

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE PROSES
PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Nuri ERTEKİN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

ARALIK 2021

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE PROSES
PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet Nuri ERTEKİN
(19241782023)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Celalettin YÜCE

ARALIK 2021

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 19241782023 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mehmet Nuri ERTEKİN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE PROSES PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Celalettin YÜCE**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL**
Bursa Uludağ Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Gökhan ADAR
Bursa Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi : 23.12.2021



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Mehmet Nuri ERTEKİN

İmzası :

X



Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimin süresince her aşamada değerli katkıları ile bana yol gösteren, kendisine ne zaman danışsam bana değerli zamanını ayırıp yardımcı olan, danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Celelettin YÜCE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım boyunca bana destek olan çalıştığım şirketim TOFAŞ AŞ'ye teşekkür ederim.

Son olarak yüksek lisans çalışmalarım boyunca bana destek olan aileme, eşim Birnur ERTEKİN'e, kızlarım Elif Ece ERTEKİN ve Selin Eda ERTEKİN'e teşekkür ederim.

Aralık 2021

Mehmet Nuri ERTEKİN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	viii
SEMBOLLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Eklemeli İmalat Yöntemleri	4
2.2 WAAM Yöntemi	13
2.2.1 WAAM Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	21
2.2.2 WAAM Yönteminin Proses Parametreleri ve Etkileri	24
2.2.3 WAAM Yönteminde Alınan Sonuçlar	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM	34
3.1 Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi	35
3.2 Takoz Parça Levhalarının MIG Kaynak Yöntemi İle Oluşturulması	36
3.2.1 Takoz parçalarının üretilmesi aşamasında kullanılan ekipmanlar	36
3.2.2 Takoz parça levhalarının üretilmesi aşamasında kullanılan ekipmanlar	42
3.3 Takoz Parça Levhaları Radyografik Çekimlerinin Yapılması	44
3.4 Mekanik Testler İçin Gereken Numune Parçaların Çıkarılması	44
3.5 Mekanik Testlerin Yapılması	46
3.6 Taguchi Deneysel Tasarım Yönteminin Uygulanması	48
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	51
4.1 Numune Parça Levhalarının Radyografik Çekimleri ve Sonuçları	51
4.2 Numune Parçalara Uygulanan Mekanik Test Sonuçları	54
4.2.1 Çekme testi sonuçları	54
4.2.2 Charpy darbe testi sonuçları	56
4.2.3 Sertlik testi sonuçları	57
4.3 Taguchi Yöntemi İle Ulaşılan İdeal Test Parametreleri	58
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	71

KISALTMALAR

ANOVA	: Analysis Of Variance (Varyans Analizi)
BJ	: Binder Jetting (Bağlayıcı Püskürtme)
CMT	: Cold Metal Transfer (Soğuk Metal Transferi)
DLP	: Digital Light Processing (Dijital Işık İşleme)
DMLS	: Direct Metal Laser Sintering (Direk Metal Lazer Sinterleme)
EBM	: Electron Beam Melting (Elektron Işınlı Ergitme)
EBAM	: Electron Beam Additive Manufacturing (Elektron Işınlı Eklemeli İmalat)
ED	: Energy Density (Enerji Yoğunluğu)
Eİ	: Eklemeli İmalat
FDM	: Fused Deposition Modeling (Eriyik Yığarak Modelleme)
GMAW	: Gas Metal Arc Welding (Gaz Metal Ark Kaynağı)
GiY	: Geleneksel İmalat Yöntemleri
LENS	: Laser Engineered Net Shape (Lazerle Net Şekillendirme)
LMD	: Laser Metal Deposition (Lazer Metal Biriktirme)
LOM	: Laminated Object Manufacturing (Lamine Nesne İmalatı)
MAG	: Metal Active Gases (Metal Aktif Gaz)
MEİ	: Metal Eklemeli İmalat
MIG	: Metal Inert Gases (Metal Inert Gaz)
SL	: Stereolithography (Stereolitografi)
SLM	: Selective Laser Melting (Seçmeli Lazer Ergitme)
SLS	: Selective Laser Sintering (Seçmeli Lazer Sinterleme)
S/N	: Signal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
WAAM	: Wire and Arc Additive Manufacturing (Tel Ark Eklemeli İmalat)
2B	: 2 Boyutlu
3B	: 3 Boyutlu

SEMBOLLER

Al	: Alüminyum
E	: Enerji
I	: Akım
P	: Güç
t	: Zaman
U	: Gerilim
v	: Hız

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Sabit Tutulan Kaynak Parametreleri.....	35
Çizelge 3.2 : Değişken Kaynak Parametreleri.	35
Çizelge 3.3 : S-AlSi5 Kaynak Telinin Teknik Özellikleri.....	36
Çizelge 3.4 : Takoz Parça Üretiminde Kullanılan Kaynak Parametre Setleri.	39
Çizelge 4.1 : Yatay Yönde Alınan Numunelerle Yapılan Çekme Testi Ortalama Sonuçları.	55
Çizelge 4.2 : Dikey Yönde Alınan Numunelerle Yapılan Çekme Testi Ortalama Sonuçları.	55
Çizelge 4.3 : Yatay Yönde Alınan Numunelerle Yapılan Darbe Testi Sonuçları.....	56
Çizelge 4.4 : Dikey Yönde Alınan Numunelerle Yapılan Darbe Testi Sonuçları.	56
Çizelge 4.5 : Sertlik Testi Sonuçları.....	57
Çizelge 4.6 : Taguchi Deneysel Tasarım Tablosu ve Çekme Dayanım Sonuçları.	58
Çizelge 4.7 : Kaynak Parametrelerinin Çekme Dayanımı S/N Oranlarına Etki Seviyeleri.	58
Çizelge 4.8 : Kaynak Parametrelerinin Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkilerini Gösteren ANOVA Tablosu.	60
Çizelge 4.9 : Taguchi Deneysel Tasarım Tablosu ve Uzama Sonuçları.	60
Çizelge 4.10 : Kaynak Parametrelerinin Uzama S/N Oranlarına Etki Seviyeleri.....	60
Çizelge 4.11 : Kaynak Parametrelerinin Uzama Üzerindeki Etkilerini Gösteren ANOVA Tablosu.	61
Çizelge 4.12 : Taguchi Deneysel Tasarım Tablosu ve Darbe Dayanımı Sonuçları..	62
Çizelge 4.13 : Kaynak Parametrelerinin Darbe Dayanımı S/N Oranlarına Etki Seviyeleri.	62
Çizelge 4.14 : Kaynak Parametrelerinin Darbe Dayanımı Üzerindeki Etkilerini Gösteren ANOVA Tablosu.	63

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Eİ Yönteminin Uygulandığı Sektörler (Karayel ve diğ., 2020).	5
Şekil 2.2 : Eİ Yönteminin Kullanım Oranı Artış Tahmini (Karayel ve diğ., 2020)....	5
Şekil 2.3 : FDM Teknolojisinin Çalışma Prensibi (Dudek, 2013).	7
Şekil 2.4 : SL Teknolojisi Çalışma Prensibi (Oropallo ve Piegl, 2016).	7
Şekil 2.5 : FDM Teknolojisinin Çalışma Prensibi (Url-2).	8
Şekil 2.6 : PJ Teknolojisinin Çalışma Prensibi (Udroiu ve Prada, 2017).	9
Şekil 2.7 : LOM Teknolojisinin Çalışma Prensibi (Url-3).	9
Şekil 2.8 : SLS Teknolojisinin Çalışma Prensibi (Sürmen, 2019).	10
Şekil 2.9 : LENS Teknolojisinin Çalışma Prensibi (Wong ve Hernandez, 2012).	12
Şekil 2.10 : WAAM Teknolojisi Düzenek Resmi (Köhler ve diğ., 2019).	15
Şekil 2.11 : WAAM Teknolojisi Şematik Resmi (Müller ve diğ., 2019).	16
Şekil 2.12 : CMT Yönteminin Temel Aşamaları (Prado ve diğ., 2017).	21
Şekil 2.13 : WAAM Metodu İle Üretilen Örnekler (Rodrigues ve diğ., 2019).	31
Şekil 2.14 : WAAM Metodu İle Üretilen Örnekler (Prado ve diğ., 2017).	32
Şekil 3.1 : Tezde Uygulanan Yöntemin Akış Şeması.	34
Şekil 3.2 : Robotik Kaynak Torcunun Hareket Rotası (Köhler ve Fiebig, 2019).	36
Şekil 3.3 : Fronius TransPuls Synergic 5000 Gazaltı Kaynak Makinası Resmi.	37
Şekil 3.4 : Gazaltı Kaynak Makinası Sistem Bileşenleri Şematik Resmi (Url-4).	37
Şekil 3.5 : Gazaltı Kaynak Makinası Kontrol Paneli Şematik Görüntüsü (Url-4).	38
Şekil 3.6 : Motoman EA-1400N Robot Resmi.	38
Şekil 3.7 : 1 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.	39
Şekil 3.8 : 2 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.	40
Şekil 3.9 : 3 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.	40
Şekil 3.10 : 4 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.	40
Şekil 3.11 : 5 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.	41
Şekil 3.12 : 6 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.	41
Şekil 3.13 : 7 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.	41
Şekil 3.14 : 8 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.	42
Şekil 3.15 : 9 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.	42
Şekil 3.16 : Zayer KF3000 Freze Makinası Resmi.	43
Şekil 3.17 : Tacchella Aqui Terme-4am Taşlama Makinası Resmi.	43
Şekil 3.18 : Taşlanmış Takoz Parça Levhalarının Resmi.	43
Şekil 3.19 : Nikon XT H 225 ST X-Ray Çekim Makinası.	44
Şekil 3.20 : Sodick AG600L Tel Erezyon Makinası Resmi.	44
Şekil 3.21 : Takoz Parça Levhaları Test Numuneleri Yerleşim Planı Resmi.	45
Şekil 3.22 : Üretilen Örnek Takoz Parça Levhası Test Numuneleri Resmi.	45
Şekil 3.23 : Zwick/Roell Z250 Çekme Testi Makina Resmi.	46
Şekil 3.24 : Ceast Resil Impactor 9022 Test Makinası.	47
Şekil 3.25 : Carpy Darbe Testi Numune Örneği Resmi.	47
Şekil 3.26 : BMS 3000-OBPC Sertlik Testi Makinası.	47

Şekil 4.1 :	1 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi..	51
Şekil 4.2 :	2 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi..	51
Şekil 4.3 :	3 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi..	52
Şekil 4.4 :	4 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi..	52
Şekil 4.5 :	5 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi..	52
Şekil 4.6 :	6 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi..	53
Şekil 4.7 :	7 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi..	53
Şekil 4.8 :	8 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi..	53
Şekil 4.9 :	9 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi..	54
Şekil 4.10 :	Kaynak Parametrelerinin Çekme Dayanımı S/N Oranlarına Göre Etki Seviyeleri.....	59
Şekil 4.11 :	Kaynak Parametrelerinin Uzama S/N Oranlarına Göre Etki Seviyeleri..	61
Şekil 4.12 :	Kaynak Parametrelerinin Darbe Dayanımı S/N Oranlarına Göre Etki Seviyeleri.....	62



TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE PROSES PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Eklemeli imalat teknolojisi, içinde bulunduğumuz Endüstri 4.0 sanayi devriminin en önemli üretim metotlarından biridir. Üç boyutlu yazıcı prensibinin kullanıldığı eklemeli imalat teknolojisi, geleneksel üretim metotlarına göre önemli avantajlar sunmaktadır. Diğer eklemeli imalat çeşitlerine göre avantajlar içeren tel ark eklemeli imalat metodu ise eklemeli imalat çeşitleri arasında en hızlı gelişen yöntemlerden biridir. Sahip olduğu bir çok avantajın yanında, tel ark eklemeli imalat yönteminde kaynak parametrelerinin doğru belirlenmesi, üretilmek istenilen parça kalitesini en çok etkileyen etmendir.

Bu çalışma kapsamında, ER-4043 alüminyum alaşımının kullanıldığı tel ark eklemeli imalat metodunda, tel hızı (akım değeri), ark boyu (voltage değeri) ve robot hızı parametrelerinin üretilen parçanın mekanik özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak belirlenen dokuz farklı kaynak parametre setinin kullanıldığı ve üretilen parçalarda en iyi mekanik özelliklere ulaşılmasının hedeflendiği ideal kaynak parametrelerine ulaşabilmek amacıyla, dokuz adet takoz parça üretilmiştir. İlk olarak, robotik üretim hattında üretilen bu parçaların yüzeyleri, mekanik testlerin yapılabilmesi için freze ve taşlama makinaları ile temizlenmiş ve iç yapılarındaki boşlukların incelenebilmesi amacıyla X-Ray radyografik çekimleri yapılmıştır. Ardından, tel erezyon makinası yardımı ile takoz parça levhalarından test numuneleri istenilen ölçülere göre kesilerek çıkarılmıştır. Numune parçalar üzerinde çekme testleri, Charpy darbe testleri ve sertlik belirleme testleri yapılarak numune parçaların mekanik dayanımları tespit edilmiştir. Son olarak Taguchi metodu yardımı ile test numunelerinin mekanik dayanımlarına en çok etkisi bulunan kaynak parametreleri belirlenerek en iyi mekanik dayanıma ulaşmayı sağlayan kaynak parametre setleri tespit edilmiştir.

Yapılan değerlendirmede, üretilen parçaların mekanik dayanımlarını etkileyen en önemli parametrelerin ark boyu (voltage değeri) ve tel hızı (akım değeri) olduğu görülmüştür. En iyi mekanik dayanım değerlerine ulaşılan parametre setleri ile üretilen takoz parça levhalarındaki radyografik görünümelerde ise çok az sayıda iç boşluk olduğu tespit edilmiştir. Çekme dayanımında en etkili sonuca 4 m/dk tel hızı, -30 ark boyu ve 60 cm/dk robot hızı parametreleri ile üretilen parçada ulaşılmıştır. Uzunlukta, 5 m/dk tel hızı, -30 ark boyu ve 40 cm/dk robot hızı parametreleri ile üretilen parçanın en iyi performansı gösterdiği görülmüştür. Darbe dayanımında en etkili sonucun ise, 6 m/dk tel hızı, -30 ark boyu ve 50 cm/dk robot hızı parametre seti ile elde edildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Alüminyum, Metal Eklemeli İmalat, Tel Ark Eklemeli İmalat, Proses Parametrelerinin Etkileri, Mekanik Test Sonuçları, İdeal Test Parametreleri

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF PROCESS PARAMETERS IN WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

SUMMARY

Additive manufacturing technology is one of the most critical production methods of the Industry 4.0 revolution. Additive manufacturing technology, in which the three-dimensional printer principle is used, offers significant advantages over traditional production methods. The wire arc additive manufacturing method, which has advantages over other additive manufacturing types, is one of the fastest developing methods among additive manufacturing types. In addition to its many advantages, the correct determination of welding parameters in the wire arc additive manufacturing method is the factor that most affects the quality of the part to be produced.

In this study, the effects of wire speed (current value), arc length (voltage value), and robot speed parameters on the mechanical properties of the manufactured part were investigated in the wire arc additive manufacturing method using ER-4043 aluminum alloy. Nine test pieces were produced in order to reach the ideal welding parameters. Nine parameter sets determined using the Taguchi experimental design method were used, and the best mechanical properties of the produced parts were aimed to be achieved. Firstly, the surfaces of these parts produced in the robotic production line were prepared with milling and grinding machines in order to carry out mechanical tests. After that, X-Ray radiographic pictures were taken to examine the porosity in their internal structures. Then, with the help of a wire erosion machine, the test samples were cut from the test piece plates according to the desired dimensions. Tensile strength tests, Charpy impact tests, and hardness tests were performed on the sample parts, and the mechanical strengths of the sample parts were determined. Finally, with the help of the Taguchi method, the welding parameters that have the most effect on the mechanical strengths of the test specimens were determined, and the welding parameter sets that provided the best mechanical strengths were determined.

In the evaluation, it was observed that the most critical parameters affecting the mechanical strengths of the parts are arc length (voltage value) and wire speed (current value). It was seen that very few internal pores were formed in the test piece plates produced with the parameter sets that achieved the best mechanical strength values. The most effective result in tensile strength was achieved with the parameter set of 4 m/min wire speed, -30 arc length, and 60 cm/min robot speed. In elongation, it was seen that the part produced with the parameters of 5 m/min wire speed, -30 arc length, and 40 cm/min robot speed showed the best performance. Moreover, it was observed that the most effective result in impact resistance was obtained with 6 m/min wire speed, -30 arc length, and 50 cm/min robot speed parameter set.

Keywords: Aluminum, Metal Additive Manufacturing, Wire Arc Additive Manufacturing, Effects of Process Parameters, Mechanical Test Results, Ideal Test Parameters

1. GİRİŞ

İçinde bulunduğumuz ve Endüstri 4.0 olarak adlandırılan endüstriyel devrimin en önemli yeni üretim metotlarından biri de eklemeli imalat yöntemidir. Eklemeli imalat teknolojisi, diğer bir deyişle “3B yazıcı teknolojisi” son yıllarda hızla gelişmektedir. Geleneksel imalat yöntemlerinden farklı olarak, eklemeli imalat yönteminde üretilen parçaya ait katmanlar üst üste yerleştirilip bu katmanlar birbirleri ile birleştirilerek, üretilmek istenilen parça oluşturulmaktadır. Son yıllarda, malzeme kullanımı, tasarım özgürlüğü ve zaman tasarrufu gibi özel avantajlar nedeniyle, eklemeli imalat süreçleri endüstriyel uygulamalarda giderek artan bir önem kazanmıştır.

Eklemeli imalat yöntemi, mühendisler tarafından tasarımı ve çizimleri yapılan parçaların fiziksel nesnelere dönüştürülmeleri için 3 boyutlu yazıcı yaklaşımını kullanmaktadır. Üç boyutlu olarak çizilen ve CAD modelle belirlenmiş geometriyi oluşturmak amacıyla her bir ince malzeme tabakasının eritildiği bu üretim metodunda; fiktür yada kesici bir takım kullanılmadan ve atık malzeme oluşturulmadan, karmaşık geometriye sahip parçalar üretilmektedir. Bu sebepten dolayı eklemeli imalat teknolojileri dünyada ilgi gören, yenilikçi ve oldukça hızlı gelişen bir sektör olarak ortaya çıkmaktadır.

Eklemeli imalat yönteminin getirmiş olduğu en önemli avantajlar, geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi mümkün olmayan kompleks geometriye sahip parçaların üretilmesine imkan tanınması ve freze gibi katı malzemelerden talaş kaldırma metodu kullanan yöntemlere göre daha ekonomik bir üretim metodu seçeneğini sunmasıdır. Sıvı, katı ve toz şeklindeki hammaddeler kullanılarak gerçekleştirilebilen eklemeli imalat yöntemi; malzeme tasarrufu, düşük maliyet, kalıp gerektirmeden parça üretebilme ve kompleks şekilli parçalarda tasarım esnekliği gibi avantajları sayesinde, ağırlıklı olarak kullanıldığı medikal, havacılık ve otomotiv alanlarına yeni bir soluk getirmiştir.

Sanayi sektöründen gelen talepler doğrultusunda eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçalara ait boyutların artırılması amacıyla, endüstride yaygın şekilde

kullanılan farklı kaynak yöntemi ve ekipmanların bu üretim metoduna dahil edilmeleriyle daha büyük geometrik ölçülere sahip parçalar elde edilebilmektedir.

