

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**ROBOTİK TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÖSTENİTİK
PASLANMAZ ÇELİK VE SERT DOLGU KAYNAK TELİ KULLANILARAK
ÜRETİLEN BİMETAL PARÇANIN KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Deniz Eylül AKPINAR

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

TEMMUZ 2023

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**ROBOTİK TEL ARK EKLEMELİ İMALAT İLE ÖSTENİTİK PASLANMAZ
ÇELİK VE SERT DOLGU KAYNAK TELİ KULLANILARAK ÜRETİLEN
BİMETAL PARÇANIN KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Deniz Eylül AKPINAR
(210022007)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Savaş DİLİBAL

Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Uğur GÜROL

TEMMUZ 2023



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı (210022007) numaralı öğrencisi Deniz Eylül Akpınar'ın “Robotik Tel Ark Eklemeli İmalat İle Östenitik Paslanmaz Çelik ve Sert Dolgu Kaynak Teli Kullanılarak Üretilen Bimetal Parçanın Karakterizasyonu” adlı tez çalışması, 04/07/2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aşağıdaki jüri tarafından *oy birliği* ile *Yüksek Lisans tezi* olarak kabul edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

- 1) Tez Danışmanı:** Doç. Dr. Savaş DİLİBAL
- 2) Eş Tez Danışmanı:** Dr. Öğr. Üyesi Uğur GÜROL
- 3) Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Haydar ŞAHİN
- 4) Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Aytaç Uğur YERDEN
- 5) Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Engin KOCAMAN

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Robotik Tel Ark Eklemeli İmalat ile Östenitik Paslanmaz Çelik ve Sert Dolgu Kaynak Teli Kullanılarak Üretilen Bimetal Parçanın Karakterizasyonu” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (04/07/2023)

Deniz Eylül AKPINAR

Mustafa Kemal Atatürk'e...



ÖNSÖZ

Bu tez çalışması 5220023 numaralı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1505 Üniversite-Sanayi iş birliği ile Bimetal Malzemelerin Özlü/Masif Tel Beslemeli Robotik Ark Kaynağı ile Eklemeli İmalat Sisteminin Geliştirilmesi projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Projeye verdikleri desteklerden dolayı Gedik Kaynak’a ve TÜBİTAK’a teşekkür ederim.

Manevi mirasçısı olduğum, eğitime ve bilime önem veren kadının toplumda ve eğitimde yer almasında büyük katkıları olan Başöğretmen Mustafa Kemal ATATÜRK’e sonsuz teşekkürler. Değerlerinin mirasçısı olmak şahsım adına gurur sebebidir.

Tez sürecimde tecrübeleriyle bana yol gösteren tez danışman hocam Doç. Dr. Savaş DİLİBAL ve metalürji ve mekanik testlerin süreçlerinde tavsiye ve tecrübeleriyle beni yönlendiren kıymetli eş danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Uğur GÜROL’a teşekkürlerimi sunarım.

Tezin deneysel çalışmalarının gerçekleştirilmesi, çizim ve teknik bilgi alanında desteklerini esirgemeyen değerli proje arkadaşım Makine Yüksek Mühendisi ve Uluslararası Kaynak Mühendisi Batuhan TURGUT’a, metalografik incelemeler ve test aşamalarında yardımlarını esirgemeyen proje arkadaşım Metalurji Malzeme Mühendisi ve Uluslararası Kaynak Mühendisi Hülya KUMEK’e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans yapma konusunda beni yüreklendiren sevgili teyzem Havva KAYA’ya ve sevgili dayım Özgün ŞENEL’e teşekkür ederim. Bugünlere gelmemde büyük paya sahip olan, hayatımın her döneminde beni maddi manevi destekleyen, hayata bakışını duruşunu örnek aldığım, akıl hocam sevgili babam Önder AKPINAR’a teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2023

Deniz Eylül AKPINAR

Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Eklemeli İmalat	6
2.1.1 Fotopolimerizasyon.....	8
2.1.2 Toz yatağında ergitme.....	9
2.1.3 Malzeme püskürtme	11
2.1.4 Tabaka laminasyon	12
2.1.5 Malzeme ekstrüzyon	13
2.1.6 Bağlayıcı püskürtme	14
2.1.7 Doğrudan enerji biriktirme.....	15
2.2 Metal Eklemeli İmalat.....	16
2.2.1 Toz sermeli imalat.....	18
2.2.1.1 SLS (Selective laser sintering)	19
2.2.1.2 SLM (Selective laser melting)	19
2.2.1.3 DMLS (Direct metal laser sintering).....	20
2.2.1.4 EBM (Electron beam melting)	20
2.2.1.5 LENS (Laser engineered net shaping)	21
2.2.2 Toz beslemeli imalat	21
2.2.3 Tel beslemeli imalat	22
2.3 Tel Ark Eklemeli İmalat.....	24
2.4 Bimetal Komponent	37
3. DENEYSEL YÖNTEMLER.....	39
3.1 Robotik WAAM Hücresi ile Bimetal Parçaların Üretilmesi.....	40
3.2 Numune Hazırlığı.....	46
3.3 Tahribatsız ve Tahribatlı Muayene İşlemleri	47
3.3.1 Görsel muayene ve dijital radyografik muayene	48
3.3.2 Makroyapı – mikroyapı incelemeleri	49
3.3.3 Çekme deneyi.....	49
3.3.4 Charpy çentik darbe deneyi.....	50
3.3.5 Vickers sertlik deneyi.....	51
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	53
4.1 Tahribatsız Muayene Sonuçları.....	53
4.1.1 Görsel muayene sonuçları (VT).....	53
4.1.2 Dijital radyografik muayene sonuçları (RT)	53

4.2 Tahribatlı Muayene Sonuçları	54
4.2.1 Makroyapı analizi sonuçları	55
4.2.2 Mikroyapı analizi	56
4.2.3 Vickers sertlik deneyi sonuçları	57
4.2.4 Çekme deneyi sonuçları	58
4.2.5 Charpy çentik darbe deneyi sonuçları	62
4.3 Sıcaklık Grafikleri ve Termal Kamera Görüntüleri	65
5. SONUÇLAR	70
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	81



KISALTMALAR

AM	: Additive Manufacturing (Eklemeli İmalat)
CAD	: Computer Aided Desing (Bilgisayar Destekli Tasarım)
EN	: Avrupa Standartı
GMAK	: Gaz Metal Ark Kaynağı
GTAK	: Gaz Tungsten Ark Kaynağı
ISO	: Uluslararası Standart
MIG	: Metal Inert Gaz
MAG	: Metal Aktif Gaz
TS	: Türk Standardı
TIG	: Tungsten Inert Gaz
WAAM	: Wire Arc Additive Manufacturing
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertliği)

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: ASTM F2792 Standartında Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	8
Çizelge 2.2: TAEİ Temel İşlem Parametreleri	26
Çizelge 2.3: WAAM Sistemlerinin Karşılaştırılması	28
Çizelge 3.1: Tellerin ve Altlık Plakanın Tipik Kimyasal Analiz Değerleri	41
Çizelge 3.2: Telin Tipik Mekanik Değerleri.....	42
Çizelge 3.3: Koruyucu Gaz Kimyasal Bileşimleri	42
Çizelge 3.4: Üretim İşlemlerinde Kullanılan Kaynak Parametreleri.....	42
Çizelge 3.5: Bimetal Parçanın Katmanlarının Akım ve Voltaj Değerleri	45
Çizelge 4.1: Sertlik Deneyi Sonuçları	57
Çizelge 4.2: 600 G (1.Bölge) Çekme Testi Sonuçları	59
Çizelge 4.3: Arayüzey (2.Bölge) Çekme Testi Sonuçları.....	59
Çizelge 4.4: Paslanmaz (3.Bölge) Çekme Testi Sonuçları	59
Çizelge 4.5: 316L Paslanmaz Bölge Çentik Darbe Sonuçları	63
Çizelge 4.6: Arayüz Bölge Çentik Darbe Sonuçları.....	63
Çizelge 4.7: 600 G Bölge Çentik Darbe Sonuçları.....	63

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Eklemeli İmalat Sisteminin Üretim Safhaları	7
Şekil 2.2: Eklemeli İmalat İle Üretilen Bir Komponent	7
Şekil 2.3: a) DLP Yöntemi b) CDLP Yöntemi, c) SLA Yöntemi	9
Şekil 2.4: Toz Yatağında Ergitme Şeması	10
Şekil 2.5: PJM Yöntemi (Şematik)	11
Şekil 2.6: Tabaka Laminasyon Şematik Gösterim	12
Şekil 2.7: Malzeme Ekstrüzyon Yöntemi	13
Şekil 2.8: Bağlayıcı Püskürtme Şematik Gösterim	14
Şekil 2.9: İki DED Şemaları (A) Toz-Lazer (B) Elektron Işını ve Tel	15
Şekil 2.10: Eklemeli İmalat Teknolojisi İle Üretilen Endüstriyel Ürünler	18
Şekil 2.11: Toz Sermeli Metal Eklemeli İmalat Şematik Gösterim	19
Şekil 2.12: DMLS Yönteminin Şematik Gösterimi	20
Şekil 2.13: Toz Sermeli Metal Eklemeli İmalat Şematik Gösterimi	22
Şekil 2.14: Tel Elektron Işını Eklemeli İmalat İşleminin Şematik Gösterimi	23
Şekil 2.15: Tel Ark Eklemeli İmalat Şematik Gösterimi	24
Şekil 2.16: Farklı Tel Ark Eklemeli İmalat İşlemlerinin Şematik Gösterimi: (a) GMAK-Tabanlı, (b) GTAK-Tabanlı ve (c) PAK-Tabanlı WAAM	27
Şekil 2.17: WAAM Hücresinde Kullanılan Ekipmanlar	28
Şekil 2.18: Oscillate-WAAM Konik Kabuk (a) Konik Kabuk Modeli (b) WAAM Konik Kabuk	31
Şekil 2.19: Üretilen Bimetal Komponent	33
Şekil 2.20: P91/740H Bimetalik Yapı Oluşturmak İçin Kullanılan Son WAAM Oluşturma ve Yazdırma Stratejisi	36
Şekil 2.21: Bimetal Parçanın Sertlik Grafiği	37
Şekil 3.1: Çalışma İşleyişi Organizasyon Şeması	39
Şekil 3.2: Robotik WAAM Deney Hücresi	40
Şekil 3.3: Bimetal WAAM Yığılma Prosesi	44
Şekil 3.4: Üretilen Bimetal Parçanın Bileşenleri	45
Şekil 3.5: Robotik WAAM ile Üretilen Bimetal Parça	46
Şekil 3.6: Tel Erozyon Yöntemiyle Numune Çıkarma	46
Şekil 3.7: Tahribatlı Muayene Numune Teknik Çizimleri	47
Şekil 3.8: Dijital Radyografi Çekim Düzenliği	48
Şekil 3.9: Çekme Numune Ölçüsü	49
Şekil 3.10: Çekme Deneyi Numuneleri	50
Şekil 3.11: Çentik Darbe Numune Ölçüsü	51
Şekil 3.12: Çentik Darbe Numuneleri	51
Şekil 3.13: Sertlik Ölçümü Numunesi	52
Şekil 4.1: Bimetal Parçanın Dijital Radyografi Film Görüntüsü	54
Şekil 4.2: Bimetal Parçadan Alınan Numunenin Makroyapı Görüntüsü	55

Şekil 4.3: Bimetal Parça Numune Mikroyapı Görüntüsü a) Arayüzey Mikroyapısı b) Arayüzey Mikroyapısı c) Sert Dolgu (600 G) Mikroyapısı d) Östenitik Paslanmaz Çelik (316L) Mikroyapısı	56
Şekil 4.4: Bimetal Parçanın Sertlik Grafiği	57
Şekil 4.5: Çekme Testi Cihazında Numune Görüntüsü.....	58
Şekil 4.6: Çekme Testi Sonrası Numune Görüntüleri	59
Şekil 4.7: 600 G (1.Bölge) Çekme Deneyi Grafiği	60
Şekil 4.8: Arayüzey (2.bölge) Çekme Deneyi Grafiği	60
Şekil 4.9: Östenitik Paslanmaz Çelik (3.bölge) Çekme Deneyi Grafiği.....	60
Şekil 4.10: Çentik Darbe Cihazında Numune Görüntüsü.....	62
Şekil 4.11: Çentik Darbe Testi Sonrası Numune Görüntüleri	62
Şekil 4.12: Üretilen Bimetal Parçanın Çentik Darbe Grafiği	64
Şekil 4.13: Çentik Darbe Kırık Yüzeyler; a) Östenitik Paslanmaz Çelik b) Sert Dolgu c) Arayüzey	64
Şekil 4.14: Arayüzey Bölgesi Kırılma Yönü İncelenmesi.....	65
Şekil 4.15: Paslanmaz ve 600 G Tel Kullanılarak Biriktirilmeden 5 Saniye Önce Çekilen Termal Kamera Görüntüleri	67
Şekil 4.16: Paslanmaz ve 600 G Tel Kullanılarak Biriktirme Esnasında Alınan Termal Kamera Görüntüleri.....	67
Şekil 4.17: 50.Katmanın Termal Kamera Görüntüleri a) Biriktirilmeden 5 Saniye Önce b) Biriktirilme Esnasında.....	68
Şekil 4.18: Bimetal Parçanın Sıcaklık Grafiği.....	69

ROBOTİK TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK VE SERT DOLGU KAYNAK TELİ KULLANILARAK ÜRETİLEN BİMETAL PARÇANIN KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Robotik ark kaynağı ile eklemeli imalat (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) bilgisayar ortamında üç boyutlu CAD verisi hazırlanmış parçanın, MIG/MAG kaynak yöntemi kullanılarak katman katman üretildiği robotik sistemlerin kullanıldığı bir eklemeli imalat yöntemidir. Geleneksel yöntemlerle üretilmeyen büyük ölçekli metal parçaların üretimi bu yöntemle sağlanmaktadır. WAAM ile ilgili birçok araştırma olmasına rağmen bu yöntemle bimetal üretimi dünyada yenidir. Bimetal yapılar, birbirinin avantajlı özelliklerini bir araya getirip fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşme sağlamaktadır. Robotik ark kaynağı ile eklemeli imalat yöntemi otomotiv, denizcilik, savunma sanayi ve havacılık alanlarında farklı ürünlere dönüştürülmektedir. Robotik ark kaynağı kullanılarak fonksiyonel bimetal malzemelerin üretilerek savunma sanayisinde üstün özellikli ürünler elde edilebilir.

Bu çalışmada 5220023 numaralı TÜBİTAK TEYDEB 1505 Üniversite-Sanayi iş birliği ile Bimetel Malzemelerin Özlü/Masif Tel Beslemeli Robotik Ark Kaynağı ile Eklemeli İmalat Sistemlerinin Geliştirilmesi projesi kapsamında tasarlanan robotik tel ark eklemeli imalat hücresi kullanılmıştır. Hücrede OTC-Daihen FD-B6L kaynak robotu ve GeKaMac Power MIG GPS WB P500L kaynak makinesi yer almaktadır. Östenitik paslanmaz çelik ve sert dolgu kaynak telleri katman katman biriktirilerek WAAM yöntemiyle bimetallik yapı üretilmiştir. Üretilen bimetallik yapıya ilk olarak görsel muayene ve dijital radyografik muayene uygulanmıştır. Sonrasında üretilen parçadan alınan numunelere makroyapı analizi, mikroyapı analizi, sertlik ve çekme ve çentik darbe testleri yapılmıştır. Bimetel yapının arayüz bölgesi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Eklemeli İmalat, MIG/MAG, Tel Ark Eklemeli İmalat, CAD, Robot Kaynak Metodu.*

CHARACTERIZATION OF THE BIMETALLIC PART PRODUCED USING AUSTENITIC STAINLESS STEEL HARD FACING WELDING WIRES BY ROBOTIC WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING

ABSTRACT

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) with robotic systems is an additive manufacturing method that uses MIG/MAG welding to produce a three-dimensional CAD model in a computer environment. This method enables the production of large-scale metal parts that cannot be produced with traditional methods. Although there are many studies on WAAM, bimetal production with this method is relatively new in the world. Bimetal structures combine the advantageous properties of each metal to improve their physical and mechanical properties. The robotic welding method is used to convert various products in the automotive, maritime, defense and aerospace industries. By using robotic arc welding, functional bimetal materials can be produced, and superior products can be obtained for the defense industry. When the literature is examined, there are studies that generally prefer laser as the heat source for bimetal material production.

In this study, the robotic wire arc additive manufacturing cell designed within the scope of TÜBİTAK TEYDEB 1505 University-Industry cooperation project with the number 5220023 was used. The OTC-Daihen FD-B6L welding robot and GeKaMac Power MIG GPS WB P500L welding machine are used in the cell. Bimetallic structures were produced by deposited austenitic stainless steel and 600 G welding wires layer by layer using the WAAM method. The produced bimetallic structure was first subjected to visual inspection and digital radiographic examination, and then microstructure analysis, hardness, and tensile tests were performed on the samples taken from the produced part. The interface region of the bimetal structure was examined.

Keywords: *Additive Manufacturing, MIG/MAG, Wire Arc Additive Manufacturing, CAD, Robotic Welding Method.*

1. GİRİŞ

Günümüzde yaşanan küreselleşme sebebiyle üretim sektörlerinde büyük bir rekabet oluşmuştur. İnsan ihtiyaçlarındaki artışın teknolojiye duyulan gereksinimle doğru orantılı olması üretim yöntemlerine de yenilikler getirmiştir. Geleneksel üretim yöntemlerine olan ihtiyaç devam etse de yeni ve gelişmiş alternatif üretim tekniklerine talep oluşmuştur.

Başarıların sürdürülmesi, ürün ve hizmetlerin kaliteli olmasına ve sürekli gelişim içerisinde olmasına bağlıdır. Teknolojik gelişmelerde yaşanan artış ve ürünlerin çeşitliliği bazı zorunlulukları beraberinde getirir. İmalat sektöründe yeni yöntemlerden olan eklemeli imalat bu zorunluluklar sayesinde geliştirilmiştir.

Endüstriyel devrimin en önemli üretim metotlarından olan eklemeli imalatın son yıllarda popülerliği artmaktadır. Geleneksel imalat yöntemlerinden oldukça farklı olan bu yöntemde kullanılan hammadde katman katman biriktirilerek parça oluşturulur.

Eklemeli imalat ile üretim, tasarım ve çizimi yapılan parçaların ürünlere dönüştürülmesinde 3 boyutlu yazıcı kullanılmaktadır. Eklemeli imalat katı, sıvı veya toz formda hammaddeler kullanılır.

Parçayı oluşturmak için malzeme tabakasının eritilerek ürün eldesi, kesici alet talaşlı imalat tezgâhları kullanılmadan ve atık malzeme oluşturulmadan sağlanır. Bu teknoloji dünyada gittikçe ilgi görmekte ve hızlı gelişmektedir.

Endüstri 4.0 içerisinde yer alan eklemeli imalat, başta savunma sanayi olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Geleneksel talaşlı imalat yöntemleriyle yapılan üretimle karşılaştırıldığında son ürüne ulaşmak daha kolaydır. Geleneksel imalat yöntemlerinde metal malzemelerden ürün elde edilmesi parça üzerinden talaş kaldırılarak sağlanıyordu. Eklemeli imalat ise katman katman birbiri üzerine birikerek üretim sağlanmaktadır. Klasik yöntemlerdekinin aksine buradaki amaç malzeme çıkarmak değil malzeme eklemektir. Eklemeli imalat ile üretimde hammaddeden kazanç sağlayabilmesi yöntemin avantajlarından biridir.

Eklemeli imalat ile bir nesne üretilmek geleneksel yöntemlere göre daha avantajlıdır. Eklemeli imalatta üretim daha kısa sürede sağlanır ve malzeme kullanımı daha azdır. Bu avantajlar maliyet açısından sıkıntılı ve ulaşılması zor malzemelerin üretilmesi konusunda önem kazanmaktadır. Ayrıca geleneksel yöntemlere nispeten imalatı zor, kişiye özel ve karmaşık parçaların üretimini de yapabildiği düşünülürse gelecek vadeden bir yöntemdir. Bu sebepler dolayısıyla eklemeli imalat üzerindeki çalışmalar hızla devam etmektedir.

Makine imalat sanayisi için önemli olan metal malzeme kullanımı tüm sektörler içinde önemlidir. Eklemeli imalatta metal kullanımı da oldukça yaygındır. Besleme malzemesinin türüne göre metal eklemeli imalat üç çeşide ayrılır; Toz yatağı ergitmeli, toz beslemeli ve tel beslemeli imalat sistemler. Toz ve tel besleme yöntemlerinin metal eklemeli imalat yöntemlerinin kullanımı yaygındır. Metalik malzeme imalatında eklemeli imalat kullanılmasının avantajları arasında bimetalik bileşenler kullanılarak özel yapılar tasarlanabilmesi ve imal edilebilmesi vardır.

Tel ark eklemeli imalat ürünlerin eklemeli imalat ile üretilmesi üzerine geliştirilen farklı yöntemlerden biridir. Literatürde 'wire arc additive manufacturing' (WAAM) olarak geçmektedir. Besleme malzemesi olarak tel kullanılması da oldukça umut vericidir. Kaynaklı imalatın içerisinde yer alan bu üretim yönteminde metal telin ergitilmesi kaynak arkı ile sağlanır. Düzgün geometride ergiyen ve sonra katılaştan metalin üst üste birikmesiyle ürün ortaya çıkar. Diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre daha avantajlı olmasının sebebi büyük parçaların kısa sürede üretilmesidir.

Toz ve lazer tabanlı eklemeli imalat yöntemlerindeki biriktirme verimliliği %14 iken WAAM yönteminde bu oran %100 e kadar çıkabilmektedir [1]. Lazer ve toz yataklı sistemlerde sırasıyla %2-5 ve %15-20 civarlarında olan enerji verimliliği ise WAAM yöntemlerinde ortalama %90 civarlarındadır [2]. WAAM yönteminde parça büyüklüğüne bağlı olarak geleneksel imalat yöntemlerine nazaran %40-60 imalat süresi ve %15-20 arası ek işleme süresinde kısaltmalar görülmektedir [3]. Yani genele bakıldığında tel ark eklemeli imalat, biriktirme verimliliği, enerji verimliliği imalat süresi açısından avantaj sağlar. Ek işlemlerde de kısaltmalar görülmesi yine tel ark eklemeli imalatı avantajlı kılar.

Metal veya alaşım tozlarının kullanıldığı eklemeli imalat yöntemlerine kıyasla WAAM ile parça üretmek son yıllarda tercih sebebi olmuştur. Metal tozlarının

maliyetli oluşu ve ülkemizde üretimlerinin sınırlı olması WAAM ile nesne üretimini cazip hale getirmiştir. WAAM sistemlerinin gelişimi ülkemizde çeşitli firmalar tarafından (Coşkunöz, Roketsan vs.) sürdürülmektedir. Fakat bu firmalar tek malzemeli çalışmalar yapmaktadırlar.

Bu tezde, robotik ark kaynağı ile eklemeli imalat yöntemi kullanılarak östane paslanmaz çelik ve sert dolgu teli ile bimetal parça üretilecek. Robotik ark kaynağıyla üretim kaynak hücresinde yapılacaktır. Kaynak hücresinde kaynak makinesi, robot kol, koruyucu gaz bulunmaktadır. 3 pasolu 30 katman paslanmaz tel, 3 pasolu 30 katman sert dolgu kaynak teli kullanılarak biriktirme sağlanacaktır.

Robotik ark kaynağıyla nitelikli parça imalatı üzerine çalışılacak olup nitelikli bimetal parça katman ve malzeme farklı içeriklere sahip olacak şekilde üretilecektir. Bir malzemenin sağlayamadığı mekanik veya fiziksel özellikleri diğer malzemeyle destekleyecektir. Üretilecek olan bimetal parça farklı malzeme özellikleri sergileyebilecektir.

Akabinde ara yüzeydeki mikroyapıları incelenecek ve üretilen bimetal malzemenin mekanik dayanımı ortaya çıkaracak uygun parametreler belirlenecektir. Üretilen bimetal komponent tahribatlı ve tahribatsız testler uygulanacaktır.

Çalışma süresince ELOX SG 316L Si ve 600 G kaynak telleri kullanılarak bimetalik yapı robotik ark kaynağı ile üretilecek, uygun kaynak parametreleri tespiti edilecek ve mikroyapı mekanik testleri incelenecektir.

Tezin amacı robotik ark kaynağı ile eklemeli imalat yöntemi kullanılarak parametre karakterizasyon ilişkisi ortaya çıkarılmış paslanmaz ve sert dolgu kaynak telleri ile üretilen bimetal parçanın mikroyapı ve mekanik analizlerinin gerçekleştirilmesidir. Bu kapsamda robotik kaynak hücresinde bimetal malzeme üretimi sağlanacaktır. Üretilen bimetal parça önce tahribatsız muayene sonrasında tahribatlı muayeneye tabi tutularak sonuçlar 4. bölümde açıklanacaktır.

Literatür detaylı incelendiğinde görülmüştür ki bu tez Türkiye bazında bimetal WAAM üretimi ve karakterizasyonu üzerine yapılan ilk çalışmadır. Uluslararası bakıldığında alanında yapılan sayılı çalışmalardan biridir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Eklemeli imalat hammaddeden ve zamandan sağladığı kazançlar sebebiyle birçok firmanın ilgisini çekmiş ve araştırmalara konu olmuştur.

Norsk Titanyum firması ve ticari uçak firması Airbus bir anlaşma yaparak uçak gövdelerini ve kanatlarını WAAM ile üretmektedirler. Havacılık sanayisinde kullanılan ve maliyetli titanyum alaşımlarındaki atıklar bu sayede azaltılarak hammaddeden tasarruf edilmiştir [4].

Yılmaz ve Uğla, daha önce metal eklemeli imalatla ilgili yaptıkları çalışmalarda parçaların mekanik özellik ve mikroyapılarını ve üretim yöntemlerinden hangilerini kullanılarak üretildiğini değerlendirmişlerdir. Yılmaz ve Uğla öncelikle, WAAM ile üretilen parçaların ekonomik bir şekilde üretildiğinden söz ederler. Kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkisinden de söz etmişlerdir. Fakat parçanın maruz kaldığı tekrarlı yüksek ısı sebebiyle kalıcı gerilmelerin oluştuğunu ve bunun sonucunda parça mikroyapısında anizotropik yapı gözlemlenebileceğine de değinmişlerdir. Son olarak birçok metal eklemeli imalat yöntemi üzerine çalışmalar olmasına rağmen birden fazla metal ile birleştirilip kullanıldığı çalışmalar literatürde yetersizdir [5].

Nikam ve arkadaşları, tel beslemeli plazma ark kaynak parametrelerinin üretilen parçanın katman geometrisini nasıl etkilediğini gözlemlemişlerdir. Hammadde olarak çapı 0,3 mm olan tel formu sertleştirilmiş TS EN ISO 4957 takım çeliği ve koruyucu gaz olarak Argon kullanarak katman oluşturmuşlardır. Oluşturulan katmanlarda plazma yüksekliği ve tel besleme hızının düşüklüğü sebebiyle aşırı ergime, hatta buharlaşma gözlemlenmiştir. Plazma gücünün düşük olması ve tel besleme hızının yüksek olması sebebiyle tel istenildiği gibi ergimemiş ve katmanlar birbirine istenildiği gibi bağlanamamıştır. Bu nedenle plazma gücünü düşürüp tel besleme hızını arttırıp ergimeyi kontrol altına almışlardır. Kaynak parametrelerinden tel besleme hızını 1275 mm/dk, plazma gücünü 450 W, ergitme oranını ise 42 gr/sa olarak ayarlamayı uygun görmüşlerdir [6].

Clark ve ark., tel ark eklemeli imalat kullanarak uçakların gaz türbinnindeki gövde parçalarının üretilip üretilmeyeceğini araştırmışlardır. MIG kaynağı ve koruyucu Argon gazı kullanarak bir nikel alaşımı olan Inconel 718 hammaddesinden üretim yapmışlardır. Üretilen parçanın numunelerinde mikro düzeyde çatlaklar olduğunu gözlemlemişlerdir. Sebebinin kalıcı gerilmeler ve çarpılmalardan olabileceğini söylemişlerdir. Olumsuz sonuçların olmaması için kaynak parametrelerinin katmanlar arası soğuma sürelerinin iyi ayarlanması gerektiğini de belirtmişlerdir. Sonuç olarak, tel ark eklemeli imalat yönteminin kullanılması karmaşık parça üretiminde ekonomik ve uygun bir tercih olacağını da söylemişlerdir [7].

Zhao ve ark., tel ark eklemeli imalat yönteminde sürecinde kaynak başlangıcından sonuna kadar oluşan ısı etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarını 1,2mm kalınlıkta H08Mn2Si alaşım teli ve koruyucu Argon gazı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlara bakıldığında önce atılan pasonun sonraki pasoya ön ısıtma etkisi yarattığını katman katman atılan pasoların kendi içlerinde incelenmesiyle katılmış alt pasonun tekrardan ergidiğini ve bu ergimenin sonucunda her katmanda metalurjik bağların oluştuğunu, katman yüksekliğinin artması sebebiyle eriyik havuzunun sıcaklığında azalma ve ısı iletiminde azalma, radyasyon ve konveksiyon ile yayılan ısıdan daha büyüktür. Sonuç olarak, yönleri aynı olan pasolardaki sıcaklık gradyanının zıt yönlü pasolara kıyasla daha büyük olduğunu ve bu sebeple aynı yönde katmanlandığında ısı iletiminin daha iyi olduğu gözlemlemişlerdir [8].

Busachi ve ark., WAAM yöntemlerini incelemişler ve bu sistemlerinin günümüzde nasıl kullanıldığını araştırmışlardır. Belirttikleri ilk şey tel ark eklemeli imalat ile hammadde kullanımındaki azalmalardır. Her paso sonrası yapılan haddeleme işleminin kaynaktaki kalıcı gerilmeleri azaltabileceğinden de söz etmişlerdir. Parça üretilirken titreşiminin olumsuz etkilerini titreşim önleyen yatak ile önlemişlerdir.

Otonom sistemlerde kullanılan maskeleme gazlarından olan Argon gazı, merkezi bir sistemden beslenmektedir. Argon gazının ısıl işlemlerde kullanımı ve uzun süreli üretimlerde mevcut gaz tüplerinin değişim zamanını ortadan kaldırması amacıyla daha fazla verim alınabileceği ortaya koyulmuştur [9].

2.1 Eklemeli İmalat

Eklemeli İmalat yöntemi, üç boyutlu CAD verileri kullanılarak, malzemelerin katman katman birikmesiyle karışık geometrilili parçaların daha hızlı üretilmesini sağlayan bir imalat tekniğidir. Eklemeli imalat ile bir parça üretmek, geleneksel imalat yöntemlerine nazaran daha hızlı gerçekleştiğinden, eklemeli imalatın diğer adı da hızlı prototiplemedir.

