

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ÇENTİK YÖNÜNÜN TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ (WAAM)
İLE ÜRETİLEN C-MN ÇELİKLERİNİN KIRILMA TOKLUĞUNA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kadir DAĞYIKAN

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

TEMMUZ 2022

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ÇENTİK YÖNÜNÜN TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ (WAAM)
İLE ÜRETİLEN C-MN ÇELİKLERİNİN KIRILMA TOKLUĞUNA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kadir DAĞYIKAN
200022005

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı:
Doç. Dr. Mustafa KOÇAK
Dr. Öğr. Üyesi Uğur GÜROL

TEMMUZ 2022



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz, Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı (200022005) numaralı öğrencisi Kadir DAĞYIKAN'ın "Çentik Yönünün Tel Ark Eklemeli İmalat Yöntemi (WAAM) ile Üretilen C-MN Çeliklerinin Kırılma Tokluğuna Etkisinin İncelenmesi" adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun kararıyla 28/06/2022 tarihinde oluşturulan jüri tarafından *Oy Birliği* ile Yüksek Lisans tezi olarak *Kabul* edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

Tez Savunma Tarihi: 28/06/2022

1) Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa KOÇAK

2) Jüri Üyesi: Prof. Dr. Gürel ÇAM

3) Jüri Üyesi: Doç. Dr. Savaş DİLİBAL

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Çentik Yönünün Tel Ark Eklemeli İmalat Yöntemi (WAAM) ile Üretilen C-MN Çeliklerinin Kırılma Tokluğuna Etkisinin İncelenmesi” 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. (28/06/2022)

Kadir DAĞYIKAN



ÖNSÖZ

Tel Ark Eklemeli İmalat (WAAM) teknolojisi, daha kalın yapısal çelik (C-Mn) parçaların imalatı için daha fazla sektörün öncülüğünde kullanılacak olup bu çalışma WAAM parçalarının kırılma tokluğu hususundaki verilere ışık tutacak bir analiz olacaktır.

‘Çentik yönünün tel ark eklemeli imalat yöntemi (WAAM) ile üretilen C-Mn çeliklerinin kırılma tokluğuna etkisinin incelenmesi’ adlı tez araştırmamdaki birçok aşamada destek olan, deneyim ve tavsiyeleri ile tarafıma yol gösteren değerli tez danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa KOÇAK ve ikinci danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Uğur GÜROL ‘a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sırasında her türlü desteğini esirgemeyen çok sevdiğim eşim Fatma DAĞYIKAN ‘a teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışma hususunda numune geliştirme üzerinde yaptığımız uygulama ve test aşamalarına imkan sağlayan Gedik Test Merkezi ve İstanbul Gedik Üniversitesi Kaynak Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezine, emeği geçen tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2022

Kadir DAĞYIKAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
SİMGELER	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	1
1.2 Kapsam.....	2
2. EKLEMELİ İMALAT	4
2.1 Giriş.....	4
2.2 Metal Eklemeli İmalat.....	5
2.2.1 Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS).....	7
2.2.2 Elektron ışını ile ergitme (EBM)	8
2.2.3 Seçici lazer eritme (SLM)	10
2.2.4 Elektron ışını ile serbest formlu imalat (EBF)	11
2.2.5 Lazerle tasarlanmış net şekillendirme (LENS)	12
2.2.6 Lazerli birleştirme (LC)	13
2.2.7 Tel lazer eklemeli imalat (WLAM)	14
2.2.8 Ultrasonik eklemeli imalat (UAM)	15
2.2.9 Toz yataklı ve püskürtmeli 3D yazıcı (3DP)	16
2.2.10 Tel ark eklemeli imalat (WAAM).....	16
3. LİTERATÜR TARAMASI	19
3.1 Tel Ark Eklemeli İmalat Üzerinde Çalışmalar.....	19
4. YÖNTEM VE METERYAL	27
4.1 Altlık Malzemesi ve Tel Seçimi.....	28
4.2 Tel Ark Eklemeli İmalat Yöntemi ile Parça Üretimi	29
4.3 Deneyler ve Numune Hazırlığı	33
4.3.1 Tahribatsız muayene işlemleri	34
4.3.2 Tahribatlı muayene yöntemleri	35
4.3.2.1 Çentikli darbe (Charpy) tokluğu deneyi.....	35
4.3.2.2 Metalografik inceleme	38
4.3.2.3 Vickers sertlik deneyi.....	38
5. SONUÇ VE ANALİZ ÇALIŞMALARI.....	40
5.1 Katmanlar Arası Zamana Bağlı Isı Transferi Analiz Sonucu	40
5.2 Tahribatsız Muayene ve Parça Boyut Analizleri	41
5.3 Tahribatlı Muayene İncelemeleri	45
5.3.1 Sertlik test sonuçları.....	45
5.3.2 Kırılma tokluğu test sonuçları.....	50

5.4 Metalografik Muayene İncelemeleri	51
5.4.1 Makro yapı sonuçları	51
5.4.2 Katmanlar arası mikro yapı incelemeleri	52
5.4.3. Kırılma yüzeyi incelemeleri	54
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ.....	62



KISALTMALAR

3D	: Üç Boyutlu
3DP	: 3D Printer (Üç Boyutlu Yazıcı)
ALM	: Additive Layer Manufacturing (Eklemeli Katman İmalatı)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CMT	: Cold Metal Transfer (Soğuk Metal Transferi)
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
DLD	: Direct Laser Deposition (Doğrudan Lazer Biriktirme)
DMD	: Direct Material Deposition (Doğrudan Malzeme Biriktirme)
DMLS	: Direct Metal Laser Sintering (Doğrudan Metal Lazer Sinterleme)
EBF	: Electron Beam Freeform Fabrication (Elektron Işını İle Serbest Formlu İmalat)
EBM	: Electron Beam Melting (Elektron Işını İle Eritme)
FFF	: Free Form Fabrication (Serbest Şekil Üretme)
GMAW	: Gas Metal Arc Welding (Gaz Metal Ark Kaynağı)
GTAW	: Gas Tungsten Arc Welding (Gaz Tungsten Ark Kaynağı)
HB	: Hardness Brinell (Brinell Sertliği)
HLM	: Hybrid Layer Manufacturing (Karma Katman Üretimi)
HRC	: Hardness Rockwell (Rockwell Sertliği)
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertliği)
IACS	: International Association of Classification Societies (Uluslararası Sınıflandırma Örgütleri Birliği)
LC	: Laser Consolidation (Lazerli Birleştirme)
LENS	: Laser Engineered Net Shapes (Lazer Mühendisliği İle Net Şekillendirme)
LMD	: Laser Metal Deposition (Lazer Metal Biriktirme)
MAG	: Metal Active Gas (Metal Aktif Gaz)
MIG	: Metal Inert Gas (Metal Soy Gaz)
PAW	: Plasma Arc Welding (Plazma Ark Kaynağı)
RP	: Rapid Prototyping (Hızlı Prototipleme)
SLA	: Stereolithografi
SLM	: Selective Laser Melting (Seçici Lazer Eritme)
STL	: Standard Template Library (Standard Şablon Kütüphanesi)
TIG	: Tungsten Inert Gas Welding (Tungsten Soy Gaz Kaynağı)
UAM	: Ultrasonic Additive Manufacturing (Ultrasonik Eklemeli İmalat)
WAAM	: Wire and Arc Additive Manufacturing (Tel ve Ark Eklemeli İmalat)
WLAM	: Wire and Laser Additive Manufacturing (Tel ve Lazer Eklemeli İmalat)

SİMGELER

Ar	: Argon
CO₂	: Karbondioksit
O₂	: Oksijen
Ti	: Titanyum
Al	: Alüminyum
V	: Vanadyum
H	: Hidrojen
Mn	: Mangan
Si	: Silisyum
W	: Watt
Kw	: Kilowatt
A	: Amper
µm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
gr	: Gram
kg	: Kilogram
sa	: Saat
sn	: Saniye
dk	: Dakika
lt	: Litre
kN	: Kilonewton
°C	: Celsius
MPa	: Megapaskal
Ra	: Yüzey pürüzlülüğü

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Metal eklemeli imalatta malzeme biçimi sınıflandırması	6
Çizelge 4.1: SG 2, SG3 ve ER110 Kaynak telinin kimyasal bileşimi (% ag.)	28
Çizelge 4.2: SG 2, SG3 ve ER110 Kaynak teli mekanik değerler	28
Çizelge 4.3: Koruyucu karışım gazı kimyasal bileşimleri.....	28
Çizelge 4.4: Altlık malzemesi kimyasal kompozisyonu.....	29
Çizelge 4.5: Numune imalatında kullanılan kaynak parametreleri	32



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Metal eklemeli imalat yöntemleri.....	5
Şekil 2.2: Doğrudan metal lazer sinterleme işlemi.....	8
Şekil 2.3: Elektron ışını ile ergitme (EBM) işlemi.....	9
Şekil 2.4: Seçici lazer eritme işlemi.....	10
Şekil 2.5: Elektron ışını ile serbest formlu imalat gösterimi.....	11
Şekil 2.6: Lazerle tasarlanmış net şekillendirme uygulama gösterimi.....	12
Şekil 2.7: Lazerli birleştirme işleminin şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.8: Tel lazer eklemeli imalatın şematik görünümü.....	14
Şekil 2.9: Ultrasonik eklemeli imalatın şematik görünümü.....	15
Şekil 2.10: Toz yataklı ve püskürtmeli 3D yazıcının şematik görünümü.....	16
Şekil 2.11: Tel ark eklemeli imalat işleminin şematik gösterimi.....	17
Şekil 3.1: Tel ark eklemeli imalat sürecinde malzeme ve kusur arasındaki ilişki gösterimi.....	21
Şekil 3.2: a) Ti-6Al-4V harici iniş takımı tertibatı, b) 2.5mm alüminyum kanat direği uygulaması.....	22
Şekil 3.3: a) darbeli mod, b) soğuk metal transferi modu ile üretilen parçalar.....	23
Şekil 3.4: Farklı katman ve sıcaklıklardaki profillerin sürekli soğuma diyagram gösterimi.....	26
Şekil 4.1: Yapılan çalışmanın deneysel ilerleyişinin şematik gösterimi.....	27
Şekil 4.2: Tabanlı plakasının şematik boyutsal ölçü gösterimi.....	29
Şekil 4.3: WAAM sisteminin genel görünümü.....	30
Şekil 4.4: Üretim öncesi makro inceleme için demo pasolar; a) 4x, b) 1x, c) 3x.....	30
Şekil 4.5: Bindirme kaynak paso makro görüntüsü; a) 4x, b) 3x, c) 1x.....	31
Şekil 4.6: Kaynak uygulamasındaki paso ilerlemesinin gösterimi.....	32
Şekil 4.7: Tek katmanda kaynak pasosunun ilerleme yolu.....	32
Şekil 4.8: Kaynak sırasında lokasyon ölçümleri; a) bitiş, b) orta, c) soğuma sonrası ortalama ölçüm.....	33
Şekil 4.9: Test aşaması için çıkarılacak numune konum gösterimi.....	33
Şekil 4.10: Numunede x-ışın çekim yönünün şematik gösterimi.....	34
Şekil 4.11: Üretilen parça için gama çekim pozisyon parametrelerinin ayarlanması.....	35
Şekil 4.12: Charby çentik darbe deney cihazı.....	36
Şekil 4.13: Katı modellemede numune için 3D ve yan kesit gösterimi.....	36
Şekil 4.14: Çıkarılacak numunenin lokasyon ölçümleri.....	36
Şekil 4.15: Numunede kesim sonrası görüntüler; a) yatay, b) dikey.....	37
Şekil 4.16: Numunede işleme sonrası görüntüler; a) yatay, b) dikey.....	37
Şekil 4.17: Çentikli darbe deney sonrası gösterimi.....	37
Şekil 4.18: Uygulamada kullanılan optik mikroskop.....	38
Şekil 4.19: Vickers sertlik test cihazı.....	39
Şekil 4.20: Vickers sertlik testi yapılacak konumlandırma (Üst / Orta).....	39
Şekil 5.1: SG3 numunesinin katmanlar arası soğuma süreleri.....	40
Şekil 5.2: SG2 numunesinin katmanlar arası soğuma süreleri.....	41

Şekil 5.3: ER110 numunesinin katmanlar arası soğuma süreleri	41
Şekil 5.4: Kaynak paso yığılması ile ortalama ulaşılan yükseklik ve kalınlık	42
Şekil 5.5: Numunede; a) Demo 3x paso makro görüntüsü, b) kalınlık ölçümü	42
Şekil 5.6: Kaynak kesit yüksekliği; a) SG2, b) SG3, c) ER110	43
Şekil 5.7: Farklı kaynak telleri kullanılarak üretilen düşük alaşımlı çelik parçaların yan yüzeyden dikiş görüntüleri; a) SG2, b) SG3 ve c) ER110	43
Şekil 5.8: X-Ray ışın radyografi film görüntüsü; a) ER110, b) SG2, c) SG3	44
Şekil 5.9: Gama ışın dijital radyografi film görüntüsü; a) ER110, b) SG2, c) SG3 ..	45
Şekil 5.10: Vickers ölçüm hattı görüntü gösterimi; a) ER110, b) SG2, c) SG3	46
Şekil 5.11: ER110 kaynak teli ile üretilen parçanın sertlik konumları ve test sonuçları	47
Şekil 5.12: SG2 kaynak teli ile üretilen parçanın sertlik konumları ve test sonuçları	47
Şekil 5.13: SG3 kaynak teli ile üretilen parçanın sertlik konumları ve test sonuçları	48
Şekil 5.14: SG2 ve SG3 kaynak teli ile üretilen parçalarda konumlara göre sertlik test sonuçları karşılaştırması	49
Şekil 5.15: SG2, SG3 ve ER110 kaynak teli ile üretilen parçalarda kaynak orta bölge sertlik test sonuç karşılaştırması.....	50
Şekil 5.16: Çentik yönlerine bağlı olarak çentikli darbe test sonuçları	50
Şekil 5.17: Katmanlar arası dikey kesit makro görüntüleri; a) ER110, b) SG 2, c) SG3	51
Şekil 5.18: Farklı kaynak telleri ile üretilen parçaların orta duvar mikro yapı görüntüleri	52
Şekil 5.19: Farklı kaynak telleri ile üretilen parçaların kenar duvar mikro yapı görüntüleri	53
Şekil 5.20: SG2 teli ile üretilen parçanın darbe test numunelerinin kırılma yüzeyi görüntüsü	54
Şekil 5.21: SG3 teli ile üretilen parçanın darbe test numunelerinin kırılma yüzeyi görüntüsü	54
Şekil 5.22: ER110 teli ile üretilen parçanın darbe test numunelerinin kırılma yüzeyi görüntüsü	55

ÇENTİK YÖNÜNÜN TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ (WAAM) İLE ÜRETİLEN C-MN ÇELİKLERİNİN KIRILMA TOKLUĞUNA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Metal veya alaşım tozunun hammadde olarak kullanıldığı eklemeli imalat yöntemlerine nazaran tel ark eklemeli imalat yöntemi (WAAM) ile metal parça üretimi düşük yatırım maliyeti, yüksek biriktirme hızı, zaman tasarrufu, yüksek malzeme çeşitliliği ve tasarım esnekliği nedeniyle tüm dünyada istikrarlı bir şekilde artmaktadır. WAAM yöntemi ısı kaynağı olarak ark, besleme malzemesi olarak ise kaynak telinin kullanılması ile sisteme beslenen telin ergimesi ve akabinde katılaşarak belirlenen bölgede parçanın bir katmanının oluşturması sürecine dayanmaktadır. İlerleyen dönemlerde WAAM teknolojisi ile kalın kesitli C-Mn çelik parçaların imalatının giderek artacağı aşikardır. Bu sebeple çelik parça üreticileri bu yeni çelik WAAM parçalarının tasarım aşamalarında kullanabilecekleri kırılma tokluğu verilerine ihtiyaç duyacaktır.

Bu çalışmada, farklı kaynak telleri kullanarak çoklu paso yöntemi ile üretilen kalın kesitli düşük alaşımlı C-Mn parçaların çentik yönüne bağlı olarak Charpy-V kırılma tokluğundaki değişim incelenmiştir. Kaynak teli olarak GeKa markalı AWS A5.18 standardı ER70S-6 kalitesine uygun ticari adı SG2 ve SG3 olan kaynak telleri ile AWS A5.28 standardı ER110S-G kalitesindeki ticari adı ER110 olan kaynak telleri kullanılmıştır. Üretilen parçalar ilk olarak görsel muayene ve radyografik muayeneye tabi tutulmuş olup akabinde mikro sertlik, çentik darbe ve mikro-makro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Tel ark beslemeli imalat yöntemi ile elde edilen sonuçlar dikey yönde çıkarılan numunelerin daha yüksek çentik darbe tokluğu değerlerine sahip olduğunu ve parçaların anizotropik özellik gösterdiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: *Metal eklemeli imalat, Charpy-v, makro yapı, mikro yapı, tel ark eklemeli imalat, MAG*

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NOTCH ORIENTATION ON
FRACTURE TOUGHNESS OF C-MN STEELS PRODUCED BY WIRE ARC
ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM)**

ABSTRACT

Compared to additive manufacturing methods in which metal or alloy powder is used as raw material, metal part production by wire arc additive manufacturing method (WAAM) is increasing steadily all over the world due to its low investment cost, high deposition rate, time saving, high material diversity and design flexibility. The WAAM method is based on the process of using the arc as the heat source and the welding wire as the feeding material, the melting of the wire fed to the system and then solidifying and forming a layer of the part in the determined region. It is obvious that the production of thick-section C-Mn steel parts will increase gradually with WAAM technology in the future. For this reason, steel part manufacturers will need fracture toughness data that they can use during the design phases of these new steel WAAM parts.

In this study, the change in Charpy-V fracture toughness depending on the notch direction of thick section low alloyed C-Mn parts produced by multi-pass method using different welding wires was investigated. GeKa branded AWS A5.18 standard and ER70S-6 commercial name SG2 and SG3 welding wires were used as welding wire, AWS A5.28 standard and ER110S-G trade name ER110 welding wires were used. The produced parts were subjected to radiographic examination and then microhardness, notch impact and microstructure examinations were made. The results obtained revealed that the samples extracted in the vertical direction had higher notch impact toughness values and the parts showed anisotropic properties.

Keywords: *Additive Manufacturing, Charpy-v, Macro Structure, Wire Arc Additive Manufacturing, MAG*

1. GİRİŞ

1.1 Amaç

Tel ve ark eklemeli imalat yöntemi, yüksek hızlı biriktirme ve potansiyel olarak sınırsız yapı boyutu nedeniyle orta ila büyük bileşenler üretebileceğini kanıtlamıştır. Bununla birlikte, tüm eklemeli üretim (AM) teknolojilerinde olduğu gibi, tek tip, hatasız birikim sağlayan optimize edilmiş bir süreç planlaması, parça üretimi için anahtardır. Ayrıca WAAM teknolojisi, artık sadece bir protatip üretim teknolojisi değildir ve günümüzün dikkatlerinin çoğu, uygulanabilir ve uygun maliyetli bir üretime dönüştürülmesi üzerindedir. Bu dönüşümle, üretilen bileşenlerin doğruluğu ve etkinliği de dahil olmak üzere bir dizi sorunun ele alınması gerekmektedir. Bu nedenle, vurgulanması gereken şey WAAM 'da boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesi üzerinde olmalıdır. Özellikle üretim sonunda kritik olan ve sonuçta ortaya çıkan büzülme, deformasyon ve artık gerilmelerle ilgili ısı girdisi ve kırılmaya dayanım önem arz eder. Ek olarak, yapı oryantasyonu, dilimleme ve yol planlaması dahil olmak üzere süreç planlamasının yanı sıra tek bir yoldan çok yönlü ve çok katmanlıya kadar süreç parametresi seçiminin tanımına ve son olarak çeşitli vaka ve yöntem çalışmaları ile malzemedeki dayanım ve ısı girdilerine bağlı iç değişken özellikleri önemlidir (Alberti, Silva & D'Oliveira 2016).

Her bir katmanlı imalat tekniği, çeşitli amaçlar için hızla geliştirilmiştir. Endüstriyel uygulamaların ve eksiltici süreçlerin getirdiği zorlukların üstesinden gelmek için çeşitli eklemeli imalat örnekleri vardır. Daha yakın zamanlarda tel ark eklemeli imalat, takım kalıpları ve araç ve havacılık bileşenleri gibi büyük parçalar için umut vaat etmiştir. Ti-6Al-4V ve Alüminyum gibi metaller son zamanlarda havacılık uygulamaları için araştırılmış, ancak çelikler ancak son zamanlarda ilgi görmeye başlamıştır (Yılmaz & Uğla 2016).

Diğer metal eklemeli imalat proseslerinden farklı olarak, tel ark prosesi hazır hammadde ile yüksek verim sunar ve ticari kullanıma hazır donanım bileşenlerini kullanır ve bu da uygun ekonomi sağlar. Uygulama aşamasında herhangi bir hazneye

ihtiyaç olmaması hem maliyet hem de genel işlemler ile oluşturulamayan farklı geometrilerin üretimini mümkün kılar. Farklı metal eklemeli imalat aşamalarına göre büyük ebatlı malzeme ve farklı metalürjik özelliklere sahip metallerin üretimine olanak oluşturması, daha verimli, maliyeti düşük ve enerji performans verimi yüksek olmasından dolayı elektrik ark ile eklemeli imalat sistemi üzerinde çalışma yapılmaktadır (Adeyinka, 2013).

1.2 Kapsam

Bu çalışmada, ürün oluşturmak ve bu ürünü oluştururken sarf edilen süreyi minimuma indirmek amaçlanmıştır. Hızlı şekilde üretimi yapılmayacak az miktardaki malzemelerin imalatı ve mekanik özelliklerini incelemek amacıyla endüstriyel sektörde en çok uygulaması yapılan düşük alaşımlı metalik malzeme ile tel ark eklemeli imalat yöntemi kullanılmıştır. İmalat sonunda farklı ürünlerin yüklere karşı tokluklarını incelemek için çentik darbe dayanımları araştırılması, katman geçişlerinin sertliğe etkisi ve üretim esnasında malzeme iç yapısındaki süreksizlikleri NDT (Tahribatsız Muayene Testi) yöntemlerinden Radyografi ve Dijital Radyografi (CR) yöntemleri ile incelenmesi hususunda araştırma yapılmıştır. Bu bağlamda, OTC Daihen FD-V8L modelinde 6 eksenli robot ve bu robotik kaynak sisteminin çalışmasını verimli kılan GeKa-Tec WB 500L kaynak makinesi ile GEKA marka SG2, SG3 ve ER110 SG model teller kullanılarak 3 adet 320mm x 60mm ebatlarında ürünler üretilmiştir. Bu tez uygulama aşaması kapsamındaki oluşturulan ürünler üzerinde yapılan testler ve yürütülen çalışmalar şunlardır;

- Giriş kısmında eklemeli imalat konusunda neden bu metot 'a ihtiyaç duyulduğu ve tez amacı hususunda tanıtım yapılmıştır.
- Eklemeli imalat kısmında bu imalat yöntemi ve alt kategori imalat unsurları hususunda bilgiler verilmiştir. Bu alanda ayrıca eklemeli imalatta kullanılan hammadde malzemeler hakkında bilgi verilmiş olup bu hammaddelerin kullanım aşamaları yorumlanmıştır.
- Literatür taraması kısmında eklemeli imalat konusunda yürütülmüş olan çalışmaları incelenmiş olup daha çok metal bazlı ürün kullanılan eklemeli imalat uygulama çalışmaları yorumlanmıştır.

- Yöntem ve Materyal kısmında deney aşamasında kullanılan malzeme ve ekipmanlar hakkında teknik verileri ve kullanım aşamaları hususunda bilgiler açıklanmıştır. Üründe oluşan mekanik özelliklerin incelenmesinde ve uygulanan NDT test yöntemleri hakkında teknik bilgiler sunulmuştur.
- Sonuç ve analiz çalışmaları kısmında ortaya çıkan teknik veri sonuçlarına göre eklemeli imalat ile üretilen C-Mn çeliklerin Charpy-V testi ile deney malzemesindeki katmanlar arası tokluğa etkisi ve ortaya çıkan ürünün NDT test sonuçları ile yorumlanması gerçekleştirilmiştir.
- Son bölüm olan sonuç ve önerilerde ise yapılan deneyde ortaya çıkan verilerin genel olarak üzerinden geçilmiş olup gelecekte bu konu üzerinde yapılabilecek araştırmalar hususunda öneri ve yorumlar yapılmıştır.

