en soğuk bölgeye yapılmıştır. Şekil 4.10, her bir senaryodaki bölümlerin sırasını göstermektedir. Her senaryoda, bir önceki katmandaki ortalama sıcaklık varyansı hesaplanmıştır. Şekil 4.11 bu değerleri göstermektedir. Şekilde görülebileceği gibi, bitişik bölgeler yığıldığında meydana gelen aşırı ısınmanın azalması nedeniyle, bölüm sayısı ne kadar fazla olursa, sıcaklık varyansı o kadar düşük olur. Bölüm sayısının artışı ile varyans azaldığından, bu algorithmada atlama, raster örüntüsüne göre seçilmiştir, çünkü raster örüntüsü ile mümkün olan en büyük bölüm sayısı elde edilebilmektedir. Zira her tek paso bir bölüm olarak sayılabilmektedir.



Şekil 4.9. Simetrik parça ve altlık (b) üzerindeki yığma yönlerinin (a) incelenmesi ve altlıktaki ortalama sıcaklık varyansları(c)



Şekil 4.10. Dikdörtgen parçanın farklı bölümlere bölünmesi üç (a), dört (b), beş (c) on (d) ile denenmiş atlama senaryoları

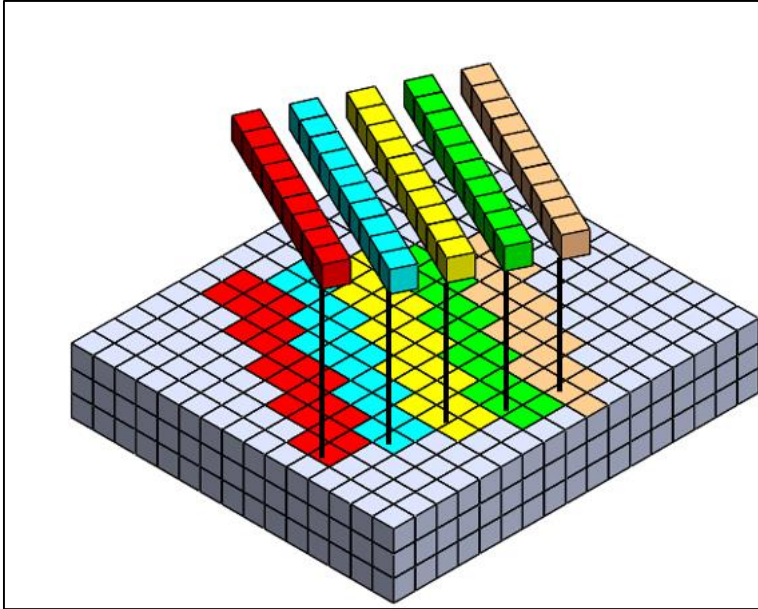


Şekil 4.11. Bölüm sayısına göre sıcaklık varyansının değişimi

4.3.3. Atlamalı raster stratejisinin adımları

Yukarıda bahsedildiği gibi, optimum yığma yolunu bulmak iki adımdan oluşmaktadır. İlk adım biriktirme yolu açısını belirlemekken ikinci adım optimum yol sırasını elde etmektir.

Bu örüntü 0'dan 360'a kadar herhangi bir açıda olabilir. Genel olarak, sonraki her katmanda, mekanik özellikleri iyileştirmek [55] için yığma yönü belirli bir miktarda [84] değiştirilir. Böylece parçadaki ısı dağılımı değişir. Isı akış yönünün doğrudan tahmin edilmesi zor olduğundan, sıcaklık varyansının en düşük değerlerini verebilecek yön bilinemez. Böylece açı seçimi adımımda 12 açı (0° - 30° - 60° - 90° - 120° - 150° - 180° - 210° - 240° - 270° - 300° - 330°) denenmektedir. Pasoların sırasının belirlenmesi, atlama ile raster örüntüsüne göre yapılmaktadır. Açı belirlenirken, mevcut katmanın her pasosuna bitişik bir önceki katmanın hacimleri gruplar halinde birleştirilmektedir. Şekil 4.12, 5 paso ile gruplandırılmış önceki katman hacimlerinin bir örneğini göstermektedir.



Şekil 4.12. Her pasonun önceki katmandan ona bitişik olan hacimlerle gruplandırılması

Her grubun ortalama sıcaklığı özel bir matrise kaydedilmektedir. Her yeni pasoya geçmeden önce, bu matris güncellenmektedir. En düşük ortalama sıcaklığa sahip olan grup seçilmektedir. Seçilen gruba bağlı olan paso seçilip yığma simülasyonu yapılmaktadır. Bu işlem, tüm pasolar bitene kadar tekrarlanmaktadır. Her açıda, bir önceki katmandaki sıcaklık varyansı kaydedilmektedir. Daha sonra en az sıcaklık varyansını veren açı seçilmektedir. Yeni bir katmanın açısı aranırken yığmanın devam etmesi için bir önceki katmanın açısı ile aynı yöne sahip olan açılar açı setinden çıkarılır. Önceki adımların tümü, tüm katmanlar bitene kadar tekrarlanmaktadır.

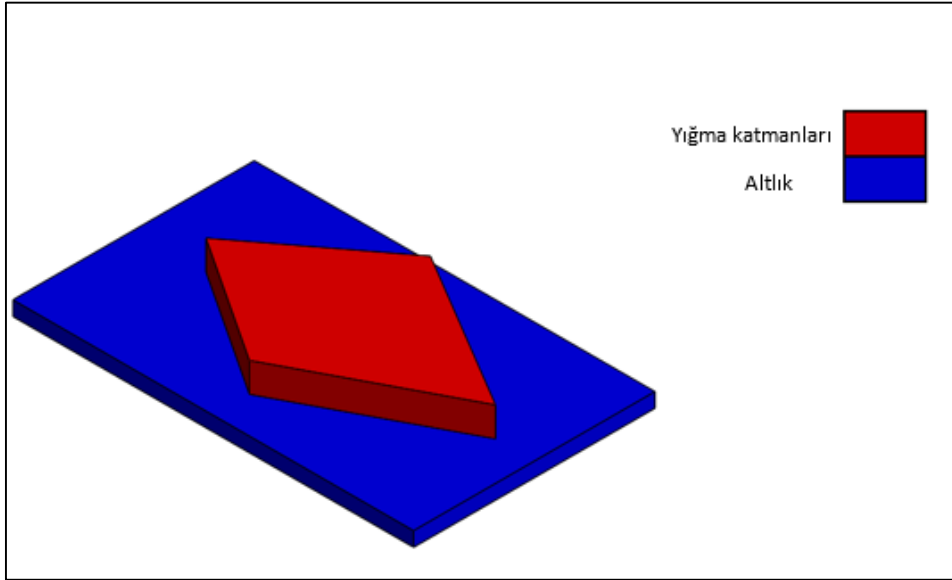
Sıcaklık varyansı V , denklem (4.9) kullanılarak hesaplanır:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^y (T_i - \bar{T})^2}{y-1} \quad (4.9)$$

Burada y : hacim sayısıdır, T_i : hacim sıcaklığıdır ve $\bar{T}$: y sayıda hacmin ortalama sıcaklığıdır.

4.4.4. Geliştirilen algoritmanın sıcaklık varyansı üzerindeki etkisini incelenmesi

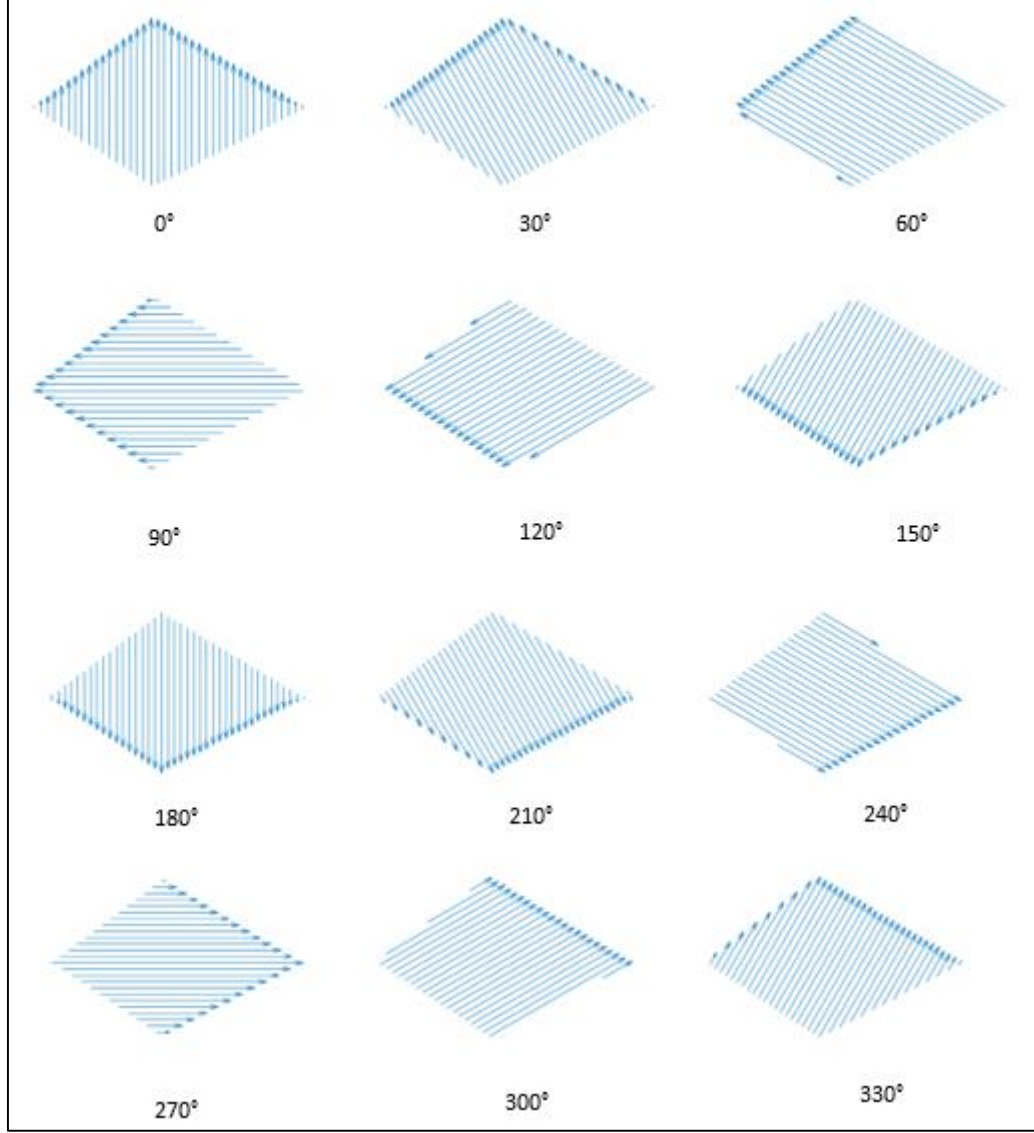
Önerilen algoritma, Şekil 4.13’de gösterilen parçanın yığılmasının simüle edilmesiyle değerlendirilmiştir. Parça, asimetrik ve 5 katmandan oluşmaktadır. Şekil 4.14, katmanlar da denenen açıların yönünü göstermektedir.



Şekil 4.13. Algoritma ile değerlendirilmiş parça

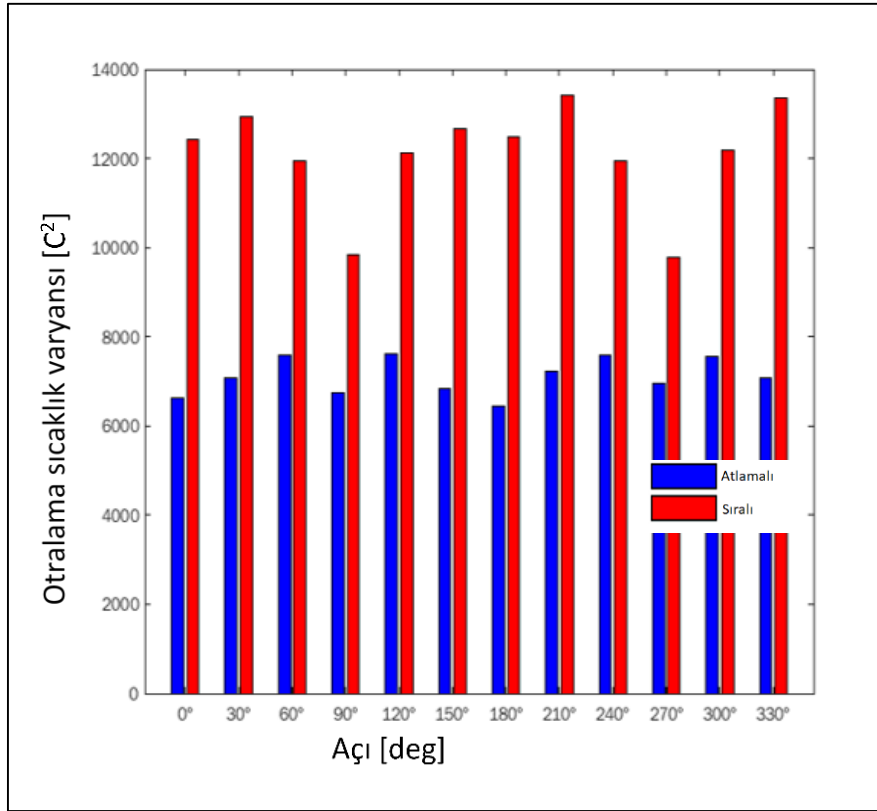
İlk katman yığıldığında, önceki katmanın (altlık) sıcaklığı hesaplanmıştır. Biri sıralı raster kullanan, diğeri atlamalı raster kullanan iki simülasyon yapılmıştır. Şekil 4.15, bu ortalamaların her açıdaki değerlerini göstermektedir. Şekil 4.15, sıralı raster ile atlamalı raster arasındaki ortalama sıcaklık varyansının her açıda karşılaştırmasını göstermektedir. Görüldüğü gibi atlamalı yığma, sıralı rasterden çok daha düşük sıcaklık varyansları vermiştir. Parçaya arkten gelen ve emilen ısı, çevreye radyasyon ve konveksiyon yoluyla dağıtılır. Ancak dağılan ısıнын hızı, parçaya arkten gelen ısıнын hızından çok daha yavaştır. Bu yüzden sıralı raster örüntüsü kullanılan parça yığma alanında diğerk örüntü alanlarına göre daha fazla ısı birikmesine yol açılır. Atlamalı rasterde ısı belirli bir alanda toplanmaz, parça

boyunca daha homojen dağılır. Sıralı rasterdeki maksimum varyans ile atlamalı rasterdeki minimum varyans arasındaki fark %51,9 olmuştur.

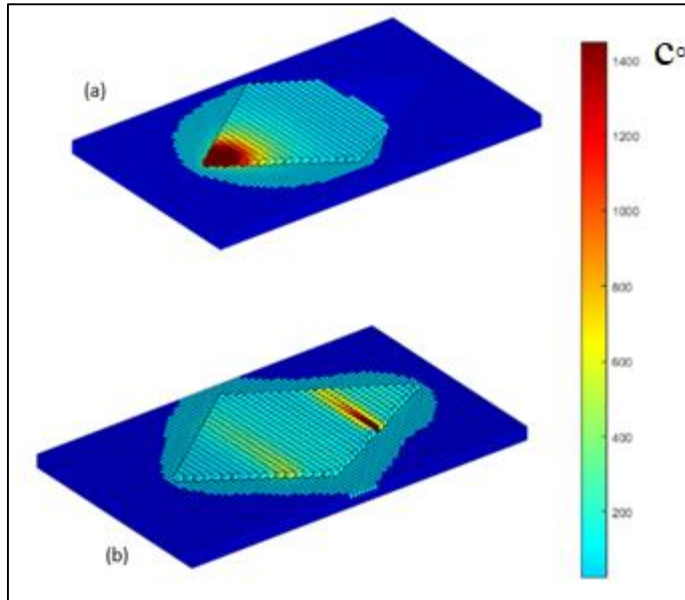


Şekil 4.14. Her katmanda denenen 12 yığma açısının yönü

Şekil 4.16, birinci katmanın yığılması bittikten sonra, sıralı raster ile atlamalı raster arasındaki ısı dağılımındaki farkı göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi AR'nin parçada daha homojen bir ısı dağılımına yol açtığı ve ısıнын neredeyse simetrik olarak dağıldığı görülmüştür. SR'de, art arda bitişik pasoların yığılması, parçanın bir yarısında ısı birikmesine neden olurken diğer yarısında sıcaklık daha düşük olmuştur.



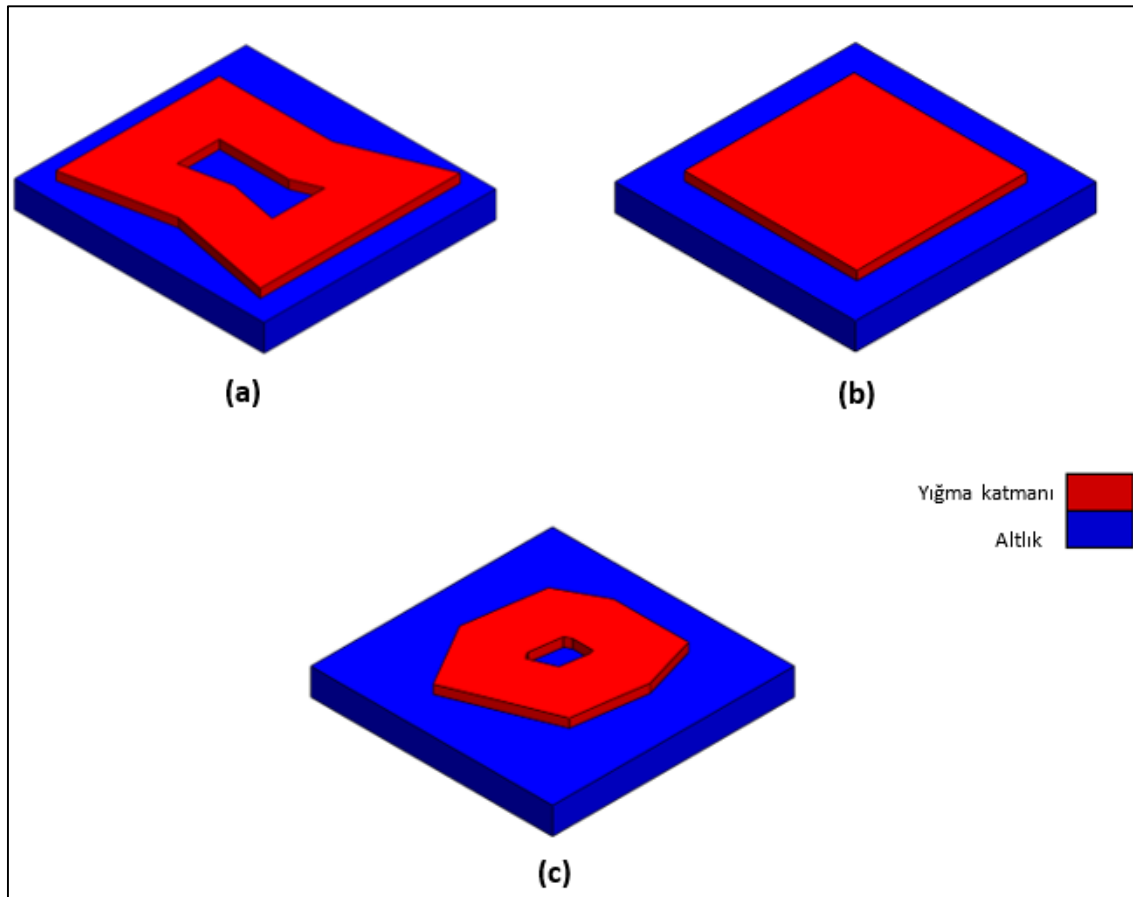
Şekil 4.15. Sıralı raster ve atlamalı raster uygulandığında ortalama sıcaklık varyansı arasındaki karşılaştırma



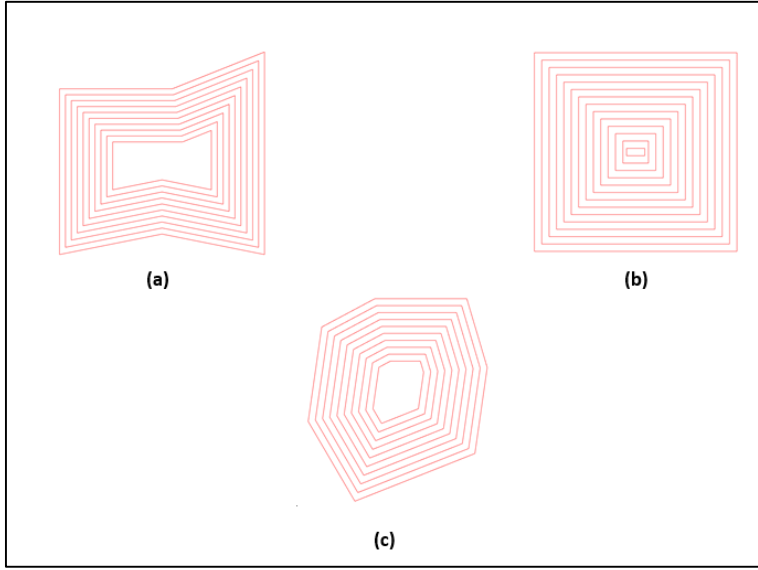
Şekil 4.16. Parçada ısı dağılımı, sıralı (a) veya atlamalı (b) raster

4.5. Raster ve kontur örüntüleri arasındaki karşılaştırma

Raster ve kontur yığma örüntüleri, her örüntünün sahip olduğu farklı şekil nedeniyle parçadaki ısı dağılımı üzerinde farklı etkilere sahiptir. Bu iki örüntüden hangisinin sıcaklık varyansı için en düşük değeri vereceğini belirlemek amacıyla, Şekil 4.17'de gösterilen parçalar için yığma simülasyonları gerçekleştirildi. Şekil 4.17'de gösterilen parçaların kesitleri sırasıyla içbükey çokgen 4.17 (a), dikdörtgen 4.17 (b) ve bir dışbükey çokgendir 4.17 (c). Şekil 4.18 her bir parçanın içindeki kontur örüntüsüne göre oluşturulan yığma yollarını göstermektedir. Atlamalı raster örüntüsüne göre oluşturulan yığma yolları ise Şekil 4.14'te oluşturulan yığma yollarına benzemektedir. Simülasyonlar tek katman için yapılmış olup yığma süresi boyunca önceki katmanın ortalama sıcaklık varyansı hesaplanmıştır.