Gelecekte, geniş yerleşim alanına sahip olan fabrikalarda bulunan büyük üretim makinaları yerine daha küçük ve kompakt üretim alanlarında üretim yapılacağı öngörülmektedir. Metal eklemeli imalat, büyük bileşenleri imal etme üstünlüğü ve tüm kaynaklanabilir metalik bileşenlerin yaygın kullanımı nedeniyle Endüstri 4.0 için hayati bir role sahiptir.

Tel ark eklemeli imalat olarak da anılan WAAM üretim teknolojisi, geleneksel kaynak yöntemi ile eklemeli imalat teknolojisinin birarada kullanıldığı ve son yıllarda hızla gelişen yeni bir üretim metotudur. Bu metod kullanılarak daha yüksek otomasyon seviyelerine çıkılabilmesi, diğer metal eklemeli imalat yöntemlerine göre daha yüksek üretim hızlarına ulaşılabilmesi, hammaddenin daha verimli kullanılabilmesi, ek işleme gereksinim duyulmadan doğrudan üretim yapılabilme imkanı ve işlenmesi zor metallerle üretim yapılabilmesi bu üretim metotunun temel avantajlarını oluşturmaktadır.

Toz bazlı metal eklemeli imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında WAAM metotunda kullanılan tel hammaddenin toz hammaddeye göre daha düşük maliyetli olması ve daha yüksek malzeme biriktirme oranı sağlayabilmesi bu teknolojinin hızla gelişmesine sebep olmaktadır. Bilindiği gibi toz bazlı metal eklemeli imalat yöntemlerinde üretilebilecek parça boyutları, toz yatağı boyunu aşamamaktadır. WAAM metotunda ise temel olarak robot kinematiği kullanıldığından dolayı, üretilecek parça boyutları teorik olarak üretim ekipmanı boyutları ile sınırlı değildir. WAAM üretim metodu, %100'e kadar etkinlikle hammadde kullanımına imkan vermesinden dolayı çevre dostu olduğu kadar, insan operatörlere zararlı olabilecek tozlu bir üretim ortamı oluşmasını da engeller. WAAM üretim metodu, bu doğal özelliklerinden dolayı ümit verici bir üretim metodu olarak görülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında tel ark eklemeli imalat yönteminde proses parametrelerinin ürün üzerinde oluşturdukları etkiler incelenmiştir. Bu konunun alt yapısını tanımlayabilmek amacıyla ilk olarak literatür araştırması yapılmıştır. Bu kapsamda eklemeli imalat yöntemlerinden bahsedilerek bu yöntemlerin geleneksel imalat yöntemlerine göre getirdikleri yenilikler ve uygulama yöntemleri konusunda bilgi verilmiştir. Ardından WAAM teknolojisi tanıtılarak bu metotun sağladığı avantaj

ve dezavantajlardan bahsedilip proses parametrelerinin ürün üzerinde oluşturduğu etkiler konusunda bilgi verilmiş ve bu yöntem kullanılarak alınan sonuçlar özetlenmiştir.

Materyal ve Yöntem başlığı altında tez kapsamında kullanılan materyal ve yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Test numunelerinin çıkarıldığı takoz parçaların imalatında kullanılan robot, kaynak ekipmanları ve bunlara ait üretim parametreleri anlatılarak, test numunelerinin takoz parçalardan kesilerek çıkarılmasında kullanılan freze, taşlama makinası ve tel erezyon makinası hakkında açıklamalar yapılmıştır. Numune parçalara yapılan testler sırasında kullanılan test ekipmanları ve test metotları kısaca açıklanarak Taguchi deneysel tasarım yöntemi hakkında bilgi verilmiştir.

Tez kapsamında hazırlanan Bulgular ve Tartışma bölümünde ise yapılan radyografik çekim resimleri yorumlanarak farklı kaynak parametre değerleri ile üretilen numune parçalara uygulanan çekme testi, Charpy darbe testi ve sertlik testleri sonuçları paylaşılmış ve sonuçları karşılaştırılarak tartışılmıştır. Ardından Taguchi yöntemi yardımı ile en iyi mekanik dayanım değerlerini verecek parametre değerleri belirlenmiştir.

Çalışmanın Sonuç ve Öneriler kısmında ise çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli İmalat (Eİ) metodu, çok sayıda ince tabaka şeklindeki malzemenin üst üste serilerek malzemelerin birbirine eklenmeleri yöntemiyle parça üretiminin yapıldığı bir üretim metodudur. Eİ terminolojisi ASTM F2792 standardı ile tanımlanmıştır (Url-1).

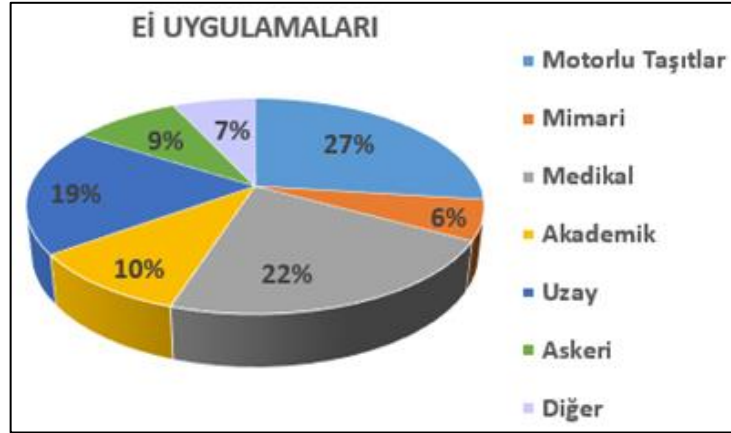
Dilberoglu ve ark. (2017).yaptıkları çalışmada Endüstri 4.0 olarak adlandırılan ve içinde bulunduğumuz yeni endüstriyel devrimde, malzeme ve prosesteki kısıtların çözümlenmesi durumunda MEİ yönteminin anahtar rol oynayacağını öngörmektedirler. MEİ yöntemindeki gelişmelere rağmen, proses hız ve güvenilirliğinin arttırılması, ürüne ait birim maliyetin azaltılması, nihai ürüne ait zayıf mekanik özellikler gibi sorunların çözülmesi amacıyla büyük çaplı Ar-Ge çalışmalarının yapılmasına devam edilmektedir. Olası sonradan işlem gereksinimine rağmen, Eİ'nin, katı malzemedan frezelemeye kıyasla ekonomik olarak uygun bir seçenek olarak karşımıza çıktığını belirtmişlerdir.

Karayel ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada Eİ teknolojisi ve yöntemlerini tanıtarak bu yöntemin kullanım alanlarını anlatmışlardır. Ayrıca literatürdeki son araştırmaları inceleyerek kaynak parametreleri ve bu yeni yöntemin mekanik özellikler ve mikroyapılar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

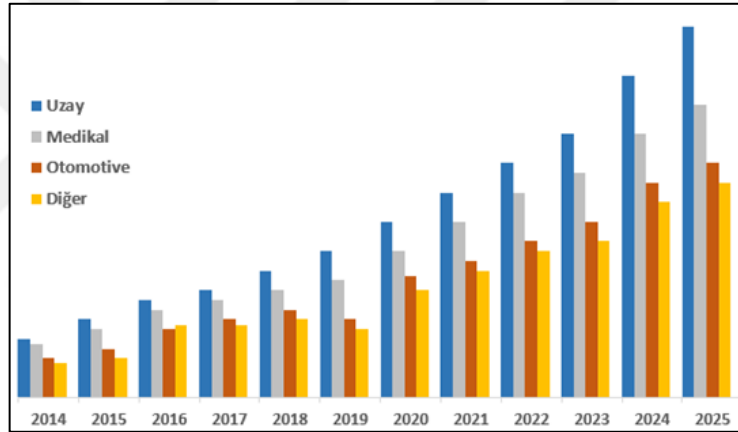
Eİ teknolojisi, diğer bir deyişle “katmanlı üretim” veya “3B yazıcı teknolojisi” son yıllarda hızla gelişmektedir. Geleneksel imalat yöntemlerinden (GİY) farklı olarak, Eİ teknolojisinin çalışma prensibi, katmanları üst üste yerleştirerek katman bazlı üretim oluşturmaktır. Eİ yöntemi, kalıba ihtiyaç duyulmadan parçaların üretilebilmesi, düşük hammadde sarfıyatı, uygun maliyet ve kompleks şekilli parçaların üretiminde kolaylık gibi avantajları sayesinde özellikle havacılık, otomotiv ve medikal alanlarında yoğun kullanım alanları bulmuştur (Karayel ve diğ, 2020).

Bununla birlikte Karayel ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada, Eİ yöntemiyle üretilen parçaların boyutsal sınırlamaları bulunduğunu bildirmişlerdir. Son zamanlarda yapılan araştırmalara göre, bu sorunu gidermek için Eİ ile üretilen metal malzemeler, yaygın olarak kullanılan farklı kaynak yöntemleri ile bir araya getirilerek büyük parçalar elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Günümüzde pazar payına göre, eklemeli imalat yöntemlerinin uygulandığı sektörler Şekil 2.1’de, Eİ yönteminin önümüzdeki yıllarda kullanım oranlarındaki artış tahmini ise Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.1 : Eİ Yönteminin Uygulandığı Sektörler (Karayel ve diğ., 2020).



Şekil 2.2 : Eİ Yönteminin Kullanım Oranı Artış Tahmini (Karayel ve diğ., 2020).

Dilberoğlu ve ark. (2017) yaptığı çalışmada içinde bulunduğumuz ve en son sanayi devrimi olan Endüstri 4.0'a katkılarıyla birlikte bu yeni hareketin en önemli bileşenlerinden biri olan eklemeli imalat teknolojileri üzerine kapsamlı bir incelemede bulunmuşlardır. İnceleme, eklemeli imalat yöntemlerinin üç önemli yönüne odaklanmaktadır:

- Malzeme bilimindeki son gelişmeler,
- Süreç geliştirme üzerinde yapılan iyileştirmeler,
- Tasarım üzerinde yapılan iyileştirmeler,

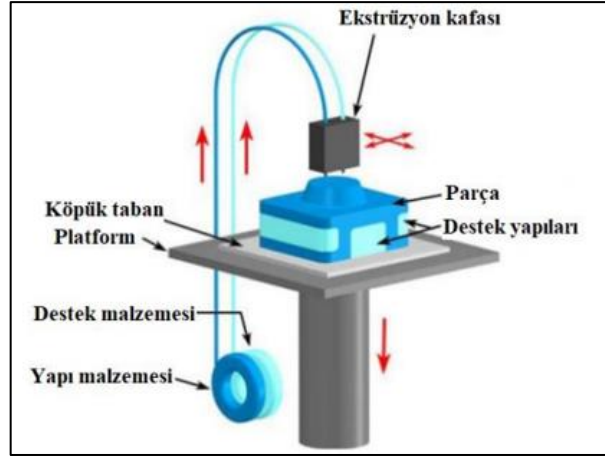
Yaptıkları çalışmanın temel amacı, Eİ hakkındaki mevcut bilgileri ve teknolojik eğilimleri sınıflandırmak ve potansiyel kullanımlarını vurgulamaktır.

Dilberoğlu ve ark. (2017) metal malzemeler kullanarak yapılan Eİ yöntemlerinde dört temel yaklaşımın bulunduğunu belirtmişlerdir: i) toz yatağı füzyonu, ii) doğrudan enerji biriktirme, iii) malzeme püskürtme, iv) bağlayıcı püskürtme. İlk iki tür, endüstride en yaygın olanlardır. Seçmeli lazer sinterleme / eritme (SLS / SLM) ve elektron ışınli ergime (EBM) gibi toz bazlı teknolojiler, bir toz havuzundaki malzemeyi ısıtmak için bir enerji kaynağı kullanır ve kullanılan kaynağa göre adlandırılır. Öte yandan, enerji için lazer ışığının kullanıldığı LENS gibi doğrudan enerji biriktirme teknikleri, erimiş metalin biriktirilmesi sırasında eritme için termal enerjiyi kullanır (Dilberoglu ve diğ, 2017).

Sürmen (2019) yaptığı çalışmada Eİ teknolojisi ve üretim yöntemleri üzerinde incelemede bulunmuştur. Yapılan çalışmada Eİ yöntemleri sıvı, katı ve toz malzeme ile yapılan imalat yöntemleri olarak üç tipte incelenmiştir.

Eİ dendiğinde ilk akla gelen imalat yöntemi FDM (Eriyik Yığarak Modelleme) metodudur. Bu yöntemin yaygın olarak kullanılma sebebi düşük maliyetli olması ve bir çok masaüstü modelinin mevcut olmasıdır. FDM metodunda ABS ve karbon fiber malzemeden üretilmiş filamentler makaralara sarılmış olarak kullanılır. Basımdan önce ekstrüzyon kafasındaki yuvaya yerleştirilen filament, basım sırasında nozüle doğru itilirken ısıtılarak sıcaklığının basım sıcaklığına ulaşması sağlanır. Dilimleme programındaki kodlara göre nozul hareket ettirilerek üretimi istenilen parça katman katman oluşturulur. Bütün katmanların oluşturulması ile 3B Eİ tamamlanmış olur. Varsa parça üzerindeki destek kısımları temizlenerek yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi amacıyla zımparalama yapılır.

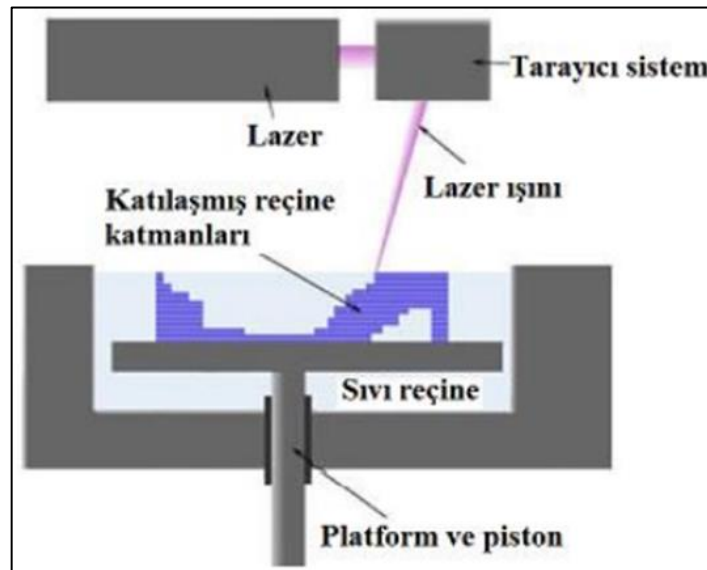
FDM metodu çoklu kafa kullanılarak hem ürün hemde destek malzemesinin yada farklı renklerde imalatın sırayla kullanımına imkan tanır. Bu teknoloji ile üretilen parçalar sağlam yapılı olup fonksiyonel olarak kullanılabilirler. FDM teknolojisinde basım hızı yüksek olmamasına rağmen nihayi ürüne ait mekanik, kimyasal ve termal özelliklerin tatminkar olması, çevre dostu olması, kullanım kolaylığı ve düşük maliyetli olmasından dolayı diğer 3B teknolojilerine göre ön plana çıkmasına sebep olmuştur. Bununla birlikte yüzey çözünürlüğünün düşük olması, düşük baskı hızı ve metal parçaların üretimine uygun olmaması kullanım alanının kısıtlanmasına sebep olmuştur (Dudek, 2013). FDM teknolojisinin çalışma prensibini gösteren şematik resim Şekil-2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3 : FDM Teknolojisinin Çalışma Prensibi (Dudek, 2013).

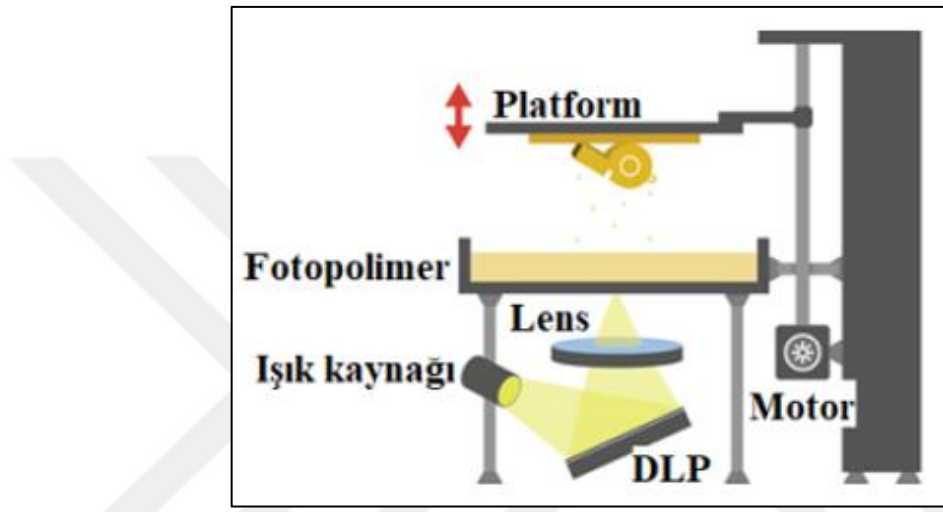
Diğer sıvı tip Eİ yöntemi SL (Stereolitografi) yöntemidir. SL teknolojisi sıvı haldeki fotopolimer reçine tabakasının geometrik verilere göre ultraviyole lazer ışını ile kürleştirilmesini içerir. 3B kodları oluşturulan parçaya ait ilk katman, lazer ışınının reçine tabakasını tarayıp kürleştirilmesi ile oluşturulur. Reçine tabakası katılaştıktan sonra platform bir katman yüksekliği kadar aşağı hareket ederek katılacak tabakanın üstü reçine ile sıvanır ve kürleştirme işlemi tekrarlanır. Reçine içine seramik tozunun da eklenebildiği SL metodunda üretilen parçalar pürüzsüz yüzey ve ayrıntılı geometriye sahip olurlar. Yüksek baskı hızına ulaşılabilmesine rağmen malzeme maliyetinin yüksekliği bu metodun dezavantajını oluşturur (Chaput ve Chartier, 2007).

Oropallo ve Piegl (2016) yaptıkları çalışmada, SL teknolojisinin çalışma prensibini anlattıkları şematik resim, Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4 : SL Teknolojisi Çalışma Prensibi (Oropallo ve Piegl, 2016).

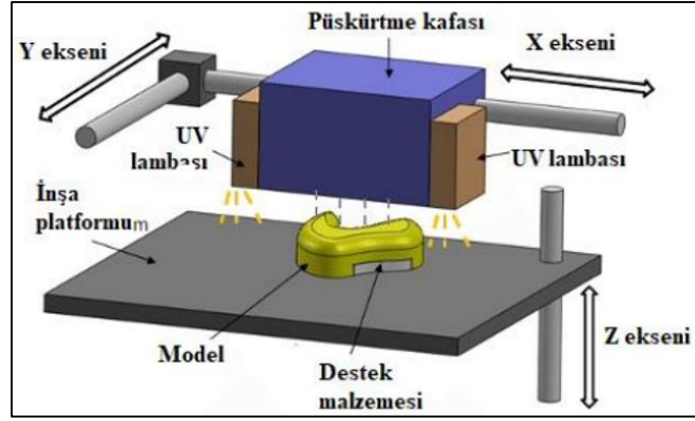
Bir diğ er fotopolimerizasyon y ontemi, SL metoduna çok benzer olan DLP (Dijital Işık I ileme) teknolojisidir. DLP metodunun SL metodundan temel farkı ışık kaynaklarının farklı olmasıdır. DLP metodunda ışık kaynağı olarak lazer yerine reçine havuzunun altında bulunan bir projektör kullanılır. SL metodunda lazer ışını üretilen katmanı tarayarak ilerlerken, DLP metodunda projektör tüm katman yüzeyine tek seferde etki eder. DLP metodu SL metoduna göre daha hızlı olmakla birlikte çözünürlüğü daha düşüktür. DLP’de projektörün çözünürlüğü basım kalitesi ve hacmi ile yakından ilişkilidir. DLP teknolojisinin şematik gösterimi  ekil 2.5’de verilmiştir (Url-2).