2. EKLEMELİ İMALAT

2.1 Giriş

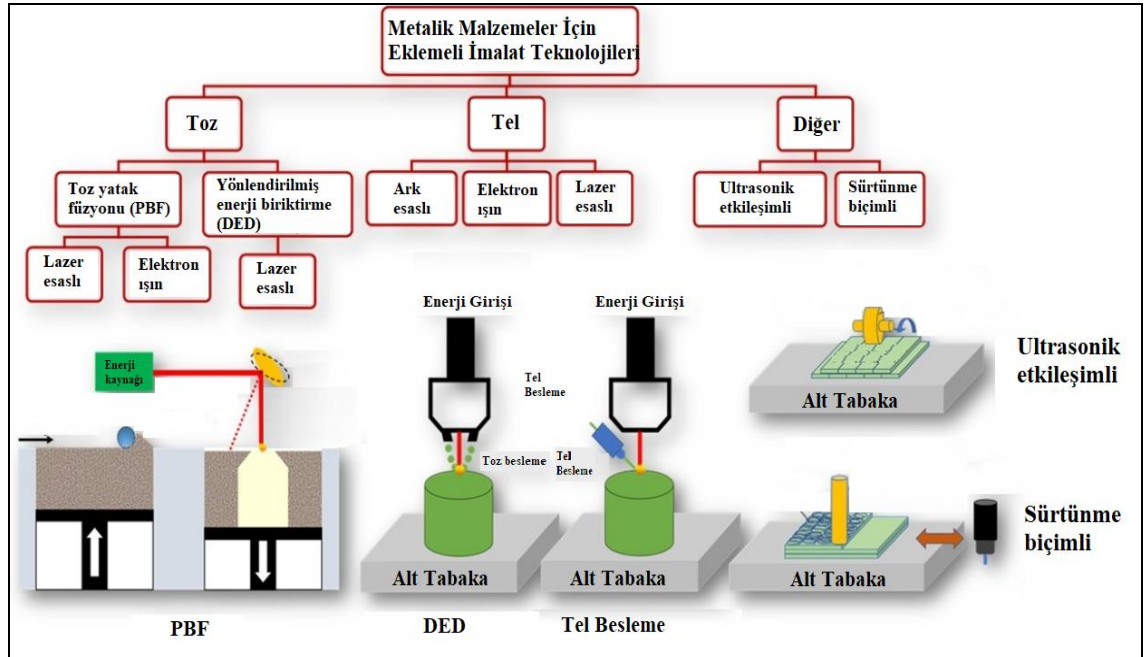
Katmanlı üretim veya eklemeli imalat (AM), gezegendeki en hızlı büyüyen ve en çok konuşulan üretim teknolojileri arasındadır. Bu yöntem, yeni ürün tasarımı ve üretimi için çeşitli fırsatlar sunmaktadır. Eklemeli imalat, özünde, dijital model verilerini kullanarak bileşenleri "inşa eden" bir teknolojiler takımıdır. Bu imalat teknolojileri üzerine ASTM Komitesi, eklemeli imalat alanının bir parçası olarak yöntemler; yönlendirilmiş enerji birikimi, levha laminasyonu, malzeme erozyonu, malzeme jeti, yapıştırıcı ile katmanlı imalat, toz yataklı lazer birleştirme ve stereolithografi (SLA) gibi yedi farklı süreç rotası tanımlamıştır. Her prosesin termal ve kimyasal proses döngüsünden ve sonuçta ortaya çıkan mikro yapıdan kaynaklanan kendine has faydaları ve zorlukları vardır. Teknolojiyle ilgili herhangi bir tartışma, sonuçta ortaya çıkan malzeme mikro yapısının, yüzey pürüzlülüğünün ve mühendislik toleranslarını koruma yeteneğinin ayrıntılarını ve ayrıca güvenilirlik ve maliyetle ilgili uygulama ayrıntılarını ve potansiyel tedarik zinciri sorunlarını hesaba katmalıdır. Bu süreç grubu etrafındaki endüstriyel heyecan, tasarımcılara döküm, sert lehimleme veya şekillendirme süreçleri gibi geleneksel süreçlerin sınırlamalarından ziyade işlevsellik için bileşenleri tasarlamaya odaklanma yetkisi verme kapasitesi tarafından yönlendiriliyor. Ayrıca, artık fonksiyonel metal prototiplerin tek tek bileşenlerin test edilmesi ve imalat montaj süreçleri için kullanılabilmesi, hızlı test ve ürün tanıtımı için yepyeni bir paradigma sağlamaktadır (Rodrigues ve diğerleri 2019).

Eklemeli imalatın kullanılması, ürün geliştirme döngülerinin metalik prototiplerin üretilmesi için aylar sürebilen geleneksel yöntemlere bağlantılı olma zorunluluğu ortadan kalkması anlamına gelmektedir. Eklemeli imalatta, şu anda örnek vermek gerekir ise; kobalt kromun lazer toz yatağı füzyonu ve titanyum alüminatın elektron ışını toz yatağı füzyonu gibi iyi anlaşılan yalnızca bir avuç malzeme işlemi uygulaması bulunmaktadır. Eklemeli imalatın tam potansiyelini gerçekleştirmek için, daha geniş bir metal alaşımları setinde ve daha birçok işleme yaklaşımı için işleme-yapı-özellik bağlantılarının daha fazla olgunlaşması gerekecektir. Bu süreç

gerçekleştiğinde, endüstriyel tasarımcılar, zorlu uygulamalar için performans iyileştirmesini sağlayan özel malzeme ve süreç kombinasyonlarını seçme yetkisine sahip olduklarından, eklemeli imalatın benimsenmesi ve uygulanması günden güne hızlanacaktır (Çelik ve diğerleri 2013).

2.2 Metal Eklemeli İmalat

Metalik malzemeler için eklemeli imalat teknolojileri, Şekil 2.1'de gösterilen farklı bileşim malzemelerinin ve enerji kaynağının türüne göre kategorize edilebilir. Toz ve tel besleme uygulama yöntemleri, metal eklemeli imalat teknolojilerinde yaygın olarak kullanılır. Beslemenin malzemenin türüne bağlı olarak metal eklemeli imalat yöntemleri; toz yatağı ergitmeli, toz beslemeli ve tel eklemeli imalat sistemleri olmak üzere üç gruba da ayrılabilir (Güler ve diğerleri, 2022). Farklı metal eklemeli imalat teknolojileri arasında toz yatağı füzyonu (PBF) ve yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED), tozu hammadde olarak en çok kullananlardır. Seçici lazer eritme (SLM) ve seçici lazer sinterleme (SLS) teknikleri, lazeri bir enerji kaynağı olarak kullanan iki tip PBF yöntemidir. Tel eklemeli ve diğer eklemeli yöntemler olarak da bu metal eklemeli imalat prosesini bir tablo halinde inceleyebiliriz (Gibson, Rosen & Stucker 2010).



Şekil 2.1: Metal eklemeli imalat yöntemleri

Kaynak: Bandyopadhyay, Zhang & Bose (2020).

Metalik malzemeleri imal etmek için eklemeli imalat teknolojilerini kullanmanın avantajları sadece karmaşık geometriler üretmek değil, aynı zamanda monolitik, bimetalik veya çok malzemeli bileşimler kullanarak özelleştirilmiş özelliklere sahip yapıları tasarlamak ve imal etmektir. Metal eklemeli imalat yöntemlerini kullanılan malzeme biçimlerine göre sınıflandırarak analiz etmek gerekir ise Çizelge 2.1’de verilen imal biçimleri tanımlanabilir (Bandyopadhyay, Zhang & Bose 2020).

Çizelge 2.1: Metal eklemeli imalatta malzeme biçimi sınıflandırması

Sınıflandırma	Terminoloji	Malzeme Biçimi
	Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS)	
Toz yataklı füzyon	Elektron ışını ile eritme (EBM)	Toz
	Seçici lazer eritme (SLM)	
	Elektron ışını ile serbest formlu imalat (EBF)	
Yönlendirilmiş Enerji birikimi	Lazerli net şekillendirme (LENS)	Toz, Tel
	Lazerli birleştirme (LC)	
	Tel ve lazer eklemeli imalat (WLAM)	
	Tel ark eklemeli imalat (WAAM)	
Bağlayıcı püskürtme	Toz yataklı ve püskürtmeli 3D yazıcı (3DP)	Toz
Levha laminasyonu	Ultrasonik eklemeli imalat (UAM)	Levha

Kaynak: Ding ve diğerleri (2015).

Metalik malzemeler için eklemeli imalat teknolojileri, Çizelge 2.1’de gösterilen besleme stoğu malzemelerinin ve enerji kaynağının türüne göre kategorize edilebilir. Toz ve tel besleme stoğu malzemeleri, metal eklemeli imalat teknolojilerinde yaygın olarak kullanılır. Farklı metal eklemeli imalat teknolojileri arasında toz yatak füzyonu (PBF) (Şekil 2.1) ve yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) (Şekil 2.1), tozu hammadde olarak en çok kullananlardır (Ding ve diğerleri 2015).

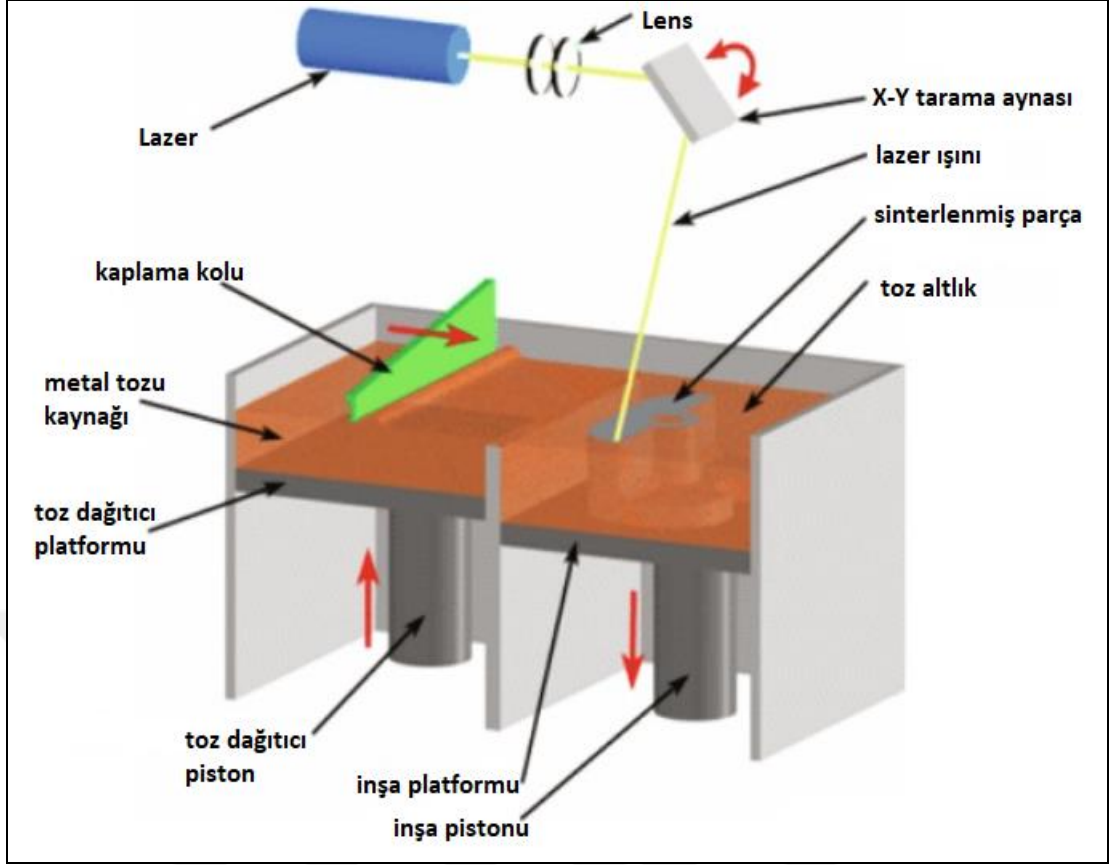
Seçici lazer eritme (SLM) ve seçici lazer sinterleme (SLS) teknikleri, lazeri bir enerji kaynağı olarak kullanan iki tip PBF yöntemidir. Diğer bir PBF tekniği, enerji girişi olarak lazer yerine yüksek güçlü bir elektron ışını kullanan elektron ışını ile eritmedir (EBM). EBM için inert gazlı bir baskı ortamı gerektiren lazer bazlı PBF işleminin aksine, parçalar bir vakum odasında üretilir (Ding ve diğerleri 2015).

Metal eklemeli imalat için besleme stoğu malzemesi olarak tel kullanılması da çok umut verici bulunmuştur. Tel bazlı biriktirme kavramı (Şekil 2.1), toz bazlı DED'e çok benzer, ancak metal tel kullanır. Ark tabanlı, elektron ışını ve lazer tabanlı tel birikimleri üç ana enerji kaynağıdır. Hammadde materyali olarak toz ve tel formunun kullanılmasının yanı sıra, hammadde materyallerinin başka formları da vardır. Örneğin, ultrasonik konsolidasyon yönteminde (Şekil 2.1), hammadde olarak ince metalik folyolar kullanır. Örneklendirdiğimiz bu metal eklemeli imalat teknolojilerinin uygulanmasıyla birçok üretim sorununun üstesinden gelinmiş olsa da daha fazla geliştirme gerektiren hususlar bulunmaktadır (Bandyopadhyay, Zhang & Bose 2020).

2.2.1 Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS)

Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS), Rapid Product Innovations (RPI) ve EOS (Electro Optical System) tarafından ortaklaşa geliştirilmiştir ve 1994 yılından başlayarak metal parçaları tek bir işlemde üreten ilk ticari hızlı prototipleme yöntemi olarak geliştirilmiştir. Bu yöntem, ısı ve basınç altında toz ile metal kalıplama sektöründe öncü bir uygulama olarak görülür. Uygulamada, 20 veya 40 µm katmanlar şeklinde oluşturacak şekilde lazer ışını kullanılarak toz metal, paslanmaz çelik, Al-30Si, titanyum, 316L veya bronz kullanılarak sinterleme işlemi uygulanır. Sonrasında, toz katmanı süpürülmesi vasıtasıyla önceden oluşturulmuş olan katman, yeni bir katmanın sinterlenmesine olanak sağlar. DMLS uygulaması, yoğunluğu yüksek oranlarda parça üretimine izin verdiği için yeniden sinterleme ihtiyacı duyulmaz. Tabakalar için destek yapıları, sinterleme işlemi yapılmış olsa dahi ihtiyaç duyulur. Üretilen parçalar için, bilyeli dövme, destek oluşturma ve ısıl işlem gibi farklı son işlemlere ihtiyaç duyulabilir (Rahmati,2014).

Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS), metal 3D baskı için bir AM tekniğidir. Bu işlemde, bağlayıcı veya eritici madde içermeyen metal tozu (20 µm çapında), yüksek güçlü bir lazer ışınının taranmasıyla tamamen eritilir. Ortaya çıkan parça, orijinal malzeme gibi özelliklere sahiptir. Bu yöntemde yaygın olarak üretilen yapılar malzemeler bronz, kobalt-krom, alaşımli çelik, takım çeliği, titanyum, alüminyum ve paslanmaz çeliktir. İşlevsel prototiplerin üretimi için ayrıca, DMLS genellikle hızlı takımların, tıbbi implantların veya yüksek ısı uygulamaları için havacılık parçalarının imalatında kullanılır. Şekil 2.2 'de bu yöntemin uygulanması şematik olarak gösterilmektedir (Jones 2019).



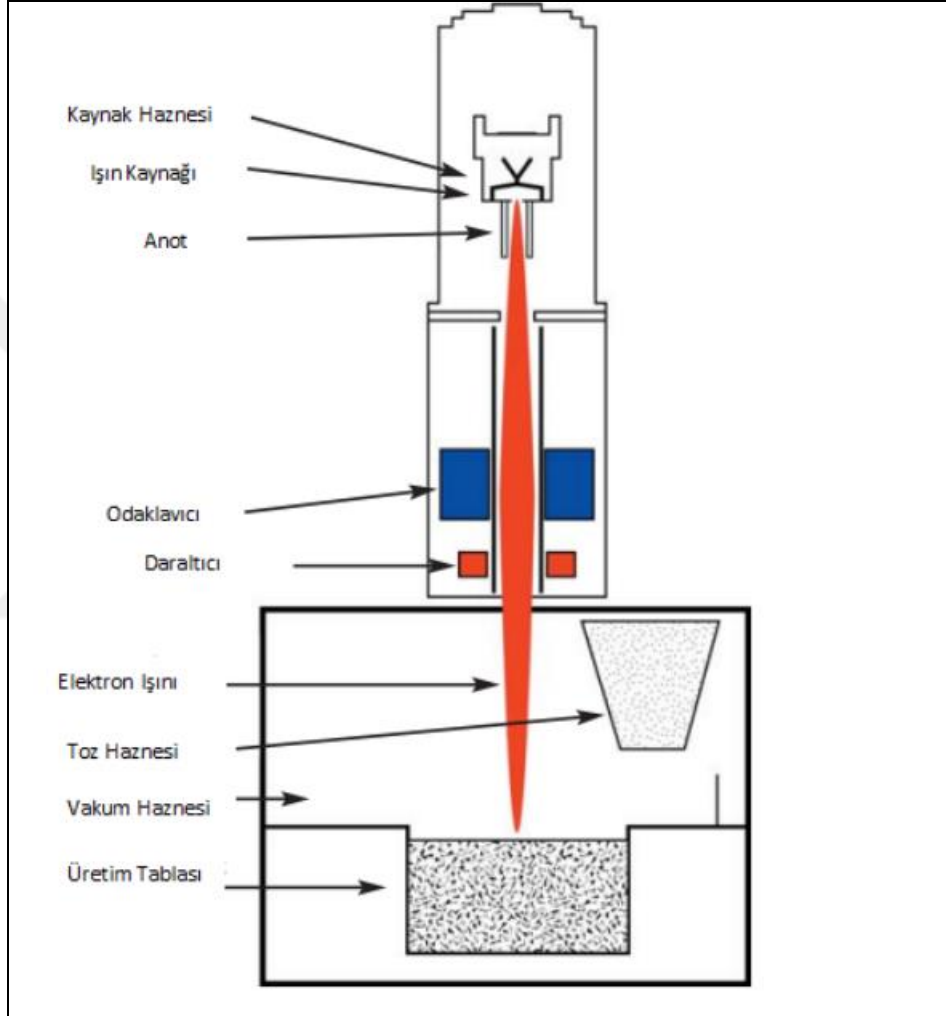
Şekil 2.2: Doğrudan metal lazer sinterleme işlemi
Kaynak: Martinho, P.G. (2021).

DMLS ile çalışırken sadece belirli geometriler oluşturulmalıdır. Bu teknolojiyi kullanırken aşırı hacimlerden kaçınılmalıdır. Bunun nedeni, yapı hacminin (katılaştırılacak malzeme miktarı) katman sayısı ile birlikte üretilen malzemenin geometrik karmaşıklığı değil, üretim süresini ve maliyetlerinin belirlenmesi önceliklidir (Martinho, 2021).

2.2.2 Elektron ışını ile eritme (EBM)

Elektron Işını Eritme (EBM), toz halindeki bir metalin yüksek enerjili bir elektron ışını ile eritildiği bir 3D üretim sürecidir. Bir elektron ışın demeti, bir CAD modeli tarafından tanımlanan kesin özelliklere uyan bir nesne oluşturmak için toz metal tabakasını eriterek, manyetik alan tarafından yönlendirilen bir elektron akışı üretir. Üretim, yüksek oranda reaktif malzemeleri tehlikeye atabilecek oksidasyona karşı koruma sağlamak için bir vakum odasında gerçekleşir. Elektron Işını ile eritme, her ikisi de 3D yazıcının toz yatağından gerçekleştirildiği için Seçici Lazer Eritmeye (SLM) benzer, ancak EBM yönteminde lazer yerine bir elektron ışını kullanır (Carlota 2019).

EBM, proste kullanılan metallerin doğal özelliklerinden en iyi şekilde yararlanan, döküm metalleri kullanılırken veya diğer imalat yöntemlerini kullanırken birikebilecek uygunsuzlukları ortadan kaldıran yüksek mukavemetli parçalar üretir. Havacılık, otomotiv, savunma, petrokimya ve tıbbi uygulamalar için bileşenleri yazdırmak için kullanılır. Şekil 2.3' de uygulanma aşaması şematik olarak gösterilmektedir (Arcam EBM 2019).



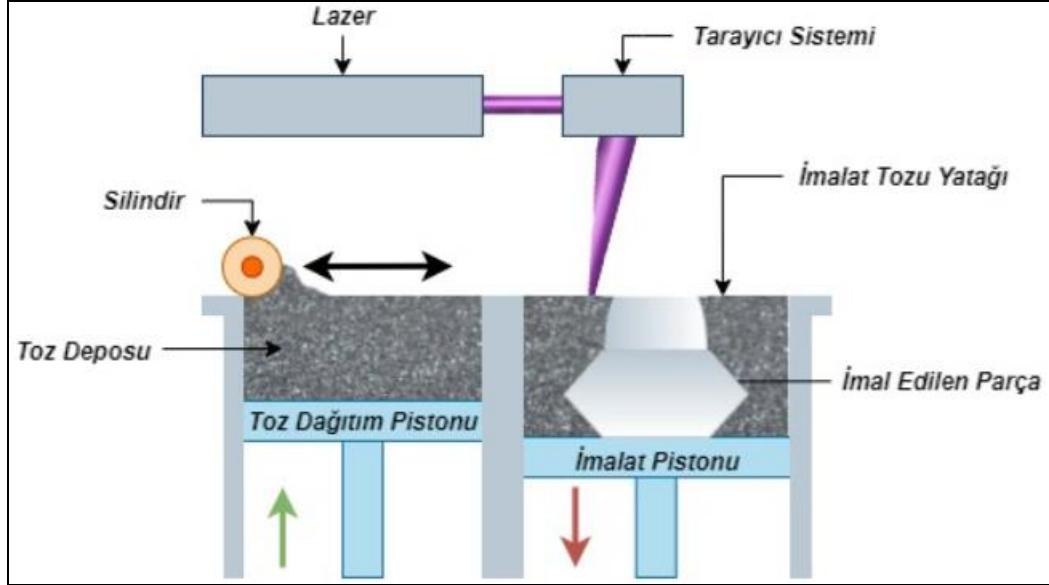
Şekil 2.3: Elektron ışını ile eritme (EBM) işlemi

Kaynak: Çelik, K. & Özkan, A. (2017).

Elektron ışını eritme teknolojisi tescillidir ve EBM yazıcıları, bunları çalıştırmak için yetenekli teknisyenlere ihtiyaç duyar. EBM, SLM' den (seçici lazer eritme) çok daha hızlı olabilse de SLM daha pürüzsüz, daha doğru parçalar üretir (Çelik & Özkan 2017).

2.2.3 Seçici lazer eritme (SLM)

Lazer toz yatağı füzyonu (LPBF) veya doğrudan metal lazer eritme (DMLM) olarak da adlandırılan seçici lazer eritme (SLM), metalik tozları yüksek güç yoğunluklu bir lazer aracılığıyla eritmek ve kaynaştırmak için geliştirilmiş bir AM tekniğidir. SLM işleminin prensibi, bir veya birkaç lazer ışını tarafından indüklenen termal enerji ile daha sonra tamamen eriyen çok ince metalik toz katmanları ile uygulanan bir bina platformu ile başlar. Tasarlanan 3 boyutlu parçanın kesit alanı, her katmandaki metalik tozların seçici olarak eritilip yeniden katılaştırılmasıyla oluşturulmuştur. İnşaat platformu daha sonra küçük bir mesafe ile alçaltılır ve yeni bir toz tabakası yeniden kaplayıcı ile kaplanır ve düzleştirilir. Lazer ışını/ışınları, dikkatle tasarlanmış tarayıcı optikleri tarafından bilgisayar tarafından oluşturulan bir model aracılığıyla yönlendirilebilir ve odaklanabilir. Bu nedenle, toz parçacıkları, toz yatağında seçici olarak eritebilir ve CAD tasarımına göre 3 boyutlu nesnelerin şeklini oluşturabilir. Şekil 2.4’ de bu yöntemin uygulanışı şematik olarak gösterilmektedir (Selective Lazer Melting 2020).



Şekil 2.4: Seçici lazer eritme işlemi

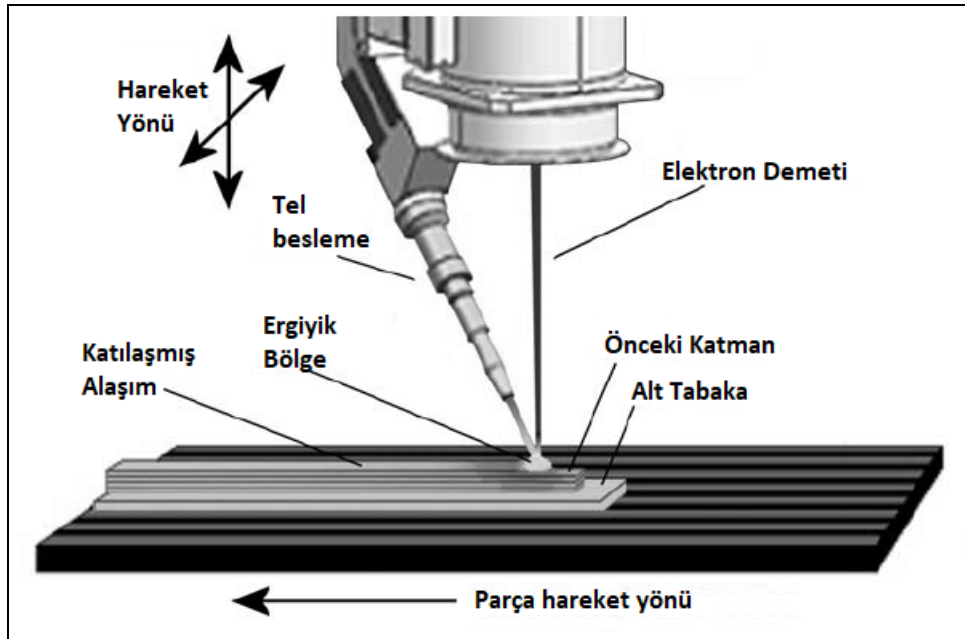
Kaynak: Selective Lazer Melting (2020).

Ticari SLM sistemlerinin çoğu genellikle partikül boyutu 20 ila 50 μm arasında değişen ve tipik katman kalınlığı 20-100 μm olan tozları kullanır. Arttırılmış özellik çözünürlüğü için geleneksel SLM' yi küçültmeye yönelik araştırma ve geliştirme, temel olarak üç faktöre odaklanmıştır: toz partikül boyutu, lazer ışını çapı ve katman

kalınlığı. 20 ila 30 μm arasında değişen lazer nokta boyutu, mikro SLM sistemleri için geliştirilmiştir (Selective Laser Melting 2020).