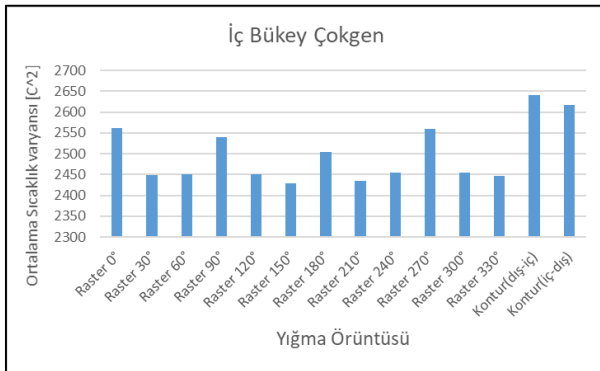


Şekil 4.17. Atlama raster ile atlamalı konturu karşılaştırmak için seçilen parçalar: (a) iç bükey, (b) dikdörtgen ve (c) dış bükey

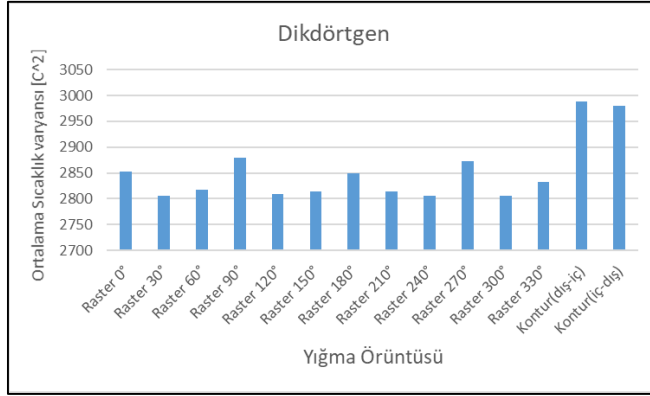


Şekil 4.18. (a) iç bükey, (b) dikdörtgen ve (c) dış bükey çokgenler içinde oluşturulan kontur yığıma yolları

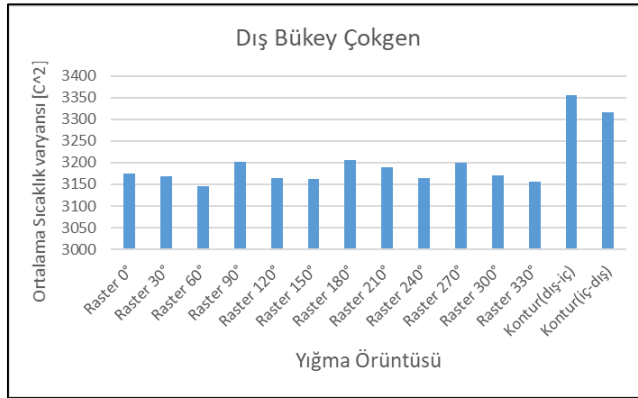
Şekil 4.19 ila 4.21, içeriden ve dışarıdan başlayan atlamalı kontur örüntüsü ve 12 açıyla atlamalı raster kullanıldığında üç parçadaki ortalama sıcaklık varyansını göstermektedir. Tüm şekillerde, tüm açılarda atlamalı raster örüntüsü, atlamalı kontura göre daha düşük sıcaklık varyansları vermiştir. Tüm parçalar için dışarıdan ve içeriden başlayan atlamalı konturda sıcaklık varyanslarının değerleri birbirine yakın gözükmemektedir. İki örüntüyü karşılaştırılırsa atlamalı konturdaki yığıma pasosunun daha uzun olduğu ve pasolar arasındaki mesafenin daha az olduğu fark edilebilir. Bu nedenle, paso aralarındaki alanlar daha fazla ısınmaya maruz kalmış ve dolayısıyla daha büyük bir sıcaklık varyansı oluşmuştur. Atlamalı rasterde ise yığıma pasolarının kısa olması ve aralarındaki mesafenin uzun olması, daha az ısınmaya neden olmuştur.



Şekil 4.19. İç bükey parça için önceki katmanın ortalama sıcaklık varyansı

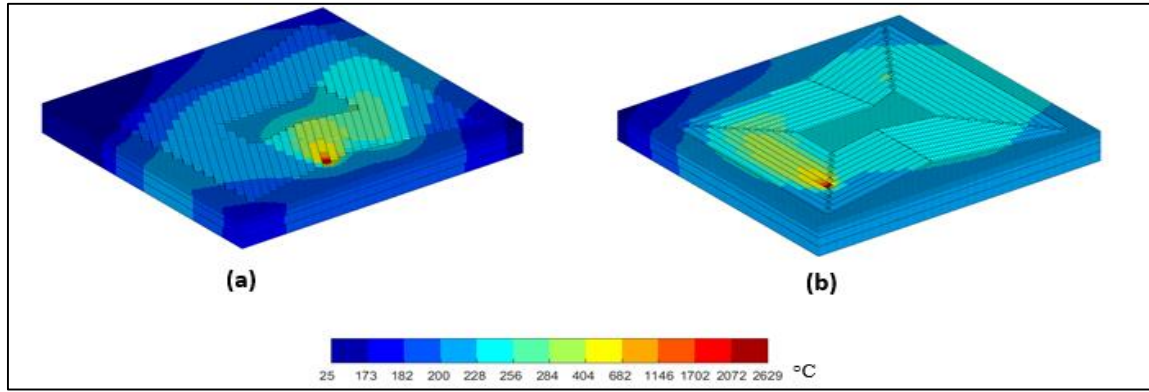


Şekil 4.20. Dikdörtgen parça için önceki katmanın ortalama sıcaklık varyansı

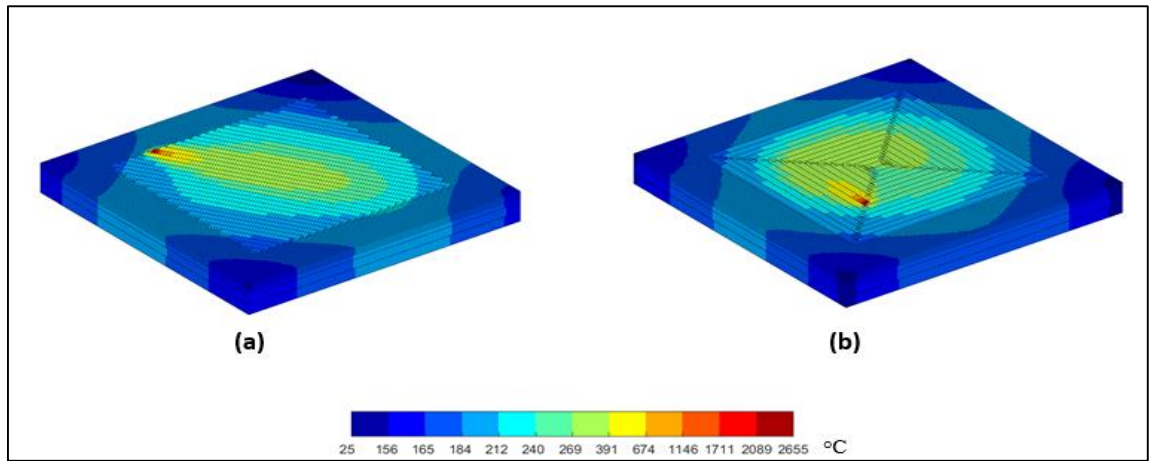


Şekil 4.21. Dış bükey parça için önceki katmanın ortalama sıcaklık varyansı

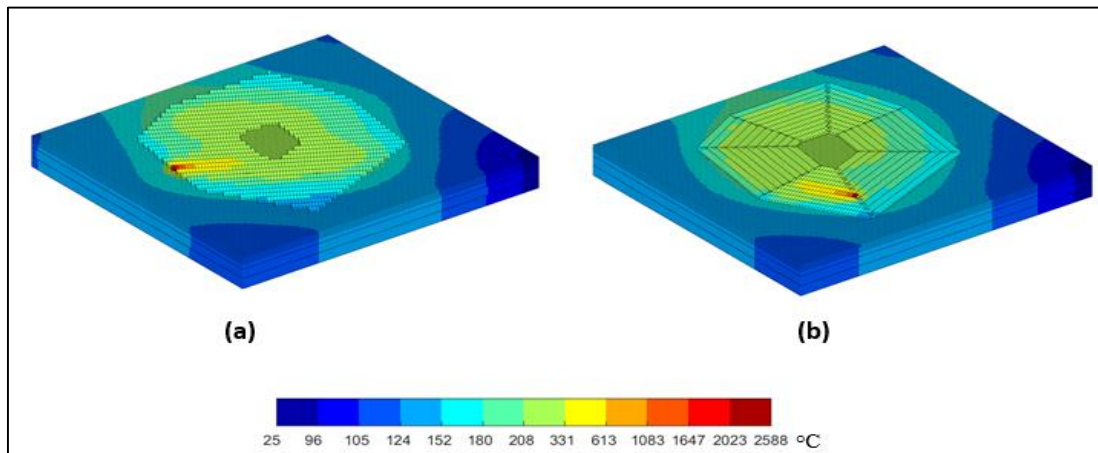
Atlamalı rasterde içbükey, dikdörtgen ve dışbükey parçalar için en düşük sıcaklık varyansını veren açılar sırasıyla 150°, 30° ve 60°'dir. Şekil 4.22 ila 4.24, bu açılarda atlamalı raster ve atlamalı kontur için yığılma sonunda oluşan ısı dağılımlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere, atlamalı raster kullanıldığında ısı parça içinde daha iyi dağılmıştır.



Şekil 4.22. İç bükey Parçadaki ısı dağılımı, (a) atlamalı raster, yığma açısı=150° (b) atlamalı kontur



Şekil 4.23. İç Dikdörtgen Parçadaki ısı dağılımı, (a) atlamalı raster, yığma açısı=30° (b) atlamalı kontur



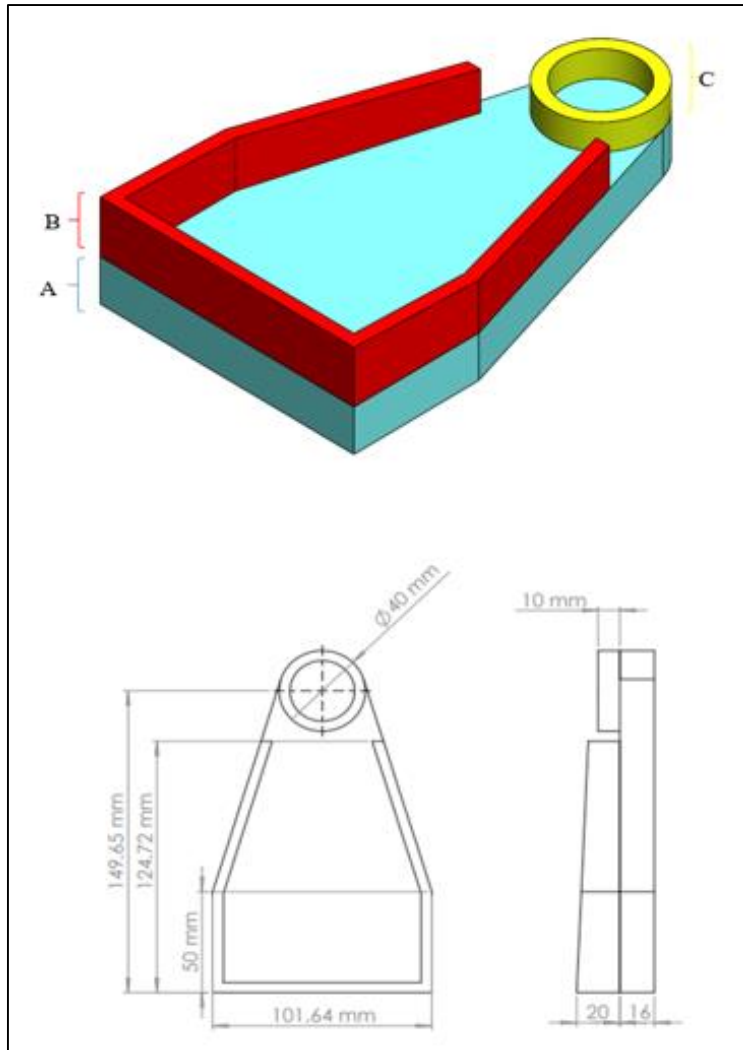
Şekil 4.24. Dış bükey Parçadaki ısı dağılımı, (a) atlamalı raster, yığma açısı=60° (b) atlamalı kontur

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde önerilen algoritmanın değerlendirmesi yapılmıştır. Algoritmayı değerlendirmek için aynı parça bir kez önerilen algoritmayı kullanarak ve bir kez de geleneksel bir yığma yöntemi kullanarak iki kez üretilmiştir

5.1. Deneysel Çalışmada Seçilen Parça Ve Deney Düzeneği

Önerilen algoritma, Şekil 5.1'de gösterilen parça deneysel çalışma parçası olarak alınmıştır. Bu parça uçaklarda bir bağlantı parçası olarak kullanılmaktadır. Parça büyük taban (A kısmı), ince cidarlı U (B kısmı) ve ince cidarlı bir halka (C kısmı) olan üç kısımdan oluşmaktadır.

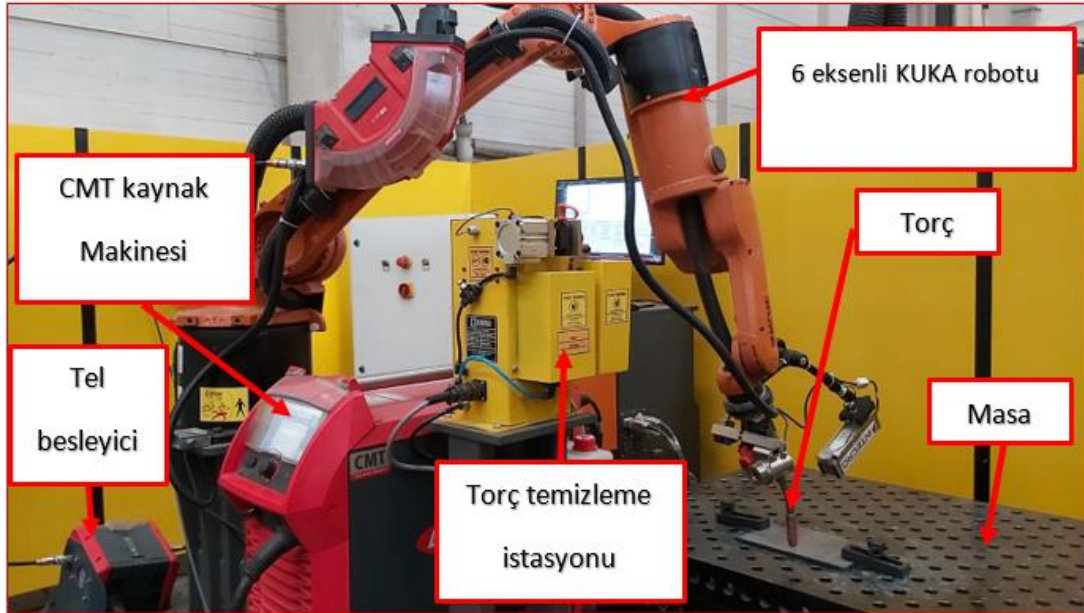


Şekil 5.1. Deneysel çalışma için seçilen parça ve ebatları

Resim 5.1, deneyde kullanılan WAAM sisteminin kurulumunu göstermektedir. Çizelge 5.1'de deneysel veriler görülmektedir.

Çizelge 5.1. Proses verileri

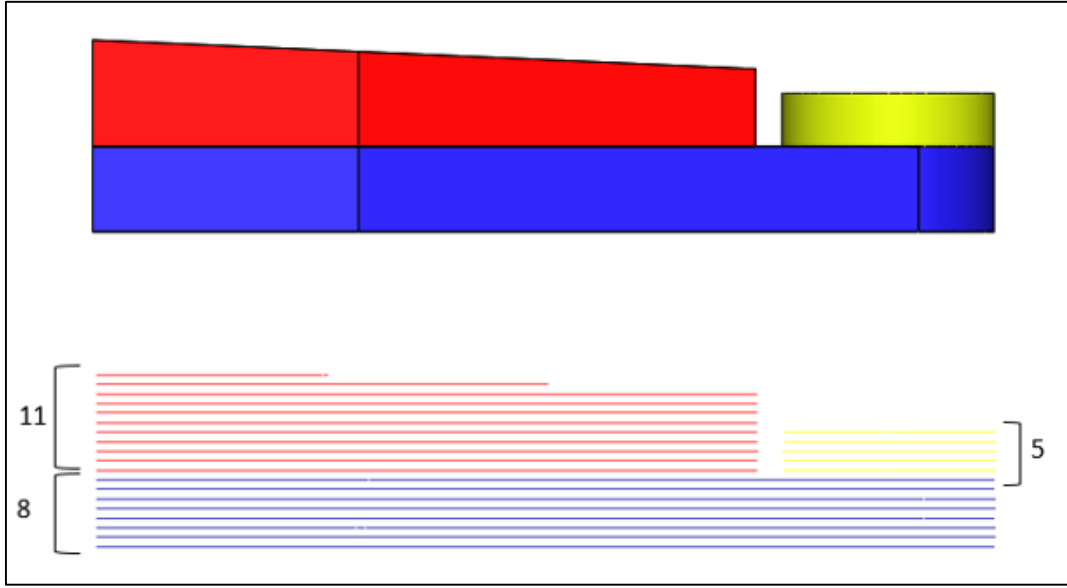
Kaynak Teknolojisi	Soğuk Metal Transferi (CMT)
Güç Kaynağı	Fronius TPS400i
Robot	6 eksenli KR6_R1820_HW robot kolu
Kullanılan Gaz	Karbondioksit ve Argon karışımı
Gaz Kompozisyonu	CO ₂ %15 ve Ar %85
Gaz Akış Hızı	18 l/dk.



Resim 5.1. Deneyde kullanılan CMT makinesi ve robot

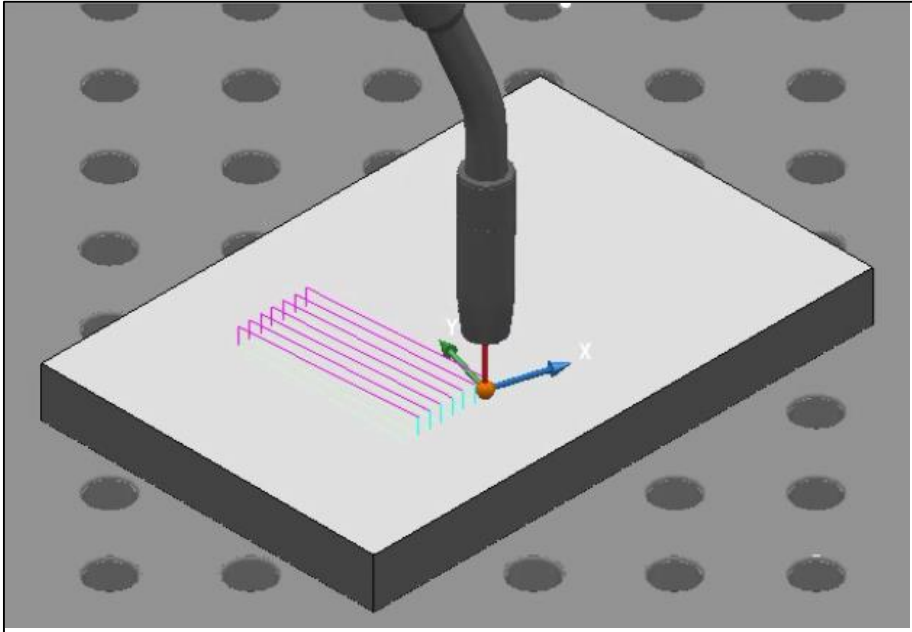
5.2. Parçanın Yığılmasında Kullanılan Stratejiler

Önerilen algoritmayı değerlendirmek için aynı parça iki farklı strateji kullanılarak üretilmiştir. İlk strateji, A kısmının tüm katmanları, geleneksel sıralı rastere (SR) ile aynı açıda ve aynı sırayla üretilmiştir. İkinci strateji ise atlamalı rasterdir (AR). Atlama sadece A kısmında uygulanmıştır. B ve C kısımlarının yığılması her iki parçada aynıdır. A, B ve C kısımları, sırasıyla 8 katman, 11 ve 5 katmandan oluşmaktadır. Katmanların sayısı Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

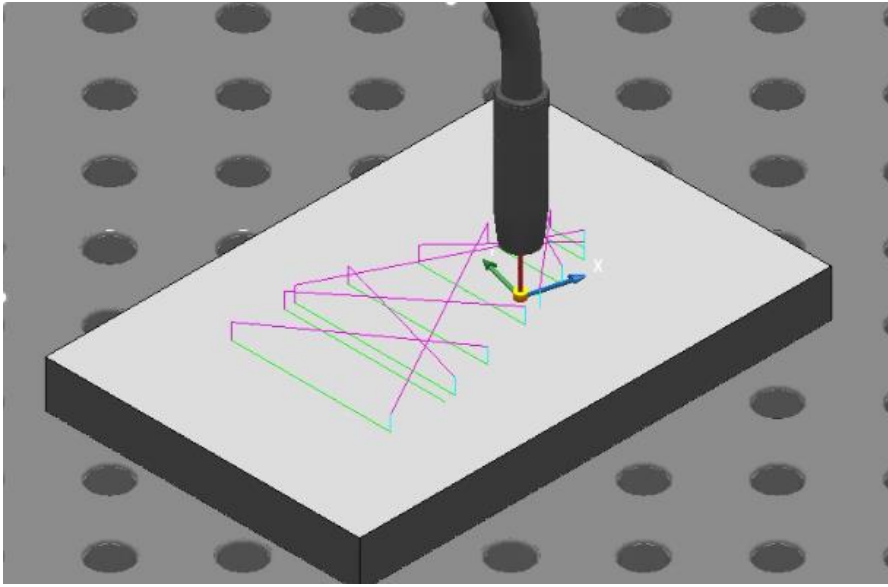


Şekil 5.2. Üç kısmın katman sayıları

Atlama stratejisiyle üretilen A kısmı, katmanlar arasında herhangi bir bekleme süresi verilmeden yığılmıştır. A kısmının yığma süresi SR’de 51.13 ve AR’de 52.93 dakikaydı. İki strateji arasındaki zaman farkının nedeni, AR’de robot pasolar arasında atlama yaparken daha fazla mesafe kat etmesidir. Şekil 5.3 (b) AR’de, yeşil renkle belirtilen pasolar arasındaki pembe renkli çizgiler fazla mesafeyi göstermektedir. Bu mesafe, SR’de daha az olur çünkü geçişler komşu pasolar arasında gerçekleşmektedir. Karşılaştırmanın adil olması için SR’de katmanlar arası 15,5 saniyelik bir soğutma süresi eklenmiştir. İnce cidarlı olan B ve C kısımları, bir dikişten oluşur ve yan taraflarında onlardan ısı emmeye yardımcı olan bitişik dikişler yoktur. Bu nedenle ısı birikimi A kısmına göre daha fazladır. Yığmanın her iki kısmında çökmemesi için katmanlar arasında 60 saniye bekleme süresi verilmiştir. Şekil 5.4, her iki stratejide de üç kısımdaki bekleme süresini göstermektedir.