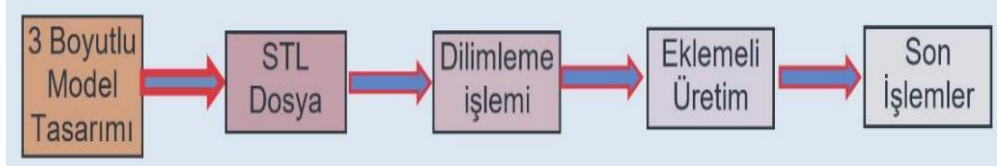
Eklemeli imalatın tarihi 150 yıl öncesine kadar dayanmaktadır. İki boyutlu (2B) katmanlardan serbest biçimli topografik harita oluşturmaya başlanması ile eklemeli imalat keşfedilmiştir [10]. Konuyla ilgili yapılan çalışmalar neticesinde, 1960'ların sonlarına doğru fotopolimerizasyon [11], 1972'de toz ergitme yöntemi ve 1979'da tabaka laminasyon yöntemi [12] olarak günümüzdeki eklemeli imalat yöntemlerinin versiyonları ortaya çıkmış ve bu konuda ilk patentler alınmaya başlanmıştır. Ancak akademik yayınlar ve patentlerdeki asıl artış 1990'ların başında görülmeye başlanmıştır. Seçici lazer ergitme yöntemi gibi yeni yöntemler 1990'ların başında [13] geliştirilmiş olup bunun yanında proses teknolojindeki başarılı ticarileşmeleri de bu yıllarda görülmektedir. Fotopolimerizasyon yöntemi 1988 yılında, malzeme ekstrüzyon ile tabaka laminasyon yöntemi 1991 yılında [10], lazer sinterleme yöntemi ise 1992 yılında ticarileştirilmiştir [11].

1990-2000 yılları arasında eklemeli imalat yöntemlerinde bir büyüme dönemi yaşanmıştır. Bu dönem Elektron ışını ergitme (EBM) gibi yeni süreçlerin geliştirildiği [14], halihazırdaki teknolojilerde ilerlemelerin görüldüğü ve eklemeli imalat ile ilgili yazılımların ve dosya formatlarında gelişmelerin görülmektedir. Bu yıllarda Stereolitografi (STL), Common Layer Interface (CLI), Layer Exchange ASCII Format (LEAF) ve Layer Manufacturing Interface (LMI) [10] gibi özel dosya formatlarının tanıtımları başlamış Materialise's Magics (1992) gibi programlar geliştirilmiştir [15].

Eklemeli imalat yöntemiyle üretilecek parçanın öncelikle Solidworks, Catia vb. bir bilgisayar destekli ortamda 3 boyutlu tasarımı yapılır. Tasarlanan model yüzey geometrisini küçük üçgenlere ayırarak yeniden oluşmasını sağlayan STL(StereoLithograph) dosya formatına çevrilir. Daha sonra bu modelden üretim yapılabilmesi için Cura, Slic3r, Meshmixer vb. 3 boyutlu yazıcı ara yüz programıyla

girilen parametrelere göre dilimleme işlemi yapılarak Gcode formatında katmanlara ayrıştırılır.

Gcode formatındaki katı model 3B eklemeli imalat makinesine gönderilip üretim işlemi başlatılır. İmalat işlemi tamamlanıp nihai ürünün kullanım amasına göre uğraması gereken son işlemleri vardır. Eklemeli imalat işlemiyle üretilen bir parçanın üretim safhaları Şekil 2.1’de görülmektedir [16].



Şekil 2.1: Eklemeli İmalat Sisteminin Üretim Safhaları

Kaynak: (Turhan ve Ozsoy, 2016)

Eklemeli üretim ile seramik, plastik ve metal gibi birçok malzeme türü üretilabilmektedir. Adından da anlaşılacağı üzere eklemeli imalat, geleneksel yöntemlerin aksine malzeme çıkararak değil malzeme ekleyerek bir ürün elde edilir.



Şekil 2.2: Eklemeli İmalat ile Üretilen Bir Komponent

Kaynak: (Turhan ve Ozsoy, 2016)

Katmanlı imalat yönteminde polimer malzemelerin kullanımı yaygındır. Metal ve seramik gibi hammaddeler de polimerler gibi bu yöntemle üretilabilmektedir. Eklemeli imalat ile üretilen polimerlerde önemli gelişmeler görülmüştür ve birçok polimer geliştirilmiştir. Son yirmi yılda katmanlı imalatta polimer parçaların fonksiyonel metalik parçalara dönüşümünde kayda değer çalışmalar yapılmaktadır [17].

Eklemeli imalat yöntemleri malzeme formu (tel veya toz), malzeme ekleme yöntemi (ışın veya ark) ve enerji kaynağının türü olmak üzere üçe ayrılır. Farklı

sınıflandırmalar vardır ancak ASTM F2792 standartında eklemeli imalat yöntemleri 7 farklı kategoriye ayrılmaktadır. Bu kategoriler çizelge 2.1’ de gösterilmiştir [18].

Çizelge 2.1: ASTM F2792 Standartında Eklemeli İmalat Yöntemleri

Proses Türü	Ticari Adı	Malzeme Türleri
Fotopolimerizasyon	SLA, DLP, 3SP, CLIP	Fotopolimer, reçine
Toz Yatağında Ergitme	SLS, DMLS, EBM, SLE	Metal, polimer, seramik
Malzeme Püskürtme	Polyjet, SCP, MJM, Projet	Fotopolimerler, polimerler, mum, metal
Tabaka Laminasyon	LOM, SDL, UAM	Kâğıt, Plastik, Metal
Malzeme Ekstrüzyon	FFF, FDM	Termoplastik, Filament
Direk Enerji Biriktirme	LMD, LENS, DMD	Metal, Seramik
Bağlayıcı Püskürtme	3DP, ExOne, Voxeljet	Plastik, metal, seramik

Kaynak: (American Society for Testing and Materials (AST M), Erişim Tarihi: 12.05.2020)

2.1.1 Fotopolimerizasyon

Bu işlem lazer ve optik kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Üretimin yapılacağı platform, reçine haznesinin üstünden katman kalınlığı boyunca indirilir ve sonra reçineye gönderilen UV ışını reçineyi katman katman katılaştırır. İlk reçine tabakasının katılaşmasından sonra katılaştıran katman üzerine tekrar atılan tekrar katmanlarındaki mekanik özellikleri olumsuz yönde etkileyen pürüzlülükler, sistemdeki kesici mekanizmalar yardımıyla katmanların üzerinden geçilerek giderilmektedir. Sonrasında, aşağı yönlü hareket eden platformla katılaştıran katmanın üzerine yeni katmanlar üretilebilir [19]. Son olarak, hazne içindeki reçine boşaltılır ve nihai ürün elde edilir. İşlem için standart katman kalınlığı 0.025- 0.5 mm arasındadır [20]. Boyut hassasiyetindeki yükseklik, yüzey kalitesi ve hızlı bir proses olması sebebiyle fotopolimerizasyon yöntemi avantaj sağlamaktadır. Pahalı bir proses olması, üretimdeki uzun süreç, foto-reçine malzemelerindeki kullanım sınırlılığı ve üretilen parçaların yüksek mukavete sahip olması için destek yapı kullanımının gereksinimi ise dezavantajları arasında yer alır.

Fotopolimerizasyon işlemi Şekil 2.3’te gösterildiği gibi kendi içinde stereolitografi (SLA), sürekli direkt ışık işleme (CDLP) ve direkt ışık işleme (DLP) olarak üç gruba ayrılabilir.



Şekil 2.3: a) DLP Yöntemi b) CDLP Yöntemi, c) SLA Yöntemi

Kaynak: (Aniwa 2017; Wallace,2014)

SLA yönteminde, yarı saydam bir tanka sıvı fotopolimer reçinesi doldurulur ve bir yapı platformuna batırılır. İmalat platformu batırıldıktan sonra, makinenin içindeki tek nokta lazer, ürünün enine ilk kesitini ve katmanını katılaştırarak oluşturur. İlk katman oluşturulup platform yukarı çıkarılır ve parçanın alt kısmında oluşan bir reçine tabakası akışı vardır. Bu işlem, her katman için tekrarlanır. Üretilen parça, mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla UV ile sertleştirilmeye maruz bırakılır [23].

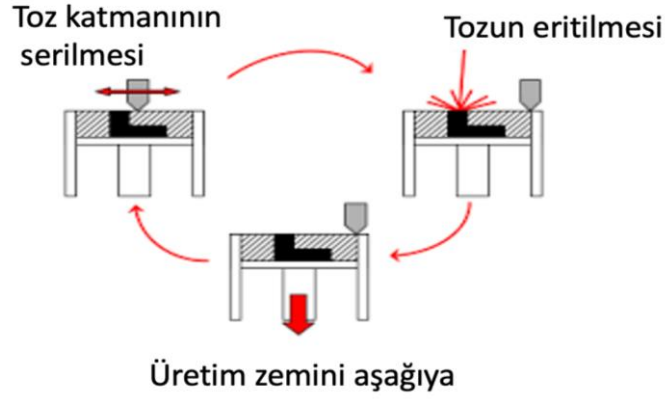
DLP imalat yöntemi, SLA imalat yöntemine benzemektedir. SLA ve DLP arasındaki en bariz fark, DLP’ de tabaka sertleşmesi projektör tarafından ultraviyole ışık ile sağlanırken SLA’ da ise, lazer kaynağı ile ışığa duyarlı reçineler katman katman sertleştirilir. Bu sebeple SLA daha hassas ve daha yavaş bir üretim işlemidir [21].

CDLP yönteminde DLP yöntemine benzer olarak parça üretimi yapılır. İki yöntem arasındaki bariz farklılık CDLP’ de, katman katman üretim esnasında üretim tabakası Z yönünde yukarı doğru sürekli hareket eder. İlk katman katıldıktan sonra reçine varilinden yukarı doğru çıkarılır ve üretilecek diğer katman projektör tarafından yayılan ışıkla katılaştırılarak üretim gerçekleşir [23].

2.1.2 Toz yatağında ergitme

Eklemeli imalat yöntemlerinin en önemlilerindendir. Toz haldeki hammadde katman katman bir tabaka üzerine serilir. Toz hammadde, lazer veya elektron ışını ile kontrollü bir şekilde eritilir. Tüm toz yataklı ergitme işlemlerinde, vakum gerekmektedir ve toz yatağının altındaki haznede oluşan tozlar bir silindir ya da toz serme pabucu ile ortalama 0,1 mm kalınlıktaki toz tabakası üretim platformuna

yayılmaktadır [19]. Bu yöntemde işlem parametreleri parça kalitesini oldukça etkilemektedir.



Şekil 2.4: Toz Yatağında Ergitme Şeması

Kaynak: (Additive Manufacturing Research Group, 2017)

SLS yöntemi, DMLS ile aynı prensipte çalışmaktadır ve çoğunlukla endüstride alanında SLS, polimer ve seramik tozlardan ürün üretmek için kullanılan sinterleme proseslerini belirtir. SLS yönteminde polimer tozları imalat tabakasına yayılır ve lazer sinterlemeyle katı hale getirilir. Son olarak, ortaya çıkan ürün basınçlı hava ile temizlenir. SLM yöntemiyle hammadde tozları tam eriyik haldedir. DML yönteminde ise hammadde tozları sinterleme ile oluşan sinter bağlarıyla birleştirilir. Ayrıca, DMLS tekniğinde alaşımlar, SLM tekniğinde ise alüminyum gibi tek bileşenli metaller tercih edilir.

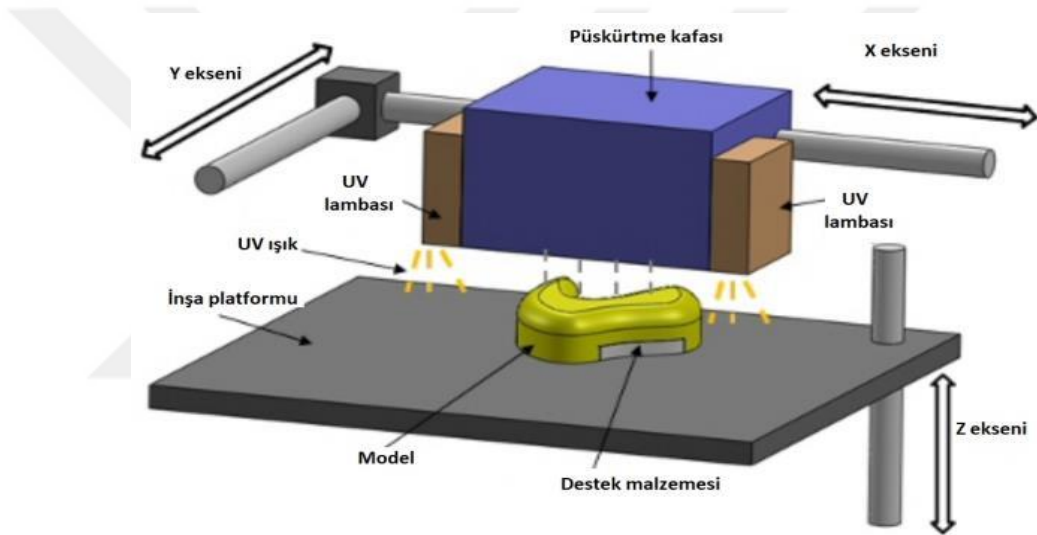
EBM (electron beam melting) tekniği ile imal edilen ürünlerde metal toz parçacıklarındaki ergimenin başlaması için enerjisi yüksek bir elektron ışını tercih edilir. Yüksek enerjili elektron ışını odaklanır ve toz tabakasını tarar. Belirlenen enine bir kesit alanında lokal ergitme yaparak toz halindeki hammaddeyi katı hale getirir. EBM ile üretilen parçalarda kalıcı gerilmeler ve distorsiyonlar daha az oluşur bu sebeple destek yapılara ihtiyaç duyulmaz çünkü [23].

EBM yönteminde SLS yöntemine nazaran daha az enerjiye ihtiyaç duyulur. Aynı zamanda ürün daha hızlı üretilebilir. Ayrıca EBM’de kullanılan toz partiküllerin boyutu ve yığılan katmanların kalınlığı daha büyüktür. EBM ile üretilen ürünlerin yüzey kaliteleri daha düşüktür.

Toz yataklı imalat yöntemlerinde bir diğeri multijet ergitme (MJF) yöntemi, diğeri toz yataklı eritme teknolojilerinden ayrı olarak detaylandırma işlemide içerir. MJF ile üretimde, imalat platformuna serilir. Toz yataklı ergitme yönteminde yüzey kaplaması, parça büzüşmesi, toz taşınması gibi zorluklar görülebilir.

2.1.3 Malzeme püskürtme

Malzeme püskürtme yönteminde iki boyutlu yazıcıya benzer bir cihaz kullanılır. Çok renkli polimer, mum ve metal malzeme kullanılarak ürün elde edilebilir. Malzeme üretim platformu hızasında yatayda hareket eden bir uçtan püskürtülüp tabaka elde edilir ve bu tabakaların ultraviyole ışıkla sertleştirilmesi sağlanır. Son olarak destek malzemesi çıkarılmadan önce tabakaların soğuması sağlanır.



Şekil 2.5: PJM Yöntemi (Şematik)

Kaynak: (Redwood, 2017)

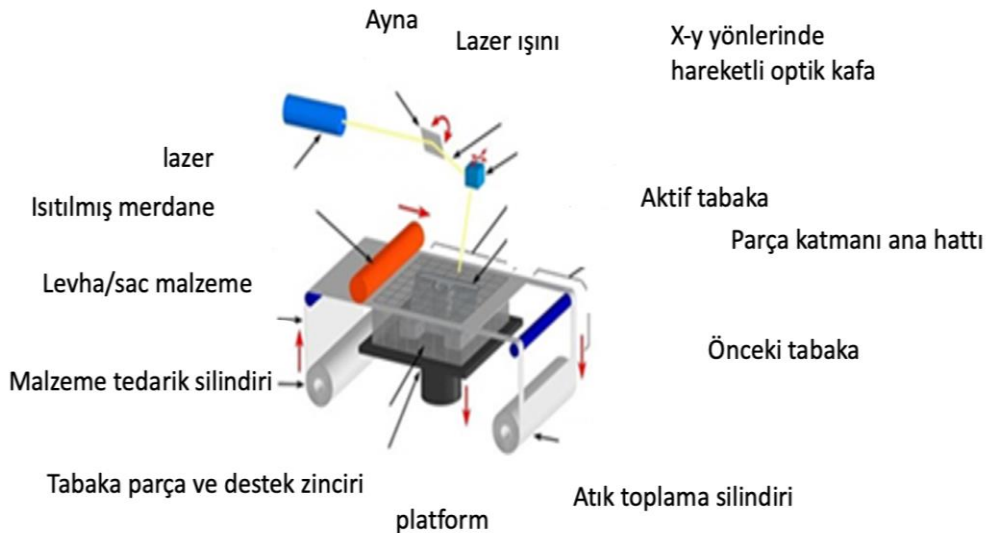
Malzeme püskürtme yöntemlerinden biri olan parçacık püskürtme (NPJ) yönteminde metal nano partiküllerinin katıldığı özel sıvı karışımdan oluşan bir kartuş yazıcıya yüklenir. Yüklenen kartuş oldukça ince damlacıklar oluşturup üretim platformuna püskürtülerek katman katman üretim sağlanmaktadır. Sistemde, katmanların katılaştırılmasında UV ışığı kullanılır ve oluşan ısı ile kartuştaki sıvı bulaşarak parça üzerinden uzaklaşır.

DOD (Drop on Demand) yöntemi malzeme püskürtme yöntemlerinden biridir. Ana malzemenin biriktirilmesi için ve çözülebilen destek malzemesini püskürten iki baskı ağızlığı kullanılmaktadır. DOD yazıcıları, püskürtme malzemesini damlacık şeklinde belirli bir yol hızasında parçanın katmanlarını ürettiği için geleneksel imalat

yöntemleriyle benzerlik göstermektedir. DOD yazıcıları düz bir yüzey elde edebilmek amacıyla, her katman üretildikten sonra tabakayı kontrol eden sıyırıcı bir aparat kullanılır. DOD teknolojisi kalıp uygulamalarında mum üretmek amacıyla kullanılır [23].

2.1.4 Tabaka laminasyon

Tabaka laminasyon yönteminin, üretim platformunda tabakayı ilerleten besleme mekanizması, alt ve üst tabakayı birleştirmek amacıyla basınç uygulamak amacıyla ısıtılmış merdane ve ürünlerin her bir katmanda dış hattını kesen lazer bileşenlerine sahip olduğu Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Yapışkan kaplı sac tabakaları üst üste yığılarak birleştirilmiş ve kesilerek parçalar üretilmiştir. Her bir kesme işlemi bitiminde platform seviyesi tabaka kalınlığı kadar indirilir ve önceden üretilen tabakanın üstüne yeni bir tabaka eklenerek üretime devam edilir. Sonrasında imalat platformu, yavaş yavaş yükseltilerek gerekli ısıya ulaştırılmış olan merdane aracılığıyla üretilen yeni katmanları birleştirmek maksadıyla haddelemeye benzeyen bir basınç uygular ve lazer imal edilen levhanın kullanılan kısmı kesilir. Nihai parça üretilene kadar bu basamaklar tekrarlanır [25]. Kullanışsız ve lazer kesimli atık saclar atık toplama silindiri ile toplanır. Krar ve Gill (2003) çalışmalarında, hızlı üretim ve düşük maliyet olmasına rağmen parçanın mukavemetinin ve tamlığının üretim sırasında kullanılan yapıştırıcıyla alakalı olduğunu bildirirler [19].



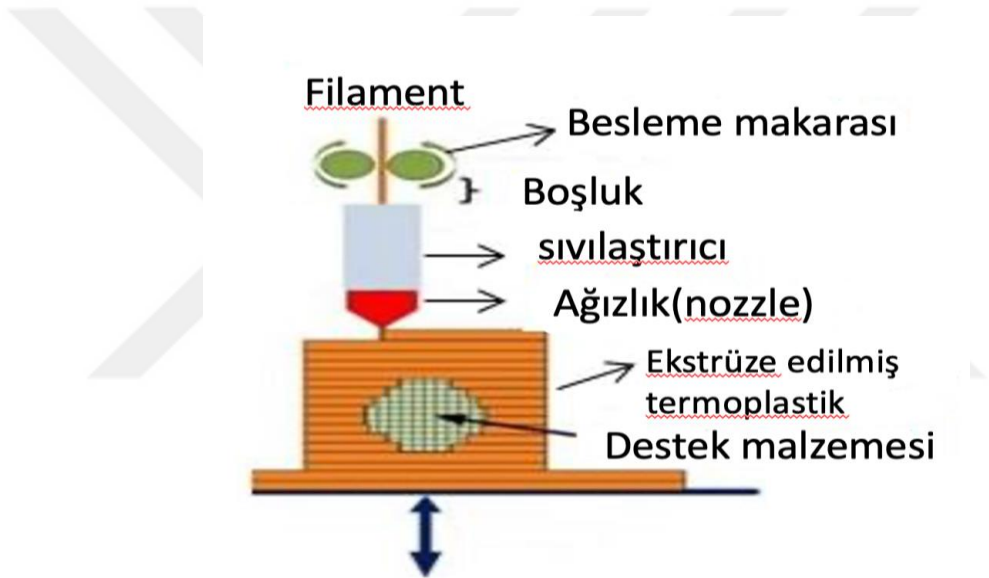
Şekil 2.6: Tabaka Laminasyon Şematik Gösterim

Kaynak: (Udroiu ve Braga, 2017)

Ahn ve ark., 2012 yılında LOM (tabakalı obje imalatı) yöntemi ile imal edilen parçalarda yüzey pürüzlülüğünde etkili olan parametrelerin araştırılması üzerine çalışmışlardır. Tabaka kalınlığının (LT) yüzey pürüzlülüğüyle doğru orantılı artış gösterdiğini ve yüzey açısı 90° olduğunda ise yüzey pürüzlülüğünde düşme olduğunu söylerler [26].

2.1.5 Malzeme ekstrüzyon

Bu yöntemde, beslenme makarası yardımıyla filamentler hareket ettirilir, sıvı hale getirilen filamentler x ve y ekseninde yatay hareket yapan ağızlık ile z yönü boyunca hareket imkânı olan üretim platformuna dökülür. Bu yöntemde polimerler, plastikler ve kompozit malzemeler kullanılır.



Şekil 2.7: Malzeme Ekstrüzyon Yöntemi

Kaynak: (Dreams, 2017)

Chua ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları bir çalışmada malzeme ekstrüzyon yöntemiyle yüksek kalitede bir yüzey elde etmenin birçok unsura bağlı olduğunu ancak en önemli faktörün malzemenin aktığı ağızlığın (nozzle) kare propozisyonunda bulunması gerektiğini bildirmişlerdir [28].

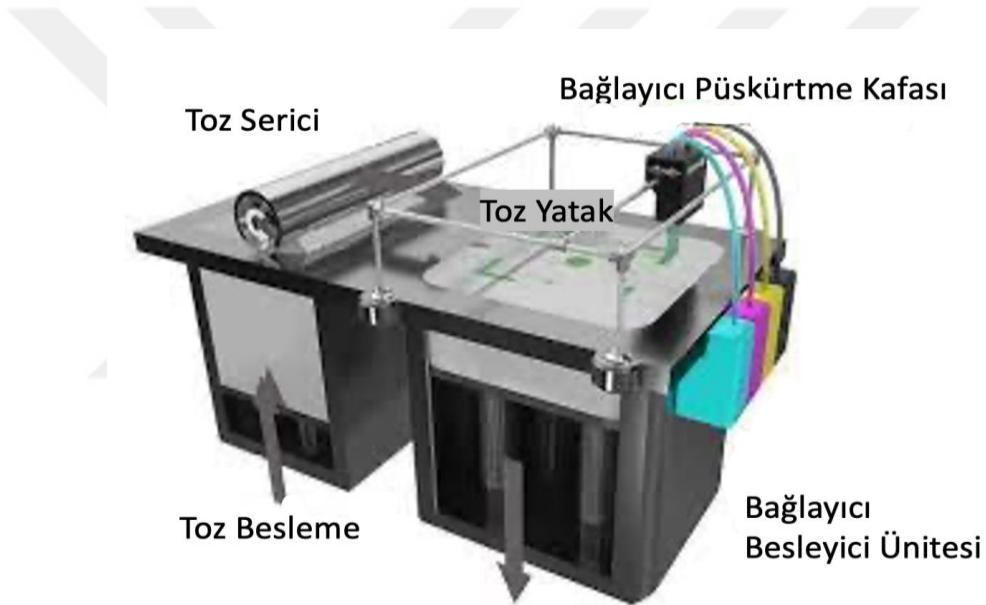
Chua ve arkadaşları, 0.178 mm- 0.356 mm aralında bir tabaka kalınlığından söz ederler. FDM ile üretilen parçarda anizotropik doğaya sahip olmaları sebebiyle katman yönlerine bağlı olarak mekanik özellikleri değişmektedir. Katmanların yönlenmesi Katman yönü, 90° lik bir açı ile çekme yükü ile uygulanıyorsa üretilen ürünün mukavemeti düşüktür. Katmanların yönü çekme yükü ile paralelse

seyrediyorsa ürün mukavemetini daha yüksektir, Katmanlara paralel bir eğilme yükü varsa ürün mukavemetinin düşüktür ve eğilme yükünün katmanlara dik ise ürün mukavemeti daha yüksektir [28].

Gibson ve diğerleri (2010), yüksek boyut hassasiyeti istenen ürünler üretilirken yer çekimi ve yüzey geriliminin hesaplanması ve doğru sonuçlara ulaşmak için ağızlıktan çıkan malzemenin sabit hız ve basınç altında tutulması gerektiğini belirtmişlerdir [29].

2.1.6 Bağlayıcı püskürtme

Bu yöntemin içeriğinde toz esaslı ana malzeme ve toz katmanlarının yapışmasını sağlayan genelde sıvı formda bulunan yapıştırıcı olarak iki tür malzeme yer alır.



Şekil 2.8: Bağlayıcı Püskürtme Şematik Gösterim

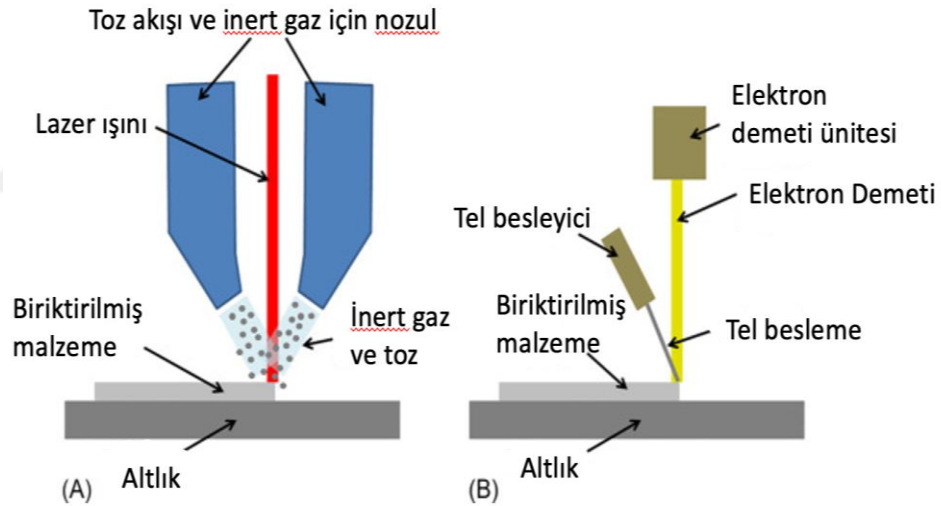
Kaynak: (Dreams, 2017)

Bu teknolojiye malzemelerin birleştirilmesinde sıvı, metal veya seramik hammaddesi bağlayıcı bir malzeme kullanılır. Birleştirme, toz hammaddenin üzerine bağlayıcı eklenmesiyle oluşur ve katı halde katman meydana gelir. Yazıcı platformunun bir katman aşağı indirilip toz malzeme önce oluşturulan katmanların üstüne serilir. Nesne, bu döngülerin tekrarlanmasıyla oluşur. Büyük parça imalatında kullanılabilir bir yöntemdir. BJ’de bir ısıtma işlemi olmadığından termal sebebiyle oluşan boyutsal distorsiyon kusurları yoktur. Bu yöntemde destek yapılarına ihtiyaç yoktur çünkü SLS yönteminde görüldüğü gibi metal tozları destek görevindedirler. Malzeme yelpazesi

geniş olan BJ yöntemi renkli parçaların üretilmesini de sağlar ve düşük maliyet avantajı vardır. Ancak dezavantajları arasında üretilen parçaların gözenek yapısı göstermesi vardır. Gözenek kusuru üretilen parçalarda mekanik özelliklerin olumsuz etkinmesine sebep olabilir. İşlem bitiminde son işlem gerektiği durumlar olabilir ve ürünün kullanılmadan önce mekanik özellikleri arttırmak için infiltran maddeye gereksinim vardır. Seramik ürünler için infiltran madde genellikle siyanoakrilat yapıştırıcı, metal ürünler için bronz olarak seçilmektedir.

2.1.7 Doğrudan enerji biriktirme

Bu yöntemde parçaların oluşturulması malzemenin ergitilmesiyle mümkündür. Malzeme ekstrüzyonu yöntemine benzer. Tel veya toz formu malzeme lazer veya elektron ışınıyla ergitilerek katılaştırılır. Çok eksenli hareket kabiliyeti olan bir ağızlıktan malzeme imalat formuna aktarılmaktadır. Tel veya toz formunda metal, polimer ve seramik malzemeler bu yöntemde kullanılabilir.



Şekil 2.9: İki DED Şemaları (A) Toz-Lazer (B) Elektron Işını ve Tel

Kaynak: (Sing ve Yeong, 2020)

Kullanılan tozların boyutu genellikle büyüktür ve yüksek enerji yoğunluğu gerektirir. Ürün üretimi hızlıdır ancak bu durum ek işlem gerektiren düşük yüzey kalitesi olur.

DED yazıcıda, nozul başlık, sabit bir nesne etrafında dönerek malzemeyi belirli yerlerde biriktirir. Bu yöntemle tam bir parça da üretilebilir ancak daha çok bir nesneyi onarmak veya ek malzeme eklemek için tercih edilen bir yöntemdir.

Toz sistemlerde toz, lazer ışını ile ergitilir. Robot kol üzerindeki hammadde nozüllerden püskürtülerek toz ile lazer çarpışır ve sonucunda ergime oluşur. Robot

kolunun ucu plaka üzerinde parça boyunca gezdirilerek işlem sağlanır. İşlemler katmanlar tamamlanıncaya kadar devam eder. Tel sistemlere göre daha hassas üretim yapılabilir.