Şekil 2.5 : FDM Teknolojisinin  alı ma Prensibi (Url-2).

Fotopolimer reçine malzemesi kullanımı ile gerçekleştirilen bir diğ er E  y ontemi, polijet ( oklu p  sk rtme) metodudur. Inkjet teknolojisi mantığı ile çalışan bu metod ile renkli parçalar  retilabilmekte ve birden fazla malzeme hassas ve yüksek hızla basılabilmektedir. Bu özelliğı sayesinde çoklu p  sk rtme metodunda aynı parça üzerinde farklı mekanik özelliklere sahip kısımlar oluşturulabilmektedir (Wong ve Hernandez, 2012). Detaylı ve yüksek yüzey kaliteli parçaların  retilabildiğı bu metod SL teknolojisi ile mürekkep p  sk rtmeli 2B yazıcıların biraraya getirilmiş hali olarak düşünülebilir. Basım tablasına fotopolimer reçine p  sk rt ld ğ  sırada UV ışını ile k rle tirilerek katmanlar üst üste oluşturulur. Aynı anda farklı malzemelerin kullanılabildiğı polijet metodunda, kolay temizlenebilen formda destek malzemeleri kullanarak temizleme işlemi sonrasında yüzeylerde iz oluşumunun önüne geçilebilmektedir (Adamidis ve diğ., 2018).

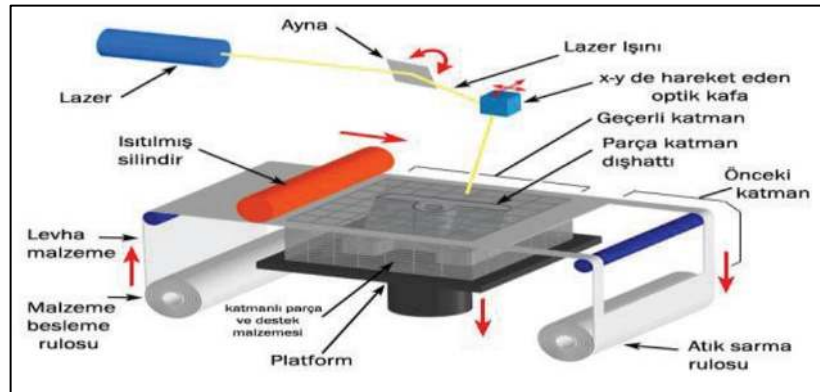
Udroiu ve Prada (2017) tarafından yapılan çalışmada PJ teknolojisinin çalışma prensibinin anlatıldığı şematik resim,  ekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6 : PJ Teknolojisinin Çalışma Prensibi (Udroiu ve Prada, 2017).

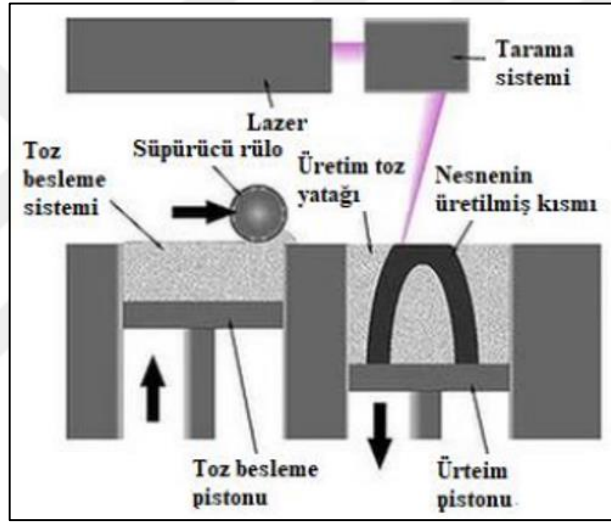
Katı malzeme ile yapılan Eİ yöntemi LOM yada Lamine Nesne İmalatı adı ile anılır. Bu yöntemde kullanılan malzemeler sac formunda olup imalat sırasında ekleme ve çıkarma teknikleri birlikte kullanılır. Bu yöntemde en sık kullanılan malzemeler metalik sac, seramik bant, kağıt ve plastik film olarak sayılabilir. Sac formundaki malzeme lazer kullanılarak dilimleme programında belirlenen ölçülere göre kesilir. Kesim işleminin ardından malzemeyi taşıyan platform sac malzeme kalınlığı kadar aşağıya indirilerek, üzerine yeni katmanı oluşturacak sac malzeme getirilir. Katmanlara basınç ve ısıtma işlemleri uygulanarak sac malzemeler termal bağlayıcılarla birbirlerine yapıştırılırlar (Ramya ve Vanapalli, 2016).

Wong ve Hernandez (2012), yaptıkları çalışmada LOM teknolojisine ait en önemli avantajları düşük maliyet, destek yapılarına ihtiyaç olmaması, işlem sırasında malzemelerin deformasyona uğramaması ve son işlem ihtiyacının bulunmaması olarak sıralamışlardır. Aynı çalışmada iç boşluk ve kanallara sahip karmaşık yapıları parçaların üretilmemesi ve düşük yüzey çözünürlüğünü bu metodun en önemli dezavantajları olarak belirlemiştir. LOM teknolojisinin şematik gösterimi Şekil 2.7’de verilmiştir (Url-3).



Şekil 2.7 : LOM Teknolojisinin Çalışma Prensibi (Url-3).

SLS yada Seçmeli Lazer Sinterleme olarak anılan metod, toz malzemelerin lazer ışını yardımıyla sinterlenip birleştirilmesi temeline dayanır. Isı yardımı ile birbirlerine kaynaştırılan toz malzemeler üretilmek istenilen parçayı oluştururken, sinterlenmeyen tozlar destek malzemesi görevini üstlenirler. Üretim prosesi bitiminde tozlar temizlenerek parça çıkarılır (Sürmen, 2019). Yüksek detaylı ve tam dolu parça üretiminin yapılabildiği SLS metodunda metal, seramik, cam ve naylon gibi malzemeler kullanılabilir. Ancak bu teknoloji yapısı gereği güçlü bir lazer kaynağına ihtiyaç duyar. Maliyeti arttıran bu sebepten dolayı küçük ofis ve ev kullanıcıları arasında yaygınlaşmış bir teknoloji değildir. Bu metodla üretilen parçaların yapısında iç gerilmeler oluşabilir. Bu sebepten dolayı gerilme giderme tavlamaına ihtiyaç duyulabilir. SLS teknolojisinin şematik gösterimi Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8 : SLS Teknolojisinin Çalışma Prensibi (Sürmen, 2019).

Agarwala ve ark. (1995), yaptıkları çalışmada Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS) metodunda yapılan bazı değişiklikler sonucu Direk Metal Lazer Sinterleme yada DMSL isimleri ile anılan teknolojinin ortaya çıktığını belirtmişlerdir. DMSL metodu ile ince yapıların üretimi ve mikro boyutlu kaynaştırma işlemlerinde etkili sonuçlar alınmaktadır. 3B ile yapılan birçok metal parça imalatı için oldukça uygun bir teknolojidir. Hızlı üretim, ekonomik malzeme kullanımı, yüksek mukavemetli parça imalatı gibi avantajlarının yanı sıra yüksek ilk yatırım maliyeti, yüksek enerji ihtiyacı ve üretim sonrası son işlem ihtiyacı gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Dupláková ve diğ., 2018).

SLM yada Seçmeli Lazer Ergitme isimleri ile anılan metod, SLS metoduna çok benzeyen bir Eİ teknolojisi. SLM’de SLS’den farklı olarak tam ergitme işlemi

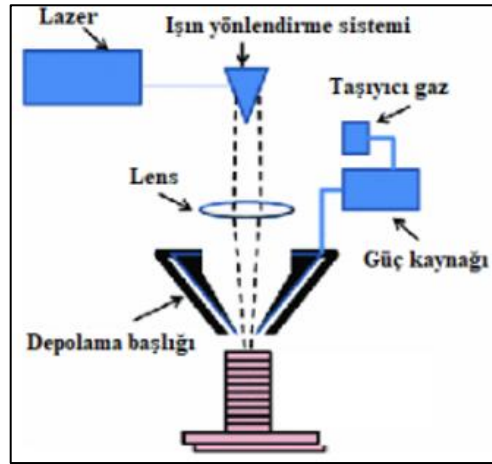
yapılır. Yüksek maliyeti nedeniyle küçük ofis ve ev kullanıcıları için uygun olmayan bu teknoloji en çok havacılık ve medikal sektörlerinde kullanılır. Bu metotta en çok kullanılan malzemelerden biri yüksek korozyon direnci ve biyo-uyumluluğa sahip olan titanyumdur. Bunun dışında alüminyum ve çelik gibi malzemelerin de kullandığı bu teknoloji, SLS’de yoğun olarak kullanılan cam, plastik ve seramik gibi malzemelerin kullanımına uygun değildir. Bu metotta yüksek güçlü lazer kullandığından dolayı prosesin kontrolü kolay değildir. Özellikle sıcaklık kontrolünün dikkatli takip edilmesi gerekir.

Toz yataklı eritme yönteminin kullanıldığı bir diğer metod, EBM yada Elektron Işınlı Ergitme isimleri ile anılır. Bu teknoloji, filament yada metal tozların düşük basınç altında odaklanmış yüksek enerji sağlayan bir elektron ışını tarafından eritilmesi prensibine dayanır (Chua ve Leong, 2014). Teknik resimdeki geometrik verilerin ışığında birbirine kaynaştırılan tozlardan elde edilen katmanlar oluştukça, tabandaki platform adım adım aşağıya çekilir. Platformun her aşağıya inişinde parçanın üzeri metal tozları ile kaplanarak kaynaştırma işlemine devam edilir. Tüm katmanların oluşturulmasıyla 3B üretimi hedeflenen parça ortaya çıkar. EBM metodunda, prosesin vacum edilmiş ortamda gerçekleştirilmesi, elektronların gaz molekülleri ile çarpışma durumunu engellerken reaktif metallerin daha etkin şekilde birleşmelerini sağlar. Bunun yanı sıra enerji tüketiminde tasarruf edilmesine sebep olur. Yüksek mukavemete sahip parçaların üretilmelerinde, EBM tercih edilen bir teknolojidir. Ayrıca EBM teknolojisinde malzeme ile birlikte baskı yatağının da ön ısıtmaya tabi tutulabilmesi, işlem sonunda karşılaşılan artık gerilmelerinin azalmasını sağlar. Ayrıca ışın parametrelerinin ayarlanabilmesi sayesinde parçada oluşan gözeneklilik durumuna da müdahale etmek mümkündür.

Bağlayıcı (Yapıştırıcı) Püskürtme yada BJ isimleri ile anılan metotta, malzemeleri bir bütün haline getirmek için toz malzemenin üzerine yapıştırma özelliği bulunan sıvı bir bağlayıcı malzeme püskürtülerek katı bir katman elde edilir (Hanssen ve diğ., 2013). Yazıcının bulunduğu platform aşağı indirilerek toz malzemenin daha önce oluşturulmuş katmanın üzerine serilmesi sağlanır ve bu döngü devam ettirilerek Eİ imalat işlemi tamamlanır. Bu teknoloji büyük parçaların imalatı için uygun olup metal, kum yada seramik gibi malzemeler kullanılarak üretim yapılabilir. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri işlem sırasında ısıtma ve sıcaklık artışı oluşmadığından dolayı termal etki kaynaklı boyutsal distorsiyonların oluşmamasıdır. Ayrıca SLS

metoduna benzer şekilde metal tozları destek görevi üstlendiğinden dolayı ek destek yapılarına gerek duyulmaz. Çok sayıda farklı malzemenin kullanılabilirdiği ve düşük maliyetli olan BJ metodu ile renkli parçalar da üretilebilir. Bununla birlikte metal BJ teknolojisi ile üretilen parçalar gözenekli bir yapıya sahiptir ve bu sebepten dolayı düşük mekanik özellikleri bulunmaktadır. Mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla parça üretildikten sonra son işlem olarak seramik parçalar genellikle siyanoakrilat yapıştırıcı, metal parçalar bronz infiltrant maddeye ihtiyaç duyarlar.

Lazerle Net Şekillendirme yada LENS adı verilen metotta lazer başlığı, toz malzemeyi püskürten nozul ve inört gaz üfleyen üniteler kullanılmaktadır. LENS teknolojisi ile imalat yapılırken lazer ile oluşturulan eriyik havuzunun üzerine argon gazı koruması altında toz malzeme püskürtülür. Ardından eriyik malzeme soğuyarak katılaşır ve tekrarlanan bu işlem sonunda parça üretimi tamamlanır. LENS teknolojisi, paslanmaz çelik, titanyum, nikel alaşımları, alüminyum, bakır alaşımları, vanadyum ve takım çeliği gibi malzemelerin kullanımına uygun bir teknolojidir. Bu teknoloji kullanılarak diğer metodlarla gerçekleştirilmesi imkansız yada çok pahalı tamir işlemleri yapılabilmektedir. Bununla birlikte sıcaklık değişimleri sonucunda oluşan artık gerilimler, hassas parçaların tamiri yapılırken göz önünde bulundurulması gereken bir faktördür ve tamir sonrası parçalarda son işlem gerekir (Wong ve Hernandez, 2012). LENS teknolojisinin şematik gösterimi Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9 : LENS Teknolojisinin Çalışma Prensibi (Wong ve Hernandez, 2012).

Elektron Işınlı Eklemeli İmalat yada EBAM ismiyle anılan metod ile metal parçalar üretebilmek için metal tozu yada metal filament, elektron ışını yardımı ile kaynatılır. Bu metodun LENS teknolojisinden farkı, lazer yerine elektron ışınının kullanılması sebebiyle daha verimli olması ve işlemin vakumlu bir ortamda gerçekleştirilmesidir.

EBAM metodunun EBM metodundan farkı ise EBAM'da kullanılan toz malzemenin toz yatak yerine bir nozul yardımı ile püskürtülmesi ve bu teknolojinin metal flamentin kullanımına da uygun bir yapıda olmasıdır.

Dilberoglu ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada Eİ yöntemini, tıp, otomotiv ve havacılık gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmasına rağmen, yine de yeni bir teknoloji olarak nitelendirmişlerdir. GİY ile üretmenin imkansız olduğu karmaşık geometrili parçaları düşük maliyetle üretebilme gibi avantajlarına rağmen, seri üretim ve büyük parçaların üretimi konusunda bazı sınırlamalar bulunmaktadır. Kaynak yöntemleri için optimum parametreler sağlandığında başarılı kaynak işlemlerinin elde edilebileceği keşfedildiğinden dolayı boyut sınırlamasını uygun kaynak yöntemleri ve optimize edilmiş kaynak parametreleri ile çözmek mümkündür. Bu nedenle Eİ yönteminde kullanılan farklı malzemeler için farklı kaynak yöntemlerinin kullanımına yönelik çalışmaların artacağı düşünülmektedir. Alüminyum alaşımlar, üzerinde araştırmalar yapılan metal listesinin ilk sıralarında bulunmaktadır. Gelecekte Eİ teknolojisi ile kaynak yöntemlerinin birlikte kullanımının daha yaygın bir yöntem haline geleceği tahmin edilmektedir (Dilberoglu ve diğ, 2017).

2.2 WAAM Yöntemi

Yeni bir MEİ prosesi de tel beslemesiyle birlikte ilave ark kaynağı prosesi olarak tanımlanan tel ve ark katkılı imalattır. Bu yeni imalat yöntemi WAAM (Tel Ark Eklemeli İmalat) kısaltılması ile anılır. WAAM yöntemi ile üretim, gazaltı kaynağı yardımı eritilen tel şeklindeki hammaddenin katmanlar halinde üst üste kaynaklanması ile gerçekleştirilir.

Köhler ve ark. (2019), tel alüminyum şeklindeki hammaddeyi kullanarak WAAM işlemi sırasında kaynak işleminin birikme doğruluğu ve malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini açıklamayı amaçlamışlardır. Bu çalışmada belirttiği gibi, bu imalat yöntemi sayesinde kompleks geometriye sahip parçalar ek bitirme işlemlerine en az miktarda ihtiyaç duyularak ve bunların sonucu olarak da konvansiyonel yöntemlere göre çok daha ucuza üretilebilmektedir.

WAAM yönteminde tel ve gazaltı kaynağı kullanıldığından dolayı, toz bazlı eklemeli imalat yöntemine göre hem daha gelişmiş hammadde kullanımı mümkün olmakta hem de hammadde daha verimli kullanılmaktadır.

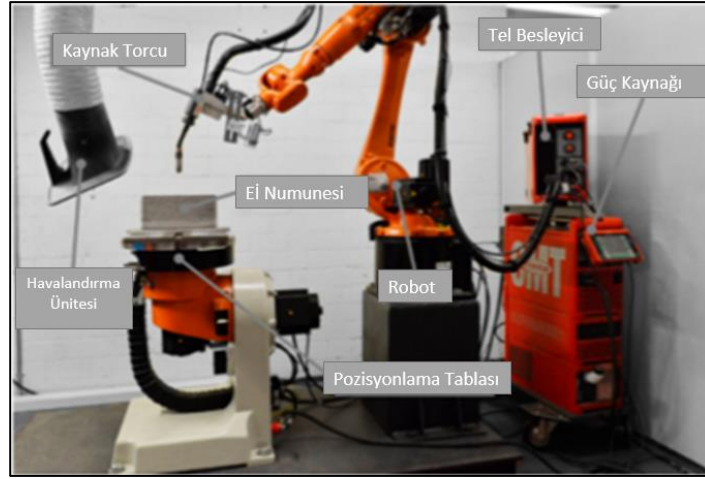
Diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre WAAM yönteminde hammadde kullanımı daha verimli olduğundan ve üretilecek büyük parçaların en az seviyede son işleme tabi tutulma avantajından dolayı tercih edilmektedir (Köhler ve diğ., 2019).

Ekonomik olarak da WAAM yöntemi, enerji açısından ve tel halindeki hammadde sebebiyle, lazer kaynağı ile yapılan eklemeli imalat yöntemine göre daha avantajlıdır. Bununla birlikte geometrik tolerans ve yüzey kalitesi açısından toz bazlı eklemeli imalat yöntemleri seviyesine ulaşamamaktadır. Eklemeli üretim metodundaki olası son işlem gereksinimine rağmen, eklemeli üretim metodlarının konvansiyonel frezeleme işlemlerine göre daha ekonomik olduğu söylenebilir (Köhler ve diğ., 2019).

Köhler ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, WAAM yöntemi ile ilgili olarak kaynak oluşturma rota planlaması, malzemelerin işlenebilirlikleri ve özellikleri hakkında çok sayıda akademik çalışma yapıldığını ancak bu çalışmaların çoğunda çelik ve titanyum malzemeler üzerine odaklanıldığını belirtmişlerdir. Son zamanlarda yapılan araştırmalarda alüminyum içerikli karışım parçaları hakkında da çalışmalar yapılmaya başlandığını özellikle otomotiv sektöründen artarak gelen taleplerde, daha çok döküm işlemi ile üretilen birbirinden farklı parçaların ortaklaştırılması ve eklemeli imalatın yüksek sayıda imalat yapılabilecek bir prosesle birleştirilmesi ile yatırım maliyetlerin yanında birim parça maliyetlerinin de azaltılmasının istendiğini tespit etmişlerdir.

