



**DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKTEN TEL ARK
EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN BİR
PARÇANIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

İskender YEŞİLDAĞ

**2020
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKTE TEL ARK EKLEMELİ İMALAT İLE
ÜRETİLEN BİR PARÇANIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

İskender YEŞİLDAĞ

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**KARABÜK
Haziran 2020**

İskender YEŞİLDAĞ tarafından hazırlanan “DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKTEN TEL ARK EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN BİR PARÇANIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 23/06/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Turgay KIVAK (DÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Mustafa GÜNAY (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi KORKMAZ (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

İskender YEŞİLDAĞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKTEN TEL ARK EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN BİR PARÇANIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İskender YEŞİLDAĞ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

Haziran 2020, 66 sayfa

Bu çalışmada, düşük alaşımlı çelik malzemeden tel ark eklemeli imalat yöntemi uygulanarak üretilen parçanın mekanik özellikleri araştırılmıştır. Endüstride yaygın olarak kullanılması ve düşük maliyetli olması sebebiyle hammadde olarak düşük alaşımlı çelik (SG2) kaynak teli seçilmiştir. Gazaltı ark kaynak yöntemi ile eklemeli imalat uygulamasında, koruyucu gaz olarak M20 sınıfında %80 argon, %12 karbondioksit, %8 oksijen içeren karışım kullanılmıştır. Eklemeli imalat işlemi ile parçanın üretimi Kuka marka KR10 R1420 model kaynak robotu yardımıyla yapılmıştır. Eklemeli imalat ile üretilen parçanın mekanik özelliklerini araştırmak amacıyla tel erozyon kullanılarak kaynak dikiş yönüne paralel ve dik yönde çekme numuneleri hazırlanmıştır. Çekme deneyleri ve mikroyapı incelemeleri sonucunda, kaynak dikiş yönüne paralel ve dik olarak hazırlanan numunelerin akma ve çekme

dayanımı, sertlik ve yüzde uzama gibi mekanik özellikler açısından farklı davranışlar gösterdiği belirlenmiştir. Kaynak yönüne paralel numunelerin daha homojen kaynak ısıl çevrimi nedeniyle daha homojen mikroyapı ve dolayısıyla daha yüksek mekanik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, deformasyon hızının artmasıyla malzeme akma ve çekme mukavemeti ile sertliğinde artış olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Eklemeli imalat, MAG, mikroyapı, sertlik, mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

MECHANICAL PROPERTIES EXAMINATION OF A PART PRODUCED BY WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING FROM LOW ALLOY STEEL

İskender YEŞİLDAĞ

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanic Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

June 2020, 66 pages

In this study, it is investigated of mechanical properties of low alloyed steel material which was produced by wire arc additive manufacturing method. Cause of the common usage in industry and being cost efficiently the low alloyed steel welding wire (SG2) was employed. On the application of gas metal arc welding on additive manufacturing, M20 classified shield gas which includes 80% Argon, 12% Carbon dioxide and 8% Oxygen shield gas was used. Producing of additive manufacturing sample was made by the help of Kuka KR10 R1420 model welding robot. For investigating mechanical properties, additive manufacturing sample was cut parallel to welding direction and perpendicular to welding direction by using wire EDM machine. It is defined at the end of tensile and microstructure experiments, the samples which are prepared parallel and perpendicular to welding direction show different

behaviours as yield strength, tensile strength, hardness and percentage elongation. Cause of more homogenous welding thermal cycle the samples which are parallel to welding direction gave us more homogenous microstructure, therefore higher mechanical properties were observed. Moreover, it was observed that with the increasing deformation rate, cause higher yield strength, tensile strength and hardness.

Key Word : Additive manufacturing, MAG, microstructure, hardness, mechanical properties.

Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Mustafa GÜNAY'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımını esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
BÖLÜM 1	16
GİRİŞ	16
1.1. AMAÇ	16
1.2. KAPSAM.....	17
BÖLÜM 2	19
EKLEMELİ İMALAT	19
2.1. GİRİŞ.....	19
2.2. METAL EKLEMELİ İMALAT	20
2.2.1. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS).....	21
2.2.2. Elektron Işını ile Eritme (EBM)	22
2.2.3. Seçici Lazer Eritme (SLM).....	23
2.2.4. Elektron Işını ile Serbest Formlu İmalat (EBF ³)	23
2.2.5. Lazerli Net Şekillendirme (LENS)	24
2.2.6. Lazerli Birleştirme (LC)	25
2.2.7. Tel ve Lazer Eklemeli İmalat (WLAM).....	25
2.2.6. Tel Ark Eklemeli İmalat (WAAM).....	26
2.2.8. Toz Yataklı ve Püskürtmeli 3D Yazıcı (3DP)	28
2.2.9. Ultrasonik Eklemeli İmalat (UAM)	28

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3	30
LİTERATÜR TARAMASI.....	30
3.1. METAL EKLEMELİ İMALAT ÜZERİNE ÇALIŞMALAR	30
3.2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	37
BÖLÜM 4	39
MATERYAL VE YÖNTEM	39
4.1. MALZEME	39
4.2. EKLEMELİ İMALATIN UYGULANMASI	40
4.3. MEKANİK DENEY NUMUNESİ HAZIRLAMA	45
4.4. MEKANİK ÖZELLİKLER	46
BÖLÜM 5	49
SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	49
5.1. ÇEKME DAYANIMI.....	49
5.2. SERTLİK	54
BÖLÜM 6	58
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	66

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Doğrudan metal lazer sinterleme makinesi.....	22
Şekil 2.2. Elektron ışını ile eritme makinesinin şematik gösterimi	23
Şekil 2.3. Elektron ışını ile serbest formlu imalat sisteminin şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.4. Lazerli net şekillendirmenin şematik gösterimi	25
Şekil 2.5. Tel ve lazer eklemeli imalat sisteminin yan ve üstten şematik veişlem sirasındaki görüntüleri	26
Şekil 2.6. Eklemeli imalatta ark kaynağının uygulanması a) Gaz metal ark kaynağı, a) Gaz metal ark kaynağı, b) Plazma kaynağı, c) Gaz tungsten ark kaynağı	27
Şekil 2.7. Toz yataklı püskürtmeli 3D yazıcının şematik gösterimi	28
Şekil 2.8. Ultrasonik eklemeli imalatın şematik gösterimi.....	29
Şekil 4.1. Fronius Transpuls Synergic 3200.....	40
Şekil 4.2. Kuka KR10 R1420 endüstriyel robot	41
Şekil 4.3. Numune oluşturma işleminin şematik gösterimi.....	42
Şekil 4.4. Deney numunesi üretimi başlangıcı	43
Şekil.4.5. İşlem sırasında pasoların gösterimi	44
Şekil.4.6. Tel ark eklemeli imalat numunesi	44
Şekil.4.7. Tel ark eklemeli imalatta efektif cidar genişliğinin gösterilmesi	45
Şekil 4.8. Deney numune taslağının gösterilmesi.	46
Şekil 4.9. Çekme deney numunesi ölçüleri	46
Şekil 4.10. Qness Q250M Makro sertlik ölçüm cihazının gösterilmesi.....	47
Şekil 4.11. Nikon ters metalurjik mikroskopun gösterimi	47
Şekil 5.1. Kaynak yönüne paralel numunenin çekme deneyi grafiğı.....	49
Şekil 5.2. Kaynak yönüne dik numunenin çekme deneyi grafiğı	50
Şekil 5.3. Kaynak dikiş yönüne paralel numune mikroyapısı	52
Şekil 5.4. Kaynak dikiş yönüne dik numune mikroyapısı.....	53
Şekil 5.5. Sertlik ölçümü yapılan numuneler, a) Çekme deneyi sonrası, b) Çekme deneyi öncesi.....	54
Şekil 5.6. Kaynak yönüne paralel numune sertlik değışimi	54
Şekil 5.7. Kaynak yönüne dik numune sertlik değışimi.....	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Metal eklemeli imalat biçimleri	21
Çizelge 4.1. Kaynak telinin yüzdece kimyasal bileşimi	39
Çizelge 4.2. Kaynak telinin mekanik özellikleri.....	39
Çizelge 4.3. M20 gazının yüzdece kimyasal bileşimi (%).....	39
Çizelge 4.4. Fronius Transpuls Synergic 3200 teknik özellikleri.....	41
Çizelge 4.5. Kuka KR10 R1420 endüstriyel robotun teknik özellikleri	42
Çizelge 4.6. Kaynak paramereleri.....	43

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Ar	: Argon
CO ₂	: Karbondioksit
O ₂	: 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

KISALTMALAR

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

- IACS : International Association of Classification Societies (Uluslararası Sınıflandırma Örgütleri Birliği)
- LMD : Laser Metal Deposition (Lazer Metal Biriktirme)
- HB : Hardness Brinell (Brinel Sertliđi)
- HV : Hardness Vickers (Vickers Sertliđi)
- HRC : Hardness Rockwell (Rockwell Sertliđi)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. AMAÇ

Günümüzde küreselleşme büyük bir rekabeti beraberinde getirmektedir. Bu rekabetin sonucunda ilgili sektörde yer almak ve başarıyı sürdürebilmek, üretilen ürün ve hizmetlerin kalitelerinin yanı sıra sürekli geliştirilmesine bağlıdır. Diğer yandan, artan teknolojik gelişmeler ve ürün çeşitliliği etkin malzeme kullanımı ve çevrecilik gibi olguları bir zorunluluk haline getirmektedir. Bu zorunluluklar ve sürekli gelişim ihtiyacı imalat sektöründe eklemeli imalat gibi yeni yöntemlerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

Geleneksel imalat yöntemlerinde metal malzemelerden nihai geometride ürünlerin imalatı, genellikle başlangıç parçası üzerinden talaş kaldırılmasıyla sağlanmaktadır. Geleneksel imalat teknikleri ile metal işlemede yüzey pürüzlülüğü (Ra) 0,025-50 µm arası değerler elde edilebilirken, metal eklemeli imalat teknikleriyle Ra değerleri 3-200 µm arasında elde edilebilmektedir [1]. Eklemeli imalat tekniklerinde geleneksel imalat yöntemlerinin aksine kalıp kullanılmadan ve talaş kaldırmadan metal alaşımlar ve metal olmayan malzemelerle üretim yapılabilmektedir. Havacılık, medikal, enerji ve otomotiv endüstrilerinde yüksek performanslı parçaların üretiminde devrim kabul edilen bu yöntem, temel olarak üç boyutlu geometrik bir yapının katmanlar halinde oluşturulması esasına dayanmaktadır. Teknolojik gelişmelerin yardımı ile sanal ortamda oluşturulan CAD verilerinin kullanılacak yönteme göre uyarlanmasıyla üretim gerçekleştirilmektedir.

Bu yöntemler Avrupa Toz Metalurji birliğinin tanımladığı üzere; kullanılan enerji kaynağına göre fotopolimerizasyon, ekstrüzyonla şekillendirme, tozların eritilerek katmanlandırılması, üç boyutlu kaplama, elektrik arkı şeklinde sınıflandırılmaktadır.

İşlem sırasında kalıba ihtiyaç duyulmaması hem maliyet hem de geleneksel yöntemlerle oluşturulamayacak karmaşık geometrilerin oluşturulmasını sağlayabilmektedir. Diğer metal eklemeli imalat yöntemlerine göre büyük boyutlu parçaların üretimini mümkün kılması, daha hızlı, maliyeti düşük ve enerji verimliliğinin yüksek olması sebebiyle elektrik arkı ile eklemeli imalat üzerine oldukça fazla çalışma yapılmaktadır [2,3]. Hammadde atıklarından kaçınmak için yüksek maliyeti olan titanyum alaşımları başta olmak üzere nikel, alüminyum ve çelik alaşımlar elektrik ark yöntemiyle yaygın olarak eklemeli imalatta kullanılabilmektedir.

1.2. KAPSAM

Bu çalışmada, prototip hazırlamak için harcanan zamanı minimize etmek ve seri üretimi yapılmayacak sınırlı sayıdaki parçaların üretimi ve mekanik özelliklerini incelemek amacıyla piyasada yaygın olarak kullanılan düşük alaşımlı çelik malzemenin tel ark eklemeli imalatta kullanımının uygunluğu araştırılmıştır. Bu amaçla, Kuka marka KR 10 R1420 model kaynak robotuna bağlı Fronius marka Trans Plus Synergic 3200 model kaynak makinesi ile tel ark eklemeli İmalat numuneleri üretilmiştir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

- 1.bölümde eklemeli imalatın gerekliliği ve tezin amacı hakkında bilgi verilmiştir.
- 2.bölümde eklemeli imalat yöntemleri ve alt dalları tanıtılmıştır. Bu bölümde eklemeli imalatta kullanılan malzemelere değinilmiş olup, metallerin eklemeli imalatta kullanımı incelenmiştir.
- 3.bölümde literatür taraması yapılmış olup, hammadde olarak metal kullanılan eklemeli imalat sistemleriyle ilgili çalışmalar değerlendirilmiştir.
- 4.bölüm materyal ve yöntem olup, bu bölümde deney düzeneği, kullanılan ekipman ve malzemelerin teknik ve teknolojik özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca, numunenin üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesinde kullanılan yöntemler hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.
- 5.bölüm sonuçlar ve tartışma olup, burada deney sonuçlarına göre numunelerin mekanik özelliklerindeki değişimler yorumlanmıştır.

- 6.bölüm olan sonuçlar ve önerilerde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar özet olarak verilmiş olup, gelecekte yapılabilecek araştırma konuları önerilmiştir.

BÖLÜM 2

EKLEMELİ İMALAT

2.1. GİRİŞ

Küreselleşme neticesinde herhangi bir üretim sektöründe söz sahibi olmak yoğun bir rekabet anlayışını beraberinde getirmektedir. Bu da ancak üretilen malzemelerin kalitesinin artışı ve kaynakları mümkün mertebe tasarruflu kullanarak sağlanmaktadır. Temiz bir çevre, düşük maliyet, hammadde tasarrufu gibi unsurlar eklemeli imalat gibi bir yöntemin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Eklemeli imalat, geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinin aksine talaş kaldırılmadan hammaddenin katmanlar halinde üst üste yığılmasıyla geometrik yapı oluşturulması esasına dayanmaktadır [4].

Eklemeli imalatın sağladığı hareket özgürlüğü ile karmaşık geometrilerde parça üretmeye imkan tanınması, enerji verimliliği, geleneksel yöntemlere göre insan ve hammadde israfını büyük oranda önlemesi endüstrinin dikkatini çekmektedir. Bilgisayar destekli tasarım, imalat teknolojisi, gelişmiş malzeme teknolojisinin kombinasyonu olan malzemelerin üç boyutlu yazdırma işlemi, teknoloji ve bilimin gelişmesiyle giderek talep görmektedir ve günümüzde imalat endüstrisinde yeni bir teknolojik devrim olduğu düşünülmektedir [5].

Eklemeli imalat kullanılan yöntem ve enerji kaynaklarına göre Amerikan Test Ve Malzeme Topluluğu (ASTM) tarafından temel olarak malzeme ekstrüzyonu, toz yataklı lazer birleştirme, malzeme jeti, yapıştırıcı ile katmanlı imalat, yönlendirilmiş enerji birikimi, levha laminasyonu ve stereolithografi (SLA) olmak üzere yedi kategoride sınıflandırılmıştır [6]. Bu yöntem ile üretilmek istenilen objeler bilgisayar ortamında tasarlandıktan veya tersine mühendislik yöntemi ile taranıp elde edildikten sonra, katmanlara ayrılarak veya STL adı verilen dosya formatına dönüştürülerek imalat makinesine verilir ve nihai ürün elde edilir [7,8].