2.2.4 Elektron ışını ile serbest formlu imalat (EBF)

Elektron ışını ile serbest biçimli imalat, uzayda metal parçalar oluşturmak için NASA tarafından geliştirilen bir eklemeli üretim sürecidir. Bu süreç, bilim adamlarının oldukça maliyetli olabilen malzemeleri uzay mekiğine taşımak yerine gerektiği gibi parçalar oluşturmasına izin vererek NASA'nın zamandan ve paradan tasarruf etmesini sağlayacak olan parçalar ve araçlar oluşturmak için CAD çizimleri ve bir 3D yazıcı kullanarak uyguladığı bir yöntemdir. Elektron ışını serbest biçimli imalat, öncelikle Karen Taminger tarafından geliştirilmiştir (Taminger & Hafley 2004). Elektron ışını serbest biçimli imalat, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi metal bir tabaka üzerinde bir ergiyik havuzu oluşturmak için vakum ortamında odaklanmış bir elektron ışını kullanır. İlk olarak CAD yazılımında bir model oluşturulur ve dosya G koduna çevrilir. G kodu yazıcıya gönderilir. Metal tel, elektron ışını geçtikten sonra katılaşan bir katmanda erimiş bir havuz oluşturarak yazıcıya beslenir. Katman katılaştıktan sonra, işlem tamamlanana ve parça oluşturulana kadar başka bir katman yazdırılacak olup işlem devam eder (Taminger & Hafley 2004).



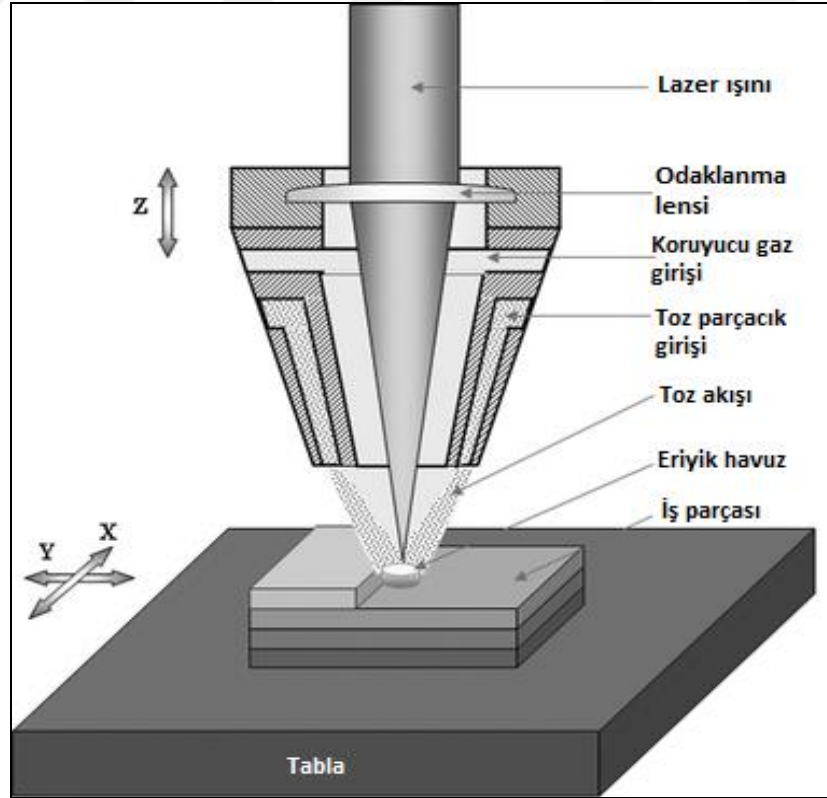
Şekil 2.5: Elektron ışını ile serbest formlu imalat gösterimi

Kaynak: Mladenov ve diğerleri (2016)

Elektron ışını ile serbest biçimli imalat ayrıca havacılık parçalarının imalatında da kullanılabilir. Parçalar bu imalat yöntemini kullanarak oluşturulabilir olup daha az malzeme, daha az elektrik kullanarak ve daha az atık oluşturarak tasarrufu sağlayabilir. Bu teknoloji tarafından oluşturulan ilk parçalar basit olmakla birlikte gelecekte enerji, etkinlik ve dayanıklılığı artıracak daha karmaşık parçaların da üretileceği öngörülmektedir (Mladenov ve diğerleri 2016).

2.2.5 Lazerle tasarlanmış net şekillendirme (LENS)

Bu uygulama lazer ile toz şekillendirme (lazerle tasarlanmış net şekillendirme), metal parçaların doğrudan bilgisayar destekli tasarım (CAD) katı modeli sayesinde Şekil 2.6 da gösterildiği gibi odaklanmış yüksek güçlü bir lazer ışını ile erimiş bir havuza enjekte edilen bir tozu kullanılarak üretim aşamasının gerçekleştirildiği bir eklemeli üretim teknolojisidir. Bu teknik aynı zamanda doğrudan metal biriktirme (DMD) ve lazer konsolidasyon (LC) diye adlandırılan birkaç ticari markalı tekniğe eşdeğerdir. Seçici lazer eritme (SLM) gibi toz yatakları kullanan işlemlerle karşılaştırıldığında, bu teknolojiyle oluşturulan nesnelere, birkaç feet uzunluğa kadar bile önemli ölçüde daha büyük boyutlarda üretim aşaması sunabilmektedir (Chang, 2015).



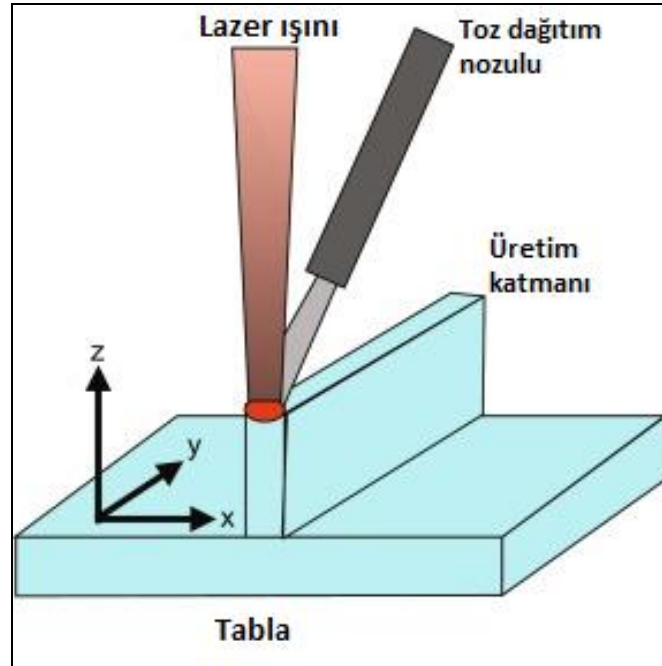
Şekil 2.6: Lazerle tasarlanmış net şekillendirme uygulama gösterimi

Kaynak: Zheng, Zhou & Smugeresky (2008).

Lazer ışınının odağına eş eksenli olarak sağlanan metal tozunu bir biriktirme başlığı aracılığıyla eritmek için yüksek güçlü bir lazer kullanılır. Lazer ışını tipik olarak başın merkezinden geçer ve bir veya daha fazla lens tarafından küçük bir noktaya odaklanır. X-Y tablosu, nesnenin her bir katmanını üretmek için hareket ettirilir. Her katman tamamlandıktan sonra kafa dikey olarak yukarı hareket ettirilir. Metal tozları, kafanın çevresine yerçekimi veya basınçlı bir taşıyıcı gaz kullanılarak dağıtılır. Parça yapı özelliklerinin daha iyi kontrolü için eriyik havuzunu atmosferik oksijenden korumak ve daha iyi yüzey ıslatma sağlayarak tabakadan tabakaya yapışmayı teşvik etmek için genellikle bir örtü gazı kullanılmaktadır. LENS aracılığıyla, uçak parçaları, tıbbi protezler ve enjeksiyonlu kalıplama araçları gibi bakır, alüminyum, paslanmaz çelik, titanyumdan oluşan çok çeşitli tam yoğunluklu metal bileşenler elde etmek mümkündür (Zheng, Zhou & Smugeresky 2008).

2.2.6 Lazerli birleştirme (LC)

Bu yöntem diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre farklı eksenlerde daha rahat hareket kabiliyeti ve iyi yüzey performansı sağlayan eklemeli imalat tekniklerinden biri olarak tanımlanabilir. Şekil 2.7 de gösterildiği üzere erimiş bir havuz oluşturmak için alt tabaka üzerinde odaklanmış bir lazer ışını kullanılırken, havuza aynı anda metalik toz enjekte edilir.

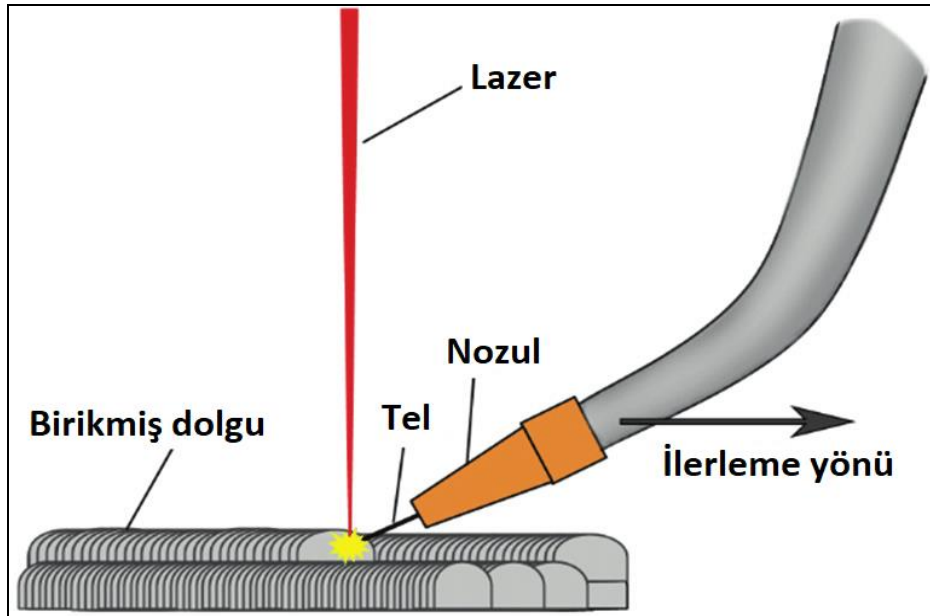


Şekil 2.7: Lazerli birleştirme işleminin şematik gösterimi
Kaynak: Chen, Xue & Wang (2008).

Lazer ışını ve alt tabaka arasındaki bağıl hareketi kontrol etmek için sayısal olarak kontrol edilen 3 ile 5 eksenli bir hareket sistemi kullanılır. Bu eksenlerde yapılan uygulama ile eriyik olan bölgelerde metalik tozun alana iletilmesi ve katman işlevinin oluşturulması durumu ile imalat gerçekleştirilir. Bu işlem tekrarlanarak sağlam ince duvarlı bir yapı oluşturulur. Lazer yolu, lazer ışını hareketini yönlendirmek için uygun şekilde tasarlandığında, herhangi bir kalıp veya kalıp olmadan doğrudan bir CAD modelinden karmaşık şekilli bir parça oluşturulabilir (Chen, Xue & Wang 2008).

2.2.7 Tel lazer eklemeli imalat (WLAM)

Tel lazer eklemeli imalat (WLAM), lazer ışını tarafından oluşturulan bir eriyik havuzuna sürekli olarak bir tel besleyerek 3D bileşenlerin oluşturulduğu bir teknolojidir. Bu süreç, önemli ölçüde azaltılmış malzeme israfı ve teslim süreleri sayesinde, hassas dökümler veya büyük boyutlu dövme parçalardan işlemeyi içeren geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında maliyet ve zaman tasarrufu sağlar. Şekil 2.8'de uygulama şematığında gösterildiği üzere bu imalat yöntemi ile tamamen yoğun bileşenler, yüksek birikme hızında üretilebilir. Lazerlerin yüksek güç yoğunluğu ve esnekliği, net şekil özelliklerine sahip orta ile küçük özellikler oluşturmak için yeterli kontrol olanağı sağlayacak olup daha fazla maliyet tasarrufunun yanı sıra artan tasarım özgürlüğü avantaj da sunmaktadır (Segerstark, 2017).



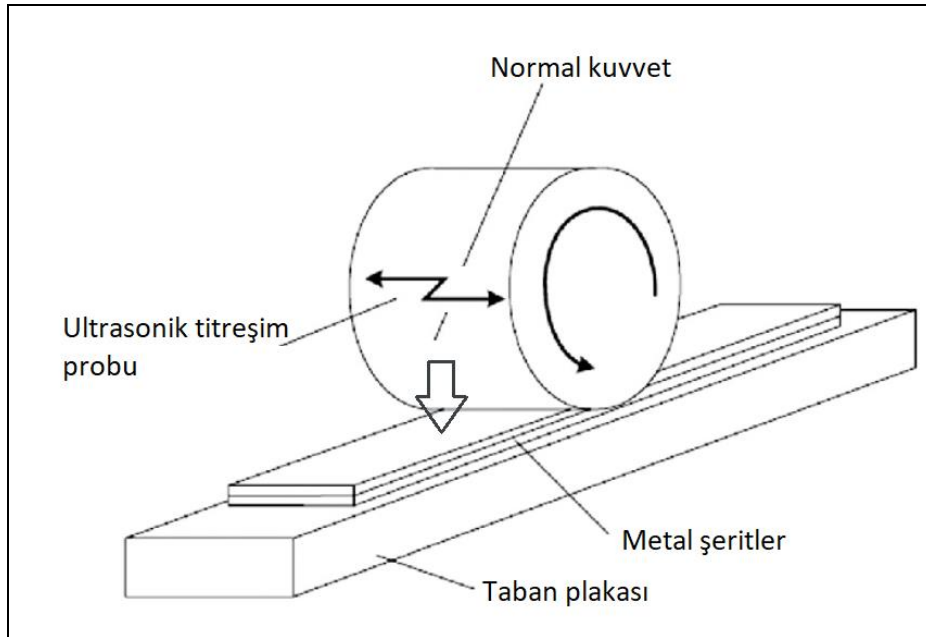
Şekil 2.8: Tel lazer eklemeli imalatın şematik görünümü

Kaynak: Chen, Xue & Wang (2008).

Bu üretim tekniğiyle, önemli ölçüde azaltılmış malzeme israfı ve teslim süreleri sayesinde, hassas dökümler veya büyük boyutlu dövme parçalardan işlemeyi içeren geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında maliyet ve zaman tasarrufu sağlar. Tamamen yoğun bileşenler sınıfındaki malzeme gruplarını yüksek birikme hızında üretilebilme olanağı sunmaktadır (Segerstark, 2017).

2.2.8 Ultrasonik eklemeli imalat (UAM)

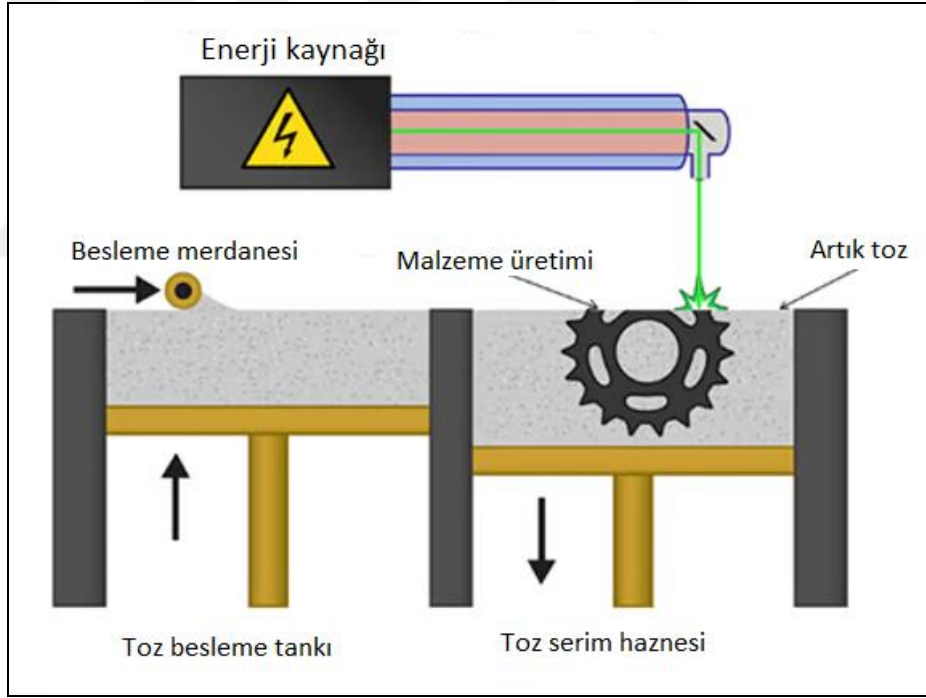
Ultrasonik Eklemeli Üretim (UAM), istenen 3D şekli elde etmek için periyodik CNC işleme ile metal levha formundaki folyoların katı halde üst üste katman şeklinde ultrasonik kaynağını içeren bir üretim sürecidir. UAM, yüksek derecede plastik metal akışı ve katman bağlama işlemi sırasında karşılaşılan nispeten düşük sıcaklıklar nedeniyle çeşitli bileşenlerin metal matrise gömülmesine izin verdiği için metalik yapıların üretilmesini sağlar. Genellikle paslanmaz çelik, bakır, titanyum ve alüminyum levhaların kullanıldığı bu yöntemde üretilecek numune şeklini oluşturmak için yüzeyden CNC işleme ile talaş kaldırma işlemi yapılması gerekmekte olup sarfiyat oranını minimumda tutmak için genellikle 25mm x 0.150mm olacak şekildeki boyutlarda levhalar kullanılır. Şekil 2.9’da gösterilen bu yöntem uygulamasının en büyük avantajı, bu yöntem ile gevrek malzeme yapısı yaratmadan farklı metalleri birleştirmek için güvenilir bir yol sağlayacak olup parçaya hem dayanıklılık hem de hafiflik sağlamak için daha hafif bir metalden yapılmış bir yapı üzerine sert bir metal katman inşa edilebilir (Ni & Ma 2014).



Şekil 2.9: Ultrasonik eklemeli imalatın şematik görünümü
Kaynak: Ni & Ma (2014).

2.2.9 Toz yataklı ve püskürtmeli 3D yazıcı (3DP)

Bu yöntem, malzemeyi üç boyutlu bir nesne oluşturmak üzere eritmek ve kaynaştırmak için lazer, ısı veya elektron ışınının kullanıldığı eklemeli imalat tekniklerinden biridir. Toz yataklı ve püskürtmeli imalat elektron ve lazer ışını kullanılarak toz haldeki malzeme yatağı üzerinde CNC kontrolü ile üç boyutlu üretim sunmakla birlikte bu yöntem birçok çeşitli avantajları bulunmaktadır. Bu yöntemde parçayı katman katman oluşturarak eksiltici üretim teknolojileriyle kıyaslandığında birçok israfı ortadan kaldıracak olup parça üretimi tamamlandıktan sonra fazla fire veren toz toplanır ve geri dönüştürülebilir. Şekil 2.10'da gösterilen toz yataklı ve püskürtmeli imalat şekli birçok yönden düşük maliyetli bir imalat yöntemi olmasına karşı üretim hassasiyetinin düşük olması bu yöntemin dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır (Laser Powder Bed Fusion 2022).



Şekil 2.10: Toz yataklı ve püskürtmeli 3D yazıcının şematik görünümü

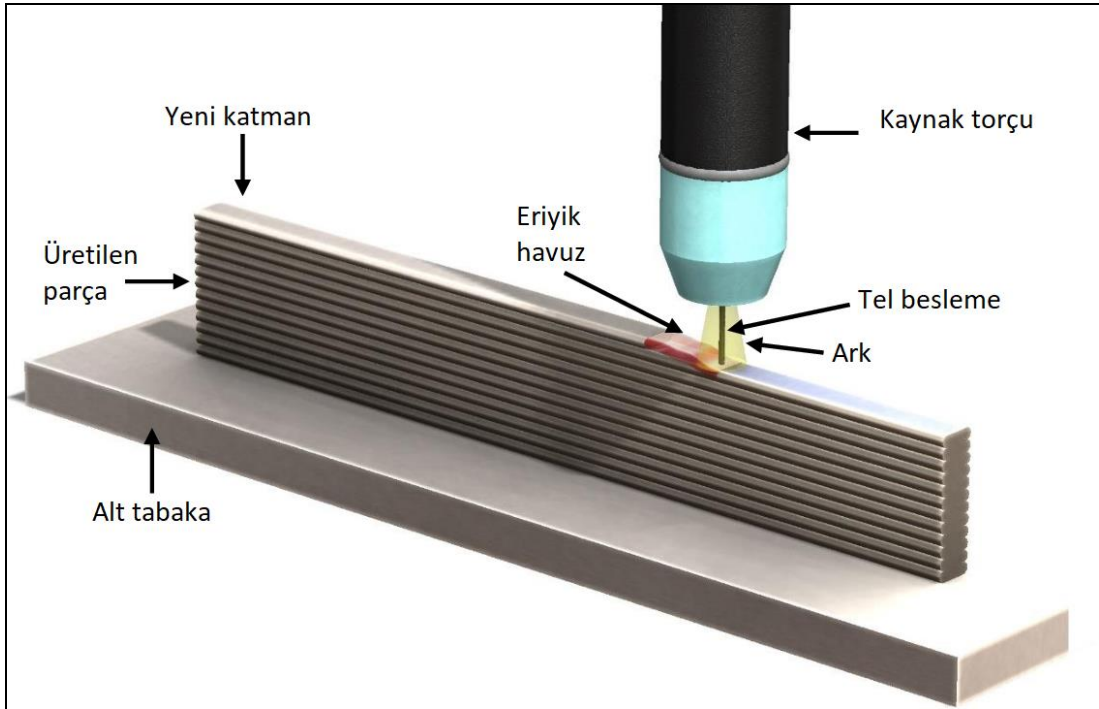
Kaynak: Laser Powder Bed Fusion (2022).

2.2.10 Tel ark eklemeli imalat (WAAM)

WAAM, doğrudan enerji biriktirme teknolojisinin bir varyasyonudur ve metal parçaları 3D yazdırmak için bir ark kaynağı işlemi kullanır. Daha yaygın olan metal toz eklemeli imalat işlemlerinden farklı olarak WAAM, ısı kaynağı olarak bir elektrik arkı kullanarak metal teli eriterek çalışır (Çam, 2022). İşlem robotik bir kol

tarafından kontrol edilir. Bu yöntemde inşa edilecek şekil, bir taban plaka malzemesi üzerine inşa edilecek olup üretim sonrası taban plakadan kolayca kesim işlemi yapılabilmektedir. Tel ark eklemeli imalat, kullanılan sarf malzeme olarak metalik tel ve elektrik enerjisi için kaynaklı uygulamalarda kullanılanlara çok benzeyen bir elektrik arkı uygulanır. Robotik bir kol ile çok eksenli bir döner tabla üzerinde kaynak teli eritilerek katmanlar oluşturulur. Koruma gazı için kaynaklı uygulamalarda gerçekleştirildiği gibi bir soy gaz kullanılır ve oluşacak oksidasyon önlenerek malzemenin metal özelliklerinin korunması sağlanır (Busachi ve diğerleri 2015).

WAAM yönteminde, tel biçiminde olmaları koşuluyla çok çeşitli metallere çalışabilir. Bu liste paslanmaz çelik, nikel bazlı alaşımlar, titanyum alaşımları ve alüminyum alaşımlarını içerir. Kaynak yapılabilen herhangi bir metal de WAAM ile kullanılabilir. Bu yöntem diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre daha düşük hassasiyete ve daha yüksek eriyik dolgu bırakma oranına sahip olup lazer-elektron ışın kaynaklarında 2-10 gram oranlarında dolgu yığıma potansiyeli mevcut iken tel ark eklemeli imalat yöntemi bize 130 gram mertebelerinde yığıma oranları ile bir potansiyel üretim aşaması sunmaktadır. Tel ark eklemeli imalat şekil 2.11’de şematik olarak verilmiştir (Busachi ve diğerleri 2015).



Şekil 2.11: Tel ark eklemeli imalat işleminin şematik gösterimi

Kaynak: Ryan, E.M. (2020).

WAAM, kaynak ve onarım, denizcilikten uzaya, kimya endüstrisine, enerji, otomotiv, yüksek teknoloji, petrol ve doğal gaz endüstrisine kadar çeşitli alanlarda uygulanabilir. WAAM, özellikle malzeme tasarrufu, artan malzeme performansı, azaltılmış tedarik süreleri ve yüksek kaliteli malzemelerin üretimi, iş senaryoları için kilit faktörler olduğunda diğer üretim yöntemlerinden daha iyi performans gösterir. Ark eklemeli imalat yüksek hacimli çıktı, mükemmel ölçeklenebilirlik ve çok iyi mekanik performans sağlar. Özellikle prototipler ve küçük partili üretim çalışmaları için ark eklemeli imalat, diğer eklemeli veya çıkarmalı üretim süreçlerinden daha uygun maliyetli bir çözümdür (Busachi ve diğerleri 2015).

WAAM süreci, 3D modelin birçok katmana bölündüğü yazılım çalıştıran algoritmalar tarafından işlenen bir 3D CAD dosyası ile başlar. Tel ark eklemeli imalat, bir bileşeni katmanlar halinde oluşturmak için ark kaynağı teknolojisini kullanır ve bu, istenen üretim sürecini oluşturmak için bir MIG kaynak torcu kullanılarak bir metal telin doğru yerde eritildiği anlamına gelen işlem aşaması uygulanır. WAAM donanımı olarak halihazırda, kullanıma hazır ve düşük maliyetli kaynak ekipmanı kullanılmaktadır. Cihazların donanımları; robotik sistem, kaynak makinası, torçlar ve tel besleme sistemleri şeklinde sıralanabilir. Üretimin hareket eğilimi, robotik sistemler veya bir düğme tıklamasıyla yolun otomatik olarak oluşturulduğu bilgisayar ortamında sayısal kontrollü portallar tarafından sağlanabilir (Ryan, 2020).

Bugün itibariyle, çeşitli sektörlerde WAAM teknolojisi kullanılarak sayısız bileşen üretilmiş olup bunlar arasında; makineler için çarklar, havacılık endüstrisi için uçak parçaları, otomotiv için araç gövdesi prototipleri hatta Sanat veya günlük yaşantı için bütün bir köprü sayılabilir. Bileşenleri yalnızca eklemeli olarak oluşturmanın yanı sıra, cilalama ve işleme gibi üretim sonrası adımlar hem hızlı üretime hem de çok yüksek hassasiyete sahip hibrit bileşenlerin üretilmesi mümkündür. WAAM teknolojisi ile bileşenlerin tamir işlemleri de mümkündür (Ryan, 2020).