Tel sistemlerde, besleyici nozülünden gelen telin, lazer veya plazma arkı ile ergitilerek plaka üzerinde birikmesi sağlanır. Korucuyu inert gazlarla çalışılması gerekir. Toz sistemlere nazaran daha yüksek biriktirme oranı elde edilir. Toz sisteme göre maliyeti düşüktür.

2.2 Metal Eklemeli İmalat

Mekanik özellikleri yüksek olan alaşımların geleneksel imalat yöntemleriyle üretilemeyen kompleks şekillerde üretilmesine imkân veren üretim yöntemidir. Sağlık, havacılık, medikal, otomotiv, uzay, enerji, yeniden imalat ve onarım vb. endüstrilerde kullanılmaktadır.

Metal eklemeli imalat yönteminde dikkat edilmesi gereken önemli noktalar; malzeme, boyut ve fonksiyondur. Metalik parça imalatına yönelik geliştirilmiştir. Literatürde ‘metal additive manufacturing -MAM’ olarak geçmektedir.

Metallerde akışkanlıkta sürekli beslemeli zorlaştırma, ergime sıcaklığı ve yüzey gerilimi açısından plastiklere göre farklılıklar görülür [31]. Mühendislik alanında makine-imalat sektörü başta olmak üzere çeşitli alanlarda metal parçalara ihtiyaç vardır. Bu durum metal eklemeli imalat yöntemlerini önemli kılar. Eklemeli imalat alanındaki gelişmeler son 20 yılda gelişmeler göstermiştir. Plastik parçaların üretiminden fonksiyonel metal parçaların üretilmesi konusunda oldukça önemli çalışmalar görülmektedir [32]. Metallerde eklemeli imalat ile üretimde araştırmalar üretimi kolay olmayan olan ve maliyeti yüksek olan ürünlere ve malzemelere yoğunlaşmıştır [33].

Metal eklemeli imalat yöntemleri çeşitli şekillerde sınıflandırılır. Yöntemde kullanılan enerji kaynağı, parçanın hacmi ve malzeme besleme şekli olarak sınıflandırılır. Ben tezimde hammadde ve malzeme besleme şekli bakımından sınıflandıracağım. Bu açıdan değerlendirildiğinde üç sınıfa ayırabiliriz. Bunlar: toz sermeli (yataklı) sistemler, toz beslemeli sistemler ve tel beslemeli sistemlerdir. Toz sermeli veya beslemeli sistemlerde madde elektron, lazer ve ark gibi enerji

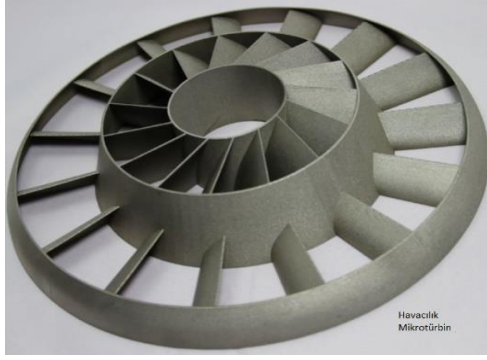
kaynaklarıyla ergitilir. Tel beslemeli sistemde ise ark ısısı kullanılarak ergitilme sağlanır.

Metal eklemeli imalat yönteminde paslanmaz çelik, titanyum, magnezyum, alüminyum gibi metal malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır. Önceki yıllarda üretimi zor olan ürünler artık çeşitli metal tozları kullanarak bu yöntemle üretilmektedir. Parçalar seri üretimle ve ekonomik olarak üretilir. Beklenen en büyük avantajlarından biri de enerji tüketimini ve karbon ayak izini azaltmasıdır. Bu sayede çevre üzerinde olumlu etkileri gözlemlenebilecektir.

Çelik: Kullanılan en yaygın mühendislik malzemelerinden biri çeliktir. Bu sebeple metal eklemeli imalat için de önem arz eder. LMD yönteminde östenitik paslanmaz çelik (316L) ve takım çeliği (H13) kullanılması da literatürde yerini almaktadır [34].

Alüminyum Alaşımları: Eklemeli imalat için kullanılan farklı alüminyum alaşımlarının sayısı sınırlı olmasının sebebi alüminyumun kolay işlenmesi ve üretim maliyetinin düşük olmasıdır. Eklemeli imalat ile üretim bu yüzden daha avantajlıdır. Diğer bir nedeni ise alüminyum alaşımının kaynaklanabilirliğinin zor olmasıdır. Büyük oranda katılaşabilen alaşımlardan bazıları, örneğin Al- Zn 7xxx serisinin EN AW-7075 'i, Zn gibi uçucu elementler bulundurur, bu da eriyik havuzunda türbülansa, sıçramaya ve gözenek sorununa sebep olur ve bu yüzden eklemeli imalata uygun değildir ya da kullanımında kolaylık görülmez. Değişik bir buhar basıncına sahip alaşım elementeri vakum koşulları altında tercihen buharlaştırılabilir. İlave Al, LBM ve LMD yöntemlerinde kullanılan lazer dalga boylarının yüksek bir yansıtıcılığı vardır, bu eklemeli imalat ile üretilen Al parçalarında görülen başka bir engeldir [35].

Titanyum Alaşımları: Eklemeli imalat için ilgi çeken diğer bir metal ise titanyum ve alaşımlarıdır. Titanyumun yüksek performanslı ürünlerde, işlemedeki maliyet yüksekliği ve geleneksel yöntemlere göre daha uzun süren işlem süreleriyle endüstriyel uygulama alanlarına sahiptir.



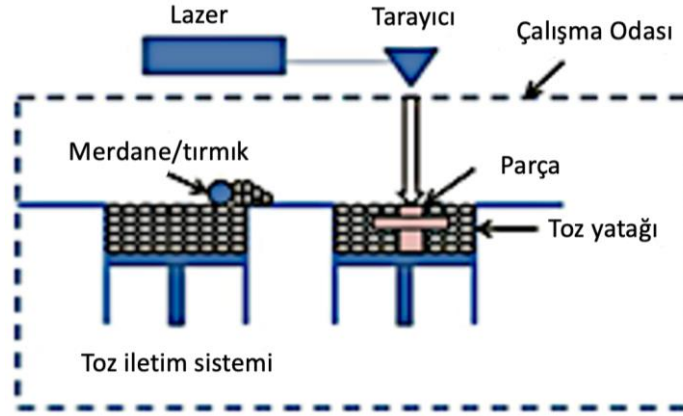
Şekil 2.10: Eklemeli İmalat Teknolojisi İle Üretilen Endüstriyel Ürünler

Kaynak: (Karakılınç vd., 2019)

Günümüzde eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak seramik, polimer ve metal hammaddenin toz, tel, plaka ve eriyik formları uygun şartlar altında lazer, elektron ve ultraviyole ışınlar yardımıyla katma katman üretilmesi ile kullanışlı endüstriyel parça imalatı mümkün hale gelmiştir [36].

2.2.1 Toz sermeli imalat

Toz sermeli sistemlerde; toz formunda malzemenin eritilmesi için lazer veya elektron ışını kullanılmaktadır. Üretilcek olan ürün taranır ve 20-80 μm aralığındaki tozlar çalışma alanı boyunca serilip toz yatağı oluşması sağlanır. Bilgisayar kontrolünde bir ısı kaynağı (lazer veya 20-200 μm aralığında elektron ışını) kullanılarak ergitilir. Bu sayede ilk katman oluşur ve imalat formu tek bir katman kadar aşağı indirilir. Toz serme ucu ilk katman üstüne yeni bir tabaka serer ve ürün elde edilinceye kadar bu döngü devam eder. Toz sermeli imalat tekniklerinden en yaygınları, seçici lazer sinterleme (SLS) yöntemi, Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi, Elektron Işın Ergitme (EBM) yöntemi, Direk Metal Lazer Sinterleme (DMLS) yöntemi, Elektron Işın Eklemeli İmalat (EBAM) yöntemi olarak sayılabilir. Toz sermeli imalatın avantajları arasında boyut hassasiyeti yüksek parçaların üretilmesi, parçadaki iç boşluk ve kanalların detaylandırılması ve hassas boyut kontrolü sağlanabilmesi vardır.



Şekil 2.11: Toz Sermeli Metal Eklemeli İmalat Şematik Gösterim

Kaynak: (Kathuria, 1999)

2.2.1.1 SLS (Selective laser sintering)

Hazne içindeki toz malzemenin lazer ışınıyla belirli bir geometri dahilinde sinterlenmesidir. SLS yönteminin patenti Austin' deki Texas Üniversitesi' nde Dr. Carl Deckard ve akademik danışman Dr. Joe Beaman tarafından alınmış, DARPA sponsorluğunda 1980' lerde geliştirilmiştir bir yöntemdir [38].

Üretim platformundaki toz katmanı sinterlenmek için lazer ışını hareketli aynaya gönderilir. Tamamlandıktan sonra alt kademeye geçer üretim tamamlanıncaya kadar devam eder. Metal tozu hammaddenin erime noktasından biraz altındaki bir sıcaklık değerine ısıtılır. Isıtılma yapılmasının sebebi, parçayı katılaştırdığımız için lazerin toz yatağında, belirli bölgelerin sıcaklığının kolayca yükselir.

2.2.1.2 SLM (Selective laser melting)

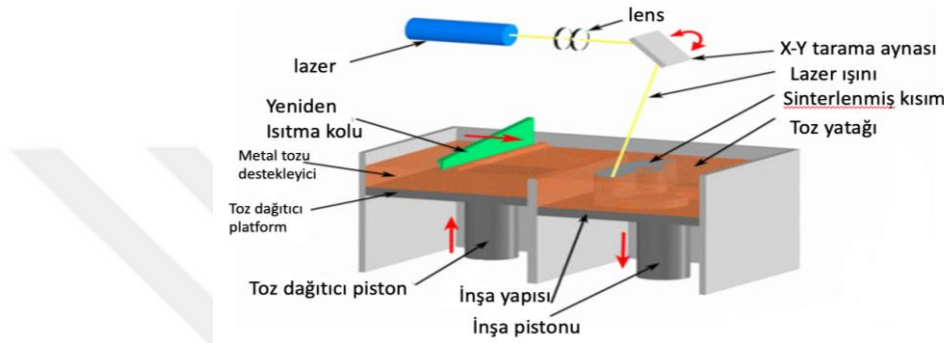
Seçici lazer ergitme, metal tozlarının yoğun lazer yardımıyla eritilerek bir ürün elde edilmesi işlemidir. Bu yöntemle üç boyutlu nesneler elde edilebilir. Tozun tam ergitilmesiyle imalat gerçekleşir. SLM' de alüminyum gibi tek bileşenli metaller kullanılır. Bu yöntemde üretim süresince oluşan yüksek kalıntı gerilmelerini azaltmak amacıyla tavlanmaktadır. Oluşan ürünün kalitesindeki en büyük etken giriş parametreleridir. Giriş parametrelerinden bazıları; katman kalınlığı, toz yapısı, inşa yönü, tarama aralığı, lazer gücü, tarama hızı, tarama deseni, vs dir. Çıkış parametreleri ise mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü, metalürjik yapı ve bağıl yoğunluk olarak belirtilebilir [39].

Strano'nun çalışmasında; lazer ergitmede sinterlemeye nazaran, daha iyi yüzeylerin üretilmesine olanak sağlar ve bu yöntemle sinterlemede elde edilemeyecek sıcaklık

değerlerine ulaşılabilceği belirtilir. Bu sayede yüzey tanımlaması daha iyi yapılır. Yüzey kaliteleri ve aynı zamanda mekanik özelliklerinin de sinterleme yönteminden daha başarılı olan parçalar üretilmektedir [40].

2.2.1.3 DMLS (Direct metal laser sintering)

1989-1990 yılları arasında Teksas Üniversitesinde Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) yöntemi için çalışmalar başlamıştır. 1990'lı yıllarda birçok enstitü bu yöntem hakkında çalışmaları sürdürmüştür [40].



Şekil 2.12: DMLS Yönteminin Şematik Gösterimi

Kaynak: (Shellabear ve Nyrhilä, 2004)

Toz partikülleri ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta kaynaşana kadar ısıtılarak sinterlenir. Üretim yatağı üzerinde bir toz katman serilir. Yüksek voltajlı lazer, önceden belirlenen yollarda seri ışımlarla gezinir ve granül formlu malzeme tozları sinterlenerek yapıştırır ve ürünün modelini oluşturan katmanlar bu şekilde oluşturulur.

2.2.1.4 EBM (Electron beam melting)

Toz partiküllerini ergitilmesinde yüksek enerjili bir elektron ışını kullanılmaktadır. Geometrik şekli esas alınarak serilen toz katmanı elektron ışını tarafından taranır ve bu alan üzerinde ergitme sağlanır. Bu ergiyen alanın katılaşması ile katman oluşur. Teknik olarak SLM ile benzerlik gösterir. Yüksek mukavemetli veya yüksek sıcaklıkların kullanıldığı uygulamalarda tercih edilebilir. Bu yöntemde kullanılan metal tozlarının %95'i geri kazandırılır.

EBM yönteminde güç kaynağı elektron ışınıdır. 3500 °C seviyelerindeki sıcaklıklara ulaşabilmesinden dolayı daha yüksek ergime sıcaklığında olan malzemeler de eklemeli imalatla üretilmektedir [41]. EBM yöntemi kullanılarak kompleks

geometrilere ürünler elde edilebilmektedir. Bu ürünlerde titanyum alaşımları, refrakter metaller ve çeşitli süper alaşımlar kullanılır. Hiemenz' in çalışmasında [41], EBM üretim yöntemiyle üretilen parçalar tek tek üretilmektense karmaşık geometrideki yapıların yekpare bir halde üretiminin mümkündür. Bu sayede hem işçilik süresinde hem de montaj süresinde azalmalar meydana gelir. Bu sayede üretim maliyetlerinde bir iyileştirmeler yapılmış olur.

2.2.1.5 LENS (Laser engineered net shaping)

Nozul başlıktan toz püskürtülerek tozun ergitilmesiyle parça üretilir. Bu yöntemde, metal tozlarının püskürtebilmek için için nozul bir başlık, tozun eritmek için lazer ve katman oksitlenmesinin önüne geçmek için ise gaz borusu olan bir biriktirme kafası kullanılır. Gaz borusundan koruyucu inert gaz püskürtülürken nozul başlıktan toz partikülleri püskürtülmektedir. Lazer ışını ile ergitilen tozlar eriyik bir havuz oluşturmaktadır. Katılan ergiyik havuzu ile oluşan katmanlar ürün oluşuncaya kadar üst üste yığılır.

LENS yöntemiyle, eklemeli imalatın diğer tekniklerinde yaşandığı görülen kalıntı gerilmeleri, yüzey çatlakları ve gözenek oluşumu gibi mukavemet azaltıcı gibi sorunlar minimum seviyeye indirilmiştir [41].

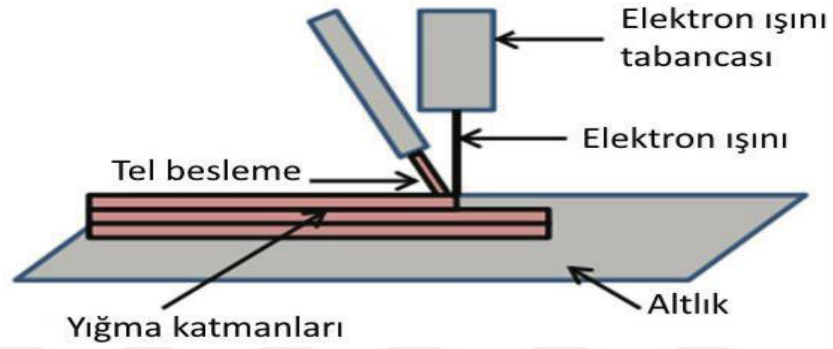
Ayrıca, LENS yönteminde, hammaddenin ek bir işleme maruz kalmadan üretiminin elverişli bir şekilde gerçekleştirildiği ve özellikle titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum ve inconel alaşımlar ile parça üretiminin yapıldığı söylenmektedir [42].

2.2.2 Toz beslemeli imalat

Toz beslemeli imalat sistemlerinde nozul kullanılarak tozlar üretim platformu boyunca taşınır. Tozların serildiği bir veya birden fazla tabaka ergitilerek istenilen şekil oluşturulur. Bu sistemde kullanılan ısı kaynağı lazer, elektron veya ultraviyole olabilir. İmalat süreci üç boyutlu nihai bir ürün elde edilinceye kadar tekrarlanır.

İşlem proseslerinde telin eriyip birikmesiyle çalışma alanı boyunca bir ve çalışma alanı boyunca bir katman oluşur. Bu katman oluşumu tekrarlanarak son ürün elde edilir. Elektron ışını, ark sistemleri ve lazer ışını bu yöntemde kullanılan ısı kaynaklarındandır.

Kullanılan ısı kaynağına bakılarak tel beslemeli metal eklemeli imalat yöntemleri 3 gruba ayrılır. Bunlar: 1) tel elektron ışını eklemeli imalat (electron beam additive manufacturing – EBAM ve electron beam forming – EBF), 2) tel lazer ışını eklemeli imalat (wire laser additive manufacturing), 3) tel ark eklemeli imalat (wire arc additive manufacturing- WAAM) yöntemleri olarak sınıflandırılır.



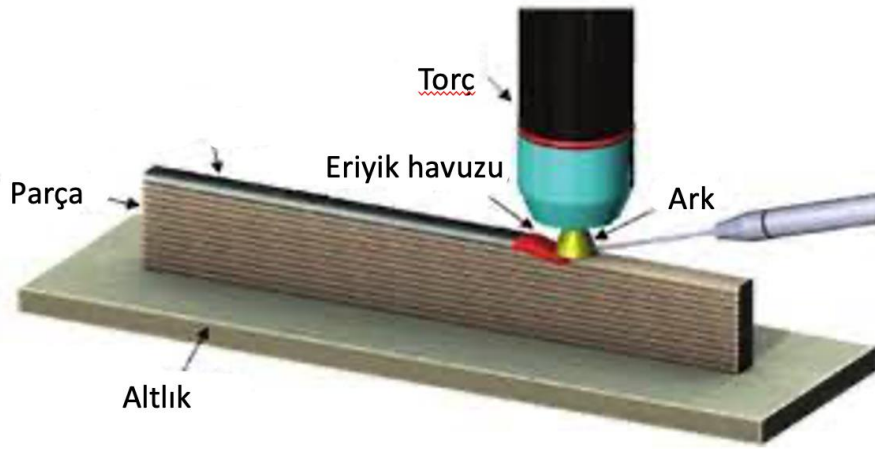
Şekil 2.14: Tel Elektron Işını Eklemeli İmalat İşleminin Şematik Gösterimi

Kaynak: (Kathuria, 1999)

Lazer yöntemi, diğer tekniklerle karşılaştırıldığında WAAM yüksek hassasitte olduğundan sık tercih edilen kaynak yöntemidir [43]. Dezavantaj olarak ise, enerji verimliliği oldukça düşüktür (%2-5) [44]. Elektron ışınının kullanıldığı yöntemde enerji verimliliği biraz daha yükselir (%15-20) [45], lakin yüksek vakumlu bir çalışma alanı gerektirmektedir. Bu sebeple, elektron ışınının kullanıldığı parçaların üretim maliyeti yüksektir. Yalnızca havacılık alanında bazı parçaların üretimde kullanılabilir. Lazer ve elektron ışınının kullanıldığı metal eklemeli imalat yöntemlerinde enerji verimliliği zayıftır ancak gaz metal ark kaynağı (GMAK) veya gaz tungsten ark kaynağı (GTAK) işlemleri gibi ark kaynağı işlemlerindeki enerji verimliliğinde %90'a varan yükselmeler görülmektedir [46]. İlaveten, lazer veya elektron ışını ekipmanı ile geleneksel ark kaynağı ekipman maliyetleri karşılaştırıldığında lazer ve elektron ışını maliyetleri nispeten düşüktür.

2.3 Tel Ark Eklemeli İmalat

Tel ark eklemeli imalatatta tel formunda bir hammadde elektrik arkı ile ergitilerek katman katman yığılmasıyla ürün elde edilir. Bu kaynak yönteminde paso sayıları çoktur. Literatürde wire arc additive manufacturing-WAAM olarak da adlandırılır. Bu yöntemle yapılan imalatatta metal aktif gaz (MAG) içeriğinde CO₂ gibi aktif bir gaz varsa /metal inert gaz (MIG) içeriğinde argon veya helyum gibi inert bir gaz varsa veya tungsten inert gaz (TIG) kullanılabilir. Bu yöntemi ilk defa Baker 1925 yılında metal süs eşyaları üretiminde kullanmıştır [47].



Şekil 2.15: Tel Ark Eklemeli İmalat Şematik Gösterimi

Kaynak: (Mcandrew vd., 2018)

Lazer kullanılan yöntemlerde hassasiyet yüksek olduğu için tel ark eklemeli imalat için tercih edilir. Ancak, bu yöntemde enerji verimliliği diğer yöntemlere kıyasla düşüktür. Elektron ışını kullanılarak yapılan işlemlerde ise enerji verimliliği artmaktadır. Çoğunlukla yüksek vakum gerektirdiğinden havacılık sektöründe tercih edilir. Genel tabloya bakıldığında lazer ve elektron ışınındaki enerji verimliliğinin zayıflığı gaz metal ark kaynağı (GMAK) veya gaz tungsten ark kaynağı (GTAK) ile %90'a kadar yükseltilebilmektedir. Aynı zamanda lazer veya elektron ışını ekipman maliyeti konusunda da geleneksel ark kaynağına göre dezavantajlıdır.

Tel ark eklemeli imalat sistemleri yüksek biriktirme gerektiren ürünler için tercih edilir. Malzeme biriktirme oranı lazer veya elektron ışınında 2-10 g/dk iken TAEİ de bu oran 50-130 g/dk'ya ulaşır. Malzeme kullanma verimliliği %100'e kadar ulaşabilmektedir. Bu sistemlerde imalat hızları da yüksektir ve büyük hacimli parçaların üretimi için de elverişlidir. Ancak, toz sermeli veya toz beslemeli imalat

sistemlerinde üretilen parçaların yüzeyine göre daha pürüzlü yüzeyler elde edilir ek işlemlere uğrar [49].

Tel ark eklemeli imalat ile üretilen komponentler diğer yöntemlerle üretilenlere göre mekanik özellikleri daha ve parçalarda toz yataklı ergitme yöntemiyle üretilen parçalarda rastladığımız yorulma ömrünün azalmasına sebep olan yüksek seviyeli gözeneklilik soruna görülmez.

Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla, tel ark eklemeli imalat sistemlerinde ürün büyüklüğüne bağlı olarak değişebilmekle birlikte üretim süresi %40-60, ek işleme süresi ise %15-20 aralığında kısalabilmektedir.

WAAM yönteminde kullanılan kaynak ekipmanları kaynak türlerine göre farklılık gösterse de temelde güç kaynağı, kaynak torcu ve tel besleme mekanizması içermektedir. Beslemede kullanılan tellerin çapı 0.2-1.2 mm arasında değişir. Isı kaynağının hareketi, robotik sistem tarafından sağlanır. Torç hareketi ise CNC tezgâh, robot kol veya 3B yazıcı tarafından sağlanabilir.

Tel ark eklemeli imalat işleminin en önemli özelliği büyük hacimli metal parçalar üretebilmesidir. WAAM yöntemi yeni bir parça üretebilmesinin yanı sıra bakım ve onarım işlemleri de yapılabilmektedir [50].

Tel ark eklemeli imalatın bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Diğer eklemeli imalat yöntemlerine nazaran boyutsal doğruluğu az ve yüzey kalitesi düşüktür. Bu sebeple fonksiyonda iyileştirmeler sağlamak için üretimden sonra talaşlı imalat işlemleri yapılması gerekir [51]. Diğer metal eklemeli imalat tekniklerine nazaran WAAM yüksek ısı girdisi ve düşük soğuma oranlarına sahiptir [52]. WAAM işleminde uygun bir ısı yönetimi stratejisi uygulanmaz ise yüksek ısı girdisi sebebiyle üretilen ürünlerde boyut sorunları, mikroyapı sorunları, distorsiyon ve kalıntı gerilme gibi hatalar gözlemlenebilir [53]. Isı girdisinin yüksekliğinin bir başka olumsuzluğu; hammadde biriktirme sırasında pasolar arası bekleme zamanını arttırır ve bu da üretim süresini uzatmaktadır [54]. WAAM işlemi esnasında sürekli yığma süreçleri sebebiyle karışık termal gerilme dağılımları oluşur ve parça içerisinde yüksek kalıntı gerilmeler ve sonrasında çatlak oluşumu görülmektedir [55]. Bunların yanı sıra malzeme yığma sırasında entegre olarak üretim sürecini izleme ve kontrolünde zorluklar görülmektedir [56]. Bu problemler imalat sırasında ya da üretimden sonra

çeşitli işlemler uygulanarak azaltılabilir veya yok edilebilir. Problemlerin tespiti sağlandıktan sonra ona yönelik işlemler gerçekleştirilir.

Kaynak işlemi bazı parametrelere sahiptir ve uygulanan kaynak yöntemine göre bu parametrelerde değişiklik gösterir.

Çizelge 2.2: TAEİ Temel İşlem Parametreleri

Kaynak Teknolojisi	Kaynak Parametreleri	Koruyucu Gaz	Besleyici Tel	Hareket Sistemi	Altlık
MIG/MAG	Akım/Voltaj	Debi	Çap	Yapı	Hacim
TIG	Tel Besleme Hızı	Bileşim	Kimyasal İçerik	Tekrarlanabilirlik	Kimyasal İçerik
Plazma	Kaynak Hızı	-	Tek/çift	Doğruluk	Sabitleme

Kaynak: (Cunningham vd., 2018)

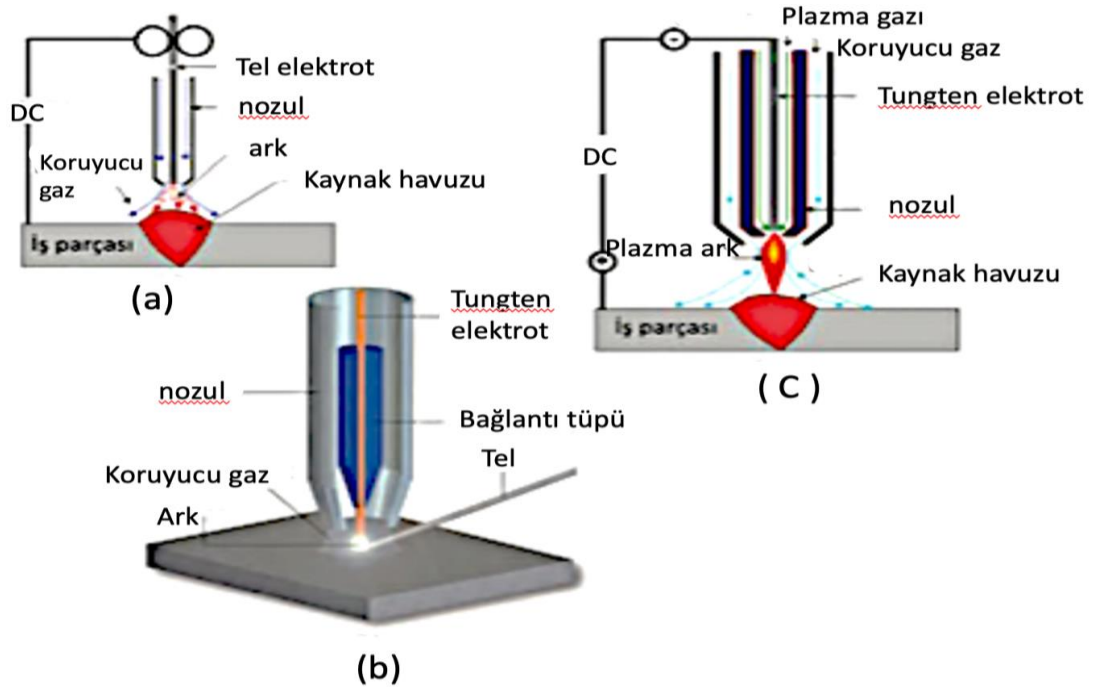
Akım/voltaj parametreleri ark gücünün kontrol edilmesini sağlar. Ark kaynağında arkın dinamik davranışları sebebiyle akım/voltaj değerleri sürekli değişim gösterir. Dolgu ve altlık malzemesinin ergime oranını akım etkilemektedir. Ark boyuna ve kaynak akımına ise voltaj etki etmektedir. MIG/MAG kaynağında ise sabit voltajlı güç kullanılırken, TIG ve plazma kaynağında sabit akımlı güç kullanılır [58]. Kaynak sonucunu etkileyen ana parametreler; oluşan ısı miktarı, kaynak kesit alanı, nüfuziyet, soğuma hızı kaynak yapısı ve özellikleri ve kusur oluşumu vs. dir. Kaynak akımı ile doğrudan ilişkili olan parametre ise ısı miktarıdır [59]. Kaynakta yüksek akım verilirse kaynak verimliliği artar. Ancak kaynakta akımın yüksekliği; dikiş ayrılıkları, yanma oluşu, paralel yükselteler, tünel gözenekliliği yükselti (weld hump) gibi kaynak kusurları oluşturabilir [60].

Kaynak hızı (torç hızı, ilerleme hızı, malzeme biriktirme hızı), kaynak torcu üzerindeki mekanizmayla imalat süresince hareketi belirli ortalama hıza denir. Kaynak hızının yükselmesiyle birim uzunluk adedince ısı girdisinin miktarı düştüğünde kaynak havuzunun kesit alanı azalır ve böylece kaynak havuzu geometrisi etkilenir [61]. Kaynak hızı faktörü, dikiş genişliği ve nüfuziyet derinliğini etkileyebilmektedir [62]. Yine kaynak hızı mikroyapıdaki tane dizilimini ve boyutları da etkileyebilecek bir faktör olarak görülmektedir [63].

Kaynak bölgesine gönderilen birim zamandaki tel miktarına tel besleme hızı denir. Birimi uzunluktur. Tel besleme hızı ve kaynak akımı doğru orantılıdır. Tel besleme hızının artması nüfuziyet derinliğini de arttırır. Dikiş yüksekliği de tel besleme hızının arttığı için artar. Tel besleme hızındaki yüksek ise daha az seyrilmeler

görülmektedir [64]. Bundan dolayı bu parametre kaynak boyutunu ve morfolojisini etkiler [65]. Arkta iyi bir kararlılık ve iyi metal transfer koşullarında öncelikle tel besleme hızı ve tel erime hızı ile birebir eşleştiğinde elde edilir [66].