Endüstrinin bu yöntemi devrim olarak nitelendirmesi sayesinde yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmakta, bu sebeple geliştirilen yöntem ve kullanılan malzeme çeşitliliği artış göstermektedir. Günümüzde metal olmayan malzemelerin yanı sıra metal malzemelerde eklemeli imalat çalışmalarında oldukça fazla kullanım alanı bulunmaktadır. Bu bağlamda, tez çalışması kapsamında bu bölümde yoğun olarak metal eklemeli imalat yöntemi hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

2.2. METAL EKLEMELİ İMALAT

Metal eklemeli imalat türleri kullanılan toz, tel ve levha olmak üzere hammadde biçimi ve elektron ışını, lazer, ark gibi kullanılan enerji kaynaklarına göre sınıflandırılmaktadır. Toz ve tel türünde hammaddeler günümüzde üzerine oldukça fazla çalışmalar yapılan toz beslemeli ve yönlendirilmiş enerji birikimi metotları ile metal eklemeli imalatta kullanılmaktadır. Ayrıca iki farklı enerji türü ve/veya hammaddenin bir araya gelmesi ile hibrit sistemler oluşturularak metal eklemeli imalatta kullanılabilir [9].

Metal eklemeli imalatta günümüzde yaygın olarak kullanılan metal alaşımlar aşağıdaki gibidir [10]:

- Paslanmaz çelik alaşımlar,
- Takım çelikleri (düşük alaşımlı çelikler ve yüksek hız çelikleri),
- Bakır alaşımları,
- Alüminyum alaşımları,
- Kobalt alaşımları,
- Nikel alaşımları,
- Yansıtıcı metaller (refrakter grubu),
- Süper alaşımlar

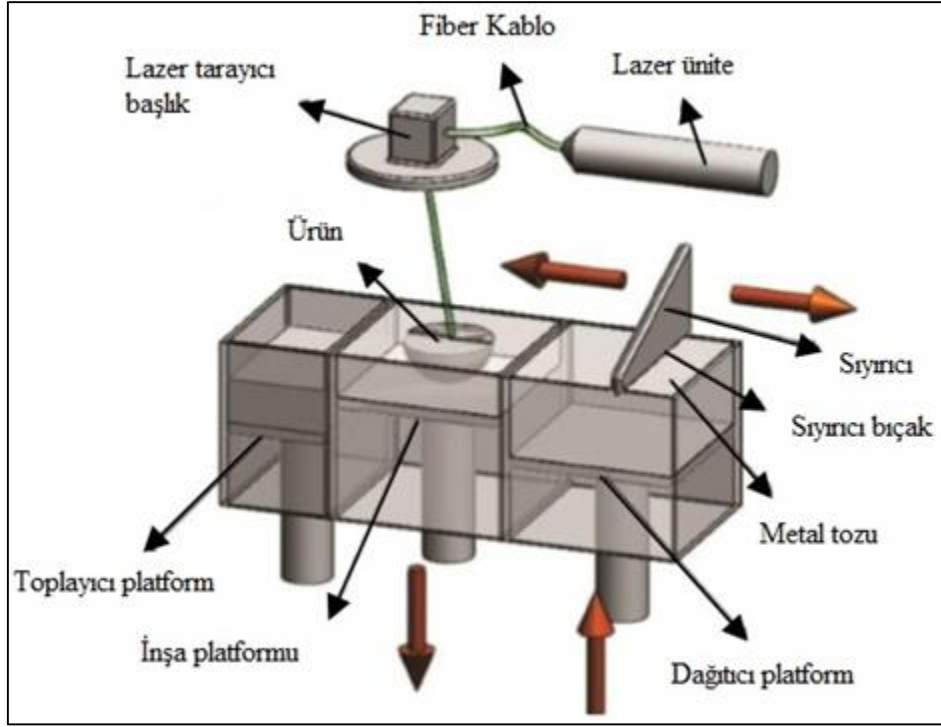
Günümüzde en çok kullanılan hammaddeyi eritmekte kullanılan enerji kaynakları ise ışın ve elektrik arkı olarak ayrılabilir. İstenilen yüzey kalitesi, maliyet ve verimliliğe göre kullanılan enerji kaynakları kendi içerisinde farklı dallara ayrılmaktadır. Hammaddeyi birleştirme tekniğine göre metal eklemeli imalatının dağılımı Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Metal eklemeli imalat biçimleri [11].

Sınıflandırma	Terminoloji	Malzeme Biçimi
Toz yataklı füzyon	Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS)	Toz
	Elektron ışını ile eritme (EBM)	
	Seçici lazer eritme (SLM)	
Yönlendirilmiş enerji birikimi	Elektron ışını ile serbest formlu imalat (EBF)	Toz, Tel
	Lazerli net şekillendirme (LENS)	
	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

2.2.1. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS)

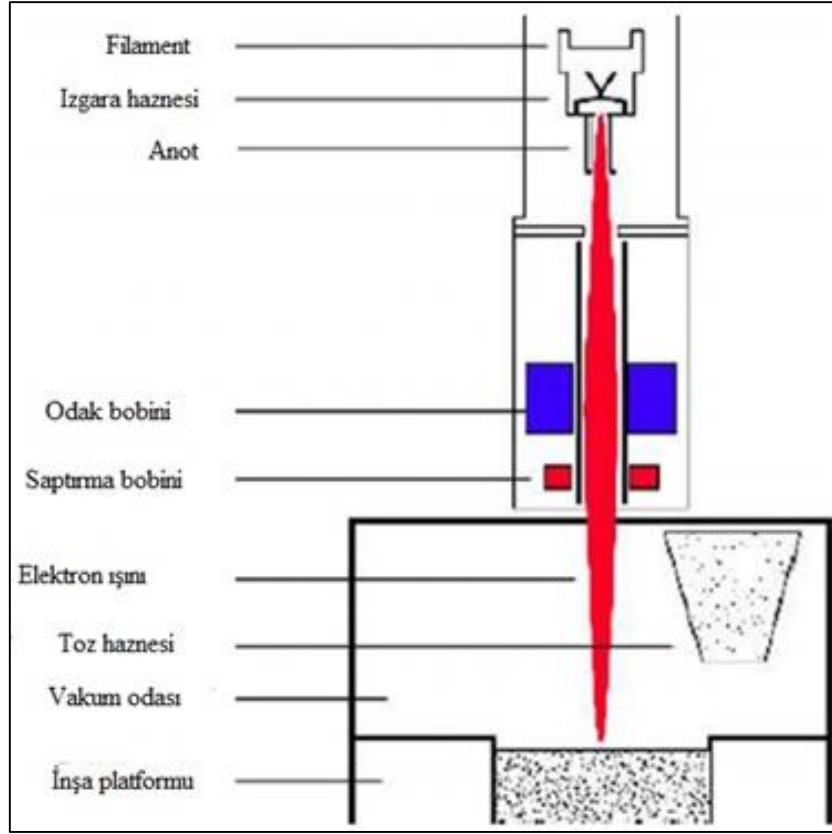
Doğrudan metal lazer sinterleme yöntemi EOS tarafından 1994 yılında Almanya’da geliştirilmiş ilk ticari hızlı prototipleme yöntemidir. Doğrudan metal lazer sinterleme, üç boyutlu bilgisayar modelinden direkt nihai yapıyı oluşturabilen birkaç üç boyutlu yazdırma tekniğinden bir tanesidir. Bu sistemde metal tozları bağlayıcı herhangi bir farklı katkı madde kullanılmadan sadece lazer ışının sağladığı ısı kullanılır. Yöntemde 20 ile 40 µm arasında değişen tanecik boyutlarına sahip metal tozları lazer ile kısmen eritilerek birbirine bağlanarak yapı oluşturulur. İşlem sırasında oluşturulan numunenin kalınlığı 75 µm civarında olup, dakikada yaklaşık 0,1 grama kadar hammadde sinterlenebilmektedir. Ayrıca oluşturulan yapının yoğunluğu %95 olduğundan imalat süresince ön sinterlemeye gereksinim duyulmaz. Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilen sistem, lazer tarayıcı kafanın alttaki platforma serpilen metal tozları üzerinde hareket etmesiyle birbirine kaynaşan tozlardan yapıyı oluşturmaktadır. Bu yöntem, teknik olarak seçici lazer eritme (SLM) yönteminin benzeri gibi gözüксе de temel fark taneciklerin bağlanma ısısıdır. Seçici lazer eritme yönteminde tozlar tamamen eritilerek yüzey oluşturulur. Fakat doğrudan metal lazer sinterleme yönteminde toz tanecikleri erime sıcaklığına yakın bir değerde yüzeysel olarak eritilerek bağlanmaktadır [12,13].



Şekil 2.1. Doğrudan metal lazer sinterleme makinesi [14].

2.2.2. Elektron Işını ile Eritme (EBM)

Elektron ışını ile eritme yöntemi, tungsten filament ile oluşturulan bir elektron tabancasının en az 1×10^{-5} mbar vakum altındaki toz yatağı üzerine elektron bombardımanı ile oluşturulan $3500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar yüksek sıcaklıklara erişilmesiyle metal tozlarının üç boyutlu yapı oluşacak şekilde bağlanması olarak tanımlanabilmektedir. Bu sistemde kullanılan hammaddenin elektronla etkileşim sağlaması için metal olması gerekmektedir. Günümüzde titanyum ve kromiyum-kobalt alaşımları, refrakter metaller, süper alaşımlar yaygın olarak bu sistemde kullanılmaktadır. Toz yatağın tümüne eş zamanlı erişebilmesinden dolayı, yüzeyi taramak zorunda kalan lazer sisteme göre daha hızlıdır. Ancak oluşan nihai ürünün gözenekli yapısından dolayı, yüzey kalitesi lazerli sistemlere göre daha düşüktür. Bu sistem sayesinde çok parçalı montaj gerektiren yapılar tek parça halinde üretilebilmekte, bu sayede ham maliyet azaltılması sağlanabilmektedir. Şekil 2.2'de şematik olarak gösterilen elektron ışını ile eritme sistemi, toz yatağı bütünüyle optimum şekilde ısıttığı için numunede hiç kalıcı gerilme oluşmaz [15,16].



Şekil 2.2. Elektron ışını ile eritme makinesinin şematik gösterimi [14].

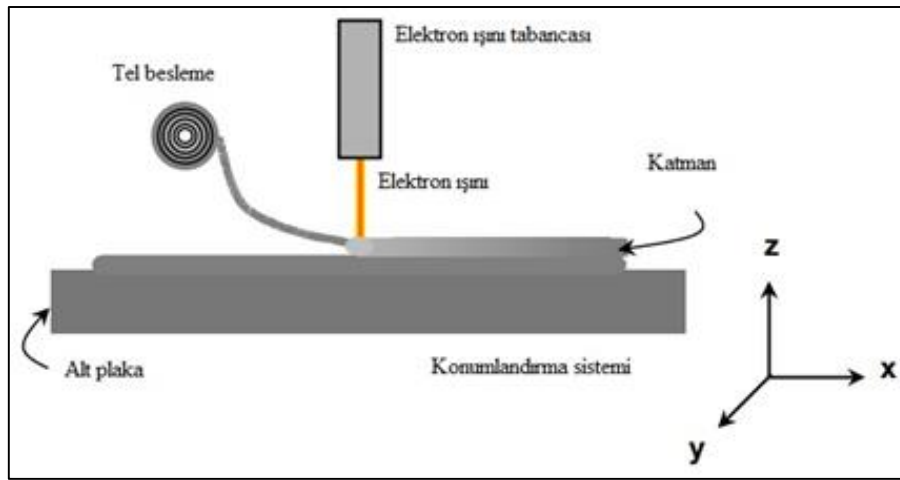
2.2.3. Seçici Lazer Eritme (SLM)

Seçici lazer eritme sistemi, doğrudan metal sinterleme yöntemi ile benzer özelliklerdedir. Aradaki fark, kullanılan yüksek yoğunluklu lazer sayesinde toz formundaki hammaddenin tamamen koruyucu bir atmosfer altında eritilmesiyle katmanların oluşturulmasından kaynaklanmaktadır. Seçici lazer eritme yöntemiyle oluşturulan katman kalınlığı 20-100 μm boyutları arasında değişebilmekte ve yüzey pürüzlülüğü yaklaşık 9-10 μm arasında olmaktadır. Sonuçta lazer sinterlemeye göre yüzey kalitesi daha yüksek elde edilmektedir [17].

2.2.4. Elektron Işını ile Serbest Formlu İmalat (EBF³)

Elektron ışını ile serbest formlu imalat yöntemi NASA tarafından havacılıkta kullanılan titanyum ve alüminyum alaşımlarını en az hammadde atığıyla, üretim maliyetlerini düşürmek için geliştirilmiş bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntem

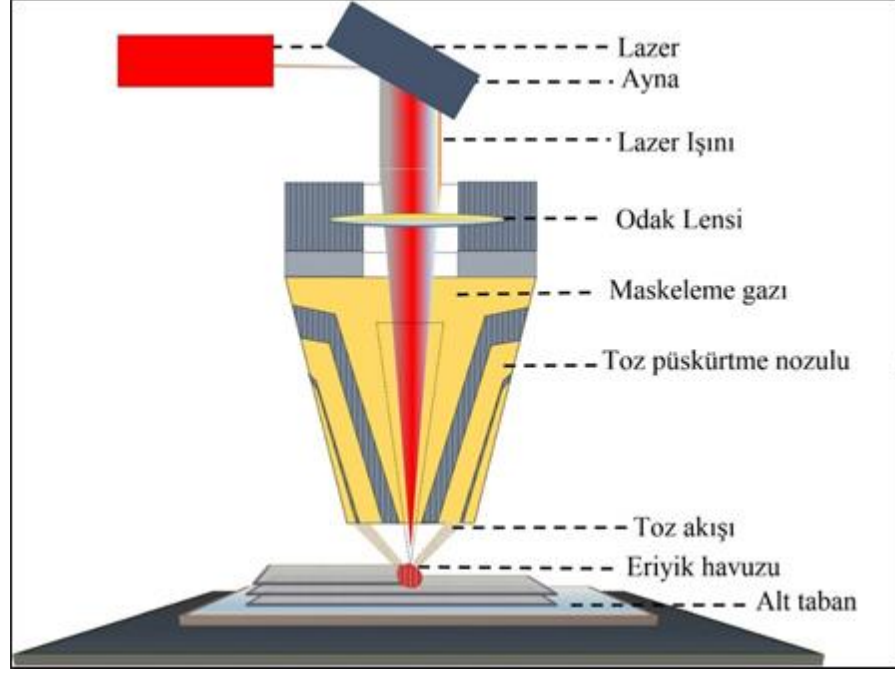
özellikle talaşlı imalat yapılamayacak kadar büyük hacimdeki girintili yapıların üretilmesine imkan tanıdığı için tercih edilmektedir. Şekil 2.3'te şematik olarak gösterildiği üzere sistem tel biçiminde hammaddenin yüksek vakumlu bir ortamda elektron ışını ile eritilerek en az 1×10^{-4} torr büyüklüğündeki vakum ortamında yığma oranı hacimsel olarak $2500 \text{ cm}^3/\text{sa}$ değerlerine kadar katmanlaşması esasına dayanmaktadır. Hammaddenin neredeyse israf edilmeden tamamının, harcanan enerjinin ise %95'nin verimli olarak kullanılabilmesi bu sistemin en büyük faydasıdır [18].