Köhler ve ark. (2019) WAAM teknolojisi üzerine yaptıkları çalışmada kullandıkları düzenek resmi Şekil 2.10'da verilmiştir. Bu düzeneği kullanarak Al 4047 ve Al 5356 alüminyum alaşım malzemelerini, 14 litre/dk akış hızlı saf Argon gazı ($Ar \geq 99.996\%$) altında ve 10 mm torç uzaklığı değerini kullanarak elde ettikleri sonuçlara göre;

- Artan ark boyu ve enerji, damlacık geçişi sırasında daha yüksek dinamik kuvvetlerin oluşmasına sebep olur ve bu durum etkili bir malzeme biriktirme hassasiyeti sağlar,
- Mekanik özellikler yükleme yönüne bağlıdır. Birikme yönüne dik olarak alınan numunelerde uzama kayıpları gözlemlenirken yatay yönde malzeme özellikleri orijinal malzeme özellikleri seviyesindedir,
- Artık gerilme büyüklüğü, dolgu malzemesinin akma dayanımına bağlıdır. En altta bulunan ilk katmanda çekme kuvveti görülürken, üst tabakalarda sıkışma kuvveti gözlemlenmektedir.

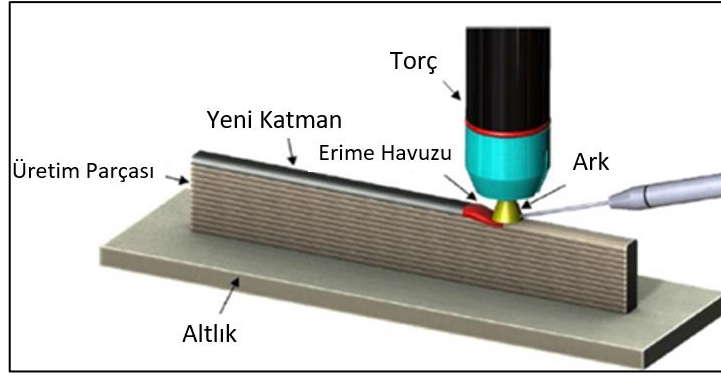


Şekil 2.10 : WAAM Teknolojisi Düzenek Resmi (Köhler ve diğ., 2019).

Derekar ve ark. (2019), farklı alüminyum alaşımları (5356, 5083, 5086) kullanılarak farklı ara geçiş sıcaklıklarında (50 ve 100 °C) WAAM yöntemi ile oluşturulan duvarların fiziksel ve mikro yapılarını incelenmişlerdir. Çalışmalarında fiziksel test ve mikroskop incelemelerinin yanı sıra malzeme röntgen çekimlerinden de faydalanmışlardır.

Alüminyum kaynağı sırasında görünen gözeneklilik oluşumu sorunu birçok araştırmacı tarafından tartışılmıştır. Sıvı ve katı alüminyumdaki hidrojenin çözünürlüğündeki geniş fark, gözenek oluşumunun temel sebebidir. Eriyik kaynak havuzunun katılaşması sırasında katı metalde çözünmüş atomik hidrojen, sıvı ve katı alüminyumdaki hidrojenin sıcaklık ve çözünürlük sınırı farkına bağlı olarak sıvı metale geçer. Hızla oluşan oksit tabakası ayrıca havadaki nemden hidrojeni de emer. Sıvı içinde sürekli artan hidrojen, çözünürlük sınırına ulaşır ve sonunda katılaşmış metalin tane sınırında bir gözenek oluşturur (Derekar ve diğ., 2019).

Müller ve ark. (2019), WAAM yönteminde, ısı kaynağı olarak bir elektrik arkı ve besleme malzemesi olarak da tel kullanıldığını, WAAM ile üretilen parçaların hassasiyeti, toz yataklı sistemler kullanılarak elde edilenlerden daha düşük olsa bile, malzeme biriktirme oranlarının önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ve bu durumun kısa sürede büyük metalik yapısal parçaların üretilmesine izin verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca WAAM tekniğinin, avantajları nedeniyle hem akademi hem de endüstri tarafından benimsenmiş konumda bulunduğunu, titanyum, alüminyum ve paslanmaz çelikler dahil mühendislik alaşımlarının çoğunun zaten WAAM'de mükemmel sonuçlarla kullanıldığını tespit etmişlerdir. WAAM teknolojisine ait şematik resim Şekil 2.11'de verilmiştir (Müller ve diğ., 2019).



Şekil 2.11 : WAAM Teknolojisi Şematik Resmi (Müller ve diğ., 2019).

Rodrigues ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada belirttikleri gibi, azaltılmış ısı girdisi ile erimiş metal birikmesini kontrol ederek daha iyi ve kararlı bir süreç oluşturmak amacıyla, soğuk metal transferi (CMT) olarak bilinen bir GMAW çeşidi, eklemeli üretime uyarlanmıştır. CMT sistemi, birleştirilmiş bir kontrol sistemi ile elektrot tel ucunun erimiş havuzla temas ettiğinin algılandığı ve bir servomotorun etkinleştirilmesiyle, damlacık transferini kontrol etmek için itme ve çekme elektromekanik işleminde telin hareket ettirildiği gelişmiş bir malzeme transfer işlemidir. CMT yani soğuk metal transferinin çeşitleri arasında Fronius firması tarafından geliştirilen CMT pulse (CMT-P), CMT advanced (CMT-ADV) ve CMT pulse advanced (CMT-PADV) bulunmaktadır. Optimize edildiğinde, CMT işlemi titanyum bazlı alaşımlarda uygulama için oldukça uygundur.

Müller ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, WAAM tekniği ile üretilen parçaların kullanıldığı uygulamaların zaten piyasada bulunduğunu ve endüstriden gelen taleplerin WAAM tekniği uygulamalarını genişletmede kritik bir rol oynamasının beklendiğini belirtmişlerdir. Sertifikasyon prosedürlerinin ve etkili tahribatsız hat içi yöntemlerin geliştirilmesiyle birlikte, WAAM'ın yakın gelecekte en çok kullanılan katmanlı üretim teknolojilerinden biri olması beklenildiğini tespit etmişlerdir. Mevcut ark kaynağı işlemlerinden, MIG / MAG olarak da bilinen GMAW, WAAM'da en çok kullanılan procestir. GMAW, arkın, kaynak tel ucu ile iş parçası arasında, kaynak havuzunu ve bitişik malzemeyi de koruyan bir inert veya aktif koruyucu gazın koruması altında oluşturulduğu füzyon tabanlı bir ark kaynağı işlemidir. Katmanlı imalatla GMAW tekniği ile malzeme biriktirme oranları, biriktirilen malzemeye ve işlem parametrelerine bağlı olarak, 15 ile 160 g/dak arasında değişir. Bu da GMAW tekniğini kısa zaman aralıklarında büyük ölçekli parçaların üretimi için ideal hale getirir (Müller ve diğ., 2019).

Gierth ve ark. (2017), WAAM yönteminde Al 5556 alaşımı kullanarak oluşturulan ürünlerde, mikroyapı ve mekanik özelliklerin üretim sırasında malzemeye aktarılan enerji girdisinden nasıl etkilendiklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada belirttiği gibi, mükemmel mukavemeti, hafifliği ve iyi korozyon direnci nedeniyle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde büyük ölçekli alüminyum parçalar kullanılmaktadır. Çalışmada katmanlı üretim süreçlerinin, bileşen imalatı bağlamında hem maliyet hem de zaman tasarrufu sağladığı ve bu nedenle WAAM'nin, yüksek malzeme biriktirme oranı nedeniyle özellikle büyük hacimli parçaların üretimi için uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Alüminyum ve alaşımları, uygun özelliklerin kombinasyonundan dolayı çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Düşük yoğunluk, uygun mukavemet ve deformasyon özelliklerinin yanı sıra yüksek termal ve elektrik iletkenliği ile karakterize edilirler. Ek olarak, alüminyum alaşımları pasifleştirici bir oksit tabakasının gelişmesi nedeniyle kimyasal ortamlara karşı yüksek korozyon direnci sergilerler (Gierth ve diğ., 2017).

Gierth ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada tel ark eklemeli imalat yönteminin, yeni, hafif yapıların üretimine izin veren karmaşık geometriler oluşturma imkanı sunmasının yanında, üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve bu durumun da üretim sonrası malzeme çıkarma yöntemleriyle sonradan işlemeyi gerektirdiğini belirtmişlerdir. Çalışmada bunlara ek olarak, tel ark eklemeli imalat yönteminin alüminyum malzemeler ile kullanımında, gözeneklilik ve katılaşma çatlakları gibi kusurlar sebebiyle kullanım sınırlamaları ile karşılaştıklarının altı çizilerek gözenekliliğin ana sorun olduğu ve bileşenlerin dayanıklılığı veya süneklik gibi mekanik özelliklerini ciddi şekilde sınırlayabildiğini belirtmişlerdir. Çalışma sonucuna göre gözeneklilik, tel kalitesi, alaşım bileşimi ve pasolar arası sıcaklık gibi diğer faktörlerden de etkilenir ve oluşan mikroyapıya bağlıdır.

Gierth ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada Al 5556 malzemesi ile en az enerji girdisi sağlanması amacıyla CMT teknolojisini kullanmışlardır. Bu çalışmada mikroyapı ile enerji girdisi arasında hem tane boyutu hem de gözeneklilik açısından güçlü bir korelasyon olduğunu göstermişlerdir. CMT'nin bir türevidir olan CMT-PADV işlemi ile yaptıkları çalışmada, 1.44 kJ/cm'lik birim uzunluk başına en düşük enerjiyi elde ederek en ince tane yapısının oluşmasını sağlamışlardır. Bu yöntem sayesinde gözeneklilik oranını % 0.06 'ya düşürmüşlerdir. Birim uzunluk (cm) başına düşen enerji girdisi miktarını şu şekilde formüle etmişlerdir.

$$E_s \left[\frac{kJ}{cm} \right] = \frac{U \cdot I}{v_s} \left[\frac{VA}{\frac{cm}{s}} \right] \quad (2.1)$$

$$E_s = \frac{\frac{1}{(t_n - t_0)} \sum_{i=0}^n \int_{t_i}^{t_{i+1}} u_i \cdot i_i \cdot dt}{v_s} \quad (2.2)$$

Gu ve ark. (2020), WAAM tekniği ile Al 2319 kullanılarak üretilen ürünlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Özellikle WAAM işleminin üzerinde gerçekleştirildiği plakanın da ürün olarak kullanıldığı durumlar için, WAAM işlemi sonrası ısıtıl işlem uygulamasının, hem alttaki plaka parçasının hem de üretilen parçaya ait mekanik özelliklerin homojen olarak hammadde malzeme değerlerine ulaştığını belirtmişlerdir.

Zhou ve ark. (2021), WAAM tekniğinin vakum veya atmosfer altı basınçtaki kapalı alanda, sarf malzemesi olmayan iki tungsten elektrot arasında oluşturulan ark yardımı ile yapılabilirliğini araştırmışlardır. Görsel inceleme sonuçları, sabit olarak oluşturulan arkın, metal teli sürekli olarak eritmeye devam ettiğini göstermiştir. Damlacıklardan ve erimiş havuzdan geçen akım olmadığından dolayı düşük ısı girdisi gibi önemli bir proses özelliği ortaya çıkarılmıştır. Seramik bir nozul kullanılması durumunda, arkın etkili bir şekilde sınırlandırılıp damlacık aktarımı yörüngesinin önemli ölçüde optimize edilebileceği ve bu şekilde hem biçimlendirme özellikleri hem de metalürjik bağlanma mukavemetinin önemli ölçüde geliştirilebileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Vimal ve ark. (2020), özellikle alüminyum alaşımlı teller ile yapılan WAAM üretim tekniğini ve çalışmalarda ortaya çıkan ürünlerin mekanik ve metalürjik özelliklerini incelemişlerdir. WAAM'nin, malzemeyi katman katman sırayla biriktirerek istenen parçaları imal etmek için kullanılan en gelişmiş teknik olduğunu belirterek ve daha yüksek biriktirme oranları, düşük üretim maliyeti ve daha az üretim süresi ile orta ve büyük boyutlu bileşenler üretimi için uygun bir üretim tekniği olarak sınıflandırmışlardır.

Vimal ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada WAAM tekniği kullanılarak yapılan üretim sürecini; süreç planlama, metal biriktirme ve işlem sonrası prosesler olmak üzere üç adıma bölünerek incelenebileceğini belirtmişlerdir. Süreç planlama aşaması şu alt aşamaları içerir; 3B CAD model oluşturma, 2B geometri seti, 3B CAD modeli

dilimleyerek bu 2B geometrilerin her biri için takım yolu oluşturma ve her katman için malzeme biriktirme parametrelerini ayarlama. Bu planlama aşamalarının ardından ürünün, verilen girdi parametreleri ile oluşturulabileceğini belirtmişlerdir. Çalışma sonucuna göre WAAM'ın birçok avantajı olsa da, WAAM'ın pratik uygulanabilirliğini sınırlayan gözeneklilik, korozyon, tabakalara ayrılma, artık gerilmeler, oksidasyon, çatlaklar ve son yüzey düzeltme işlemi gibi belirli sınırlamaların bulunduğu tespit etmişlerdir. Metalurjik ve mekanik özellikleri iyileştirmek için ısıtma işlemi, geçişler arası soğuk haddeleme işlemi, geçişler arası soğutma işlemi ve çekiçleme işlemi gibi farklı proses modifikasyonlarının bulunduğunu belirtmişlerdir.

Vimal ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada WAAM yöntemi ve alüminyum alaşımları kullanılarak uygulanan proseslerde karşılaşılan başlıca zorlukları ve bu zorluklara ait sebepleri şu şekilde sıralamışlardır: 1) Gözeneklilik: Kaynak havuzunda oluşan baloncukları çekirdekletmek için belirli miktarda hidrojen gereklidir. Hidrojen içeriği gerekli seviyeyi aştığında gözenekliliğe neden olur. Bu durum biriktirilen bileşenin düşük mekanik dayanımına yol açar. 2) Artık gerilme: biriken malzemeye etki eden dış kuvvet olmadığında oluşan ve fatik dayanımı ile birlikte mekanik özellikleri etkileyen gerilmedir. 3) Çatlaklar ve deformasyon: Artık gerilme değeri malzemenin nihai çekme dayanımını aştığında çatlaklar gelişmektedir. Artık gerilme, nihai dayanım ile akma dayanımı arasında olduğunda deformasyonlar gelişir. 4) Delaminasyon: Birbirine bitişik katmanların ayrılmasıdır. Esas olarak, yeni bir metal tabakası biriktirilirken alttaki tabakanın uygun olmayan şekilde yeniden erimesi sebebiyle oluşur (Vimal ve diğ., 2020).

Montevecchi ve ark. (2016), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak WAAM işlemi sırasında dolgu maddesi ve taban olarak kullanılan plaka arasındaki enerji girdisi dağılımını hesaba katan yeni bir WAAM ısı kaynağı dağılımı modellemesi önermişlerdir. Önerilen modellemenin etkinliğini kanıtlamak için deneysel doğrulama yaparak, bir WAAM prosesinde tespit edilen artık gerilim ve atıklık bozulmalarını, simüle edilmiş olanlarla karşılaştırarak önerilen modelin doğruluğu kanıtlanmaya çalışmışlardır. Önerilen süreç modellemesi, geleneksel ısı kaynağı modellemesi ile karşılaştırılmıştır. Bazı hatalara rağmen, önerilen modelleme sonuçlarının, deneysel olanlarla genel olarak uyumlu olduğunu ve geleneksel tekniğe göre daha yüksek doğruluk elde etmeyi sağladığını vurgulamışlardır.

Lehmann ve ark. (2020), düşük karbonlu çelik malzemelerin kullanıldığı CMT ilaveli WAAM yönteminde, geometrik, mekanik ve metalurjik tutarlılığı nitel ve nicel olarak etkileyen biriktirme işlemi parametreleri tanımlamışlar ve istatistiksel olarak doğrulamışlardır. Ek olarak, mikro yapı varyasyonları ile geometrik varyasyonlar arasında korelasyonlar bularak optimum bileşen kalitesini elde etmek için yerinde sıcaklık izleme yöntemleri önermişlerdir.

Busachi ve ark. (2015), savunma sanayisinde kullanılabilecek WAAM tabanlı bir üretim sistemi tanımlamaya çalışmışlardır. Üzerine yerleşik WAAM kabiliyetine sahip bir savunma platformu sağlamak, platforma, sistemlerinin daha fazla kullanılabilirliği ve darbeye maruz kaldıktan sonra kapasitesini geri kazanma yeteneği gibi çok önemli avantajlar sağlayacaktır. WAAM'nin, geleneksel talaş kaldırma üretim metodları ile karşılaştırıldığında, oluşturulan atık malzeme miktarının % 90 'lardan % 10 'lara kadar önemli ölçüde azaldığını görmüşlerdir. WAAM teknolojisi, diğer eklemeli imalat ve geleneksel üretim yöntemlerine göre çeşitli avantajlara sahiptir. Titanyum gibi değerli malzemelerde yüksek oranda tasarruf sağlayan nihayi geometrik ölçülere yakın üretim imkanı sağlar. Çalışmalarında titanyumun malzeme biriktirme hızlarının 1 kg/saate kadar ulaştığını ve bunun, toz yatağı teknolojileriyle elde edilen 0,2 kg/saate göre oldukça yüksek olduğunu tesbit etmişlerdir. Yüksek ısı girdisi nedeniyle, WAAM yöntemiyle üretilen ürünlerde mekanik performansının düşmesine sebep olan “Artık Gerilim”, ve gerekli toleranslara ulaşmada zorluklara yol açan “Atıklık” sorunları görülür. Klemp ile taban parçasının sabitlenmesi atıklık sorununu azaltırken, rolling işlemi diye isimlendirilen silindir şeklindeki bir parça ile yeni kaynak üzerinden geçilmesinin artık gerilimlerin azalmasını sağlayacağı değerlendirilmesini yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada rolling işlemi artık gerilim miktarını azaltmanın yanı sıra çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri iyileştirirken, nihayi ürünün fatik kırılım oluşumunu hızlandırdığını belirtmişlerdir.

Venturini ve ark. (2016), WAAM metodu kullanarak geometrik olarak T şeklindeki geçişlerin üretimi için biriktirme yollarının tanımının optimize edildiği bir strateji seçme süreci göstermişlerdir.

Venturini ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada, üretim verimliliği, enerji verimliliği ve düşük hammadde maliyeti ile ön plana çıkan WAAM'nin, yeni eklemeli üretim teknolojileri arasında en umut verici olanlardan biri olduğunu tespit etmişlerdir. Ancak üretim sektöründeki yayılımını sınırlayan ve çözülmesi gereken bazı problemleri de

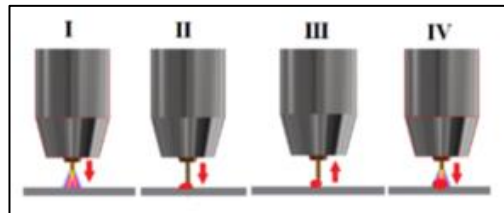
bulunmaktadır. Bunlardan en önemlilerini; artık gerilimi ve gerilmeleri mümkün olduğunca azaltmak ve her katmanda sabit bir yükseklik oluşturabilmek için bileşen geometrik özelliklerinin verimli bir şekilde manuel olarak optimize edilmesi gereken katman biriktirme stratejisine ihtiyaç duyulması olarak sıralamışlardır. Malzeme biriktirme yolunun seçimini; üretkenlik ve malzeme kullanım verimliliği arasında optimum noktanın bulunması ile gerçekleştirilebileceğini belirtmişlerdir.