WAAM sistemleri, kaynak işlemi sırasında kullanılan ısı kaynağına göre dört sınıfa ayrılır. Bunlar: 1) Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAK), 2) Gaz tungsten ark kaynağı (GTAK), 3) Plazma ark kaynağı ve 4) Robotik waam yöntemleridir. Bu yöntemlerden herhangi birinin seçimi ürün üretimi için gereken koşulları ve üretim hızını doğrudan etkiler. Örnek verecek olursak GMAK tabanlı WAAM yönteminde biriktirme hızı diğer yöntemlere göre 2-3 kat daha fazladır. Ancak ark kararlılığı düşük olduğundan daha fazla kaynak dumanı çıkar ve daha fazla sıçrama olur. Bu problem yeni geliştirilen soğuk metal transferli (cold metal transfer – CMT) GMAK tabanlı WAAM yöntemiyle çözülmüştür. Bu sistemle düşük ısı girdisi sağlanır ve minimal düzeyde bir sıçrama görülür. Bu yöntem Al-alışımları ve çelik malzemelerde iyi sonuç verir ancak Ti-alışımlarında arkın kararsızlığından dolayı yüzey pürüzlülüğü artar. Bu sebeple Ti alışımlarında GTAK veya PAK tabanlı WAAM tercih edilir.



Şekil 2.16: Farklı Tel Ark Eklemeli İmalat İşlemlerinin Şematik Gösterimi: (a) GMAK-Tabanlı, (b) GTAK-Tabanlı ve (c) PAK-Tabanlı WAAM

Kaynak: (Ding vd., 2015)

Çizelge 2.3: WAAM Sistemlerinin Karşılaştırılması

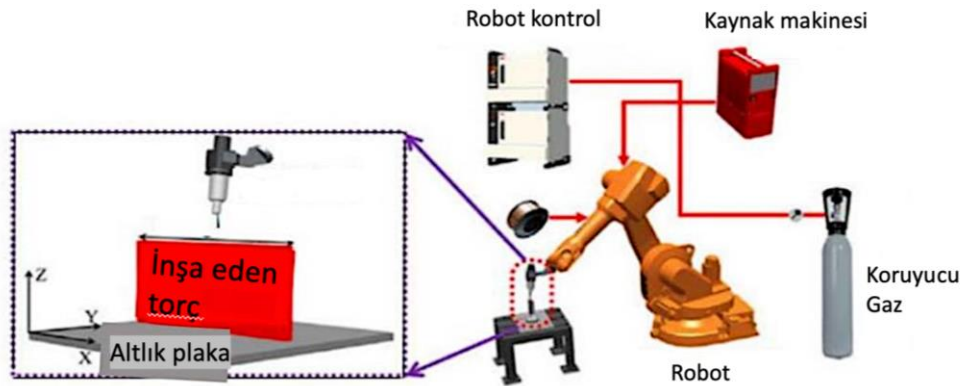
WAAM Sistemi	Isı Kaynağı	Özellikleri
GMAK-Tabanlı	GMAK	Tüketilir tel elektrot Tipik yığma hızı: 3-4 kg/h Düşük ark kararlılığı ve sıçrama
	CMT-GMAK	Tüketilir tel elektrot Tipik yığma hızı 2-3 kg/h Düşük ısı girdisi, sıfır sıçrama ve yüksek işlem toleransı
GTA-Tabanlı	Tandem GMAK	2 tüketilebilir elektrot Tipik yığma hızı 6-8 kg/h Kolay karıştırma ile kompozisyon kontrolü yüksek
PAK-Tabanlı	Plazma	intermetalik parça üretimi mümkün Tüketilemeyen elektrot, harici tel besleme; Tipik yığma hızı 2-4 kg/h Tel ve torcun döndürülmesi gerek

Kaynak: (Gu vd., 2016)

MIG-MAG yöntemlerinin genel adı olan GMAK kaynak yöntemi tel ark eklemeli imalatla en çok kullanılan yöntemlerdendir. GMAK yönteminde kaynak teli, tel besleme ünitesi tarafından sürekli beslenir.

Bu kaynak teli aynı zamanda bir elektrot görevi de görür, arkı oluşturan birinci elementtir [69]. Kaynak torcundan kaynak teli ile beslenen koruma gazı, oluşan kaynak havuzunu ve kaynak dikişini atmosferin olumsuz etkilerinden korur.

WAAM sistemlerinin birçoğunda hareket mekanizması olarak endüstriyel robotlar kullanılmaktadır. Bu robotlar üretim esnasında, robot ve dış eksen kaynak torcunun parçanın katman katman oluşturulmasında gereken hareket yeteneğini sağlamaktadır. Şekil 2.17’de gösterildiği üzere bir WAAM hücresinde 6 eksenli kaynak robotu, kaynak makinesi, koruyucu gaz ve tel besleme ünitesi vardır.



Şekil 2.17: WAAM Hücresinde Kullanılan Ekipmanlar

GMAW kaynak teknolojisi ile WAAM yönteminde üretilen parçaların kaliteli olması için proses parametrelerinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Proses parametreleri akım yoğunluğu, gerilim, biriktirme hızı, ısı girişi, pasolar arası sıcaklık, koruyucu gaz, tel çıkışı, tel besleme hızı, kaynak hareket hızı ve torç açısı olarak değişir [70].

Kaynak parametrelerinin en önemlilerinden olan kaynak hızı ısı iletimi ile ilişkilidir ve üretim sırasında parçayı etkilemektedir. Kaynak hızı yükselince biriken dikiş yüksekliği düşük olur. Aynı zamanda yetersiz malzeme birikimine neden olur. WAAM yönteminde temel parametre kaynak akımıdır. Kaynak hızı arttıkça yüksek birikme hızı elde edilir ancak, sıçrama ve yüksek ısı girdisi gibi dezavantajları vardır.

WAAM yöntemi ark tabanlı bir işlem olduğu için yüksek ısı girdisi sorunu vardır. WAAM yöntemiyle üretilen parçalar, değişken ısıtma ve soğutma döngülerine sahip oldukları için eşit olmayan termal genleşme ve büzülme sorunlarına sahiptir [71].

Günümüzde yaşanan nüfus artışları sebebiyle üretimde otomasyon sistemlerine yönelim artmaktadır. Bu yönelimin etkileri kaynaklı üretimde de görülmektedir. Endüstride üretim maliyetlerini düşürmek ve üretim kalitesini yükseltmek için robotlar kullanılmaya başlanmıştır. Robotlu kaynak manuel kaynaktan dört kat daha hızlı kaynak yapabilme kabiliyetine sahiptir.

Kaynağın birçok çeşidinde robot kullanımı mümkündür. Nokta kaynağı, MIG/MAG kaynağı, TIG ve plazma kaynakları yapılabilir. Bu kaynak yönteminde kaynak parametrelerinin takibi de kolaydır. Bir kaynakçının 70 cm/dak hız ile kaynaklayabildiği bir parça robotik kaynak yöntemi kullanılarak yüksek kalitede ve 270 cm/dak hızlara çıkılarak kaynaklanabilmektedir. Bu sayede üretim kalitesi ve hızı artarken üretim maliyeti de azalmaktadır [72].

Tel ark eklemeli imalat yöntemlerinde kaynak torcu ve altlık arasındaki hareketi oluşturmak için kartezyen (doğrusal XYZ), 5 eksenli/eklemlili robotik kol ve kinematik makineler kullanılmaktadır. Robot sistemleri hammaddenin düzenli bir şekilde yığılmasını sağlar. Manevra kabiliyetleri sayesinde çok büyük yapılarda üretebilmektedirler. Ancak robot sistemlerinin maliyetlerinin yüksekliği olumsuz bir durum oluşturur. Parça üretimi için yazılım ve robot kaynak operatörlerine ihtiyaç duyulması da ek maliyetlere sebep olmaktadır. Bu sebeple büyük ölçekli parçalarla çalışılmayacaksa CNC ler tercih edilmektedir.

Tel ark eklemeli imalat (WAAM), konseptten üretime kadar geçen sürenin kısalması, hızlı işleme, yüksek yoğunluk, malzeme tasarrufu, malzemelerde esneklik ve otomasyona kolay uyarlanabilirlik gibi avantajları nedeniyle katı serbest biçimli imalatın umut verici bir üretim teknolojisidir. Yüksek biriktirme oranı, yüksek malzeme kullanım oranı, düşük üretim ve ekipman maliyeti ve yüksek ekipman esnekliği ve ölçeklenebilirliği sayesinde WAAM, lazer veya elektron ışınlarının ısı olarak kullanıldığı diğer toz metalürjisi AM tekniklerine göre büyük ölçekli bileşenlerin imalatı için daha uygundur [68].

Tel ark eklemeli imalatta bimetal parça üretimi de sağlanmaktadır. Bimetalik malzemeler, tek malzemeli özelliklerin sınırlamalarını aştıkları ve daha çeşitli özellikler kombinasyonu sağladıkları için son yıllarda büyük ilgi görmüştür [73]. Bimetal parça farklı metal özellikleri sağlayabilen ve bu şekilde işlevselliği arttıran parça anlamında kullanılmaktadır. Bimetal parçalar genelde farklı özellikleri olan birden fazla hammaddenin tel ark eklemeli imalat yöntemiyle üretilir. Bimetal üretiminin birçok avantajı vardır. Bunlardan biri de farklı iki malzemenin kullanımıyla güçlü özelliklerini tek malzemede birleştirilme seçeneğidir. Farklı iki metal kullanılması ikincil faz yapılar oluşturur. İkinci fazlar sertlik değerinde artışa sebep olur. Bimetal üretimi sırasında tel besleme oranlarıyla da oynanıp son üründe farklı mikroyapılar elde edilir. Bu şekilde üretilen parçalarda ara yüzey dayanımı yüksek olabilmektedir.

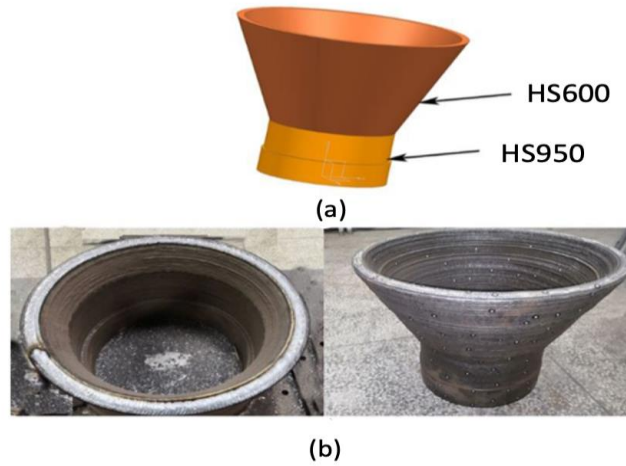
Tel ark eklemeli imalat üzerine yapılan literatür araştırmaları incelendiğinde bu konu üzerine birçok akademik ve endüstriyel çalışma bulunmuştur. Güncel çalışmaları değerlendirecek olursak bimetal ürün üretiminde de tel ark eklemeli imalat teknolojisinin yaygınlaştığı göze çarpmaktadır.

Ahsan ve ark. (2021) östenitik paslanmaz çelik ve Inconel 625 bimetalik yapının mikroyapısını ve mekanik davranışını inceledi ve WAAM'ın kontrol edilebilir özelliklere sahip bimetalik yapı hazırlama potansiyeline sahip olduğunu buldu [74].

Shen ve ark. (2021) soğuk metal geçiş katkı maddesi üretimi ile Nb ara katmanının eklenmesiyle bir Ti6Al4V/Al6.21Cu bimetalik yapı hazırladı ve Nb ara katmanının eklenmesinin Ti6Al4V/Al6.21Cu bimetalik yapısının mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebileceğini buldu [75].

Singh ve ark. (2021) WAAM kullanılarak inşa edilen NiTi/paslanmaz çelik bimetalik yapıların mikroyapısını ve mekanik özelliklerini araştırdı. Arayüzde herhangi bir kusur olmadığını ve as-prepared bimetalik yapıların iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu buldular [76].

O, T., Yu, S., Runzhen, Y. ve arkadaşları yaptıkları çalışmada şekillendirme işleminde salınım-WAAM konik kabuğunun sıcaklık alanını, dinamik gerilmesini ve şekillendirme doğruluğunu inceler ve WAAM konik kabuk parçasını üretir. Sonuçlar, ofset dolum WAAM ile karşılaştırıldığında, salınlı WAAM konik kabuğun iç ve dış duvarları arasındaki sıcaklık farkı değeri önemli ölçüde azalır, soğutma hızı iki katına çıkar, ara katman sıcaklığı 300 °C'nin üzerindedir ve ortalama sıcaklık gradyanı, dinamik gerinim stabilitesi değeri ve deformasyon yaklaşık %50 azalır. Aynı işlem parametreleri altında, oscillate-WAAM'ın hareket hızı düşüktür, bu da ısı girişini büyük ve ara katman sıcaklığını yüksek artırır. Yukarıdakilerin tümü, stres salınımı için iletkendir ve bileşenlerin gerilmesini ve deformasyonunu azaltır [77].



Şekil 2.18: Oscillate-WAAM Konik Kabuk (a) Konik Kabuk Modeli (b) WAAM Konik Kabuk

Kaynak: (He vd., 2021)

Ashish Kumar ve ark., (2021) yaptıkları çalışmada Inconel 625 ve östenit paslanmaz çelik 304L ile bimetal yapı çift telli ark katkılı imalat (DWAAM) gerçekleştirmişlerdir. Bimetal biriktirilmesi için proses parametrelerini, iki telin tek telli besleme birikintilerinin yanıt yüzey analizleri ile seçmişlerdir. Bimetal arayüzündeki mikroyapıları ve kimyasal bileşim varyasyonlarını araştırmak için taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağıtıcı spektroskopi testleri yapmışlardır.

Ara katmanlar olmadan BMS durumundaki ani değişime kıyasla kimyasal bileşimin ara katmanların eklenmesiyle kademeli olarak değiştiği bulunmuştur [78].

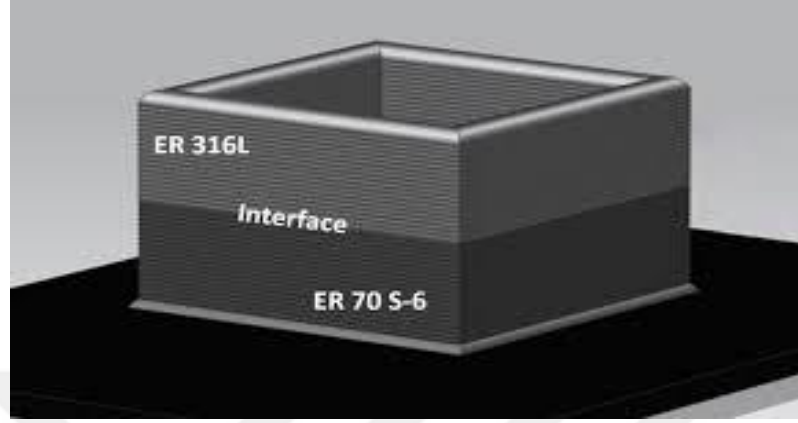
Shalini Singh ve ark. (2021) yaptıkları alışma, Tel Ark Katkı Maddesiyle Üretilen NiTi-SS bimetallik yapıların mikro yapısını ve mekanik özelliklerini ilk kez sunmaktadır. Eklem boyunca bileşimde yumuşak bir geçiş ile hatasız bir tortu gözlemlenmişlerdir. NiTi, dendritik bir mikro yapı gösterir ve arayüzde makul mekanik özellikler kazandıran TiCr₂, TiNi₃ ve FeNi intermetalik fazlar gözlenir. Arayüz, ortalama 400 HV sertliği gösterdi ve nihai basınç dayanımının, kırılgan intermetaliklerin varlığından dolayı kırılgan kırılma ile 570 MPa olduğu gözlemlenildi [79].

S. Mohan Kumar ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada, SS321 ve Inconel 625'in bimetallini WAAM yöntemini kullanılarak ürettirler. Bimetal parçayı mikroyapısal özellik ve mekanik bütünlük inceleyip birtakım sonuçlara vardılar. WAAM ile üretilen bimetal parçalarda herhangi bir çatlak olmaksızın başarılı parçalar ortaya çıkabileceğini göstermişlerdir. Çekme özellikleri SS321 için daha iyiydi ve Inconel 625 için dövme alaşımlara göre karşılaştırılabilirken, arayüz FGM numunesi SS321 tarafında başarısız oldu [80].

Wenhao Zhang ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada 316L ve Inconel 625 bimetallik yapılara soğuk metal transferine dayalı tel ark katkılı imalat uygulamışlardır. Biriktirme dizisinin bimetallik yapının mikroyapısı ve özellikleri üzerindeki etkisi kesin olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, biriktirme katmanlarının sayısındaki artışla birlikte, 316L'deki d-ferrit morfolojisinin ıttadan iskelete değiştiğini ve Inconel 625'teki Laves fazı miktarının arttığını gösterdi. 316L ve Inconel 625 biriktirme tarafına arayüz boyunca yayılan iki çatlak vardı. 316L-Inconel 625 ekme numunelerinin kırılması, sünek bir kırılma olan 316L tarafında meydana geldi. Inconel 625-316L ekme numuneleri, kırılgan ve sünek kırılma karışımı olan çatlaklar nedeniyle arayüzde kırıldı [81].

Gürol ve ark. (2021), yaptıkları bir çalışmada robotik WAAM teknolojisi kullanılarak ferritik ER 70 S-6 ve paslanmaz elik ER316L kaynak telleri biriktirilerek çok malzemeli metalik parçalar üretmişlerdir. Robot hücresinde OTC Daihen FD-V8L'nin kaynak robotu kullanılmıştır. GeKaMac Power MIG GPS WB P500L güç kaynağı, sinerjik bir kaynak makinesi olarak robot hücre sine entegre

edilmiştir. İlk kök paso ve pasolar arası tabakalar 1,2 mm ferritik ER 70 S-6 kodlu düşük karbonlu çelik masif kaynak teli ile üretilir. On kat kaynak geçişinden sonra, malzeme-B katmanları, bi-metal bileşen üretmek için üzerine biriktirilirken, malzeme-B, ER316L östenitik paslanmaz çelik kaynak teli idi [82].



Şekil 2.19: Üretilen Bimetal Komponent

Kaynak: (Zhang vd., 2021)

İki farklı malzeme arasındaki arayüzleri içeren detaylı mikroyapı analizleri ve sertlik testleri yapılan numunelerde Fe-östenit kaynak arayüzlerinin karakterizasyonu, sertleştirme elemanlarının yer değiştirmesinden dolayı sert fazların varlığı gözlenmiştir. Mikrosertlik incelemesi, en yüksek sertlik değerlerinin, arayüz tabakası boyunca Fe ve C migrasyonu nedeniyle bimetalik arayüzde kaydedildiğini ortaya çıkarmıştır [82].

Yinbao Tian, Junqi Shen ve ark. (2022) bu çalışmada bir, iki ve beş Al tabakalı Ti-Al bimetalik yapılar, soğuk metal transfer kaynağı ile tel ve ark katkılı imalat yoluyla imal edilmiştir. İlk Al tabakasının biriktirme işlemi sırasında matris TiAl idi ve iğne şeklinde bir Ti₃Al oluştu. Daha sonra, Al alaşımının ikinci biriktirme katmanından TiAl₃ oluştu ve iki tür yapıya sahip olağanüstü bir morfoloji sergiledi: aynı büyüme yönelimine sahip kaba sütunlu tane yapıları ve rastgele dağılıma sahip uzun şerit benzeri yapılar. Ti-Al intermetalik bileşiklerinin oluşum sırası TiAl₃, TiAl ve Ti₃Al idi [83].

Kim, Y.S., Yun, D., Han, J.H. ark. (2022) yaptıkları çalışmada, tel ark katkılı üretim (WAAM) teknolojisine dayalı bir gaz-metal-ark-kaynak (GMAW) tarafından üretilen Inconel 625 (In625) ve östenitik paslanmaz çelik 316L'nin (SS316L) bimetalik katkılı olarak üretilmiş bir yapısını (BAMS) sunmaktadır. Bir BAMS, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için 970 °C'de ısıtılma işlemi görmüştür. Isıl işlemler,

SS316L'de delta-ferritten östenite mikroyapısal bir değişime ve as-built numuneye kıyasla gerilme mukavemetinin artmasına neden oldu. In625 ve SS316L arasındaki aynı kristal yapı ve benzer kafes sabiti, aynı kristalografik yönelime sahip tutarlı sütunlu taneler geliştiren bimetalik arayüzde epitaksiyel bir büyümeye yol açtı. Isıtma ve soğutma dizisi sırasında, her iki malzemenin farklı termal genleşme katsayıları, arayüzde daha yüksek bir sertlik sergileyen dinamik gerinim sertleşmesinin sağlandığı bimetalik arayüzde lokalize suşlar üretti [84].

Yi Chen, Xinde Zuo ve arkadaşları (2022) yaptıkları bu çalışmada WAAM, Q345 substratınadönüşümlü olarak 304 paslanmaz çelik (304 SS) ve düşük karbonlu çelik (LCS) biriktirerek gelişmiş mukavemet-süpürneklik sinerjisine sahip bimetalik lamine çelik yapı (BLSS) üretmek için kullanılmıştır. Katkı maddesi üretilen BLSS'nin mikroyapısı ve mekanik özellikleri detaylı olarak araştırılmıştır. 304 SS tabakası, tek-304 SS yapısının östenit matrisinde dağılan vermiküler ferritten farklı martensitten oluşur. LCS katmanı, bloklu ferritin rafine edilmesi dışında, single-LCS yapısına kıyasla belirgin bir değişikliğe sahip değildir. Bu arada LCS ve 304 SS katmanları arasındaki arayüzde ince taneler oluştu. Farklı katmanlar arasındaki eleman içeriği, faz bileşeni ve tane boyutundaki farklılıklar, bu BLSS'nin farklı yükleme yönleri boyunca mekanik özelliklerinde değişikliklere yol açar. Boyuna (Y) yönde çekme mukavemeti ve uzama sırasıyla 999.8 MPa ve %28,2'ye ulaştı; burada mukavemet, aralarındaki uzama ile tek malzemeli 304 SS ve LCS yapısının neredeyse iki katıydı. Çekme işlemi sırasında BLSS'nin gerinim dağılımını gözlemlemek için dijital görüntü korelasyonu (DIC) kullanıldı ve enine (Z) yönde önemli bir stres konsantrasyonu gözlemlendi ve bu da Y yönüne kıyasla çekme özelliklerinde bir azalmayana neden oldu. Farklı yükleme yönlerine sahip numunelerin kırık topografya analizi, kırılma-sfero karışık kırık modunu ortaya çıkardı. Çalışmalarımız, mimari ve inşaat mühendisliği yapıları gibi alanlarda potansiyel uygulamalara sahip üstün mekanik özelliklere sahip BLSS imalatı için uygulanabilir ve esnek bir yöntem sunmaktadır [85].

Donghong Ding ve ark. bir robot yardımıyla tel ark eklemeli imalat tekniğini kullanarak üst üste binen çoklu boncukları yerleştirmeyi tartışmışlar. Birden çok boncuktan oluşan geleneksel düz tepeli üst üste binen model yerine, teğet bir üst üste binen modeli izlediler. Deneysel testler Wollongong Üniversitesi'nde bir robotik kaynak sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Robotik WAAM sistemi bir kaynak

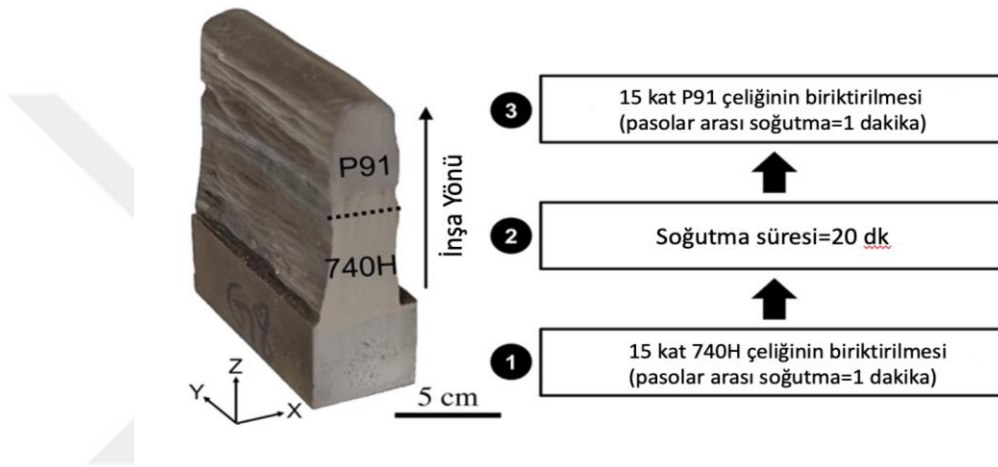
hücrelerine entegre edilmiştir. Tel elektrot 1.2 mm çapında bakır kaplı çelik teldir. %82 argon ve %18 CO₂ den oluşan bir koruyucu gaz karışımı 22L/dak akış hızında kullanılmıştır. Tel besleme hızı 5m/dak olarak ayarlanmış ve kaynak hızı 200 ile 550 mm/dak arasında değiştirilmiştir [86].

Raut, L.P. ve Taiwade, R.V. Yaptıkları bu çalışmada, tek geçişli çok katmanlı bir modele dayanan östenitik paslanmaz çelik (ASS) ve düşük karbonlu çelik (LCS) bimetalik yapı, soğuk metal transfer kaynak işlemi kullanılarak WAAM aracılığıyla biriktirmiştir. Ayrıca, bimetalik yapı, mikro yapısını ve mekanik özelliklerini incelemek için çeşitli analizlere tabi tutulmuştur. Bulgu, ASS kısmındaki Ferrit-Östenit modelini göstermektedir. ASS'nin mikro yapısı vermiküler δ -ferrit ortaya çıkarırken, LCS asiküler ve çokgen ferrit morfolojisini ortaya çıkardı. Bimetalik yapının arayüzünde mikrosertlikte keskin bir artış gözlenmiştir. Bimetalik yapının gerilme mukavemeti ve % uzaması sırasıyla 493 MPa ve %22'ye ulaşırken, kırılma LCS tarafında meydana geldi ve bimetalik yapının arayüzünde güçlü mekanik bağlanma ve tokluğa işaret etti [87].

Motwani, A., Kumar, A., Puri, Y. ve ark. soğuk metal transferi (CMT) işlemi ile imal edilen 316LSi paslanmaz çelik ve Ni-baz alaşımı 625'ten oluşan bimetalik ince duvar yapısının mikro yapısını ve mekanik davranışını araştırmaktadır. Bimetalik parça kesitinin farklı konumlardaki mikroyapı analizi, katmanlar arasında epitaksiyel tane büyümesine sahip sütunlu bir katılma yapısını ortaya koymuştur. Bimetalik arayüz boyunca mikro sertlik geçişleri, 316LSi'de 160 ila 190 HV sertlik gösterirken, alaşım 625 torduatınıniki bimetalik arayüzde anormal sertlik olmadan 220 ila 245 HV arasında değişiyordu. Çekme testi 316LSi ve alaşım 625 yapı katmanları içinde ve ayrıca bimetalik arayüze enine gerçekleştirildi. Bimetalik arayüz boyunca yapılan çekme testi, 316LSi yatağında ortalama nihai gerilme mukavemeti 660 MPa, akma dayanımı 412 MPa ve %49 uzama ile arızaya neden oldu. Bu çalışma östenitik paslanmaz çelik ile Ni bazlı alaşım arasındaki yüksek kaliteli bimetalik ince parça birikintilerinin CMT-WAAM tarafından başarıyla üretilebileceğini göstermektedir [88].

Soumya Sridar ve ark. (2022), gelişmiş ultra-süperkritik fosil yakıt enerji santrallerinde uygulanan farklı bir alaşımın imalatına rehberlik etmek için, Inconel 740H süper alaşım ve P91 çeliğin bimetalik yapıları WAAM kullanılarak imal ettiler. Telin çapı sırasıyla P91 çelik ve 740H süper alaşım için 0,9 ve 1 mm idi. Örnek,

Raytheon Technologies Araştırma Merkezi'nde (RTRC) bir robotik WAAM sistemi (plazma meşaleli ABB robotik platformu) kullanılarak oluşturuldu. WAAM kurulumu, tel besleyiciye bağlı altı eksenli bir robottan ve plazma ark kaynağı (PAW) torcundan oluşur. PAW torcunu korumanın yanı sıra plazmayı üretmek için saflaştırılmış argon gazı kullanıldı. Torçtan biriktirme yüzeyine olan mesafe 12 mm'de tutuldu ve numune, 30'luk bir tel besleme açısıyla yumuşak çelik bir alt tabaka üzerine bırakıldı. Tel, eriyik havuzunun önünden girer ve plazma için argon gazı akışı 1,2 litre/dk idi. İlk olarak, 15 kat 740H süper alaşım uygulandı, ardından 20 dakikalık bir soğuma süresi geldi ardından 15 kat P91 çeliği kaplandı [89].



Şekil 2.20: P91/740H Bimetalik Yapı Oluşturmak İçin Kullanılan Son WAAM Oluşturma ve Yazdırma Stratejisi

Kaynak: (Sridar vd., 2022)

Her iki alaşımın biriktirilmesi sırasında ortalama 20.9 V voltaj ve 1 mm kapak aralığı korunmuştur. P91 çeliği ve 740H süper alaşımdan oluşan ilk katman için daha yüksek akım ve daha düşük hareket hızı kullanıldı. Sonraki 740H süper alaşım ve P91 çeliği katmanları için, biriktirme sırasında akım azaltıldı ve hareket hızı artırıldı.

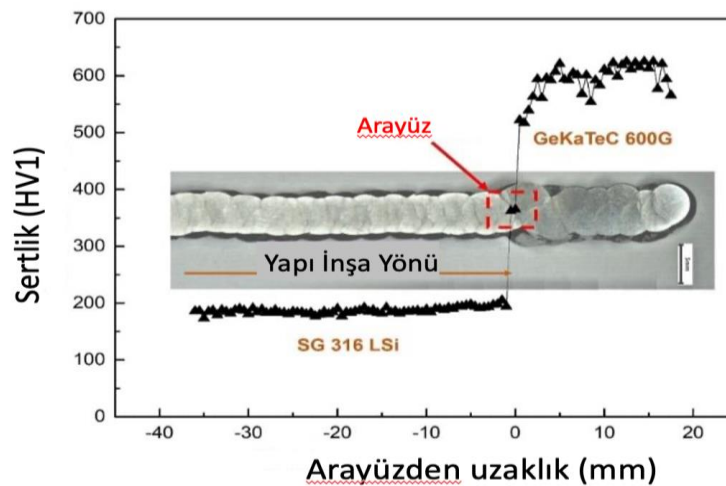
Gradyan bölgesinin mikrosertliğinin P91 ve 740H bölgeleri ile karşılaştırıldığında en az sert olduğu bulunmuştur. Gradyan bölgesinde taneler arası çatlaklar gözlemlendi. Bu nedenle, Sridar ve ark. biriktirme dizisini değiştirmenin ve P91 ve 740H'nin karışık bir kimyasal bileşimine sahip gradyan katmanları eklemenin, hatasız yapılar elde etmek için uygun olacağını öne sürdüler.