Şekil 2.3. Elektron ışını ile serbest formlu imalat sisteminin şematik gösterimi [18].

2.2.5. Lazerli Net Şekillendirme (LENS)

Bu sistemde lazerle kaplama yönteminin uygulanabilir bir modeli olup, bilgisayar kontrollü merkezde bulunan lazer ışınının etrafından nozul yardımıyla toz formundaki hammadde püskürtülmesi ve hareketli alt taban yüzeyinde erimiş hammadde oluşması sağlanarak katmanlama yapılması işlemidir. Şekil 2.4'te lazerli net şekillendirme yöntemi şematik olarak gösterilmiştir. Bu yöntemin sağladığı en önemli fayda ise üretilen parçaların yüzey kalitesinin talaşlı imalat kadar iyi olmasından dolayı, işlem bittikten sonra yüzeyi düzeltmeye gerek yoktur. Fakat, lazerin oluşturduğu yüksek ısı erimiş haldeki hammaddenin düzgün yüzeyler oluşturmasını zorlaştırmaktadır, bunun için işlem parametrelerinin iyi ayarlanması gerekmektedir. Günümüzde bu yöntem titanyum, çelik, alüminyum gibi çeşitli hammaddelerin başarılı bir şekilde kullanılabilmesine imkan vermektedir [19].



Şekil 2.4. Lazerli net şekillendirmenin şematik gösterimi [20].

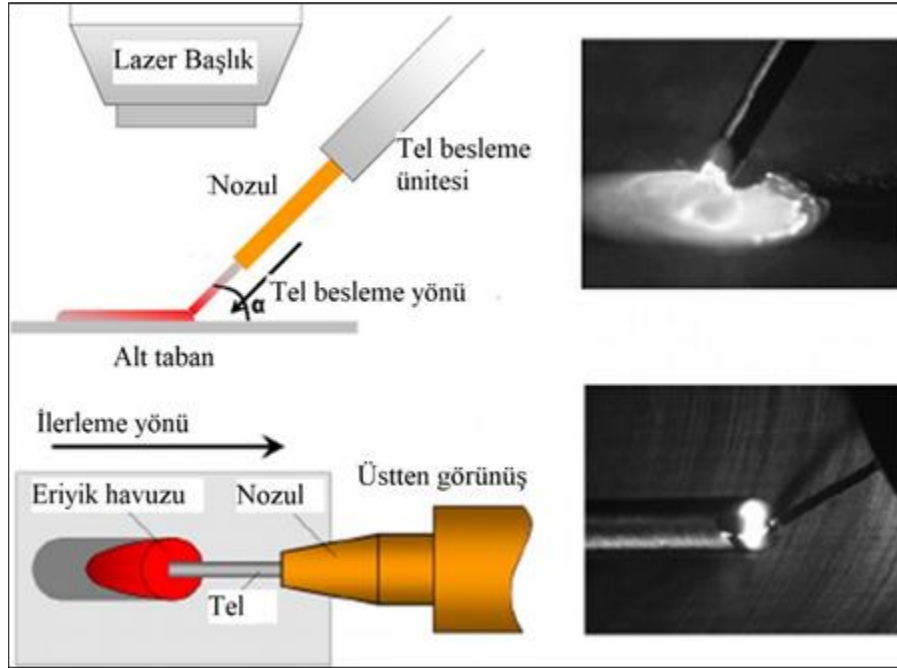
2.2.6. Lazerli Birleştirme (LC)

Lazerli birleştirme temelde, lazerli net şekillendirme ile benzer işlem sonrası talaşlı imalatla yüzeyi düzeltmeye gereksinim duyulmayan yüksek yüzey hassasiyeti sağlayan bir eklemeli imalat yöntemidir. Lazerli birleştirme yönteminde 3 veya 5 eksenli, nümerik olarak kontrol edilen lazer tarayıcı ve alt taban platformuna eş zamanlı olarak metal alaşım tozu püskürtülür ve sabit olan alt tabanda eriyik oluşturularak işlem katmanlama oluşturmak için tekrarlanır. Lazerli net şekillendirme (LENS) sisteminde lazer tarayıcı kafa sabit, taban platformu hareketli iken, bu yöntemde ise hem tarayıcı hem platform hareketlidir [21].

2.2.7. Tel ve Lazer Eklemeli İmalat (WLAM)

Tel ve lazer eklemeli imalat yöntemi, diğer lazer biriktirme yöntemleri gibi füzyon tabanlı lazer kaplama teknolojisidir. Bu sistemde kullanılan lazer tarayıcıya otomatik tel besleme ünitesi ile hammadde sağlanır ve nümerik kontrollü alt taban veya robot sistemi ile hareket sağlanır. Ayrıca isteğe bağlı maskeleme gazı, ön ısıtma ünitesi veya soğutma ünitesi eklenebilmektedir. Şekil 2.5'te şematik olarak gösterilen yöntemde alt

tabana odaklanan lazer tarayıcıya tel besleme ünitesinden hammadde sağlanır ve tabanda lazerin sağladığı enerji ile eriyen tel katmanlanır ve yapı oluşturulur. Bu sistemin toz tabanlı sistemlere göre en büyük avantajı daha yüksek malzeme yığıma oranına sahip olması ve bu sayede büyük boyutlu parçaları üretmeye daha uygun olmasıdır [11].



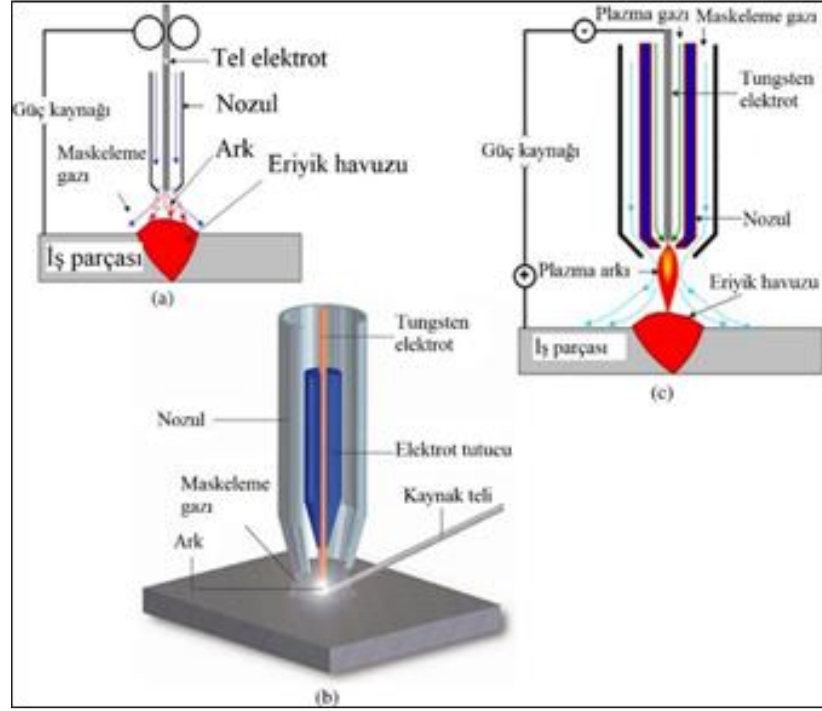
Şekil 2.5. Tel ve lazer eklemeli imalat sisteminin yan ve üstten şematik ve işlem sırasındaki görüntüleri [22].

2.2.6. Tel Ark Eklemeli İmalat (WAAM)

Tel ark eklemeli imalat yönteminde tel formundaki hammaddeyi eritmek için elektrik arki kullanılmaktadır. Bu yöntem toz beslemeli sistemlere göre daha düşük hassasiyete, fakat daha yüksek eriyik yığıma oranına sahiptir. Bu değerler, lazer ve elektron ışın kaynaklarında hammadde yığıma oranı dakikada 2-10 gram arasında iken, ark kaynağı ile dakikada 130 grama kadar çıkabilmektedir [23].

Tel ark eklemeli imalat yönteminde hammaddeden neredeyse hiç atık oluşmadan kayıpsız olarak faydalanılabildiği, büyük boyutlu ve orta seviyedeki karmaşık parçaların sorunsuzca üretilebilmesi ve diğer metal eklemeli imalat yöntemlerine ekonomik oluşu bu tekniği talep gören bir üretim yöntemi haline getirmektedir.

Tel ark eklemeli imalat yönteminde arkı sağlayacak ısı kaynağı olarak, Şekil 2.6’da şematik olarak gösterilen gaz metal ark kaynağı (GMAW, MIG/MAG), gaz tungsten ark kaynağı (GTAW, TIG) ve plazma ark kaynağı (PAW) kullanılmakta olup, bu sistemler üzerinden araştırmalar yapılarak yeni teknolojik sistemler geliştirilmektedir.



Şekil 2.6. Eklemeli imalatta ark kaynağının uygulanması a) Gaz metal ark kaynağı, b) Plazma kaynağı, c) Gaz tungsten ark kaynağı [11].

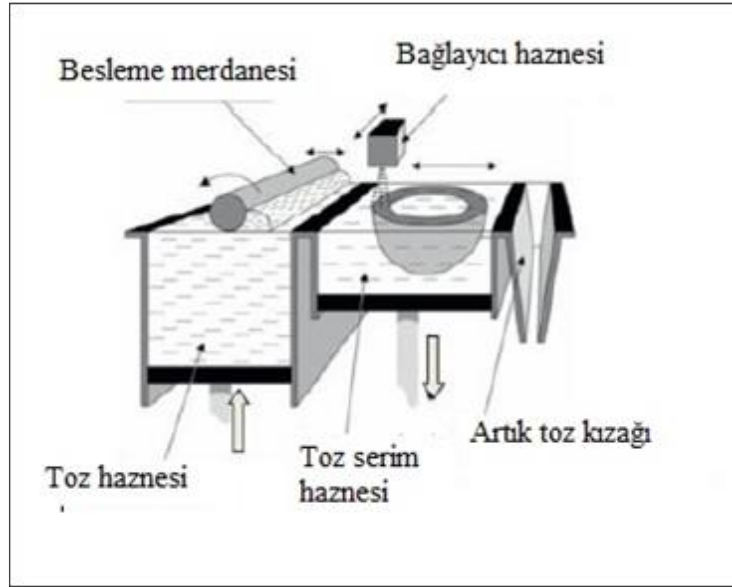
Gaz metal ark kaynağı (GMAW) elektrik devresinin tükenen bir elektrot yardımıyla taşınıp iş parçası ile arasında ark oluşturmasıyla gerçekleştirilen kaynak yöntemidir. Gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) ve plazma ark kaynağı (PAW) yöntemlerinde tükenmeyen tungsten elektrot kullanılır ve kaynak teli dışarıdan sisteme dahil edilir. Bu yöntemlerin kendi aralarındaki en önemli farkı ise ark plazma kaynağının, gaz tungsten kaynağına göre üç kata kadar ark gücü sağlayarak kaynak yüzeyinde daha az bozuntular sağlayabilmesi ve bu sayede küçük yapıları daha hızlı oluşturabilmesidir [11,24].

Bahsi geçen kaynak sistemlerinin eklemeli imalatta kullanımı ise robot ve CNC kontrol ünitelerle sağlanmaktadır. Bu ünitelere bağlanan kaynak torçları önceden

tanımlanan yollar üzerinde tel formundaki hammaddeyi eriterek katmanlar oluşturur ve bu sayede üç boyutlu parçalar ortaya çıkmaktadır [25].

2.2.8. Toz Yataklı ve Püskürtmeli 3D Yazıcı (3DP)

Toz yataklı ve püskürtmeli 3D yazıcı sisteminde, lazer veya elektron ışını kullanarak eritmek yerine toz formundaki hammadde yatağının üzerine CNC kontrollü ünite tarafından bağlayıcı püskürtülerek üç boyutlu yapı üretilir. Bu yapı daha sonra sinterlenerek nihai ürün elde edilmiş olur. Şekil 2.7’de toz yataklı ve püskürtmeli 3D yazıcı şematik olarak gösterilmiştir. Bu yöntemin en büyük avantajı lazer ve elektron ışını kullanılan sistemlere göre daha düşük maliyetli bir eklemeli imalat yöntemi olmasıdır, fakat hassasiyeti düşüktür [26].

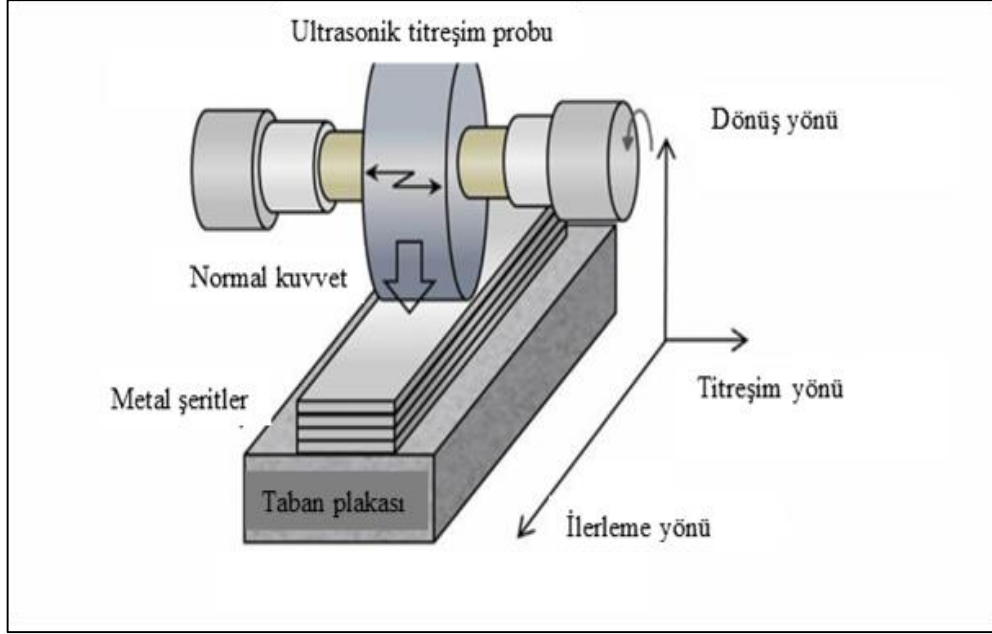


Şekil 2.7. Toz yataklı püskürtmeli 3D yazıcının şematik gösterimi [26].

2.2.9. Ultrasonik Eklemeli İmalat (UAM)

Ultrasonik eklemeli imalat yönteminde levha formundaki metal malzemeler ultrasonik kaynak kullanılarak birbirine yapıştırılır. Bu şekilde üst üste dizilen katmanlardan üç boyutlu geometride bir yapı oluşturulur. Yaygın olarak alüminyum, bakır, titanyum ve paslanmaz çelik levhaların kullanıldığı bu yöntemde nihai şeklin oluşması için

yüzeyden talaş kaldırılması gerekmekte olup, atık oranını en az seviyede tutmak için 0,150 mm yüksekliğine ve 25 mm kalınlığında levhalar kullanılmaktadır. Şekil 2.8’de şematik olarak gösterilen bu yöntemin sağladığı en büyük avantaj, farklı metallerin bir araya getirilebilmesine imkan vermesi ve yöntemde tamamen erime sağlanmadığı için enerji tasarrufu sağlamasıdır [27].



Şekil 2.8. Ultrasonik eklemeli imalatın şematik gösterimi [28].