3. LİTERATÜR TARAMASI

3.1 Tel Ark Eklemeli İmalat Üzerinde Çalışmalar

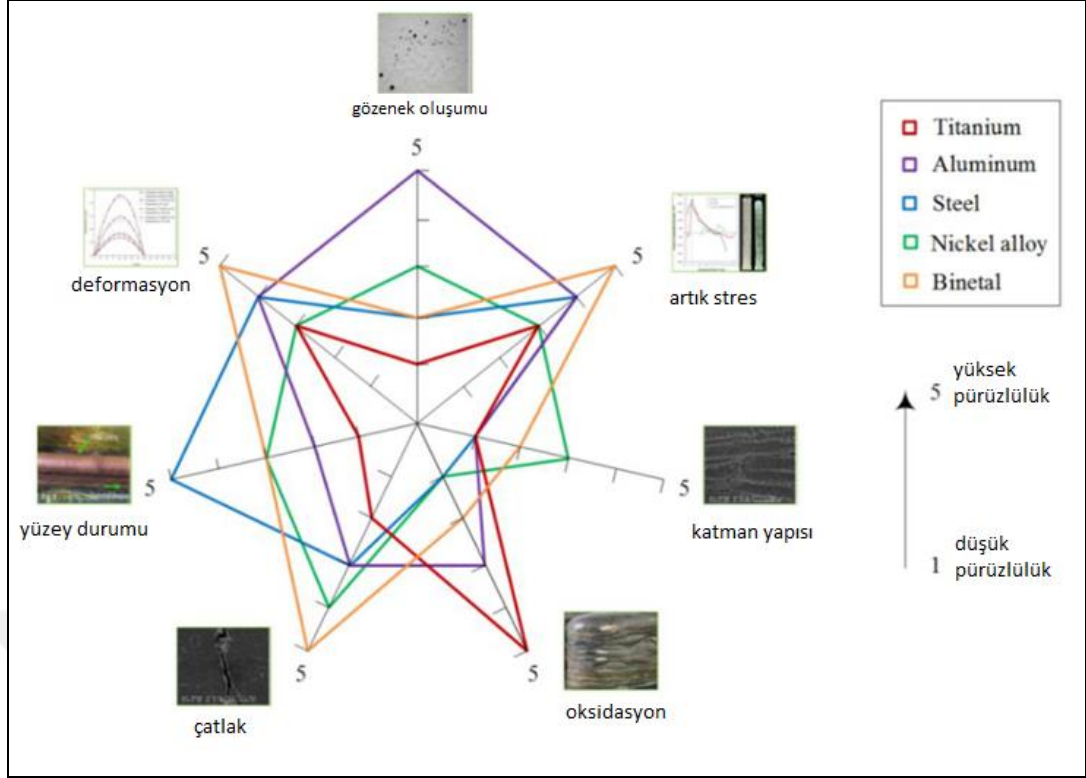
Katmanlı İmalat (AM), yapıların katman katman şekilde malzeme eklenmesi ve biriktirilmesiyle üretilen bir tekniktir. Diğer yandan WAAM (Tel ve Ark Eklemeli İmalat), ilk patenti neredeyse 100 yıl öncesine ait olmasına rağmen son 30 yılda araştırılan bir teknoloji olup herhangi bir parçaya özel alet kullanmadan karmaşık parçalar üretme kabiliyeti nedeniyle imalat endüstrisinde devrim yaratan bir teknolojidir. Son yıllarda tamamen yoğun metal parçalar ve büyük net şekle yakın ürünler üretme kabiliyeti nedeniyle bilim adamları ve üreticiler için ilgi çekici hale gelmiştir. WAAM, çoğunlukla havacılık, otomotiv ve uzay endüstrisi gibi modern endüstrilerde kullanılmaktadır. Bu yöntemde mevcut kaynak ekipmanlarını, enerji kaynağı olarak elektrik arkını ve hammadde olarak kaynak telini kullanır. Bu nedenle, genellikle belirli ekipman ve malzemelere ihtiyaç duyan diğer eklemeli imalat teknolojilerinden daha ucuzdur. İşlem birkaç adımdan oluşmakta olup bunlar; CAD modelinin tasarlanması, katmanlara dilimlenmesi, takım yolu oluşturma, kaynak parametrelerinin seçilmesi, malzeme biriktirme ve son işlemdir (Wu ve diğerleri 2018).

Günümüzde nispeten yüksek biriktirme oranlarına sahip büyük ölçekli metal bileşenlerin ekonomik olarak üretilmesinin fizibilitesi nedeniyle, fabrikasyon bileşenlerin mikro yapısı ve mekanik özelliklerinin yanı sıra Tel Ark Eklemeli İmalat (WAAM) sürecinin anlaşılmasında önemli ilerleme kaydedilmiştir. WAAM geliştikçe, çok çeşitli malzemeler süreç ve uygulamalarıyla ilişkilendirilmeye başlanmıştır. Bu bağlamda WAAM teknikleri ve yaygın olarak kullanılan metalik hammadde malzemeleri hakkında ortaya çıkan araştırmaları gözden geçirmekte ve ayrıca biriktirilen parçaların metalürjik ve malzeme özelliklerine ilişkin kapsamlı bir genel bakış sunmak üzere araştırmalar yapılmıştır. WAAM bileşenlerinde farklı alaşımlar kullanılarak yapılan üretimlerde deformasyon, gözenek oluşumu ve çatlama gibi yaygın kusurlar tespit edilmiştir. Çeşitli alaşımların gereksinimleri göz önünde bulundurularak, eklemeli olarak üretilmiş bileşenlerin üretim kalitesini

iyileştirme yöntemleri üzerinde yapılan çalışmalara göre WAAM'ın geniş uygulamasının hala birçok zorluk içerdiği ve kabul edilebilir bir zaman çerçevesinde operasyonel bir sistem elde etmek için bu uygulama sürecinde farklı malzemeler için belirli yollarla ele alınması gerekebileceği sonucuna varılmaktadır. Kusursuz ve yapısal olarak sağlam birikmiş parçalar üretmek için malzemelerin ve üretim sürecinin entegrasyonun hala iyileştirilmesi konusunda çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Wu ve diğerleri 2018).

Wu, yüksek kaliteli WAAM ürünleri üretmek ve potansiyel hizmet ömürlerini iyileştirmenin hangi etkenlere dayandığını incelemiştir (Wu, 2018). WAAM tekniği ile üretilen bileşenin kalite performansını iyileştirmek için kritik konulara ve metodolojilere odaklanarak çalışmalar yapmıştır. Şekil 3.1 'de yapılan çalışmadaki malzeme ve çıkabilecek kusurlar arasındaki ilişki gösterilmiştir. Dolgu katmanlarındaki termal birikimin etkileri nedeniyle malzemenin mekanik ve kırılma davranış özelliklerinin değiştiğini görmüş olup üretimde ara katmanın yüzey oksidasyonunun, damlacık geometrisinin, mikroyapısal oluşumun, tane boyutunun ve kristal fazın üretim duvarın inşa yönü boyunca değiştiğini tespit etmiştir. İncelemeler sonucunda dolgu katmanları arasında aktif geçişler arası kontrollü soğutma uygulanarak, üretim süreleri en az %80 oranında azaltılmıştır. Ayrıca pasolar arası aktif soğutma sayesinde, hızlı ısı tahliyesi ve buna bağlı olarak azalan ısı birikimi nedeniyle üretilen parçalarda önemli ölçüde deformasyon ve bozunumun azalması hususunda büyük oranda mümkün olduğu sonucuna ulaşmıştır (Wu, 2018).

Sridharan vd., Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda geliştirilen tel bazlı bir eklemeli üretim sistemi kullanılarak düşük alaşımlı karbon manganlı (C-Mn) çelik yapı üretimleri üzerinde incelemelerde bulunmuşlardır. Numuneler x,y ve z yönünde üretilmiş olup detaylı mekanik testler yapıldığında mekanik test sonuçları, çekme sünekliğinde önemli bir dağılım ve Charpy tokluğunda önemli değişkenlikler ile karşılaşmıştır. Numunelerde istenmeyen martenzit yapı oluşumunu mikroyapısal gözlemlere ve yerel ısı transferi koşullarındaki temel değişikliklere dayalı olarak incelenmesi gerçekleştirilmiştir. İnceleme sonucunda parçalar üretilirken tokluk azalmalarına yol açan martenzit yapı oluşumunu önlemek için parametreler ve üretim yolunun soğuma hızının 800 °C'den 500 °C'ye 30 saniyeden büyük olacak şekilde seçilmesi gerektiği sonucuna ulaşmışlardır (Sridharan ve diğerleri 2017).



Şekil 3.1: Tel ark eklemeli imalat sürecinde malzeme ve kusur arasındaki ilişki gösterimi

Kaynak: Wu, B. (2018).

Williams vd., yüksek biriktirme oranlarına sahip olan tel ark eklemeli imalat metodu üzerinde çalışmalar yapmıştır. Yüksek biriktirme oranları, düşük malzeme ve ekipman maliyetleri ve iyi yapısal bütünlükleriyle Tel Ark Eklemeli İmalatını, özellikle düşük ve orta karmaşıklıkta parçalar açısından, kütük yapılarına benzer veya büyük dövmelemlerden mevcut imalat yöntemini değiştirmek için uygun bir aday haline getirdiği üzerinde incelemelerde bulunulmuştur.

Çalışmalarında Şekil 3.2’ de gösterilen Ti6Al4V ve iniş takımı düzenekleri, alüminyum kanat kirişleri, çelik rüzgar tüneli modelleri ve koniler dahil olmak üzere bu işlemle farklı geometrilere ait çeşitli bileşenler başarıyla üretilmiş olup bu tarz malzeme gruplarında üretim aşamasında oluşan artık gerilimin nasıl yönetileceğine, mekanik özelliklerin nasıl iyileştirileceğine ve gözenek oluşumu gibi kusurların nasıl ortadan kaldırılacağına dair stratejiler üzerinde incelemeler yapılmıştır. Sonuç olarak ortaya çıkan numunede kaynaklı üretim sırasında ortaya çıkan yüzeydeki form bozuklukları ve fazla ısı girdilerinden kaynaklanan doğrusal kaçıklıkları giderebilmek için simetrik bir şekilde kaynak paso uygulamasıyla iyileştirilmeler yapılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Aynı zamanda numune işleme

optimizasyonunun ve parametrelerin iyileştirilmesiyle birlikte kalıcı artık gerilmelerin önüne geçilebileceği anlaşılmıştır (Williams ve diğerleri 2016).



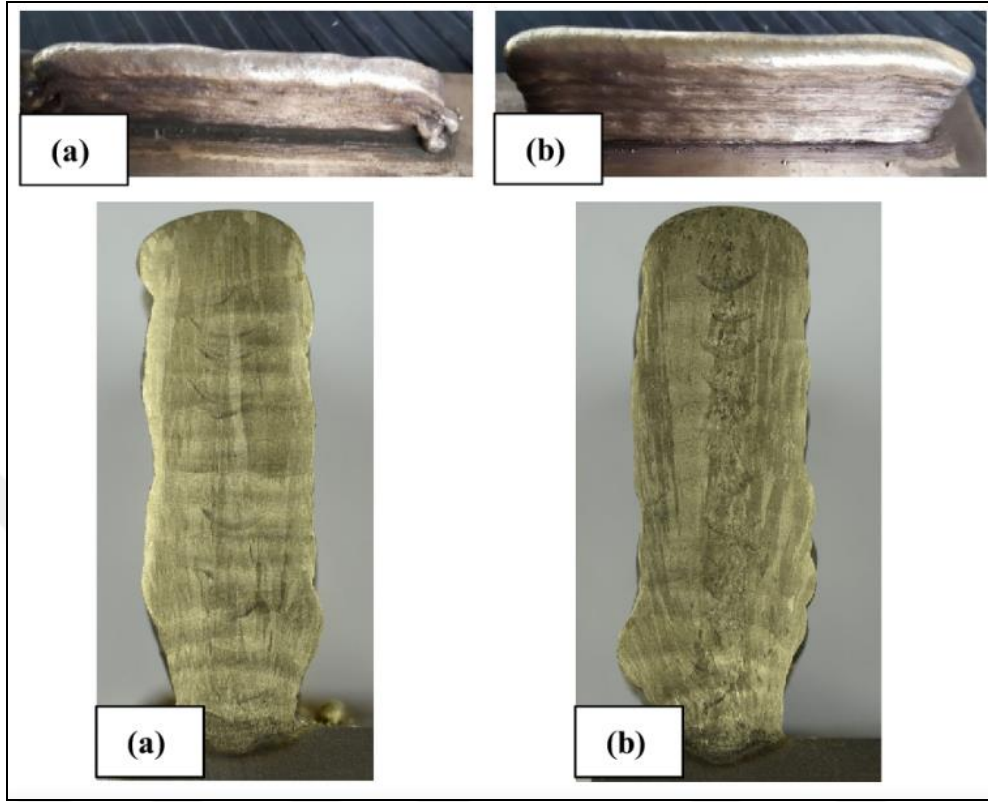
Şekil 3.2: a) Ti-6Al-4V harici iniş takımı tertibatı, b) 2.5mm alüminyum kanat direği uygulaması

Kaynak: Williams ve diğerleri (2016).

Queguineur vd., çalışmasında tel ark katkılı imalat yönteminde östenitik 316L paslanmaz çelik ve bakır-alüminyum alaşımlı malzemelerin mevcudiyeti, denizcilik uygulamalarında sıklıkla kullanılan büyük dökümlerdeki döküm kusurlarını ortadan kaldırmak için incelemelerde bulunmuşlardır. Araştırmalarında, 1,2 mm çapında (CMT) yani tel ve soğuk metal transfer prosesi kaynak makinesi kullanılarak üretilen yapılar, üretim süresi, korozyon ve mekanik kombinasyonlar açısından incelenmiştir. Sonuç olarak, paslanmaz çelik 316L'nin metalürjik altyapısına uygun ve yakın malzemedeki yapılmış kaynaklı plakalara benzer mekanik özellikler sergilediğini rapor etmişlerdir. Yazarlar, çekme testinde numuneyi 369 MPa akma gerilimine sahip olarak ölçmüşler ve test numunesinin haddeleme, dövme ve döküm yöntemleriyle üretilen parçalara yakın sonuçlar gösterdiğini belirtmişlerdir (Williams ve diğerleri 2016).

Yapılan incelemelerde Şekil 3.3 'de görüldüğü üzere Bakır-alüminyum alaşımı test parçası için uygulanan kaynak makinesi darbe modunda kullanıldığında kaynak dikişinin düzensiz hale geldiğini söylemişlerdir. Üretilen parçaların mekanik özelliklerini araştırırken, yazarlar numunelerin akma geriliminin işleme öncesi tel durumuna göre azaldığını, ancak yine de IACS tarafından belirlenen kabul edilebilir aralık çerçevesi içerisinde olduğunu bildirmişlerdir. Yazarlar, bu sonucun aşırı ısıya

maruz kalan parçaların metalürjik ve mekanik yapısındaki değişikliklerden kaynaklanabileceğini bildirmektedirler (Queguineur ve diğerleri 2018).



Şekil 3.3: a) darbeli mod, b) soğuk metal transferi modu ile üretilen parçalar
Kaynak: Queguineur ve diğerleri (2018).

Busachi vd., tel ark eklemeli imalat metodunu araştırmış ve bu uygulama proseslerin günümüzde nasıl daha avantajlı kullanılabilirliği hakkında incelemelerde bulunulmuştur. İlk olarak, yazarlar tel ark eklemeli imalat kullanım aşamasında hammaddenin uygunsuz kullanım durumunu %90'dan %10'a düşürdüğünden bahsetmekte ve kaynak geçişlerinde üretim sırasında kalıcı artık gerilimi düşürmenin en etkili yolunun her kaynak dikiş uygulaması sonrası yüzeyde haddeleme yapmak olduğunu söylemektedir. Ek olarak, parça üretimi aşamasında titreşimin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için titreşimleri sönmüleyen yatak prosesi uygulanması gerektiğini savunmuşlardır. Ayrıca otonom bir sistemde kullanım için merkezi bir sistemden argon gibi bir koruma gazının sağlanmasının hem termal işlem için kullanılabilirliğini hem de uzun vadeli üretimde mevcut gaz silindirlerinin değiştirme süresini ortadan kaldırabileceğini ve bununla yöntemin avantajını öne çıkarabileceğini tavsiye etmişlerdir (Busachi ve diğerleri 2015).

Adeyinka, entegre olan ve olmayan tel ark eklemeli imal edilmiş sistemlerde ince duvar yapılarının imalat ve işleme sürecini incelemiştirler. Otomatik kaynak makine ünitesini, SAM Edgetek taşlama makinesi, bir ABB robotu ve bir sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) makinesi gibi farklı platformlarda proseslere entegre ederek tel ark eklemeli imalatında ekipmanların da duvar yapılarının biriktirilmesinin hususunda bir çalışma yürütmüşlerdir. Yazar çalışmada, entegre bir sistem aracılığıyla tel ark eklemeli imalat duvar parçalarının biriktirilmesi ve işlenmesi hakkında daha iyi bir proses elde ettiği sonucuna varmıştır. Yazar, soğuk metal transfer kabiliyetine sahip bir kaynak makinesi kullanmış ve koruyucu atmosfer gazı olarak argon ve karbondioksitle birlikte numuneler yapmak için hammadde olarak 0,8 ila 1,2 mm çapında G3Si1 çelik tel kullanarak uygun bir parça üretimi gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, CNC taşlama makinelerinin performanslı düzlemsel ilerleme doğruluğu ile numunede daha düzgün geometriler yarattığı sonucuna ulaştığını rapor etmiştir. İnceleme sonucunda tel ark eklemeli imalatın, endüstride tipik olarak mevcut olan çeşitli farklı platformlarda uygulanabilen, sağlam bir şekilde aktarılabilir bir teknik olduğunu ileri sürmüştür (Adeyinka, 2013).

Clark vd., havacılık sanayisinde kullanılan ve üretilecek olan uçak motorlarındaki gaz türbin ekipman bileşenlerinin üretiminde hem daha ekonomik hem de ticari bir süreç amaçlı tel ark eklemeli imalat yöntemi ile üretim denemeleri yapmıştır. İlk olarak, nikel bazlı polikristal süper alaşım Inconel 718'i kullanılarak argon koruyucu gaz altında MIG yöntemi ile üretim aşaması gerçekleştirilmiştir. Nispeten basit olacak şekilde başlangıçta çok geçişli doğrusal kaynak biriktirme havuzu ile birlikte oluşan numunede alt tabakanın ve üst üste bindirilmiş kaynakların mikro yapı ve karakteri incelenmiştir. Yazarlar bu incelemeler sonucunda üretilen parçalarında mikro çatlakların varlığından bahsetmekte olup bunun kalıcı stres ile parçanın çarpılma deformasyonlarından kaynaklandığını söylemektedir. Yazarlar, bu sonuçlardan kaçınmak için soğuma hızının kontrol altına alınması gerektiği ve katmanlar için parametre analizlerinin iyi ayarlanması ihtiyacını ortaya koymaktadır (Clark, Bache & Whittaker 2008).

Ding vd., tel ark eklemeli imalat proseslerinde kaynak işleminin yüksek ısı girişi ile iş parçasında önemli ölçüde kalıntı gerilmeleri, formlar bozulmalara neden olabileceğini ve bundan dolayı yöntemdeki çok katmanlı duvar yapısının termomekanik davranışını incelemektedirler. Bu çalışmada, bir 3D termo-elastik-plastik

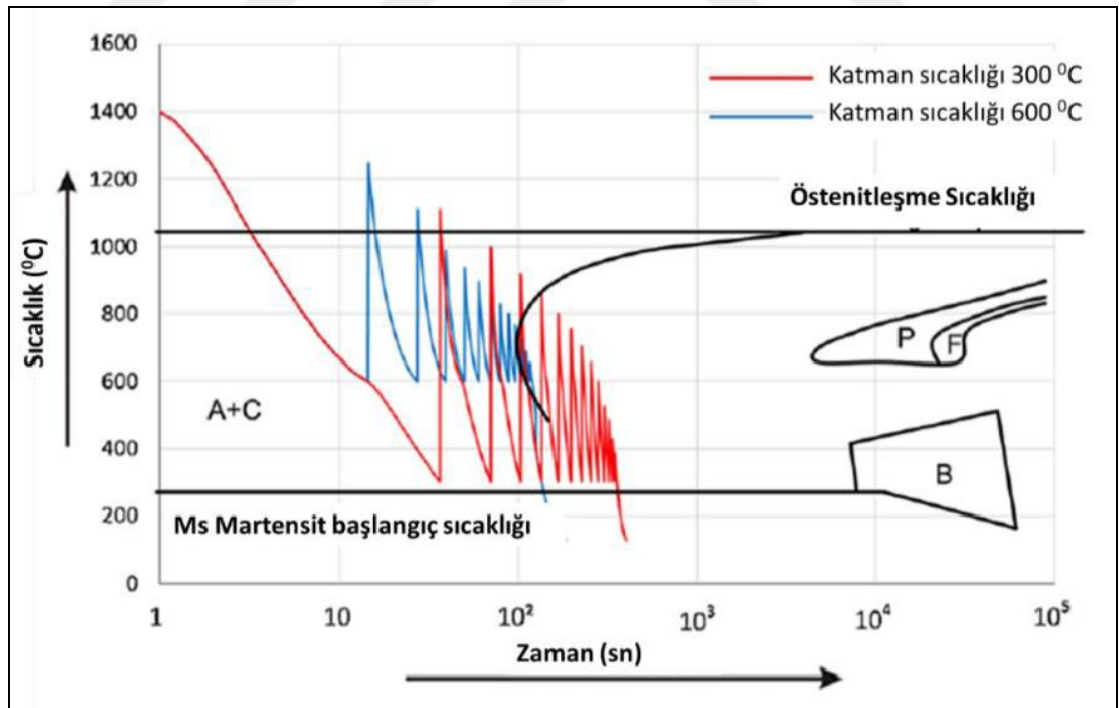
geçici model ve gelişmiş termal ısı transfer modülü izlenmesi analizine dayalı bir model kullanılmıştır. Bu çalışmada sıcaklık simülasyonları ve numunenin faz yapılarındaki bozulma tahminleri, termo-çiftler ve lazer tarayıcılardan elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulama yapılmaya çalışılmıştır. Yazar ve çalışma arkadaşlarına göre numunede oluşacak çarpımları önlemek için kaynaklanacak olan taban plakasının uygulama öncesinde yüzeye sıkıca bağlanarak sıkıştırılmasıyla birlikte çarpımların önüne geçilebileceğinden de bahsedilmiştir (Ding ve diğerleri 2011).

Xiong vd., gaz metal ark kaynağına (GMAW) dayalı eklemeli tekniğini kullanarak, karmaşık büyük boyutlu metalik bileşenlerin üretim aşamasında, fabrikasyon parçaların yan yüzündeki yüzey kalitesinin bozulmasını incelemiştir. Yapılan incelemede eklemeli imalatta biriktirilen çok katmanlı tek geçişli düşük karbonlu çelik parçaların yan yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için yüzey görünümünü görüntülemek amaçlı bir lazer görüş sistemine dayalı bir metodoloji önerilmiş ve buna karşılık gelen bir değerlendirme yöntemi oluşturulmuştur. Yazar ve arkadaşları, katmanlar arası sıcaklık, tel besleme hızı ve hareket hızı gibi ana işlem parametrelerinin ince duvarlı parçaların yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmış ve detaylı olarak tartışılmıştır. Sonuçlara dayalı olarak, proses parametrelerinin değişkenliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi görülmüştür. Diğer parametreler sabitken, tabakalar arası sıcaklığın azalması ince duvarlı parçaların yüzey kalitesinin artmasına neden olduğunu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, tel besleme hızının hareket hızına oranı sabit tutularak, artan tel besleme hızı ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Yazar ve arkadaşları inceleme sonucunda, daha düşük bir hareket hızıyla eşleşen daha düşük bir tel besleme hızı ile oluşan numunenin yüzey pürüzlülüğünün azaltılabildiği tespiti yapılmıştır (Xiong ve diğerleri 2018).

Rodrigues vd., tel ark eklemeli imalat uygulamalarında, mikro yapıyı, mekanik özellikleri ve bitmiş parçalarda kusur oluşumunu kontrol etmek için süreç geliştirmelerini ve oluşabilecek farklı varyantları incelemiştir. Bu incelemeler sırasında artık gerilimleri en aza indirmek için benimsenen ana biriktirme stratejileri ve parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmek için işlem sonrası oluşan ısıl etkenin numuneye etkisi incelenmiştir. Yazar ve arkadaşları, numunede oluşan ısıl etken ve artık gerilimleri en aza indirmek için yığılma sırasındaki dikiş geometrilerinin

davranışını inceleyerek karmaşık parçalar için uygun bir istifleme stratejisi belirlenmesiyle birlikte uygun bir numune üretimini yapılabileceği sonucuna varılmıştır (Rodrigues ve diğerleri 2019).

Ali ve arkadaşları, bir soğuk metal transfer (CMT) prosesi olan enerjisi azaltılmış gaz metal ark kaynağı (GMAW) prosesi ile sıcak iş çeliğinin eklemeli imalatı üzerine incelemeler yapmışlardır. Bu araştırmada, ark enerjisinin ve termal alanın malzemenin mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Ayrıca ısı girdilerinin değişkenliği ve pasolar arası oluşan ısının malzemenin mekanik ve makro yapı özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İncelemeler, plastik kalıpların, sıcak ekstrüzyon kalıplarının ve dövme kalıplarının imalatında kullanılan sıcak iş takım çeliği olan X37CrMoV ile gerçekleştirilmiş olup bu takım çeliklerinde Şekil 3.4’ de görülen sürekli soğuma diyagramlarında görüleceği üzere katman sıcaklığının 600 °C den 300°C’ ye kadar düşürülmesi durumunda numunenin sertlik analiz sonuçlarının azaldığı aynı zamanda da bu durumun temperleme zamanının artmasından kaynaklı olduğu belirtilmiştir (Ali ve diğerleri 2019).