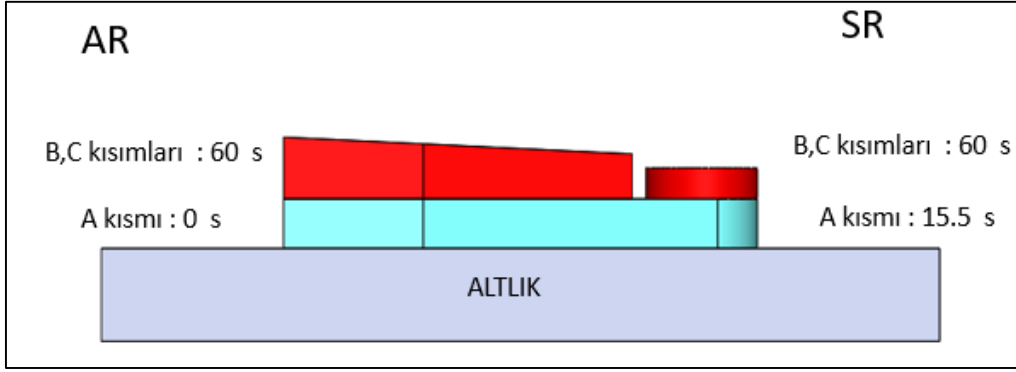


(a)



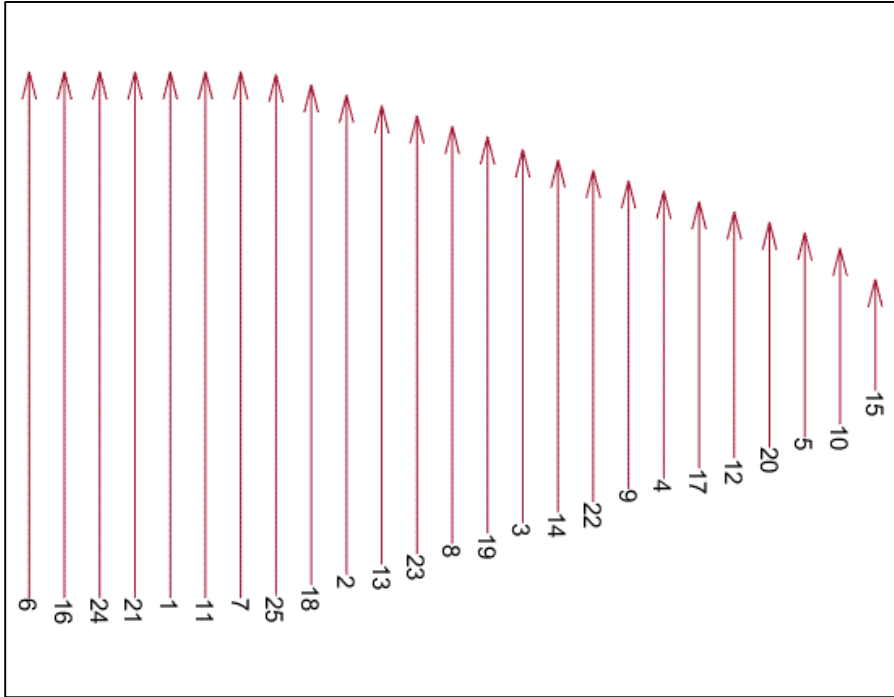
(b)

Şekil 5.3. Pasolar arasında geçiş yapılırken kat edilen mesafe SR'de (a), AR'de (b)

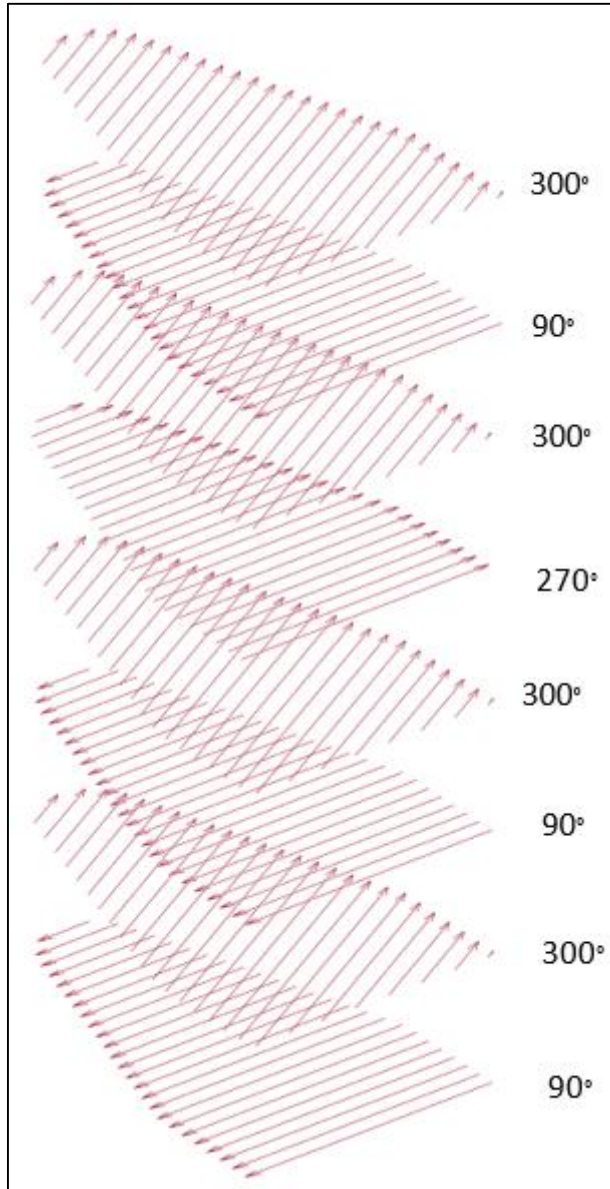


Şekil 5.4. Katmanlar arası bekleme zamanı

AR’de her katmanda yığma yönü ve atlama sırası, önceki bölümde açıklanan atlama stratejisi uygulanarak bulunmuştur. Şekil 5.6, sekiz katmanda ortaya çıkan yığma açılarını göstermektedir. Şekil 5.5 de birinci katmandaki pasoların sırası bir örnek olarak göstermektedir. SR’deki yığma yönü ise tüm katmanlar için 90° ’dir.



Şekil 5.5. Birinci katmanın paso sırası



Şekil 5.6. AR'de A kısmının katmanlar yönleri

Çizelge 5.2, deneyde kullanılan işlem parametrelerini göstermektedir. Bu deneyde kullanılan malzeme ER70S-6 kaynak telidir. Altlığın boyutları 300*200*30 mm ve malzemesi çelik AISI 1070'dir.

Çizelge 5.2. Proses parametreleri

Yığma hızı	Tel besleme hızı	Tel çapı	Akım	Voltaj	η	η_d
(m/ dk)	(m/ dk)	(mm)	(A)	(v)	-	-
0.44	4.8	1.2	155	15	0.9	0.5

CMT'nin ark verimliliği $\eta = 0.9$ olarak alınmıştır [85]. Bu değer deneysel olarak hesaplanan $\eta = 0,88$ verimlilik değerine çok yakındır [86].

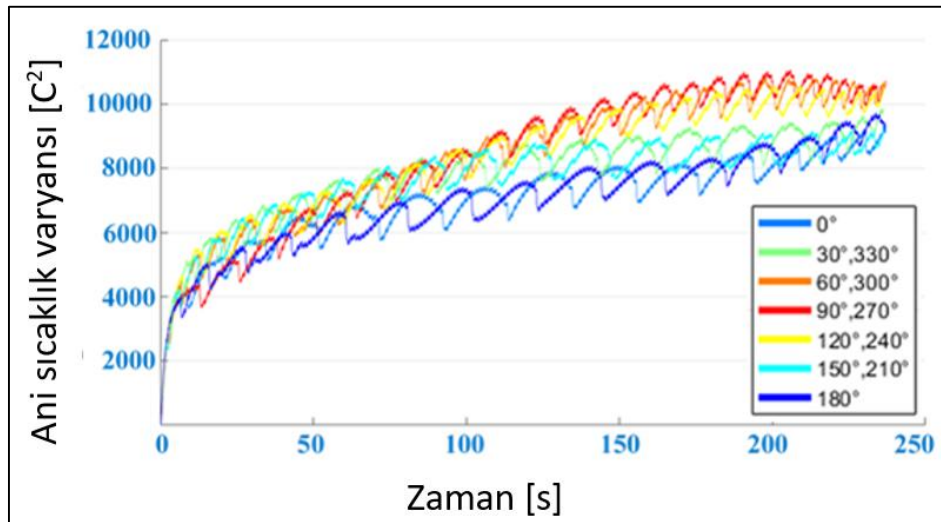
Çizelge 5.3, simülasyonda kullanılan ER70S-6 malzemesinin ısı özelliklerini [51] göstermektedir. Altlığın ısı özellikleri, ısı iletkenliği katsayısı dışında tel ile aynıdır. Altlığın ısı iletkenliği katsayısı değeri $k=51.9$ W/m.K [87].

Çizelge 5.3. ER70S-6 ısı özellikleri

Isı iletkenliği	Özgül ısı kapasitesi	Yoğunluk	Taşınım ısı aktarım katsayısı
W/m.K	J/Kg.K	Kg/m ³	W/(m ² K)
40	450	7800	20

5.3.Yığma Stratejisinin Sıcaklık Varyansı Üzerindeki Etkisi

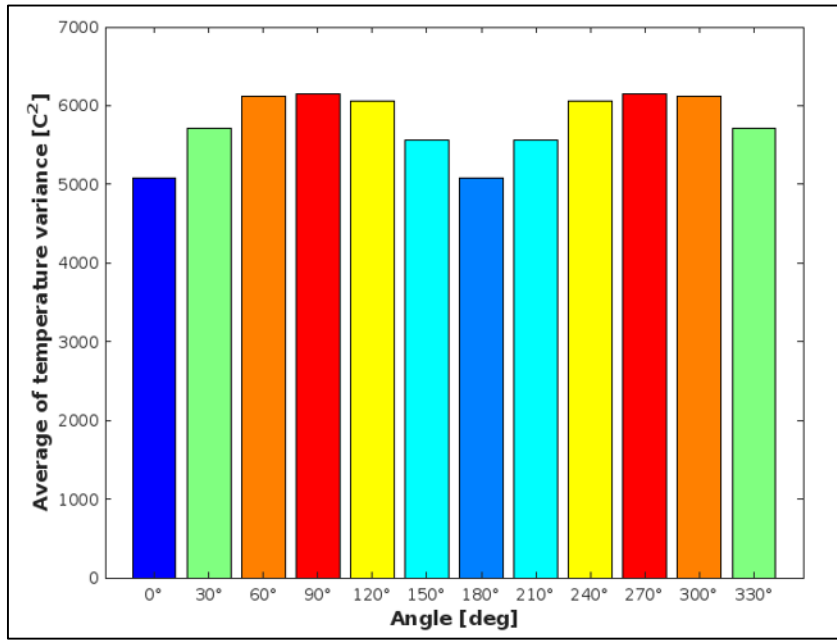
Yığma stratejisinin sıcaklık varyansı üzerindeki etkisini göstermek için A kısmının ilk katmanı yığıldığında sıcaklık varyansı incelenmiştir. Şekil 5.7, birinci katman yığıldığında önceki katmandaki ani sıcaklık varyansını ve Şekil 5.8 ise ortalama sıcaklık varyansını göstermektedir.



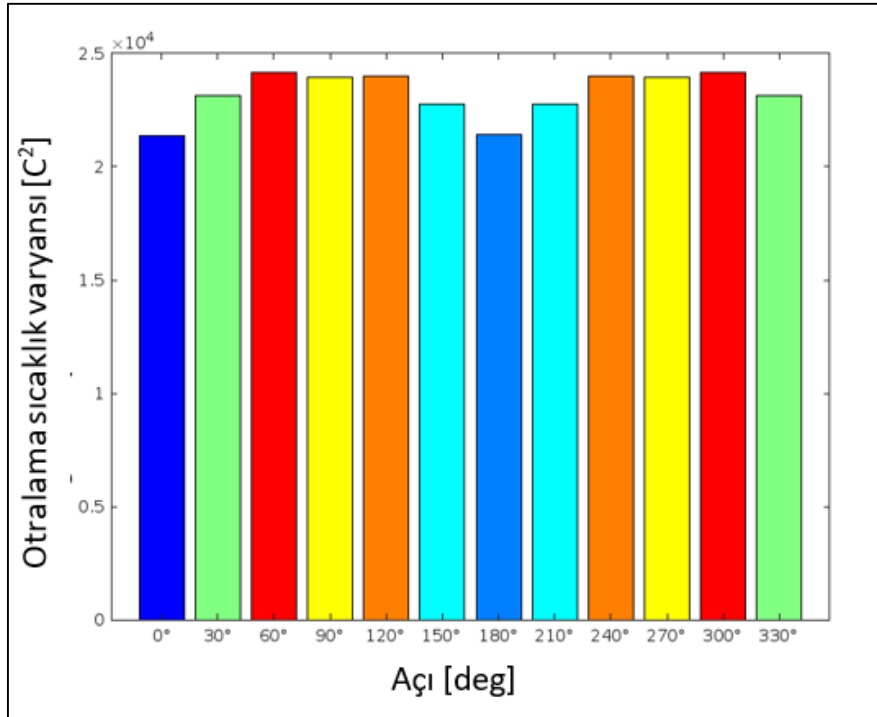
Şekil 5.7. Mevcut katmanın önceki katmanındaki ani sıcaklık varyansı

Görüldüğü gibi, sıcaklık varyansı, atlama olmamasına rağmen, yığma açısının değişmesiyle önemli ölçüde değişebilir. Birinci katman için yığma açısı olarak 0° açısının ideal olduğu

rahatlıkla gözlemlenebilir. Mevcut yığılmış katmandaki ortalama sıcaklık varyansına bakıldığında, 0° açısının da en az ortalama varyansı verdiği görülmektedir. Bu, sadece yığma yönünü atlamaksızın değiştirerek, en az sıcaklık varyansını verebilen yönün elde edildiği anlamına gelir. Bu yöndeki ısı, parça boyunca mümkün olan en eşit şekilde dağılacaktır. Sadece yığma açısı değiştirilerek maksimum ve minimum varyans arasındaki farkın yaklaşık %16'ya ulaşabildiği görülmektedir. Yığılan katmandaki ortalama sıcaklık varyanslarının değerleri Şekil 5.9'da gösterilmektedir.

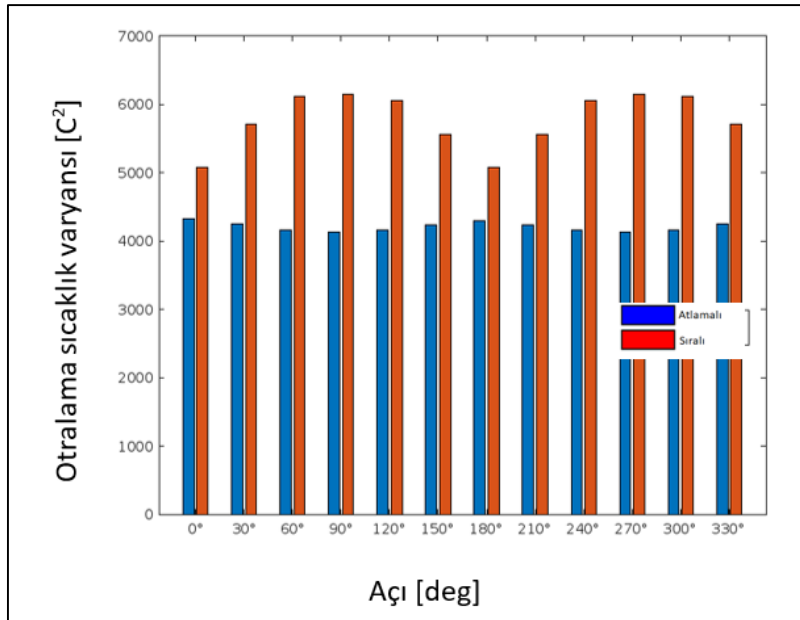


Şekil 5.8. Mevcut katmanın önceki katmanındaki ortalama sıcaklık varyansı



Şekil 5.9. Yığılmış katmanın ortalama sıcaklık varyansı

İlk katmandaki ortalama sıcaklık varyansı da AR kullanılırken hesaplanmıştır. Bu sonuçlar SR'deki aynı açılar ile karşılaştırılıp Şekil 5.10 gösterilmiştir.

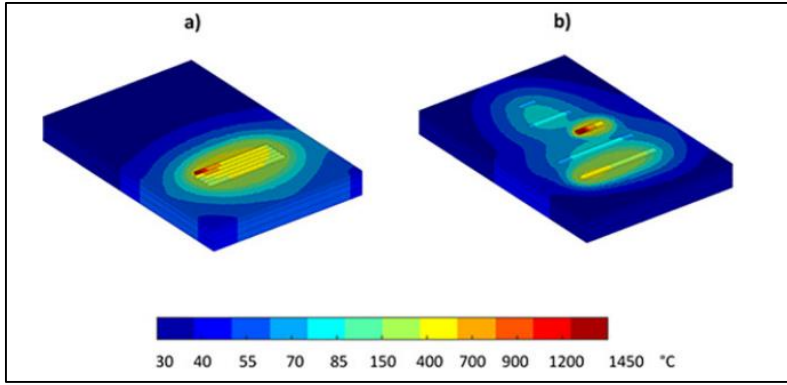


Şekil 5.10. İlk katmanın yığılması sırasında SR ve AR kullanıldığında altlığın ortalama sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması

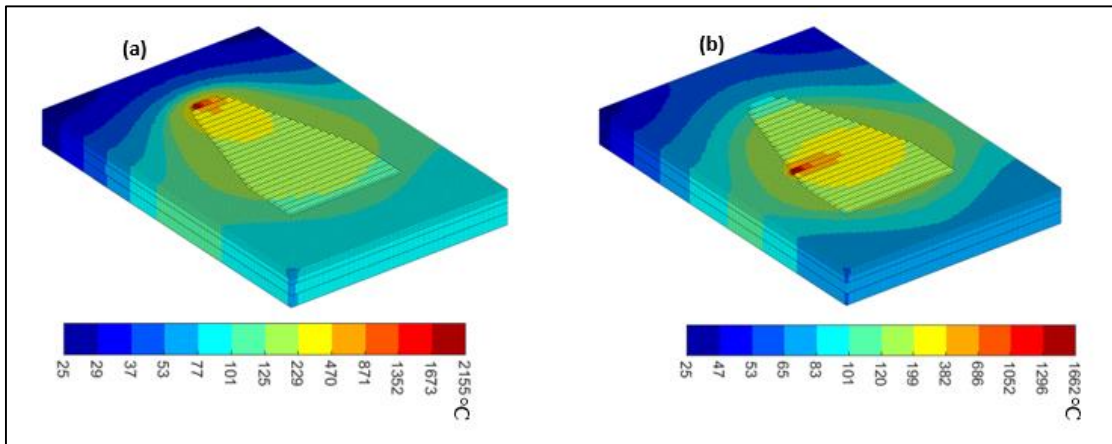
Şekilden de anlaşılacağı gibi, atlama her açıda sıcaklık varyansı değerlerinde bir azalmaya

yol açmıştır. Yığma açısı 90° olduğunda en düşük sıcaklık varyansı elde edilir. Dolayısıyla birinci katmanın yığma açısı 90° olarak belirlenmiştir.