2.2.1 WAAM Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Prado ve ark. (2017), CMT özellikli WAAM yöntemini ve bu yöntemin avantaj ve dezavantajlarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada son birkaç yılda eklemeli üretime olan ilginin hızlı bir şekilde arttığını ve sadece prototip imalatı için değil, aynı zamanda son ürün üretimi için de metal eklemeli imalat yöntemi üzerinde çalışıldığının altını çizmişlerdir. WAAM yönteminde elde edilen ölçüsel hassasiyetin ± 1 mm seviyesine ulaştığını ve diğer eklemeli üretim yöntemlerine göre WAAM yöntemi ile üretimin daha hızlı ve daha ucuz yapılabildiğini belirtmişlerdir. WAAM yönteminin temel avantajlarını şu şekilde sıralamışlardır;

- a) Malzemenin daha verimli kullanılması,
- b) Daha yüksek otomasyon,
- c) Farklı malzemelerden oluşan parçaların veya işlenmesi zor metallere sahip parçaların imalatı,
- d) Diğer metal katmanlı imalat yöntemlerine göre daha yüksek üretim hızı,
- e) Metalik parçaların ek işleme ihtiyaç duyulmadan üretilme imkanı.

Ürün geometrik toleranslarının iyileştirilmesi amacıyla eritilmiş hammadde damlalarının boyutları ve oluşma hızları kontrol altına alınmaya çalışılmaktadır. Bu amaçla malzemeye verilen ısı miktarının azaltılması amacıyla Fronius firması tarafından CMT (Soğuk Metal Transferi) yöntemi geliştirilmiştir. CMT yönteminin temel aşamaları Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12 : CMT Yönteminin Temel Aşamaları (Prado ve diğ., 2017).

Hauser ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada; CMT'nin kullanıldığı WAAM yönteminde kaynak kalitesine etki eden değişkenleri belirlemişler ve bu değişkenlere örnek olarak akım değeri, voltaj değeri, tel besleme hızı, kaynak ilerleme hızı, torç açısı, koruyucu kaynak gaz çeşidi gibi değişkenleri vermişlerdir. 4000 serisi alüminyum alaşımlarının kaynak uygulamaları ve katmanlı imalat için en uygun alaşımlardan biri olduğunu ve bunun sebebinin alaşım içindeki silikon olduğunu belirtmişlerdir. Silikon (Si), 4000 serisinin ana alaşım bileşenidir ve erime noktasını düşürerek mükemmel kaynaklanabilirliği sağlayan metal akışını iyileştirir. 10 derecenin üzerindeki torç açılarıyla yapılan CMT kaynak uygulamalarında, düşük ısı girdisi ve alüminyumun yüksek ısı iletkenliği sebebiyle kaynak ergiyiğinin çabuk katılaşmasına ve kaynağın kürecikli şekilde oluşmasına sebep olduğunu belirtmişlerdir.

Köhler ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, esnek üretim ve hızlı ürün entegrasyonuna yönelik artan talep, azaltılması hedeflenen ürün geliştirme zamanı ile birleştiğinde, eklemeli üretim gibi yeni üretim teknolojilerinin sürekli geliştirilmesine yol açtığını belirtmişlerdir. WAAM yönteminin, ark kaynağı teknolojisi ve tel malzemeleri gibi uygun maliyetli üretim kaynaklarını kullanarak, karmaşık geometriye sahip büyük yapıların neredeyse net şekle yakın üretim imkanı için ümit verici bir teknoloji sağladığını tespit etmişlerdir. WAAM, toz bazlı katmanlı üretim süreçleriyle karşılaştırıldığında, yüksek biriktirme hızlarının yanı sıra gelişmiş ve daha etkin malzeme kullanımı sunmaktadır. Çalışmada ayrıca, katman katman ürün oluşturma yaklaşımı nedeniyle, enerji girişi, ark özellikleri ve malzeme bileşimi gibi işlem koşullarının eklemeli üretim süreci sırasında farklılaştırılabilir bir işlem yapabilme seçeneği sunduğunu belirtmişlerdir.

Derekar ve ark. (2019), geleneksel yöntemlerle üretilmiş ürünlere kıyasla azaltılmış mekanik özellikler, gözenek oluşumu ve katılaşma çatlamasının alüminyum alaşımları kullanan WAAM ürünlerinin geniş çaplı uygulamalarını kısıtlayan başlıca kısıtlar olduğunu belirtmekle birlikte, düşük maliyet, yüksek biriktirme oranı ve teorik olarak hiçbir boyut sınırı olmayan doğal süreç yeteneklerinin, WAAM yöntemini ümit verici bir teknik haline getirdiğini tespit etmişlerdir.

Müller ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada tel bazlı teknolojilerin toz bazlı işlemlere kıyasla düşük malzeme maliyeti ve daha yüksek malzeme biriktirme oranı sebeplerinden dolayı daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir. Toz bazlı teknolojilerin, geometrik hassasiyetle ilgili yüksek gereksinimleri olan karmaşık geometriler için

daha uygun çözüm olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, SLM işleminde üretilebilecek ürün boyutu, toz yatağı boyutuna göre sınırlıdır, çünkü ürün boyutları toz yatağı boyutlarını aşamaz. Çalışmada ayrıca WAAM sürecinin, CNC veya robot kinematiğı kullandığından dolayı WAAM yöntemi ile üretilebilecek ürün boyutunun teorik olarak ekipman boyutları ile sınırlı olmayacağını belirtmişlerdir.

Kumar ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada, Al 4043 alaşımının kullanıldığı ve WAAM yöntemi ile üretilen ürünlerin mikroyapı ve sertlik değerlerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada uzay alanında ihtiyaç duyulan hızlı şekilde prototip parça üretiminin, CAD modeller kullanılarak mümkün olabileceğinden bahsederek son zamanlarda yapılan eklemeli imalat araştırmalarının kompleks geometriye sahip ve geleneksel yöntemlerle ekonomik olarak üretilemeyen titanyum ve nikel alaşımları üzerine yoğunlaştığından bahsetmişlerdir. Çelik malzeme ile yapılan eklemeli imalat yönteminin geleneksel üretim metotlarına göre üstünlüğünü, özellikle kompleks geometrik yapıların üretilebilmesi olarak belirtmişlerdir. Tipik eklemeli imalat yöntemleri toz ve tel beslemeli imalat yöntemleri olarak karşımıza çıkar. Toz beslemeli imalat yöntemi yüksek geometrik hassasiyette üretim yapabildiğı için daha hızlı gelişmiştir. Yapılan çalışmada toz beslemeli imalat yönteminde her katmanın kalınlığı 20-100 µm, geometrik tolerans +/- 0,05 mm ve yüzey pürüzlülüğü yaklaşık 9-16 µm olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte malzeme biriktirme hızı 10 gr/dak gibi çok düşük bir değerde olduğundan dolayı büyük hacimli parçaların üretilmesinde dezavantaj oluşturduğunu şeklinde yorumlamışlardır. Tel beslemeli eklemeli imalat yönteminde ise temel olarak lazer ışını, gazaltı kaynağı ve elektron ışını olmak üzere üç farklı tip enerji kaynağı kullanılmaktadır. Tel beslemeli eklemeli imalat yönteminde %100'e kadar etkinlikte malzeme kullanımı olduğu için, bu yöntem hem çevre dostudur hem de operatöre zarar verebilen tozlu bir üretim ortamının yaratılmasına engel olur. Tel beslemeli eklemeli imalat yöntemi, toz beslemeli eklemeli imalat yöntemine göre çok daha yüksek malzeme biriktirme hızına sahiptir (paslanmaz çelik için 330 gr/dak). Ayrıca tel malzeme üretiminin, toz malzeme üretimine göre çok daha kolay ve ucuz olduğunu belirtmişlerdir (Kumar ve diğ., 2020).

Horgar ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada, AA5183 alüminyum tel alaşımının kullanıldığı WAAM üretim yöntemini incelenmiştir. Yapılan mikroskobik inceleme sonuçlarında, işlemin uygulanabilir olduğunu, ancak gaz gözenekliliğini ve sıcak çatlamayı azaltmak için daha da optimize edilebileceğı belirlemişlerdir. Malzeme

sertlik ölçüm sonuçları, göreceli olarak yüksek sertlik değerleri olarak tanımlanabilecek yatay düzlemde yaklaşık 75 kg/mm² ve dikey düzlemde 70 ile 75 kg/mm² arasında ölçülmüştür. Yaptıkları mekanik test sonuçlarında, sırasıyla 145 ve 293 MPa'lık akma ve gerilme mukavemetleri en düşük değerler olarak dikey eksen yönünde tespit etmişlerdir. Genellikle seçmeli lazer ergitme (SLM) olarak adlandırılan toz yataklı eklemeli imalat prosesleri ile üretim bileşenleri, diğer eklemeli imalat proseslerine kıyasla en yüksek geometrik esnekliği ve doğruluğu sunar ve çoğu yayında SLM prosesi incelenmiştir. Yaptıkları çalışmada SLM tekniğinin de alüminyum alaşımlı tozlar söz konusu olduğunda zayıf yönleri bulunduğu ve metal tozun yüzeyindeki oksit film ve alüminyum oksidin termodinamik stabilitesinin, bu yüzeyin üründen uzaklaştırılmasını zorlaştırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca alüminyumun nispeten düşük erime noktası ikili sıvı faz oluşturarak yeterli sıvı üretmek için hafif metaller grubuna ait uygun bir düşük erime noktalı bağlayıcı malzeme bulmayı zorlaştırmaktadır. Toz yataklı eklemeli imalat proseslerindeki bazı dezavantajlar, WAAM prosesi seçilerek önlenebilir. WAAM teknolojisini, yüksek biriktirme oranına, yüksek enerji verimliliğine ve düşük maliyetlere sahip olduğu için flanşlar veya sertleştirilmiş paneller gibi orta veya düşük karmaşıklığa sahip büyük bileşenleri oluşturmak için en uygun olan üretim tekniği olarak değerlendirmişlerdir. Çalışmada son olarak WAAM yönteminde de kaynak ısısı girdisinden dolayı ortaya çıkan artık gerilmeler ve geometrik atıklığın yanı sıra geometrik ölçülere ulaşma ve yüzey kalitesi konuları da bu tekniğin zayıf yönleri olarak belirtmişlerdir. (Hogar ve diğ., 2018).

2.2.2 WAAM Yönteminin Proses Parametreleri ve Etkileri

Zhang ve ark. (2019), WAAM yönteminde Al 2219 alaşımı kullanarak oluşturulan ürünlerde, üretim sırasında kullanılan parametrelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri nasıl etkilendiklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada belirttiği gibi, tel ark eklemeli imalat yöntemi (WAAM), üç boyutlu ve büyük ölçekli parçaları doğrudan imal edebilen bir eklemeli üretim tekniğidir. 1,2 mm çapındaki Al 2219 tel ve %99,99 argon gazı kullanılarak yapılan tel ark eklemeli imalat işleminden sonra ısı girdisinin Al 2219'un (AlCu6Mn 'nin) mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkilerini araştırmak için çekme testleri ve mikroskopi çalışmaları yapmışlardır. Uygun ısı girdisi ile en yüksek gerilme mukavemeti 295 MPa ve gerilme uzaması % 18 olarak tespit etmişlerdir. Ayrıca, numunenin alt bölgesinin en iyi mekanik özellikleri

sergilediğini gözlemlemişlerdir. Bunun başlıca nedenini, tekrarlanan termal döngüde ısı birikimi ile üst bölgedeki aşırı yanma kusurlarının ve tane boyutunun artması olarak belirtmişlerdir (Zhang ve diğ., 2019).

Lee (2020), Gauss proses regresyon (GPR) yöntemini kullanarak, belirsizlikler de dahil olmak üzere WAAM işlem parametrelerini modelleyerek hem üretkenliği hem de biriktirme şeklinin kalitesini iyileştirmek için bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Çalışmada da belirtildiği gibi WAAM yöntemi ile yapılan üretim metodu, düşük hammadde maliyetlerinde yüksek verimlilik sağladığı için metaller için en umut verici katmanlı üretim teknikleri arasındadır. Bununla birlikte, fazlalık yüzey malzemesini WAAM işlemiyle üretilen bileşenlerden çıkarmak için ek son işlem gereklidir ve bu nedenle üretkenlik azalır. Metaller için eklemeli imalat (Eİ), havacılık, gemi yapımı ve otomotiv endüstrileri de dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerdeki üretim proseslerinin üretkenliğini artırmanın bir yolu olarak son yıllarda ilgi konusu olmuştur. Eİ, mevcut döküm veya dövme süreçlerindeki daha yüksek üretkenliğe ve üretim esnekliğine sahiptir. Standart bir gazaltı kaynak makinesi, WAAM işleminde bir ısı kaynağı olarak kullanılabilir ve bu, bir lazer veya elektron ışınının kullanıldığı toz tipi Eİ işlemlerine kıyasla ilk yatırım maliyetlerini düşürür. Ayrıca, tel türü hammaddelerin maliyeti, toz türü hammaddelerin maliyetinin yaklaşık % 10'u seviyesindedir. Bu nedenlerden dolayı Lee (2020) çalışmasında WAAM işleminin, düşük bir maliyetle yüksek bir biriktirme oranı sağladığını ve pahalı malzemeler kullanılarak büyük bileşenlerin üretildiği işlemlerde oldukça tercih edilir hale geldiğini belirtmiştir.

WAAM işlemi kullanılarak oluşturulan parçalar, nihai parçanın özelliklerine göre frezeleme veya taşlama gibi son işlemeyi gerektirir. Bu nedenle, sonradan işleme en aza indirilebilirse, WAAM sürecinin üretkenliği ve etkinliği artacaktır. Bazı araştırmacılar yüzey dalgalılığını ve pürüzlülüğü azaltarak nihai ürünü şekillendirmek için çıkarılan hammadde miktarını azaltmak için deneysel çalışmalar yürütmüştür. Lee (2020) yaptığı çalışmada, düşük karbonlu çelik telin kullanıldığı WAAM işleminde ortalama akım değeri arttırıldığında yüzey dalgalılığının azaldığı doğrulanarak, yatay yöndeki homojenliğin, torç hızı ve tel besleme hızı kontrol edilerek iyileştirilebileceğini bildirmiştir. Ayrıca çalışmada az sayıda deney yapıldığında bile, GPR (Gaussian Process Regression) gibi modellere dayalı bir optimizasyonun,

bir operatörün deneyimine veya sezgisine güvenmeye göre optimum parametreleri bulmak için daha kullanışlı olacağını belirtmiştir.

Zhang ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, yüksek malzeme biriktirme oranı, malzeme kullanım verimliliği ve düşük ekipman maliyetleri nedeniyle, WAAM'nin büyük (metre ölçekli) metal parçaların üretimi için havacılık uygulamalarında çok fazla ilgi çektiğini belirlemişlerdir. Roket itici tankları gibi Al alaşımlarından yapılan büyük boyutlu parçaların, yüksek mukavemetleri ve iyi korozyon dirençleri nedeniyle havacılık uygulamalarında giderek daha fazla kullanıldığını ancak alüminyum alaşımlarında metalurjik kusurların kolaylıkla oluşabileceğini tespit etmişlerdir. Bu nedenle uygun bir elektrik arkının kullanılmasının, WAAM yöntemi ile üretilen alüminyum alaşımlı parçalar için kritik bir faktör olarak belirtmişlerdir.

Zhang ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, farklı işlem parametrelerinin gerilme mukavemeti ve uzama üzerindeki etkilerini analiz ederek, metalurjik kusurlar ile mekanik özellikler arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Çalışma sonunda, tüm yatay numunelerin tüm dikey numunelere göre daha yüksek gerilme mukavemeti sergilediğini belirlemişlerdir. Ark akımı 85 A'den 115 A'e yükseldikçe gerilme mukavemetinin önce arttığını, ardından düştüğü görülmüştür. En yüksek mukavemet ise 95 A'lik bir ark akımı kullanıldığında elde edilmiştir. Bu sonuçlar aynı zamanda mekanik özellikler ve mikro yapı açısından yüksek kalitenin çok yüksek yada çok düşük akım değerlerinde oluşmadığını da göstermektedir. Koruyucu amaçla kullanılan argon gaz akışı 15 L/dk'dan 25 L/dk'ya arttırıldığında, her iki yönde çekme mukavemeti değerlerinin kademeli olarak arttığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, mekanik özelliklerin 25 L/dk'nın üzerindeki argon akış hızlarında gözle görülür şekilde bozulmaya başladığını ve bunun nedenini, muhtemelen aşırı yüksek argon akış hızının argon türbülansına neden olması ve arkın etrafındaki havanın kaynak havuzuna dahil edilmesiyle sonuçlanması olarak yorumlamışlardır (Zhang ve diğ., 2019).

Derekar ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, 660 °C'lik bir erime noktasında alüminyum sıvı içindeki hidrojen çözünürlüğünün $0.69 \text{ cm}^3/100\text{g}$ iken aynı sıcaklıktaki katı alüminyum içindeki hidrojen çözünürlüğünün $0.036 \text{ cm}^3/100\text{g}$ olduğunu belirtmişlerdir. 1.2 mm çapında ER5356 dolgu telinin ve koruyucu gaz olarak 20 l/dakika gaz akış hızına sahip saf argon gazının kullanıldığı çalışmada, 50 °C'lik daha düşük pasolar arası sıcaklığa sahip duvarda, 100 °C'lik pasolar arası sıcaklığa sahip duvara göre % 10.41 daha fazla gözeneklilik tespit etmişlerdir. Sonuç

olarak alüminyum telin kullanıldığı WAAM metodunda; daha yüksek pasolar arası sıcaklığa sahip numunelerde küçük boyutlu gözeneklerin hakim olduğu içerik ortaya çıkarken, daha düşük pasolar arası sıcaklığa sahip numunelerde büyük boyutlu gözenekler görüldüğünü belirtmişlerdir. Bu sonuca paralel doğrultuda daha yüksek pasolar arası sıcaklık numunesinin çekme özelliklerini, daha düşük pasolar arası sıcaklık numunesine göre nispeten daha iyi olarak belirlemişlerdir.

Oyama ve ark. (2019), alüminyum alaşımlarının hammadde olarak kullanıldığı WAAM yönteminde, eklemeli imalatın oluşturulma rotası ve ısı kaynağının şiddeti gibi parametrelerin WAAM prosesine etkileri ve maliyet verimliliğinin geliştirilmesi konularında oynadıkları roller konusunda inceleme yapmışlardır. Ayrıca her katman için ısı kaynağı modifikasyonu ayarlamasının WAAM'de biriktirme verimliliğini ve üretilebilirliği iyileştirmenin etkili bir yolu olduğunun altını çizmişlerdir.

Müller ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, çelik hammadde ile yaptıkları WAAM yönteminde her katmana verilen enerjinin

$$E = U \times I \times t_{weld} \quad (2.3)$$

denklemini ile hesaplanabileceğini belirtmişlerdir. Bu denklemde U gerilimi, I akımı ve t_{weld} kaynak süresini temsil etmektedir. Katman geometrisinin, kaynak enerjisi girişine bağlı olduğunu belirterek, yüksek enerjinin, heterojen yüzey topografyasına, daha yüksek malzeme hacimlerine ve katman arayüzlerinde keskin çentiklere yol açacağını tespit etmişlerdir. Ayrıca yüksek ısı girdisinin, homojen mikroyapı ile birlikte düşük sertliğe, iri tanelere ve daha düşük uzamaya neden olacağını belirtmişlerdir.