BÖLÜM 3

LİTERATÜR TARAMASI

3.1. METAL EKLEMELİ İMALAT ÜZERİNE ÇALIŞMALAR

Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemlerindeki gibi talaş kaldırmaya ihtiyaç duyulmadan her bir katmanın birbirine kaynaklanarak gerçekleştirilen imalat yöntemidir. Bu metot aynı zamanda eklemeli katman imalatı (ALM), hızlı prototipleme (RP), doğrudan malzeme biriktirme (DMD), serbest şekil üretme (FFF) ve karma katman üretimi (HLM) olarak da bilinmektedir [29,30]. Geleneksel imalat yöntemlerinin tersine ham malzemeyi işlemeden şekillendirmesi sebebiyle eklemeli imalat, fiziksel olarak içi oyuk, birbiri üzerine girintili gibi daha karmaşık tasarımları oluşturmayı mümkün kılabilir. Sağladığı bu avantajları sayesinde eklemeli imalata talep her geçen gün artmaktadır [29,31].

Eklemeli imalatta üst üste yığılan her katman 3 boyutlu CAD programı tarafından aynı geometride oluşturulmaktadır. Eklemeli imalat karmaşık yapıda geometrilerin herhangi bir destekleyici yapı gerektirmeden ve malzeme israfından kaçınarak üretilmesine imkan tanımaktadır. Sunduğu yüksek şekillendirme kabiliyetinin yanı sıra, geleneksel imalata göre daha düşük maliyet, yüksek oranda hammaddeden faydalanma ve enerji verimliliği sayesinde daha çevreci oluşu eklemeli imalatı popüler kılmaktadır. Sağladığı üstün kabiliyet eklemeli imalatın otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde rekabetçi konuma gelmesini sağlamıştır. Bu sayede Formula 1 araçları ve Airbus A380 uçağının kanat oluşu gibi gelişmiş ve hassas teknoloji gerektiren önemli parçaları başarıyla üretilebilmektedir [30]. Eklemeli imalat üzerine çalışmalar yürüten Norsk Titanyum firması ticari uçak firması Airbus ile anlaşmaya vararak bazı uçak gövde ve kanat parçalarını tel ark eklemeli imalat yöntemiyle üretmeye başlamıştır. Bu sayede havacılık sanayisinde kullanılan ve oldukça pahalı olan

titanyum alaşımlarında atık oranını minimize ederek tasarruf edilmeye başlandığı belirtilmiştir [32].

Metal olmayan malzemelerde uygulanabildiği gibi metal malzemeler ile eklemeli imalat gerçekleştirilebilmekte ve bunlarla ilgili günümüzde deneysel çalışmalar devam etmektedir. Metal malzemelerde, temel olarak toz ve tel beslemeli sistemler kullanılmaktadır [33]. Eklemeli imalat ile aynı zamanda farklı malzemeler bir arada kullanılarak üretim yapılabilir. Bu şekilde mekanik gerilmelerin yüksek olduğu, korozif ve yüksek ısıya maruz kalan farklı malzeme kombinasyonları ile fayda sağlanabilmektedir. Diğer taraftan, endüstride kullanılan yüksek dayanıma sahip çelik kalıp ve takımlar aşındıktan sonra veya hasara maruz kalınca onarımları çoğunlukla sahip olduğu karmaşık yapı nedeniyle ya imkansız ya da maliyetli olmaktadır. Böyle durumlarda eklemeli imalattan faydalanılarak düşük maliyet ile sorunun üstesinden gelinebilmektedir [2,10].

Yılmaz ve Uğla, metal eklemeli imalatla ilgili önceki çalışmalarını derleyerek mekanik özellik, mikroyapı ve üretim yöntemleri arasında değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Yazarlar öncelikle, tel ark eklemeli imalatın büyük ölçekteki parçaların üretimi için ekonomik ve uygun bir yöntem olduğundan bahsetmişlerdir. Mekanik özelliklerin ise işlem parametrelerinin iyi optimize edilmesine bağlı olduğundan, metal eklemeli imalat yöntemi sayesinde yüksek yoğunluklu geometriler oluşturulabildiğinden, fakat tekrarlı yüksek ısı nedeniyle oluşan kalıcı gerilmelerin sonucu olarak mikroyapıda anizotropik yapının meydana gelebileceğinden bahsetmişlerdir. Son olarak yazarlar bazı eklemeli imalat yöntemleri üzerine çalışma yapıldığı halde metal eklemeli imalatta birden fazla hammaddenin kombine edilip kullanılmasıyla ilgili literatürde yeterli çalışma bulunmadığından bahsetmiştir [34].

Rombout vd., çalışmalarında seçici metal sinterleme yöntemiyle yapılan eklemeli imalat çalışmalarında demir tozuna bakır, silisyum, titanyum, karbon ve oksijenin etkilerini araştırmak için üretilen numunenin karakteristik özelliklerini incelemişlerdir. Yazarlar oksijen atmosferinde erime hızının demirin ekzotermik oksidasyonu nedeniyle arttığını, demir tozuna karbon takviyesinin tek katmanda yüzey kalitesini arttırdığını, erime sıcaklığını ve porozite eğilimini düşürdüğünü,

hammaddeye silisyum ve titanyum eklemenin yüzey kalitesini düşürdüğünü ve düzensiz porozite yarattığını, hammaddeye bakır takviyesinin eriyik havuzunda herhangi bir etki yaratmadığını gözlemlemişlerdir. Yazarlar alaşım tozları arasındaki boşlukların sinterleme esnasında tamamen kaybolmadığından gözenekli bir yapı elde edildiğini, bu sorunu çözmek ve malzeme yoğunluğunu arttırmak için ısıl işlem gerektiğini belirtmişlerdir. Son olarak, ısıl işleme gereksinimi ortadan kaldıracak toz geliştirildiğini, fakat bu tozun yine de istenen mekanik gereksinimleri karşılamadığını belirtmişlerdir [35].

Eklemeli imalata endüstrinin her alanında talep gün geçtikçe artmaktadır. Tıp alanında çalışmalarını sürdüren Alaca ise çalışmasında Ti6Al4V titanyum alaşımını toz formunda seçici lazer ergitme yöntemi kullanarak kafatası implantı imal etmiştir. Kullandığı deneğin ilk önce kafatası yapısını tomografi yardımıyla üç boyutlu oluşturan yazar daha sonra bu yapıyı CAD yazılımı ile modellemiştir. Oluşturduğu bilgisayar modellemesini seçici lazer sinterleme yöntemiyle üreten yazar bu implantı deney tavşanları üzerinde uygulamış, implantın bünyeye başarılı bir şekilde uyum sağladığından bahsetmiştir [36].

Dursun, toz formundaki Ti6Al4V alaşımını seçici lazer ergitme yöntemi kullanarak farklı tasarımda oluşturulan nihai ürünün boyutsal farkını incelemiştir. Yazar tasarımda oluşturduğu yapıların her birine 0,3, 0,5 ve 0,7 mm aralığında değişen kolon aralıkları vermiş olup deney sonucu ürettiği numunelerde 150-300 µm arasında kolon kalınlıklarında artışın meydana geldiğini görmüştür. Ayrıca bilgisayarlı mikro tomografi analizi sonucunda kübik ve oktahedroid yapıların kolonlarında ergimiş metalin oluşturduğu sarkmalar olduğunu belirtmiş, bu sarkmaların üretilen numunelerin hacimsel boşluk oranının tasarıma göre daha düşük olmasına neden olduğu sonucuna ulaşmıştır [37].

Choi ve Chang, lazer beslemeli metal biriktirme yönteminde toz formundaki H13 takım çelik tozunu kullanarak ürettikleri numunenin boyutsal ve karakteristik özelliklerini incelemişlerdir. Numunenin karakteristik özelliğinin lazer gücü, katman çapı, ilerleme hızı, toz akış hızına ve katmanların örtüşme yüzdesine bağlı olarak

değiştiğini belirten yazarlar, bu sebepten ötürü her katmanın boyutlarını sisteme entegre ettikleri sensör ile geri besleme verisi oluşturarak kontrol altında tutmuşlardır. Sonuç olarak, poroziteden kaçınmak için lazer gücünün ve katmanlar arası dökülen toz miktarının iyi optimize edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, numunenin üst yüzeyinde ortalamanın biraz üzerinde sertlik belirlenmiş olup, bunun sebebinin yüzeyin soğuma hızının iç katmanlardan fazla olmasından dolayı olduğunu ifade etmişlerdir. Son olarak, mikroyapı incelemelerinde düzensiz ve aşırı ısıdan dolayı alt ve üst bölgede dallantılar olduğundan ve toz beslemeli metal eklemeli imalat ile elde edilen yüzey kalitesinin talaşlı imalatla erişilebilen yüzey kalitesine yaklaşabildiği belirtilmiştir [38].

Toz tabanlı eklemeli imalat sistemlerinde oluşturulan yapı, işlem esnasında dikey olarak desteklenemediğinden yapının yükselme hızı düşüktür. Tel tabanlı sistemlerde ise birim zamanda daha fazla yığıma oranı gerçekleştirilebilmesi ve dikey olarak yapının toz tabanlı sistemlerdeki gibi kısıtlanmaması sebebiyle bu karakteristik problemin üstesinden gelinmektedir. Tel tabanlı sistemlerin bu avantajıyla gazaltı kaynak sistemleri kullanılarak tel ark eklemeli imalat geliştirilmiştir [29,39].

Syed vd., doğrudan lazer eklemeli imalat yönteminde toz ve tel formunda hammadde kullanarak karakteristik ve mikroyapı yönünden incelemeler yapmışlardır. Araştırmalarında, argon gaz atmosferi altında 1500 watt gücünde diyot lazer kullanan yazarlar hammadde olarak sırasıyla 0,8 mm çapında tel ve 53-150 µm çapında toz formunda 316L paslanmaz çelik tercih etmişlerdir. Sonuç olarak, toz formundaki hammadde ile daha yüksek yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Hammadde besleme yönü açısından ise her iki hammaddenin ilerleme yönüne göre lazerin önünden beslenmesinin daha düzgün yüzeyler sağladığını belirtmişlerdir. Ayrıca, üretilen numuneler mikroyapısal olarak ele alındığında, kayda değer bir fark olmadığı belirtilmiştir [40].

Liu vd., 4 mm çapındaki tel formundaki Inconel 625 alaşımı üzerinden ark kaynağı sistemine benzer şekilde elektrik akımı geçirerek devreyi alt tabanla tamamlamış ve bu sırada ark sayesinde ergime derecesine gelen telin üzerine 3 kW gücünde lazer ışını odaklayarak metal yığıma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, ark ile elde

ettikleri ısı sayesinde lazer, ark kullanılmadan oluşturulmuş sisteme göre eriyik havuzunun alt tabana daha iyi bağlandığını ve lazer ışını için daha az enerji harcadığını belirtmişlerdir [41].

Nikam vd., tel beslemeli plazma ark kaynak parametrelerinin oluşturulan katman geometrisine etkisini araştırmışlardır. Hammadde olarak tel formundaki 0,3 mm çapında, sertleştirilmiş TS EN ISO 4957 takım çeliğini Argon gazıyla oluşturdukları plazma ile eriterek katmanlamışlardır. Sonuç olarak, yüksek plazma gücü ve düşük tel besleme hızı nedeniyle katmanlarda aşırı ergime, hatta buharlaşma gözlemlenmiştir. Düşük plazma gücü ve yüksek tel besleme hızında ise yetersiz ergime gerçekleşmiş ve katmanlar birbirine istenildiği gibi bağlanamamıştır. Yazarlar, en uygun işlem parametrelerini 42 gr/sa ergitme oranı, 450 W plazma gücü ve 1275 mm/dk tel besleme hızı olarak belirlemişlerdir [42].

Clark vd., uçakların gaz türbinlerinde kullanılan gövde parçalarının tel ark eklemeli imalat yöntemiyle üretilebilirliğini araştırmışlardır. Argon gazı atmosferinde bilgisayar destekli MIG kaynak makinesinde hammadde olarak bir nikel alaşımı olan Inconel 718 kullanmışlardır. Yazarlar, numunelerinde mikro düzeyde çatlak oluştuğundan bahsetmiş olup, bunun sebebinin kalıcı gerilmeler ve çarpılmalardan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bu sonuçların oluşmaması için katmanların soğuma hızlarının ve diğer parametrelerin çok iyi ayarlanması gerektiğini vurgulamışlardır. Sonuç olarak, bu imalat yönteminin karmaşık parçaların üretimi için ekonomik ve uygun bir üretim yöntemi olabileceğini belirtmişlerdir [43].

Zhao vd., tel ark eklemeli imalat yönteminde kaynağın başladığı ilk pasodan son pasoya kadar ısının oluşturduğu etkiyi araştırmışlardır. Yazarlar çalışmalarını Argon gazı atmosferinde 1,2 mm kalınlığında H08Mn2Si alaşım teli kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, bir önceki pasonun sonraki pasoya ön ısıtma etkisinin olduğunu, birbiri üzerine atılan pasolar kendi aralarında incelendiğinde ise katılmış alt pasoda yeniden ergime oluştuğunu ve bu ergimenin sonucu olarak her katmanın metalurjik olarak bağlanma sağladığını, katman yüksekliği arttığından eriyik havuzunun sıcaklığı azalmakta ve azalan kontak ısı iletimi konveksiyon ve radyasyonla yayılan ısıdan daha büyük olduğunu ifade

etmişlerdir. Son olarak, aynı yönde atılan pasoların sıcaklık gradyanının zıt yönde atılan pasolara göre daha büyük olduğunu ve bu sebepten dolayı kontak ısı iletiminin aynı katmanlama yönünde daha iyi olduğunu belirtmişlerdir [44].

Adebayo, otomatik gazaltı kaynak ünitesini, sırasıyla CNC sürtünme kaynak makinesine, kaynak robotu ve CNC taşlama makinesine entegre ederek tel ark eklemeli imalatında makine etkisini araştırmıştır. Soğuk metal transferi yapabilen kaynak makinesinden yararlanan yazar, hammadde olarak 0,8 ile 1,2 mm çaplarında G3Si1 çelik teli argon ve karbondioksitten oluşan koruyucu atmosfer altında kullanarak numuneleri üretmişlerdir. Sonuç olarak, CNC taşlama makinesinin yüksek doğrusal ilerleme hassasiyeti sayesinde daha düzgün geometriler elde ettiğini belirtmiştir. Ek olarak kaynak pasolarının atılacağı taban yüzeyinin taşlanmasının poroziteyi azaltmaya yardımcı olduğunu belirtmiş olup, yüzey kalitesini arttırmak için girintili katman duvarlarından talaş kaldırılacaksa geometrik optimizasyonun iyi belirlenmesi hususuna değinilmiştir. Ayrıca geleneksel talaş kaldırma yöntemleriyle eklemeli imalatın bir arada kullanıldığı sistemler geliştirmenin yüzey kusurlarını gidermede daha faydalı olabileceğini vurgulamıştır [4].

Kulkarni ve Dutta, eklemeli imalat ile geleneksel talaşlı imalatı bir arada kullanmışlardır. Çalışmada yazarlar eriyik yığıma modelleme tekniğini kullanarak oluşturulmuş 3,81 mm yüzey pürüzlülük değeri olan plastik tabanlı numuneleri CNC freze yardımıyla Ra 12,7 μm yüzey pürüzlülük değerlerine indirgemişlerdir. Sonuçta, eklemeli imalat numunesinin yüzeyini CNC freze ile düzelterek istedikleri yüzey kalitesini elde etmişlerdir. Elde ettikleri bulguları değerlendiren yazarlar eklemeli imalatın ve geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinin kendilerine göre zayıflıkları ve avantajları bulunduğunu bu sebeple ikisinin bir arada kullanımını optimize edilerek başarılı sonuçlar elde edilebileceğinden söz etmişlerdir [45].