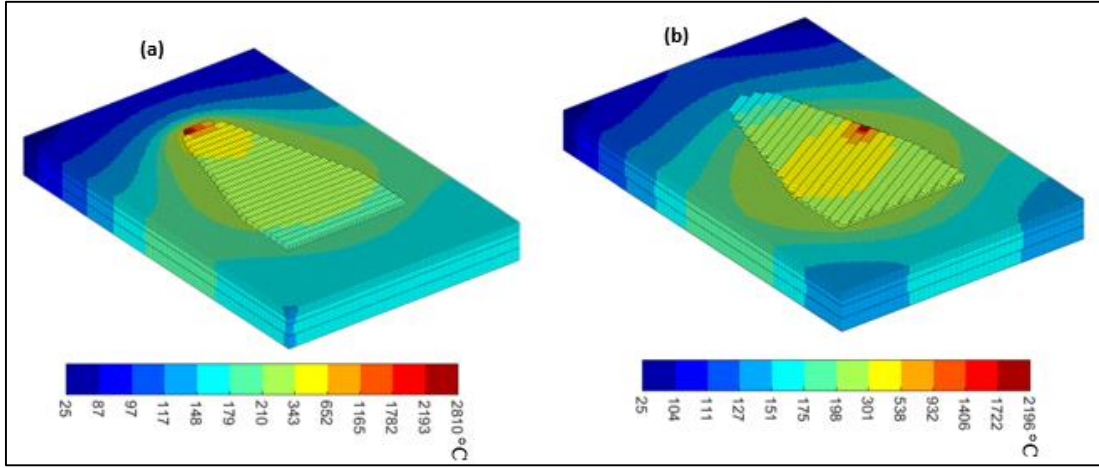
Şekil 5.11(a) SR kullanıldığında ve Şekil 5.11(b) AR kullanıldığında sırasıyla ilk 5 paso yığıldığında parçadaki ısı dağılımını göstermektedir. A bölümünün her bir katmanının yığılması tamamlandıktan sonra parçadaki ısı dağılımını Şekil 5.12'den 5.19'a, görülmektedir. Şekil 5.20 her katman yığıldıktan sonra, bir önceki katmandaki ortalama sıcaklık varyansını göstermektedir. Şekil 5.21, atlama stratejisinin kullanılması sayesinde varyanstaki yüzde azalmayı göstermektedir.



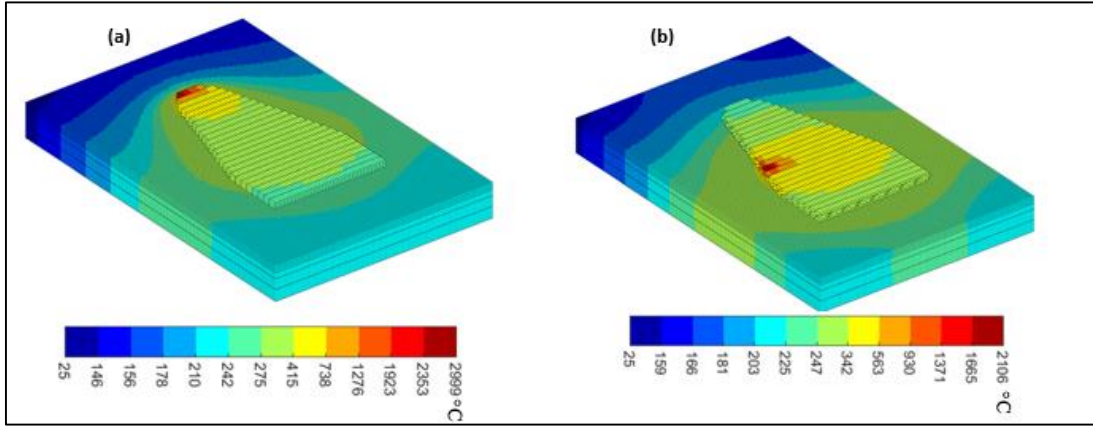
Şekil 5.11. Isı dağılımı ilk 5 paso yığıldıktan sonra a) SR b) AR



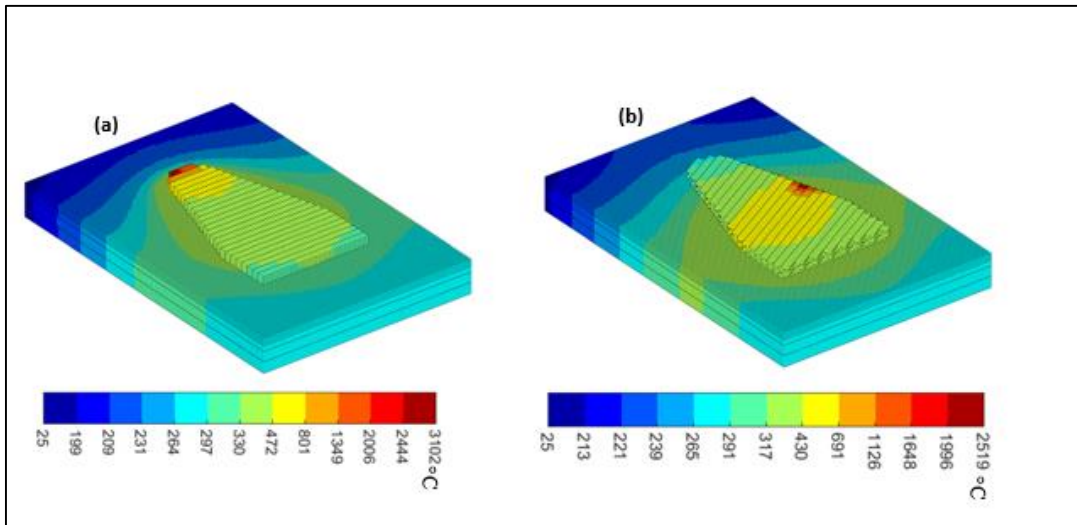
Şekil 5.12. Birinci katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR



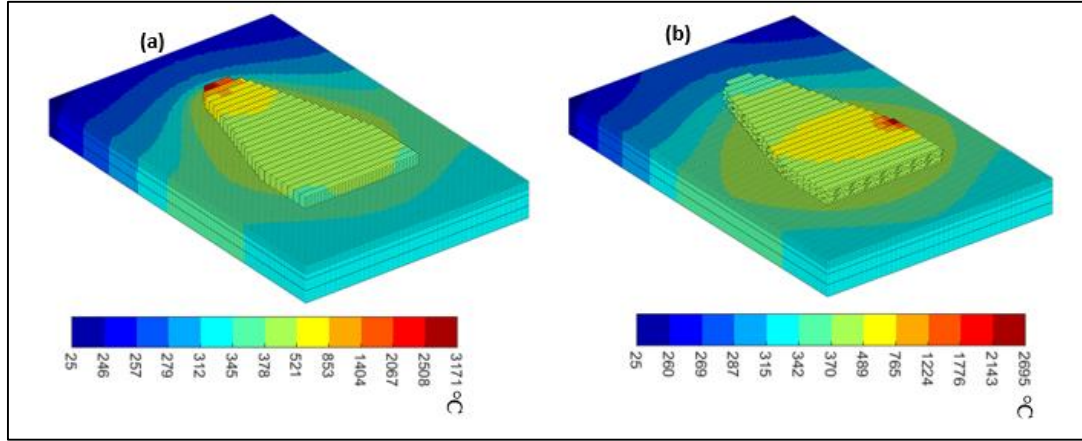
Şekil 5.13. İkinci katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR



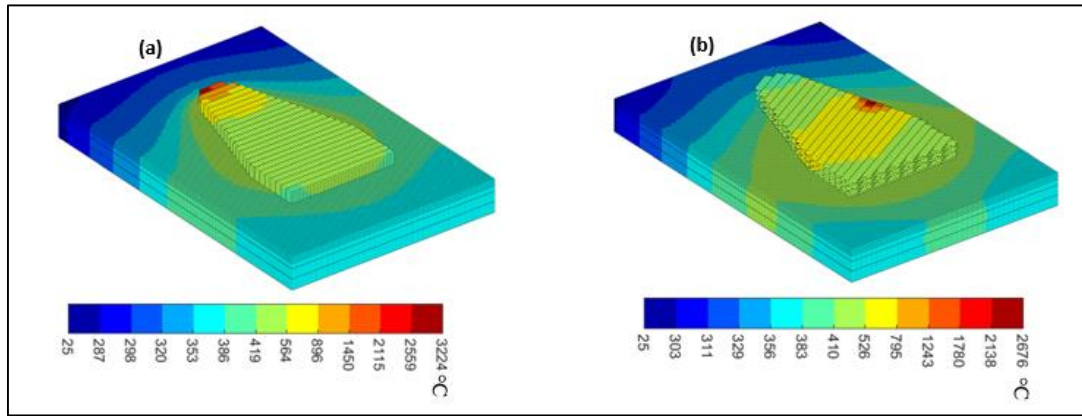
Şekil 5.14. Üçüncü katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR



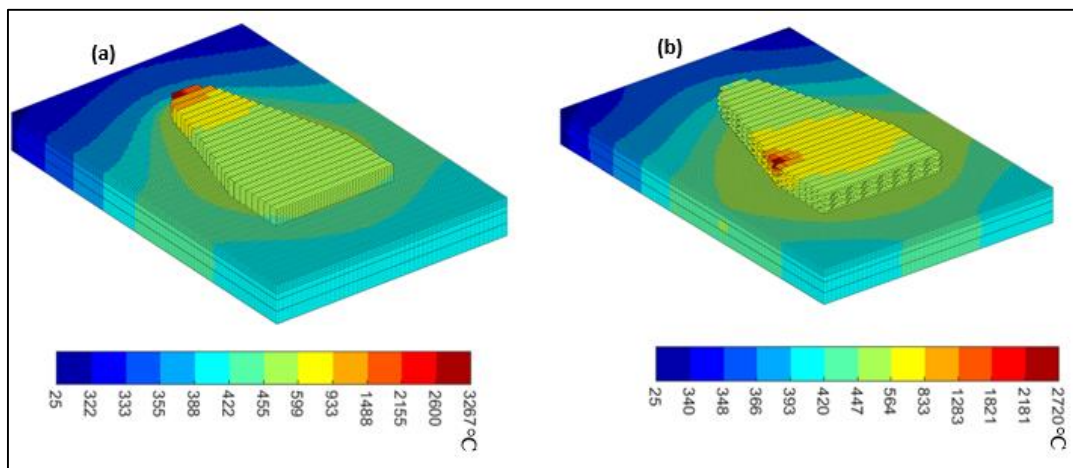
Şekil 5.15. Dördüncü katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR



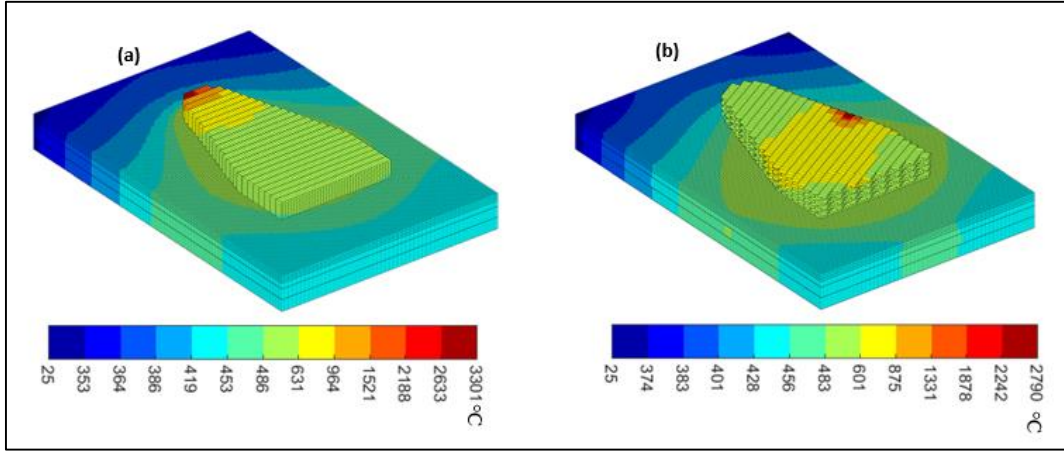
Şekil 5.16. Beşinci katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR



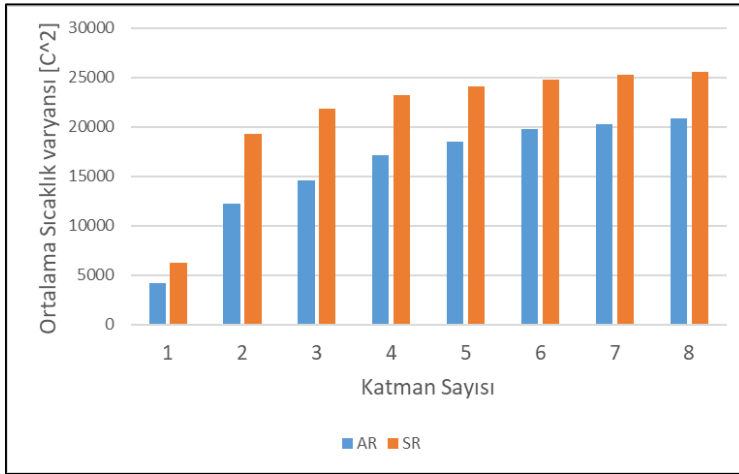
Şekil 5.17. Altıncı katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR



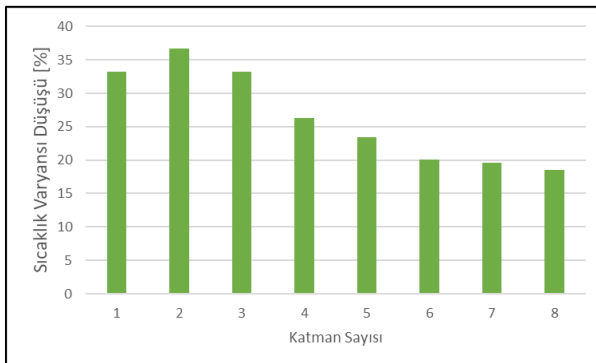
Şekil 5.18. Yedinci katman yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR



Şekil 5.19. A kısmı yığıldıktan sonra ısı dağılımı a) SR b) AR



Şekil 5.20. Her bir katmanın yığılmasından sonra bir önceki katmanın ortalama sıcaklık varyansı

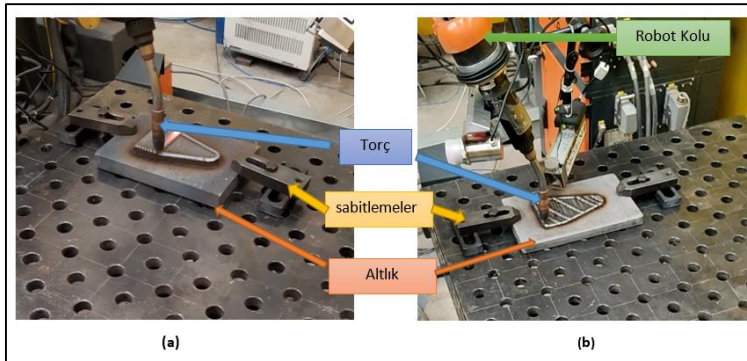


Şekil 5.21. SR ile karşılaştırıldığında AR kullanılarak yığma sırasında sıcaklık varyansındaki azalma yüzdesi

Önceki şekillerden anlaşılacağı gibi SR’de her katmanın yığılma sonundaki maksimum

sıcaklığı, AR'deki maksimum sıcaklıktan her zaman daha yüksektir. SR kullanıldığında sekiz katmanda ısı dağılım profilinin şekli aynıdır, yalnızca her sonraki katmanda sıcaklığın daha yüksek olduğu görülmüştür. AR'de ısı dağılım profili her katmanda farklılık gösterir. Her iki stratejideki ortalama sıcaklık varyansının değeri, beşinci katmana kadar artar. Beşinci katmandan sonra değerler neredeyse sabit hale gelir. Bunun nedeni parçada termal dengenin oluşmasıdır, zira yığılan parçanın alanının artmasıyla çevreye dağılan ısı miktarı artar ve arkten gelen ısı ile dengelenir. Varyansta en büyük düşüş değeri, atlama nedeniyle ilk üç katmanda en büyük elde edildi (yaklaşık %33). Bu değer, katman sayısının artmasıyla azaldı ve son üç tabakada neredeyse sabit kaldı (%20), bu durumun oluşması termal denge ile açıklanabilir.

Atlama etkisi iki parçanın yığılması sırasında da gözlenmiştir. Bu etki Resim 5.2'de gösterilmektedir. Isı birikiminin etkisi, SR'de yığma dikişleri kızarıp ışık vermişti (Resim 5.2 (a)). Bu kızarma AR dikişlerinde görülmemiştir (Şek. 5.2(b)).



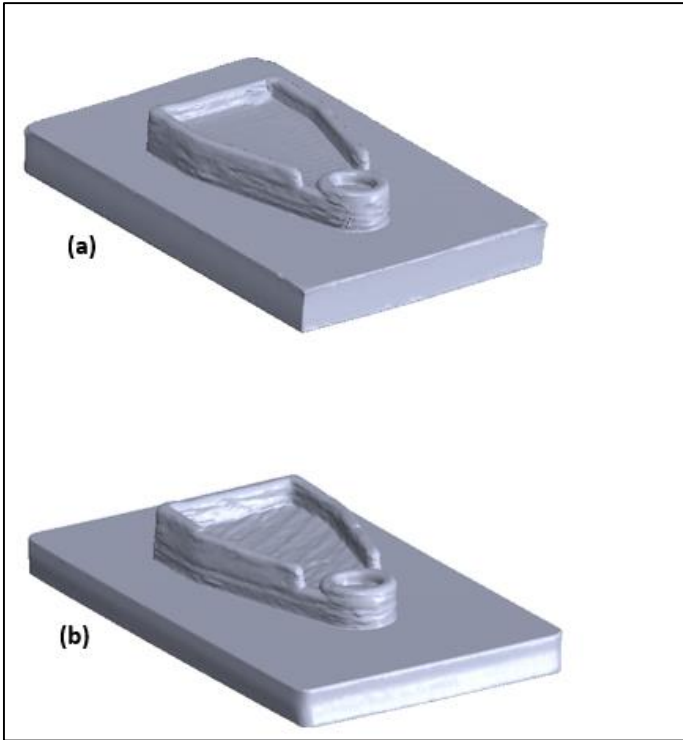
Resim 5.2. (a) SR'de, metalin aşırı ısıtılması sonucunda ışımaya meydana gelirken, (b) AR'de metal ışımaya yapmamaktadır

5.4. Kullanılan Yığma Stratejisinin Üretilen Parçadaki Deformasyonlara Etkisi

İki stratejiyi değerlendirmek için iki parça temassız test yöntemi olan bir 3D lazer tarayıcı ile taranmıştır. Taramada kullanılan lazer tarayıcı Resim 5.3'te gösterilmiştir. Bu tarayıcı çift lazer ışığı kullanıp 10µm çözünürlüğe sahiptir[88]. Tarama yoluyla, iki parça için iki STL dosyası oluşturulmuştur. Bundan sonra, SOLİDWORKS® yazılımı kullanılarak STL dosyalarından CAD dosyaları oluşturulmuştur. Şekil 5.22, nokta bulutlarından oluşturulan CAD dosyalarını göstermektedir.



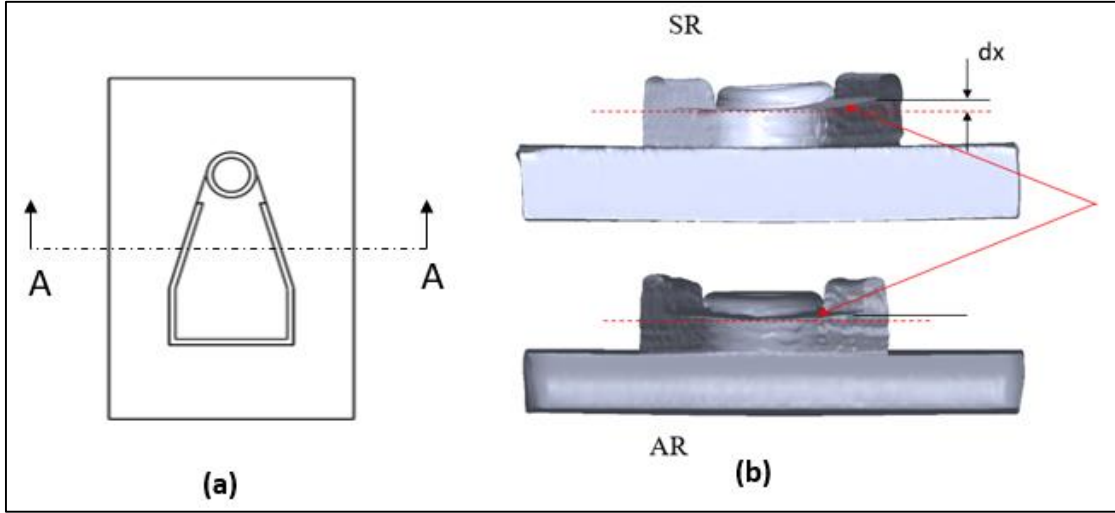
Resim 5.3. KSCAN20 3B lazer tarayıcı



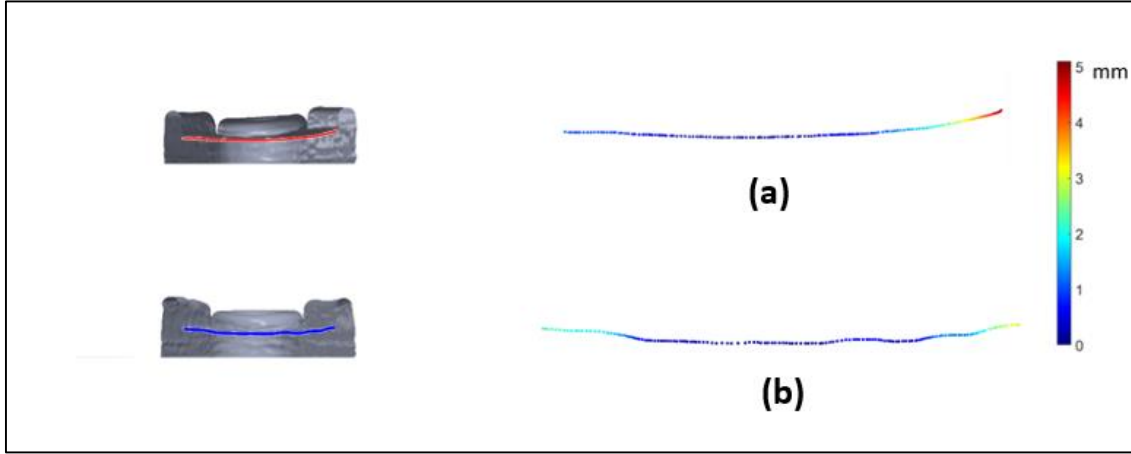
Şekil 5.22. SR (a) ve AR (b) ile üretilen parçalar için 3d tarama ile oluşturulan CAD dosyaları

5.4.1. A kısmının değerlendirilmesi

Her iki parçanın deformasyonunu değerlendirmek için A kısmının enine (Şekil 5.23 (a)) kesiti karşılaştırıldı. Şekil 5.23 (b), SR'deki deformasyon miktarının, AR'deki deformasyondan önemli ölçüde daha fazla olduğunu göstermektedir. Her iki kesitteki en yüksek ve en alçak nokta arasındaki fark, Şekil 5.24'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır. SR'de en yüksek noktası ile en alçak noktası arasındaki fark 4,58 mm iken AR'de bu fark 2,87 mm'dir. AR, yükseklik farkını %37 oranında azaltmıştır. Bu karşılaştırma, sıcaklık varyansını azaltmanın deformasyonları azaltmadaki rolünü göstermektedir.