Kumar ve ark. (2020), 1,2 mm çapındaki ER4043 malzeme ile ve saf argon gazı (% 99.9) kullanarak 120A, 17V ve 1m/dak kaynak yapma hızı ile yaptıkları çalışmada, güçlendirme oranı (reinforcement ratio) arttıkça mikro yapının (grain size) küçüldüğünü ve aynı zamanda sertlik değerinin arttığını tespit etmişlerdir.

Yi ve ark. (2018), alüminyum alaşımlarının kullanıldığı WAAM işleminde, darbeli ark ve darbesiz ark kullanarak damlacık oluşum ve transferini tanımlamışlardır. Damlacık aktarımı üzerindeki ark darbesinin etkisini analiz etmek için bir hesaplama yöntemi önermişler ve sonuç olarak, darbeli arkın daha yüksek damlacık transfer frekansına ulaşabildiğini ve darbeli arktaki damlacık boyutunun darbesiz arktakinden daha küçük olduğunu tespit etmişlerdir. Ek olarak, darbeli arktaki üretim verimliliğini, yüksek

biriktirme hızı nedeniyle benzer ark gücündeki darbesiz arkdakinden daha yüksek olarak sınıflandırmışlardır. Alüminyum alaşımının kullanıldığı WAAM yönteminde darbeli arkın, darbesiz arktan daha uygun olacağı düşünülmesine rağmen, darbeli arkta damlacık üzerine etkiyen ark kuvvetini, darbesiz arktakinden daha büyük olarak tespit etmişlerdir. Ark gücü arttıkça ark kuvvetinin de artacağını, bunun da malzeme biriktirme tabakasının çökmesine neden olabileceğini tespit etmişlerdir. Bu nedenle, ark gücü yani ısı girdisi, malzeme biriktirme miktarını yani üretim verimliliği gereksinimini karşıladığı sürece, WAAM alüminyum alaşımlarında daha küçük darbeli ark gücü kullanmanın daha uygun olacağı sonucuna ulaşmışlardır.

Dinovitzer ve ark. (2019), nikel ağırlıklı Hastelloy-X alaşımı kaynak teli kullanılarak oluşturulan numuneler için TIG tabanlı WAAM'deki işlem parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Taguchi metodu kullanılarak; torç hızının, tel besleme hızının, akımın ve argon akış hızının; kaynak şekli ve boyutu, kaynak pürüzlülüğü, oksidasyon seviyeleri, malzeme nüfusiye derinliği ve mikro yapı üzerindeki etkilerini belirlemeye çalışmışlardır. Çalışma sonuçları incelendiğinde en büyük etkinin torç hızı ve akım olduğunu tespit etmişlerdir. Artan ilerleme hızının veya azalan akımın, eriyikte bir azalmaya ve pürüzlülükte bir artışa neden olduğunu gözlemlemişler ve malzeme biriktirme için farklı torç rotaları oluşturularak yapılan karşılaştırmalarda ise aynı yöndeki rotalamalar ile alternatif yönlerdeki rotalamalar arasında önemli bir fark bulunmadığını tespit etmişlerdir.

Oliveira ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada, eklemeli imalatta kullanılan ergitme kaynağının ayırt edici özelliklerini, yani küçük boyutlu ve lokal ısı kaynakları ile ilişkili hızlı termal döngülerin doğasını, hızlı katılaşmanın doğasını ve bunların yarattığı ürün içinde oluşan kusurlu oluşumları, faz dönüşümlerini, artık gerilmeleri ve geometrik atıklıkları gözden geçirmeyi amaçlamışlardır. Proses optimizasyonu ile ilgili olarak, eklemeli imalat sırasında torçun geçeceği optimum tarama mesafesi için bir üst sınır limiti belirlemeye izin veren geometrik, enerji ve termal hususlara dayalı olarak farklı kriterler önermişlerdir. Ayrıca enerji yoğunluğunu hesaplamak için birleşik bir denklem de önermişlerdir. Bu denklem, güç, torç ilerleme hızı, ısı kaynağı boyutu, torç tarama mesafesi, birikmiş katman kalınlığı ve malzeme tane boyutu gibi ana işlem parametrelerini kapsayan farklı ekipman ve deneysel koşullarla gerçekleştirilen işleri karşılaştırmayı sağlamaktadır. Çok pasolu kaynaklarda, kaynak tokluğundaki gelişmeler ve artık gerilmelerin azalmasıyla mikroyapısal iyileştirmeleri

gözlemlemişlerdir. Bu durumun ana nedenlerini şu şekilde özetlemişlerdir; - her bir termal döngü, önceki kaynak metalinin tanelerini rafine eder veya "normalleştirir", - önceki geçiş, malzemeyi ön ısıtma etkisine sahiptir ve bu nedenle soğuma hızı düşer, - sonraki termal döngüler, önceki geçişlerin neden olduğu artık gerilmeleri tavlama eğilimindedir.

Oliveira ve ark. (2020) çalışmalarında, kaynak işleminde kaynak gücü ile kaynak hızı arasındaki oranın ısı girdisini tanımlayacağını ve ısı girdisinin eritme kaynağında en önemli parametre olduğunu çünkü eritme bölgesinin soğuma hızı ve genişlemesi hakkında niteliksel bir tahmin verdiğini belirtmişlerdir. Kaynak sırasında ortaya çıkan ısı girdisinin, büyük hacimde eriyen ve katılaşma sırasında büzülen malzeme nedeniyle bozulmalara neden olacağını ve özellikle, ark tabanlı kaynak tekniklerinin yüksek güç ışını (lazer ve elektron ışını) tekniklerindekiyle göre daha yüksek ısı girdisi sağladığının altını çizmişler ve bu durumun, lazer veya elektron ışını kaynağının kaynak sırasında bozulmaya daha az yatkın olmasının nedenlerinden biri olarak tespit etmişlerdir (Oliveira ve diğ., 2020).

Çalışmalarında ana işlem parametrelerini dikkate alan enerji yoğunluğunu (ED) veya hacim içi ısı girdisini hesaplamak için bir denklem önermişlerdir:

$$ED = \beta \frac{P}{v \cdot h \cdot d} \quad (2.4)$$

$$\beta = \frac{g_s}{d_{HeatSource}} \quad (2.5)$$

Bu denklemde güç (P), torç ilerleme hızı (v), katman kalınlığı (d), torç tarama aralığı (h), tane boyutu (g_s) ve ısı kaynağı çapı ($d_{HeatSource}$) değişkenleri bulunmaktadır. Tane boyutunun, ısı kaynağı çapına oranı birimsiz olarak tanımlanmıştır (Oliveira ve diğ., 2020).

Ortega ve ark. (2019), Al 4043 alüminyum alaşımının kullanıldığı CMT özellikli WAAM yönteminde farklı güç girdilerinin, ürün mikroyapısı ve gözenek oluşumunda yarattığı etkiyi incelemişlerdir. Üst üste biriktirilen katman ilavesi nedeniyle oluşan ısı birikimi, 100 mm uzunluğundaki malzeme birikintileri için 10 saniyelik katman üretimleri arasında bekleme süresi eklenmesini gerektirmiştir. Aksi takdirde, özellikle yüksek ortalama güçle yapılan üretimlerde, katman ilavesi ile biriktirilen malzeme çökeltilerinin genişliğinin sürekli arttığını saptamışlardır. Yapılan mikroyapı

incelemelerinde ise gözenek oluşumu ve az miktarda karşılaşılan çatlama kusurları gözlemlenmiştir. Yüksek güç ile üretilen ürünlerde, düşük güç ile üretilen ürünlere göre gözenek sayısının daha az ancak gözenek çaplarının daha büyük olduğunu belirtmişler ve ayrıca gözeneklerin kapladıkları alanın ise bütün ürünün % 0,9 'unu kapsadığı tespit etmişlerdir.

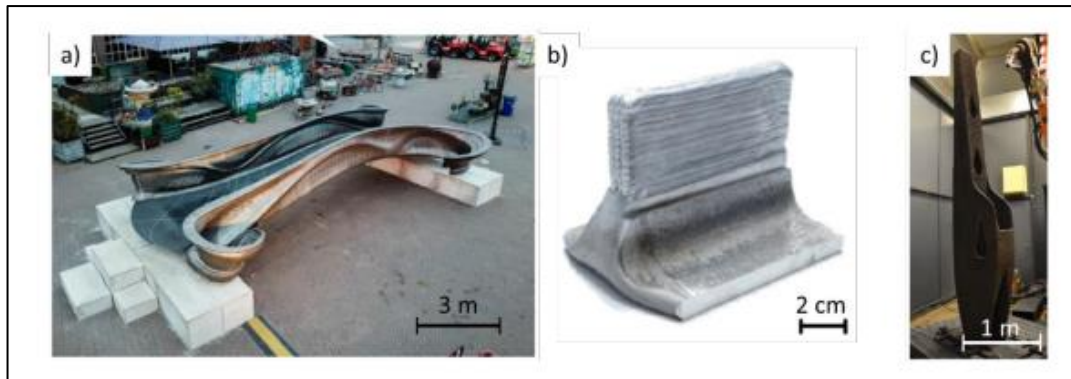
Ryan ve ark. (2018), tel ark eklemeli imalat (WAAM) tekniği ile AA2319 alüminyum alaşımı kullanarak duvar şeklinde parçalar üretip malzeme içinde oluşan gözeneklerin yapısını ve oluşma sebeplerini incelemişlerdir. Gözenek oluşumunun, kullanılan telin bileşimine bağlı olmadığını, ancak gözenek oluşumunun tel yüzey kaplamasından etkilendiğini tespit etmişlerdir. Kullanılan telin yüzey kalitesinin, tel yüzeyindeki hidrojen içeriğini ve gözenekliliği etkilediğinden dolayı ark stabilitesini etkileyebileceğini belirtmişlerdir.

WAAM tekniği ile alüminyum parça üretimi için ticarileşebilmenin karşılaştığı zorluklardan biri de yüksek gözeneklilik seviyesidir. WAAM'ın ticari olarak uygulanabilir olması için, gözenekliliğin anlaşılması, izlenmesi ve tekrarlanabilir şekilde kabul edilebilir bir düzeye indirilmesi gerekir. Alüminyum hammaddenin kullanıldığı WAAM işlemi sırasında gözenek oluşumunun temel nedeni, katılaşma sırasında hidrojen gazının ortaya çıkması olarak kabul edilmektedir. Bu durum, hidrojenin sıvı ve katı alüminyumdaki çözünürlüğündeki yaklaşık 20 kata yakın büyük farktan kaynaklanır. Kaynak havuzu katılaştıkça hidrojen gazı ortaya çıkar ve daha sonra katı metalde kabarcıklar halinde tutulur, bu da tipik olarak küresel gözeneklere neden olur.

Ryan ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada hidrojenin denge çözünürlüğü, erimiş saf alüminyumun 100 g'ında 0.65 ml iken, katı saf alüminyumun 100 g'ında 0.034 ml olarak bildirmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan CMT modlarında, tel besleme hızı veya tel besleme hızının torç hızına oranındaki farklılıkların, gözeneklilikte önemli bir değişikliğe yol açmadığını görmüşlerdir. Tel yüzey kaplamasının, kirlenme için uygun alanlar oluşturabilecek çentikler ve tel yüzey alanında artışa neden olacak pürüzlü bir yüzey içermesi nedeniyle, tel üzerindeki hidrojen içeriğini etkileyebileceğini ve hidrojen içeriğindeki artışın da üretilen parça içindeki gözenekliliği arttırabileceğini tespit etmişlerdir (Ryan ve diğ., 2018).

2.2.3 WAAM Yönteminde Alınan Sonuçlar

Rodrigues ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada önce WAAM'deki başarılı çalışmalara genel bir bakış sunmuşlar ardından mikro yapı, mekanik özellikler ve üretilen parçalardaki kusur oluşumunu kontrol etmek için geliştirilen süreçleri vurgulayarak, kullanılan hammadde ve işlem sonrası ısıl işlemlerin etkisini incelemişlerdir. WAAM yönteminin katmanlı üretimin geleneksel üretim süreçleriyle elde edilmesi zor veya imkansız olabilen karmaşık şekilli üç boyutlu parçalar oluşturabilme fırsatı nedeniyle son yıllarda üretim paradigmasında devrim yarattığını belirtmişlerdir. Farklı eklemeli üretim teknikleri arasında WAAM'yi, örneğin toz yatağı tekniklerinden önemli ölçüde daha büyük olarak elde edilen yüksek biriktirme hızları nedeniyle büyük metal parçaların üretilmesi için uygun bir üretim tekniği olarak nitelendirmişlerdir. Günümüzde WAAM'ye olan ilgi giderek artmakta ve sonuç olarak önemli araştırma çabaları devam etmektedir. Katmanlı üretim, günümüzde imalat ve mühendislik dünyasının en sıcak konularından biridir. Katmanlar halinde üretim yaparak, üç boyutlu, karmaşık ve son ürün geometrisine yakın şekilli parçalar oluşturma yeteneği, WAAM alanındaki büyük atılımlar için önemli bir itici güçtür. WAAM tekniği kullanılarak farklı alanlar için farklı büyüklüklerde imal edilen ürün örnekleri Şekil 2.13'de verilmiştir (Rodrigues ve diğ., 2019).



Şekil 2.13 : WAAM Metodu İle Üretilen Örnekler (Rodrigues ve diğ., 2019).

Müller ve ark. (2019) çelik hammadde kullanılan WAAM işleminde ürün geometrisi, yüzey topografyası ve malzeme özellikleri ile ilgili süreci araştırmışlardır. Bu çalışmada endüstriyel uygulamalardaki katmanlı üretimin (AM), otomasyon potansiyeli ve karmaşık yapıların imalatındaki esnekliği nedeniyle artan ilgi ile karşılaştığını belirtmişlerdir. Robotik olarak uygulanan WAAM prosesi, yüksek otomasyon ve geometrik özgürlüğü yüksek proses verimliliği ile birleştirme yeteneğine sahiptir. Tüm tasarım sürecini dijitalleştirerek, gerekli adımların sayısı

geleneksel tasarım süreçlerine göre azaltılabilir. Bileşenlerin eklemeli üretimi için tasarım, optimizasyon ve hazırlık dijital olarak yapılabilir. Atölyelerde yapılacak üretim planlaması için üç boyutlu dijital modelin iki boyuta dönüştürülmesi gibi iş adımları gerekli değildir.

Vimal ve ark. (2020) alüminyum alaşım uygulamalarını sınırlayan ana dezavantajların gözeneklilik ve çatlaklar olduğunu ve soğuk metal transferi (CMT) gibi gelişmiş teknikler kullanılarak gözeneklilik ve çatlakların etkisinin azaltılabileceği veya tamamen ortadan kaldırılabileceğini belirtmişlerdir. WAAM tekniği ile ER1100, ER4043, ER4943, ER4047 ve ER5356 gibi farklı alüminyum alaşımları kullanarak yaptıkları çalışmalarda mukavemet ve gözeneklilik düşünüldüğünde, 4000 serisinin diğer serilere göre daha iyi performans sergilediği sonucuna varmışlardır.

Moore ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, WAAM yöntemi ile üretilen çelik türevli test parçalarının mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada da belirttiği gibi, pazar sektörlerinde eklemeli olarak üretilen büyük metalik yapılara yönelik hayal gücü, ihtiyaç ve istek büyüdükçe, tel ile yapılan eklemeli imalat tekniklerine olan ilgi de artmaktadır. Potansiyel yeni bir eklemeli imalat kullanıcısının ilk gereksiniminin, ortak malzemelerin mekanik özellikleri, işlem doğruluğu, güvenilirliği, üretkenliği ve bu üretim parametrelerinin ilgili uygulamaların yapısal bütünlüğü üzerindeki etkileri hakkındaki bilgi olduğunu belirtmişlerdir.

Prado ve ark. (2017), +/- 1mm geometrik hassasiyette parçalar üreterek WAAM yöntemi ile diğer MEİ yöntemlerine göre daha yüksek malzeme biriktirme oranlarına ulaşılabildiğini belirtmişlerdir. Farklı geometrilerde üretilen örnek ürünlere ait resimler Şekil 2.14’de verilmiştir.



Şekil 2.14 : WAAM Metodu İle Üretilen Örnekler (Prado ve diğ., 2017).

Eİ fikri başlangıçta otomotiv ve havacılık endüstrisindeki yeni tasarım stratejilerini minimum üretim çabasıyla test etmek için hızlı prototipleme ile ilişkilendirilmiştir.

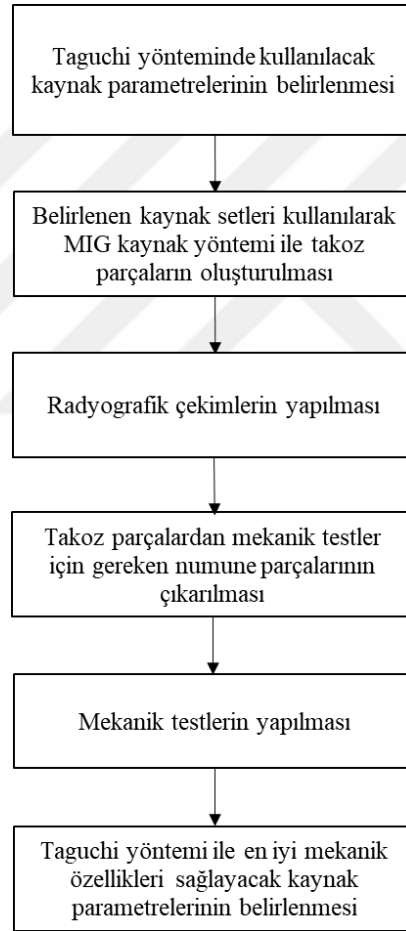
Günümüzde Eİ, geometrik olarak karmaşık yapı elemanlarının verimli malzeme kullanımı ile imal edilmesini sağlayan bir teknoloji haline gelmiştir.

Yapılan literatür araştırmasında, Eİ yöntemleri arasında hızla önemi artan WAAM yönteminin oldukça güncel ve araştırılmasına ihtiyaç duyulan bir teknoloji olduğu görülmüştür. WAAM yöntemi hakkında gelişmeler yaşandıkça, günümüzde kullanılan imalat süreçlerine katkı sağlayacak bir yöntem olduğu tüm kaynaklarda belirtilmektedir. WAAM teknolojisinin gelişmesindeki en kritik konunun proses parametrelerinin doğru seçilmesi olduğu ve çalışmaların bu noktada yoğunlaştığı görülmüştür.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında WAAM yöntemi ile üretim yaparken üretim sırasında kullanılan kaynak parametrelerinin, üretimi yapılan alüminyum parçaların mekanik özelliklerine olan etkileri incelenmiş ve en iyi mekanik özellikleri sağlayan kaynak parametreleri belirlenmiştir. Şekil 3.1’de tezde izlenilen yöntemi özetleyen akış şeması görülmektedir.



Şekil 3.1 : Tezde Uygulanan Yöntemin Akış Şeması.