2.4 Bimetal Komponent

Teknolojideki gelişim ve değişimler insanları üstün malzemeler üretmeye itmiştir. Bunun sonucunda farklı malzemeler ortaya çıkmıştır. Metal malzemelerin avantaj sağlayan özelliklerini birleştirmek amacıyla üretilen malzemelere bimetalik malzeme denir. Bu yapılar, sertlik ve korozyon direnci gibi birbirini tamamlayan fiziksel ve mekanik özelliklere sahip iki metalik parçaya sahiptir. Bimetalik bileşenler üretmek için eklemeli üretim teknikleri kullanmak, endüstriyel bileşenlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için umut verici bir üretim sürecidir [90]. Üretilen malzemelerin saf malzemelere üstünlüğü sertlik, aşınma, korozyon direnci, iletkenlik, termal genleşme ve diğer mekanik ve fiziksel özellikleri bakımından olabilmektedir [91].

Bimetal terimi tarihi çok eskiye dayanır. 1871 yılında Hainsworth'ün yaptığı patentli bir çalışmada, bimetal kompozit boruların üretim teknolojilerinden söz edilir [92]. 2000'li yıllara kadar, birkaç çalışma haricinde çalışma olmamıştır. 2001 yılında ise, Al/Cu bimetal kompozitte intermetalik alaşımlardaki büyüme hızlarının incelenmiştir. Bu çalışma alanında ses getirmiş ve bimetal komponentler üzerindeki araştırmaları hızlandırmıştır [93].

Gürol ve ark. yaptıkları çalışmada, keskin kenarda yüksek sertlik değerlerine sahip bir bimetalik satır elde etmek için toplam 65 katmana sahip bir bimetalik bileşen eklemeli olarak üretmişlerdir [90].



Şekil 2.21: Bimetal Parçanın Sertlik Grafiği

Sonuç olarak sertlik değeri kademeli olarak ER 316LSi'den MSG 6 GZ-60'a yükselmiştir ve 600 HV'nin üzerine çıkmıştır. Bu araştırma çalışması, bimetalik

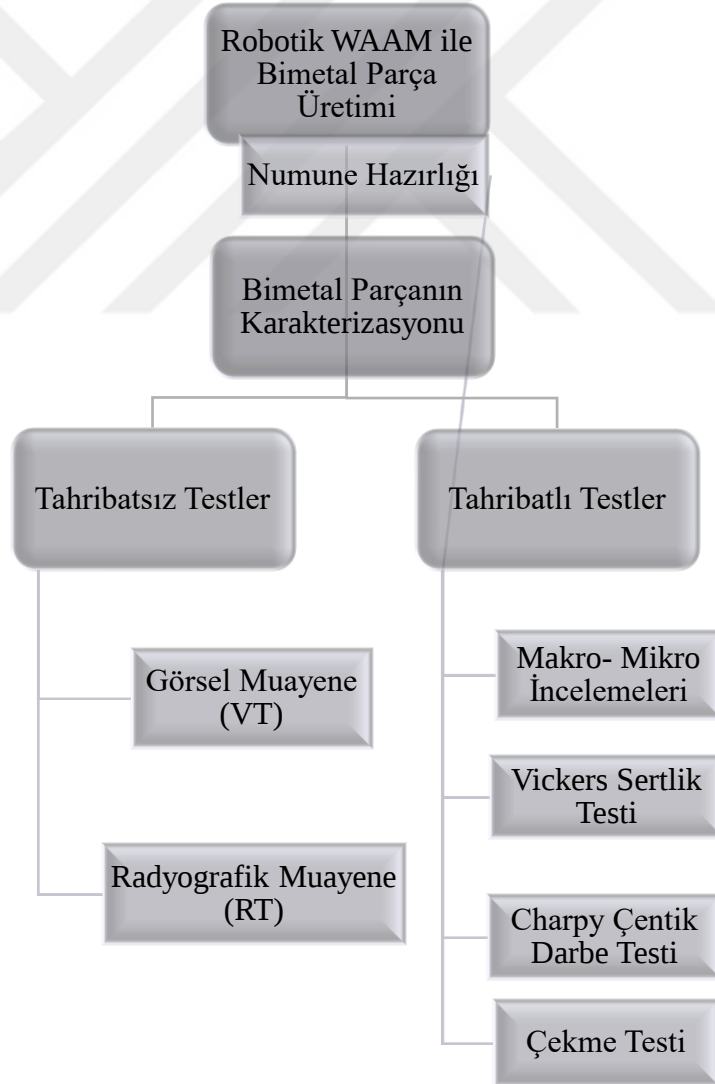
yapıların üretimi için yeni bir yol göstermiştir ve belirli yapısal veya işlevsel uygulamalar için sahaya özgü özelliklere sahip kesme ekipmanı tasarlamak için daha fazla esneklik sağlamıştır [90].



3. DENEYSEL YÖNTEMLER

Tezin bu bölümünde deneysel çalışmalarda kullanılan teller, altlık plaka, koruyucu gaz ve robotik WAAM hücresi detaylıca anlatılmıştır. Ayrıca parça üretimindeki kaynak parametreleri, üretim şekli, termal ölçümde kullanılan kamera görüntüleri, parçaya uygulanan mekanik ve metalürjik testler hakkında detaylı açıklamalara yer verilmiştir.

Tez süresince gerçekleştirilen işlemler şekil 3.1’de özetlenmiştir.



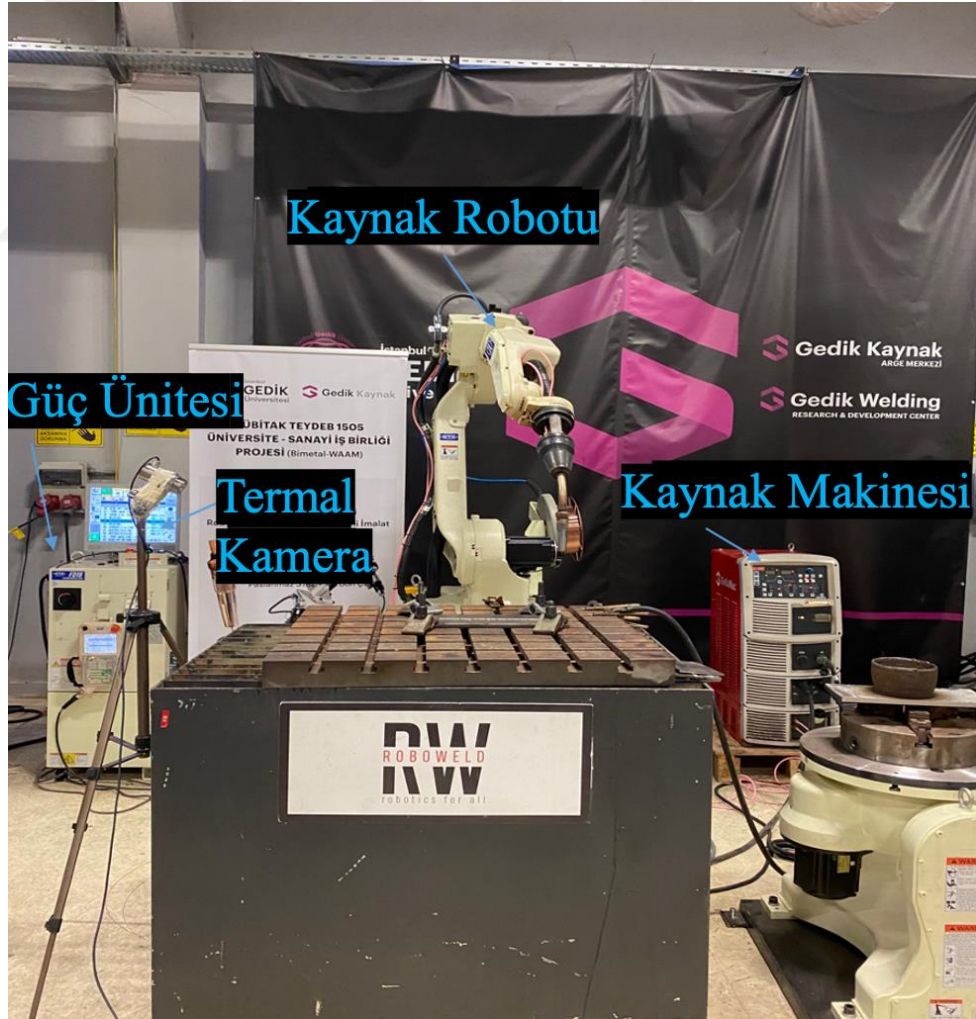
Şekil 3.1: Çalışma İşleyişi Organizasyon Şeması

3.1 Robotik WAAM Hücresi ile Bimetal Parçaların Üretilmesi

Literatür kısmında da yer verildiği üzere tel ark eklemeli imalat ile ilgili çalışmalar son yıllarda artış göstermiştir. İmalat işlemleri ilk olarak üç boyutlu yazıcılarla sağlanmıştır. Ancak hareket kabiliyetindeki kısıtlılık ve boyutsal sıkıntılar sebebiyle üretim sınırlı sayıdaydı.

Bu tez çalışmasında 5220023 numaralı TÜBİTAK TEYDEB 1505 Üniversite-Sanayi iş birliği ile Bimetal Malzemelerin Özlü/Masif Tel Beslemeli Robotik Ark Kaynağı ile Eklemeli İmalat Sistemlerinin Geliştirilmesi projesi kapsamında tasarlanan robotik tel ark eklemeli imalat hücresi kullanılmıştır. Proje konusu ve tez konusu direkt bağlantılı olmamakla birlikte birbiriyle ilişkilidir.

Bu kısımda robotik WAAM hücresi kullanılarak bimetal parça üretilmiştir. Deneylerin yapıldığı robotik WAAM hücresi şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Robotik WAAM Deney Hücresi

Şekil 3.2’de gösterilen hücrede OTC-Daihen FD-B6L kaynak robotu (6 eksenli robot kol) ve GeKaMac Power MIG GPS WB P500L kaynak makinesi kullanılmıştır. Pasolar arası sıcaklığı ölçmek için OPTRIS CT 3M pirometre (200-1500°C) ve OPTRIS Xi 400 termal kamera (150-900°C) kullanılmıştır.

İlk olarak kaynak robotunun hangi hızda ve hangi konumlarda hareket edeceği programlanmıştır. Bu programlama için parça üretiminden önce akım, voltaj, hız, ark boyu ve tel mesafesi gibi çeşitli parametreler üzerinde çalışılmış ve parametreler optimize edilmiştir.

Kaynak makinesi tel sürme makinesi ile aynı anda çalışmakta ve robot kontrol ünitesinden aldığı sinyal ile kaynak işlemine başlamaktadır. Kaynak robotuna kaynak hızı, konumlar ve gereken kaynak parametreleri girilir ve bu sayede kaynak torcu girilen koordinatlara gider. Robot kontrol ünitesinden kaynak makinesine kaynağı başlatacak bir sinyal gönderilir. Kaynak makinesi robot kontrol ünitesinden aldığı sinyali tel sürme mekanizmasına gönderir. Kaynak teli tel besleme ünitesi tarafından sürekli beslenir. Tel alt plakaya temas edince kısa devre oluşur ve akım yükselir ve tel erimeye başlar. Kaynak teli burada elektrot görevi görür yani arkı oluşturan birincil elementtir [69].

Bimetal parçanın üretiminde altlık plaka olarak 12 mm x 150 mm x 350 mm ölçülerinde S316 paslanmaz çelik kullanılmıştır. ELOX SG 316L Si ve 600 G teller bu altlık plaka üzerine yığılmıştır.

Kullanılan tellerin ve altlık plakanın kimyasal bileşenleri çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Tellerin ve Altlık Plakanın Tipik Kimyasal Analiz Değerleri

	C (%)	Si (%)	Mo (%)	Cr (%)	Ni (%)
ELOX SG 316L Si	0.02	0.80	1.98	18.5	11.50
600G	0.4	3	-	9	0.5
SS 316L	0.022	0.003	-	16.70	-

Bimetal parçanın tel ark eklemeli imalat ile üretiminde iki farklı kaynak teli kullanılmıştır. Parçanın alt kısmında Gedik Kaynak’ın Ar-Ge çalışmaları ile üretmiş olduğu ELOX SG 316L Si (paslanmaz çelik tel), üst kısmında ise 600 G (sert dolgu teli) kullanılarak bimetal parça üretilmiştir. Her iki telin çapı 1,2 mm olarak seçilmiştir. Ayrıca, her iki tel ile bir katmanda 3’er paso olacak şekilde 30’ar katman üretilmiştir. Her katmanda gözenek çapak vb. problemler yaşanmaması için

fırçalama işlemi yapılmıştır. Toplamda 60 katmanlık bir parça üretilmiş olup, parçanın boyutları 18 mm x 150 mm x 330 mm olarak ölçülmüştür.

Çizelge 3.2: Telin Tipik Mekanik Değerleri

	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)
ELOX SG 316L Si	Min. 400	550-700	Min. 30
600 G	-	-	-

600 G teline ait mekanik değerler üreticisi tarafından paylaşılmamıştır.

Gazaltı ark kaynak yönteminde asal ve aktif gazlar kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan gazlar hem ayrı hem de karışım olabilmektedir. Bu sebeple gazaltı ark kaynağı, Metal Inert Gaz (MIG) kaynağı ve Metal Aktif Gaz (MAG) kaynağı olarak 2 sınıfa ayrılır. Koruyucu gazın türüne göre isimlendirilen metal ark kaynağında, nüfuziyet şekli, kaynak dikişi görünümü ve sıçrantı gibi hatalar kullanılan aktif gaz türünden kaynaklı ergitme kuvvetine bağlı olan aktif gaz sebebiyle oluşmaktadır [94].

Çizelge 3.3: Koruyucu Gaz Kimyasal Bileşimleri

	Argon (%)	CO (%)	Kullanıldığı Tel
M12	97,5	2.5	ELOX SG 316L Si
M21	89	18	600 G

Koruyucu gaz, içeriği imalatla kullanılan tellere göre değişiklik gösterdiğinden dolayı iki farklı gaz kullanılmıştır. ELOX SG 316L Si için M12 (ArCO2.5), 600 G için M21 (ArCO18) kullanılmıştır. Her iki telde de koruyucu gazın debisi 15lt/dk olarak ayarlanmıştır.

Robotik WAAM hücresinde kullanılan kaynak makinesi tipi sinerjiktir. Geleneksel elektrik ark kaynağı makinelerinde akım, gerilim ve tel besleme hızını kaynakçı kendisi ayarlar. Sinerjik kaynak makinesinde akım ve kaynak hızı değerleri girilirse gerilim ve tel sürme hızını otomatik olarak ayarlar [69].

Çizelge 3.4: Üretim İşlemlerinde Kullanılan Kaynak Parametreleri

	ELOX SG 316L Si	600 G
Akım (A)	130-160	150-180
Voltaj (V)	17-19	18-21
Torç Açısı	90	90
Kaynak Hızı (mm/dk)	35-45	35-45
Koruyucu Gaz Debisi (l/dk)	15	15

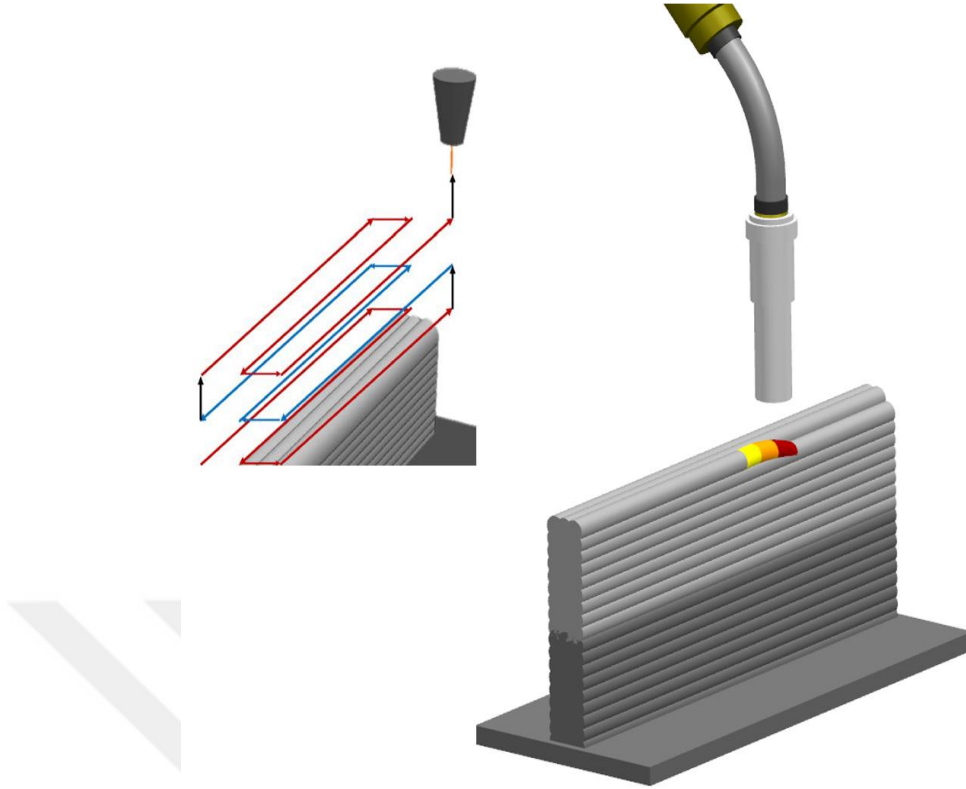
Doğru parametreleri bulabilmek için parametre çalışmaları yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda kaynak akımı arttıkça penetrasyon, biriktirme hızı ve kaynak genişliği artmıştır. Akımı arttırıp hızı azaltınca kaynak genişliği ve penetrasyon artmıştır. Akımı azaltıp hızı arttırınca kaynak genişliği ve penetrasyon azalmıştır. Voltaj arttıkça kaynak genişlik artmış voltaj azaldıkça kaynak genişliği azalmıştır.

WAAM yönteminde parçalar katman katman biriktirildiğinden yüksek ısı nedeniyle pasolar arası sıcaklık artar. Literatürde oluşan aşırı ısınmayı minimuma indirmek amacıyla çeşitli bekleme süreleri kullanılarak çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Sonuç olarak kusursuz parçalar elde etmek için WAAM yöntemiyle parça üretirken proses parametreleri hayati önem taşır.

Genel parametreler haricinde üretimi etkileyen ve üretimdeki malzeme türüne göre önemli olan parametrelere bulunmaktadır. Örneğin torç açısı bu parametrelerden biridir.

Su ve Chen, CMT ile üretimde torç açısının malzeme yığılma üzerine olan etkisini inceleyen bir çalışma yapmıştır. Çalışma sonucunda torç açısının alüminyum malzeme biriktirme işleminde önemli bir parametre olduğunu söylemektedir. Farklı torç açılarının kaynak morfolojisini, porozite oluşumunu ve kaynak havuzu akışını etkilediğini önemle belirtmiştir. Farklı torç açılarıyla biriktirilen kaynak dikişlerinde farklı oluşabileceğini de bildirmiştir [95].

Biriktirme stratejisini belirlemek WAAM yönteminde oldukça önemlidir. Biriktirme başlangıcında aşırı ısı emilimi kaynak nüfuziyetini düşürür. Biriktirme sonucunda yüksek sıcaklığın sebep olduğu düşük ısı dağılımı vardır bu da tabaka yüksekliğinin azalmasına neden olur. Makro ve mikro yapısal hataları önlemek amacıyla bu tezde paralel biriktirme stratejisi ile üretim gerçekleştirilmiştir.

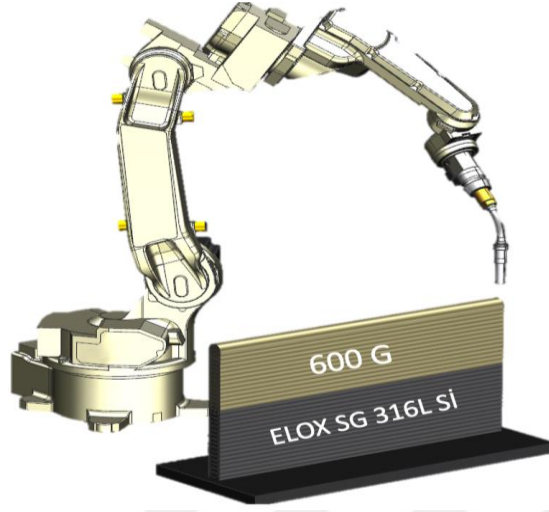


Şekil 3.3: Bimetal WAAM Yığma Prosesi

Şekil 3.3'te üretimin yığma prosesi verilmiştir. Paralel biriktirme yöntemiyle üretim yapıldığı şekilde görülmektedir. Paralel biriktirme stratejisi tek katmanda üçlü pasolar paralel şekilde kaynak atılmıştır. Duvarın başlangıç ve bitişinde farklı ısı yayılımından kaynaklanacak makro ve mikro yapısal hataları önlemek amacıyla örülmüş duvarın başlangıç yönü her katmanda değiştirilmiştir.

İlk katmanın yığma işleminin gerçekleşeceği altlık plakanın kaynak masası üzerindeki konumu ve sabitlenmesi fikstürler yardımıyla sağlanmıştır. Bu sayede yüksek ısıdan kaynaklanan çarpılmalar minimum düzeye indirilmiştir. Kalın cidarlı bir WAAM duvarı üretmek için her katmanda birbiri üzerinde 1/3 oranında bindirilmiş 3 pasodan oluşan toplamda 60 katman biriktirilmiştir. Yazılımdan elde edilen takım yolları kodu robota aktarılarak ilk olarak ELOX SG 316 L Si kaynak teli kullanılarak SS316 altlık malzemesine 30 katman biriktirilmiştir. Ardından sıcaklık değerinin 200 altına düşmesi beklenerek ikinci kaynak teli sert dolgu (600 G) kullanılarak, 316 L Si WAAM dikişinin üzerine 30 katman daha biriktirilmiştir. Biriktirme işlemi sırasında altlık plakanın sıcaklık değişimlerini gözlemlemek amacıyla Optris CT 3M pirometre kullanılmıştır. Ayrıca, her 5 pasoda bir biriktirme esnasında ve biriktirme işlemine başlamadan önce 5 saniye süresince Optris Xi 400

termal kamera kullanılarak termal görüntüler alınmıştır. Bu yöntemle, görsel ve sayısal olarak üretilen parçanın ısı ve sıcaklık alanında analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4: Üretilen Bimetal Parçanın Bileşenleri

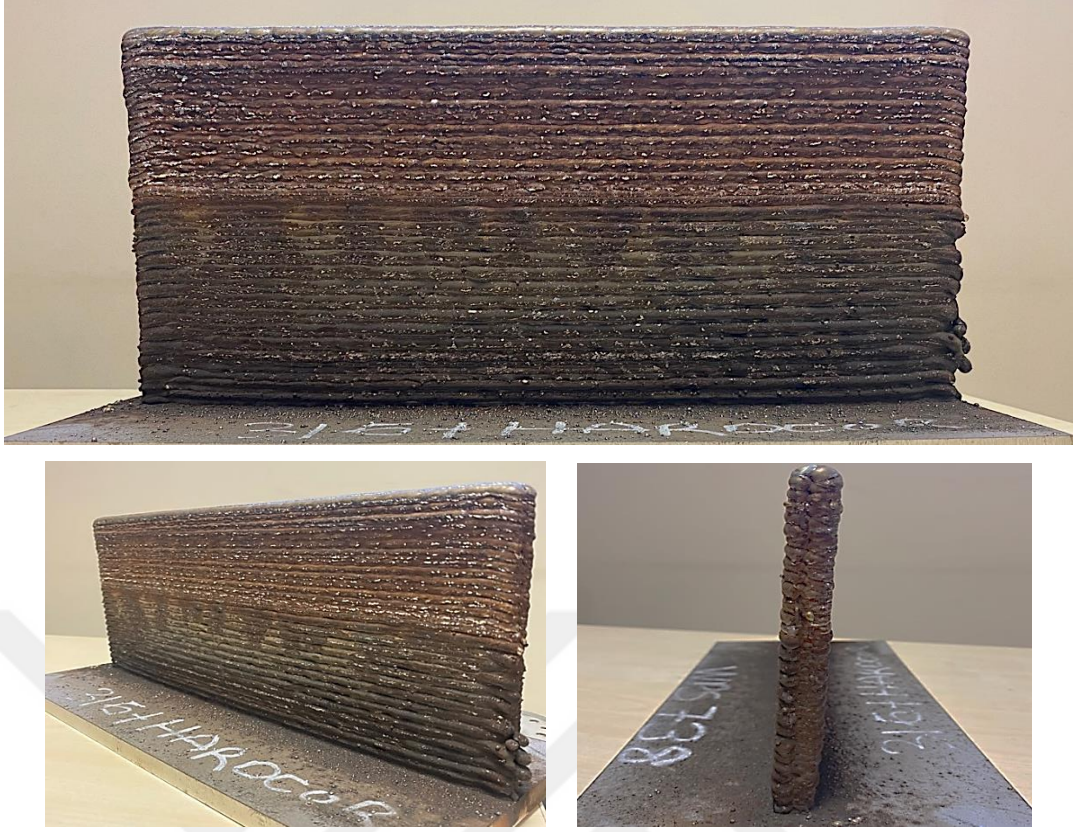
Daha önce yapılan parametre çalışmalarında optimum 180 saniye bekleme süresinin parçada mekanik ve metalürjik özellikleri olumsuz yönde etkilemediği görülmüştür. Deney kapsamında oluşabilecek ısı birikimini en aza indirebilmek için katmanlar arası 180 saniye bekleme süresi programlanarak WAAM parçasının soğumasına izin verildi. Biriktirme esnasında her katmanda gözenek, çapak vb. problemlerin oluşmaması için paslanmaz çelik fırça ile fırçalanmıştır.

Tüm bu işlemlerin sonucunda 18 mm x 150 mm x 330 mm ölçülerinde bimetal parça üretimi başarıyla tamamlanmıştır.

Çizelge 3.5: Bimetal Parçanın Katmanlarının Akım ve Voltaj Değerleri

	ELOX SG 316L Si		600 G	
	Akım	Voltaj	Akım	Voltaj
5.katman	160	15	140	19
10.katman	170	15	140	19
15.katman	160	15	130	19
20.katman	160	15	140	18
25.katman	170	15	130	19
30.katman	170	15	130	19

Robotik tel ark eklemeli imalat ile üretilen bimetal parça şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Robotik WAAM ile Üretilen Bimetal Parça

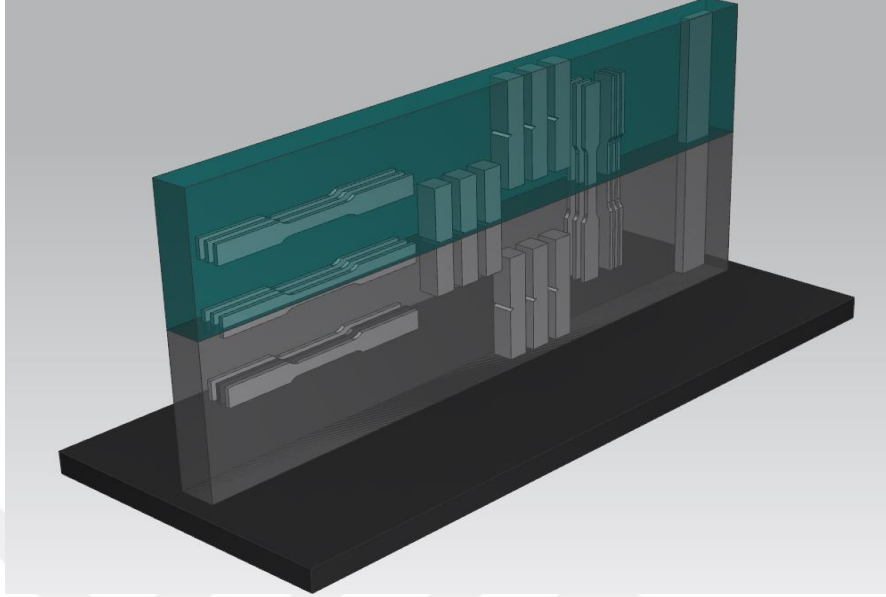
3.2 Numune Hazırlığı

Üretilen bimetal parçadan tahribatlı ve tahribatsız testlerinin yapılabilmesi için belirlenen ölçülerde numuneler çıkarılmıştır. Çekme testi numuneleri tel erozyon yöntemiyle çıkarılmıştır. Şekil 3.6’da tel erozyon yöntemiyle numune çıkarılması gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Tel Erozyon Yöntemiyle Numune Çıkarma

Şekil 3.7’te görüldüğü üzere parçadan 9 adet yatay çekme numunesi bimetal arayüzden, ELOX SG 316L Si ve 600 G ile üretilen katmanlardan ayrı ayrı alınıp incelenmiştir. 1 adet mikro-makro yapı ve sertlik numunesi çıkarılmıştır.



Şekil 3.7: Tahribatlı Muayene Numune Teknik Çizimleri

Makro ve mikroyapı analizleri, sertlik analizleri için numuneler hazırlanmıştır. Öncelikle üretilen parçadan yatay şeritli testere yardımıyla 10-15 mm aralığında bir numune alınmıştır. Gedik Kaynak bünyesinde bulunan Metkon Forcipol 2V zımparalama ve parlatma cihazı ile parça yüzey analiz için hazırlanmıştır. Alınan numunenin sırasıyla 120, 220, 320, 600, 800, 1000, 1200 ve 2500 numaralı zımparalarla yüzey hazırlama işlemi tamamlanmıştır. Akabinde numune 1 µm’lik alümina süspansiyonu ve çuhayla parlatılıp alkol ile temizlenerek dağlama işlemine hazırlanmıştır.

ELOX SG 316L Si ve 600 G telleri kullanılarak üretilen bimetal parça mikroyapı için paslanmaz tarafı %10 NaOH solüsyonu ve sert dolgu tarafı %3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır. Parçanın dağlanması yapılırken + kutup çubuğu malzemeye dokunurken – kutup dağlanacak yüzey üzerinde parçaya değmeden gezdirilerek işlem yapılır. Parlatma ve dağlama işlemleri tamamlanan parça mikro ve makro incelemeleri için hazır hale getirilmiştir.

3.3 Tahribatsız ve Tahribatlı Muayene İşlemleri

Tahribatsız muayene (Non-destructive testing-NDT), incelenecek malzeme ya da komponentin bütünlüğünü bozmadan yapılan muayenedir. Muayenenin geçerliliği ise

tahribatlı muayene sonuçlarına bağlıdır. Malzeme içinde görülmeyen süreksizliklerin tespitinde kullanılır. Tahribatsız olması sebebiyle ekonomik ve hızlıdır. Sanayi ve birçok alanda kullanılmaktadır.