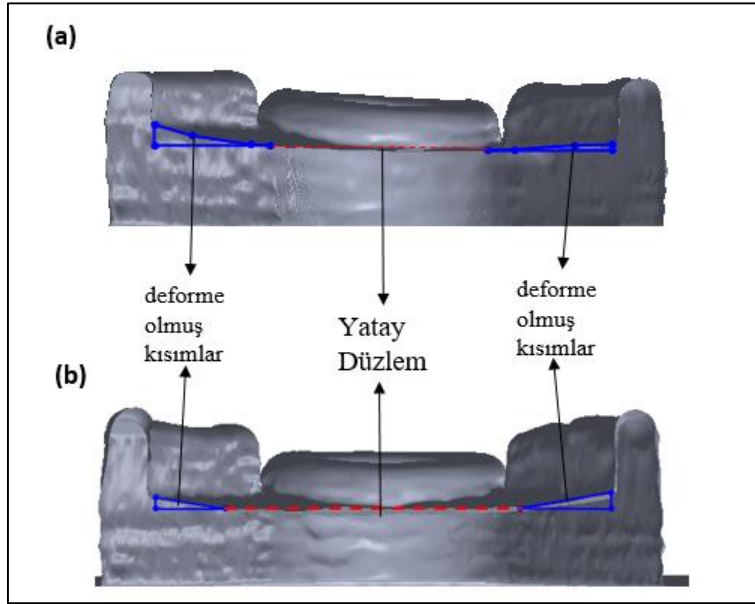
Şekil 5.23. Kesit konumu (a) ve iki parçada yüzeyin deformasyonu (b)



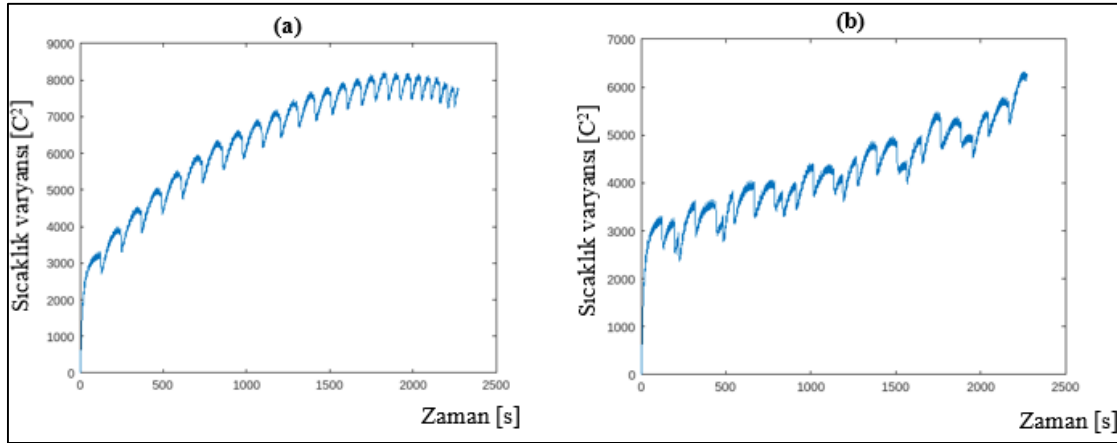
Şekil 5.24. (a) SR’de ve (b) AR’de yüzeyin yükseklik farkı

A kısmının üst yüzeyi, yığma bittikten hemen sonra düzdü. Deformasyon, parça yeterince soğuyana kadar ortaya çıkmadı (deformasyonların %60’ı soğutma aşamasında ortaya çıkıyor [89]). Deforme olmuş yüzeyin en yüksek ve en alçak noktaları arasındaki farkın değerlendirilmesi, yüzey boyunca oluşan deformasyon hakkında yeterince fikir vermeyebilir, bu nedenle her iki parçada da deforme olmuş kısımların uzunlukları ölçülmüştür. Uzunluk ne kadar büyükse deformasyon o kadar büyüktür. Şekil 25, iki parça için de yüzeyin deforme olan kısımlarını göstermektedir. Yüzeyin yatay çizgisi üzerinde deforme olan bölümler belirlenerek ölçüldü. SR’de deforme olmuş iki bölümün uzunluklarının toplamı 47.88 mm iken AR’de toplamı 32.23 mm olmuştur. Atlama stratejisinin deforme olmuş bölümün uzunluğunu %33 oranında azalttığı sonucuna varılabilir. Her iki parçada da yüzey deformasyonunun yüzeyin her iki uç tarafında meydana

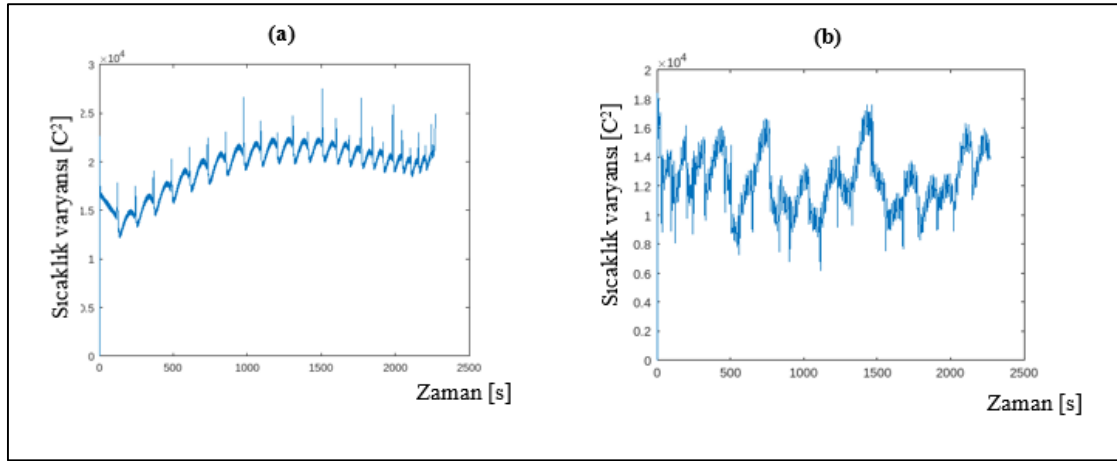
geldiği görülmektedir. Bu, ÇKÇD yığılmasında görülebilir[90][91]. Bunun sebebi, uç tarafların parça merkezinden uzaklığı ve altlık kenarlarına yakınlığıdır. Bu da bu kısımlarda ısı birikmesine yol açar. Ayrıca robot kolunun her yığmanın başında ve sonunda hızlanması ve yavaşlaması da ısı birikimine katkıda bulunur. Sekiz katmanın yığılması sırasında anlık sıcaklık varyansı değerlerini temsil eden Şekil 5.26 ile 5.33'e bakılırsa, AR yığma stratejisinde sıcaklık varyansı değerlerinin, SR yığma stratejisi değerlerinden her zaman önemli ölçüde düşük olduğunu görülmüştür. Örneğin, AR kullanılarak ilk katmanın yığılması sırasında sıcaklık varyansı $6000\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ 'ye ancak yığma tamamlandıktan sonra ulaşılırken, SR'de yedinci pasodan sonra $6000\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ 'ye ulaşılır (yığma süresinin dörtte birinden sonra). Bu nedenle, AR yığma stratejisinde oluşan deformasyon; düşük varyansa bağlı uçlarda biriken az ısı ile azalır.



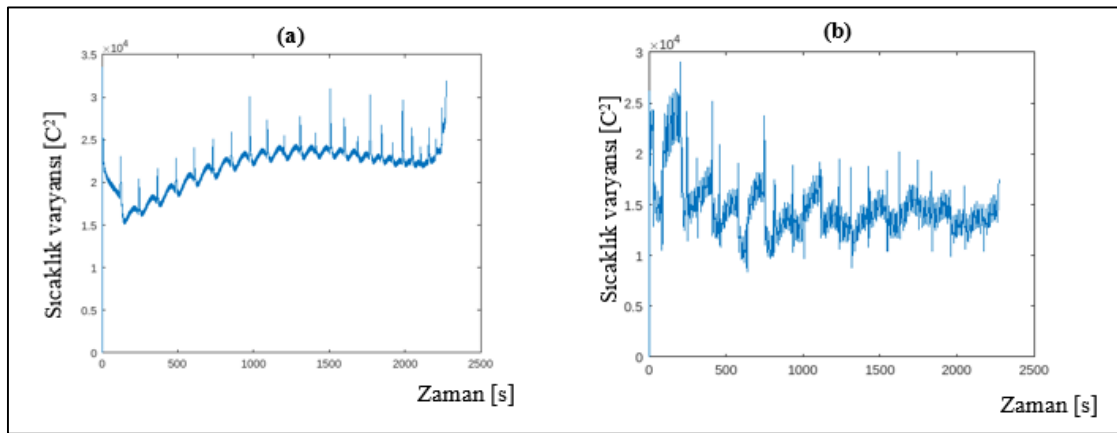
Şekil 5.25. SR (a) ve AR (b) ile yığma yapıldığında deforme olmuş bölümlerin uzunluğu arasındaki fark



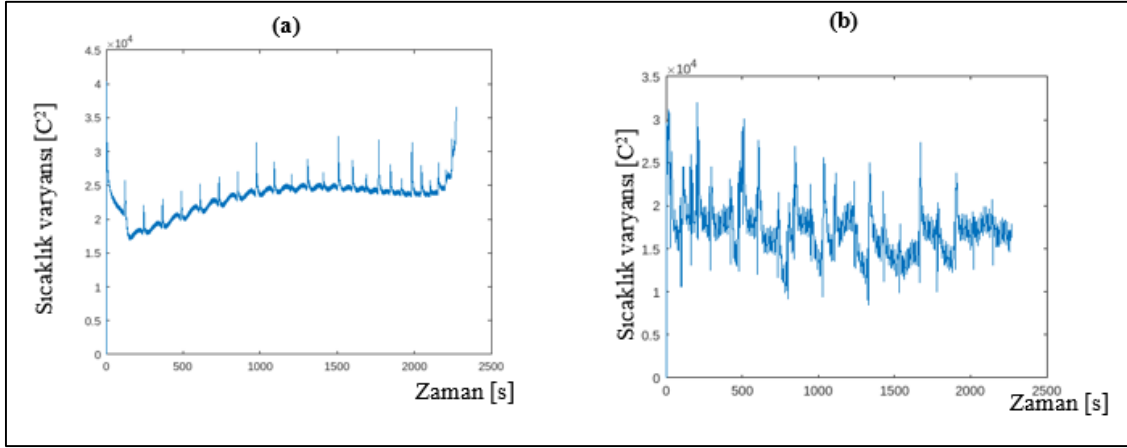
Şekil 5.26. Birinci katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı a) SR b) AR yöntemleri ile



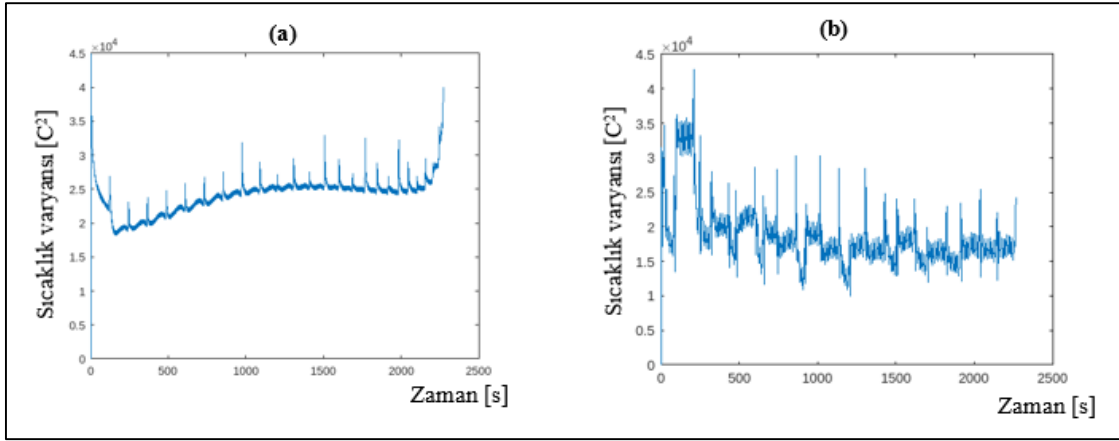
Şekil 5.27. İkinci katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı a) SR b) AR yöntemleri ile



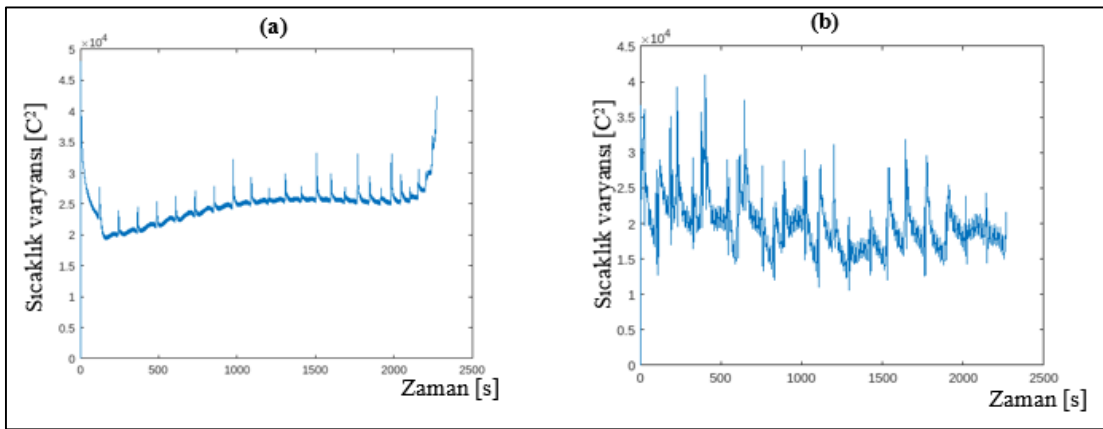
Şekil 5.28. Üçüncü katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı a) SR b) AR yöntemleri ile



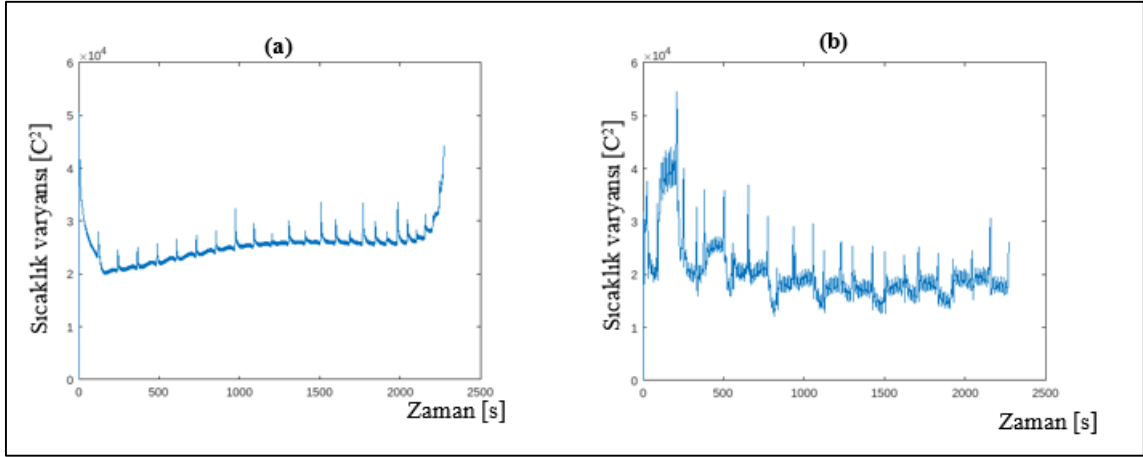
Şekil 5.29. Dördüncü katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı
a) SR b) AR yöntemleri ile



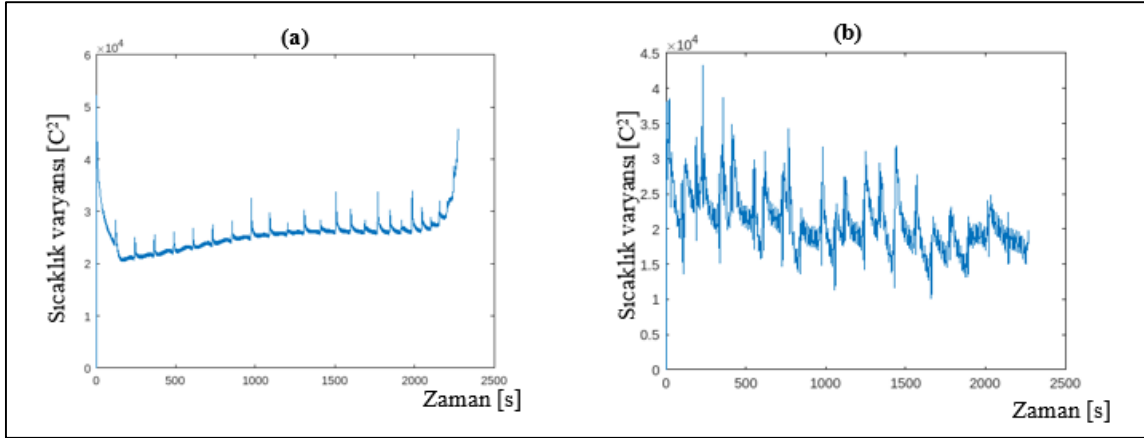
Şekil 5.30. Beşinci katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı
a) SR b) AR yöntemleri ile



Şekil 5.31. Altıncı katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı
a) SR b) AR yöntemleri ile

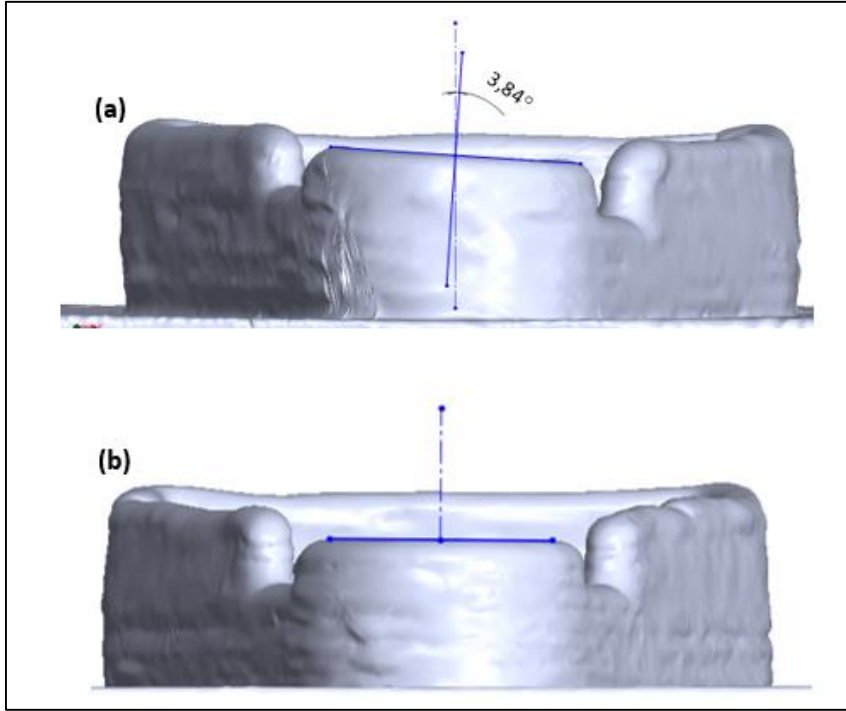


Şekil 5.32. Yedinci katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı
a) SR b) AR yöntemleri ile



Şekil 5.33. Sekizinci katman yığıldıktan sonra bir önceki katmandaki anlık sıcaklık varyansı
a) SR b) AR yöntemleri ile

Üst yüzeyin deformasyonundan etkilenen bir diğer kısım da C kısmıdır. Her iki parçadaki C kısmı karşılaştırılarak, SR’de A kısmının yüzeyindeki deformasyonun C kısmının daha fazla eğilmesine yol açtığı fark edilmiştir. Şekil 5.17, A kısmının deformasyonunun C kısmını nasıl etkilediğini göstermektedir. Bu deformasyon, C kısmının ekseni $3,84^\circ$ açıyla eğilmesine neden olmuştur. AR’de bu deformasyon olmadığı için C kısmı eğilmemiştir. Bu eğim Şekil 5.34’te gösterilmiştir.