Üretimi yapılacak numunelerde kullanılacak kaynak tel çeşidi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesinin ardından, Taguchi yönteminde kullanılacak parametreler listelenerek MIG kaynak yöntemi ile 9 adet numune takoz parçanın üretilmesi sağlanmıştır. Numune takoz parçalar önce freze ve taşlama makinalarında temizlenmişler ardından bu parçaların radyografik çekimleri yapılmıştır. Takoz levha

parçalar tel erezyon makinasında testler için gereken geometrik şekil ve ölçülerde kesilerek, istenilen test numunelerinin oluşturulması sağlanmıştır. Planlanan mekanik test ve incelemelerin ardından Taguchi yönteminden faydalanılarak en iyi mekanik özellikleri sağlayacak parametre değerleri belirlenmiştir.

3.1 Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi

Kaynak parametrelerinin WAAM yöntemi ile oluşturulan parçalar üzerindeki etkisini belirleyebilmek için doğru parametre pencerelerinin belirlenmesi önem taşımaktadır. Yapılan çalışma kapsamında değişken parametre olarak kullanılacak olan robot hızı, akım ve gerilim değerlerine ait test pencerelerinin belirlenmesi için kaynak oluşumuna etki eden torç yüksekliği, torç açısı, koruyucu gaz cinsi ve debisi gibi diğer değişkenler sabit tutulmuştur. Sabit tutulan değişkenlere ait bilgiler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Sabit Tutulan Kaynak Parametreleri.

Parametre	Değer	Birim
Torç Yüksekliği	15	mm
Torç Açısı	İtme-45	Derece
Gaz Cinsi	Argon 99	Yüzde (%)
Gaz Debisi	17	Litre/dakika
Tel Kalınlığı	1,2	mm
Bekleme Süresi	120	Saniye

WAAM yöntemi ile oluşturulan parça üzerindeki etkilerinin inceleneceği parametreler ise Robot Hızı, Tel Hızı ve Ark Boyu’dur. Eski tip gazaltı kaynak makinalarında akım ve voltaj değerleri değişken olarak kullanılmakta iken yeni tip gazaltı kaynak makinalarında Tel Hızı ve Ark Boyu değerleri değişken olarak kullanılmaktadır. Temel olarak Tel Hızı arttıkça Akım değeri doğrusal olarak artmakta iken Ark Boyu arttıkça Voltaj değeri doğrusal olarak artmaktadır. Yapılan kaynak denemelerinde kullanılması uygun bulunan değişken parametrelere ait üçer adet seviye Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Değişken Kaynak Parametreleri.

Proses Parametresi	Seviyeler	Birim
Tel Hızı	4/5/6	m/dk
Ark Boyu	-10/-20/-30	%
Robot Hızı	40/50/60	cm/dk

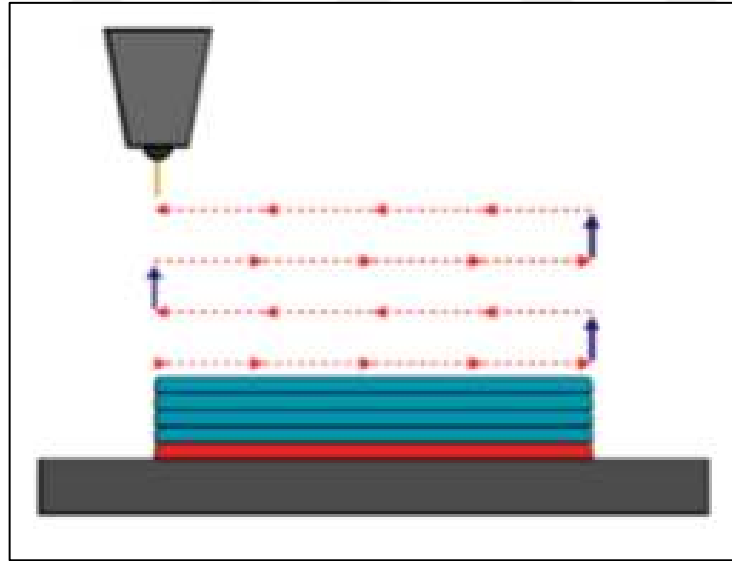
3.2 Takoz Parça Levhalarının MIG Kaynak Yöntemi İle Oluşturulması

Tez kapsamında planlanan test ve incelemelere tabi tutulacak numune parçalar, S-AlSi5 cinsi 1,2 mm çapındaki tel ile MIG kaynak yöntemi kullanılarak üretilmişlerdir. Bu tel tipi TS 6204 standardında S-AlSi5, DIN 1732 standardında SG-AlSi5 ve AWS A5.10 standardında ER-4043 isimleri ile anılmaktadır. Bu tel cinsine ait teknik özellikler Çizelge 3.3’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.3 : S-AlSi5 Kaynak Telinin Teknik Özellikleri.

Parametre	Değer	Birim
Çekme Dayanımı	150	N/mm ²
Akma Dayanımı	110	N/mm ²
Uzama	15	Yüzde (%)
Sertlik	50	HB

Takoz parçalar üretilirken robotun elinde bulunan kaynak torcunun hareket rotası Şekil 3.2’de gösterildiği şekilde gerçekleşmiştir.



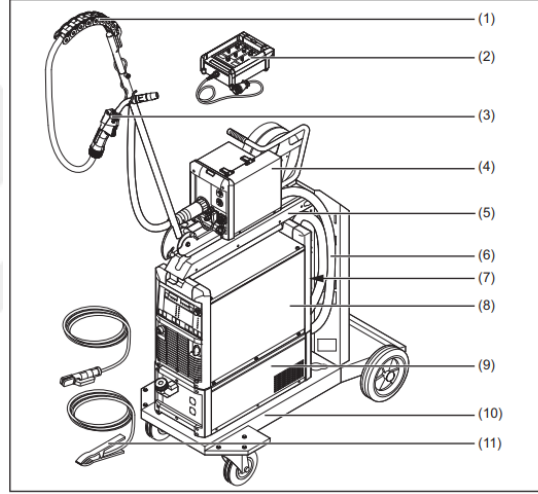
Şekil 3.2 : Robotik Kaynak Torcunun Hareket Rotası (Köhler ve Fiebig, 2019).

3.2.1 Takoz parçalarının üretilmesi aşamasında kullanılan ekipmanlar

Yapılan MIG kaynağı sırasında Fronius TransPuls Synergic 5000 tipi gazaltı kaynak makinası kullanılmıştır. Kullanılan gazaltı kaynak makinasının resmi Şekil 3.3’de verilmiştir. Kullanılan gazaltı kaynak makinası bileşenlerinin şematik gösterimi ise Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.3 : Fronius TransPuls Synergic 5000 Gazaltı Kaynak Makinası Resmi.

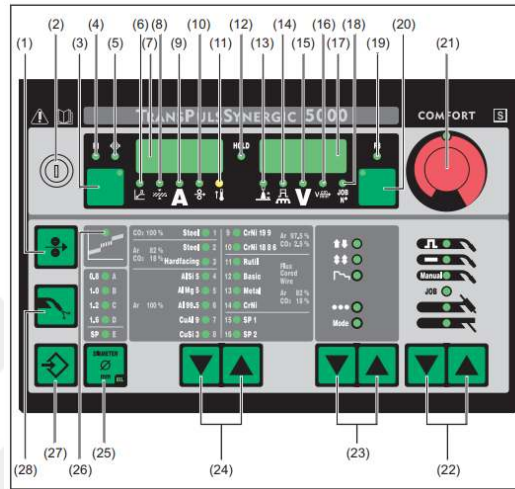


Şekil 3.4 : Gazaltı Kaynak Makinası Sistem Bileşenleri Şematik Resmi (Url-4).

- (1) Hortum paketi bomu,
- (2) Uzaktan kumandalar,
- (3) Kaynak torçları,
- (4) Tel sürme üniteleri,
- (5) Tel besleme ünitesi montaj alanı,
- (6) Bağlantılı hortum paketleri,
- (7) Robot aksesuarları,
- (8) Güç kaynakları,
- (9) Soğutma üniteleri,

(11) Topraklama kablosu ve elektrot kablosu.

Kullanılan MIG Gazaltı kaynak makinasının kontrol paneli şematik görüntüsü ise Şekil 3.5’de verilmiştir. Kontrol paneli yardımıyla kaynak makinası ile ilgili her türlü teknik ayar (tel hızı/akım, ark boyu/gerilim, tel tipi vb.) yapılabilmektedir. Bu kaynak makinası ile 3-500 Amper arasında akım ve 39,0 Volt’a kadar gerilim değerleri kullanarak MIG/MAG gazaltı kaynak işlemleri gerçekleştirilebilmektedir (Url-4).



Şekil 3.5 : Gazaltı Kaynak Makinası Kontrol Paneli Şematik Görüntüsü (Url-4).

Test numunelerinin hazırlanma aşamasında Motoman EA-1400N tipi robot ve NX-100 tipi kontrolör kullanılmıştır. Tez çalışmalarında kullanılan ve tavana başaşağı şekilde monte edilmiş olan robotun resmi Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6 : Motoman EA-1400N Robot Resmi.

Motoman EA-1400N tipi robotlar gazaltı kaynağı operasyonu için geliştirilmiş 6 eksenli robotlar arasında olup ince bir gövde yapısına sahiptirler. 1390 mm erişim

mesafesi, 3 kg yük taşıma kapasitesi, 0,08 mm tekrarlanabilir geometrik hassasiyete sahip olan bu robotların zemine, duvara yada tavana monte edilebilir olması kaynak yapılacak noktalara ulaşımında esneklik sağlamaktadır. Kolay programlanabilme özelliği, erişim mesafesinin yüksek olması, torç ve kablo paketinin kolay değiştirilebilir olması gibi nedenlerden dolayı kullanımı tercih edilen robotlar arasındadır.

Belirlenen sabit ve değişken kaynak parametreleri kullanılarak, 9 adet takoz parçanın üretimi yapılmıştır. Takoz parçalar, 450mm x 100mm ebatlarında ve 3mm kalınlığında alüminyum altlıklar üzerine oluşturulmuştur. Üretim sırasında kullanılan 9 farklı parametre setini gösteren tablo Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Takoz Parça Üretiminde Kullanılan Kaynak Parametre Setleri.

Takoz Parça Numarası	Tel Hızı (m/dk)	Ark Boyu (%)	Robot Hızı (cm/dk)
1	4	-10	40
2	4	-20	50
3	4	-30	60
4	5	-10	50
5	5	-20	60
6	5	-30	40
7	6	-10	60
8	6	-20	40
9	6	-30	50

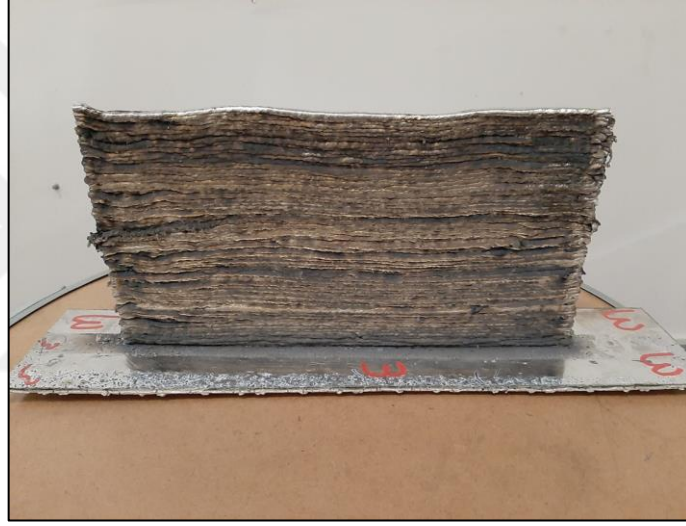
Taguchi deneysel tasarım yöntemiyle belirlenerek kullanılan, 9 ayrı parametre seti yardımı ile üretilen takoz parçalara ait görüntüler, Şekil 3.7 ile Şekil 3.15 arasında takoz parça numara sırasına göre sunulmuştur.



Şekil 3.7 : 1 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.



Şekil 3.8 : 2 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.



Şekil 3.9 : 3 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.



Şekil 3.10 : 4 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.



Şekil 3.11 : 5 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.



Şekil 3.12 : 6 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.



Şekil 3.13 : 7 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.



Şekil 3.14 : 8 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.



Şekil 3.15 : 9 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça Resmi.

3.2.2 Takoz parça levhalarının üretilmesi aşamasında kullanılan ekipmanlar

Üretilen takoz parça numunelerinin istenilen geometrik kalınlık ölçüsüne getirilmeleri için ilk aşamada yüzey temizliklerinin yapılması amacıyla ve ardından takoz parça kalınlıklarının 3 mm'ye düşürülmesi amacıyla Şekil 3.16'da da görülen Zayer marka KF3000 tip freze makinası kullanılmıştır. Bu freze makinasının işleyici ucu X ekseninde 2800mm, Y ekseninde 1000mm ve Z ekseninde 1000mm hareket edebilme özelliğine sahiptir. Ayrıca bu freze makinası 4000 rpm'e kadar iş mili hızı ile çalışabilir.

Takoz parça numunelerinin istenilen son geometrik kalınlık olan 2,90 mm kalınlığa getirilmeleri için Şekil 3.17'de de görülen Tacchella marka Aqui Terme-4am tip taşlama makinası kullanılmıştır. Bu işlemten sonra tüm takoz parçalar 2,90 mm standart kalınlıkta levha şeklini almıştır.

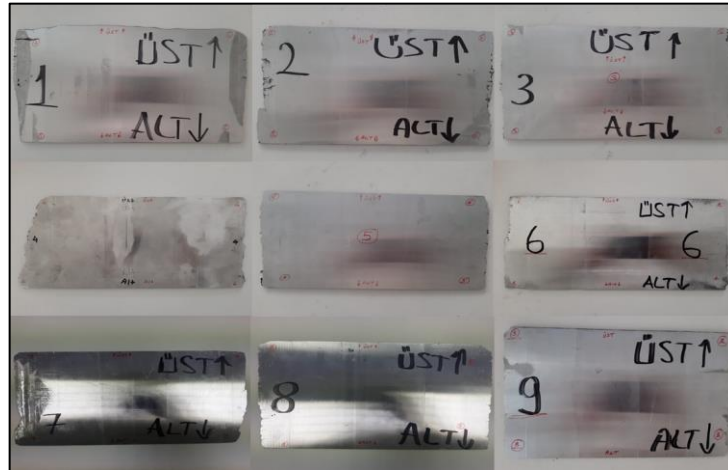


Şekil 3.16 : Zayer KF3000 Freze Makinası Resmi.



Şekil 3.17 : Tacchella Aquì Terme-4am Taşlama Makinası Resmi.

Frezeleme ve taşlama işlemlerinden sonra istenilen son kalınlık ölçüsüne ulaşan 9 adet takoz parça levhasına ait görüntüler, Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.18 : Taşlanmış Takoz Parça Levhalarının Resmi.

3.3 Takoz Parça Levhaları Radyografik Çekimlerinin Yapılması

Takoz parça levhalarının radyografik çekimlerinin yapılabilmesi amacıyla Şekil 3.19'da da görünen Nikon marka XT H 225 ST tipi X-Ray çekim makinası kullanılmıştır.



Şekil 3.19 : Nikon XT H 225 ST X-Ray Çekim Makinası.

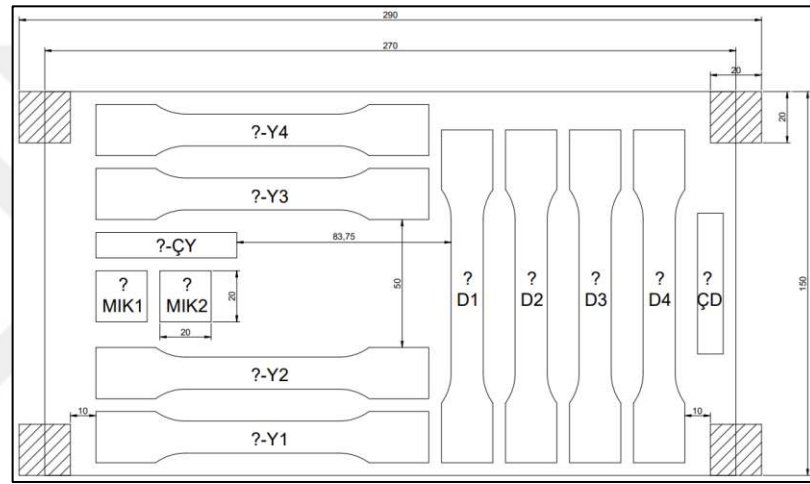
3.4 Mekanik Testler İçin Gereken Numune Parçaların Çıkarılması

Aynı kalınlığa sahip levha şeklindeki 9 adet takoz parça üzerinden, istenilen testlerin yapılabilmesi için gereken test numunelerinin çıkarılması ve bu numunelerin son geometrik ölçüleri alabilmeleri amacıyla Şekil 3.20'de de görünen Sodick marka AG600L tip tel erozyon makinası kullanılmıştır. Bu makinanın X, Y ve Z eksenlerinde sırasıyla 600mm, 400mm ve 350 mm hareket kabiliyeti bulunmaktadır. 1000 kg'a kadar ağırlıktaki iş parçaları bu makinada işlenebilmektedir.



Şekil 3.20 : Sodick AG600L Tel Erozyon Makinası Resmi.

Mekanik testlere tabi tutulacak parçaların çıkarılması için üretilen 9 adet takoz levha 270mm x 150 mm x 2,9 mm ebatlarında standart ölçülere getirilmiştir. Bu ölçülere göre oluşan 270mm x 150 mm boyutlarındaki dikdörtgenin içine, yapılması planlanan testlere ait numune parça resimleri yerleştirilerek levha kesim planı oluşturulmuştur. Bu kesim planına levhaların tel erezyon makinasına sabitlenmeleri için kullanılacak pabuçlar da eklenerek resmin son halini alması sağlanmıştır. Şekil 3.21'deki takoz parça levhalarına ait test numuneleri yerleşim planı resminden de görüldüğü gibi, her bir takoz parça levhasından 8 adet çekme testi numunesi (4 dikey-4 yatay), 2 adet Charpy darbe testi numunesi (1 dikey-1 yatay) ve 2 adet mikroyapı testi numunesi çıkarılmıştır.



Şekil 3.21 : Takoz Parça Levhaları Test Numuneleri Yerleşim Planı Resmi.

Tel erezyon makinasında planlanan ölçülere göre kesilen bir adet takoz parça levhası test numunelerine ait örnek resim, Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.22 : Üretilen Örnek Takoz Parça Levhası Test Numuneleri Resmi.

3.5 Mekanik Testlerin Yapılması

Tez içeriğinde uygulanan mekanik testler; çekme testi, Charpy darbe testi ve sertlik testlerini içermektedir.

Çekme Testinin amacı, malzemelerin üzerlerine uygulanan statik yük sonucunda oluşan elastik ve plastik deformasyonların belirlenmesidir. Çekme test cihazı temel olarak; birbirine göre aşağı ve yukarı yönde hareket edebilen, test edilecek numune parçanın bağlandığı iki çene ve bu çenelere hareket veya kuvvet verebilen ve bu iki büyüklüğü ölçebilen ünitelerden oluşur. Test parçasını tutan çenelerden biri sabit hızda hareket ettirilerek test parçasına değişen miktarda çekme kuvveti uygulanır ve bu kuvvet karşılığında oluşan uzama miktarı kayıt altına alınır.