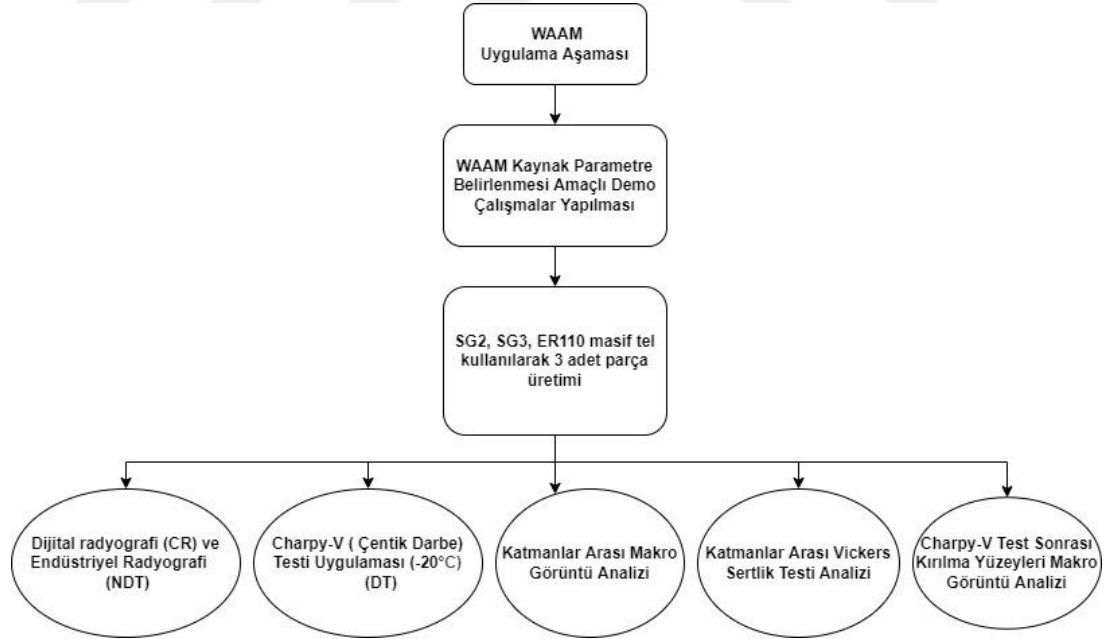


Şekil 3.4: Farklı katman ve sıcaklıklardaki profillerin sürekli soğuma diyagram gösterimi

Kaynak: Ali ve diğerleri (2019).

4. YÖNTEM VE METERYAL

Bu tez çalışması ile diğer eklemeli imalat yöntemlerine nazaran tel ark eklemeli imalat ile numune üretirken sarf edilen süreyi minimuma indirerek oluşturulan numunenin mekanik özelliklerini incelemek amacıyla endüstriyel sektörde en çok uygulaması yapılan düşük alaşımlı metalik malzemenin tel ark eklemeli imalat yöntemi kullanılmıştır. Farklı teller ile üretilen ürünlerin yüklere karşı toklukları incelenmiştir. Ayrıca ürünlerin çentik darbe dayanımlarının araştırılması, katmanlar arası ısı geçişlerinin sertliğe etkisi incelenmiştir. Üretim esnasında oluşabilecek malzeme içapısındaki süreksizlikleri NDT (tahribatsız muayene testi) yöntemlerinden Radyografi ve Dijital Radyografi (CR) yöntemleri ile incelenmesi hususunda deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışma boyunca gerçekleştirilen deneysel uygulamalar Şekil 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1: Yapılan çalışmanın deneysel ilerleyişinin şematik gösterimi

4.1 Altlık Malzemesi ve Tel Seçimi

Bu çalışmada özellikle GeKa marka AWS A5.18 ve AWS A5.28 standartlarına uygun 1,2 mm çapında ticari isimleri SG2, SG3 ve ER110 olan düşük alaşımlı C-Mn kaynak telleri kullanılmıştır. Uygulamada kullanılan tellerin kimyasal bileşimleri SG2, SG3 ve ER110 teli için Çizelge 4.1’de gösterilmiş olup Çizelge 4.2 ‘de kullanılan tellerin mekanik değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1: SG 2, SG3 ve ER110 Kaynak telinin kimyasal bileşimi (% , ag.)

	C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	Cu
SG2	0,07	0,85	1,46	0,001	0,015	0,022	0,023
SG3	0,08	0,92	1,72	0,001	0,039	0,02	0,054
ER110	0,1	0,54	1,75	0,254	1,455	0,265	0,053

Çizelge 4.2: SG 2, SG3 ve ER110 Kaynak teli mekanik değerler

	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Çentik Dayanımı (ISO-V/-30°C)	Uzama (L ₀ =5d ₀) (%)
SG2	Min. 420	500 - 640	Min. 47 J	Min. 22
SG3	Min. 460	540 - 680	Min. 47 J	Min. 22
ER110	Min. 690	Min. 760	Min. 47 J	Min. 19

Uygulama aşamasında her üç tel için de koruyucu gaz olarak Ar + %18 CO₂ içerikli M21 gazı kullanılmış olup bu koruyucu gazın kimyasal bileşimi Çizelge 4.3 ‘de verilmiştir.

Çizelge 4.3: Koruyucu karışım gazı kimyasal bileşimleri

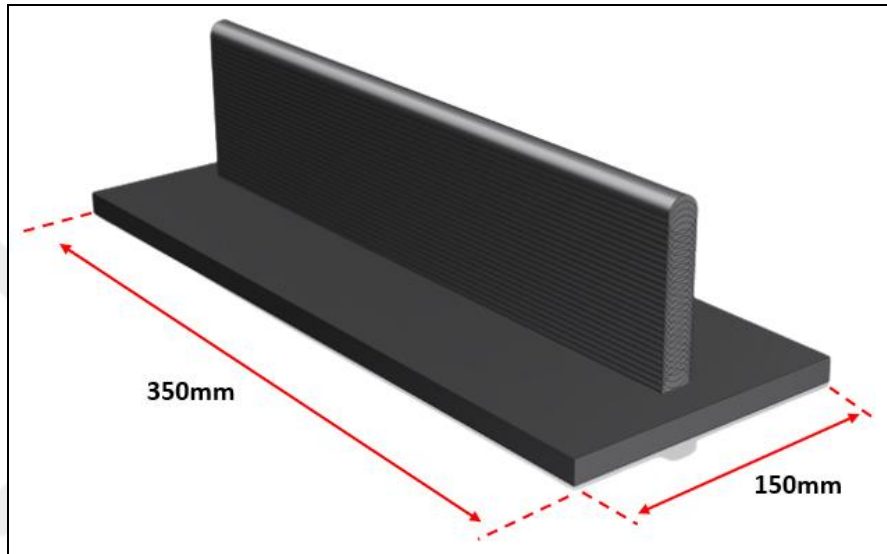
	Hacim (%)	CAS Numarası	CLP Sınıflandırma
Argon	Max. %82	7440-37-1	H280
Karbondioksit	Max %18	124-38-9	H280

Altlık malzemesi olarak da TS EN 10025-2 standardına göre haddelenmiş 12 mm kalınlığında S355 alaşımsız yapı çeliği kullanılmış olup Çizelge 4.4’ de kullanılan altlık parçanın kimyasal analizleri verilmiştir.

Çizelge 4.4: Altlık malzemesi kimyasal kompozisyonu

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	N (%)	Cu (%)
	Max	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.
S355	0,22	0,55	1,6	0,035	0,035	0,012	0,55

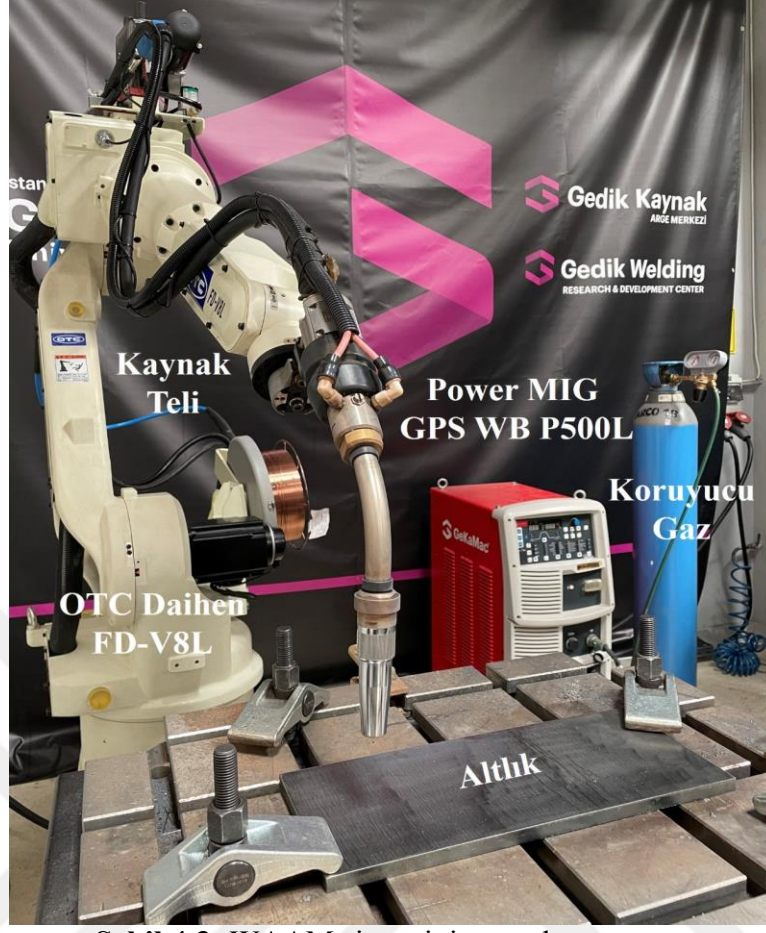
Tel ark eklemeli imalat yöntemi ile parça üretim aşamasında altlık malzemesi olarak kullanılan 12mm et kalınlığındaki S355 çelik plakanın boyutsal ölçüleri ve üretilen parçaların 3D ön izleme görünümü Şekil 4.2’ de verilmiştir.



Şekil 4.2: Tabanlık plakasının şematik boyutsal ölçü gösterimi

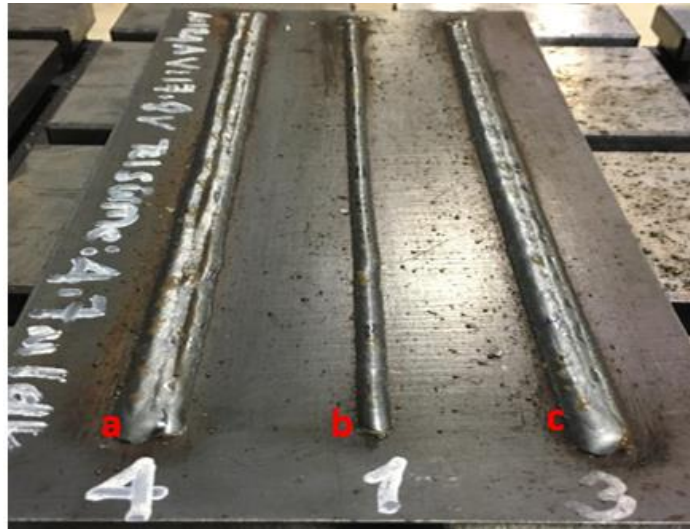
4.2 Tel Ark Eklemeli İmalat Yöntemi ile Parça Üretimi

Üretim aşaması için kullanılan Şekil 4.3’de gösterilen 6 eksenli OTC Daihen FD-V8L modelinde robotik sistem ve bu robotik kaynak sisteminin çalışmasını verimli kılan GeKa-Tec WB 500L model kaynak makinesi ile GEKA marka SG2, SG3 ve ER110 model teller ile 3 adet 320mm x 60mm ebatlarında ürünler üretilerek elde edilen parçaların iç yapı ve mekanik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.



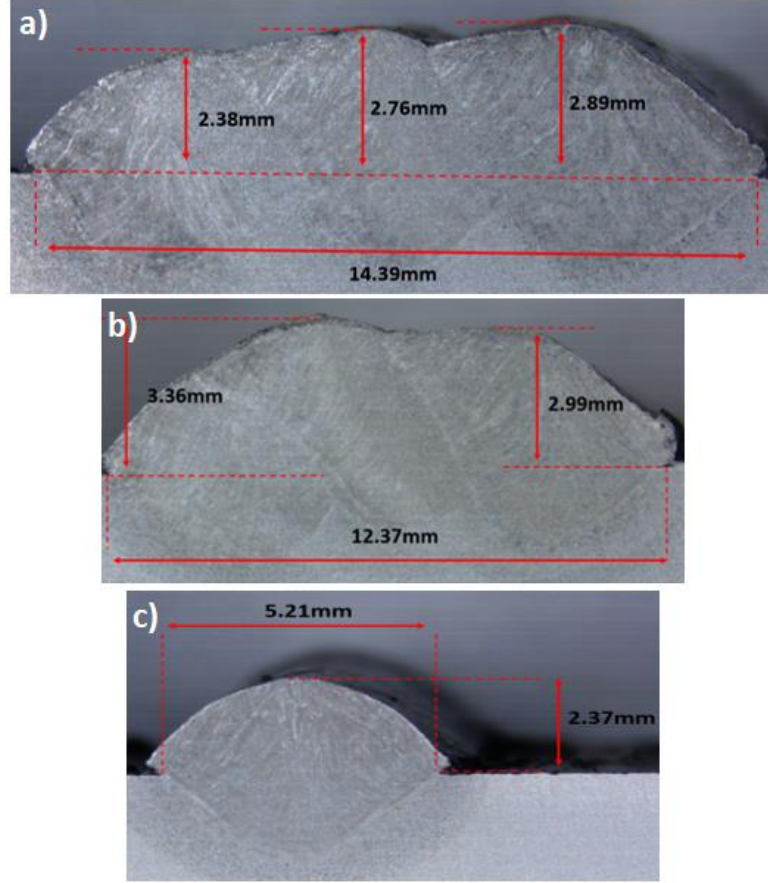
Şekil 4.3: WAAM sisteminin genel görünümü
Kaynak: Gürol ve diğerleri (2022)

Kaynak öncesi parametrelerin belirlenmesi amaçlı Şekil 4.4 'de görüldüğü üzere 1x, 3x ve 4x bindirme yapılarak demo kaynaklar oluşturulmuş olup kaynak uygulaması aşamasın da kullanılacak parametreler için bu demo kaynaklarda makro analizler yapılmıştır.



Şekil 4.4: Üretim öncesi makro inceleme için demo pasolar; a) 4x, b) 1x, c) 3x

Bu uygulamada kaynak sonrası mekanik test şartlarını karşılayacak boyut ve ebatlara ulaşabilmemiz için 4x bindirme, 1x bindirme ve 3x paso bindirme kaynak formları incelenmiş olup Şekil 4.5 'de görüldüğü üzere makro görüntü analizleri yapılmıştır.



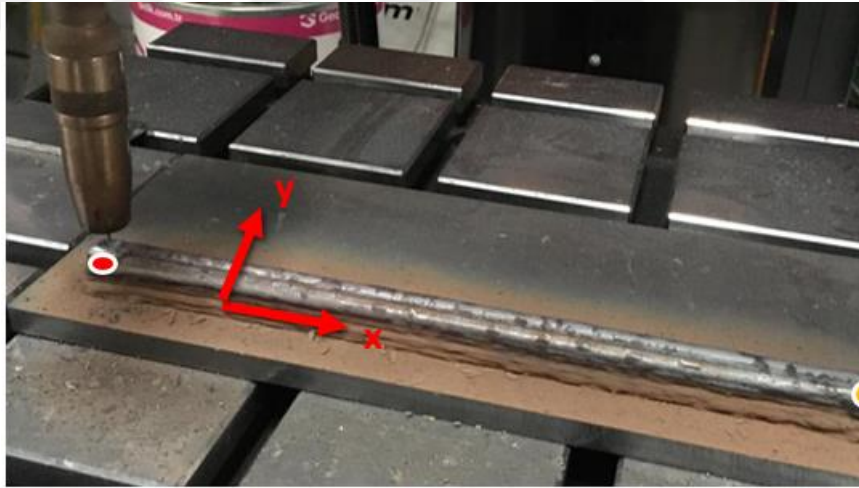
Şekil 4.5: Bindirme kaynak paso makro görüntüsü; a) 4x, b) 3x, c) 1x

Yapılan inceleme sonucunda mekanik test şartlarını karşılayacak kaynak dikiş boyutlarını elde edebilmek ve uygun kaynak parametrelerini karşılayabilmek için 3x bindirme paso tercih edilmiş olup uygun olan bu 3x bindirme dikişli kaynak uygulama prosesi için numune üretimindeki uygulamada kullanılacak parametreler Çizelge 4.5 'de yer verilmiştir. Tabloda görülen parametreler SG2, SG3 ve ER110 telleri için sabit bir şekilde uygulanmıştır.

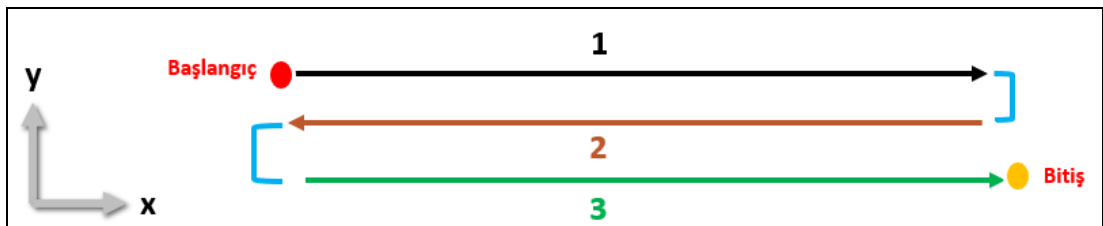
Çizelge 4.5: Numune imalatında kullanılan kaynak parametreleri

Parametreler	Ölçümler
Akım	184 A
Voltaj	17.8 V
Tel Sürme Hızı	4.7 m/dk
Serbest Tel Boyu	10-12 mm
Ark Boyu	0
Damlacık Formu (Endüktans)	0
Torç açısı	90°
Kullanılan Tel Çapı	1.2 mm
Torç öteleme değeri (x ekseni)	3.5 mm
Torç öteleme değeri (z ekseni)	2 mm
Kaynak uygulama uzunluğu (tek paso)	320mm
Torç Hızı	8.5 mm/sn

Kaynak uygulama aşamasında Şekil 4.6 'da görüldüğü üzere kaynak dikişinde tek katmanda dolgu dikişi için yığma yolu gösterilmiş olup Şekil 4.7 'de gösterilen başlangıç noktasından kaynağa başlanarak bitiş noktasına doğru bir süreç tek bir katmanı oluşturmak için gerçekleştirilmiştir.

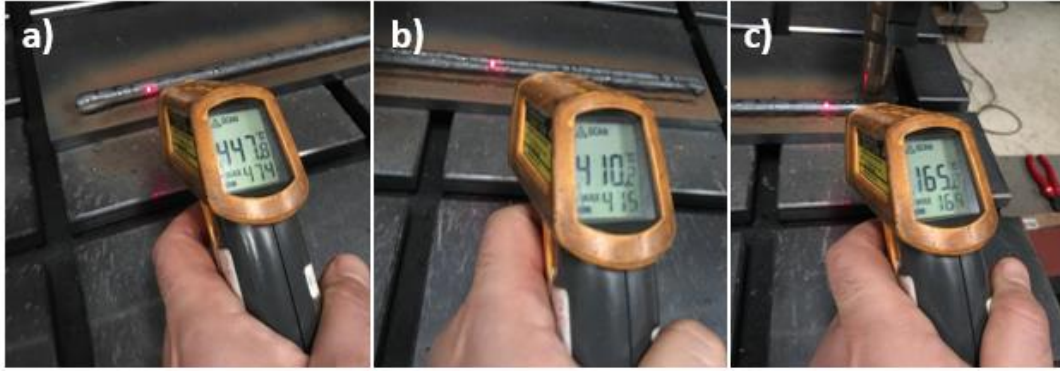


Şekil 4.6: Kaynak uygulamasındaki paso ilerlemesinin gösterimi



Şekil 4.7: Tek katmanda kaynak pasosunun ilerleme yolu

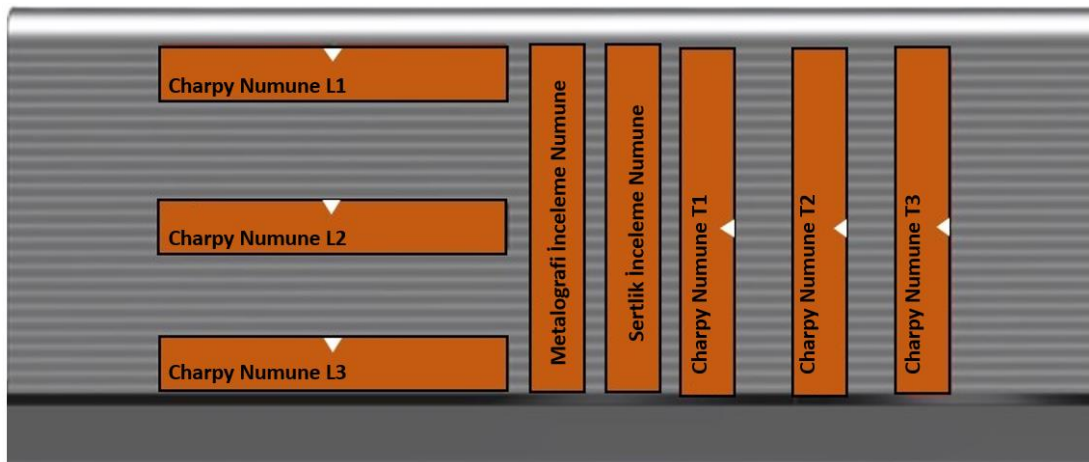
Başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar yapılan tek katmanı tamamlanmış paso kaynağının sonunda toplam kaynak dikiş formunun Şekil 4.8’ de görüldüğü üzere orta ve kenarlardan üç ölçüm yapılarak kaynak sonunda ortalama kaynak dikişinin 160°C ‘ye kadar soğuması beklenmiştir. Daha sonra bitiş noktasından tekrar kaynak uygulamasına başlanarak başlangıç noktasına geri dönülerek 2. katman da tamamlanmıştır.



Şekil 4.8: Kaynak sırasında lokasyon ölçümleri; a) bitiş, b) orta, c) soğuma sonrası ortalama ölçüm

4.3 Deneyler ve Numune Hazırlığı

Üretimi tamamlanan parçalar ilk olarak tahribatsız muayene yöntemlerine tabi tutulmuş olup akabinde metalografik ve tahribatlı muayene testleri uygulanmıştır. Parçalara uygulanan kesim ve numune çıkartma planı Şekil 4.9 ‘da verilmiş olup parçadan 3 adet yatay (yığıma yönüne paralel), 3 adet dikey (yığıma yönüne dik), 1 adet sertlik ve 1 adet de metalografi numunesi çıkartılmıştır.

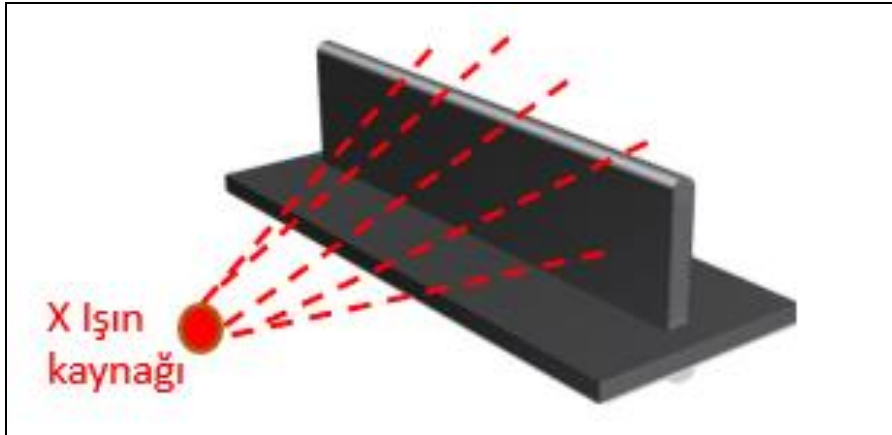


Şekil 4. 9: Test aşaması için çıkarılacak numune konum gösterimi

4.3.1 Tahribatsız muayene işlemleri

Tel ark eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçalarda tahribatsız muayene teknikleri ile incelemeler yapılmış olup üretim sonrası TS EN ISO 17637 standartına uygun biçimde parçaların görsel muayenesi yapılmış olup kaynak dikiş formu çıplak gözle ve optik cihazlar yardımıyla boyutsal değişkenlikler ölçülendirilerek incelenmiştir. Üretim sonrası parçada oluşabilecek form bozuklukları, kusurlu biçim ve süreksizlikleri belirlemeye yönelik TS EN ISO 6520-1 ve TS EN ISO 5817 standartına uygun şekilde parçada görsel muayene değerlendirmeleri yapılmıştır. Ardından üretim sonucunda elde edilen parça iç yapısında oluşabilecek hacimsel kusurları analiz etmek için TS EN ISO 17636-1 standartına uygun bir şekilde Radyografi muayene tekniklerinden dijital X-Ray ve gamagrafi çekimleri yapılmıştır.

Radyografik muayene yöntemi hemen hemen tüm malzeme türlerinde iç yapıdaki süreksizlikleri tespit etmek için kullanılan bir yöntem olup temel prensip, radyasyon kaynağından gelen ışınların malzemeye yönlendirilmesi, bu ışınların malzeme içinden geçmesi ve malzemenin arkasına yerleştirilen radyografik film üzerindeki etkisine dayanmaktadır. Bu deneyde malzemedен geçen ışınların soğurulma farklılıkları ile malzemedeki süreksizlikler (çatlaklar, cüruf, gözenekler vb.) nedeniyle, radyografik film üzerinde farklı etkilenen alanlar oluşturulmuş ve bu etkilenen alanlar filmde renk ton farklılıkları ortaya çıkararak oluşabilecek süreksizlikleri çıplak gözle görülebilir hale getirecektir. Deneyde ulaşılan radyografi film görüntüleri TS EN ISO 6520-1 standartına uygun kusur yapıları ile karşılaştırılarak değerlendirmeye alınmıştır. Şekil 4.10 'da radyografi çekim pozisyon parametrelerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.10: Numunede x-ışın çekim yönünün şematik gösterimi

Bu deneyde endüstriyel radyografi için X-Ray ışın grafiği çekimi yapılmış olup dijital radyografi içinde gama ışını kullanılarak çekim deneyi tamamlanmıştır. Şekil 4.11 'de üretilen numunelerin endüstriyel X-Ray ışın ve gama ışın grafiği çekim görüntülerine yer verilmiştir.