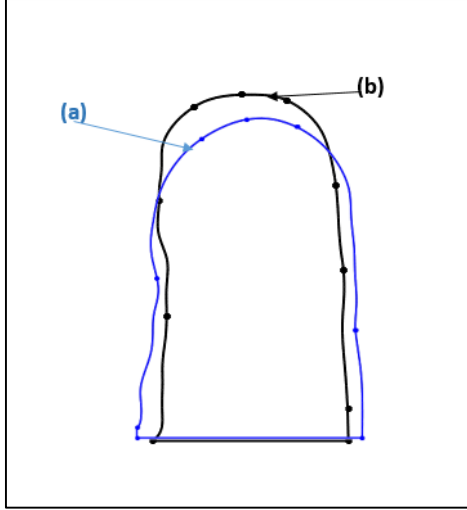
Şekil 5.34. SR’de A yüzeyinin deformasyonu sonucu C ekseninin sapması (a) ve AR’de C ekseninin dikey kalması (b)

5.4.2. B kısmının değerlendirilmesi

B kısmının yüksekliği her iki yöntem için karşılaştırıldı. AR ile üretilen parçada duvarın ortalama yüksekliği 1,56 mm ve genişliği 9,79 mm olmuştur. SR ile üretilen parçada ise ortalama yükseklik 1,29 mm ve genişlik 10 mm idi. Duvar yüksekliğinin azalması ve genişliğinin artması duvarda akma meydana geldiğini göstermektedir. Bu akmanın nedeni, SR’de ısı birikimidir.

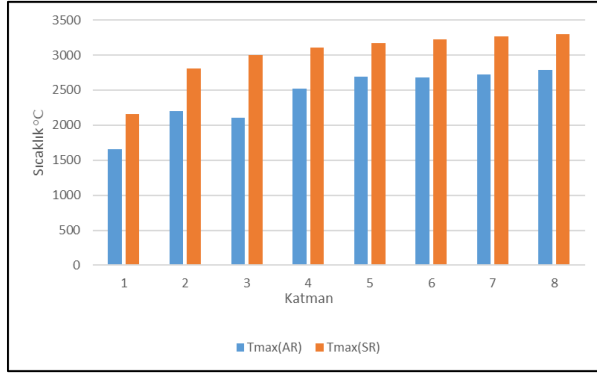
Şekil 5.35 SR kullanılarak üretilen B kısmının kesit profili ile AR kullanılarak üretilen kesit profil arasındaki farkı göstermektedir. Şekilden de anlaşılabacağı üzere SR’deki dikiş akması AR’deki dikiş akmasından daha fazla olmuştur. Aslında kaynak dikiş profilinin oluşumu karmaşık bir süreçtir ve erimiş metalin basınç kuvveti, yüzey gerilimi ve metal damlacıklarının erime havuzuna çarpması sonucu oluşan enerji gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Önceki karmaşık işlemlere rağmen dikkat çeken şey, önceki katmanın sıcaklığı ne kadar yüksekse, ergiyik havuzu hacmi o kadar büyük olacak ve dikişin katılaşması için gereken süre uzun olacaktır. Bu sürenin artmasıyla birlikte dikiş akar ve bu akma dikiş genişliğinde artma ve yüksekliğinde azalma ile gösterilir. Akma SR’de daha çok ve AR’de daha az olur. Aynı parametrelerle ancak katmanlar arasında yeterli soğuma süresi

bırakılarak başka bir duvar yığıldığında, katmanın ortalama yüksekliği 1,88 mm ve ortalama genişliği 9,35 mm'dir. Bu durum duvarın yeterli soğuma süresi ile yığıldığında akmanın minimum olduğu anlamına gelir. Parçada oluşan ısı birikimi sonucu duvar SR'de AR'den daha fazla akar.

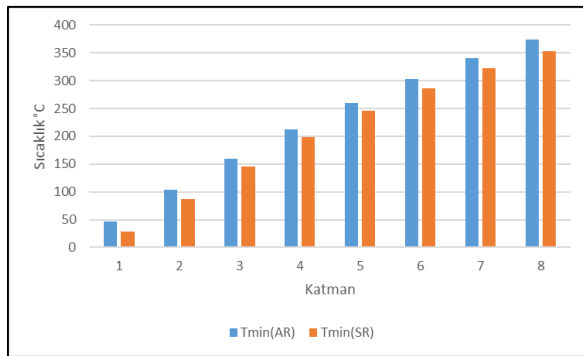


Şekil 5.35. SR (a) ve AR (b) kullanılarak yığma yapıldığında B bölümünün duvar profilindeki fark

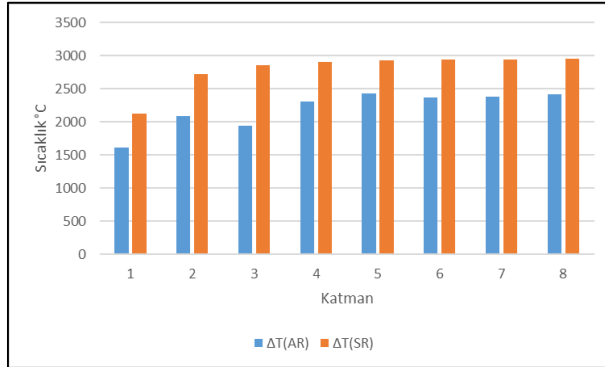
A kısmı ve altlıktaki ısı dağılımı, SR'deki akmanın artmasından birincil derecede sorumludur. Şekil 5.36, 5.37 ve 5.38 sırasıyla tüm parça için maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık ve maksimum ile minimum arasındaki sıcaklık aralığını göstermektedir. Şekillerden de görülebileceği gibi, SR'deki minimum sıcaklık her zaman AR'deki sıcaklıktan daha düşüktür ve SR'deki maksimum sıcaklık her zaman AR'deki sıcaklıktan daha yüksektir. Diğer bir deyişle, SR'de maksimum ve minimum sıcaklık arasındaki aralık daha fazladır. Şekil 5.19'a göre parçanın en soğuk bölgesi her iki durumda da parçanın sol tarafında yer almakta olup, ısının biriktiği bölge B kısmı ile en soğuk bölge arasında yer almaktadır. Bu nedenle A kısmı SR ile yığıldığında, parçanın merkezinde daha yoğun olan ısı, B kısmından daha soğuk alana ısı transferini engeller. Böylece B kısmının soğuması daha uzun sürer ve duvar daha fazla akar.



Şekil 5.36. Her katman yığılması sonrası maksimum sıcaklık



Şekil5.37. Her katman yığılması sonrası minimum sıcaklık



Şekil5.38. Her katman yığılması sonrası sıcaklık farkı

5.5. A kısmının İçyapısının Değerlendirilmesi

WAAM ile üretim sırasında parçada meydana gelen çeşitli ısınma ve soğuma döngüleri, parçanın yapısı üzerinde farklı etkilere sahiptir. Parçanın üretildiği iki stratejinin termal etkisi farklı olduğundan iki parçanın her biri Resim 5.4'te gösterilen yerden kesilmiştir. Böylelikle A bölümü her iki strateji için incelenmiştir.

Resim 5.5'te gösterilen iki kesit çıplak gözle incelendiğinde, yığılan malzemede herhangi bir boşluk veya eksiklik görülmemiştir. Bu, her iki stratejinin de boşluklar olmadan dolu bir parça verdiğini göstermektedir.

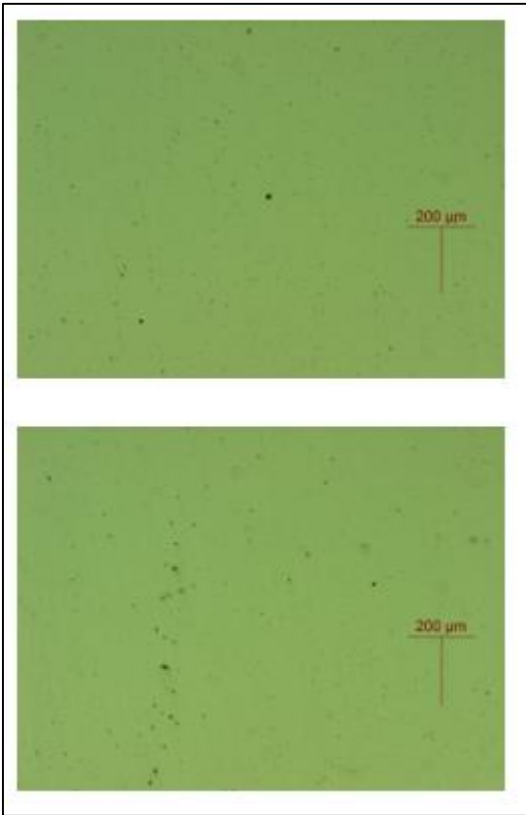
Daha sonra her iki kesit de zımparalanıp parlatılmış ve optik mikroskop (OM) altında incelenmiştir. Resim 5.6 SR ve Resim 5.7 AR ile üretilen parçanın kesitinden alınan ikişer noktayı göstermektedir. İki resim karşılaştırıldığında, SR ile üretilen parçadaki gözenek miktarının, AR ile üretilen parçadaki gözenek miktarından daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca gözenek miktarının fazla olmasının yanı sıra SR parçasındaki gözenek çapının da daha büyük olduğu görülmüştür. Gözeneklerin nedeni, SR'de meydana gelen ısı birikimidir. Isı birikiminin artmasıyla birlikte kaynak havuzu hacmi de artmış ve inert gaz, kaynak havuzunun tamamını koruyamaz hale gelmiştir. Bu durum, havuzun hava ile etkileşime daha duyarlı hale gelmesine neden olmuştur.



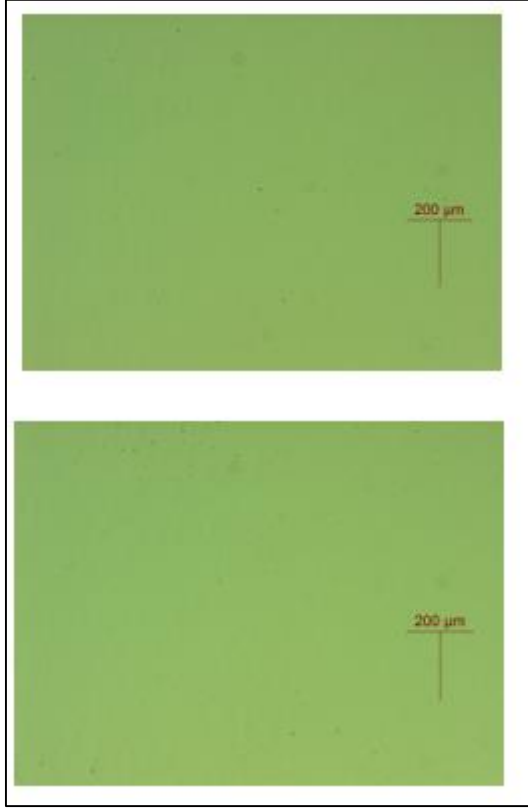
Resim 5.4. C kısmının ortasından olacak şekilde iki parçanın kesildiği yer



Resim 5.5. SR ile üretilen parçanın (solda) ve AR ile üretilen parçanın (sağda) kesiti

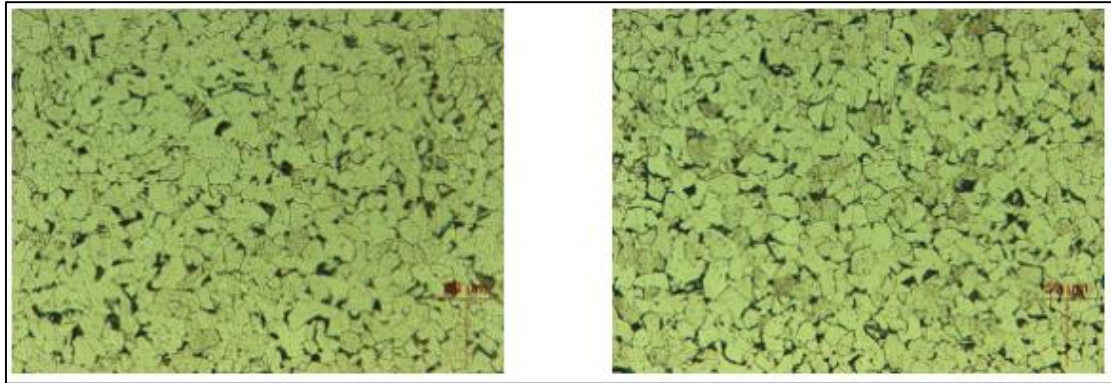


Resim 5.6. OM ile SR kesitinden elde edilen iki resim (50x)

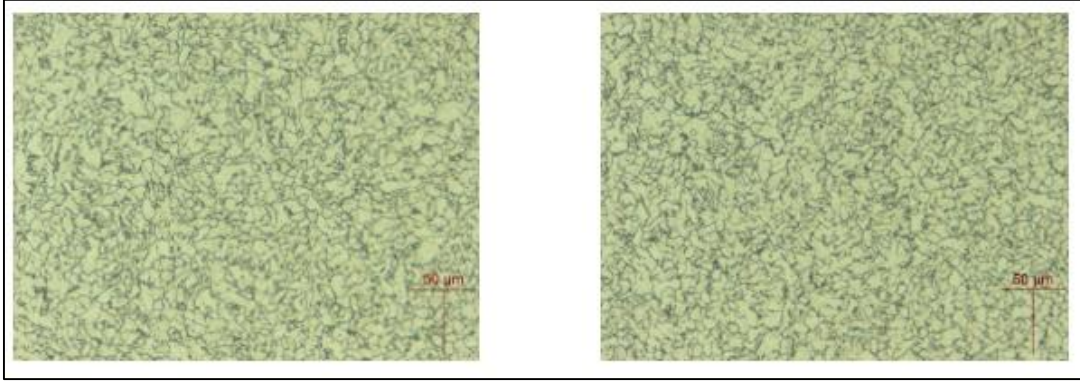


Resim 5.7. OM ile AR kesitinden elde edilen iki resim (50x)

Resim 5.8 ve 5.9, sırasıyla SR ve AR ile üretilen parçaların farklı konumlarından alınan, 200 kat büyütülmüş iki mikro yapı fotoğrafı göstermektedir. Bu iki resimde görülebileceği üzere SR parçasının tanecik boyutu AR parçasının taneciklerinden açıkça daha büyük ve kabadır. SR'de biriken ısı, AR'ye kıyasla parçanın daha yavaş soğumasına neden olmuş ve tanecik boyutlarının büyük olmasına neden olmuştur.



Resim 5.8. SR parçasının mikro yapı görüntüleri (200x)



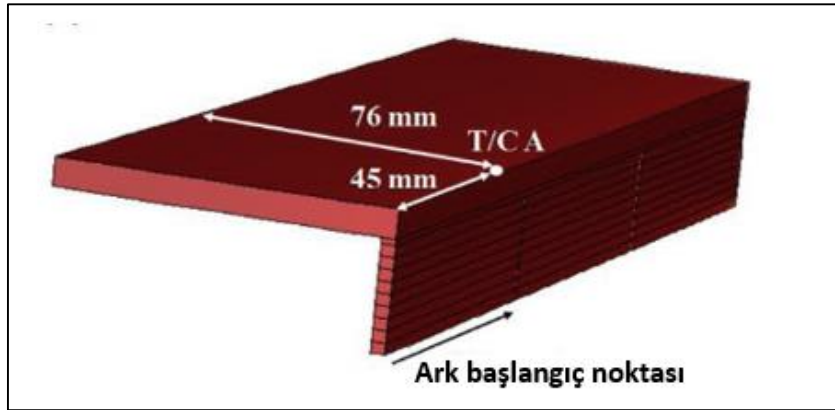
Resim 5.9. AR parçasının mikro yapı görüntüleri (200x)

6. ALGORİTMADA GELİŞTİRİLEN ISIL MODEL DOĞRULAMA

Algoritmada geliştirilen ısı model, iki kez doğrulanmıştır. İlk olarak, modelin tahmin ettiği sıcaklık, Hejripour'un [45] çalışmasında ölçtüğü sıcaklıkla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. İkinci olarak, model tarafından tahmin edilen sıcaklık, SR kullanılarak yığma sırasında bir altlık noktasının sıcaklığıyla karşılaştırılıp ve doğrulanmıştır.

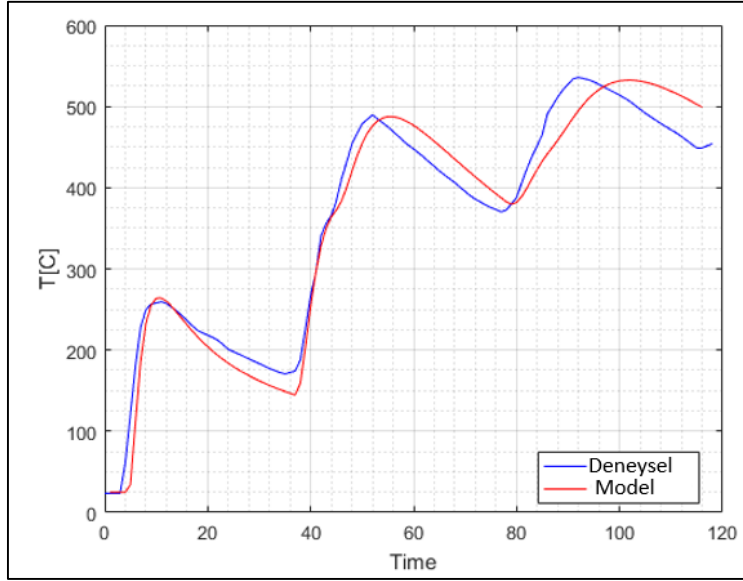
6.1. Hejripour'un Çalışmasıyla Modelin Karşılaştırılması

Hejripour, çalışmasında duplex paslanmaz çelikten yapılmış ince duvarlı bir parça üretmiştir. Şekil 6.1'de belirtilen noktanın sıcaklığını termokupl (ısı çifti) ile ölçmüştür. Hejripour, ölçtüğü sıcaklığı geliştirdiği modelin tahmin ettiği sıcaklıkla karşılaştırmıştır.



Şekil 6.1. Kontrol noktasının konumu [45]

Geliştirilen modelin karşılaştırılması için Hejripour'un ölçtüğü sıcaklıklar alındı ve bu alınan değerler, geliştirilen modelin tahmin ettiği sıcaklıklarla karşılaştırılmıştır. Şekil 6.2, deneysel sıcaklık ve modelin sıcaklık tahminini göstermektedir. Model ile deneysel değerler arasındaki ortalama hata %6.87'dir. Bu, geliştirilen modelin parçada oluşan sıcaklığı iyi bir şekilde tahmin ettiğini göstermektedir.



Şekil 6.2. Deneysel ve model sıcaklığı

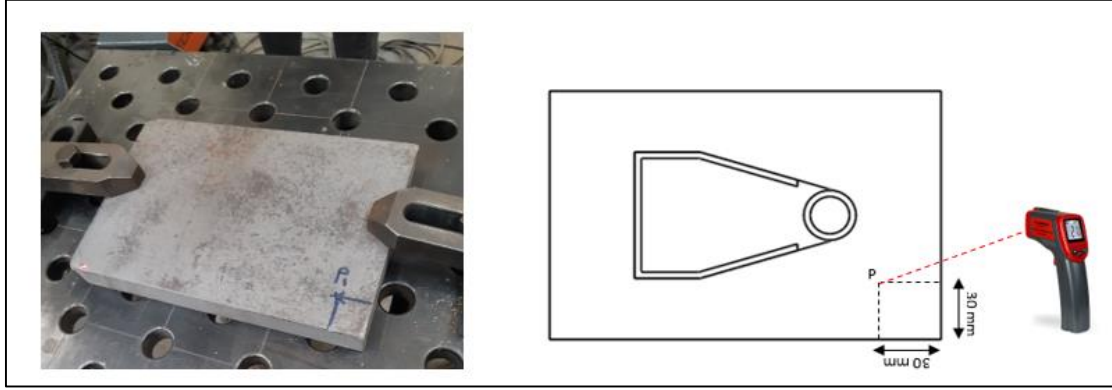
Hejripour'un modelinde hesaplama hızı, 32 GB RAM'e sahip bir bilgisayar kullanılarak 264 dakika olmuştur. Geliştirilen modelin hesaplama hızı ise 4 GB RAM'e sahip bir bilgisayar kullanılarak 0.2 dakikadır. Bu, geliştirilen modelin hesaplama süresinin %99.92 daha hızlı olduğunu göstermektedir.