Toz beslemeli sistemlerde malzeme yığıma oranı saatte 0,2 kg, tel beslemeli sistemlerde ise bu değer saatte 1 kg civarına kadar ulaşabilmektedir. Ayrıca tel ark eklemeli imalatı ile istenen geometrik şeklin oluşturulması için üst üste atılan kaynak pasolarının en az 1-2 mm genişliğinde girintiler oluşturduğundan, bunun yüzeyi düzensiz hale getirdiği bilinmektedir. Bu düzensizlik ise parça oluşturulduktan sonra

yüzeyinden talaşlı imalat ile bir miktar talaş kaldırılarak giderilebilir. Gazaltı kaynak yöntemlerini eklemeli imalatta kullanmak diğer yöntemlere göre daha düşük maliyetlidir ve enerji verimliliği yüksek olmasının yanı sıra daha kontrol edilebilir bir üretim yapmayı sağlar. Daha esnek ve hassas üretim yapmaya imkan vermesinden dolayı bu yöntemi kullanarak katmanlı üretim yapmak cazip hale gelmiştir [46,47].

Tel ark eklemeli imalat stratejisinde metal ergitme söz konusu olduğundan dolayı yüksek sıcaklıklar ortaya çıkmaktadır. Bu sıcaklık dolayısıyla parça üzerinde kalıcı gerilme ve çarpılmalar meydana gelmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda, işlem öncesi, işlem sırası ve işlem sonrası stratejilerden bahsedilmiştir. Ding ve arkadaşlarına göre işlem öncesi kaynak yapılacak alt tabanın sağlamca yüzeye kenetlenmesiyle çarpılmalara karşı faydalı olduğu belirtilmiştir [48].

Busachi vd., tel ark eklemeli imalat yöntemlerini incelemişler ve günümüzde bu sistemlerin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Öncelikle tel ark eklemeli imalat ile gereksiz hammadde kullanımının %90'lar seviyesinden %10 seviyelerine gerilediğinden söz eden yazarlar, kaynak pasoları atılırken işlem sırasında kalıcı gerilmeleri azaltabilecek en etkili yöntemin her pasodan sonra yüzey haddelemesi olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca numune üretimi sırasında titreşimin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için titreşim önleyici yatak kullanımını ve Argon gibi maskeleme gazlarının otonom sistemlerde kullanımı için merkezi bir sistemden beslenmesinin hem ısı işleminde kullanılmasında hem de mevcut gaz tüplerini uzun süreli üretimlerde değişim zamanını ortadan kaldırması amacıyla daha verimli olabileceğini önermişlerdir [25].

Williams vd., tel ark eklemeli imalat çalışmalarını derleyerek değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Çalışmalarında bir titanyum alaşımı olan Ti6Al4V, alüminyum ve çelik malzeme ile üretilmiş çeşitli geometrileri incelemişlerdir. Tel ark eklemeli imalatın ekonomik olması, yapısal düzgünlük sağlaması, yüksek malzeme yığına oranına sahip olmasından dolayı günümüzde yaygın kullanılan geleneksel imalat yöntemlerinin yerini alabileceğini, işlem sırasında yüksek kalitede ergime sağlandığını ve çok az yüzeyde çok az cüruf oluştuğunu belirtmişlerdir. Numune üretimi sırasında fazla ısı ve kaynak karakteristiğinden dolayı numune üzerinde istenmeyen şekil

bozuklukları ve çarpıklıklar için alt tabana simetrik kaynak pasosu atılması, kalıcı gerilmelerin bertaraf edilmesi için kaynak pasolarının haddelenmesi ve optimum işleme parametrelerin belirlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir [49].

Queguineur vd., deniz taşıtları uygulamalarında sıklıkla kullanılan büyük döküm parçalarındaki döküm kusurlarını elimine etmek amacıyla östenitik 316L paslanmaz çelik ve bakır-alüminyum alaşımlı malzemelerin tel ark eklemeli imalat yönteminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, 1,2 mm çapında tel ve soğuk metal transfer (CMT) destekli kaynak makinesi kullanılarak üretilen yapı üretime harcanan zaman, korozyon ve mekanik özellik açısından incelenmiştir. Sonuçta paslanmaz 316L çeliğinin, aynı malzemedan yapılan kaynakla birleştirilmiş levhalara benzer mekanik özellik gösterdiğini belirtmişlerdir. Yapılan çekme deneyinde numunenin akma gerilmesini 369 MPa olarak ölçen yazarlar, test numunesinin haddelenerek, dövme ve döküm yöntemleriyle üretilmiş türlerine yakın sonuçlar sergilediğini belirtmişlerdir.

Bakır-Alüminyum alaşımlı test numunesi için kullanılan kaynak makinesi pulse moduna alındığında kaynak pasolarının düzensizleştiğini belirtmişlerdir. Numunenin mekanik özelliklerini inceleyen yazarlar, numunenin işlemde önceki tel haline göre akma gerilmesinin azaldığını fakat yine de IACS'nin belirlediği kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar, bu sonuca çok fazla ısıya maruz kalan numunenin yapısında meydana gelen değişmelerin sebep olabileceğini bildirmişlerdir [50].

3.2. LİTERATÜR ÖZETİ

Geleneksel talaş kaldırma yöntemlerinin aksine hammaddeyi üst üste katmanlama yaparak üç boyutlu geometriyi oluşturması, geometrik olarak karmaşık yapıların oluşturulmasına imkan vermesi ve hammadde israfını oldukça azaltması nedeniyle eklemeli imalat yöntemi kullanımına olan talep artmaktadır. Bu yöntem ile metal olmayan malzemeler, metaller veya bu iki türün farklı kombinasyonları bir arada kullanılarak üstün özellikli karma malzeme yapıları oluşturulabilmektedir. Eklemeli imalatın bir diğer kullanım alanı ise yeniden imalatı yüksek maliyet ve zaman gerektiren hasarlı takım ve kalıp parçalarının onarılmasıdır.

Günümüzde uzay, uçak ve tıp gibi yüksek teknoloji içeren alanlarda faaliyetlerini sürdüren pek çok firma yüksek maliyetli bir titanyum alaşımı olan Ti6Al4V alaşımını eklemeli imalatta hammadde olarak kullanarak yöntemin sunduğu yüksek hammadde faydalanma oranı sayesinde tasarruf etmelerinin yanı sıra karmaşık geometrilerdeki parçaları da başarı ile üretebilmişlerdir.

Metal eklemeli imalatta kullanılan yöntemler hammaddeye göre toz veya tel formunda olup, kullandıkları enerji kaynaklarına göre lazer, elektrik arkı, elektron ışını ve plazma olarak sınıflandırılmaktadır. Kullanılan hammaddenin türüne ve enerji kaynağına göre en iyi sonucu almak işlem parametrelerinin optimizasyonu ile sağlanabilmektedir.

Tel beslemeli sistemler hammaddeyi eritmek için yüksek miktarda ısı enerjisi kullanmaktadır. Bu yüksek ısı girdisi, üretilen yapıda kalıcı gerilmeler ve çarpılmalara yol açabilmektedir. Çarpılmaların önüne geçmek için katman oluşturma sırasında uygulanan işlem parametrelerinin iyi optimize edilmesi gerekmektedir. Kalıcı gerilmeler ise her katmandan sonra yüzeye haddeleme ve/veya alt tabana göre simetrik katmanlama yapılarak aşılabilir.

Eklemeli imalatta toz beslemeli sistemlerin hammadde yığılma hızı, tel beslemeli sistemlere göre daha düşük olup, bu oran tel beslemeli sistemlerde saatte 1 kg civarında çıkabilmektedir. Diğer yandan, tel beslemeli sistemlerde katmanlar arasında 1-2 mm civarında girintili-çıkıntılı düzensiz formların oluşmasından dolayı üretilen parçaların yüzey kalitesi toz beslemeli sistemlere göre zayıf kalmaktadır. Bu nedenle, tel beslemeli sistemlerde yüzey kalitesini arttırmak için yüzeyden bir miktar talaş kaldırmak gerekmektedir. Buna göre endüstride en iyi verimi elde edebilmek için eklemeli imalat ile geleneksel talaşlı imalat sisteminin bir arada olduğu karma imalat teknolojileri kullanılabilir.

BÖLÜM 4

MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. MALZEME

Bu çalışmada kaynak teli olarak piyasa oldukça fazla kullanılan, Askaynak firmasının SG2 adıyla ürettiği TS EN ISO 14341-A standardına göre G42 3CM G3Si1 olarak tanımlanan düşük karbonlu 1 mm kalınlığında çelik tel malzeme tercih edilmiştir. Malzemenin kimyasal ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kaynak telinin yüzde kimyasal bileşimi.

C	Si	Mn
0,08	0,85	1,5

Çizelge 4.2. Kaynak telinin mekanik özellikleri.

Akma dayanımı	440 MPa
Çekme dayanımı	540 MPa
Uzama (L=5d)	%30
Çentik darbe dayanımı	60 J (-30)

Kaynak işlemi sırasında M20 kaynak gazı kullanılmış olup kaynak gazının kimyasal bileşimi Çizelge 4.3’ te verilmiştir.

Çizelge 4.3. M20 gazının kimyasal bileşimi (%).

Ar	O ₂	CO ₂
80	8	12

4.2. EKLEMELİ İMALATIN UYGULANMASI

Bu çalışmada eklemeli imalat numunesini oluşturmak için Kuka KR10 R1420 model robota Fronius Transpuls Synergic 3200 model kaynak makinesi entegre edilerek kullanılmıştır. Kaynak parametreleri ise yine Fronius markasının geliştirdiği Fronius Weld Connect isimli Android uygulaması ve taban sacının kalınlığına göre kullanılan alın kaynağı veri önerileri dikkate alınarak yapılan ön deneyler neticesinde belirlenmiştir. Kaynak işlemi boyunca paso sıcaklığı ise Sinometer BM 380 markalı kızılötesi sıcaklık ölçer ile takip edilmiştir.

Fronius Transpuls Synergic 3200 model kaynak makinesi spreyleme, puls ve kısa devreyi tamamen dijital mikroişlemcilerle yöneten 320 ampere kadar çıkış akımı sağlayan bir MIG/MAG kaynak makinesidir. Bu cihaz MIG/MAG, TIG ve elektrot kaynağı yapabilmekte ve hem manuel hem de robota entegre edilerek kullanılabilir. Şekil 4.1’de Fronius Transpuls 3200 kaynak makinesi gösterilmiş olup, Çizelge 4.4’te de kaynak makinesinin teknik özellikleri tanımlanmıştır.



Şekil 4.1. Fronius Transpuls Synergic 3200 [51].

Çizelge 4.4. Fronius Transpuls Synergic 3200 teknik özellikleri.

Giriş Voltajı (50/60 Hz)	3x400
Cos phi	0,99
Akım ayar aralığı	3-320 A
Kaynak akımı (x=%40- 40°C / 10dk)	320 A
Kaynak akımı (x=%60- 40°C / 10dk)	260 A
Kaynak akımı (x=%100- 40°C / 10dk)	220 A
Açık devre voltajı	65 V
Çalışma voltajı	14,2-30 V
Koruma sınıfı	IP 23
Ölçüler (ExBxY)	290x625x475mm
Ağırlık	35,2 Kg

Kaynak makinesinin entegre edildiği 6 eksenli Kuka KR10 R1420 model endüstriyel motorun sırasıyla resmi ve teknik özellikleri Şekil 4.2’de ve Çizelge 4.5’te verilmiştir.

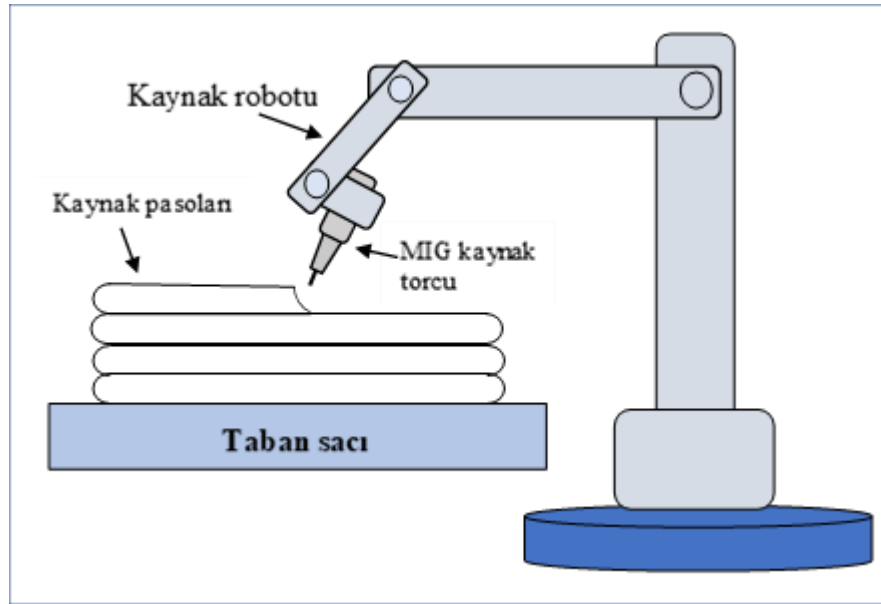


Şekil 4.2. Kuka KR10 R1420 endüstriyel robot [52].

Çizelge 4.5. Kuka KR10 R1420 endüstriyel robotun teknik özellikleri.

Maksimum erişim mesafesi 1420 mm	1420 mm
Nominal taşıma kapasitesi	10 kg
Nominal ilave yük döner tabla / bağlantı kolu / kol	0 kg/0 kg/10 kg
Konum tekrarlanabilirliği (ISO 9283)	$\pm 0,04$ mm
Aks sayısı	6
Bağlantı konumu	Zemin, tavan, duvar
Kurulum alanı	333,5 mm x 307 mm
Ağırlık	Yaklaşık 160 kg

Numuneler 25°C sıcaklıkta hazırlanmış olup, numune üretimi süresince kaynak torcu daima dik açı yapacak biçimde Şekil 4.3'te şematik olarak gösterildiği gibi kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Pasolar arası geçiş sıcaklığı ise ısıdan dolayı oluşacak etkileri en aza indirmek ve eriyik havuzunun yayılmasını önlemek için 150°C sıcaklığın altında tutulmaya özen gösterilmiştir [53].



Şekil 4.3. Numune oluşturma işleminin şematik gösterimi.

Kaynak pasolarının inşa edilmesi için 10 mm kalınlığında S235JR levha kullanılmış olup, kaynak işlemine başlamadan önce yüzey taşlama, ardından yüzey alkol ile silinerek dış yüzeydeki yağ, kir ve korozyon tabaka ortadan kaldırılmıştır. Kaynak işlemi

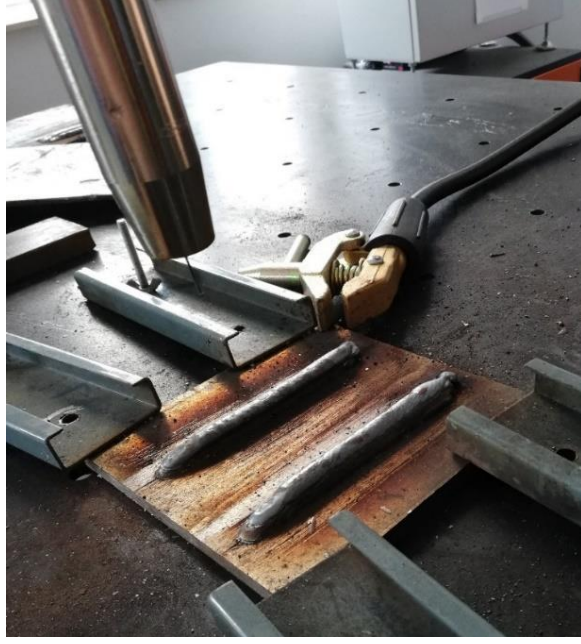
için kullanılan parametreler Çizelge.4.6’da verilmiştir. Numune üretim süreci ise sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 ’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Kaynak parametreleri.