Şekil 4.11: Üretilen parça için gama çekim pozisyon parametrelerinin ayarlanması

4.3.2 Tahribatlı muayene yöntemleri

Üretim sonucunda elde edilen parçalara TS EN 10045-1 standartına göre Charpy-V (çentikli darbey) deneyi, metalografik numuneler hazırlanarak makro-mikro yapı incelemeleri ve TS EN ISO 6507-1 standartına göre de Vickers sertlik testi uygulanmıştır.

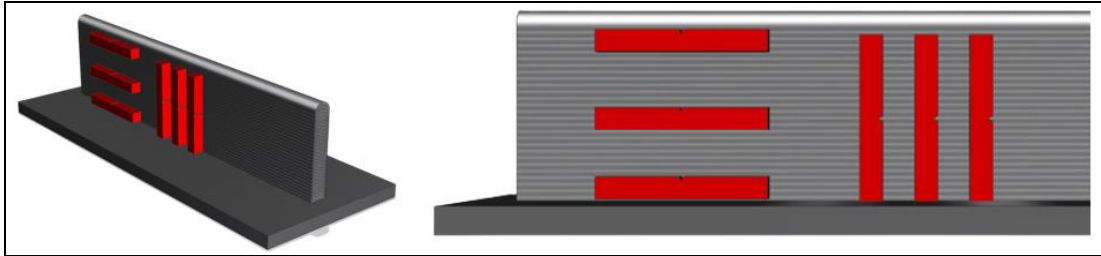
4.3.2.1 Çentikli darbe (Charpy) tokluğu deneyi

Bu test uygulamasında numunenin ortasındaki bir sarkacın desteğe çekiçle vurulması ve çok eksenli gerilme altında numuneyi kırmak için harcanan enerjinin belirlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Çentikli darbe deneyinde, numunenin tam ortasına çentik açılmış olup numune yatay olarak deney cihazına yerleştirilmiştir. Deney cihazının kırma çekici numunenin çentik hizasının arkasından numuneye vurmakta ve numune kırılmasıyla birlikte kırılma enerjisi ölçülmektedir. Charpy test numunesinin boyu 55 mm ve 10 mm kare kesite sahip olup bu deneyde Şekil 4.12 'de görülen Zwickroell marka HIT300P model deney cihazı kullanılmıştır.

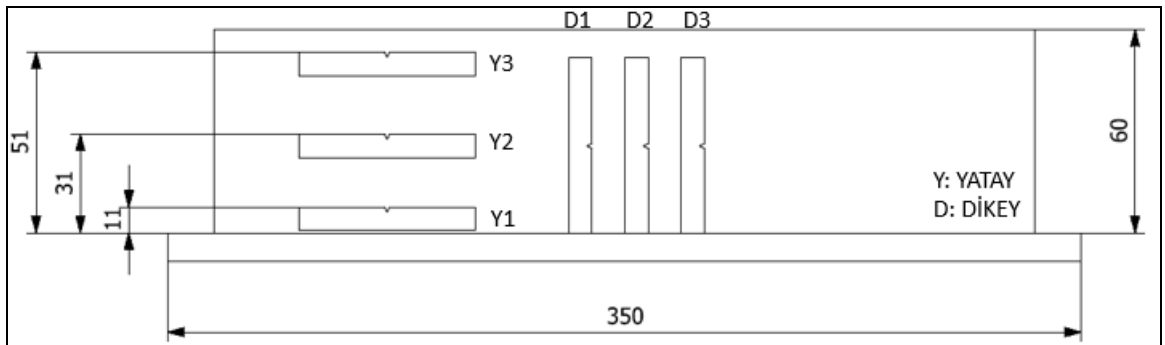


Şekil 4.12: Charby çentik darbe deney cihazı

Bu test yöntemi için aşağıdaki şekilde gösterilen lokasyonlar da kesim işlemiyle numuneler hazırlanmıştır. Numune hazırlama işlemi SG2, SG3 ve ER110 telleri ile üretilen parçalarda yatay ve dikey formlarda çıkarılmıştır. Şekil 4.13 'de katı modelleme gösterimi olup charpy deneyi için çıkarılacak numune boyut ve konumları Şekil 4.14 'de gösterilmiştir.

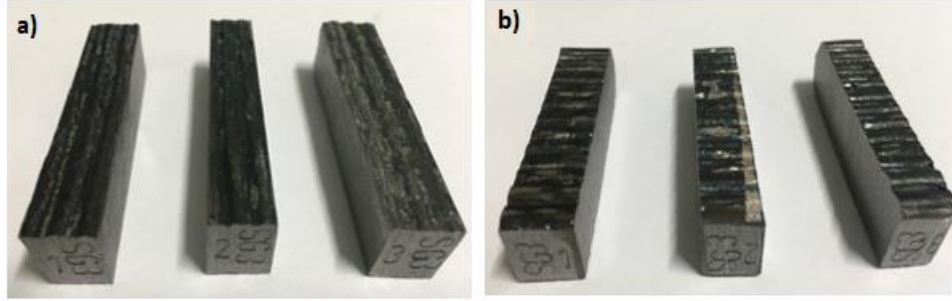


Şekil 4.13: Katı modellemede numune için 3D ve yan kesit gösterimi

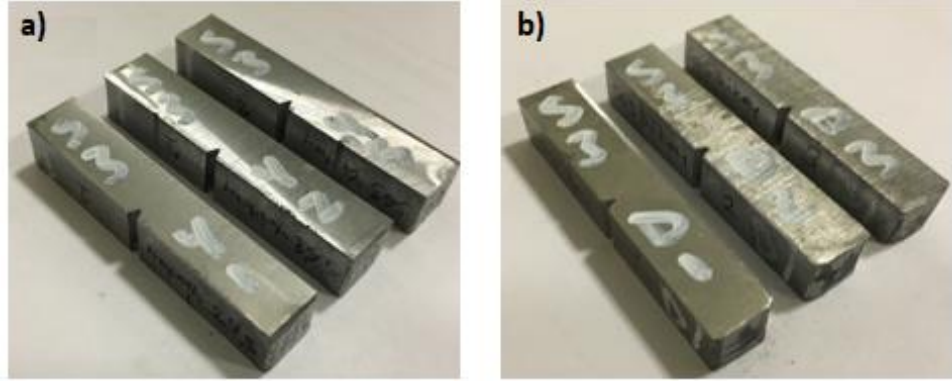


Şekil 4.14: Çıkarılacak numunenin lokasyon ölçümleri

Üretimde elde edilen malzemelerden Charpy-V testi için çıkarılan örnek numuneler Şekil 4.15 'de gösterilmiş olup Şekil 4.16 'de bu numunelerin işlenmesi sonrasında test öncesi son hali gösterilmiştir.



Şekil 4.15: Numunede kesim sonrası görüntüler; a) yatay, b) dikey



Şekil 4.16: Numunede işleme sonrası görüntüler; a) yatay, b) dikey

Her üretilen parçadan 3 yatay, 3 dikey numune olacak şekilde toplamda 3 parçadan 18 adet kırılma numunesi çıkartılmıştır. Bu deneyde rezistanslı düşük sıcaklık kabini içerisindeki etil alkol yardımı ile soğutma uygulaması yapılmıştır. Soğutma işlemi ile -20°C sıcaklığa düşürülmüş numunelerde Charpy-V testleri yapılarak numunelerin metalürjik özelliklerdeki farklılıklarına göre tokluk değerleri belirlenmiştir. Şekil 4.17 'de Charpy-V testi sonrası numunelerin kırılma görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 4.17: Çentikli darbe deney sonrası gösterimi

4.3.2.2 Metalografik inceleme

Bu yöntemde, üretilen parçadan çıkarılmış numunelerde yüzey pürüzlülüğü giderilmiş ve ardından dağlanma işlemi yapılarak yüzey, çıplak gözle veya minimum büyütme ile incelenmiştir. Büyütme aşamasında; büyüteç, stereo mikroskop vb. ekipmanlar kullanılmıştır. Alınan görüntülerde; Boşluklar, kalıntılar, incelenen bölgedeki çatlaklar, kaynaklı birleştirmede ısıdan etkilenmiş bölge, kaynaklı malzemenin birleştirme şekli, kaynaklı birleştirmelerde ergime ve nüfuziyet azlığı gibi bulguların olup olmadığı belirlenmiştir. Bu çalışmada Şekil 4.18 'de gösterilen 7.5:1 büyütme oranı özelliğine ve 115 mm uzun çalışma mesafesine sahip olan Nikon SMZ745T model mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 4.18: Uygulamada kullanılan optik mikroskop

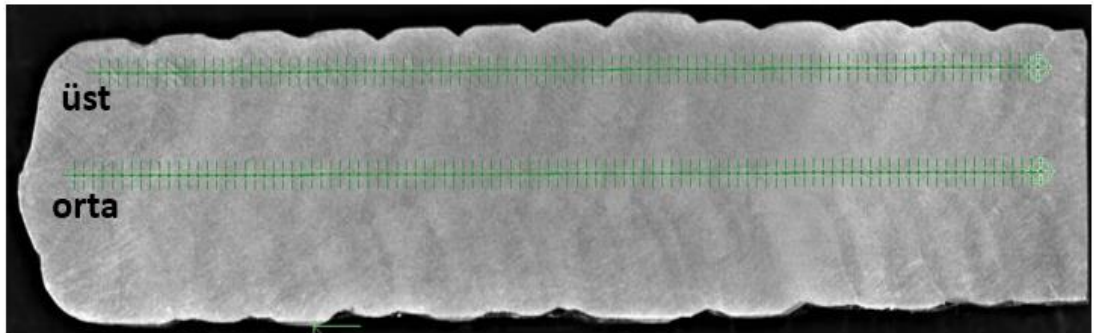
4.3.2.3 Vickers sertlik deneyi

Bu deneyde üretilen parçadan çıkarılan numune yüzeyine kare tabanlı piramit şeklinde bir ucun belirli bir yük altında daldırılması ve yük kaldırıldıktan sonra oluşan izin köşegeninin ölçülmesi gerçekleştirilmiştir. Deneyde tepe açısı 135° olan kristal pramit bir uç kullanılmıştır. Bu deney Şekil 4.19 'da gösterilen Emcotest-DuraScan model test cihazı ile gerçekleştirilmiş olup 0,25gr – 62,5kg yük çalışma aralığındaki bu cihaz aynı zamanda ekran monitörü üzerinden kontrol, 6 turetli ölçüm yapabilen, düz tabya üzerinde kamera yardımı ile kontrol mekanizasyonu sağlama gibi özellikleri kullanılarak deney işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 4.19: Vickers sertlik test cihazı

Vickers sertlik testi öncesi Şekil 4.20 'de görüldüğü üzere kaynak dikiş orta ve üst katmanlarda konumlandırma güzergahı belirlenmiştir. Üst ve orta sertlik ölçüm güzergahlarında ortalama 100 noktadan ölçümler alınmıştır. 0.5 mm öteleme aralıklarıyla alınan bu ölçümler HV5 yani 5 kg'lık yük altında alınmıştır. Buna bağlı olarak yan pasolardaki yığılma ile orta eksendeki pasolar arasındaki ısıl farklılığın sertliğe etkisi incelenmiştir.



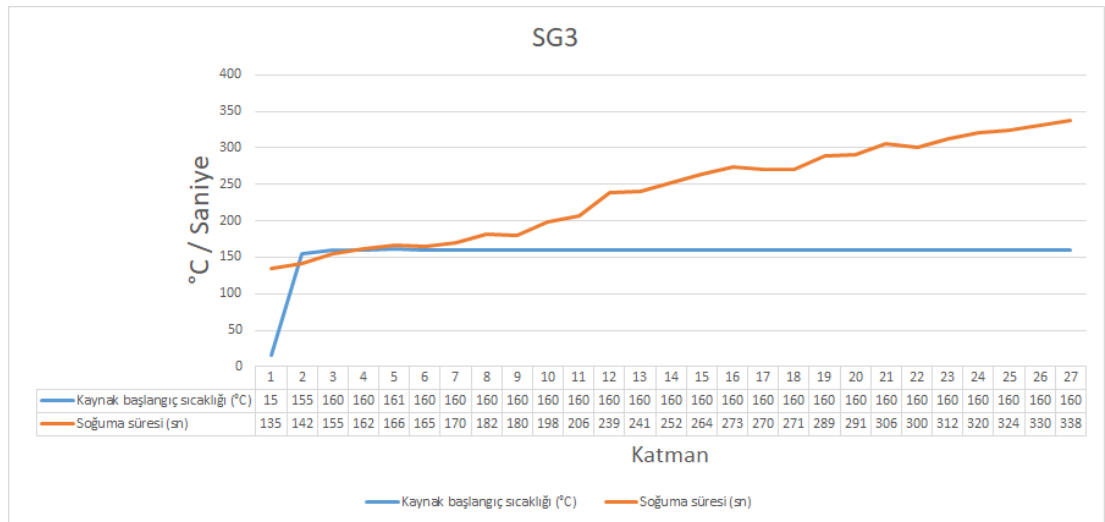
Şekil 4.20: Vickers sertlik testi yapılacak konumlandırma (Üst / Orta)

5. SONUÇ VE ANALİZ ÇALIŞMALARI

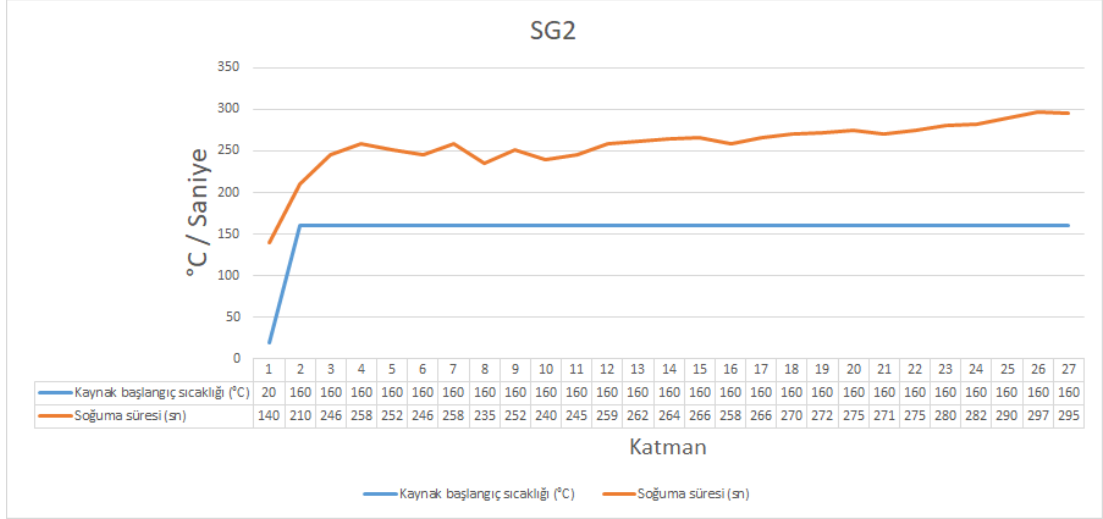
Yöntem ve materyal bölümde tanımlanan Tel Ark Eklemeli İmalat yöntemi ile numuneler üretilmiş olup bu numunelerden tel erozyon kesim metodu kullanılarak yatay ve dikey yönde çentikli darbe deneyi numuneleri çıkarılmıştır. Bu numuneler ile Makro ve Mikro yapı incelemeleri, Charpy-V testi, Vickers sertlik testi, hacimsel hata kontrolü için endüstriyel ve dijital radyografi deneyi yapılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar incelenmiş olup aşağıdaki bölümde bu elde edilmiş sonuçlar hakkında değerlendirmeler yapılmıştır.

5.1 Katmanlar Arası Zamana Bağlı Isı Transferi Analiz Sonucu

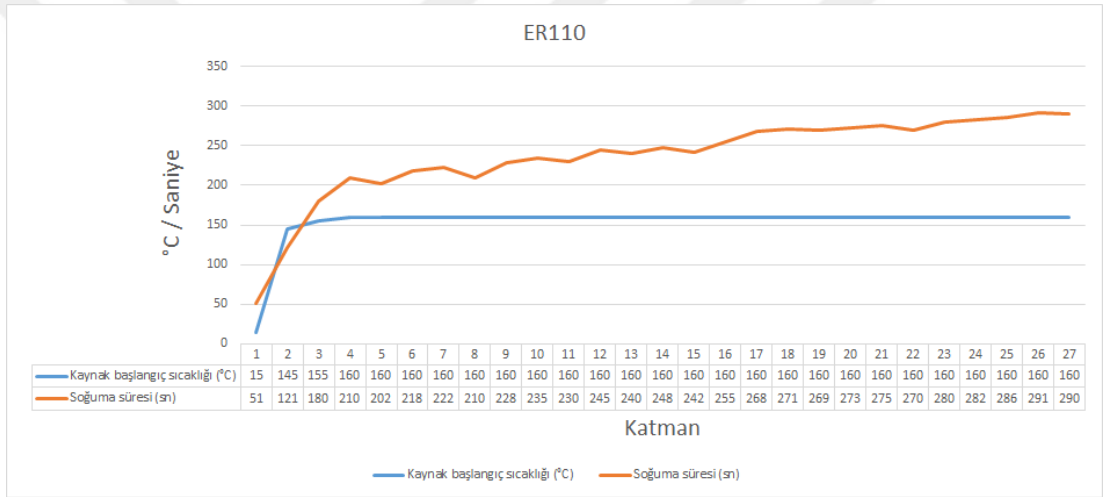
Tel ark eklemeli imalat numune üretim aşamasında katmanlar arası sıcaklığın 160 °C ortalamasında sabit bırakmak şartı ile toplamda 27 katmanda 60 mm kaynak dikiş yüksekliğine ulaşılmıştır. SG2, SG3 ve ER110 kaynak telleri ile 27 katmanda üretilmiş parçalarda, üretim aşamasında her katmandaki kaynak uygulaması tamamlandıktan sonra bir sonraki katmana geçmeden önce dikişin ortalama 160 °C 'ye kadar olan soğuma hızının kat geçişlerine göre değişimi Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: SG3 numunesinin katmanlar arası soğuma süreleri



Şekil 5.2: SG2 numunesinin katmanlar arası soğuma süreleri



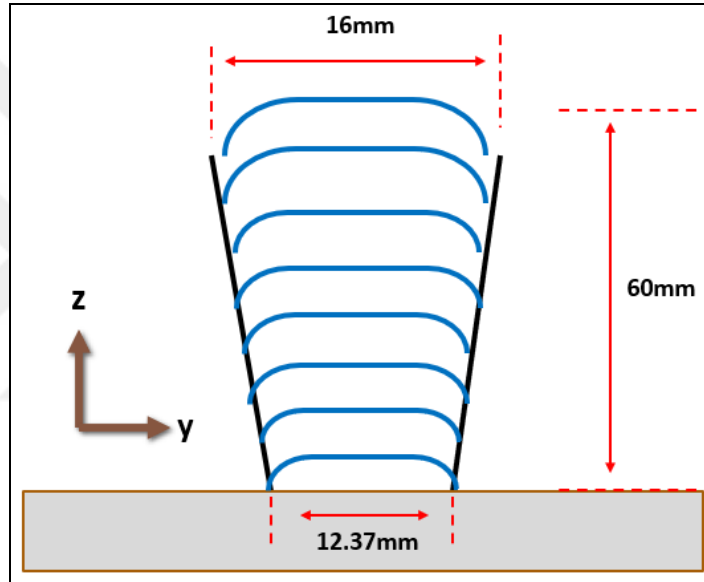
Şekil 5.3: ER110 numunesinin katmanlar arası soğuma süreleri

Üretilen numunelerin soğuma hızlarına bakıldığında her bir tel için tel ark eklemeli imalat ile üretilen parçaların üst katmanlara doğru gidildikçe parça soğuma hızının azaldığı görülmekte olup SG3 kaynak teli ile üretilen numunenin diğer SG2 ve ER110 numunelerine göre daha yavaş soğuma hızlarına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum SG3 ile üretilen numunede üst katmanlara doğru kaynak dikişinde tokluğun artmasına ve yavaş soğumadan kaynaklı dikişin üst yığılma alanlarına doğru sertliğin düşmesine neden olacağı öngörülmüştür.

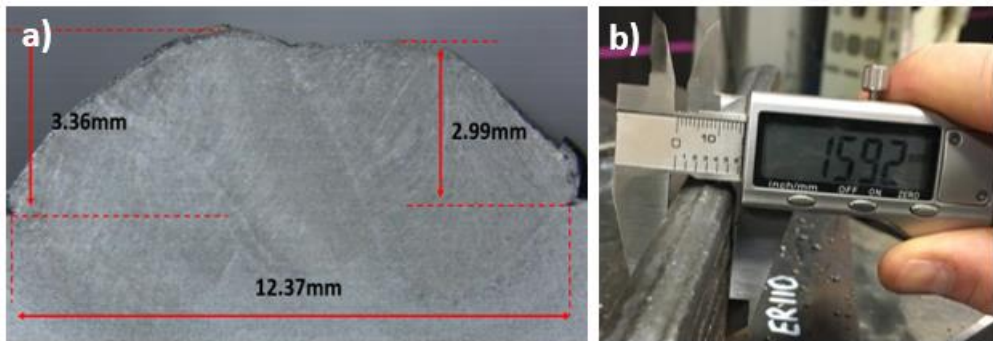
5.2 Tahribatsız Muayene ve Parça Boyut Analizleri

Tel ark eklemeli imalat ile üretilen parçalarda öncelikle yüzey kusurları ve boyutsal kontrol analizleri için TS EN ISO 17637 standartına uygun bir şekilde görsel

muayene yapılmıştır. Yapılan görsel muayene sonuçlarına göre üst katmanlara doğru ergiyik havuzunun alt katmanlara nazaran daha yavaş soğumasından dolayı tepe bölgelerde parça kalınlığının yaklaşık 16mm civarlarına ulaştığı görülmüştür. Toplamda 27 katmandan oluşturulan parçaların dikey yığıma yönünde yükseklikleri mekanik test aşamasında numune boyutlarını karşılayabilmek için ortalama 60mm civarında olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 5.4 'de katmanlar arası paso geçişlerinde üst katmanlara doğru dolgu dikişindeki yığılma ile ortaya çıkan formun nasıl olacağı ile ilgili şematik olarak gösterilmiştir. Üretim sonunda Şekil 5.5 'de 3x bindirme paso görüntüsü ile üst katman yığıma bölgelerinde kalınlık değeri gösterilmiş olup ortalama 16mm olarak ölçülmüştür.



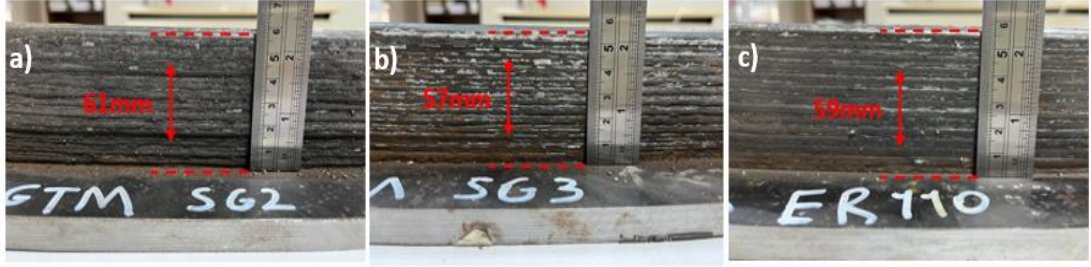
Şekil 5.4: Kaynak paso yığılması ile ortalama ulaşılan yükseklik ve kalınlık



Şekil 5.5: Numunede; a) Demo 3x paso makro görüntüsü, b) kalınlık ölçümü

Deney aşaması için üretilen parçalar uygun formlarda hazırlanmış olup bu üretim uygulamasında her bir tel için 3x bindirme ile toplamda 27 katman oluşturulmuş ve

ortalama 60mm olarak ölçülen parçaların kesit yükseklikleri Şekil 5.6 'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6: Kaynak kesit yüksekliği; a) SG2, b) SG3, c) ER110

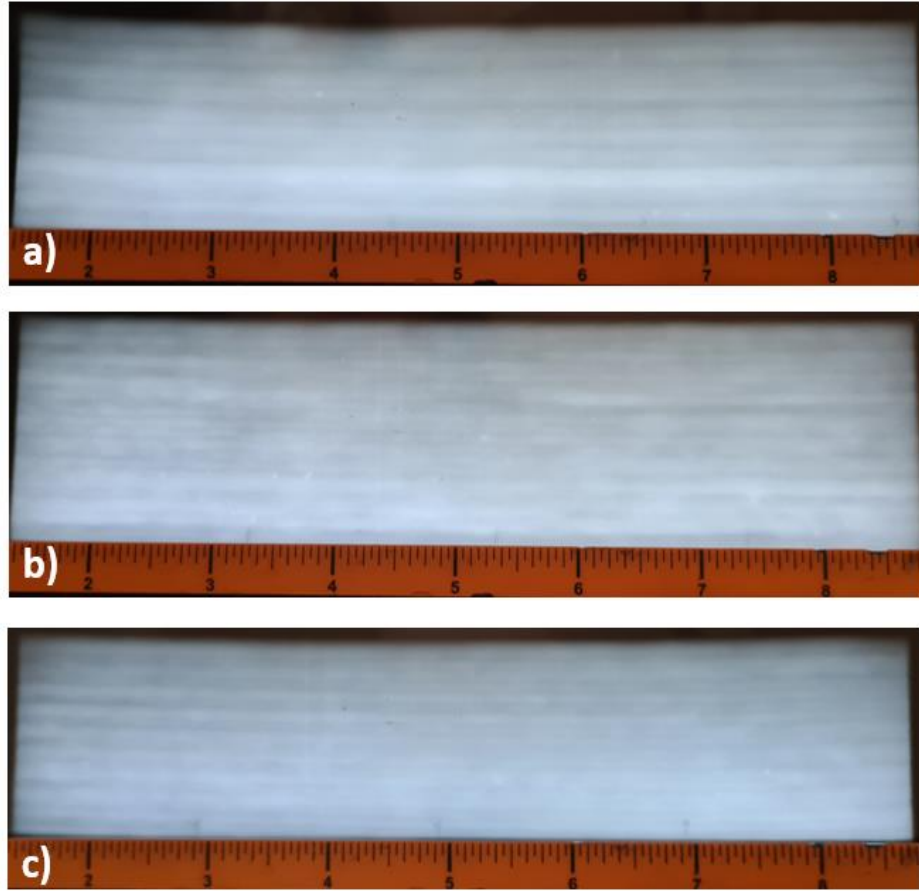
Farklı kaynak telleri kullanılarak 27 katmanda üretilen düşük alaşımlı 3 adet çelik parçanın genel görüntüleri Şekil 5.7 'de verilmiştir. Her katmanda yan yana 3 pas geçişi sağlanan bu üretimde katmanlar arası ısı geçiş kontrolü için parça sıcaklığı ortalama 160C civarına ulaştıktan sonra kaynaklara başlanılmıştır.