Tahribatlı muayene, malzemelerin yüzeyinde kalıcı hasar meydana getirdiği muayene yöntemleridir. Bu bölümde üretilen bimetal parçanın tahribatlı muayenelerine de yer verilmiştir. Üretilen bimetal parçaya uygulanan tahribatlı testler; mikroyapı analizi, makroyapı analizi, çekme deneyi, çentik darbe deneyi ve sertlik deneyidir.

3.3.1 Görsel muayene ve dijital radyografik muayene

Bu çalışmada, üretilen bimetal parçaya tahribatsız muayene tekniklerinden görsel muayene (VT) ve radyografik muayene (RT) uygulanmıştır. Öncelikle parçada kaynak sonrası yüzeyinde gözenek çatlak gibi hataların olup olmadığını tespit etmek için görsel muayeneye tabi tutulmuştur. Görsel muayene (VT) çıplak gözle yapılan muayenedir. Parçanın yüzey kalitesini ve yapı bozukluklarının tespitinde kullanılır. Üretilen parçanın görsel muayenesi TS EN ISO 17637'ye göre yapılmıştır. Akabinde değerlendirmeleri EN ISO 5817 standartı B sınıfına göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8: Dijital Radrografi Çekim Düzenegi

Görsel muayeneden uygunluk alan parçanın iç yapısında süreksizlik, çatlak, gözenek ergime noksanlığı vb. hataların olup olmadığını tespit etmek için EN ISO 17636 standartına göre dijital radyografik muayene uygulanmıştır. Bu yöntemde nüfuz edici kısa boylu radyasyon dalgaları kullanılır.

Radyografik muayenede kaynaklı plakaya radyografi makinesinden çıkan radyasyon demeti gönderilir. Gönderilen radyasyon kaynaklı plakanın içinden geçer ve plakanın altına yerleştirilen film tabakasında iz oluşturur. Plakanın kaynak bölgesindeki gözenek ve çatlaklar radyasyonun yansıma şiddetini değiştirmektedir. Böylece kaynak hatalarının film tabakasındaki izleri rahatlıkla ayırt edilebilir [96].

Gedik Kaynak bünyesinde kullanılan Ge Eresco MF4-300 KW radyografik muayene cihazı (X-ray) gösterilmiştir. Üretilen bimetal parçanın radyografik muayenesi bu cihazla yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında bir farklılık olarak dijital radyografik muayene yapılmıştır.

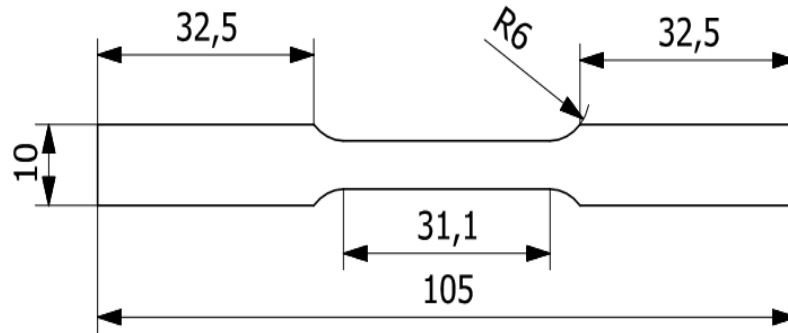
3.3.2 Makroyapı – mikroyapı incelemeleri

Bimetal parçanın TS EN ISO 17639 standartına göre makro ve mikroyapı analizleri yapılmıştır. Numunelerin makro yapılarını incelemek için Gedik Kaynak bünyesinde yer alan Nikon SMZ745T makro mikroskobu kullanılmıştır. Numunelerin mikroyapılarını incelemek için ise yine Gedik Kaynak bünyesinde bulunan Leica Mİ8 M marka mikro inceleme mikroskobu kullanılmıştır.

3.3.3 Çekme deneyi

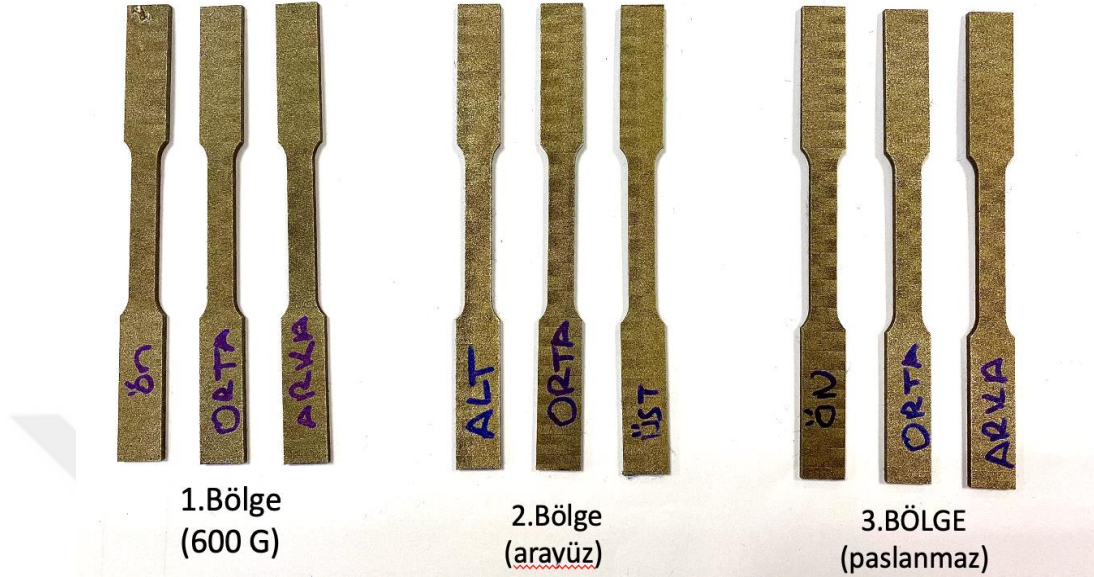
Bimetal olarak ürettiğimiz parçanın ne kadar güçlü ve kırılmadan önce ne kadar gerilebileceğini bulmak için parçaya çekme testi yapılmıştır. Tahribatlı testler içinde en yaygın kullanımı olan testtir. Çekme deneyi sonuçlarına göre akma mukavemeti belirlenir. Akma mukavemeti ise parçanın dayanabileceği maksimum yükü belirler.

Bu çalışmada bimetal parçadan tel erozyon cihazı ile EN ISO 4136 ve EN ISO 6892-1 standartlarında Şekil 3.9’ daki çekme numunesi ölçülerine göre çekme testi numuneleri çıkarılmıştır.



Şekil 3.9: Çekme Numune Ölçüsü

3 adet birinci parçadan 3 adet ikinci parçadan 3 adet ara yüzeyden çekme numunesi çıkarılmıştır. Çekme deneyi için Gedik Kaynak bünyesinde bulunan Zwick Roell Z 600 marka cihazı kullanılmıştır.



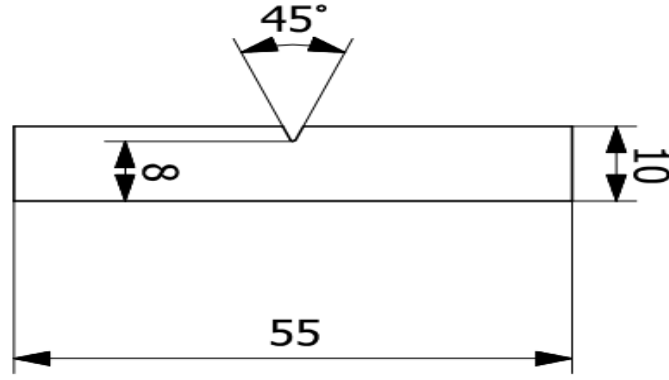
Şekil 3.10: Çekme Deneyi Numuneleri

3.3.4 Charpy çentik darbe deneyi

Charpy çentik darbe testi ile hazırlanan numunelerin dinamik yüklere karşı göstereceği gevrek kırılma direncini görebilmek için numuneye yapay bir darbe uygulanmaktadır [97].

Çentikli darbe deneyi; numuneleri çatlak içermezler, bu numunelere sadece çentik açılır. Bu sebeple yapılması kolay ve ekonomiktir. Kolay ve ekonomik olması ürün kalite kontrollerinde yaygın olarak kullanılmasına sebep olmaktadır. 1905 yılında, çelik yapıların sünek-gevrek kırılma geçiş sıcaklığı aralığında kırılma davranışları üzerinde çentiklerin etkisini test etmek amacıyla geliştirilmiştir. Günümüzde de çeliklerin kalite kontrolünde hala kullanımı yaygındır [98].

Çentik darbe deneyi TS EN ISO 9016 standartına göre yapılmıştır. Bu test Gedik Kaynak bünyesindeki Zwick/Roell RKP 300 marka çentik darbe deney makinesiyle yapılmıştır.



Şekil 3.11: Çentik Darbe Numune Ölçüsü



Şekil 3.12: Çentik Darbe Numuneleri

3.3.5 Vickers sertlik deneyi

Kaynak kalitesinin kontrolünü sağlayan sertlik testleri genellikle mikrosertlik testleri olup, kaynaklı parçadan alınmış numune ile gerçekleştirilir. Bu yöntemde, çok az iz bırakması ve bu sebeple lokal sertlik ölçülmesine imkân verdiği için yaygın olarak Vickers mikrosertlik deneyi tercih edilmektedir. Bu test ile kaynak bölgesinde oluşan ve çok dar olan farklı iç yapı bölgelerinde sertlik ölçümü sağlanmaktadır [98].

Sertlik ölçümleri numune yüzeyinden HV 1 batıcı uç (135° derece tepe açılı elmas kare piramit) ile 1 mm aralıklarla mikrosertlik örnekleri alınmıştır. Ölçümler Gedik Kaynak bünyesinde bulunan Emcotest Durascan marka sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Sertlik deneyi ISO 9015 standartına göre yapılmıştır. 0.25 mm aralıklarla 80 nokta östenitik paslanmaz çelik (Elox SG 316L Si) bölgeden 40 nokta sert dolgu (600 G) bölgeden toplam 120 noktadan sertlik alınmıştır. Sertlik alınan

noktalar incelenip sert dolgu, östenitik paslanmaz çelik ve arayüzey bölgelerinin sertlikleri karşılaştırılacaktır.

Şekil 3.13'te sertlik deneyi sonrası numune görüntüsü verilmiştir. Şekilde gösterilen numunenin sağ tarafı 600 G sol tarafı ELOX SG 316L Si bölgesidir.



Şekil 3.13: Sertlik Ölçümü Numunesi

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Deneysel yöntemler bölümünde tel ark eklemeli imalat yöntemi ile ELOX SG 316L Si ve 600G telleri kullanılarak bimetal parça üretilmiştir. Bimetal parça öncelikle tahribatsız muayene (görsel muayene ve dijital radyografik muayene), sonrasında tahribatlı muayeneye (makro yapı analizi, mikro yapı analizi, sertlik deneyi, çentik darbe ve çekme testleri) tabi tutulmuştur. Üretilen bimetal parçadan tel erozyon ile kesim yöntemi kullanılarak çekme deney numuneleri çıkarılmıştır. Bu bölümde yapılan tahribatsız ve tahribatlı test sonuçları incelenmiş olup testlerin sonuçları ayrı başlıklar altında detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

4.1 Tahribatsız Muayene Sonuçları

Robotik tel ark eklemeli imalat hücresinde üretilen bimetal parça tahribatsız muayene yöntemleri ile incelenmiştir. Bu yöntemlerden görsel muayene (VT) ve dijital radyografi muayenesi (RT) kullanılmıştır.

4.1.1 Görsel muayene sonuçları (VT)

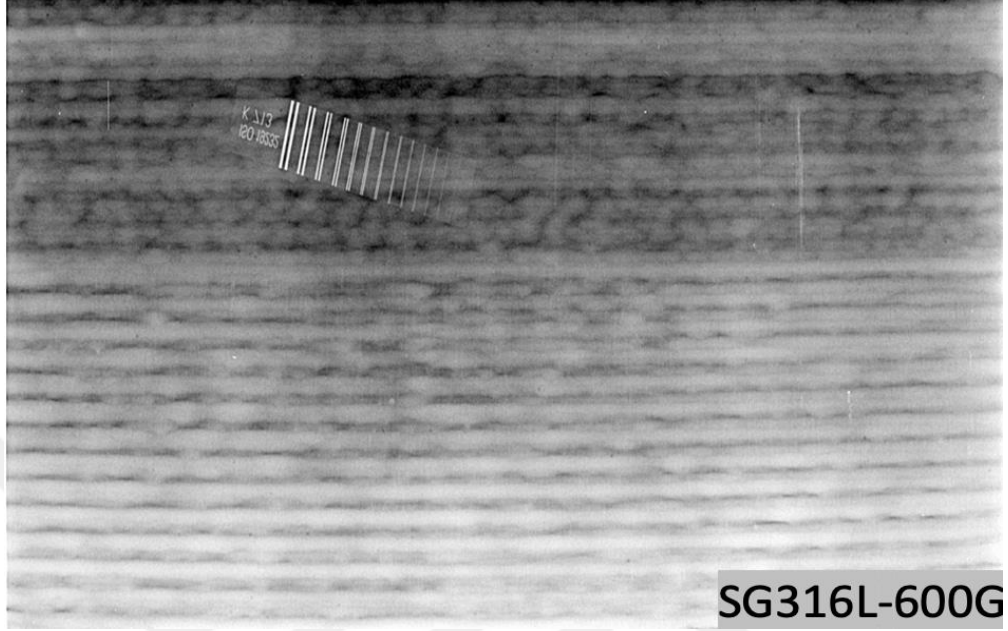
Üretilen bimetal parçanın TS EN ISO 17637 standartına göre görsel muayenesi yapılmıştır. Değerlendirmeleri EN ISO 5817 standartı B sınıfına göre gerçekleştirilmiştir. Üretilen parça 30 derece açıyla 600 lüks ışık şiddeti altında görsel muayenesi yapılmıştır. Muayene sonucunda bimetal parçada herhangi bir gözenek, porozite ve çatlak gibi kaynak hataları görülmemiştir. Parçada sıcaklıktan kaynaklı eğilme görülmemektedir. Parçada yüzeysel ve test kalitesini etkilemeyecek düzeyde sıçrantılar görülmektedir.

4.1.2 Dijital radyografik muayene sonuçları (RT)

Robotik tel ark eklemeli imalat ile üretilen bimetal parçanın görsel muayeneden uygunluk alan parçanın iç yapısında süreksizlik, çatlak, gözenek ergime noksanlığı vb. hataların olup olmadığını tespiti için EN ISO 17636 standartına göre radyografik

muayenesi yapılmıştır. Sonuçlar EN ISO 10671-1 standartına göre değerlendirilmiştir.

Çekilen dijital radyografik film görüntüsü şekil 4.1’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.1: Bimetal Parçanın Dijital Radyografi Film Görüntüsü

Bu tezde radyografik muayene olarak dijital radyografi kullanılmıştır. Dijital radyografi radyografik görüntülemenin yeniliklerindendir. Filme ihtiyaç duyulmadan özel fosfor ekranlar ve mikro elektrik sensörler içeren düz paneller kullanılır. Kağıtsız, filmsiz kimyasal gerektirmez ve atık oluşturmaz.

Test malzemesinin görüntüsü önce görüntü taşıyıcı olarak kullanılan radyografi filmi üzerine veya görüntüleme plakasına alınır. Film üzerindeki görüntü bir lazer taşıyıcı ile taranarak bilgisayar ortamına aktarılır ve görüntü işleme yöntemleri uygulanır.

Şekil 4.1’de bimetal parçanın dijital radyografi film görüntüsü verilmiştir. Verilen filme bakılacak olursa üretilen bimetal parçanın dijital radyografik muayenesi sonucunda parçanın iç yapısında süreksizlik, çatlak, gözenek noksanlığı vb. hatalara rastlanmamıştır. Parça dijital radyografik muayeneden geçmiştir.

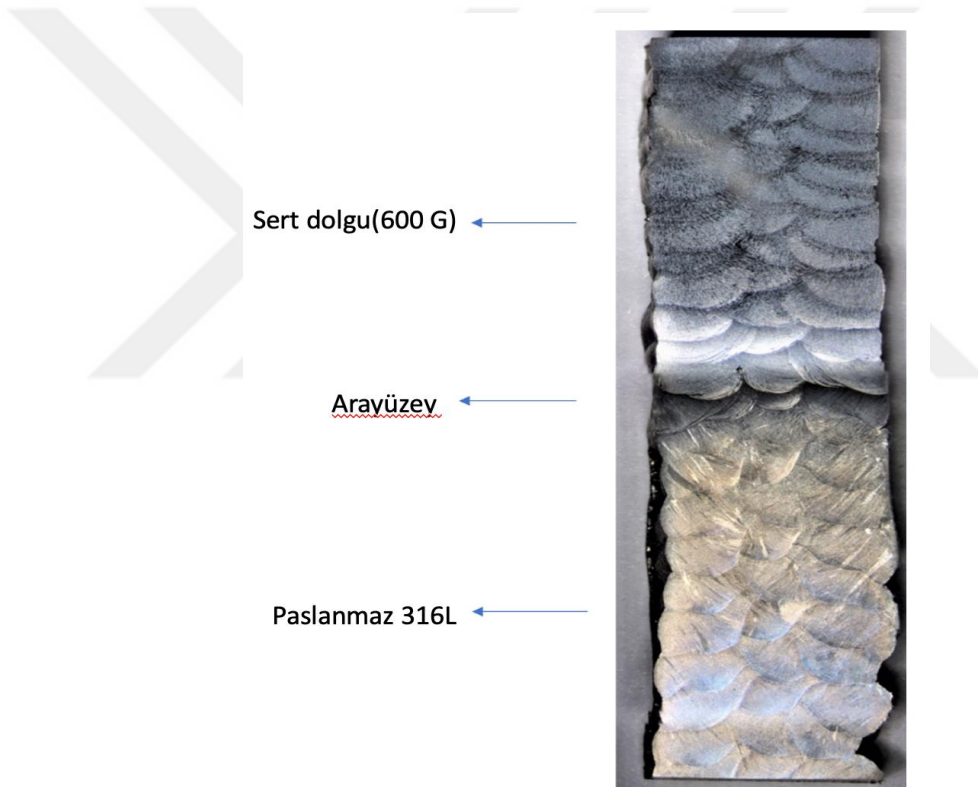
4.2 Tahribath Muayene Sonuçları

Bu bölümde, üretilen bimetal parçaya geri dönüşümsüz tahribatlar vererek bazı mekanik testler uygulanmış ve sonuçları paylaşılmıştır. Deneysel kısımda üretilen parçadan çıkarılan numuneler makro yapı, mikro yapı, Charpy çentik darbe deneyi ve

Vickers sertlik gibi testlere maruz bırakılmış ve test sonuçları incelenmiştir. Tel erozyon yöntemi ile çıkarılan çekme numunelerine uygulanan çekme testiyle akma ve çekme dayanımları ve uzama miktarları incelenmiştir. Darbe deneyiyle çentik darbe enerjisi incelenmiştir.

4.2.1 Makroyapı analizi sonuçları

Üretilen bimetal parçadan alınan makro numunesine %10 NaOH (100 gram katı NaOH-900 ml saf su) ile yaklaşık 2 dakika elektrolitik dağlama yapılmıştır. Akabinde %10 Nital (HNO₃) çözeltisi ile dağlanmıştır. Dağlanan makro numunesini incelemek için Gedik Kaynak bünyesinde yer alan Nikon SMZ745T makro mikroskobu kullanılmıştır. Şekil 4.2’de makro yapı görüntüsü verilmiştir.

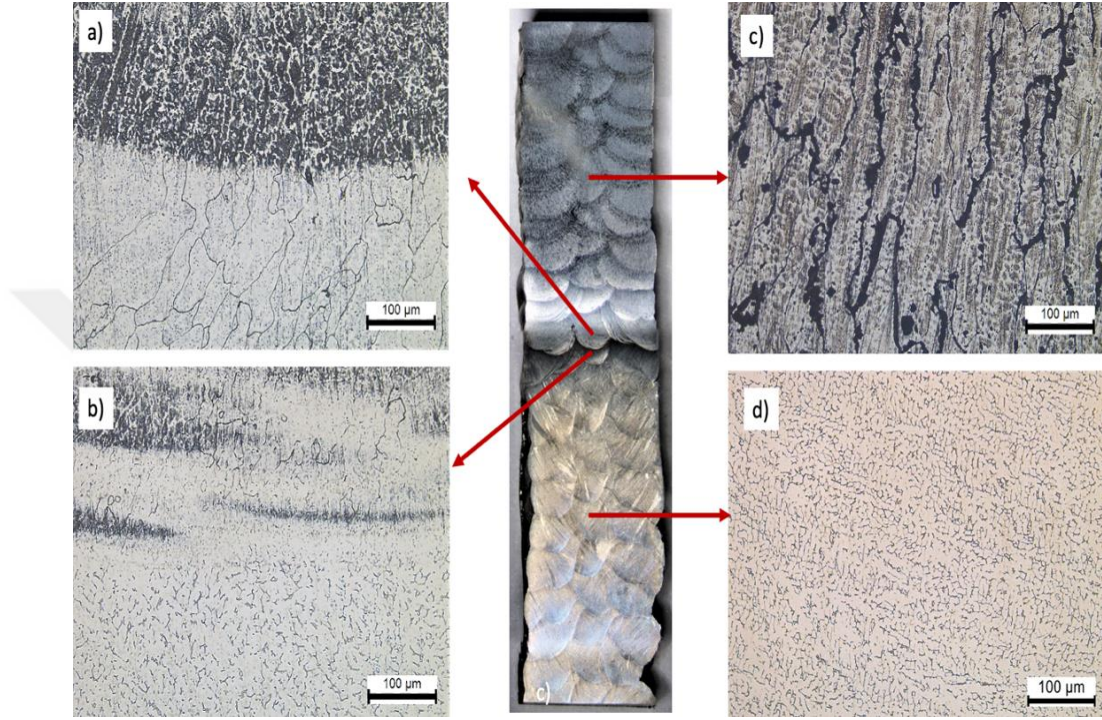


Şekil 4.2: Bimetal Parçadan Alınan Numunenin Makroyapı Görüntüsü

Numune makro yapı incelemeleri TS EN ISO 17639 standartına göre gerçekleştirilip; TS EN ISO 5817 standardı B kalitesine göre incelenmiştir. İncelenen makro numunesinde cüruf kalıntısı, katmanlar arası ergime noksanlığı, çatlak, boşluk, nüfuziyetsizlik, yanma olukları vb. kusurlar tespit edilmemiştir. Görüntüde 600 G bölge ve paslanmaz bölge birbirinden ayırt edilebilmektedir. Şekil 4.2’de katmanların paslanmaz tel ve 600 G tel kullanılarak toplam 60 katman başarılı bir şekilde biriktirildiği görülmektedir. Tel ark eklemeli imalat görüldüğü üzere

katmanlar arasında iyi bir birleşim sağlar ve kaynak kusurları yoktur. Hem eklemeli katmanlar arasında hemde arayüzde çatlak ve gözenek yapı elde edilmemiştir. Parça boyutu 18 mm x 150 mm x 330 mm olarak ölçülmüştür. Kalın duvarlı bimetal bileşen kaynak kusurları olmadan üretilmiştir.

4.2.2 Mikroyapı analizi



Şekil 4.3: Bimetal Parça Numune Mikroyapı Görüntüsü a) Arayüzey Mikroyapısı b) Arayüzey Mikroyapısı c) Sert Dolgu (600 G) Mikroyapısı d) Östenitik Paslanmaz Çelik (316L) Mikroyapısı

Şekil 4.3'te bimetalik parçanın üç farklı bölgesine ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir.

Şekil 4.3-a da arayüzeyin mikroyapısı verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere arayüzeyde malzemeler arası geçiş belirgin şekilde görülmektedir. Arayüzeyde herhangi bir mikroçatlak vs. tespit edilmemiştir. Fakat elemental difüzyon nedeniyle segregasyon bölgelerinin varlığı net bir şekilde görülmektedir.

Şekil 4.3-c de 600 G kaynak teli ile üretilen sert dolgunun mikroyapısı görülmektedir. Görsel bakıldığında sert dolgu kısmında martenzit matris içerisinde çoğunlukla tane sınırları boyunca çökelmiş metal karbürlerin varlığı net bir şekilde görülmektedir.

Şekil 4.3-d de ELOX SG 316L Si (östenitik paslanmaz çelik) ile üretilen parçanın mikroyapısı verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere paslanmaz çelik tarafında yüksek Cr-Ni içeriği nedeniyle östenit matris içerisinde farklı tiplerde delta ferritlerin oluştuğu görülmektedir.

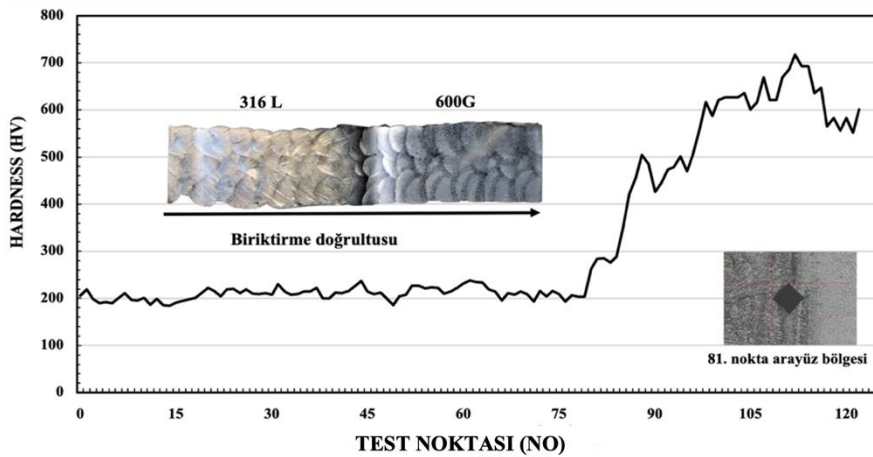
4.2.3 Vickers sertlik deneyi sonuçları

Vickers sertlik testi, Gedik Kaynak bünyesinde bulunan Emcotest Durascan marka sertlik ölçme cihazı kullanılarak EN ISO 9015 standartına göre yapılmıştır. 80 ELOX SG 316L Si ve 40 600 G olmak üzere 120 noktadan 0.25 mm mesafeyle alınan sertlik sonuçları incelenmiştir.

Çizelge 4.1: Sertlik Deneyi Sonuçları

	ELOX SG 316L Si	600 G
Test Noktaları	0-80	80-120
Sertlik Değerleri (HV)	200-260 HV	600-700 HV

Bimetalik yapılarda sertlik testleri arayüzey bölgesinin mukavemetini ve yapısal performansını etkileyebilecek malzeme özelliklerindeki değişimleri değerlendirmek için gerçekleştirilir. Yapı boyunca elde edilen ortalama sertlik değerleri çizelge 4.1’de verilmiştir. Üretici telinin sertliğini 55-60 HRC olarak belirtmiştir bu değer yaklaşık olarak 600 HV’ye eşittir [99].



Şekil 4.4: Bimetal Parçanın Sertlik Grafiği

Şekil 4.4’te görüldüğü üzere sertlik paslanmaz bölgeden arayüzeye kadar sabit seyrederken arayüzey ve sonrasında kademeli ani bir artış görülmüş ve sertlik değeri 600 HV’nin üzerine çıkmıştır. Bu artış element ayrışmasından kaynaklanan sert yüzölçümüyle ilişkilendirilebilir. Han ve arkadaşlarının da düşük

alaşımlı çelik (ER80S-G) ve sert yüzeyli bir malzeme (MF6- 55GP) ile üretilen bimetalik yapılar çalışmasında benzer sonuçlar bildirilmiştir [100].