Geliştirilen modelin hızlı hesaplama yeteneği aşağıdaki nedenlere dayanmaktadır:

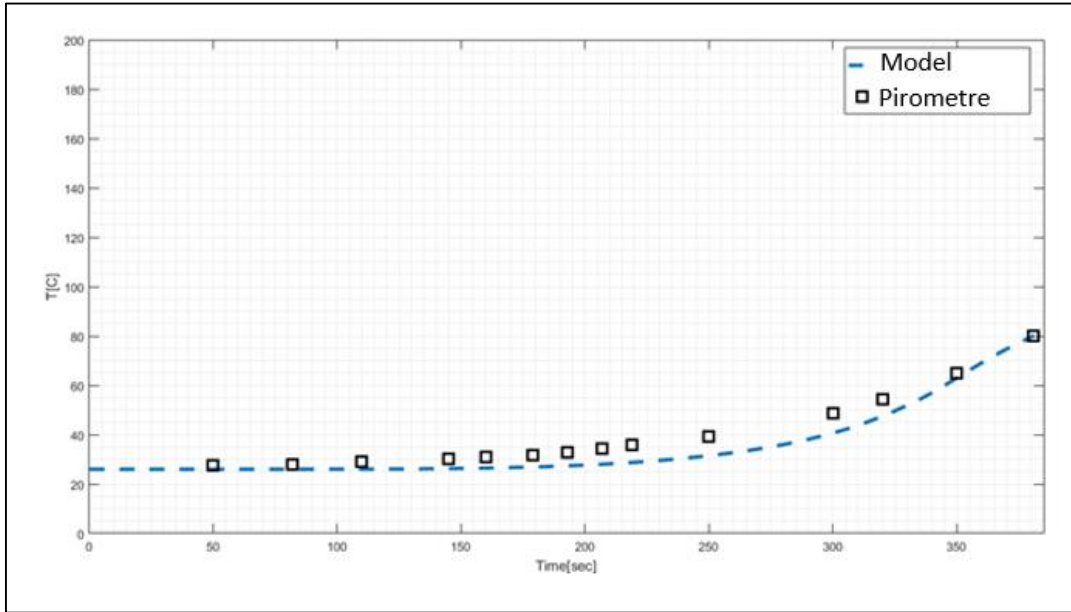
- 1- Nispeten büyük bir eleman kullanma. Bu modelde termal analizin amacı genel olarak parçadaki ısıyı bulmaktır, örneğin kaynak dikişinin boyutunu incelemek gibi bir amaç yoktur. Bu nedenle, büyük eleman boyutları bu amaç için yeterli olacaktır.
- 2- Sıcaklıktan bağımsız olarak malzemenin termal özelliklerini kullanma. Bu, malzemenin özelliklerini doğru bir şekilde tahmin etmek için gereken hesaplama süresini azaltmaktadır.
- 3- Mümkün olduğunca FOR döngülerini azaltma. Bu tür kodlarda genellikle hesaplama hızı, kodun nasıl yazıldığıyla ilişkilidir.

6.2. Pirometre İle Ölçülen Sıcaklık İle Model Sıcaklığı Karşılaştırılması.

SR parçasında altlığın üst yüzeyinde bir kontrol noktası olan P noktası, yığma öncesinde belirlenmiştir. Şekil 6.3, bu noktanın tabandaki konumunu göstermektedir. İlk katmanın yığılması sırasında bu noktanın sıcaklığı birkaç kez pirometre ile ölçülmüştür. Ölçülen sıcaklık, model tarafından tahmin edilen sıcaklıkla karşılaştırılıp, Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Pirometre ve model sıcaklığı benzer sonuçları vermektedir.



Şekil 6.3. Pirometre ile ölçülecek noktanın konumu

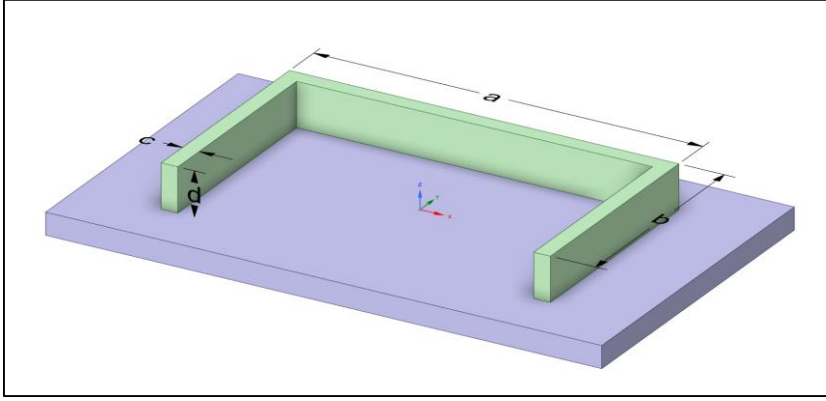


Şekil 6.4. Pirometre ve model sıcaklığı

6.3. Termal Kamera İle Doğrulama

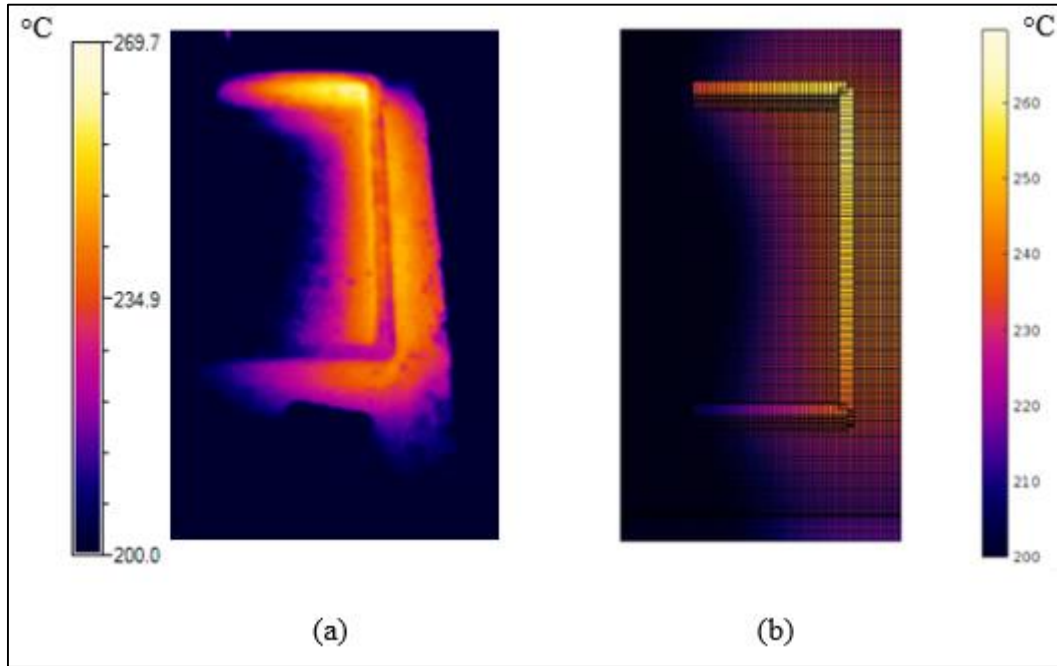
6.3.1. U şeklinde ince cidarlı parça ile doğrulama

Geliştirilen modelden tahmin edilen sıcaklıkların doğruluğunu sağlamak için, Şekil 6.5'te gösterilen 30 katmandan oluşan parça yığılmıştır. Yığma işlemi, bir OPTRIS XI 400 termal kamera kullanılarak izlenmiştir. Kamera, 200-1500°C aralığındaki sıcaklıkları kaydedebilir. Geliştirilen model kullanılarak parçanın termal analizi yapılmıştır. Yığma parametreleri, Bölüm 5'te kullanılanlarla aynıdır.

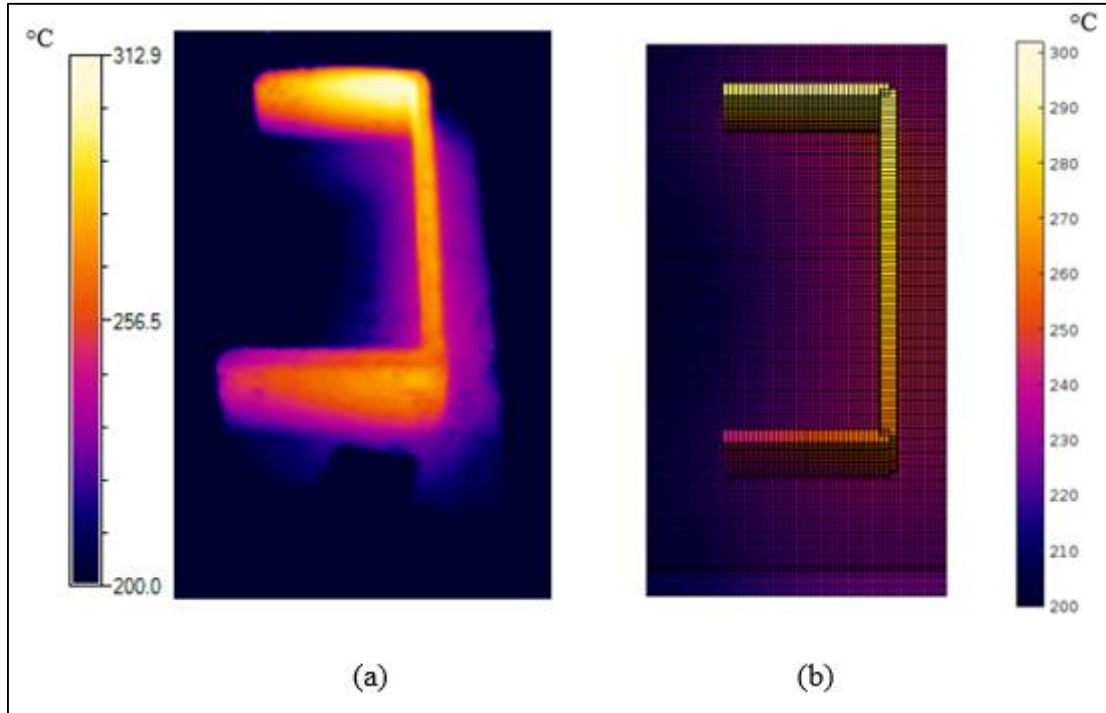


Şekil. 6.5. Termal kamera görüntülemesi için yığılan parçanın geometrisi, $a= 207$ mm, $d=52.5$ mm, $b=86$ mm, $c=7.7$ mm

Şekil 6.6 ve Şekil 6.7, sırasıyla 10. ve 20. katmanın yığılması tamamlandıktan sonra termal kamera tarafından kaydedilen (a) ve tahmin edilen (b) sıcaklıkları göstermektedir.



Şekil 6.6. Onuncu katmanın yığılmasından sonra, termal kamera ölçülen (a) ile tahmin edilen (b) sıcaklığın karşılaştırılması



Şekil 6.7. Yirminci katmanın yığılmasından sonra, termal kamera ölçülen (a) ile tahmin edilen (b) sıcaklığın karşılaştırılması

İki şekilde de görülebileceği gibi, kamera tarafından kaydedilen parçadaki ısı dağılım profili ile tahmin edilen profil oldukça tutarlıdır. Bu, modelin sıcaklığı yüksek bir doğruluk derecesi ile tahmin etme yeteneğini gösterir.

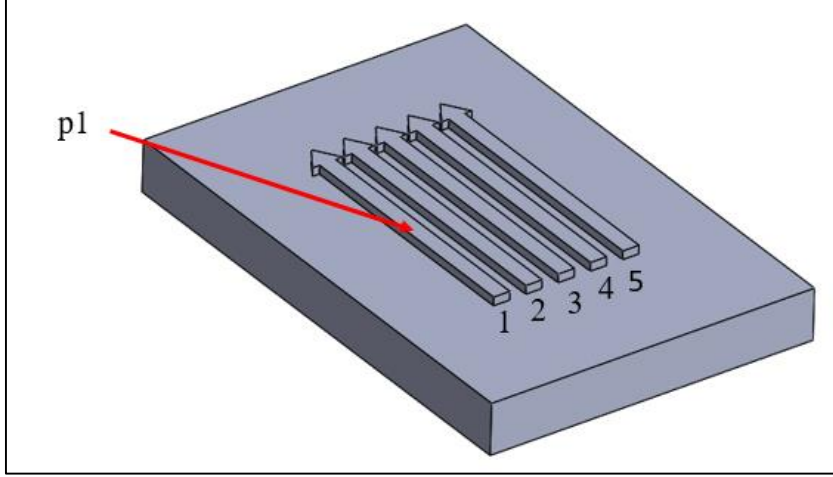
6.3.2. Kutu şeklinde parça ile doğrulama

Modelin tahmin ettiği sıcaklık, Resim 6.1'de gösterilen kutu şeklindeki parçanın yığılması sırasında termal kameranın okuduğu sıcaklıkla da karşılaştırılmıştır. Parçanın boyutları 150 x 32 x 7,5 mm'dir. Parça, 4 katmandan oluşmakta ve her katmanda 5 paso mevcuttur.



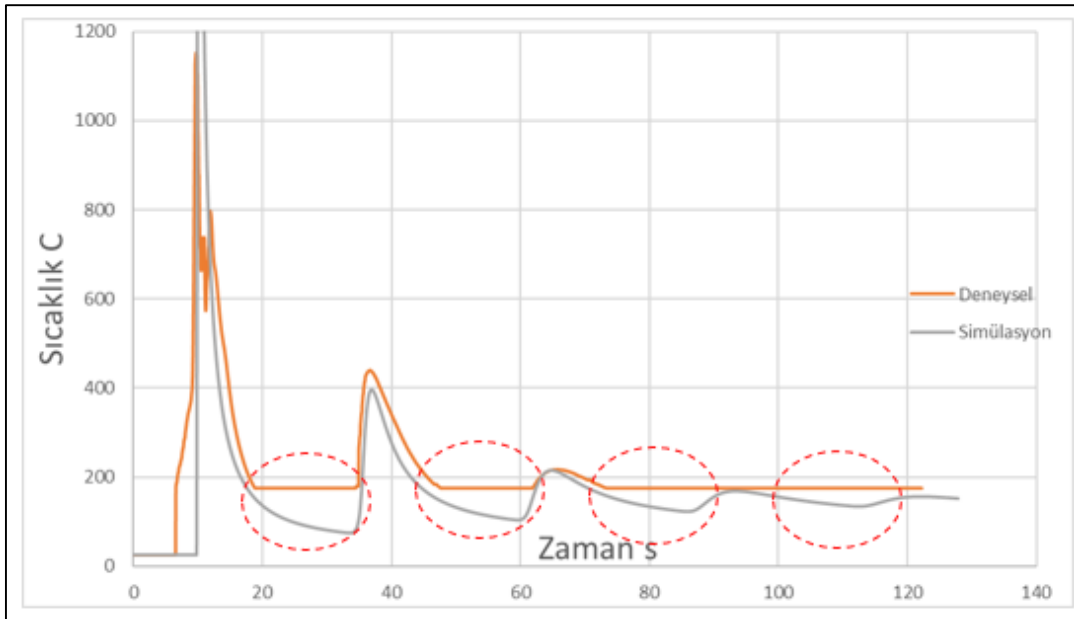
Resim 6.1. Modeli doğrulamak için yığılmış kutu şeklindeki parça

İlk katmandaki ilk pasonun ortası kontrol noktası (p1) olarak seçilmiştir. Şekil 6.8 bu noktanın konumunu ve birinci katmandaki pasoların yönlerini göstermektedir.



Şekil 6.8. Kontrol noktasının konumu (p1) ve ilk katmanın yığma pasoları

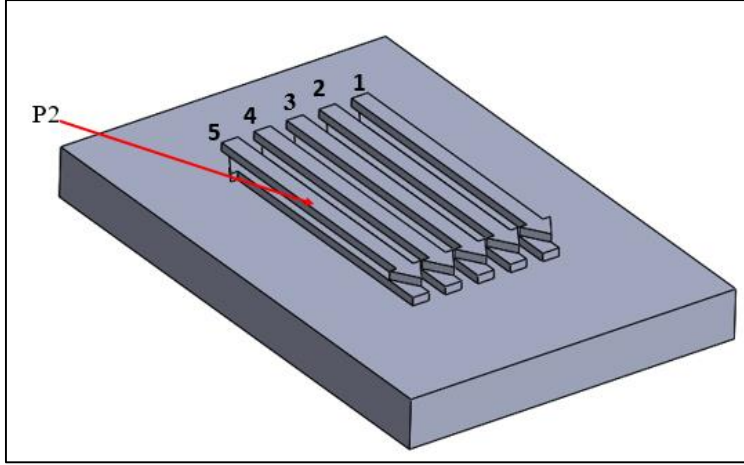
Simüle edilen sıcaklık ile kamera tarafından ölçülen ve Şekil 6.9'da gösterilen sıcaklık karşılaştırılınca, uyum olmayan ve kırmızı çizgilerle gösterilmiş alanlar dışında, iki sıcaklık eğrileri arasında büyük bir uyum olduğu görülmektedir. Uyum olmayan bölgelerdeki sapmanın nedeni termal kameranın 200°C altındaki sıcaklıkları ölçememesidir.



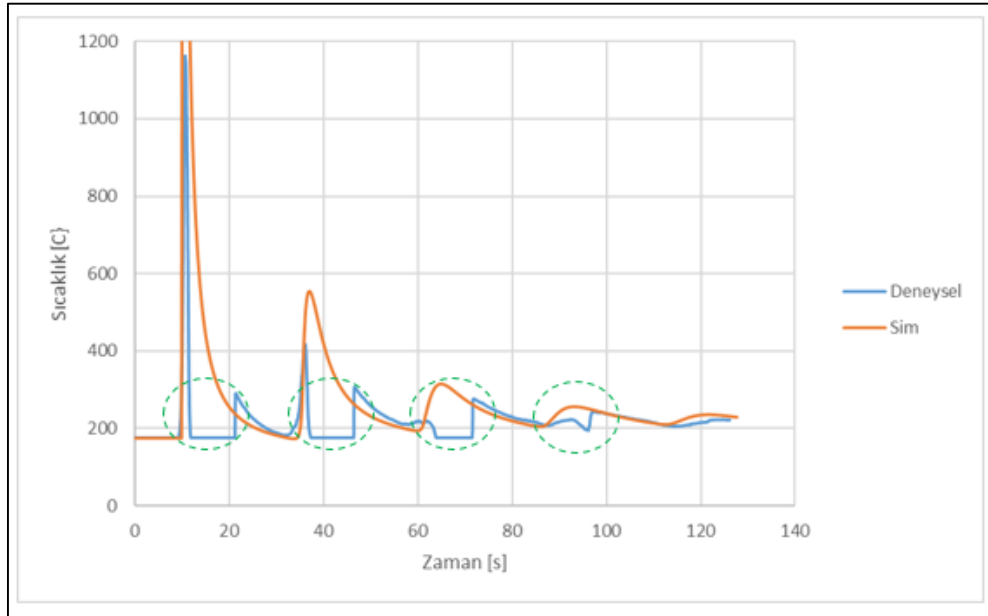
Şekil 6.9. p1 kontrol noktasının simülasyon ve ölçülen sıcaklıkları

İkinci katmandaki beşinci pasonun orta noktası p2, Şekil 6.10'da gösterildiği üzere ikinci

kontrol noktası olarak seçilmiştir. Şekil 6.11'de gösterildiği üzere hesaplanan sıcaklık ölçülen sıcaklıkla karşılaştırıldığında, yeşil çizgiyle çevrelenen bazı alanlar dışında aralarında büyük bir uyum olduğu görülmüştür. Yığma işlemi sırasında torçun kameranin görüş açısını engellemesi nedeniyle yeşil çizgiyle çevrelenen alanlarda kamera parça sıcaklığını ölçememiştir.



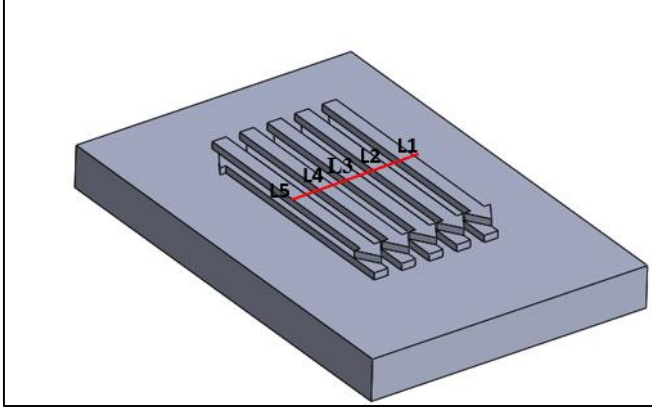
Şekil 6.10. İkinci kontrol noktasının konumu (p2) ve ikinci katmanın yığma pasoları



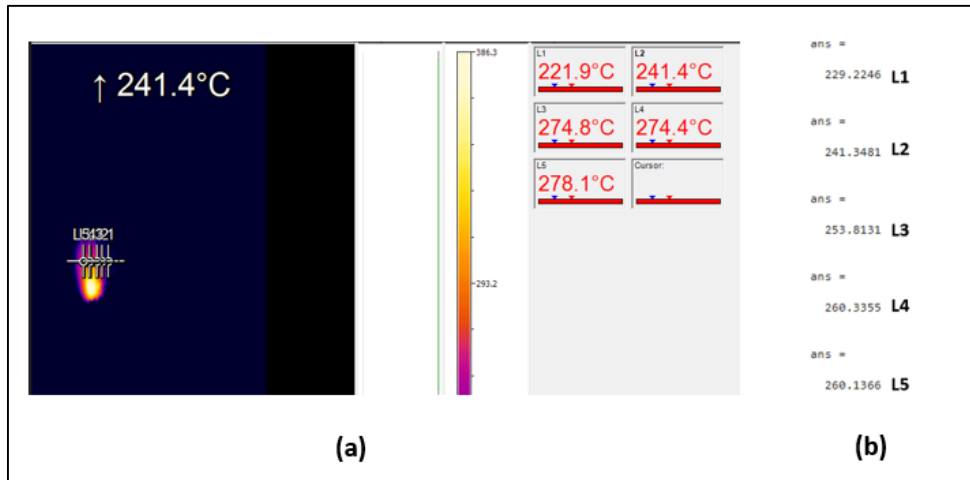
Şekil 6.11. p2 kontrol noktasının simülasyonu ve ölçülen sıcakları

İkinci katman yığıldıktan sonra beş pasonun (L1, L2, L3, L4, L5) ortalarının sıcaklıkları ölçülmüştür. Şekil 6.12'de bu beş noktanın ikinci katmandaki yerleri gösterilmektedir. Resim 6.2(a) kamera tarafından ölçülen ve Optris PIX Connect yazılımı aracılığıyla okunan sıcaklık

değerlerini, Resim 6.2(b) ise bu beş nokta için modelin hesapladığı sıcaklık değerlerini göstermektedir.