Akım	218 A
Tel sürme hızı	11 m/dk
Gerilim	22,5 V
Paso genişliği (istenen)	12 mm
Paso yüksekliği (istenen)	4 mm
Gaz debisi	15 lt/dk
Torcun iş parçasına uzaklığı	13 mm



Şekil 4.4. Deney numunesi üretimi başlangıcı.



Şekil 4.5. İşlem sırasında pasoların gösterimi.



Şekil 4.6. Tel ark eklemeli imalat numunesi.

Busachi vd., Şekil 4.6'da gösterilen efektif cidar genişliğinden bahsetmişlerdir. Yazarlar kaynak pasolarının üst üste yığılmasından dolayı ortalama 1-2 mm girintili yüzey oluştuğunu ve bu kusurların ancak yüzeylerden talaş kaldırılarak giderilebildiğini belirtmişlerdir [25].

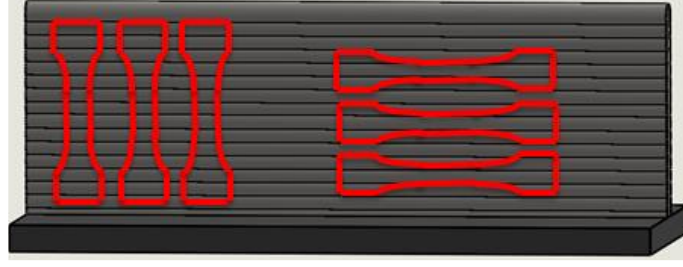


Şekil 4.7. Tel ark eklemeli imalatta efektif cidar genişliğinin gösterilmesi [25].

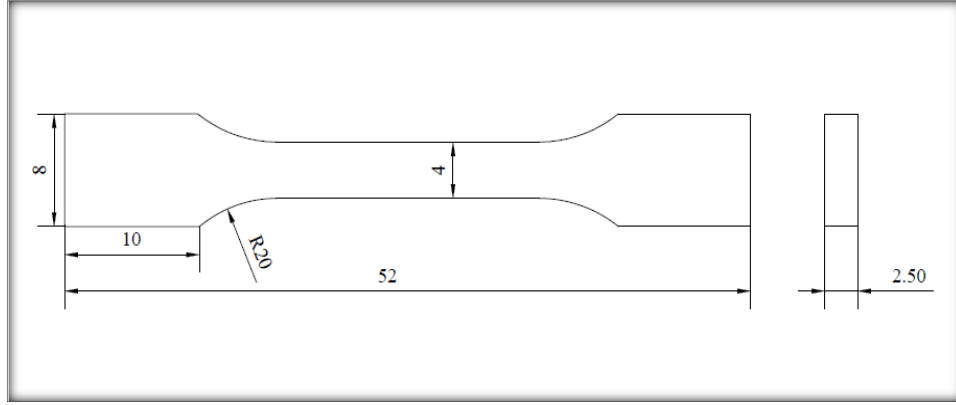
Bu çalışmada, tel ark eklemeli imal edilen parçanın mekanik özelliklerini incelemek amacıyla ISO 6892-1-2009 standardında deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu amaçla, eklemeli imalat numunesinden istenilen ölçülerde deney numunesi hazırlamak için bir çelik taban plakası kullanılmıştır. Çelik plaka üzerinde 30 pasoluk bir kaynak duvarı inşa edilmiştir. Her bir pasonun genişliği baş, orta ve bitiş kısmından alınan değerlere göre ortalama 12,3 mm olarak ölçülmüştür. Literatürdeki bilgilere göre, kaynak dikiş yüzeylerinden 1,5 mm talaş kaldırılarak tel ark eklemeli imalat numunesi düzeltilmiştir.

4.3. MEKANİK DENEY NUMUNESİ HAZIRLAMA

Üretilen tel ark eklemeli imalat numunesinin mekanik özellikleri ve mikroyapı incelemeleri amacıyla önce frezeleme işlemi ile pasoların oluşturduğu kaynak duvarları alt taban plakasından ayrılmış ve tüm yüzeylerinden 1,5 mm derinliğinde işlenerek temizlenmiştir. Böylece, çekme deney numunesi hazırlamak üzere 9 mm kalınlığında bir plaka hazırlanmıştır. Daha sonra, Şekil 4.7’de gösterildiği gibi 6 adet kaynak dikiş yönüne paralel, 6 adet kaynak dikiş yönüne dik çekme deney numunesi üretilmiştir. Numuneler, tel erozyon yardımı ile Şekil 4.8’de verilen ölçülerde hazırlanmıştır.



Şekil 4.8. Deney numune taslağının gösterilmesi.



Şekil 4.9. Çekme deney numunesi ölçüleri.

4.4. MEKANİK ÖZELLİKLER

Tel ark eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçanın mekanik özelliklerini incelemek amacıyla sertlik ölçümü, mikroyapı incelemesi ve çekme deneyi yapılmıştır. Sertlik ölçümünde, Qness Q250M makro sertlik ölçüm cihazı, mikro yapı incelemesinde ise Nikon ters metalurjik mikroskop kullanılmıştır. Bu cihazlar, KBÜ MARGEM Laboratuvarlarında mevcut olup, sırasıyla Şekil 4.9'da ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Qness Q250M cihazı otomatik odaklamalı, 0,5-250 kg yük uygulama kapasitesine sahip sertlik ölçüm cihazıdır. Bu cihazla,

- TS EN ISO 6506 standardına uygun Brinell sertlik ölçümü,
- TS EN ISO 6507 standardına yönelik Vickers sertlik ölçümü,
- TS EN ISO 6508 standardına yönelik Rockwell sertlik ölçümü,
- HBW 2.5/187.5, HV10 ve HRC metodlarından akredite ölçümler,

- Demir alaşımları, demir dışı alaşımlar ve kompozit malzemeleri kapsayan tüm malzemelerin sertlik testleri yapılabilir.



şekil 4.10. Qness Q250M Makro sertlik ölçüm cihazının gösterilmesi.

Nikon ters metalurjik mikroskop ile çekilen mikroyapı fotoğrafları, 50-1000 kat arasında büyütülerek, Clemex görüntü analiz yazılımı ile bilgisayara veri olarak gönderilebilir. Bu cihazla;

- İmaj yakalama, basit ölçümler ve raporlama,
- Manuel interaktif çizgi çizibilme ve boyunu ölçebilme,
- ASTM E562 standardına göre faz analizi ve faz yüzde hesaplaması,
- ASTM B487 kaplama kalınlığı analizi yapılabilir.



şekil 4.11. Nikon ters metalurjik mikroskopun gösterimi.

Çekme testleri KBÜ Teknoloji Fakültesi bünyesinde bulunan 50 kN kapasiteli SHIMAZDU marka test cihaz kullanılarak yapılmıştır. Çekme deneyi, kaynak dikiş yönüne dik ve paralel olarak kesilen numunelere 1 mm/sn ve 4 mm/sn hızla uygulanmıştır.

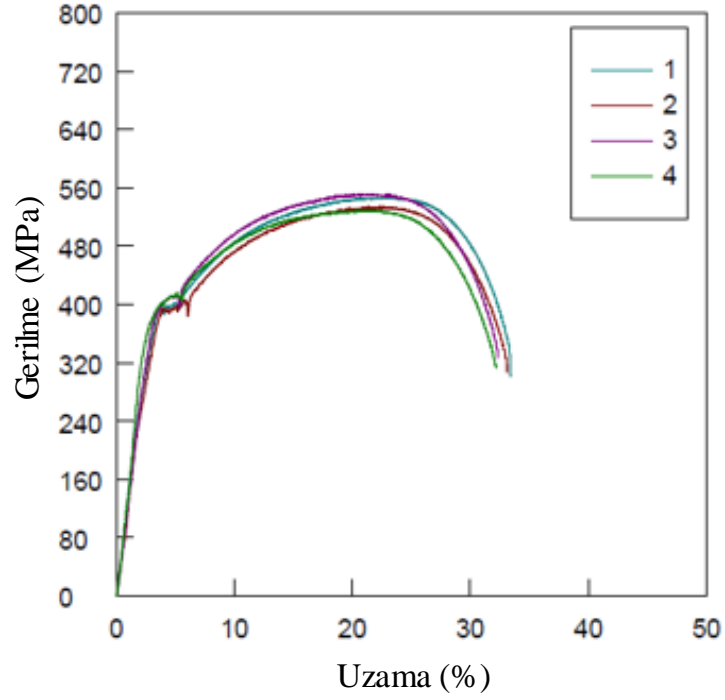
BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Önceki bölümde detayları verilen tel ark eklemeli imalat parçalarından, ISO 6892-1-2009 standardına göre kaynak dikiş yönüne paralel ve dik olacak şekilde tel erozyonla kesme yöntemi ile çekme deney numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler çekme dayanımı, mikrosertlik ve mikroyapı açısından incelenmiş olup, elde edilen sonuçlar hakkında yapılan değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

5.1. ÇEKME DAYANIMI

Çekme deneyi, kaynak dikiş yönüne dik ve paralel olarak kesilen numunelere 1 mm/sn ve 4 mm/sn hızla uygulanmıştır. Eklemeli imalat ile üretilen parçadan kaynak dikiş yönüne paralel olarak kesilen numunenin çekme deneyi grafiği Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Grafiklerde belirtilen 1,2 nolu eğriler 1 mm/sn, 3,4 nolu eğri ise 4 mm/sn hızla çekilen numunene için çekme-uzama eğrisidir.

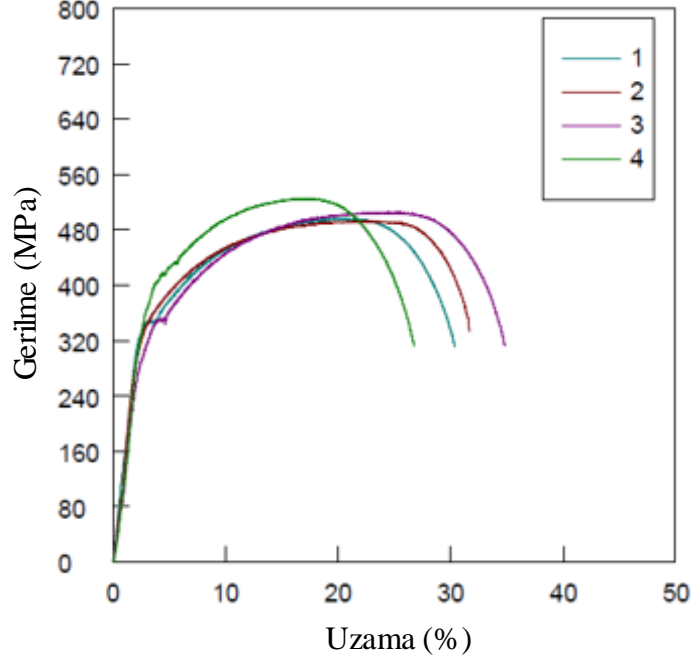


Şekil 5.1. Kaynak yönüne paralel numunenin çekme deneyi grafiği.

Grafik değerlendirildiğinde, 1 mm/sn hızla çekilen numunelerin akma dayanımı ortalama 402 MPa, çekme dayanımı ise 530 MPa olarak elde edilmiştir. Numune, %33'lik uzama miktarına ulaştığında kopma meydana gelmiştir. Bu değerler Çizelge 4.2'de mekanik özellikleri tanımlanan kaynak teli ile kıyaslandığında, eklemeli imalat ile üretilen parçanın akma dayanımında azalma olurken, çekme dayanımında ise artış meydana geldiği belirlenmiştir.

4 mm/sn hızla çekme deneyi sonucunda ise numunelerden ortalama 417 MPa akma dayanımı, 545 MPa çekme dayanımı ve %32 uzama değerleri elde edilmiştir. Çekme hızının değişmesiyle mekanik özelliklerde oluşan bu farklar dislokasyon mekanizması ile açıklanabilir. Malzemenin maruz kaldığı yüke göre değişen dislokasyon yoğunluğu arttıkça, plastik deformasyon işlemi zorlaşmakta ve bu süreç malzemenin mekanik özelliklerinde gelişmeye neden olmaktadır [54]. Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalara benzer olarak [55,56], deformasyon hızının artmasıyla tel ark eklemeli imalat yöntemiyle üretilen parçanın akma ve çekme dayanımlarında artış olduğu belirlenmiştir.

Kaynak dikiş yönüne dik olarak hazırlanan numunenin çekme deneyinden elde edilen grafik Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

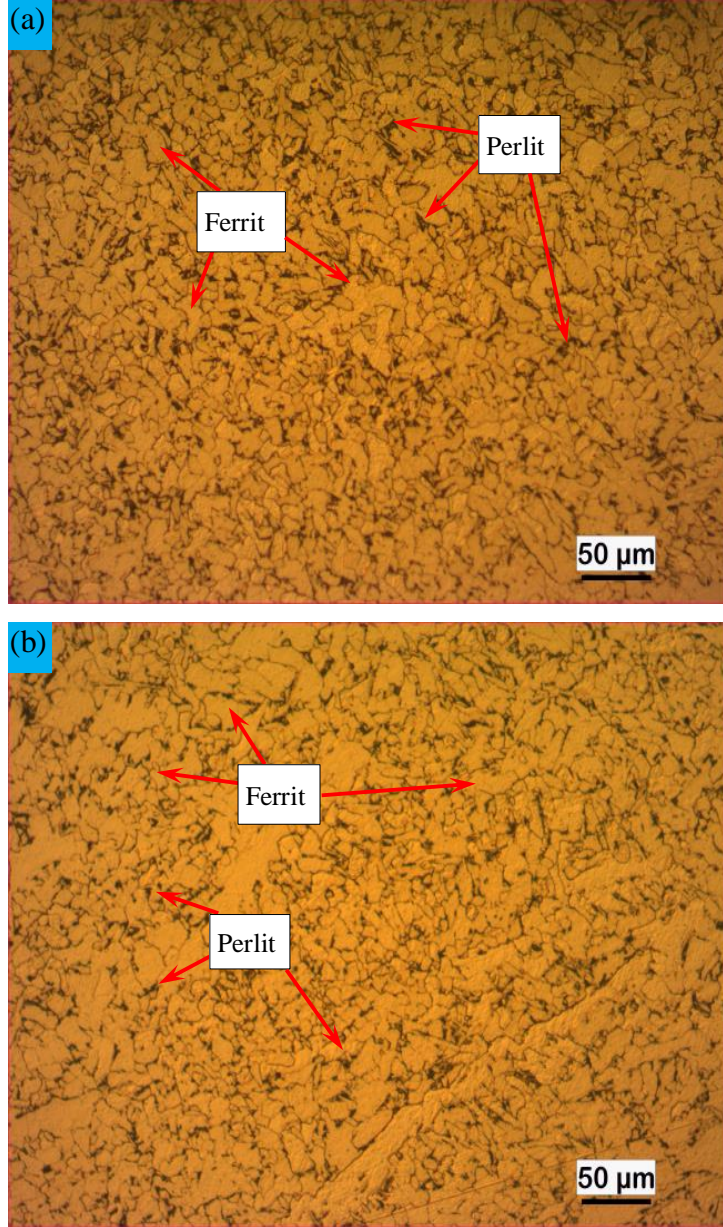


Şekil 5.2. Kaynak yönüne dik numunenin çekme deneyi grafiği.