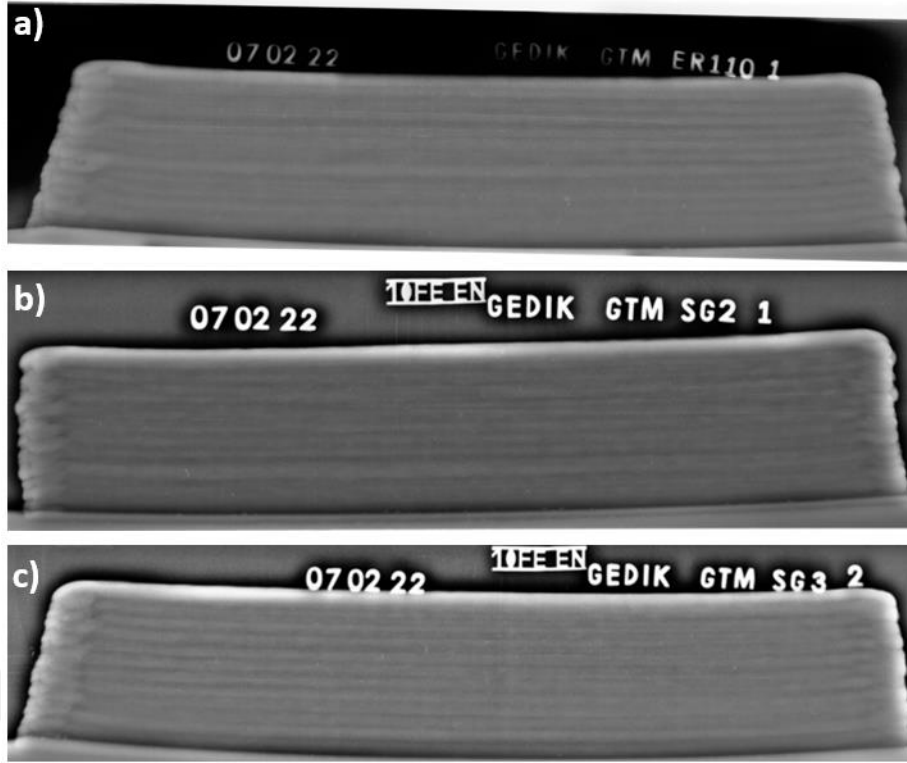
Şekil 5.7: Farklı kaynak telleri kullanılarak üretilen düşük alaşımlı çelik parçaların yan yüzeyden dikiş görüntüleri; a) SG2, b) SG3 ve c) ER110

Üretilen parçalarda görsel muayene sonucunda TS EN ISO 6520-1 standartına uygun sınıflandırılmış süreksizlik gruplarına rastlanmamış olup kaynak paso geçiş formunun uygun ve homojen bir yapıda olduğu tespit edilmiştir.

Farklı tel bileşenler ile üretilen parçalarda numune çıkarmak için tel erezyon ile kesim işlemi öncesi, üretim aşamasında iç yapı süreksizliklerin kontrolü ve kaynaklı imalatın pasolar arası geçişte homojen bir parametrede kalite uygunluğunun analizi için endüstriyel gamagrafi çekimi ve dijital X-Ray ışın çekimi yapılmış olup çekim sonuç görselleri Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 'da verilmiştir.



Şekil 5.8: X-Ray ışın radyografi film görüntüsü; a) ER110, b) SG2, c) SG3



Şekil 5.9: Gama ışın dijital radyografi film görüntüsü; a) ER110, b) SG2, c) SG3

Radyografi film görüntüleri incelendiğinde kaynaklı imalat uygulaması aşamasında katmanlar arası geçiş formunda herhangi bir gölgelenme görülmediği aynı zamanda da nüfuziyetsizlik, çatlak, gözenek vb. gibi TS EN ISO 6520-1 standartında sınıflandırılmış farklı süreksizlik gruplarından herhangi biri gözlenmemiştir. X-Ray ve Dijital radyografi çekimleri sonuçları ile kaynak dikişinde homojen dağılım ve penetrasyona sahip tel ark eklemeli imalat ile üretim yapılabilirliği desteklenmiştir.

5.3 Tahribathı Muayene İncelemeleri

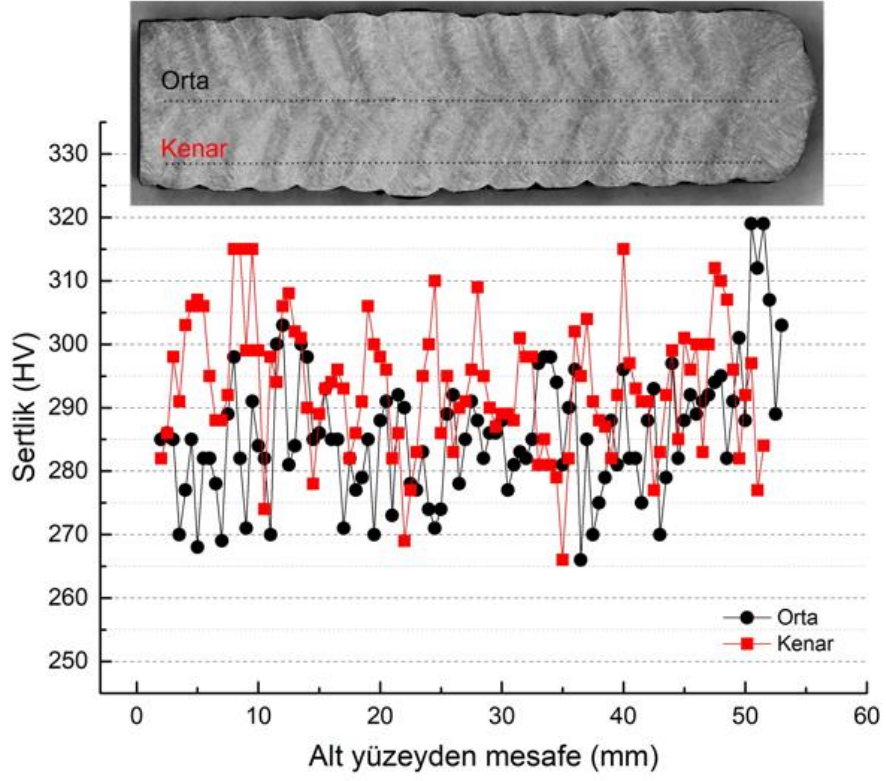
5.3.1 Sertlik test sonuçları

Tahribatsız muayene işlemleri tamamlandıktan sonra tel ark eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçalardan kesit numunesi alınmış ve bu numunenin alt bölgesinden üst bölgesine doğru 0,5 mm aralıklarda vickers sertlik ölçümleri yapılmış ve katmanlar arası sertlik değişiminin mikro yapı oluşumu ile ilişkisi incelenmiştir. Şekil 5.10'da sertlik testi sonucunda elde edilen Vickers sertlik iz görüntüleri ve buna bağlı olarak sertlik test konumları verilmiştir.

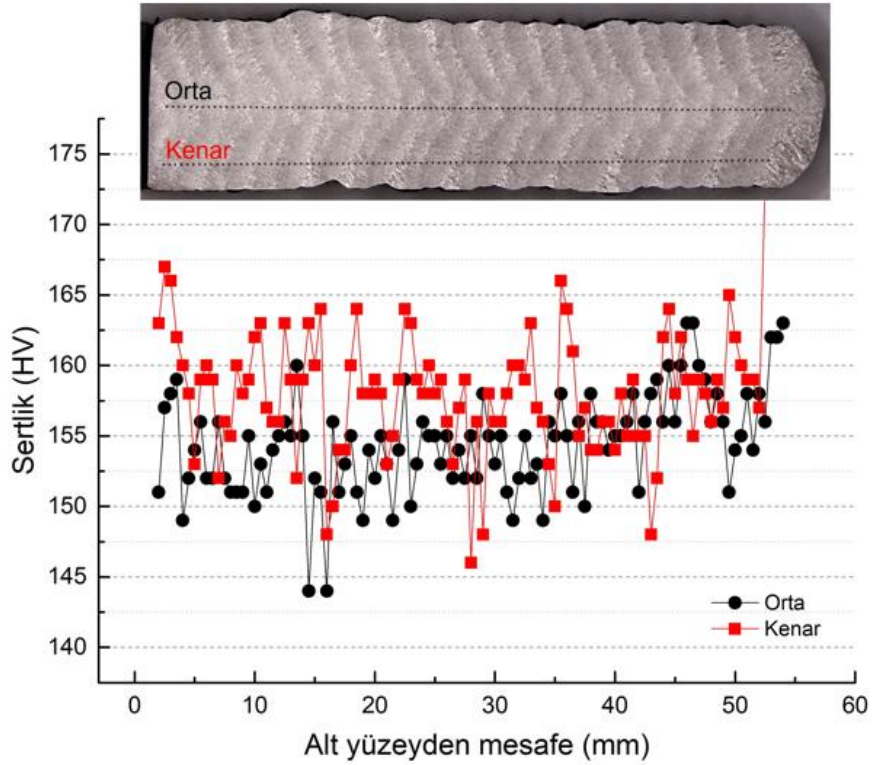


Şekil 5.10: Vickers ölçüm hattı görüntü gösterimi; a) ER110, b) SG2, c) SG3

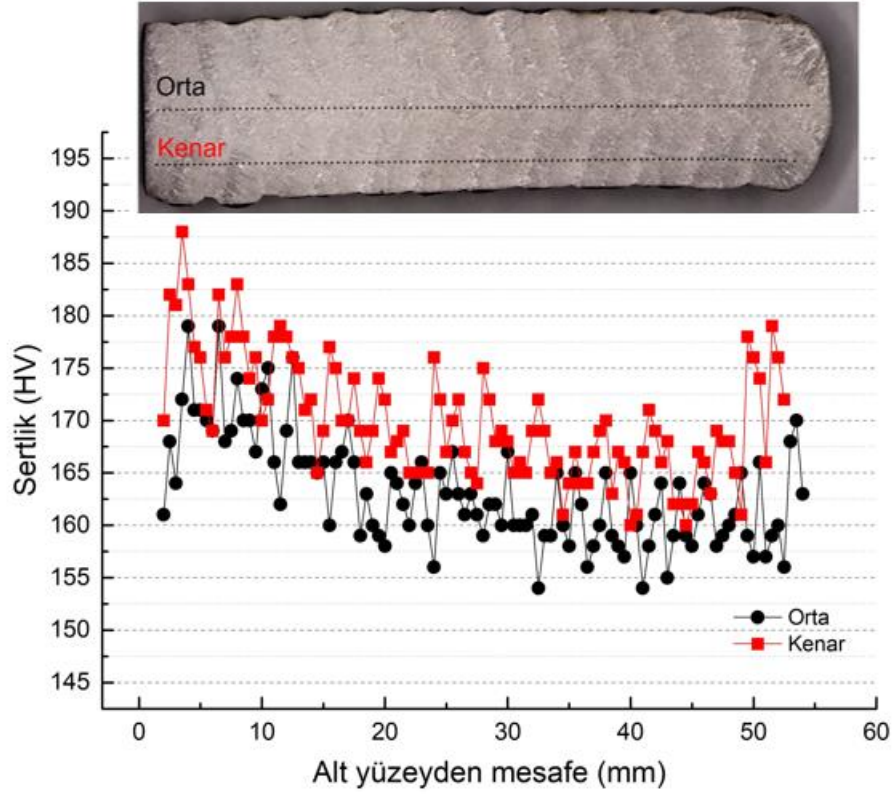
Sertlik ölçümleri her parça için hem orta bölgeden hem de kenar bölgeden olmak üzere iki farklı lokasyon üzerinde gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç çoklu paso tasarımı ile üretilen parçaların farklı bölgelerindeki sertlik değişimlerini incelemektir. Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13 'de ER110, SG2 ve SG3 numunelerinin orta ve kenar bölgelerinde alınan sertlik sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.11: ER110 kaynak teli ile üretilen parçanın sertlik konumları ve test sonuçları



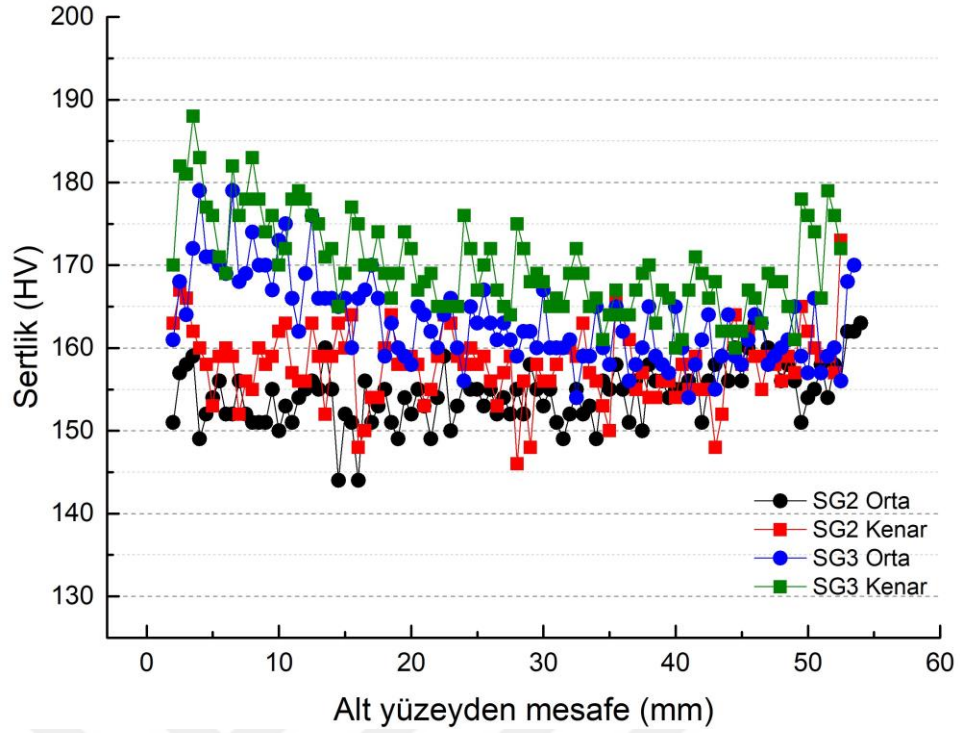
Şekil 5.12: SG2 kaynak teli ile üretilen parçanın sertlik konumları ve test sonuçları



Şekil 5.13: SG3 kaynak teli ile üretilen parçanın sertlik konumları ve test sonuçları

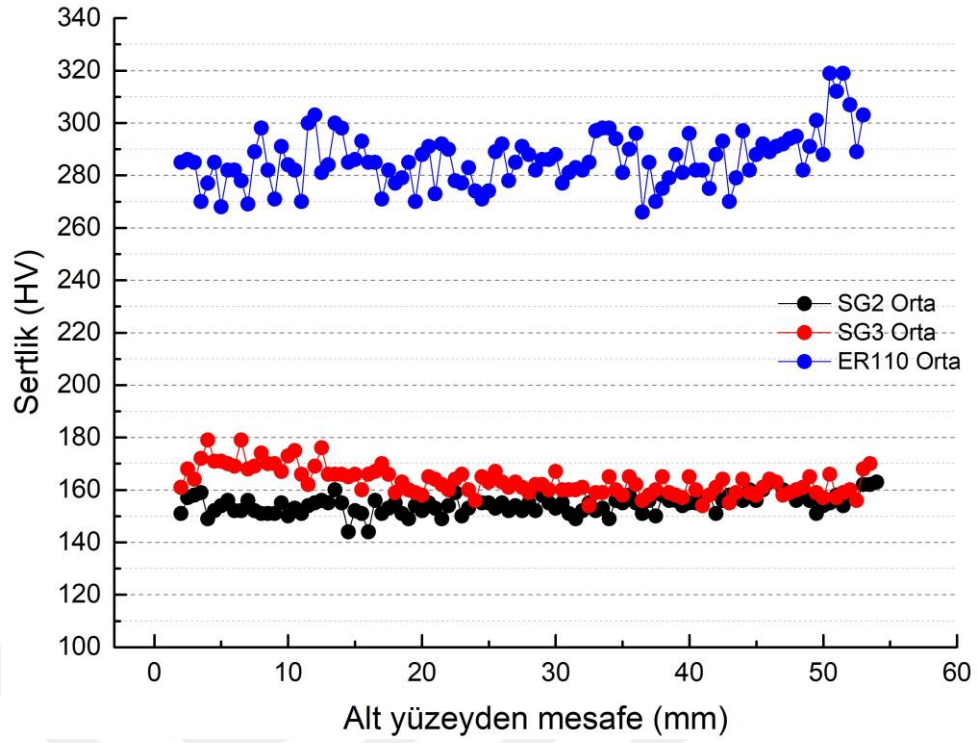
SG2, SG3 ve ER110 tel bileşenler ile üretilen numunelerde ortalama sertlik ölçümleri sırasıyla 155 ± 4 , 163 ± 5 , 286 ± 10 olarak bulunmuş olup bu yapı ile ilgili bindirme kaynak pasoları arasındaki ısı geçişlerinin kaynak katmanların katılaşmasına etkisi aşamasında yapı yönü boyunca homojen bir sertlik dağılımı olduğu görülmüş olup en yüksek sertlik değerleri ER110 tel üretim parçasında tespit edilmiştir.

Şekil 5.14 'de SG2 ve SG3 tel ile üretilen parçalarda orta ve kenar bölgelerde yapılan sertlik deney test sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre SG3 tel ile üretilen parçanın orta ve kenar bölgelerdeki sertlik değerleri SG2 tel ile üretilen parçaya göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.14: SG2 ve SG3 kaynak teli ile üretilen parçalarda konumlara göre sertlik test sonuçları karşılaştırması

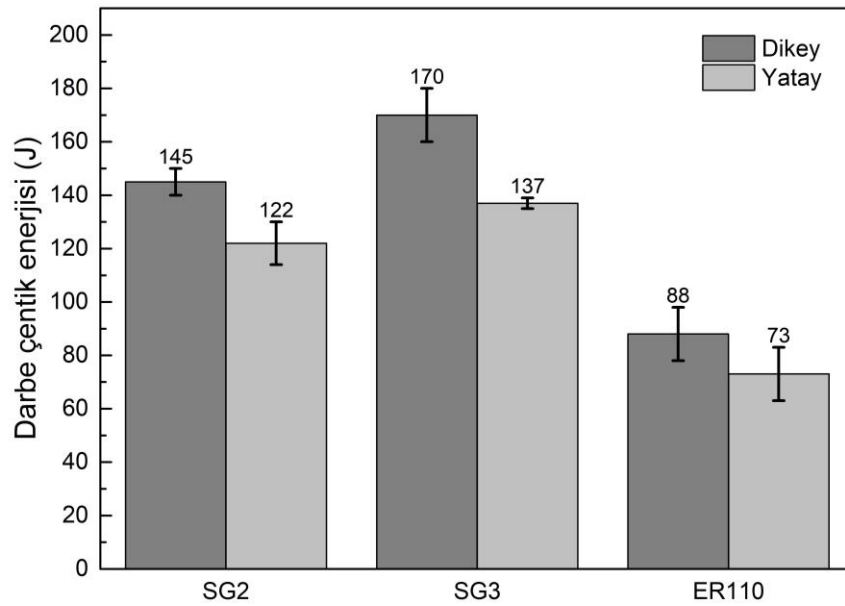
Şekil 5.15 'de SG2, SG3 ve ER110 kaynak teli ile üretilen parçaların kaynak dikişlerindeki orta bölge sertlik test sonuç karşılaştırılması gösterilmiştir. Bu sertlik test sonuçlarına göre SG2 ve SG3 teli ile üretilen parçalarda orta bölgelerde yaklaşık sırasıyla 150 ± 5 (HV) ve 165 ± 5 (HV) gibi birbirlerine yakın sertlik sonuçları tespit edilmiş olup ER110 kaynak teli ile üretilen parça orta konum sertlik değeri diğer parçalara göre çok daha yüksek bir değer sonucu ile ortalama 287 ± 10 (HV) sertlik değeri görüldüğü tespit edilmiştir.



Şekil 5.15: SG2, SG3 ve ER110 kaynak teli ile üretilen parçalarda kaynak orta bölge sertlik test sonuç karşılaştırması

5.3.2 Kırılma tokluğu test sonuçları

Farklı bileşenlere sahip SG2, SG3 ve ER110 için kullanılan teller ile üretilen parçalardan yatayda ve dikeyde 3'er adet numuneler çıkarılmış olup (-20°C) 'de soğutulularak deneye tabi tutulan numunelerin ortalama kırılma enerjileri Şekil 5.16 'da gösterilmiştir.



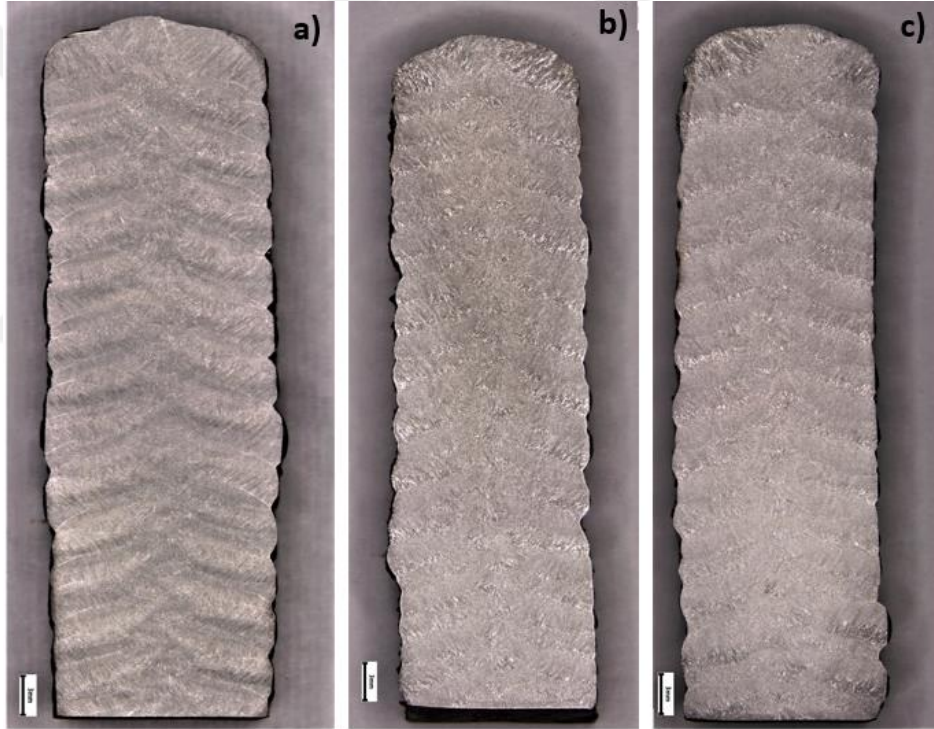
Şekil 5.16: Çentik yönlerine bağlı olarak çentikli darbe test sonuçları

Tespit edilen sonuçlara göre üretim aşamasında soğuma hızının daha yavaş görüldüğü SG3 ile üretilen numunenin tokluk dayanımı SG2 ve ER110 ile üretilen numune verilerine göre daha yüksek olduğu ve dikey yönlerde çıkarılmış olan numunelerin darbe tokluğu yatay yönler göre daha yüksek olduğu görülmüştür. En düşük darbe tokluğu değeri ER110 numunesi tarafından gösterilmiştir.

5.4 Metalografik Muayene İncelemeleri

5.4.1 Makro yapı sonuçları

Üretilen her bir parçadan dikey kesitte numuneler alınmış olup pasolar arası geçiş parametreleri, kenar ve orta paso geçiş formunu incelemek üzere çekilen makro fotoğrafları Şekil 5.17 'de gösterilmiştir.