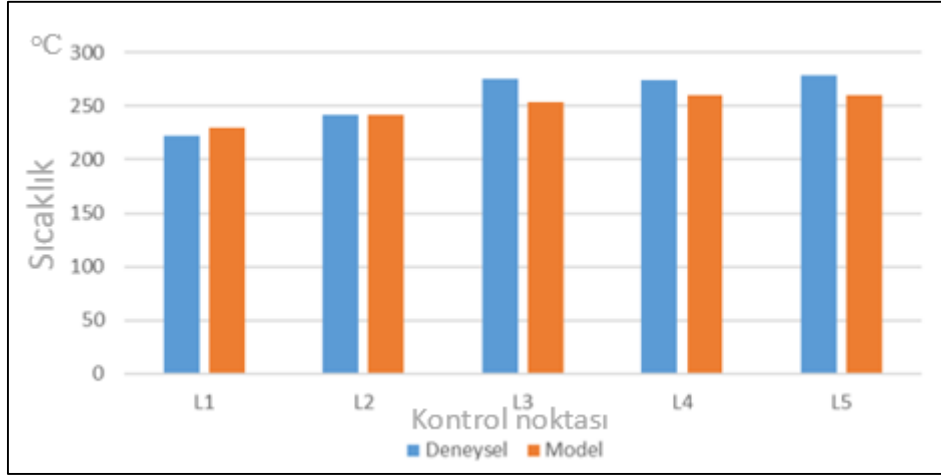


Şekil 6.12. p2 İkinci katman yığıldıktan sonra ölçülen 5 kontrol noktaları (L1- L2- L3- L4- L5) konumları



Resim 6.2. Kontrol noktaların sıcaklıkları, ikinci katman yığıldıktan sonra (a) deneysel, (b) tahmin edilen

Şekil 6.13, model tarafından hesaplanan ve ölçülen beş noktanın sıcaklıklarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Tahmin edilen sıcaklıklarda en büyük hata ise %7,6 ile üçüncü noktada (L3) olmuştur.



Şekil 6.13. Paso orta kontrol noktalarının karşılaştırılması

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, WAAM teknolojisi kullanılarak parça üretimi için yığma yolu üretebilen bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmanın amacı, yol planlama ve analiz programları arasındaki boşluğu kapatmak ve yol planlama programlarıyla analiz programları arasında geçiş yapmayı kolaylaştırmaktır. Bu tezde yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Parçadaki ısı dağılımına göre yığma yolları oluşturabilen bir algoritma geliştirmiştir. Bu algoritma, CAD dosyasına ve proses parametrelerine dayalı olarak ek bir çabaya ihtiyaç duymadan aynı anda yığma yolları oluşturabilir ve termal analiz gerçekleştirebilir.
- Parçada oluşan sıcaklık varyansını azaltmak için algoritmada bir atlama stratejisi geliştirilmiştir. Atlama stratejisi, her katmanda birkaç yığma açısını test eder ve pasoların sırasını en soğuk alana atlayarak belirler. Termal geçmişi nispeten iyi bir hızda hesaplayabilen geliştirilmiş termal model sayesinde bu işlem verimli bir şekilde gerçekleştirilir. Bu strateji sayesinde, ortalama sıcaklık varyansı azaltılır. Sıcaklık varyansı azaltma yüzdesi, parçanın şekline ve boyutlarına göre değişir. Sıcaklık varyansı azaltma, bazı şekiller için %50'ye kadar ulaşabilir.
- Algoritma, bir parçayı bir kez atlama stratejisi ve bir kez sıralı raster kullanılmak üzere iki kez yığılarak deneysel olarak değerlendirilmiştir. Üretilen parça; bir büyük, bir ince cidarlı ve bir ince cidarlı halka olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır.
- Sıcaklık varyansı değerleri ilk üç katmanda %30-35 oranında azaldı. Altıncı tabakanın yığılmasından sonra ve oluşan ısı dengenin bir sonucu olarak, sıcaklık varyansındaki azalma altıncı tabakadan sonra sabit kaldı ve %20 civarındaydı.
- Atlamalı raster örüntüsü atlamalı kontur örüntüsüyle karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar üç çokgen için yapılmıştır: içbükey, dikdörtgen ve dışbükey. Atlamalı rasterin, atlamalı kontura göre tüm açılar için daha düşük bir sıcaklık varyansı verdiği bulunmuştur.
- Üretilen parçaların boyutları tersine mühendislik ile taranarak değerlendirildi. Sıralı rasterde meydana gelen daha büyük sıcaklık varyansı, büyük bölümün daha fazla bir yüzey deformasyonuna yol açtı. Atlama stratejisi kullanılırken deformasyon daha azdı.
- Atlama stratejisi, parçadaki maksimum ve minimum sıcaklık arasındaki açıklığı azalttı. Açıklığın azalması, ince duvarlı bölümünün daha hızlı soğumasına neden oldu ve bu da ince duvarlı bölümünün kaynak dikişinin akmasında bir azalmaya yol açtı.
- Çok bölümlü parçalarda, her bölümün şekli önceki bölümün şekline bağlıdır. Atlama

stratejisindeki sıcaklık varyansının azaltılması, sıralı rasterdeki ince duvarlı halkanın eğilmesini engelledi.

- SR ve AR ile üretilen iki parça kesilmiştir. SR'de üretilen parçada aşırı ısı birikiminin daha büyük çaplı ve daha büyük miktarda gözeneklere yol açtığı bulunmuştur. SR parçasında, ısı birikiminden kaynaklanan soğuma hızının düşük olması sonucunda tane boyutu daha büyük olmuştur.
- Kullanılan termal modelin geçerliliği, tahmin edilen sıcaklıklar ile yığma sırasında termal kamera tarafından kaydedilen sıcaklıklar karşılaştırılarak doğrulandı. Tahmin edilen ve deneysel sıcaklıklar arasında önemli bir uyum bulunmuştur.

Önerilen çalışmalar aşağıdaki gibi olabilir:

- Algoritmayı, robotların kinetik analizi için bir sistem içerecek şekilde geliştirmek, böylece bu sistem aracılığıyla her robot için doğrudan çalıştırılacak dosyalar oluşturması.
- Atlama stratejisinin üretilen parçaların mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi.
- Yığma sırasında parçada oluşan ısıya göre üretilen parçaların mikro yapısını tahmin edebilecek algoritmanın geliştirilmesi.
- Birden fazla kısım içeren karmaşık şekle sahip parçalar için yığma yolunu oluşturan yapay zekanın algoritmaya entegre edilmeye çalışılması, böylece algoritmanın bu parçaları insan müdahalesi olmadan tek başına tanıması, bu da karmaşık şekiller için yol planlamasında harcanan eforun azaltılması.
- Algoritmada kullanılan sonlu hacimler yönteminin termal analize ek olarak parçada oluşacak deformasyonları tahmin edebilecek şekilde mekanik analiz yapabilmesi için geliştirilmesi.
- Katman yüksekliğini tahmin edecek ve ekleme yapacak bir algoritmanın geliştirilmesi.

KAYNAKLAR

1. Casini M. (2021). *Construction 4.0: Advanced Technology, Tools and Materials for the Digital Transformation of the Construction Industry* (Birinci Baskı). United Kingdom: Elsevier Science, 63.
2. Zhang Y, Jarosinski W, Jung YG, Zhang J. (2018). *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications* (Birinci Baskı). Butterworth:Heinemann, 40.
3. Chen D, Yin L, Wang H, et al. (2019). *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders* (İkinci Baskı). Amsterdam :Elsevier, 5.
4. Gardner L, Kyvelou P, Herbert G, Buchanan C. (2020). Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge. *Journal of Constructional Steel Research*, 172,106233.
5. Li Y, Su C, Zhu J. (2022). Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects. *Results in Engineering*, 13,100330.
6. Ahn DG. (2021). Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8,703–742.
7. Ralph B. (1925). Method of making decorative articles. *Westinghouse Electric and Manufacturing Co, U.S. Patent 1,533,300*.
8. Uгла AA, Yilmaz O. (2017). Deposition-Path Generation of SS308 Components Manufactured by TIG Welding-Based Shaped Metal Deposition Process. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42,4701–4711.
9. Almeida PMS, Williams S. (2010). *Innovative Process Model of Ti-6Al-4V Additive Layer Manufacturing Using Cold Metal Transfer (CMT)*. 2010 International Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, Texas.
10. Kazanas P, Deherkar P, Almeida P, et al. (2012). Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(6), 1042-1051.
11. Wang R, Zhang H, Gui-Lan W, Zhao X. (2020). Cylindrical slicing and path planning of propeller in wire and arc additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 26,49–58.
12. He T, Yu S, Shi Y, Dai Y. (2019). High-accuracy and high-performance WAAM propeller manufacture by cylindrical surface slicing method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105,4773–4782.
13. Rusteiko AC, Angelo JD, del Conte EGD. (2019). Residual stress in metal arc additive manufacturing of mill knives cutting edges. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104,4457–4464.

14. Yu Z, Pan Z, Ding D, et al. (2021). A practical fabrication strategy for wire arc additive manufacturing of metallic parts with wire structures. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115,3197–3212.
15. Pragana JPM, Bragança IMF, Silva CMA, Martins PAF. (2022). Hybrid Wire-Arc Additive Manufacturing of Conformal Cooling Channels: A Feasibility Study. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 1–13.
16. Shi J, Li F, Chen S, Zhao Y. (2019). T-GMAW based novel Multi-node trajectory planning for fabricating grid stiffened panels: An efficient production technology. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117919.
17. Chaudhari R, Parmar H, Vora J, Patel VK. (2022). Parametric Study and Investigations of Bead Geometries of GMAW-Based Wire–Arc Additive Manufacturing of 316L Stainless Steels. *Metals*, 12, 1232, 12,1232.
18. Oh WJ, Lee CM, Kim DH. (2022). Prediction of deposition bead geometry in wire arc additive manufacturing using machine learning. *Journal of Materials Research and Technology*, 20,4283–4296.
19. Ma B, Zhang N, Zhang Y, Gao X. (2021). Welding parameters effect and optimization on bead geometry during arc additive manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series*, 1986,012034.
20. Aiyiti W, Zhao W, Lu B, Tang Y. (2006). Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 12,165–172.
21. Xiong J, Zhang G, Gao H, Wu L. (2013). Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29,417–423.
22. Cao Y, Zhu S, Liang X, 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*, 27,641–645.
23. Suryakumar S, Karunakaran KP, Bernard A, et al. (2011). Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing. *Computer-Aided Design*, 43,331–344.
24. Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. (2015). A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 31,101–110.
25. Wang Z, Zimmer-Chevret S, Léonard F, Abba G. (2022). Improvement strategy for the geometric accuracy of bead's beginning and end parts in wire-arc additive manufacturing (WAAM). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118,2139–2151.
26. Müller J, Hensel J. (2023). WAAM of structural components—building strategies for varying wall thicknesses. *Welding in the World*, 67,833–844.

27. Ding D, Pan Z, Cuiuri D, et al. (2016). Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation. *Journal of Cleaner Production*, 133,942–952.
28. Li Y, Sun Y, Han Q, et al. (2018). Enhanced beads overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead metallic parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 252,838–848.
29. Li Y, Han Q, Zhang G, Horváth I. (2018). A layers-overlapping strategy for robotic wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead components with homogeneous layers. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96,3331–3344.
30. Ding D, Yuan L, Huang R, et al. (2023). Corner path optimization strategy for wire arc additive manufacturing of gap-free shapes. *Journal of Manufacturing Processes*, 85,683–694.
31. Martina F, Mehnen J, Williams SW, et al. (2012). Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti–6Al–4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 212,1377–1386.
32. Perez E, Landers R, Bristow D. (2022). Optimal trajectory smoothing for direct energy deposition additive manufacturing processes. *Mechatronics*, 88,102910.
33. Ding D, Zhao R, Lu Q, et al. (2021). A shape control strategy for wire arc additive manufacturing of thin-walled aluminium structures with sharp corners. *Journal of Manufacturing Processes*, 64,253–264.
34. Mehnen J, Ding J, Lockett H, Kazanas P. (2014). Design study for wire and arc additive manufacture. *International Journal of Product Development*, 19,2–20.
35. Venturini G, Montevecchi F, Bandini F, et al. (2018). Feature based three axes computer aided manufacturing software for wire arc additive manufacturing dedicated to thin walled components. *Additive Manufacturing*, 22,643–657.
36. Venturini G, Montevecchi F, Scippa A, Campatelli G. (2016). Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features. *Procedia CIRP*, 55,95–100.
37. da Silva LJ, Souza DM, de Araújo DB, et al. (2020). Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107,2513–2523.
38. Montevecchi F, Venturini G, Grossi N, et al. (2018). Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique. *Additive Manufacturing*, 21,479–486.
39. Tanvir ANM, Ahsan MRU, Seo G, et al. (2021). Phase stability and mechanical properties of wire + arc additively manufactured H13 tool steel at elevated temperatures. *Journal of Materials Science and Technology*, 67,80–94.

40. Wu B, Ding D, Pan Z, et al. (2017). Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 250,304–312.
41. Singh S, Jinoop AN, Tarun Kumar GTA, et al. (2021). Effect of Interlayer Delay on the Microstructure and Mechanical Properties of Wire Arc Additive Manufactured Wall Structures. *Materials*, 14,4187.
42. Rodrigues TA, Duarte V, Avila JA, et al. (2019). Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 27,440–450.
43. Lu X, Zhou YF, Xing XL, et al. (2017). Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93,2145–2154.
44. Yildiz A.S. (2020). *Tel Beslemeli Ark Ergitmeli Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Parçaların Isıl Davranış, Geometrik, Mekanik ve Metalürjik Özelliklerinin Araştırılması*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
45. Hejripour F, Binesh F, Hebel M, Aidun DK. (2019). Thermal modeling and characterization of wire arc additive manufactured duplex stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 272,58–71.
46. Lehmann T, Jain A, Jain Y, et al. (2020). Concurrent geometry- and material-based process identification and optimization for robotic CMT-based wire arc additive manufacturing. *Materials and Design*, 194,108841.
47. Belhadj M, Kromer R, Werda S, Darnis P. (2022). Effect of Cold Metal Transfer-Based Wire Arc Additive Manufacturing parameters on geometry and machining allowance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-10.
48. Nickel AH, Barnett DM, Prinz FB. (2001). Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 317,59–64.
49. Foroozmehr E, Kovacevic R. (2010). Effect of path planning on the laser powder deposition process: thermal and structural evaluation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51,659–669.
50. Israr R, Buhl J, Elze L, Bambach M. (2018). *Simulation of different path strategies for wire-arc additive manufacturing with Lagrangian finite element methods*. 15 LS-DYNA Forum, Bamberg.
51. Somashekara MA, Naveenkumar M, Kumar A, et al. (2016). Investigations into effect of weld-deposition pattern on residual stress evolution for metallic additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90, 2009–2025.

52. Wu Q, Mukherjee T, Liu C, et al. (2019). Residual stresses and distortion in the patterned printing of titanium and nickel alloys. *Additive Manufacturing*, 29,100808.
53. Li X, Lin J, Xia Z, et al. (2021). Influence of Deposition Patterns on Distortion of H13 Steel by Wire-Arc Additive Manufacturing. *Metals*, 11,485.
54. Mughal MP, Mufti RA, Fawad H. (2007). The mechanical effects of deposition patterns in welding-based layered manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221,1499–1509.
55. Sun L, Ren X, He J, Zhang Z. (2021). Numerical investigation of a novel pattern for reducing residual stress in metal additive manufacturing. *Journal of Materials Science and Technology*, 67,11–22.
56. Ren K, Chew Y, Zhang YF, et al. (2019). Thermal analyses for optimal scanning pattern evaluation in laser aided additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 271,178–188.
57. Ding DH, Pan ZX, Dominic C, Li HJ. (2015). Process planning strategy for wire and ARC additive manufacturing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 363,437–450.
58. Ferreira RP, Vilarinho LO, Scotti A. (2022). Development and implementation of a software for wire arc additive manufacturing preprocessing planning: trajectory planning and machine code generation. *Welding in the World*, 66,455–470.
59. Chernovol N, Lauwers B, van Rymenant P. (2020). Development of low-cost production process for prototype components based on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Procedia CIRP*, 95, 60–65.
60. Artaza T, Alberdi A, Murua M, et al. (2017). Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring system in a gantry machine. *Procedia Manufacturing*, 13,778–785.
61. Silmbroth M, Enzinger N, Schneider-Bröskamp C, et al. (2022). Characterisation of structural modifications on cold-formed AA2024 substrates by wire arc additive manufacturing. *Science and Technology of Welding and Joining*, 28(4), 314-322.
62. Sarma R, Kapil S, Joshi SN. (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.
63. Reisch R, Hauser T, Kamps T, Knoll A. (2020). Robot based wire arc additive manufacturing system with context-sensitive multivariate monitoring framework. *Procedia Manufacturing*, 51,7 32–739.
64. Internet: Additive manufacturing multi-axis | Siemens Software. <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/products/nx-am-multi-axis/>. Accessed 11 Jun 2023

65. Bajpei T, Chelladurai H, Ansari MZ. (2016). Numerical Investigation of Transient Temperature and Residual Stresses in Thin Dissimilar Aluminium Alloy Plates. *Procedia Manufacturing*, 5,558–567.
66. Sun J, Hensel J, Köhler M, Dilger K. (2021). Residual stress in wire and arc additively manufactured aluminum components. *Journal of Manufacturing Processes*, 65,97–111.
67. Xiong J, Lei Y, Li R. (2017). Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 126,43–52.
68. Ding J, Colegrove P, Mehnen J, et al. (2011). Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. *Computational Materials Science*, 50,3315–3322.
69. Yildiz AS, Koc BI, Yilmaz O. (2021). Thermal behavior determination for wire arc additive manufacturing process. *Procedia Manufacturing*, 54,233–237.
70. İnternet: Documentation - MATLAB & Simulink. https://www.mathworks.com/help/index.html?s_tid=CRUX_lftnav. Accessed 11 Jun 2023.
71. Hormann K, Agathos A. (2001). The point in polygon problem for arbitrary polygons. *Computational Geometry*, 20,131–144.
72. Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. (2014). A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73,173–183.
73. Wang J, Shi J, Wang Y, et al. (2018). *Fast computation of thermal field of direct metal deposition: A preliminary study based on quiet element method*. 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference, Texas.
74. Nijhuis B, Geijselaers HJM, van den Boogaard AH. (2021). Efficient thermal simulation of large-scale metal additive manufacturing using hot element addition. *Computers and Structures*, 245,106463.
75. Wang J, Wang Y, Shi J. (2020). A Novel Time Step Fusion Method with Finite Volume Formulation for Accelerated Thermal Analysis of Laser Additive Manufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 8,1181–1196.
76. McMillan M, Leary M, Brandt M. (2017). Computationally efficient finite difference method for metal additive manufacturing: A reduced-order DFAM tool applied to SLM. *Materials & Design*, 132,226–243.
77. Stockman T, Schneider JA, Walker B, Carpenter JS. (2019). A 3D Finite Difference Thermal Model Tailored for Additive Manufacturing. *JOM*, 71,1117–1126.
78. Cengel YA, Ghajar AJ. (2014). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (Beşinci Baskı). United Kingdom: McGraw-Hill Education, 531.

79. Geng R, Du J, Wei Z, et al. (2021). Modelling and experimental observation of the deposition geometry and microstructure evolution of aluminum alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 64,369–378.
80. Oyama K, Diplas S, M'hamdi M, et al. (2019). Heat source management in wire-arc additive manufacturing process for Al-Mg and Al-Si alloys. *Additive Manufacturing*, 26,180–192.
81. Ding D, Zhang S, Lu Q, et al. (2021). The well-distributed volumetric heat source model for numerical simulation of wire arc additive manufacturing process. *Materials Today Communications*, 27,102430.
82. Hu J, Guo H, Tsai HL. (2008). Weld pool dynamics and the formation of ripples in 3D gas metal arc welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51,2537–2552.
83. Michaleris P. (2014). Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes. *Finite Elements in Analysis and Design*, 86,51–60.
84. Wang X, Wang A, Li Y. (2019). A sequential path-planning methodology for wire and arc additive manufacturing based on a water-pouring rule. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103,3813–3830.
85. Cong B, Qi Z, Qi B, et al. (2017). A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process. *Applied Sciences*, 7,275.
86. Pepe N, Egerland S, Colegrove PA, et al. (2013). Measuring the process efficiency of controlled gas metal arc welding processes. *Science and Technology of Welding and Joining*, 16(5), 412-417.
87. Internet: AISI 1070 Steel, hot rolled, 19-32 mm (0.75-1.25 in) round. https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=9506f59dc73d41a7ab0da119f6775358. Accessed 10 Jun 2023
88. Internet: KSCAN20 Industrial 3D Scanner | Scantech. <https://www.3d-scantech.com/product/kscan20-3d-scanner/>. Accessed 18 Jun 2023.
89. Lu X, Lin X, Chiumenti M, et al. (2018). Finite element analysis and experimental validation of the thermomechanical behavior in laser solid forming of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 21,30–40.
90. Horgar A, Fostervoll H, Nyhus B, et al. (2018). Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire. *Journal of Materials Processing Technology*, 259,68–74.
91. Gordon J V., Gary Harlow D. (2019). Statistical Modeling of Wire and Arc Additive Manufactured Stainless Steel 304: Microstructure and Fatigue. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 26(04), 1950016.



Gazili olmak ayrıcalıktır