Kaynak dikiş yönüne dik olarak çekme testi uygulanan numunelerin grafiği incelendiğinde, 1 mm/sn hızda ortalama 353 MPa akma dayanımı, 498 MPa çekme dayanımı ve %32,2 yüzde uzama değerleri ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar ile kaynak yönüne paralel çekilen numunenin değerleri kıyaslandığında, akma ve çekme dayanımında azalmanın olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, SG2 kaynak telinin Çizelge 4.2’de verilen mekanik özellikleri ile kıyaslandığında sadece boyca uzama miktarında bir artış olduğu görülmektedir. Dikiş yönüne dik olarak hazırlanan numuneler 4 mm/sn hızla çekildiğinde ise ortalama 382 MPa akma dayanımı, 524 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Numunenin yüzde uzama miktarı ise %26,7 olarak kaydedilmiş olup, bu değer 1 mm/sn hızda çekilen numunenin yüzde uzama değerine göre %17,08 daha azdır. Bu sonuç, yüksek deformasyon hızında dislokasyon hareketinin tam anlamıyla gerçekleşmediğini ve buna bağlı olarak şekillenebilirliğin azalmasına neden olduğunu göstermektedir.

Yüzde uzama değerleri dikkate alındığında, 1 mm/sn hızla çekilen numuneler kıyaslandığında kaynak yönüne paralel oluşturan çekme numunesinin dik olarak çekilen numuneye göre %3 daha fazla uzadığı belirlenmiştir. 4 mm/sn hızla çekme deneyi uygulanan kaynak yönüne paralel ve dik olarak oluşturulan numunelerde ise kaynak yönüne paralel olan numune %19,8 daha fazla uzama göstermiştir. Benzer sonuç, Xu ve ark. tarafından yapılan çalışmada elde edilmiş olup [57], kaynak yönüne dik numunelerde olası muhtemel gözeneklerin fazla olması ve heterojen mikroyapı dağılımının bu duruma neden olduğu düşünülmektedir.

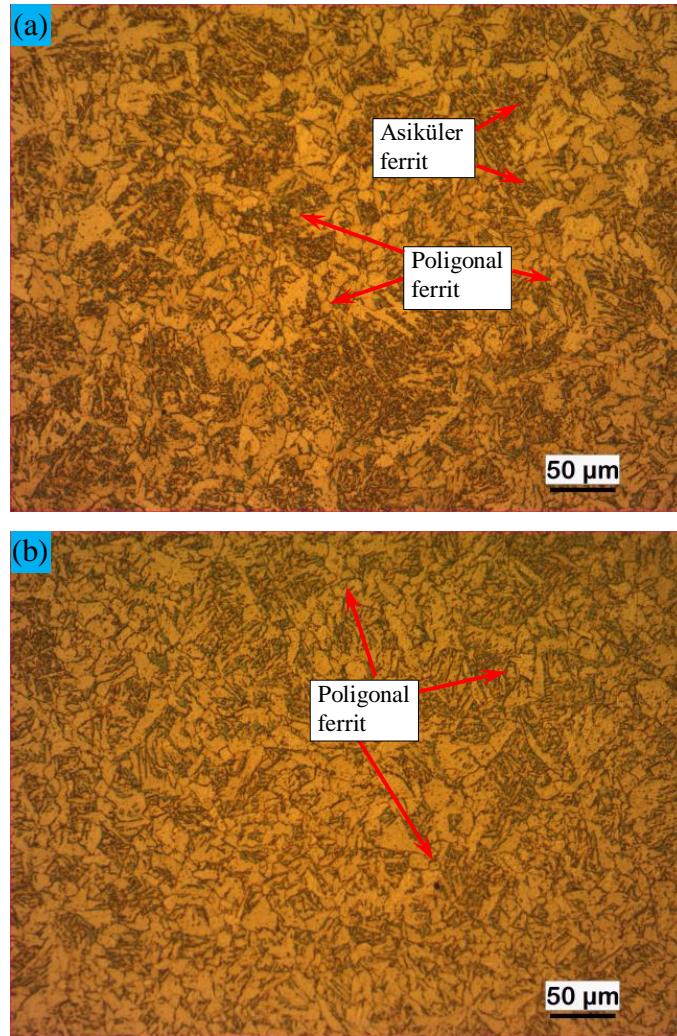
Kaynak dikiş yönüne paralel ve dik yönde numunelerin çekme eğrileri dikkatlice incelendiğinde, en önemli farkın akma dayanımında olduğu görülmektedir. Dikiş yönüne paralel hazırlanan tüm numuneler belirgin bir akma davranışı gösterirken, dik yönde çekilen numunelerde 3 nolu numune hariç belirgin olmayan akma davranışı görülmektedir. Akma noktasındaki bu değişken durum, karbon atomunun katı eriyik içerisinde serbest halde olup olmadığı ile ilgilidir [58,59]. Aynı zamanda bu sonuç, kaynak dikiş yönüne dik numunelerin aynı homojenliğe sahip olmadığını ve mikroyapısal farklılıklar içerdiğini göstermektedir. Bilindiği gibi, kaynak işleminde üst üste uygulanan pasolarda ya da çok pasolu kaynak uygulamalarında her paso önceki paso üzerinde ısıl işleme yapar ve daha yumuşak olmasına sebep olur. Sonuç olarak, çok pasolu kaynak işlemi sırasında homojen olmayan ısı dağılımı sebebiyle farklı mikroyapısal dönüşümler oluşur ve bu durum mekanik özellikleri etkiler [60,61,62].



Şekil 5.3. Kaynak dikiş yönüne paralel numune mikroyapısı.

Kaynak dikiş yönüne paralel çekme testi yapılan numunelerin katılaşma mikroyapısı incelendiğinde (Şekil 5.3), orjinal östenit tanelerinin tane sınırlarında ötektoid dönüşüm öncesi ferrit fazının olduğu, tane içinde ötektoid dönüşüm sonrası perlit fazı gözlenmektedir. Bilindiği üzere otomotiv sektöründe yoğun bir şekilde kullanılan çift fazlı çelikler mikroyapısında ferrit ve martensit yapılarını içermektedir ve belirgin olmayan akma davranışı gösterir. Fakat ferrit ve perlit mikroyapısında bulunan yaklaşık aynı kimyasal bileşimdeki çelikler belirgin bir akma davranışı gösterirler.

DH36 gemi sac çeliğinde mikroyapı değişimlerinin incelendiği bir çalışmada, orijinal malzemenin ferrit ve perlit mikroyapısından dolayı belirgin akma gösterdiğini, fakat su verme işlemi uygulanan numunelerde oluşan martensit yapısı ile belirgin akmanın kaybolduğu rapor edilmiştir [63]. Kaynak dikiş yönüne dik numunelerde, asiküler ve poligonal ferritin oluşması soğuma hızının kaynak yönüne paralel olan numunelere göre daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 5.4). Benzer sonuçlar, Karabulut ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada bulunmuştur [64].

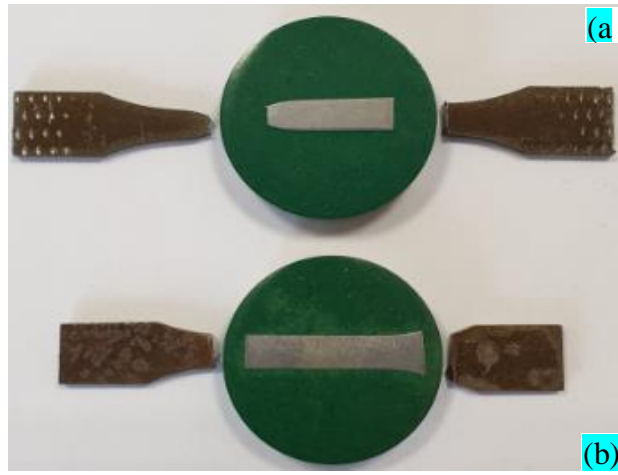


Şekil 5.4. Kaynak dikiş yönüne dik numune mikroyapısı

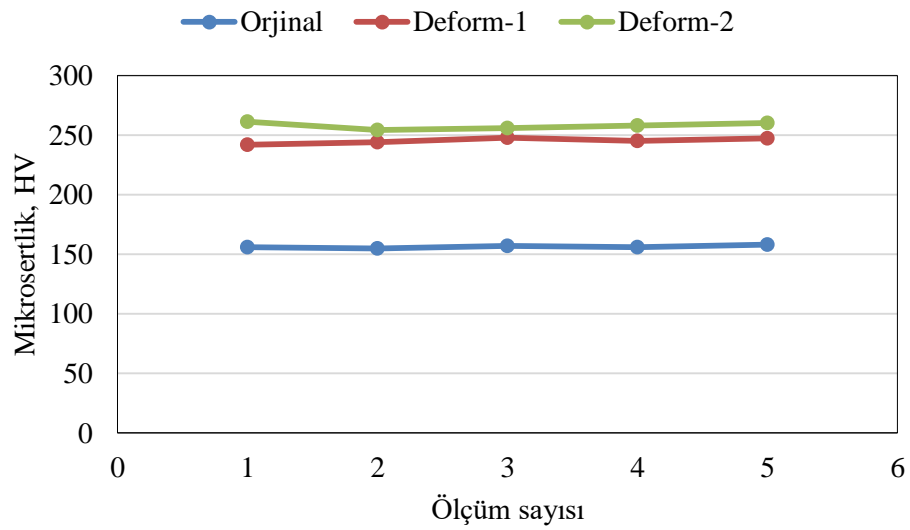
5.2. SERTLİK

Tel ark eklemeli imalat üretilen parçanın sertlik değerleri, deformasyon öncesi ve sonrasında kaynak yönüne paralel ve dik olarak hazırlanan numuneler üzerinden

Vickers yöntemine göre ölçülmüştür. Sertlik ölçüm işlemleri, 15 saniye için 5 kg yük uygulanarak yapılmıştır. Şekil 5.5'te gösterilen resimler deformasyon işlemi (Çekme deneyi) sonrası ve öncesi sertlik ölçümü yapılan numuneleri temsil etmektedir. Numunelerin kırılma noktalarından itibaren 0,5 mm aralıklarla 5 noktadan sertlik ölçümü yapılmış olup, ortalama sonuçlar grafiklerde gösterilmiştir. 1 mm/sn (Deform-1) ve 4 mm/sn (Deform-2) hızlarda çekme uygulanan numuneler ile çekme deneyi öncesi (Orjinal) numunenin sertlik değerleri, kaynak yönüne paralel ve dik hazırlanan numuneler için sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'te grafik olarak verilmiştir.

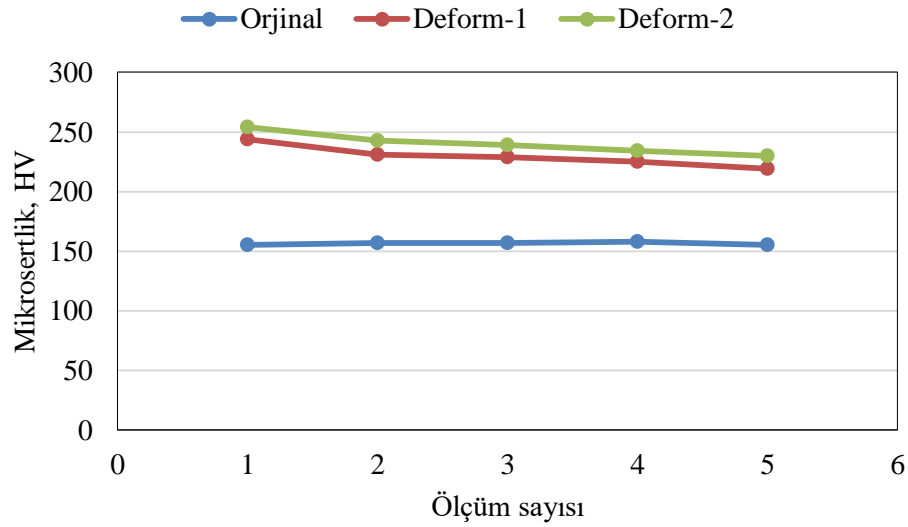


Şekil 5.5. Sertlik ölçümü yapılan numuneler, a) Çekme deneyi sonrası, b) Çekme deneyi öncesi



Şekil 5.6. Kaynak yönüne paralel numune sertlik değişimi.

Şekil 5.6'daki grafikte mavi eğri çekme deneyi uygulanmayan numune, kırmızı eğri 1 mm/sn hızda çekilen numune ve yeşil eğri ise 4 mm/sn hızda çekme deneyi uygulanan numunenin mikrosertlik değişimini göstermektedir. Tel ark eklemeli imalat ile üretilen parçadan hazırlanan numunelerin orijinal mikrosertliği ortalama 156 HV olarak ölçülmüştür. Grafik incelendiğinde, çekme deneyine maruz kalan numunelerin birbirine oldukça yakın sertlik davranışı gösterdiği ve çekme deneyi uygulanmayan numuneye göre daha yüksek sertlikte olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuç dislokasyon mekanizması ile açıklanabilmektedir. Yüksek deformasyon hızında dislokasyon hareketinin tam anlamıyla gerçekleşmediği ve buna bağlı olarak gelişen deformasyon sertleşmesi nedeniyle mikrosertliğin arttığı düşünülmektedir [65,66]. Bu sebeple çekme deneyine maruz kalan numunenin sertlik değerleri daha yüksek ölçülmüştür. Benzer şekilde, deformasyon hızının 1 mm/sn'den 4 mm/sn'ye artırılmasıyla malzemenin sertliğinde bir artış olduğu görülmektedir (Şekil 5.6). Orijinal numunenin mikrosertlik değerine göre deformasyon uygulanan numunelerin sertlik değerlerindeki artış oranları 1 mm/sn ve 4 mm/sn için sırasıyla ortalama %56 ve %64 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.7. Kaynak yönüne dik numune sertlik değişimi.