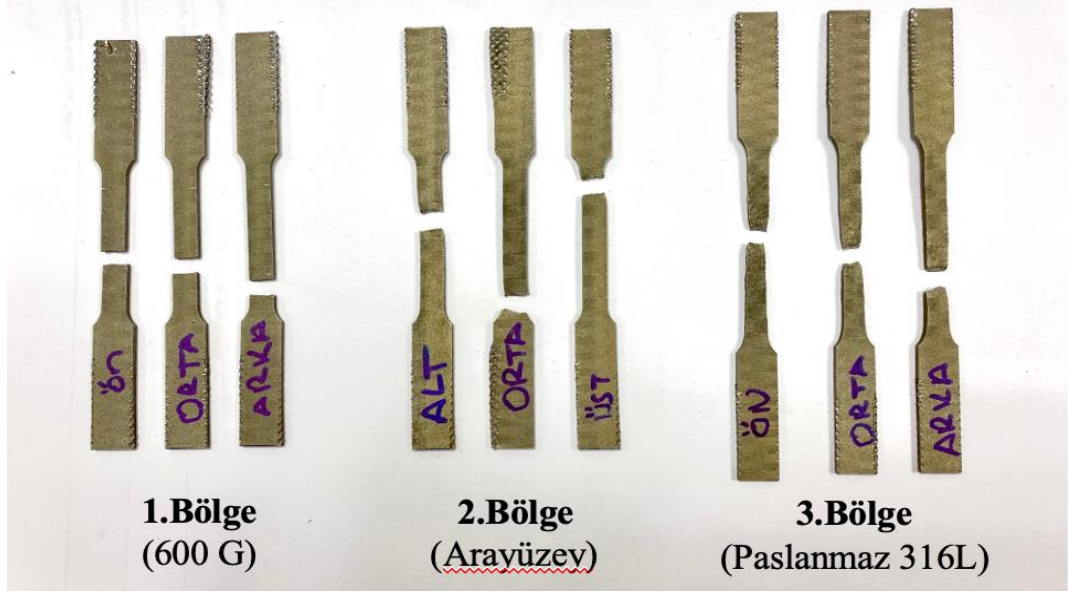
4.2.4 Çekme deneyi sonuçları

Üretilen bimetal parçadan tel erozyon yöntemi ile çıkarılan numunelere çekme testi yapılmıştır. Bu bölümde deney sonrası test cihazından alınan gerilme uzama grafikleri, akma-çekme-uzama değerlerini içeren çizelgeler yer almaktadır. Çekme testi TS EN ISO 4136 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5: Çekme Testi Cihazında Numune Görüntüsü

1.bölge 600 G, 2.bölge arayüz, 3.bölge paslanmaz telden 3'er adet olmak üzere toplamda 9 adet numuneye çekme testi uygulanmıştır. Şekil 4.6'da çekme testi sonrasında numunelerin son görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Çekme Testi Sonrası Numune Görüntüleri

Çizelge 4.2: 600 G (1.Bölge) Çekme Testi Sonuçları

	Akma Dayanım $R_{p0.2}$ (N/mm ²)	Çekme Dayanım R_m (N/mm ²)	Uzama (%)
1.(600 G)-Ön	853,91	1409,11	1,47
1.(600 G)-Orta	826,62	1326,56	1,59
1.(600 G)-Arka	763,56	1275,33	1,51
Ortalama	814,69	1337	1,52

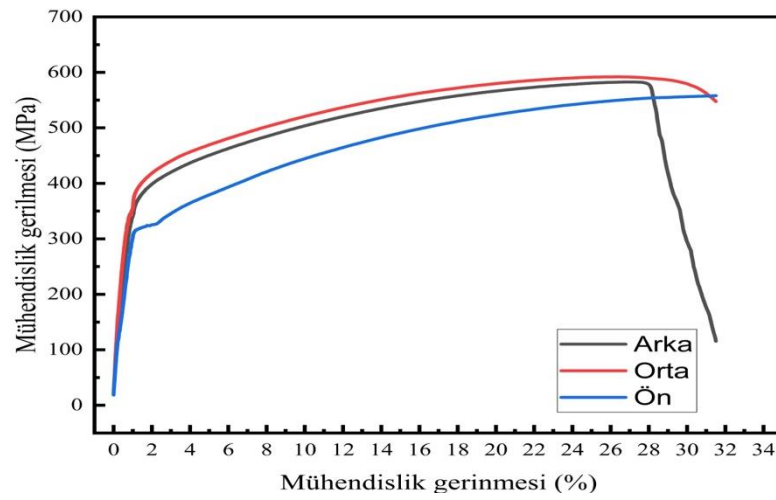
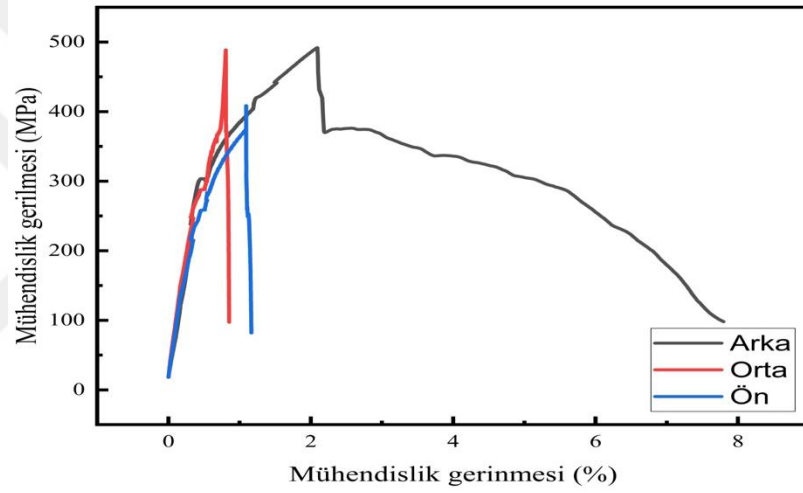
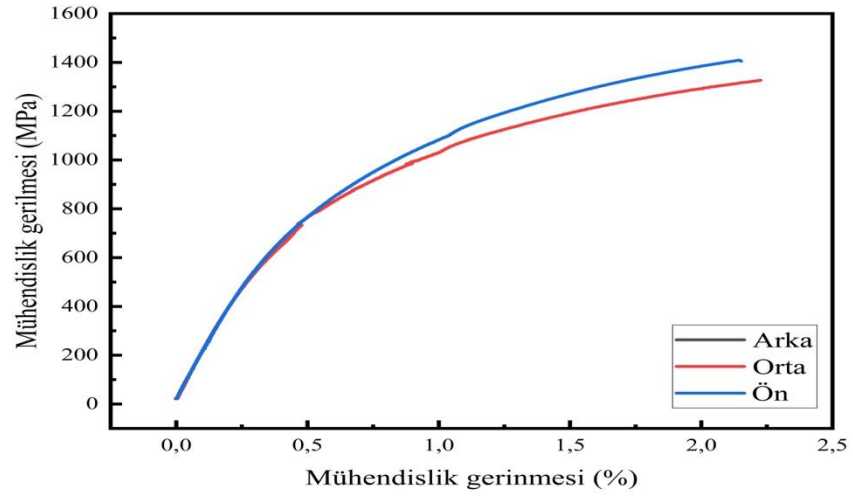
Çizelge 4.3: Arayüzey (2.Bölge) Çekme Testi Sonuçları

	Akma Dayanım $R_{p0.2}$ (N/mm ²)	Çekme Dayanım R_m (N/mm ²)	Uzama (%)
2.(Arayüz)-Üst	283,47	408,59	1,67
2.(Arayüz)-Orta	334,37	488,79	2,53
2.(Arayüz)-Alt	360,90	492,01	6,38
Ortalama	326,24	463,1	3,52

Çizelge 4.4: Paslanmaz (3.Bölge) Çekme Testi Sonuçları

	Akma Dayanım $R_{p0.2}$ (N/mm ²)	Çekme Dayanım R_m (N/mm ²)	Uzama (%)
3.(316L)-Ön	338,91	563,59	38,22
3.(316L)-Orta	341,21	592,01	31,70
3.(316L)-Arka	331,02	582,72	31,35
Ortalama	337,04	579,44	33,75

Yukarıdaki çizelgelerde görüldüğü üzere bölgelerden alınan 3'er adet numunenin ortalama akma çekme ve uzama değerleri alınmış değerlendirmeler ortama değerler üzerinden yapılmıştır.



Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.7’de sert dolgu (1.bölge) teli ile üretilen numunelerin test sonuçları ve grafiği verilmiştir. Çizelge ve grafik incelendiğinde ortalama akma dayanımı 814,69 MPa, çekme dayanımı 1337 MPa ve uzama değeri %1,52 olduğu görülmektedir. En yüksek akma dayanımı ve çekme dayanımı bölgede görülmüştür. En düşük uzama oranı ise yine bu bölgede görülmektedir.

Çizelge 4.3’te ve Şekil 4.8’de arayüzey bölgesinden (2.bölge) alınan numunelerin sonuçları ve grafiği verilmiştir. Çizelge ve grafik incelendiğinde ortalama akma dayanımı 324,24 MPa, çekme dayanımı 463,1 MPa ve uzama değeri ise %3,52’dir. En düşük akma dayanımı ve çekme dayanımı bu bölgede görülmüştür. Uzama yüzdesi sert dolgu bölgesine yakın bir değerdedir.

Çizelge 4.4’te ve Şekil 4.9’da östenitik paslanmaz çelik (3.bölge) teli ile üretilen bölgeden alınan numunelerin test sonuçları ve grafiği verilmiştir. Çizelge ve grafik incelendiğinde ortalama akma dayanımı 337,04 MPa, çekme dayanımı 579,44 MPa ve uzama değeri %33,75’tir. Akma ve çekme dayanımları arayüzeyden minimum düzeyde yüksek olmasına rağmen sert dolgu bölgesinden oldukça düşük değerlerdedir.

Uzama oranına bakacak olursak paslanmaz bölgenin uzama oranı daha yüksektir. Sonuç olarak en yüksek akma ve çekme dayanımı 600 G telde iken en düşük akma ve çekme dayanımı arayüzeyde görülmektedir. En yüksek uzama yüzdesi paslanmaz bölgede görülürken en düşük uzama yüzdesi sert dolgu bölgesindedir.

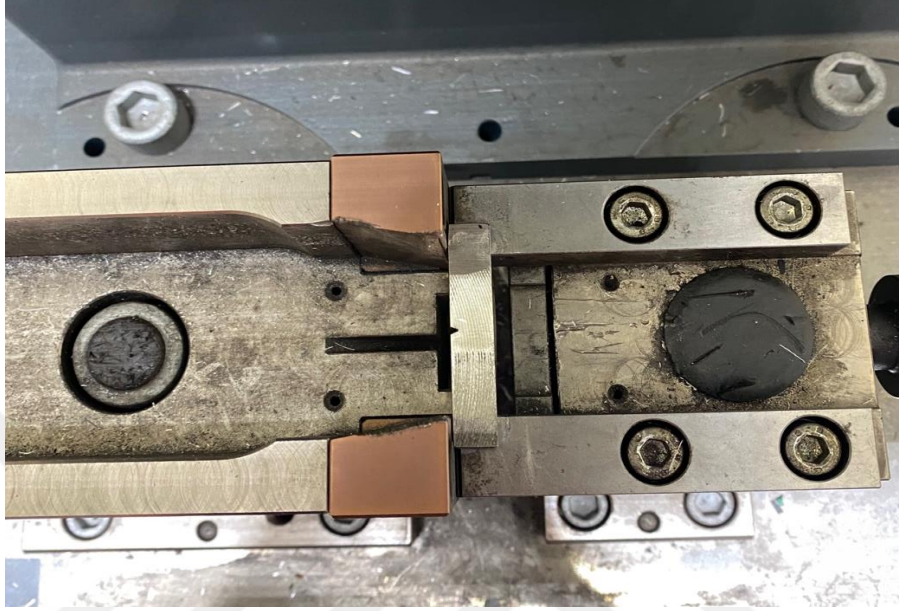
Sonuçlar incelendiğinde arayüzey bölgesinin akma ve çekme dayanımları paslanmaz 316L bölgesine yakın sonuçlar vermiştir. Karışım bölgesinin mekanik değerler olarak düşük sonuçlu bölgeye yakın olduğunu söyleyebiliriz.

Metallerin %5’ten yüksek uzama veren malzemelerin sünek davranış sergilediklerini söyleyebiliriz. Bu durumda östenitik paslanmaz çelik (3.bölge) sünek davranış sergilerken sert dolgu (1.bölge) ve arayüzey (2.bölge) gevrek davranış sergilemişlerdir.

Paslanmaz bölgesinin mekanik değerleri incelendiğinde tel üreticisinin verdiği mekanik değerlerin altında kaldığı görülmektedir. Sert dolgu kaynak telinin ise (600 G) oldukça yüksek mekanik değerlere sahip olduğu görülmektedir. Uzama değeri ise en düşük seyretmiştir.

4.2.5 Charpy çentik darbe deneyi sonuçları

Çentik darbe numuneleri 20°C ortam sıcaklığı altında ISO EN 148-1 ve EN ISO 9016 standartına göre test edilmiştir. Test sırasında Gedik Kaynak A.Ş. bünyesinde yer alan Zwick Roell RKP marka çentik darbe cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.10: Çentik Darbe Cihazında Numune Görüntüsü

Üretilen bimetal parçadan, her bölgeden 3'er adet olmak üzere (3 adet 316L, 3 adet arayüzey, 3 adet 600 G) toplamda 9 adet çentik darbe numunesi çıkarılmıştır. Şekil 4.9'da numunelerin çentik darbe testi sonrası görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.11: Çentik Darbe Testi Sonrası Numune Görüntüleri

Çizelge 4.5: 316L Paslanmaz Bölge Çentik Darbe Sonuçları

	Çentik Darbe Enerjisi J	Ortam Sıcaklığı °C
1.Numune 316L	116,13	20
2.Numune 316 L	110,93	20
3.Numune 316L	134,98	20
Ortalama	120,68	20

Çizelge 4.6: Arayüz Bölge Çentik Darbe Sonuçları

	Çentik Darbe Enerjisi J	Ortam Sıcaklığı °C
1.Numune arayüzey	65,21	20
2.Numune arayüzey	103,98	20
3.Numune arayüzey	56,87	20
Ortalama	75,35	20

Çizelge 4.7: 600 G Bölge Çentik Darbe Sonuçları

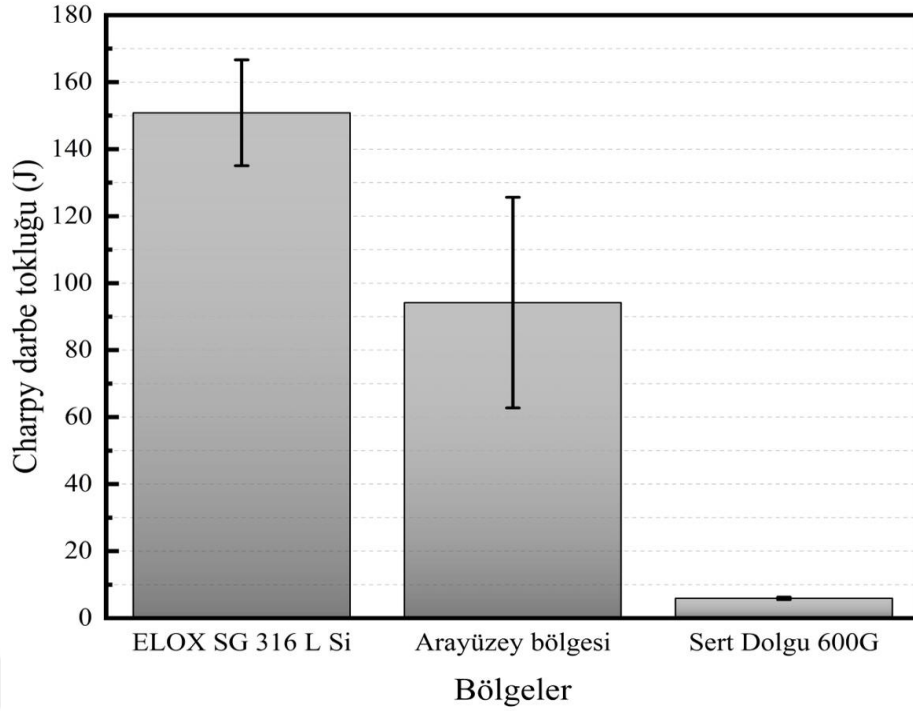
	Çentik Darbe Enerjisi J	Ortam Sıcaklığı °C
1.Numune 600 G	4,40	20
2.Numune 600 G	4,97	20
3.Numune 600 G	4,80	20
Ortalama	4,72	20

Çizelgelerde görüldüğü üzere bölgelerden alınan 3'er adet numunenin çentik darbe enerjileri bölge bölge ve ortalama değerler üzerinden verilmiştir.

Çizelge 4.5'te östenitik paslanmaz çelik (ELOX SG 316L Si) teli ile üretilen bölgeden alınan 3 numunenin çentik darbe enerjisi verilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere ortalama çentik darbe enerjisi 120,68 J dür. En yüksek darbe enerjisi bu bölgede görülmektedir.

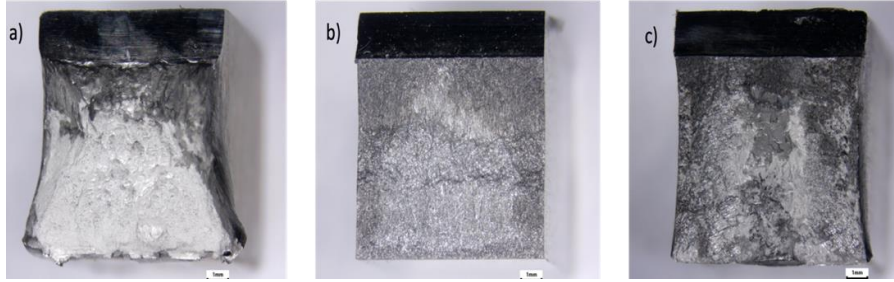
Çizelge 4.6'da arayüzey bölgesinden alınan 3 numunenin çentik darbe enerjisi verilmiştir. Ortalama çentik darbe enerjisi 75,35 J dür. Paslanmaz bölgeden sonra görülen en yüksek ortalama çentik darbe değeridir.

Çizelge 4.7'de sert dolgu (600 G) teli ile üretilen bölgeden alınan 3 numunenin çentik darbe enerjisi verilmiştir. Bu bölgenin ortalama çentik darbe enerjisi 4,72 J dür. En düşük ortalama çentik darbe enerjisi bu bölgede görülmüştür.



Şekil 4.12: Üretilen Bimetal Parçanın Çentik Darbe Grafiği

Şekil 4.10'da bimetal parçanın çentik darbe grafiği verilmiştir. Şekil 4.10'da görüldüğü üzere en yüksek darbe enerjisi östenitik paslanmaz çelik bölgesinde görülmektedir. En düşük ise sert dolguda görülmüştür. Darbe enerjisini ve tokluk özelliklerini mikroyapı etkilemektedir. Sert dolgu bölgesinin darbe enerjisinin düşük olmasının sebebi mikroyapı ve sertlik sonuçlarıyla bağlantılıdır. Yüksek sertlik değerleri süneklik ve tokluk değerlerini düşürebilme potansiyeli taşımaktadır [101].



Şekil 4.13: Çentik Darbe Kırık Yüzeyler; a) Östenitik Paslanmaz Çelik b) Sert Dolgu c) Arayüzey

Çentik darbe deneyi sonrası kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Şekil 4.10-a'da östenitik paslanmaz bölgeden çıkartılan numunenin çentik darbe deneyi sonrası kırık yüzeyi gösterilmektedir, sünek tipi kırılma meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 4.10-b’de sert dolgu bölgesinden çıkartılan numunenin çentik darbe deneyi sonrası kırık yüzeyi gösterilmektedir, gevrek tipi kırılma meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.10-c’de arayüzey bölgesinden çıkartılan numunenin çentik darbe deneyi sonrası kırık yüzeyi görülmektedir, sünek-gevrek tipi kırılma meydana geldiği görülmektedir. Sünek kırılmaya bağlı olarak plastik deformasyona bağlı olarak östenitik paslanmaz çelikte yanal genleşme görülmektedir. Sert dolguda gevrek kırılma bağlı olarak östenitik numuneye göre yanal genleşme olmadığı görülmüştür.

Arayüzey numunesinin çentik darbe deneyi sonrası kırılma yönünün incelenmiştir. Numuneler çentik yönüne dik 2 mm frezelenerek ve bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numunenin, Metkon Forcipol 2V zımparalama cihazı kullanılarak sırasıyla 120, 220, 320, 600 ve 800 numaralı zımparalanmış ve $FeCl_3$ ile dağlanmış.



Şekil 4.14: Arayüzey Bölgesi Kırılma Yönü İncelenmesi

Metalografik hazırlama işlemlerinden sonra makro görüntüsü alınmıştır. Makro görüntüsü şekil 4.12’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere numune paslanmaz çelik kısmından kırılmıştır.

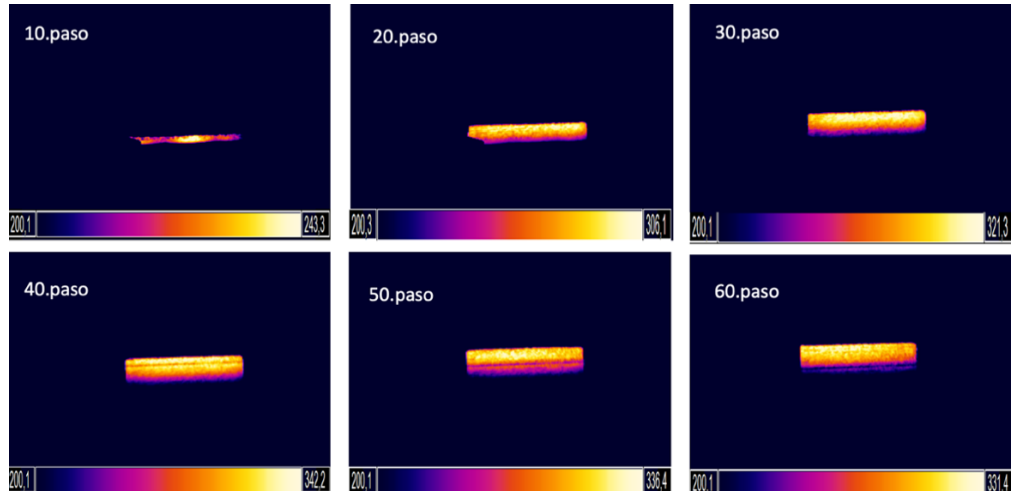
4.3 Sıcaklık Grafikleri ve Termal Kamera Görüntüleri

WAAM ile üretilen parçaların ürün kalitesi büyük oranla termal geçmişlerine bağlıdır [102]. Isı girdisi WAAM ile üretimde katmanların birbirine yapışması için önem arz etmektedir. WAAM ile üretimde alt tabakaya iletken ısı transferiyle parçaların yaşadığı kontrol edilmeyen termal döngüler çok katmanlı karmaşık parçalar oluştururken anizotropiye sebep olabilmektedir [103,104]. Bu sebeple WAAM ile üretilen parçaların termal geçmişi ve ürün kalitesi ilişkilerini kontrol etmek gerekir.

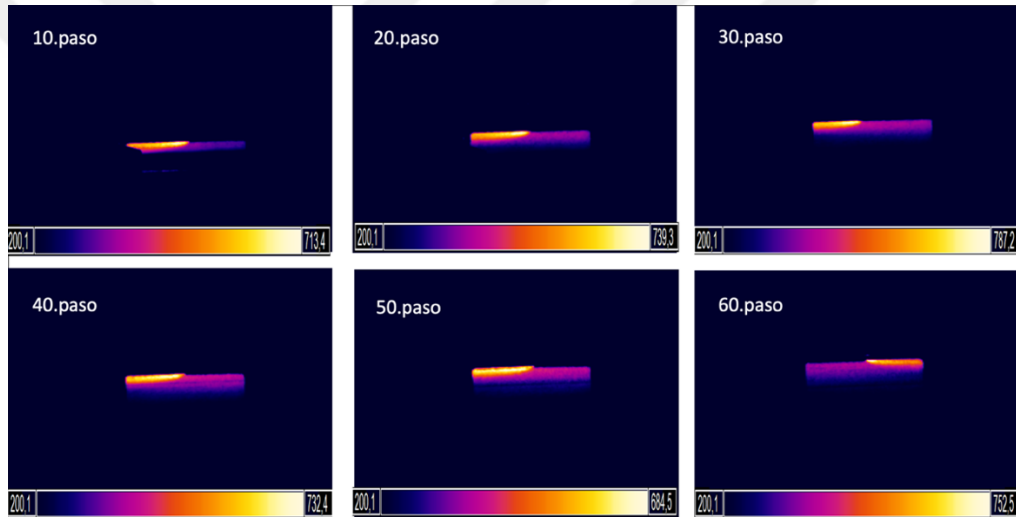
WAAM yöntemi, termal geçmiş çıktı kalitesini doğrudan etkileyecek çok çeşitli proses seçimlerine sahiptir. Birçok araştırmacı uygun parametreleri belirlemek için

alışmalar yapmışlardır. Örneğin Müller ve ark., ısı girdisi, ara katmanların sıcaklığı ve soğutma hızının yüksek mukavemetli çeliklerdeki etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak WAAM koşullarında mikroyapı ve mekanik özelliklerin büyük oranda değişebileceğini görmüşlerdir [105]. Huang ve ark., normal ve yüksek mukavemetli elik kullanarak farklı biriktirme stratejileriyle WAAM uygulanan işlenmiş ve işlenmemiş numunelerin çekme davranışını araştırmış ve işlenmiş numunelerin neredeyse izotropik davranış gösterdiğini, işlenmemiş numunelerin ise önemli ölçüde anizotropi gösterdiğini bildirmiştir [106]. Tonelli ve ark., 304L paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri üzerinde aktif soğutmanın etkisini incelemişlerdir. Aktif soğutmanın parça özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığını söylemektedirler [107]. Laghi ve ark., yüzey işlemenin, oryantasyonun, işlem parametrelerinin ve soğutma stratejisinin elik numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve sonucunda incelenen tüm koşulların mekanik özellikleri etkilediği ve soğutma stratejisinin özel bir araştırma gerektirdiği savunmaktadırlar [108]. Abusalma ve ark., katmanlar arası bekleme süresinin WAAM ile imal edilen parçaların artık gerilme profilini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir [109]. Singh ve arkadaşları, dört katmanlı WAAM ile oluşturulan 316 L paslanmaz elik duvarlar üzerinde farklı katmanlar arası bekleme sürelerini test etmiş ve katmanlar arası bekleme süresinin ortaya çıkan parçaların yoğunluğunu, geometrisini, mikro yapısını ve mekanik özelliklerini etkilediği sonucuna varmıştır [110]. İncelenen literatür sonuçları, termal geçmişin kontrol edilmesiyle mikroyapı, parça geometrisi, yüzey kalitesi ve mekanik özelliklerin iyileştirilebileceğini ve WAAM proses parametrelerinin çıktı özellikleri üzerindeki etkilerinin önemli ölçüde değişebileceğini göstermiştir.

Bu bölümde biriktirme esnasında ve biriktirilmeden 5 saniye önce altlık plakadan alınan sıcaklık verileri ve katmanların termal kamera görüntüleri incelenmiştir.



Şekil 4.15: Paslanmaz ve 600 G Tel Kullanılarak Biriktirilmeden 5 Saniye Önce Çekilen Termal Kamera Görüntüleri

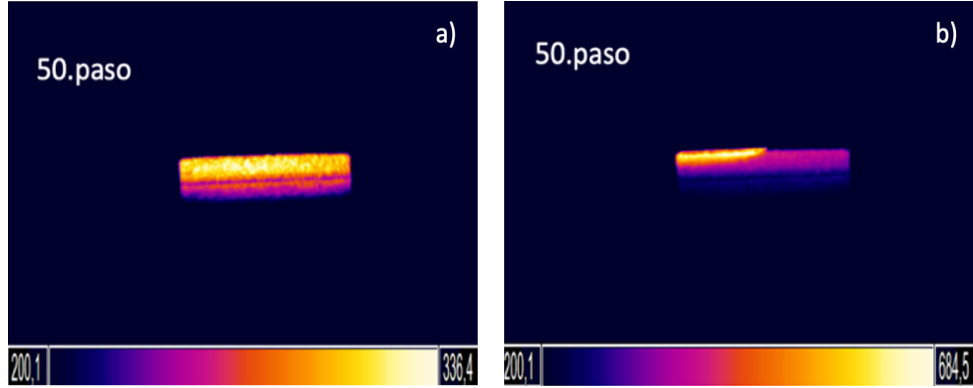


Şekil 4.16: Paslanmaz ve 600 G Tel Kullanılarak Biriktirme Esnasında Alınan Termal Kamera Görüntüleri

Paslanmaz 316L ve 600 G telleri kullanılarak üretilen çok pasolu kalın cidarlı parçada biriktirilen duvarın sıcaklığı her 5 katmanda bir ölçülmüştür. Toplamda 30 termal kamera çekimi yapılmış ancak 6 termal görüntü paylaşılmıştır. (Her 10 katmanda bir) Aynı zamanda her beş katmanda bir termal kamera kullanarak sıcaklık görüntüleri kayıt altına alınmıştır. Alınan termal kamera görüntüleri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da verilmiştir.

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 da numunenin 10. katmandan 60.katmana kadar alınan termal kamera görüntüleri verilmiştir. Çıktılar, termal kameranın sıcaklık sınırını (900°C) geçmemiştir. Alınan termal kamera görüntüleri katmanların termal dağılım ve ısı dağılımını karşılaştırmak için bilgilendirme sunar. Katmanların artışı ısı

birikimini de arttırmaktadır. Katmanlar arası verilen 3 dakika bekleme süresi ise katmanlardaki sıcaklığı düşürmekte ve numune ve alt plaka boyunca oluşan ısı birikimini azalttığı görülmektedir.



Şekil 4.17: 50.Katmanın Termal Kamera Görüntüleri a) Biriktirilmeden 5 Saniye Önce b) Biriktirilme Esnasında

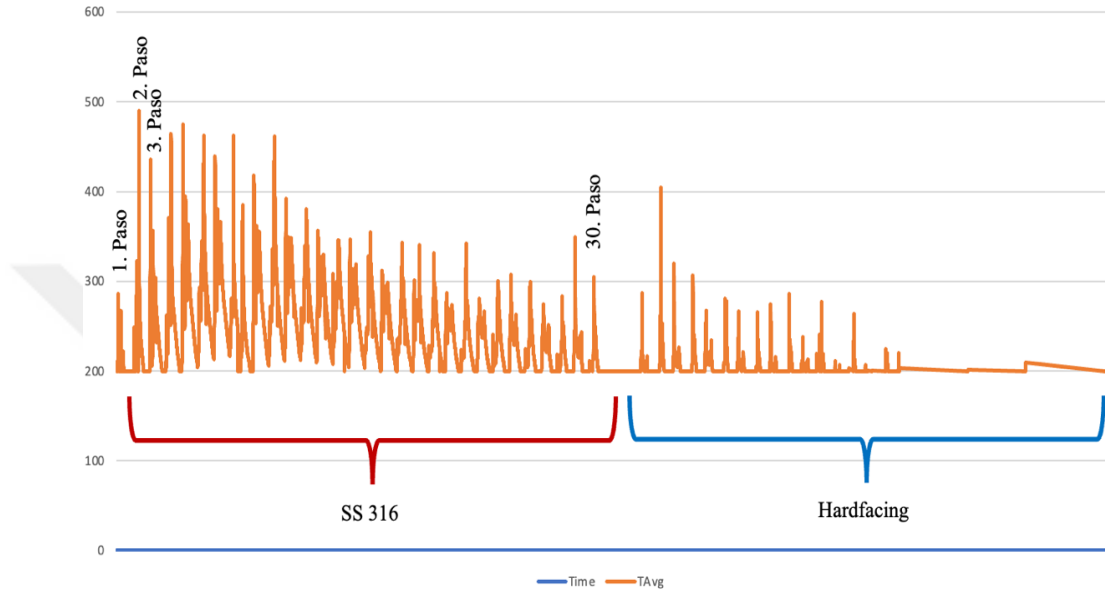
Şekil 4.17’de 50. katmanın biriktirilmeden 5 saniye önceki ve biriktirilme esnasında alınan termal kamera görüntüleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere 50. katmanın sıcaklığı biriktirilmeden 5 saniye önce alınan görüntüde ortalama 300 °C derece bandında seyrederken biriktirilme esnasında alınan görüntüde 500°C -600 °C aralığına yükselmektedir. Atılan ilk katmanlarda ise sıcaklığın 200 °C altına düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi ise yukarıda belirtildiği üzere verilen 3 dakika bekleme süresi verilerek katmanlardaki sıcaklığı düşürmesi ve alt plaka boyunca oluşan ısı birikimini azaltmasıdır. Diğer katmanlar incelendiğinde de aynı durumdan söz edilebilmektedir.

WAAM ile üretim yönteminde ısı birikiminin artması mikroyapısal ve mekanik özelliklerde değişikliklere sebep olabilmektedir. Katman katman imal edildiğinden alt katmanlardaki ısınma üretim sırasında parçada ısı birikmesine sebep olur. Bu ısı birikimi kaynak dikişinde genişlemeler meydana getirmektedir. Termal kamera görüntüleriyle pasolar arası sıcaklık takip edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalarla bekleme süresinin en uygun 3 dakika olduğu görülmüştür bu sebeple ısı birikiminin etkisini minimuma indirmek için her katman arası 3 dakika bekleme süresi verilmiştir.

Şekil 4.18’de üretilen parçanın sıcaklık grafiği verilmiştir. Sıcaklık ölçümleri alt plakadan alınmıştır Sıcaklık grafiği parçadaki sıcaklıkların gelişimini gösteren bir dizi tepe noktadan oluşur. Sıcaklık noktaları ilk katmanlarda daha yüksek iken

katmanlar yığıldıkça kademeli bir düşüş olmuş belli bir noktadan sonra da 200 °C altında sabitlenmiştir. Biriktirme esnasında katmanlardaki artış parçanın ısı transferi davranışında değişikliğe sebep olur. İlk katmanda sıcaklık, ısı iletimi yoluyla yoğun bir şekilde soğuk olan alt tabakaya iletilir sonrasında atmosfere aktarılır. Son olarak katman sayısı arttıkça alt plakaya aktarılan ısı azalırken radyasyon ve konveksiyon yoluyla atmosfere olan ısı aktarımı daha etkili hale gelir [111].