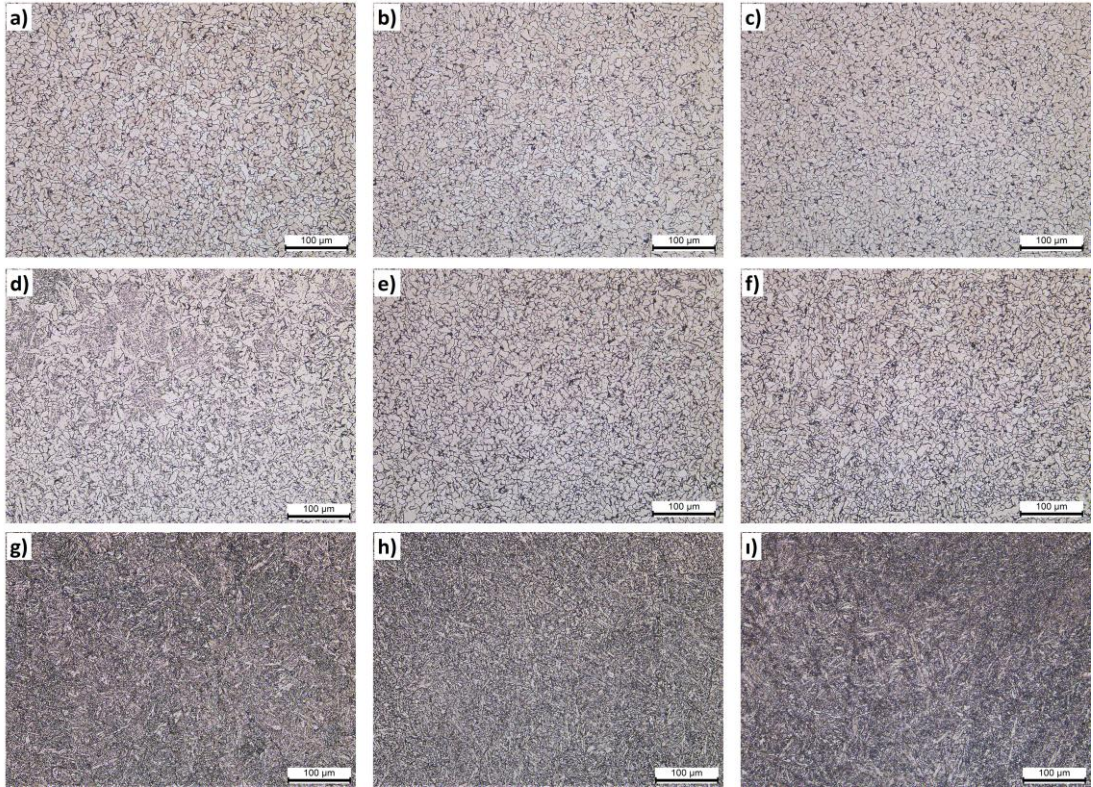


Şekil 5.17: Katmanlar arası dikey kesit makro görüntüleri; a) ER110, b) SG 2, c) SG3

Buradan bitişik katmanlar arasında dikkate değer gözenekler, çatlaklar veya uygun olmayan füzyonların bulunmadığı gözlemlenebilmektedir. Bu görüntünün GMAW tabanlı Tel ark eklemeli imalatın katmanlar arasında iyi bir yapışma kuvvetine sahip ve kaynak kusurları olmadan kalın duvarlı çelik bileşenlerin oluşturulmasına izin verdiğini doğrular niteliktedir.

5.4.2 Katmanlar arası mikro yapı incelemeleri

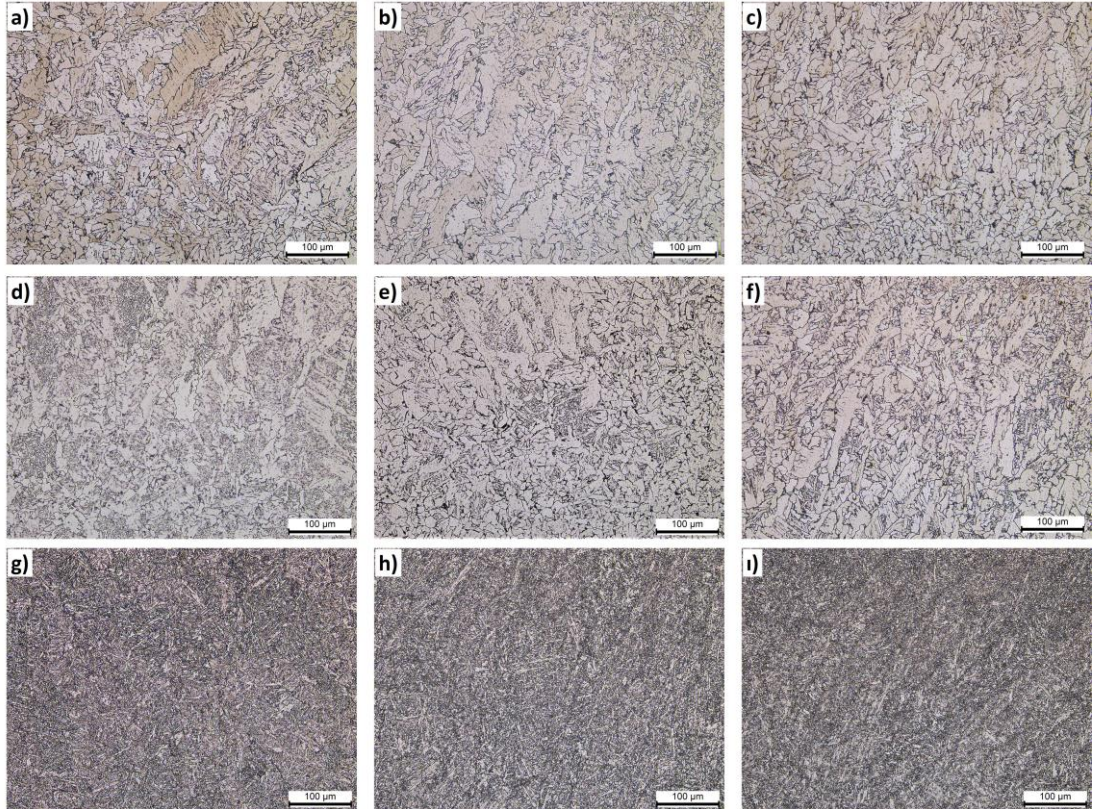
Şekil 5.18’de SG2, SG3 ve ER110 kaynak telleri ile üretilen düşük alaşımlı çelik parçaların orta bölgesi boyunca alt, orta ve üst bölgelerinden alınan mikro yapı görüntüleri verilmiştir. SG2 ve SG3 teli ile üretilen parçaların genel mikro yapıları poligonal ferrit fazı ile beraber tane sınırları boyunca çökelmiş perlit fazından oluşmaktadır. Fakat, SG2 kaynak teline nazaran bir miktar daha yüksek mangan içeriğine sahip SG3 kaynak teli ile üretilen parçanın alt bölgelerinde asiküler ferrit oluşumu da ayrıca gözlenmektedir. Bu durum sertlik sonuçlarından da görüldüğü üzere mangan elementinin sertleşebilirliği arttırması ve altlık malzemenin ilk pasalarda ısıyı hızlı bir şekilde absorbe etmesinden kaynaklanmaktadır. Öte yandan, ER110 kaynak teli ile üretilen parçanın mikro yapısı incelendiğinde yapının Nikel ve Molibden ilavesi nedeniyle büyük oranla ince taneli asiküler ferrit yapısına dönüştüğü görülmektedir. Alt, orta ve üst bölgelerde büyük bir yapı farklılığı görülmezken sertlik sonuçlarından da anlaşılacağı üzere oluşan termal döngüler nedeniyle zaman zaman asiküler ferrit tanelerinin irileştiği görülmektedir. Bu durum Şekil 5.18’de net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.18: Farklı kaynak telleri ile üretilen parçaların orta duvar mikro yapı görüntüleri

a) SG2 alt, b) SG2 orta, c) SG2 üst, d) SG3 alt, e) SG3 orta, f) SG3 üst, g) ER110 alt, h) ER110 orta, i) ER110 üst

Şekil 5.19’da SG2, SG3 ve ER110 kaynak telleri ile üretilen düşük alaşımlı çelik parçaların kenar bölgesi boyunca alt, orta ve üst bölgelerinden alınan mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Tüm numunelerde orta bölgeden alınan mikro yapılar nazaran kenar bölgelerde kolonsal alanların oluştuğu görülmektedir. Orta bölge boyunca üst üste atılan pasolar bir önceki pasoların tavlanmasına sebebiyet verirken kenar bölgelerde bu durum nispeten daha az görülmektedir. Bu bağlamda değerlendirildiğinde SG2 ve SG3 kaynak teli ile üretilen parçaların genel mikro yapıları asiküler ferrit, poligonol ferrit, tane sınırı ferritleri, Widmanstatten ferritlerinin karışımından oluşmaktadır. Fakat SG2 ile kıyaslandığında; SG3 kaynak teli ile üretilen parçanın tüm bölgelerinde ferrit tane boyutları küçülürken, asiküler ferrit miktarları artış göstermiştir. Öte yandan, ER110 kaynak teli ile üretilen numunede ise orta bölgeden alınan mikro yapılar kıyasla asiküler ferrit tane boyutlarının küçüldüğü net şekilde görülmektedir. Bu da yine sertlik sonuçlarından görüleceği üzere kenar bölgenin orta bölgeden daha yüksek sertliğe sahip olmasına neden olmuştur.

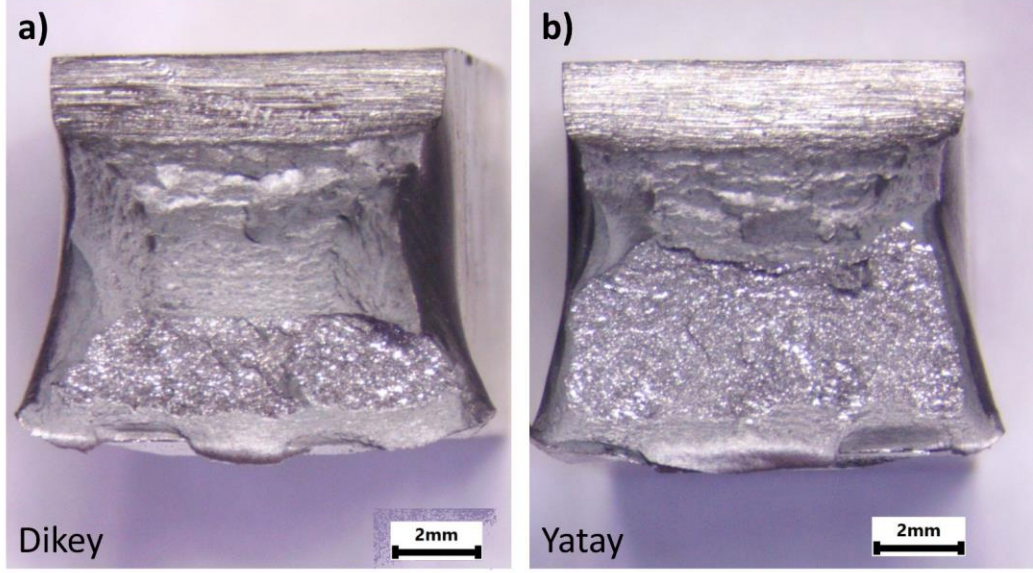


Şekil 5.19: Farklı kaynak telleri ile üretilen parçaların kenar duvar mikro yapı görüntüleri

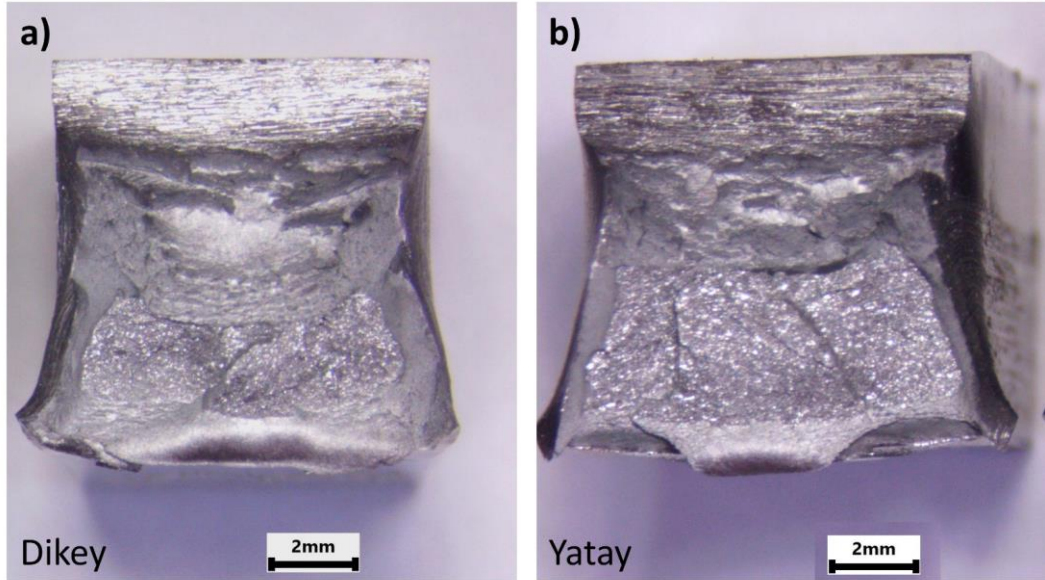
a) SG2 alt, b) SG2 orta, c) SG2 üst, d) SG3 alt, e) SG3 orta, f) SG3 üst, g) ER110 alt, h) ER110 orta, i) ER110 üst

5.4.3. Kırılma yüzeyi incelemeleri

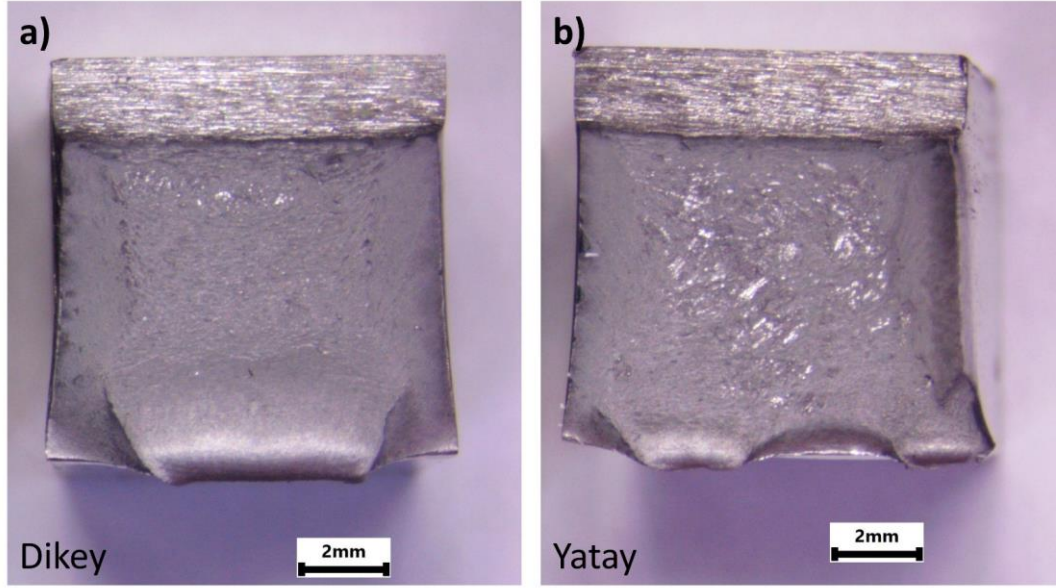
Çentikli darbe deneyi sonrası SG2, SG3 ve ER110 ürünlerden yatay ve dikey konumda çıkarılan numunelerde kırılan yüzeylerin analizleri için makro fotoğraf çekimleri yapılmış olup çekilen fotoğraflar Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de görülmektedir.



Şekil 5.20: SG2 teli ile üretilen parçanın darbe test numunelerinin kırılma yüzeyi görüntüsü
a) dikey alınan, b) yatay alınan



Şekil 5.21: SG3 teli ile üretilen parçanın darbe test numunelerinin kırılma yüzeyi görüntüsü
a) dikey alınan, b) yatay alınan



Şekil 5.22: ER110 teli ile üretilen parçanın darbe test numunelerinin kırılma yüzeyi görüntüsü

a) dikey alınan, b) yatay alınan

Şekiller incelendiğinde çentik darbe test sonuçlarını doğrular nitelikte dikey olarak çıkartılan çentik numunelerinin yatay olarak çıkartılan numunelere nazaran daha yüksek bir deformasyona uğradığı net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, en sünek kırılmanın SG3 numunesi ile en gevrek kırılmanın ise sertlik değeri en yüksek olan ER110 numunesi olduğu görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Farklı bileşenlere sahip SG2, SG3 ve ER110 kaynak tel gruplarıyla aynı parametreler kullanılarak üretilmiş numunelerde yapılmış olan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıda verilmiş sonuçlar tespit edilmiştir.

- Yapılan görsel muayeneler ve radyografik muayeneler sonucunda; GMAW tabanlı Tel Ark Eklemeli İmalat prosesi ile katmanlar arasında iyi bir yapışma gücüne sahip ve kaynak hatası olmayan kalın duvarlı düşük alaşımlı çelik malzemelerin üretilebileceği ortaya konulmuştur.
- Üç farklı kaynak teli ile de yığıma yönü boyunca homojen bir sertlik dağılımı elde edilmiştir. Sadece SG3 kaynak teli ile üretilen parçada alt yüzeyin orta ve üst bölgelere nazaran bir miktar daha yüksek sertliğe sahip olduğu görülmüştür.
- Dikey yönde çıkarılan Charpy deney test numunelerinin darbe tokluk değerleri, yatay yönler göre SG2, SG3 ve ER110 telleri için sırasıyla yaklaşık %19, %24 ve %21 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden numunelerin kırılma toklukları çentik yönüne bağlı olarak değiştiği yani anizotropik olduğu söylenebilir. Ancak, her iki yönde de elde edilen çentik darbe tokluk değerlerinin yapısal çelik uygulamaları için yeterli düzeyde (>47 Joule & -20 °C) olduğu görülmüştür.
- Kaynak bindirmeleri ile tüm numunelerin üretim aşamasında kaynak dikişinin farklı bölgelerindeki soğuma hızı dağılımı değişkenliğinden dolayı orta bölge dikiş yapı sertliğinin kenar bölgelere göre yaklaşık SG2, SG3, ER110 telleri için sırasıyla % 2.3, % 4.0, % 2.4 oranında daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Katmanlı imalat uygulamasında üretim aşamasında üst katmanlara doğru soğuma hızının azalması nedeniyle katman genişliğinin artmasına ve aynı şekilde üst katmanların tokluk değerlerinin daha yüksek çıkmasına sebebiyet vermiştir.

- Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda SG2, SG3 ve ER110 telleri kullanarak sabit parametrelerle üretilen ürünlerin tüm testlerinde başarılı sonuca ulaşıldığı üzere max. % 0.2 karbon oranına sahip S235, S275, S355 gibi C-Mn 'lı yapı çeliklerinin bu yöntem ile üretim aşamasında kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.
- Tel ark eklemeli imalat ile üretilen düşük alaşımlı çelik bileşenlerin hizmete uygunluk performansının değerlendirilmesinde çentik oryantasyonu ve bunların mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesinin önemli olduğunu doğrulanmıştır.
- Her paso katmanı arasındaki bekleme süresini en aza indirmek veya kaldırmak için farklı soğutma sistemleri üzerinde çalışılabilir.
- Farklı kaynak paso ilerleme takım yollarının çalışılması ile ısı dolaşımının optimize edilmesi sağlanabilir.
- Üretimde oluşacak mukavemet kaybının önüne geçmek için mikro alaşımlı B+Ti+Nb gibi tane büyümesini engelleyen metal özlü tellerin kullanılması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Adeyinka, A.** (2013)., “Characterisation of integrated WAAM and machining processes”, PhD Thesis, *Cranfield University*, 1-8.
- Alberti, E. A., da Silva, L. J. and D’Oliveira, A. S. C. M.** (2016)., “Additive manufacturing: the role of welding in this window of opportunity”, *Welding International*, 30 (6): 413-422.
- Ali Y., Henckell P., Hildebrand J., Reimann J., Bergmann J. P., and Barnikol-Oettler S.** (2019). Wire arc additive manufacturing of hot work tool steel with CMT process. *Journal of Materials Processing Technology*, 269(1), 109–116
- American Society for Testing and Materials.** (2012). *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing and Materials (ASTM), 1-3.
- Bandyopadhyay, A., Zhang, Y., Bose, S.** (2020)., “Recent developments in metal additive manufacturing”, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 28: 96-104.
- 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.
- Chang, K.-H.** (2015)., “Rapid Prototyping”, Computer aided design engineering design, *Elsevier Ltd.*, London, 743–746.
- Chen, J., Xue, L., Wang, S.** (2008)., “Microstructure characterization of laser-consolidated AISI 420 stainless steel”, *Materials Science & Technologies*, 1388-1396.
- 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.
- Çam, G.**, (2022)., “Prospects of producing aluminum parts by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)”, *Materials Today: Proceedings.*, Vol. 62, Part 1, PP: 77-85.
- Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C. ve Duysak, A.** (2013)., “Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31: 53-70.
- Çelik, K., Özkan, A.** (2017)., “Eklemeli İmalat Yöntemleri İle Üretim ve Onarım Uygulamaları”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 107-121.

- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. and Li, H.** (2015)., “Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81: 465–481.
- Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Almeida, P. M. S., Wang, F. and Williams, S.** (2011)., “Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts”, *Computational Materials Science*, 50 (12): 3315-3322.
- Gaddes J. S.** (2015). Parametric Development of Wire 3D Printing. Master Thesis, Auburn University, Auburn, Alabama, 6-44.
- Gibson, I., Rosen, D. W. and Stucker, B.** (2010)., “Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing”, *Springer*, New York.
- Güler, S., Serindağ H.T. ve Çam, G.** (2022)., “Tel Ark Eklemeli İmalat: Son Gelişmeler ve Değerlendirmeler”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, Cilt. 63, 706: 82-116.
- 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.
- Gürol, U., Dilibal, S., Turgut, B., Koçak, M. (2022).**, “Characterization of a low-alloy steel component produced with wire arc additive manufacturing process using metal-cored wire”, *De Gruyter Materials Testing*, 64: 755-767.
- Martinho, P.G.** (2021)., “Rapid manufacturing and tooling”, *Design and Manufacturing of Plastics Products*, 381-456.
- Mladenov, G.M., Koleva, E., Koleva, L., Dzharov, V.** (2016)., “State of the art of additive manufacturing by selective electron beam melting”, *Electrotechnica & Electronica*, 5-6.
- Ni, D.R., Ma, Z.Y.** (2014)., “Shape Memory Alloy-Reinforced Metal-Matrix Composites: A Review”, *Acta Metallurgica Sinica*, 5: 739-761.
- Queguineur, A., Rückert, G., Cortial, F. and Hascoët, J. Y.** (2018)., “Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications”, *Welding In The World*, 62: 259-266.
- Rahmati, S.** (2014)., “Direct Rapid Tooling”, *Comprehensive Materials Processing* 1st ed., *Elsevier Ltd.*, London,.
- Rodrigues T. A., Duarte V., Miranda R. M., Santos T. G., and Oliveira J. P.** (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12(7), 1121–1162.

- Rodrigues T. A., Duarte V., Miranda R. M., Santos T. G., and Oliveira J. P.** (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12(7), 1121–1162.
- Ryan, E.M.** (2020)., “On wire and arc additive manufacture of aluminium”, *University of Surrey*,.
- Segerstark, A.** (2017)., “Laser Metal Deposition using Alloy 718 Powder: Influence of Process Parameters on Material Characteristics”, *University West*.
- Sridharan, N., Noakes, M.N., Nycz, A., Love, L., Dehoff, R.R., Babu, S.S.** (2017)., “On the toughness scatter in low alloy C-Mn steel samples fabricated using wire arc additive manufacturing”, *Materials Science and Engineering A*, 3: 713.
- Tamingier K. M. B. and Hafley R. A.** (2004)., “Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing”, *Nato Unclassified*, 1-10.
- Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G. and Colegrove, P.** (2016)., “Wire + Arc additive manufacturing”, *Materials Science And Technology*, 32 (7): 641-647.
- Wu, B.** (2018)., “Quality improvement in wire arc additive manufacturing”, *University of Wollongong*,.
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., Norrish, J.** (2018)., “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement”, *Journal of Manufacturing Processes*, 35: 127-139.
- Xiong J., Li Y., Li R., and Yin Z.** (2018). Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 252(1), 128–136.
- 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(10), 1781–1798.
- Zheng, B., Zhou, Y., Smugeresky, J.E.** (2008)., “Thermal Behavior and Microstructural Evolution during Laser Deposition with Laser-Engineered Net Shaping: Part I. Numerical Calculations”, *Metall Mater Trans*, 39: 2228–2236.

Internet Kaynakları

Jones, G., “NoDirect Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained Title”, (2019), Adres: <<https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>>, alındığı tarih: 13.05.2022.

Carlota, V., “The Complete Guide to Electron Beam Melting (EBM) in 3D Printing”, (2019), Adres: <<https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/>>, alındığı tarih: 20.05.2022.

Arcam EBM, (2019), Adres: <<https://www.ge.com/additive/who-we-are/about-arcam>>, alındığı tarih: 10.06.2022.

Selective Lazer Melting, (2022), Adres: <<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/selective-laser-melting>>, alındığı tarih: 05.05.2022.

Laser Powder Bed Fusion, (2022) Adres: <<https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing/>>, alındığı tarih: 25.06.2022.

ÖZGEÇMİŞ

Kadir DAĞYIKAN İlk ve orta öğrenimini Yaltır Kardeşler İlköğretim Okulu'nda tamamladı. 2009 yılında Ceyhan Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2009 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği Lisans Programı Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2013 yılında lisans eğitimini tamamladı. 2013 yılında Uluslararası Kaynak Mühendisliği eğitimine başlayarak 2013 yılında diploma eğitimini tamamladı. 2013 yılında özel bir firmada yurtiçi ve yurtdışında farklı ülkelerde çeşitli projelerde 2018 yılına kadar Kalite Müdürü ve Kalite departman sorumlusu olarak görev aldı. 2017 yılında İstanbul Gedik Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başlayıp 2019 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2020 yılında İstanbul Gedik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı. 2022 yılında IIW (Internation Institue of Welding) Uluslararası Kongresinde “Effect of the Location on the Fracture Toughness of Wire Arc Additively Manufactured Components Using Different Welding Wires” adlı çalışmayı araştırma üyeleriyle birlikte sunumunu gerçekleştirdi. İstanbul Gedik Üniversitesi, GEV-ATB, Gedik Test Merkezi bünyesinde İstanbul bölge Eğitim Bölüm Başkanı pozisyonunda görev almaktadır.