Şekil 5.7 incelendiğinde, kaynak yönüne paralel numuneden elde edilen sertlik değişimine benzer bir eğilim görülmektedir. Çekme deneyi yapılmayan numuneler her iki kaynak yönünde birbirine çok yakın sonuçlar verirken, çekme deneyi yapılan

numunelerde ise dislokasyonların etkisi ile kaynak dikiş yönüne bağı olarak farklı sonuçlar vermiştir. Kaynak dikiş yönüne göre dik olarak çekme deneyi uygulanmış deney numunesinde sertlik değerleri, dikiş yönü paralel olan numuneye göre daha düşüktür. Bunun sebebi, çekme testinde olduğu gibi, kaynak ısı çevrimden dolayı meydana gelen farklı mikroyapıdan kaynaklanmaktadır. Diğer yandan, deformasyon hızının 1 mm/sn'den 4 mm/sn'ye artırılmasıyla oluşan dislokasyon mekanizmasına bağı olarak malzemenin sertliğinde bir artış olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.7). Kaynak dikiş yönüne dik numunelerde, orijinal numuneye göre deformasyon uygulanan numunelerin mikrosertlik değerlerindeki artış oranları 1 mm/sn ve 4 mm/sn için sırasıyla ortalama %46 ve %53 olarak belirlenmiştir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, gazaltı ark kaynağı ile düşük karbonlu çelik malzemedan tel ark eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen parçaların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Kaynak robotu yardımıyla üretilen parçalardan hazırlanan numuneler sırasıyla çekme dayanımı, sertlik ve mikroyapı açısından incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Endüstriyel kaynak robotuna entegre gazaltı ark kaynağı yöntemi esaslı tel ark eklemeli imalat teknolojisi uygulanarak prizmatik parçaların üretimi gerçekleştirilmiştir. Literatürde bahsedildiği gibi ölçü tamlığı ve yüzey pürüzlülüğü açısından parçaların kalitesinin kötü olduğu belirlenmiş olup, talaşlı imalat yöntemleri ile nihai geometrilerin oluşturulabileceği sonucuna varılmıştır.
- Kaynak dikiş yönüne paralel ve dik olmak üzere iki farklı şekilde hazırlanan numunelerin akma ve çekme dayanımı, sertlik ve yüzde uzama gibi mekanik özellikler açısından farklı davranışlar gösterdiği belirlenmiştir.
- Mikroyapı incelemeleri sonucunda, düşük alaşımlı çelik malzemedan tel ark eklemeli imalat ile üretilen numunelerin yapısında genellikle ferrit ve perlit fazlarının olduğu görülmüştür.
- Çekme deneyi sonuçlarına göre, kaynak dikiş yönüne paralel numuneler tüm deformasyon hızlarında belirgin akma davranışı sergilerken, kaynak dikiş yönüne dik numunelerin bazıları belirgin olmayan akma davranışı göstermiştir. Diğer yandan, deformasyon hızının arttırılmasıyla eklemeli imalat ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinde iyileşmeler görülmüştür.

- Kaynak dikiş yönüne paralel numunenin çekme dayanımı 1 mm/sn çekme hızı için ortalama 530 MPa olurken, dik numunenin çekme dayanımı 498 MPa olarak belirlenmiştir.
- Deformasyon hızının dört kat artırılmasıyla, kaynak dikiş yönüne paralel numunenin çekme dayanımı ortalama 545 MPa olurken, dik numunenin çekme dayanımı 524 MPa olarak elde edilmiştir.
- Kaynak dikiş yönüne paralel numunenin mikrosertlik değeri 1 mm/sn çekme hızı için ortalama 245 HV olurken, dik numunenin mikrosertliği 229 HV olarak belirlenmiştir.
- Deformasyon hızı dört kat artırıldığında, kaynak dikiş yönüne paralel numunelerin mikrosertliği ortalama 257 HV olurken, dik numunenin mikrosertliği 240HV olarak elde edilmiştir.
- Gazaltı ark kaynağı esaslı tel ark eklemeli imalat ile üretilen parçaların ölçü ve yüzey kalitesinin artırılması amacıyla üretim parametrelerinin optimizasyonuna yönelik çalışmalar yapılabilir.
- Aynı yöntem ile imal edilecek ince kesitli parçaların mekanik ve geometrik özellikleri üzerine araştırmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Internet: Huckstepp, A., “Digital Alloys’ guide to Metal Additive Manufacturing”, <https://www.digitalalloys.com/blog/surface-roughness/> (2019).
2. Alberti, E. A., da Silva, L. J. and D’Oliveira, A. S. C. M., “Additive manufacturing: the role of welding in this window of opportunity”, *Welding International*, 30 (6): 413-422 (2016).
3. Colegrove, P. A., Coules, H. E., Fairman, J., Martina, F., Kashoob, T., Mamash, H. and Cozzolino, L. D., “Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling”, *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (10): 1782-1791 (2013).
4. Adeyinka, A., “Characterisation of integrated WAAM and machining processes”, PhD Thesis, *Cranfield University*, 1-8 (2013).
5. Wang, Y., Chen, X. and Konovalov, S. V., “Additive manufacturing based on welding arc: a low-cost method”, *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 11: 1317-1328 (2017).
6. Internet: “7 Families of Additive Manufacturing”, <http://www.hybridmanutech.com/resources.html#additive> (2019).
7. K. Çelik, A. Ö., “Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Üretim ve Onarım Uygulamaları”, *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 5 (1): 107–121 (2017).
8. Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C. ve Duysak, A., “Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31: 53-70 (2013).
9. Karakoç, F., “Katmanlı imalat ile hafif parça imal edebilmek için hücresel kafes yapıların geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 8-75, (2016).
10. Gibson, I., Rosen, D. W. and Stucker, B., “Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing”, *Springer*, New York, (2010).
11. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. and Li, H., “Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81: 465–481 (2015).

12. Rahmati, S., "Direct Rapid Tooling", Comprehensive Materials Processing 1st ed., *Elsevier Ltd.*, London, (2014).
13. Internet: Jones, G., "NoDirect Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained Title", <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/> (2019).
14. Singh, R., Singh, S. and Hashmi, M. S. J., "Implant Materials and Their Processing Technologies", Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, *Elsevier Ltd.*, London, (2016).
15. Internet: Carlota, V., "The Complete Guide to Electron Beam Melting (EBM) in 3D Printing", <https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/> (2019).
16. Internet: "Arcam EBM", <https://www.ge.com/additive/who-we-are/about-arcam> (2019).
17. Strano, G., Hao, L., Everson, R. M. and Evans, K. E., "Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting", *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (4): 589-597 (2013).
18. Taminger K. M. B. and Hafley R. A., "Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing", *Nato Unclassified*, 1-10, (2004).
19. Chang, K.-H., "Rapid Prototyping", Computer aided design engineering design, *Elsevier Ltd.*, London, 743–746 (2015).
20. Guddati, S., Kiran, A. S. K., Leavy, M. and Ramakrishna, S., "Recent advancements in additive manufacturing technologies for porous material applications", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105: 193–215 (2019).
21. Xue, L., Islam, M. U., Theriault, A., Gregoris, L., Rubinger, B. and Reedman, T., "Laser consolidation process for the manufacturing of structural components for advanced robotic mechatronic system—a state of art review", *6th International Symposium On Artificial Intelligence And Robotics & Automation In Space*, (2001).
22. Heraclis, A., "Monitoring and control of robotized laser metal-wire deposition", PhD Thesis, *Chalmers University of Technology*, Sweden, (2012).
23. Suryakumar, S., Karunakaran, K. P., Bernard, A., Chandrasekhar, U., Raghavender, N. and Sharma, D., "Weld bead modeling and process optimization in hybrid layered manufacturing", *CAD Computer Aided Design*, 43 (4):331-344 (2011).
24. Mannion, B. and Heinzmann, J. I., "Plasma arc welding brings better control", *Tooling&Production*, 5: 29-30 (1999).

25. Busachi, A., Erkoyuncu, J., Colegrove, P., Martina, F. and Ding, J., “Designing a WAAM based manufacturing system for defence applications”, *Procedia CIRP*, 37: 48-53 (2015).
26. Maleksaeedi, S., Wang, J. K., El-Hajje, A., Harb, L., Guneta, V., He, Z., Wiria, F. E., Choong, C. and Ruys, A. J., “Toward 3D printed bioactive titanium scaffolds with bimodal pore size distribution for bone ingrowth”, *Procedia CIRP*, 5: 158-163 (2013).
27. Internet: Loughborough University, “About Additive Manufacturing”, <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>.
28. Shimizu, S., Fujii, H. T., Sato, Y. S., Kokawa, H., Sriraman, M. R., and Babu, S. S., “Mechanism of weld formation during very-high-power ultrasonic additive manufacturing of Al alloy 6061”, *Acta Materialia*, 74:234-243 (2014).
29. Levy, G. N., Schindel, R. and Kruth, J. P., “Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 52 (2):589-609 (2003).
30. Kruth, J. P., Leu, M. C. and Nakagawa, T., “Progress in additive manufacturing and rapid prototyping”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47 (2):525-540 (1998).
31. Karunakaran, K. P., Suryakumar, S., Pushpa, V. and Akula, S., “Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing”, *Robotics And Computer-Integrated Manufacturing*, 26 (5):490-499 (2010).
32. Internet: Titanium, N., “Norsk Titanium Receives Airbus Contract for Qualification and Production”, <https://www.norsktitanium.com/media/press/norsk-titanium-receives-airbus-contract-for-qualification-and-production>, (2019).
33. Baufeld, B. and Van Der Biest, O., “Mechanical properties of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition”, *Science And Technology of Advanced Materials*, 10:1-10 (2009).
34. Yilmaz, O. and Uglu, A. A., “Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230: 1-18 (2016).
35. Rombouts, M., Kruth, J. P., Froyen, L. and Mercelis, P., “Fundamentals of selective laser melting of alloyed steel powders”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 55 (1):187-192 (2006).

36. Alaca, İ., “Kişiyeye özel-gözenekli kafatası implant tasarımı ve Ti6Al4V toz malzemeneden eklemeli imalat ile üretilerek tavşana uygulanıp kemik gelişiminin izlenmesi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi*, (2014).
37. Dursun, A. M., “Değişken gözenekli hücreyel yapıların metal eklemeli imalat için tasarımı ve üretilen yapıların tasarım ile uyumluluğunun araştırılması”, Yüksek Lisans, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 10-98, (2019).
38. Choi, J. and Chang, Y., “Characteristics of laser aided direct metal/material deposition process for tool steel”, *International Journal of Machine Tools And Manufacture*, 45 (4-5): 597-607 (2005).
39. Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Sequeira Almeida, P. M., Wang, F., Williams, S., “Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive manufacturing process on large multi-layer parts”, *Computational Materials Science*, 50 (12): 3315-332 (2012).
40. Syed, W. U. H., Pinkerton, A. J. and Li, L., “A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping”, *Applied Surface Science*, 247 (1-4): 268-276 (2005).
41. Liu, S., Liu, W., Harooni, M., Ma, J. and Kovacevic, R., “Real-time monitoring of laser hot-wire cladding of Inconel 625”, *Optics And Laser Technology*, 62: 124-134 (2014).
42. Nikam, S. H., Jain, N. K. and Jhavar, S., “Thermal modeling of geometry of single-track deposition in micro-plasma transferred arc deposition process”, *Journal of Materials Processing Technology*, 230: 121-130 (2016).
43. Clark, D., Bache, M. R. and Whittaker, M. T., “Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications”, *Journal of Materials Processing Technology*, 203 (1-3): 439-448 (2008).
44. Zhao, H., Zhang, G., Yin, Z. and Wu, L., “A 3D dynamic analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping”, *Journal of Materials Processing Technology*, 211 (3): 488-495 (2011).
45. Kulkarni, P. and Dutta, D., “On the integration of layered manufacturing and material removal processes”, *Journal of Manufacturing Science And Engineering, Transactions of The ASME*, 122 (1): 100-108 (2000).
46. Stenbacka, N., Choquet, I. and Hurtig, K., "Review of arc efficiency values for gas tungsten arc welding", *IW Commission IV-XII-SG212*, (2012).
47. Internet: Martina, F., “Wire and Additive Manufacturing”, https://www.researchgate.net/profile/Filomeno_Martina/publication/278017889_Wire_Arc_Additive_Manufacturing_properties_cost_parts/links/557866a308aeacff200282e0/Wire-Arc-Additive-Manufacturing-properties-cost-parts, (2014).

48. Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Almeida, P. M. S., Wang, F. and Williams, S., "Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts", *Computational Materials Science*, 50 (12): 3315-3322 (2011).
49. Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G. and Colegrove, P., "Wire + Arc additive manufacturing", *Materials Science And Technology*, 32 (7): 641-647 (2016).
50. Queguineur, A., Rückert, G., Cortial, F. and Hascoët, J. Y., "Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications", *Welding In The World*, 62: 259-266 (2018).
51. Internet: Apex Engineering, "Fronious transpuls 3200", <http://apexengineering.com/product/transpuls-synergic-3200> (2019).
52. Internet: Automatisierungstechnik, E., "Kuka KR10", <https://www.egsautomatisierung.de/produkte/industriroboter/kuka-kr10-r1420-cybertech-nano/> (2019).
53. Wang, T., Zhang, Y., Wu, Z. and Shi, C., "Microstructure and properties of die steel fabricated by WAAM using H13 wire", *Vacuum*, 149: 185-189 (2018).
54. Qin, K., Yang, L. M. and Hu, S. S., "Mechanism of strain rate effect based on dislocation theory", *Chinese Physics Letters*, 26 (3): 1-4 (2009).
55. Kim, J. H., Kim, D., Han, H. N., Barlat, F. and Lee, M. G., "Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels: Experiment and constitutive modeling", *Materials Science And Engineering A*, 559: 222-231 (2013).
56. Çavuşoğlu, O. ve Gürün, H., "Deformasyon hızının DP600 ve DP780 sac malzemelerin mekanik özelliklerine ve derin çekme işlemine etkilerinin incelenmesi", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (4): 777-784 (2014).
57. Xu, X., Ganguly, S., Ding, J., Guo, S., Williams, S. and Martina, F., "Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire + arc additive manufacture process", *Materials Characterization*, 143: 152-162 (2018).
58. Speich, G. R. and Miller, R. L., "Mechanical Properties of Ferrite-Martensite Steels.", *IEEE Conference Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, .
59. Türkmen, M. ve Gündüz, S., "Çift fazlı çeliklerde martenzit morfolojisinin statik deformasyon yaşlanma davranışı üzerine etkisi", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (2): 353-362 (2013).
60. Suryakumar, S., Karunakaran, K. P., Chandrasekhar, U. and Somashekara, M. A.,

"A study of the mechanical properties of objects built through weld-deposition", *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 227 (8): 1138–1147 (2013).

61. Haden, C.V., Zeng, G., Carter, F.M., Ruhl, C., Krick, B.A. and Harlow, D.G., "Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties", *Additive Manufacturing*, 16: 115–123 (2017).
62. Erden, M. A., Gündüz, S., Çalgülü, U. ve Boz, M., "Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen alaşımsız ve hardoks çeliklerin mikroyapı ve sertlik özelliklerinin araştırılması", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1): 221-226 (2018).
63. Hayat, F. and Uzun, H., "Effect of heat treatment on microstructure mechanical properties and fracture behaviour of ship and dual phase steels", *Journal of Iron And Steel Research, International*, 18 (8): 65-72 (2011).
64. Karabulut, H., Türkmen, M., Erden, M. A. And Gündüz, S., "Effect of different current values on microstructure and mechanical properties of microalloyed steels joined by the submerged arc welding method", *Metals*, 6 (281): 1-7 (2016).
65. William D. Callister, J. and Rethwisch, D. G., "Fundamental of material science and engineering-an integrated approach", *Orbit An International Journal On Orbital Disorders And Facial Reconstructive Surgery*, (2012).
66. Türkmen, M. ve Gündüz, S., "Çift fazlı çeliklerde martenzit morfolojisinin statik deformasyon yaşlanma davranışı üzerine etkisi", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (2): 353-362 (2013).

ÖZGEÇMİŞ

İskender YEŞİLDAĞ 1992 yılında Hatay'ın İskenderun ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Namık Kemal İlköğretim Okulu'nda tamamladı. 2010 yılında İskenderun Lisesi'nden mezun oldu. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Lisans Programı Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2015 yılında onur öğrencisi olarak lisans eğitimini tamamladı. 2016 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı. Özel bir firmada imalat mühendisliği pozisyonunda görev almaktadır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK
Tel : (531) 647 70 63
E-posta : iskender.yesildag@gmail.com