Şekil 4.18: Bimetal Parçanın Sıcaklık Grafiği

Grafikte görüldüğü üzere sağa doğru sıcaklıkta bir azalma görülmektedir. Katmanlar biriktirildikçe duvar yükselir altlık plaka sıcaklığı doyar ve sıcaklık değerlerinde azalma görülür. Son pasolarda plaka sıcaklığı doymuştur ve sıcaklık gittikçe azalır ve sıfırlanır.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında 5220023 numaralı TÜBİTAK TEYDEB 1505 Üniversite-Sanayi işbirliği ile Bimetal Malzemelerin Özlü/Masif Tel Beslemeli Robotik Ark Kaynağı ile Eklemeli İmalat Sistemlerinin Geliştirilmesi projesi kapsamında tasarlanan robotik tel ark eklemeli imalat hücresi kullanılarak ELOX SG 316L Si ve 600 G telleri katman katman biriktirilerek bimetal komponent üretilmiştir.

Hücrede OTC-Daihen FD-B6L kaynak robotu ve GeKaMac Power MIG GPS WB P500L kaynak makinesi kullanılmıştır. Koruyucu gaz olarak Elox SG 316L Si için M12 (ArCO₂.5), 600G için M21 (ArCO₁₈) kullanılmıştır.

Üretim öncesinde MIG/MAG gazaltı kaynak yöntemi kullanılarak uygun kaynak parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen kaynak parametreleriyle pasolar arası 3 dakika bekleme süresi verilerek 30 (paslanmaz)-30 (600 G) toplam 60 katman çok pasolu kalın cidarlı bimetal yapı üretilmiştir.

Üretilen bimetal parça öncelikle tahribatsız muayeneden (görsel muayene-dijital radyografi) uygunluk almıştır. Sonrasında parçadan alınan numulere, mekanik ve metalürjik özelliklerinin belirlenmesi için testler uygulanmıştır. Mekanik özellikleri için çentik darbe, çekme testi ve sertlik testleri yapılmıştır. Metalürjik özellikleri için makro yapı ve mikro yapı çalışmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmalar XRD ve Line analizleriyle de desteklenmiştir. Bimetal parçada iki metalin birleştiği ara yüz bölgesinin detaylı incelenmiştir.

Deneysel çalışmaların sonucunda aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir.

- Üretilen bimetal parçanın görsel muayene sonucunda korozyon, yüzey hatası, konumlama hatası, yanma olukları, krater çatlağı vb. kaynak hataları görülmemiştir. Parçada yüzeysel ve test kalitesini etkilemeyecek düzeyde sıçrantılar görülmüştür. Parça görsel muayeneden uygunluk almıştır.
- Dijital radyografik muayene sonucunda parçanın iç yapısında süreksizlik, çatlak, gözenek noksanlığı vb. hatalara rastlanmamıştır. Bimetal parça dijital radyografik muayeneden geçmiştir.

- Makro yapı sonucunda katmanların paslanmaz tel ve sert dolgu tel kullanılarak toplam 60 katman başarılı bir şekilde biriktirildiği görülmektedir. Tel ark eklemeli imalatla görüldüğü üzere katmanlar arasında iyi bir birleşim sağlanmıştır. Kaynak kusurları görülmemektedir. Hem eklemeli katmanlar arasında hemde arayüzde çatlak ve gözenek yapı elde edilmemiştir. Kalın duvarlı bimetal bileşen kaynak kusurları olmadan üretilebilmiştir.
- Mikro yapı sonucunda paslanmaz çelik kısmında yüksek Cr ve Ni içeriği nedeniyle östenit matris içerisinde farklı tiplerde delta ferritlerin. Oluştugu gözlemlenmiştir. Sert dolgu teli ile üretilen kısımda ise martenzit matris içerisinde çoğunlukla tane sınırları boyunca çökelmiş metal karbürlerin varlığı net bir şekilde görülmektedir. Arayüzeyde ise geçiş belirgin bir şekilde görülmekte olup herhangi bir mikro çatlak vs. gözlemlenmemiştir. Fakat elemental difüzyon nedeniyle segregasyon bölgelerinin varlığı net bir şekilde görülmektedir.
- Vickers sertlik deneyi sonucunda WAAM teknolojisiyle bimetal üretilerek daha yüksek veya farklı yapısal performans istenen parçaların işlevselleştirilmesi için başarıyla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Test sonucunda paslanmaz bölgede stabil seyreden sertlik değerinin sert dolgu ile üretilen bölgeye doğru ani bir yükseliş gösterdiği görülmüştür. Sertlik grafiğinde sert dolgu bölgesinde görülen sertlik dalgalanmaları ısıya bağlı mikroyapı değişimleriyle ilişkilendirilebilir.
- Çekme Deneyi sonucunda en yüksek akma dayanımı ve çekme dayanımının sert dolgu (600 G) bölgesinde en yüksek uzama oranının paslanmaz bölgede olduğu görülmektedir. En düşük akma ve çekme dayanımı arayüzey bölgesinde en düşük uzama miktarı ise sert dolgu bölgesinde görülmüştür.
- Çentik darbe deneyi sonucunda en yüksek çentik darbe enerjisinin paslanmaz bölgesinde en düşük çentik darbe enerjisinin ise sert dolgu bölgesinde olduğu görülmüştür. Nedeni mikroyapı ve mikrosertlik değerleriyle ilişkilendirilir. Paslanmaz bölgenin sertliği düşük olduğundan darbe enerjisi yüksektir. Sert dolgunun sertliği yüksek olduğundan darbe enerjisi çok düşük çıkmıştır.
- Sıcaklık incelemeleri sonucunda noktaların ilk katmanlarda daha yüksek iken katmanlar yığıldıkça kademeli bir düşüş olduğu ve belli bir noktadan sonra da

200°C altında sabitlendiği görülmüştür. Katmanlar biriktirildikçe duvar yükselir altlık plaka sıcaklığa doyar ve sıcaklık değerlerinde azalma görülür. Son pasolarda plaka sıcaklığa doymuştur ve sıcaklık gittikçe azalır ve sıfırlanır.

WAAM yöntemiyle bimetal üretiminin kullanım sahaları geniştir. Bu tezde çalışılan östenitik paslanmaz çelik ve sert dolgu kaynak teli ile üretilecek parçaların kullanım alanları da araştırılmıştır. Sert dolgu kaynak teli kullanım amacı aşınmalara karşı dayanıklı olmasıdır.

Bu çalışmanın sonucunda elde edilen veriler WAAM yöntemiyle bimetalik malzemelerin üretilebileceğini net bir şekilde ortaya koymaktadır. İlerde bu teknolojiyi farklı kompleks yapılarda parçaların rahatlıkla üretilebileceğini görebiliriz. Geleneksel yöntemlerden döküm, dövme vs. yöntemlerle üretilen ve oldukça maliyetli olan parçalar bimetal WAAM ile üretilmeleri durumunda malzeme sarfiyatı ve maliyet açısından oldukça verimli sonuçlar ortaya koyacaktır.

Aşınmaya dayanıklı bileşenlerin üretim süreci, geleneksel bir yöntem olarak sert kaplama malzemesinin ana metal üzerine kaplanmasıyla gerçekleşir. Bu süreç genellikle maliyet ve zaman açısından kayıplara sebep olur. Bu çalışma, yüksek aşınma direnci için sert yüzeyli kaynak teli ile bimetalik parçalar imal etmek için WAAM işleminin kullanılmasını önermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, aşınmaya dayanıklı bimetalik bileşenlerin üretimi için daha verimli ve uygun maliyetli yeni bir yol sunmuş ve sahaya özgü özelliklere sahip yekpare bileşenlerin tasarım fırsatlarını genişletmiştir.

Dünyada bimetalik WAAM çalışmasının az olması nedeniyle bir sonraki aşamalarda üretilen bu tarz parçaların aşınma ve korozyon dayanımları ölçülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **T. Abe, H. Sasahara**, (2016). “Dissimilar metal deposition with a stainless steel and nickel-based alloy using wire and arc-based additive manufacturing,” *Precision Engineering*, vol. 45, pp. 387-395.
- [2] **Al-Bermani, S.S., Blackmore, M.L, Zhang, W., Todd, I.**, (2010). “The origin of microstructure diversity texture and mechanical properties in electron beam melted Ti6Al4V. Metallurgical and Materials Transactions” *A-physical Metallurgy and Materials Science*, vol. 41, pp. 3422-3434
- [3] **Wu, C. J., Usoskin, I. G., Krivova, N., et al.**, (2018). “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement” *Journal of Manufacturing Processes*, vol, pp 127-139.
- [4] **Titanium, N.**, (2019). “Norsk Titanium Receives Airbus Contract for Qualification and Production”, <https://www.norsktitanium.com/media/press/norsk-titanium-receives-airbus-contract-for-qualification-and-production>.
- [5] **Yilmaz, O. and Ugla, A. A.**, (2016). “Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230: 1-18.
- [6] **Nikam, S. H., Jain, N. K. and Jhavar, S.**, (2016). “Thermal modeling of geometry of single-track deposition in micro-plasma transferred arc deposition process”, *Journal of Materials Processing Technology*, 230: 121-130.
- [7] **Clark, D., Bache, M. R. and Whittaker, M. T.**, (2008). “Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications”, *Journal of Materials Processing Technology*, 203 (1-3): 439-448
- [8] **Zhao, H., Zhang, G., Yin, Z. and Wu, L.**, (2011). “A 3D dynamic analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping”, *Journal of Materials Processing Technology*, 211 (3): 488-495
- [9] **Busachi, A., Erkoyuncu, J., Colegrove, P., Martina, F. and Ding, J.**, (2015). “Designing a WAAM based manufacturing system for defence applications”, *Procedia CIRP*, 37: 48-53.
- [10] **Pham, D. and Dimov, S. S.** (2012). *Rapid manufacturing: the technologies and applications of rapid prototyping and rapid tooling*. London: Springer, 84-98.
- [11] **Wohlers, T. and Gornet, T.** (2014). History of additive manufacturing. *Wohlers report*, 24(2014), 110-118.
- [12] **Nakagawa, T.** (1979). Blanking tool by stacked bainite steel plates. *Press Technique*, 93-101
- [13] **Shellabear, M. and Nyrhilä, O.** (2004 September). *DMLS-Development history and state of the art*. LANE 2004 Konferansı. Erlangen, Germany.

- [14] **ARCAM.** (Erişim Tarihi: 10.05.2020.). Arcam History. Adres: <http://www.arcam.com/company/about-arcam/history/>,
- [15] **Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I. and Martina, F.** (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *Engineering Research*, 65(2), 737-760.
- [16] **S. Turhan, A. Ozsoy,** (2016). “DMLS yöntemiyle imal edilen Ti6Al4V alaşım özelliklerine işlem parametrelerinin etkisi,” *SDU International Journal of Technological Science*, c. 8, s. 2, ss. 15-27.
- [17] **Somashekara, M. A. and Suryakumar, S.,** (2017). “Studies on Dissimilar Twin-Wire Weld-Deposition for Additive Manufacturing Applications”, *Trans Indian Inst. Met.*, Vol.70, Issue 8, Pages 2123-2135.
- [18] **American Society for Testing and Materials (AST M).** (Erişim Tarihi: 12.05.2020). 7 Families of AdditiveManufacturing.Web: https://www.additivemanufacturing.media/cdn/cms/7amilies_print_version.pdf
- [19] **Additive Manufacturing Research Group.** (2017). About Additive Manufacturing. <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/> (30.09.2017).
- [20] **Chua, C.K., Leong, K.F. and Lim, C. S.** (2010). Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd edition. World Scientific. Singapore.
- [21] **Aniwaa.** (2017). Categories of 3D printing technologies and processes. <http://www.aniwaa.com/3d-printing-technologies-and-the-3d-printing-process/> (26.09.2017).
- [22] **Wallace, J. vd.** (2014). Validating Continuous Digital Light Processing (cDLP) Additive Manufacturing Accuracy and Tissue Engineering Utility of a Dye-initiator Package. *Biofabrication*, 6, 015003, 14.
- [23] **Redwood, B.** (2017). Additive manufacturing technologies overview. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview> (25.09.2017).
- [24] **R. Udroi, and I. C. Braga,** (2017).“Polyjet Technology Applications for Rapid Tooling”, *MATEC Web of Conferences*, 112, Gdansk, Poland.
- [25] **Custom.** (2017). Laminated object manufacturing (LOM). <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing> (19.09.2017).
- [26] **Ahn, N., Kweona, J.H., Choi, J., Lee, S.** (2012). Quantification of Surface Roughness of Parts Processed By Laminated Object Manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 339–346.
- [27] **Dreams.** (2017). Material extrusion. <http://seb199.me.vt.edu/dreams/material-extrusion/> (24.09.2017).
- [28] **Chua, C.K., Leong, K.F. and Lim, C.S.** (2010). Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd edition. World Scientific. Singapore.

- [29] **Gibson, I., Rosen, W.D., Stucker, B.** (2010). Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, 1. Edition, Springer Publishers, United Kingdom.
- [30] **S.L. Sing, ... Wai Yee Yeong,** (2020). Rapid Prototyping of Biomaterials, Second Edition.
- [31] **Fang, X., Du, J., Wei, Z., He, P., Bai, H., Wan, X., and Lu, B.,** (2017). "An investigation on effects of process parameters in fused-coating based metal additive manufacturing", *Journal Of Manufacturing Processes*, 28: 383–389.
- [32] **Somashekara, M. A. and Suryakumar, S.,** ((2017). "Studies on dissimilar twin-wire weld- deposition for additive manufacturing applications", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, 70 (8): 2123–2135.
- [33] **Haase, C., Bültmann, J., Hof, J., Ziegler, S., Bremen, S., Hinke, C., Schwedt, A., Prahl, U., and Bleck, W.,** (2017). "Exploiting process-related advantages of selective laser melting for the production of high-manganese steel", *Materials*, 10 (1): 56.
- [34] **Simchi, A., Petzoldt, F., Pohl, H.** 2003. "On the development of direct laser sintering for rapid tooling", *J Mater Process Technol*, vol. 141, pp. 319-328.
- [35] **Frazier, W.E.** 2014. "Metal additive manufacturing: a review", *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, pp. 1917-1928.
- [36] **Karakılınç U., Yalçın B. ve Ergene B.,** (2019). "Toz yataklı/beslemeli eklemeli imalatla kullanılan partiküllerin uygunluk araştırması ve partikül imalat yöntemleri", *Politeknik Dergisi*, 22(4): 801-810.
- [37] **Kathuria, Y.P.,** (1999), "Microstructuring by selective laser sintering of metallic powder", *Surface and Coatings Technology*, Vol.116, p. 643-647.
- [38] **"Method and apparatus for producing parts by selective sintering"**, issued 1986-10-17 31 Mayıs 2021 tarihinde [Wayback Machinesitesinde arşivlendi.](#)
- [39] **J. P. Oliveira, A. D. LaLonde, J. Ma,** (2020). Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing, *Materials & Design*, 193, 108762.
- [40] **Shellabear, M., Nyrhilä, O.** 2004. DMLS – Development History and State of the Art. LANE 2004 conference, Sept., Erlangen, Germany, 21-24.
- [41] **Hiemenz J.,** (2007). "Electron beam melting", *Advanced Materials & Processes*, 165-3: 45-46.
- [42] **Redwood B.,** (2017). Additive manufacturing technologies overview.
- [43] **Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H.J.** 2015. "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests", *Int. J. Adv. Manuf. Tech- nol.*, vol. 81, pp. 465-481.
- [44] **Çam G.** 2022. "Prospects of producing aluminum parts by Wire Arc Additive Manu- facturing (WAAM)", *Materials Today: Proceedings*, doi: <https://doi.org/10.1016/j. Matpr.2022.02.137>
- [45] **Rännar, L.E., et al.** 2007. "Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting", *Rapid Prototyp J*, vol. 13, pp. 128-135.

- [46] **DuPont, J., Marder, A.R.** 1995. "Thermal efficiency of arc welding processes", *Weld J*, vol. 74, pp. 406s-416s.
- [47] **Baker, R.** 1925. "Method of making decorative articles"; US patent no. 1 533 300 1925.
- [48] **McAndrew, A.R.; Rosales, M.A.; Colegrove, P.A.; Ho, A.; Fayolle, R.; Eyitayo, K.; Stan, L.; Sukrongpang, P.; Crochemore, A.; Pinter, Z.,** (2018). "Interpass Rolling Of Ti- 6Al-4V Wire + Arc Additively Manufactured Features For Microstructural Refinement", *Microstructural Optimisation of Large Scale Additive Manufactured Ti6Al4V*, 21.
- [49] **Zhang, C., Li, Y., Gao, M., and Zeng, X.,** (2018). "Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source", *Materials Science And Engineering: A*, 711: 415–423
- [50] **Marenych, O., Kostryzhev, A., Shen, C., Pan, Z., Li, H., and van Duin, S.,** (2019). "Precipitation strengthening in Ni–Cu alloys fabricated using wire arc additive manufacturing technology", *Metals*, 9 (1): 105
- [51] **Alonso, U., Veiga, F., Suárez, A., and Artaza, T.,** (2019). "Experimental investigation of the influence of wire arc additive manufacturing on the machinability of titanium parts", *Metals*, 10 (1): 24
- [52] **Treutler, K. and Wesling, V.,** (2021). "The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): A review", *Applied Sciences*, 11 (18): 8619.
- [53] **Silva, L. J., Souza, D. M., de Araújo, D. B., Reis, R. P., and Scotti, A.,** (2020). "Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 107 (5–6): 2513–2523
- [54] **Thien, A., Saldana, C., and Kurfess, T.,** (2021). "The effect of WAAM process parameters on process conditions and production metrics in the fabrication of single-pass multi-layer wall artifacts", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 119: 531-547.
- [55] **Tangestani, R., Farrahi, G. H., Shishegar, M., Aghchehkandi, B. P., Ganguly, S., and Mehmanparast, A.,** (2020). "Effects of vertical and pinch rolling on residual stress distributions in wire and arc additively manufactured components", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 29 (4): 2073–2084
- [56] **Dhinakaran, V., Ajith, J., Fathima Yasin Fahmidha, A., Jagadeesha, T., Sathish, T., and Stalin, B.,** (2018). "Wire arc additive manufacturing (WAAM) process of nickel based superalloys – A review", *Materials Today: Proceedings*, 21: 920–925 (2020).
- [57] **Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., and Newman, S. T.,** (t.y). "Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing", *Additive Manufacturing*, 22: 672–686
- [58] **Acherjee, B.,** (2018). "Hybrid laser arc welding: State-of-art review", *Optics & Laser Technology*, 99: 60–71
- [59] **Vidhyarthi, R. S. and Dwivedi, D. K.,** (2016). "Activating flux tungsten inert gas welding for enhanced weld penetration", *Journal Of Manufacturing Processes*, 22: 211– 228.

- [60] **Campbell, S. W., Galloway, A. M., and McPherson, N. A.,** (2013). "Arc pressure and weld metal fluid flow while using alternating shielding gases. Part 1: arc pressure measurement", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 18 (7): 591– 596.
- [61] **Vidhyarthi, R. S. and Dwivedi, D. K.,** (2016). "Activating flux tungsten inert gas welding for enhanced weld penetration", *Journal Of Manufacturing Processes*, 22: 211– 228.
- [62] **Bannour, S., Abderrazak, K., Mhiri, H., and Le Palec, G.,** (2012). "Effects of temperature-dependent material properties and shielding gas on molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy", *Optics & Laser Technology*, 44 (8): 2459–2468.
- [63] **Zhou, Y., Lin, X., Kang, N., Huang, W., Wang, J., and Wang, Z.,** "Influence of travel speed on microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured 2219 aluminum alloy", *Journal Of Materials Science & Technology*, 37: 143–153 (2020).
- [64] **Fuchs, J., Schneider, C., and Enzinger, N.,** "Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source", *Welding In The World*, 62 (2): 267–275 (2018).
- [65] **Yuan, T., Yu, Z., Chen, S., Xu, M., and Jiang, X.,** "Loss of elemental Mg during wire + arc additive manufacturing of Al-Mg alloy and its effect on mechanical properties", *Journal Of Manufacturing Processes*, 49: 456–462 (2020).
- [66] **Palani, P. K. and Murugan, N.,** "Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding", *Journal Of Materials Processing Technology*, 172 (1): 1– 10 (2006).
- [67] **Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H.J.** 2015. "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests", *Int. J. Adv. Manuf. Tech- nol.*, vol. 81, pp. 465-481
- [68] **Gu, J. et al.** The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al–6.3 Cu alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 651, 18 (2016).
- [69] **Turgut, Batuhan.** Comparison of Solid and Metal Cored Wires in Wire Arc Additive Manufacturing of Low-Alloyed Steel Parts. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, 2022.
- [70] **Khan A.U., Madhukar Y.K.,** (2020), "An Economic Design and Development of the Wire Arc Additive Manufacturing Setup", *Procedia CIRP*, 91, 182–187.
- [71] **Suat Yildiz A.,** (2020), "Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108 (11), 3391-3404.
- [72] **Yumurtacı S., Mert T.,** 2003, "Robotik kaynak sistemleri ve gelişme istikametleri", *Kaynak Teknol. IV. Ulus. Kongresi*, Kocaeli.
- [73] **A. Kumar, K. Maji** 'Microstructure and chemical composition analysis of double wire arc additive manufactured bimetallic structure' *J. Mater. Eng. Perform.*, 30 (7) (2021), pp. 5413-5425.

- [74] M.R.U. Ahsan, X. Fan, G.-J. Seo, C. Ji, M. Noakes, A. Nycz, P.K. Liaw, D.B. (2021). Kim ‘Microstructures and mechanical behavior of the bimetallic additively-manufactured structure (BAMS) of austenitic stainless steel and Inconel 625’, *J. Mater. Sci. Technol.*, 74, pp. 176-188.
- [75] N. Xu, J. Shen, S. Hu, Y. Tian, J. Bi (2021). ‘Bimetallic structure of Ti6Al4V and Al6.21Cu fabricated by cold metal transfer additive manufacturing via Nb interlayer added by TIG’ *Mater. Lett.*, 302, Article 130397.
- [76] S. Singh, A.N. Jinoop, I.A. Palani, C.P. Paul, K.P. Tomar, K.G. Prashanth (2021), Microstructure and mechanical properties of NiTi-SS bimetallic structures built using wire arc additive manufacturing *Mater. Lett.*, 303. Article 130499.
- [77] He, T., Yu, S., Runzhen, Y. *et al.* (2021). Oscillating wire arc additive manufacture of rocket motor bimetallic conical shell. *Int J Adv Manuf Technol* 119, 6601–6612.
- [78] Kumar, A., Maji, K. (2021). Microstructure and Chemical Composition Analysis of Double Wire Arc Additive Manufactured Bimetallic Structure. *J. of Materi Eng and Perform* 30, 5413–5425
- [79] Shalini Singh, A.N. Jinoop, I.A. Palani, C.P. Paul, K.P. Tomar, K.G. Prashanth, 2021. Microstructure and mechanical properties of NiTi-SS bimetallic structures built using Wire Arc Additive Manufacturing, *Materials Letters*, Volume 303,
- [80] Mohan Kumar, S., Rajesh Kannan, A., Pravin Kumar, (2021). N. ve ark. Tel Ark Katkı Maddesi Üretilen SS321/Inconel 625 Fonksiyonel Gradyan Malzemenin Mikroyapısal Özellikleri ve Mekanik Bütünlüğü. *J. of Materi Eng and Perform* 30, 5692–5703.
- [81] Zhang, W., Lei, Y., Meng, W. *et al.* (2021). Effect of Deposition Sequence on Microstructure and Properties of 316L and Inconel 625 Bimetallic Structure by Wire Arc Additive Manufacturing. *J. of Materi Eng and Perform* 30, 8972–8983.
- [82] Gürol U., Turgut B., Güleçyüz N., Dilibal S., and Koçak M. (2021). “Development Of Multi-Material Components Via Robotic Wire Arc Additive Manufacturing”, *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 5(3): 721-729.
- [83] Yinbao Tian, Junqi Shen, Shengsun Hu, Xinya Chen, Yangchuan Cai & Jian Han, , (2022) Effect of deposition layer on microstructure of Ti–Al bimetallic structures fabricated by wire and arc additive manufacturing, *Science and Technology of Welding and Joining*, Volume 27.
- [84] Kim, Y.S., Yun, D., Han, J.H. ve ark. , (2022) Inconel 625 ve östenitik paslanmaz çeliğin bimetalik katkılı olarak üretilmiş yapısı (BAMS): ısıtılma işleminin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi. *Int J Adv Manuf Technol* 121, 7539–7549.
- [85] Yi Chen, Xinde Zuo, Wei Zhang, Zhizhuang Hao, Yang Li, Zhen Luo, Sansan Ao, (2022). Enhanced strength-ductility synergy of bimetallic laminated steel structure of 304 stainless steel and low-carbon steel fabricated by wire and arc additive manufacturing, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 856, 143984, ISSN 0921-5093.

- [86] **D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri and H. Li**, 2015. "A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)," *RoboticsandComputer- IntegratedManufacturing*, vol. 31, pp. 101-110.
- [87] **Raut, L.P., Taiwade, R.V.** (2022). Tel Arkın Mikroyapısı ve Mekanik Özellikleri Östenitik Paslanmaz Çelik ve Düşük Karbonlu Çeliğin Katkılı Bimetalik Yapısı. *J. of Materi Eng and Perform*
- [88] **Motwani, A., Kumar, A., Puri, Y. et al.** Mechanical characteristics and microstructural investigation of CMT deposited bimetallic SS316LSi-IN625 thin wall for WAAM. *Weld World* (2022). <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01403-4>
- [89] **Sridar, S.; Klecka, M.A.; Xiong, W.** (2022). Interfacial characteristics of P91 steel-Inconel 740H bimetallic structure fabricated using wire-arc additive manufacturing. *J. Mater. Process. Technol.* 300, 117396.
- [90] **Gürol U., Dilibal S., Turgut B., Baykal H., Kümek H., Koçak M.,** (2022). "Manufacturing and Characterization of Waam-Based Bimetallic Cutting Equipment" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 6(3): 548-555.
- [91] **Chena X., Xiaojie Lia X., Wang X., Yana H., Kebin Lia K., Zenga X.,** (2019). "Bonding mechanism of explosive compaction-welding sintering", *Journal of Manufacturing Processes*, 46: 1-15.
- [92] **Hainsworth, W.,** (1871). Improvement in Molds, Patent no: 121,736, ABD.
- [93] **Anık. S., Anık. E., Vural. M.** (1993). 1000 soruda kaynak teknolojisi el kitabı, Cilt II, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [94] **Web 6,** (n.d.), <https://www.materialwelding.com/what-is-synergic-mig-welding/>, (accessed Jun. 27, 2022).
- [95] **Su, C. and Chen, X.,** (2019). "Effect of depositing torch angle on the first layer of wire arc additive manufacture using cold metal transfer (CMT)", *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research And Application*, 46 (2): 259– 266.
- [96] **Kayhan O.,** 2011, "Tahribatsız muayene yöntemleri", Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi ders notu, Konya.
- [97] **Albayrak M., Kaman M. O.,** 2019, "Charpy darbe testinin deneysel ve sayısal analizi", *DÜMF Mühendislik Derg.*, vol. 10, no. 3, pp. 945–957, doi: 10.24012/dumf.475979.
- [98] **Gürel, Ç.** (2020). Kaynak bilimi ve teknolojisi, Kitap, Yayın evi: Nobel, Yayın no: 2963.
- [99] **Hardfacing Welding Wires And Rods,** Erişim: October 27, 2022. "600G", <https://gedikwelding.com/en/product-detail/600-g>,
- [100] **Han, S., Zhang, Z., Liu, Z., Zhang, H., Xue, D.,** (2020). "Investigation of the microstructure and mechanical performance of bimetal components fabricated using CMT-based wire arc additive manufacturing", *Materials Research Express*, Vol. 7, 116525.
- [101] **Vahedi Nemani, A., Ghaffari, M., and Nasiri, A.,** (2020). "On the post-printing heat treatment of a wire arc additively manufactured ER70S part", *Materials*, 13 (12): 2795.

- [102] **Cunningham CR, Flynn JM, Shokrani A et al** (2018) Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Addit Manuf* 22:672–686.
- [103] **Montevecchi F, Venturini G, Grossi N et al** (2018) Heat accumulation prevention in Wire-Arc-Additive-Manufacturing using airjet impingement. *Manuf Lett* 17:14–18.
- [104] **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. *J Mater Process Technol* 250:304–312.
- [105] **Müller J, Hensel J, Dilger K** (2022) Mechanical properties of wire and arc additively manufactured high-strength steel structures. *Weld World* 66:395–407.
- [106] **Huang C, Kyvelou P, Zhang R et al** (2022) Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels. *Mater Des* 216:110544.
- [107] **Tonelli L, Sola R, Laghi V et al** (2021) Influence of interlayer forced air cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured 304L austenitic stainless steel. *Steel Res Int* 92(11):2100175.
- [108] **Laghi V, Palermo M, Gasparini G et al** (2021) On the influence of the geometrical irregularities in the mechanical response of wire-and-arc additively manufactured planar elements. *J Constr Steel Res* 178:106490.
- [109] **Abusalma H, Eisazadeh H, Hejripour F et al** (2022) Parametric study of residual stress formation in wire and arc additive manufacturing. *J Manuf Process* 75:863–876.
- [110] **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 (Basel)* 14(15):4187.
- [111] **Wu, B., Pan, Z., Chen, G., Ding, D., Yuan, L., Cuiuri, D., Li, H.,** (2019). “Mitigation of thermal distortion in wire arc additively manufactured Ti6Al4V part using active interpass cooling”, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 24, Issue 5, Pages 484–494.

ÖZGEÇMİŞ

Deniz Eylül AKPINAR 2014 yılında Ümraniye Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2015 yılında Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde öğrenime başlayıp 2021 yılında Nişantaşı Üniversitesi'nde lisans eğitimini tamamladı. Akabinde 2021 yılında Gedik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans programına başladı. Şu an Gedik Üniversitesi ve Gedik Kaynak A.Ş. bünyesindeki TÜBİTAK 1505 Üniversite-Sanayi iş birliği ile 'Bimetal Malzemelerin Özlü/Masif Tel Beslemeli Robotik Ark Kaynağı ile Eklemeli İmalat Sisteminin Geliştirilmesi' projesinde bursiyer olarak yer almaktadır. 2023 yılında başladığı Uluslararası Kaynak Mühendisliği eğitimine devam etmektedir.