Test numunelerinin, çekme mukavemetleri ile uzama miktarlarını test edebilmek için Zwick/Roell marka Z250 tipi test makinası kullanılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan test makinasına ait resim Şekil 3.23’de verilmiştir. Bu test makinası 250kN maksimum test kuvvetine ulaşabilirken, 0,0005 mm/dk ile 600 mm/dk arasında test hızı ve +/- 0,002 mm konum hassasiyet değerleri ile oldukça hassas test sonuçları oluşturabilmektedir. Tez kapsamında hız kontrollü olarak yapılan çekme testlerinde, üst tutucu çene EN ISO 6892-1 standartındaki Metod A’ya göre akma bölgesi de dahil olmak üzere 0,00025 1/s hız ile çekilmiş ve test numunelerine ait çekme mukavemet değerleri ile birlikte uzama miktarları belirlenmiştir (Url-5, Url-6).

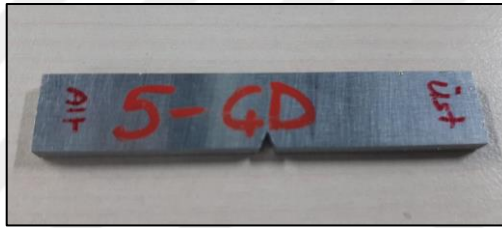


Şekil 3.23 : Zwick/Roell Z250 Çekme Testi Makina Resmi.

Tez kapsamında yapılan bir diğ er test, Carpy darbe testidir. Carpy darbe testi için Ceast marka Resil Impactor 9022.803 model test makinası kullanılmıştır. Kullanılan test makinasına ait resim şekil 3.24’de verilmiştir. Bu test için 55mm x 10mm x 2,9mm boyutlarında hazırlanan numunelere ait örnek resim ise şekil 3.25’de verilmiştir.



şekil 3.24 : Ceast Resil Impactor 9022 Test Makinası.



şekil 3.25 : Carpy Darbe Testi Numune  rneği Resmi.

Tez kapsamında numune parçalar üzerine uygulanan bir diğ er test ise sertlik testidir. Sertlik testi için BMS marka 3000-OBPC model test makinası kullanılmıştır. Üretilen 9 adet takoz parça levhasından çıkarılan numune parçalar üzerinde HBW 2,5/62,5/15  l   birimi kullanılarak Brinell sertlik testleri yapılmıştır. Kullanılan sertlik testi test makinasına ait resim şekil 3.26’da verilmiştir.



şekil 3.26 : BMS 3000-OBPC Sertlik Testi Makinası.

3.6 Taguchi Deneysel Tasarım Yönteminin Uygulanması

WAAM yöntemiyle üretim metodunda en etkili parametreler olan tel hızı, ark boyu ve robot hızına ait optimum değerlerin belirlenebilmesi amacıyla, Taguchi deneysel tasarım metodundan faydalanılmış ve bu parametrelerin üretilen parçaya ait mekanik özellikleri nasıl etkiledikleri incelenmiştir. Süre ve maliyet açısından verimsizlik yaratan klasik deneysel tasarım yöntemlerinde, değişkenlerin sayısı arttıkça deney sayısı da artmaktadır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için geliştirilmiş olan Taguchi yönteminde, daha az sayıda yapılacak deney ile parametre etkilerinin değerlendirilmesi mümkün olmaktadır.

Taguchi metodu uygulanırken yapılması gereken ilk iş, bu metotta deneysel durumları açıklamak için kullanılan farklı ortogonal diziler arasından uygun bir ortogonal düzenin seçilmesidir. Ortogonal dizinin klasik metotlardan en önemli farkı, parametre değerlerinin teker teker değiştirilmesi yerine değerlerin aynı anda değiştirilmelerini önermesidir. Bu sayede yapılacak daha az sayıdaki test ile parametre değişikliklerinin sonuç üzerindeki etkilerinin belirlenmesine olanak tanınmış olur. Çözülmesi gereken problemin özelliğine göre farklı kademe sayılarında ortogonal diziler belirlenebilmektedir. En çok kullanılan diziler 2 ve 3 seviyeli dizilerdir. L4, L8, L16 ve L32 dizileri 2 seviyeliler için, L9, L18 ve L27 dizileri ise 3 seviyeliler için yoğun olarak kullanılmaktadır.

Toplam serbestlik derecesi ve düzey sayısı dizilerin seçiminde önemli rol oynamaktadır. Klasik tam faktöriyel deney tasarımlarında yapılması gereken deney sayısı, ortogonal dizinlerin yardımı sayesinde önemli ölçüde azalmaktadır. Örnek vermek gerekirse, klasik tam faktöriyel deneysel tasarımda $3^4=81$ adet deney yapılması öngörülürken, aynı deney sonucuna ortogonal dizinler yardımı ile 9 adet deney ile ulaşılması mümkündür.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, üç farklı proses parametresine ait üçer farklı seviye için L9 ortogonal dizininin kullanılması uygun bulunmuştur. Yani 9 satır ve 3 sütundan oluşan Taguchi deneysel tasarımı oluşturulmuştur. Tel hızı, ark boyu ve robot hızı proses parametreleri olarak seçilmiştir. Yapılan ön denemeler sonucunda belirlenen üçer seviye, her bir parametre için ayrı ayrı seçilmiştir.

Taguchi yönteminde ölçülmek istenilen sinyalin (S) ve gürültü faktörünün (N) belirlenmesi ve bunların birbirlerine oranlanmaları (S/N), belirlenen karakteristiklerin

değerlendirilmelerindeki ölçüt olarak verilir. Burada belirtilen sinyal değeri tanımlamasıyla ölçülmek istenilen ve sistem tarafından verilen gerçek değer, gürültü faktörü tanımlamasıyla ise ölçülen gerçek değer içinde bulunan istenmeyen faktörlerin miktarı temsil edilmektedir. S/N değeri; “nominal değer iyi”, “büyük olan değer iyi” yada “küçük olan değer iyi” şekillerinde kalite değerinin hedefine göre farklı yaklaşımlarla analiz edilebilmektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmada en yüksek mekanik dayanım değerlerinin tespit edilmesi hedeflendiği için, büyük olan değer iyi yaklaşımı ile aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.1)$$

Bu formüldeki “y” terimi mekanik dayanımı belirten karakteristik değeri, “n” terimi ise gerçekleştirilen deney sayısını ifade etmektedir. Hesaplamalar sonunda ortaya çıkan en büyük S/N değeri, en iyi mekanik dayanımı gösterir.

Taguchi yöntemi kapsamında belirlenen S/N değerlerine göre her bir parametrenin etkisini belirleyebilmek için ANOVA (Analysis of Variance) yada F testi isimleri ile anılan varyans analizleri yapılır. Bu analizler ile test numunelerinin gösterdikleri performans değerleri arasındaki farklılık belirlenir. Varyansların analiz edildikleri tablolar ile varyans değerleri hesaplanır. Faktörlerin varyansları hesaplanırken, her bir faktörün karesi alınıp bulunan değerler toplanır ve bu toplam serbestlik derecesine bölünür. Hata varyansı hesaplanırken ise hataların kareleri alınıp bulunan değerler toplanır ve bu toplam serbestlik derecesine bölünür. Ardından F testi yapılarak faktörlerin önemini belirleyebilmek için varyans analiz tablosu oluşturulur. F testinin yapılması sırasında, F değerine ait hesaplanan değer ile istenilen güven düzeyindeki tablo değeri arasında karşılaştırma yapılır. Hesaplanan F değeri, tabloda istenilen F değerinden daha büyük bir değere sahip ise, 1-α güvenli olarak değerlendirilir. Varyans Analizi için hazırlanan tablo yardımı ile belirlenen F değeri, etkileşim yada faktör varyansının hata varyansına bölünmesi ile elde edilir.

Taguchi yöntemi ile ulaşılmak istenilen temel sonuç, hedef değer etrafında var olan değişken miktarının azaltılmasıdır. Yapılan analizlere ait sonuçlar, optimum parametre seviyelerini göstermektedir.

Dokuz adet takoz parça üretiminde kullanılan kaynak parametre setleri; tel hızı için 4, 5 ve 6 m/dk değerleri, ark boyu için -10, -20 ve -30 değerleri ve robot hızı için 40, 50

ve 60 cm/dk değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Bu değişkenlere göre üretilen takoz parça levhalarından alınan numunelere uygulanan mekanik testler sonucunda bulunan çekme dayanımı, malzeme uzama yüzdesi ve darbe dayanım değerleri üzerinde Taguchi yöntemi kullanılarak en iyi mekanik özelliklere sahip parça ve bu parçanın üretildiği kaynak parametre değerleri belirlenmiştir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde öncelikle radyografik çekimler sonucunda oluşan X-Ray görüntüleri ve bu görüntülere ait değerlendirmelerden bahsedilmiş, ardından numune parçalara uygulanan mekanik test sonuçları paylaşarak kaynak parametrelerinin numune parçaların mekanik özelliklerini nasıl etkiledikleri konusunda saptamalarda bulunulmuştur. Son olarak Taguchi yöntemi ile ulaşılan ideal test parametreleri belirleme çalışmalarının sonuçları açıklanmıştır.

4.1 Numune Parça Levhalarının Radyografik Çekimleri ve Sonuçları

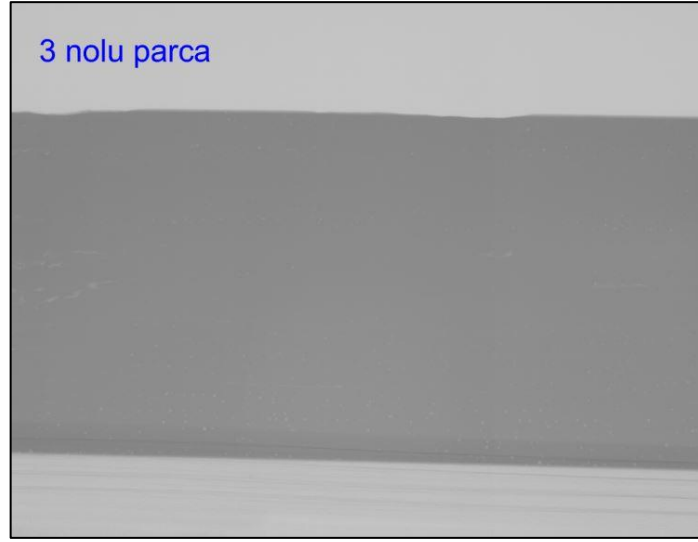
Radyografik çekimler sonucunda oluşan X-Ray görüntülerine ait resimler, Şekil 4.1 ile Şekil 4.9 arasında takoz parça numara sırasına göre verilmiştir.



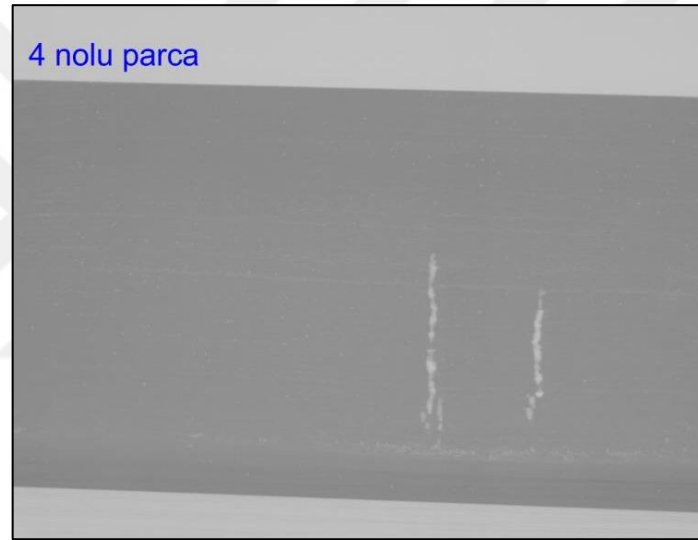
Şekil 4.1 : 1 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi.



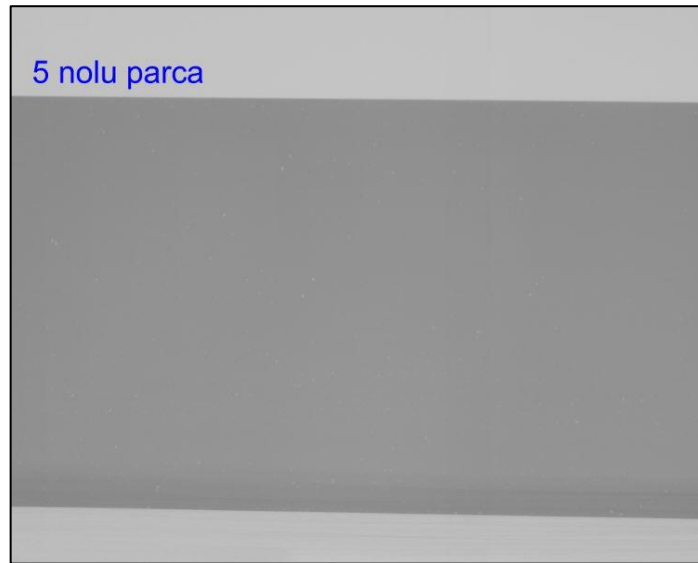
Şekil 4.2 : 2 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi.



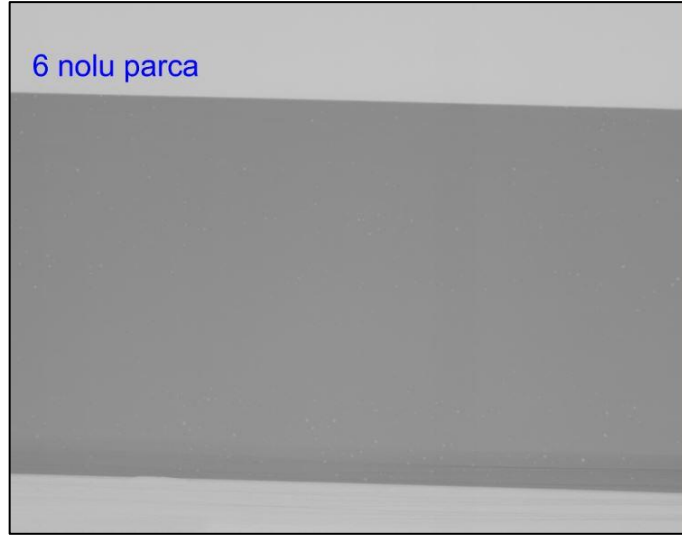
Şekil 4.3 : 3 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi.



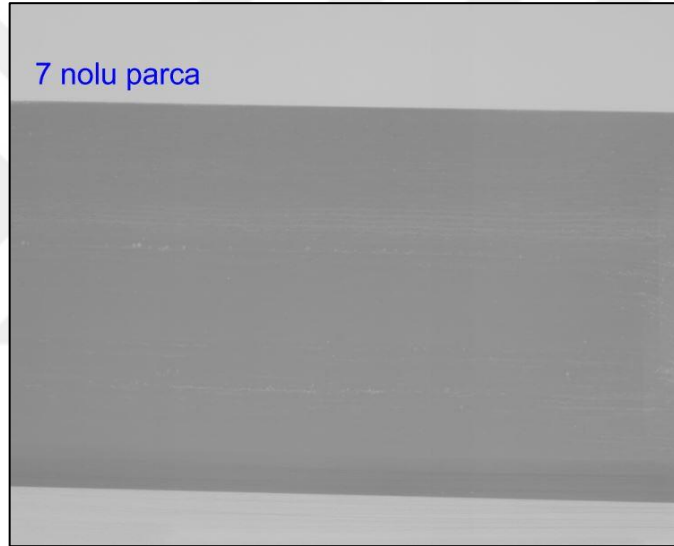
Şekil 4.4 : 4 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi.



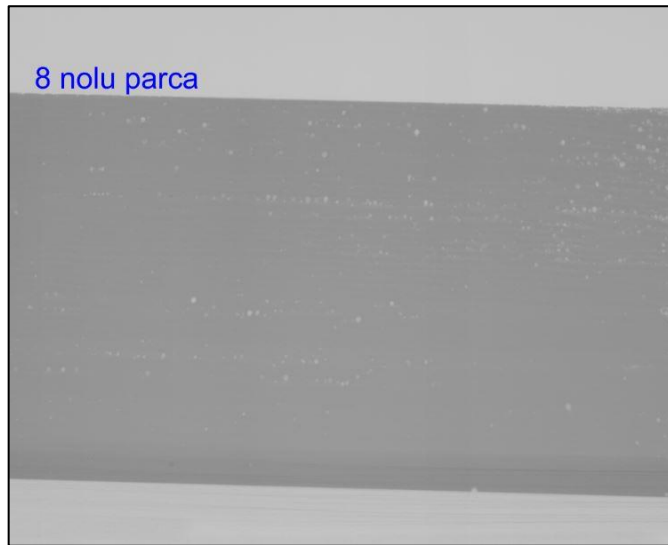
Şekil 4.5 : 5 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi.



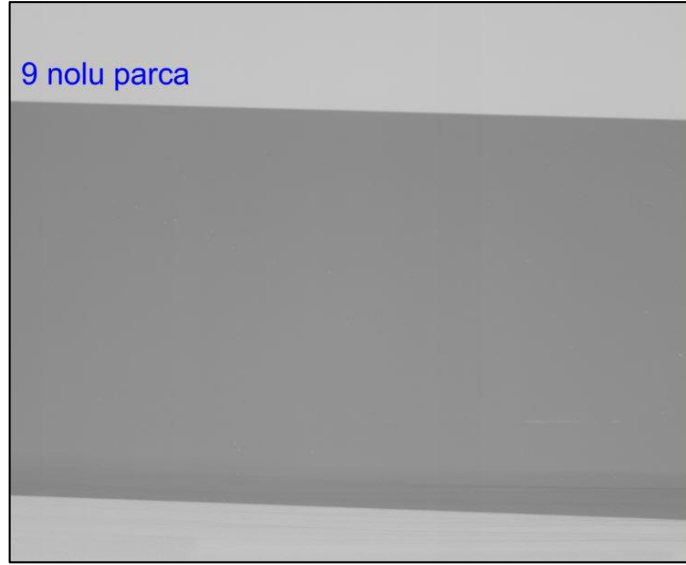
Şekil 4.6 : 6 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi.



Şekil 4.7 : 7 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi.



Şekil 4.8 : 8 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi.



Şekil 4.9 : 9 Nolu Parametre Seti İle Üretilen Takoz Parça X-Ray Görüntü Resmi.

Dokuz farklı parametre seti ile üretilen takoz parçaların radyografik X-Ray görüntüleri incelendiğinde, üretilen test parçalarının içinde oluşan boşluklara ait büyüklük ve yoğunluğun değişen parametre değerleriyle birlikte farklılaştığı görülmektedir.

4,7 ve 8 numaralı parçalarda çok sayıda yatay yönde sıralanmış büyük çaplı boşlukların olduğu görülmüştür. 1 ve 2 numaralı parçalarda ise çok sayıda ancak sıralı şekilde dağılmayan büyük çaplı boşluklar gözlemlenmiştir. 5 numaralı parçada seyrek olarak dağılmış, tekil yapılı ve küçük çaplı boşluklar görülürken, 9 numaralı parçanın görüntüsü de 5 numaralı parçanın görüntüsüne benzer bir yapı göstermektedir. En az boşluk görünen 3 ve 6 numaralı parçalarda ise; çok az sayıda, tekil yapılı ve küçük çaplı boşluklar görülmüştür.

4.2 Numune Parçalara Uygulanan Mekanik Test Sonuçları

Üretilen 9 adet numune parça levhasından planlanan ölçülere göre kesilip çıkarılan test numunelerine; Çekme testi, Charpy darbe testi ve Sertlik ölçüm testleri yapılmıştır. Yapılan testlere ait sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.2.1 Çekme testi sonuçları

Üretilen her bir numune parça levhasından 4 yatay ve 4 dikey test numune parçası çıkarılarak çekme testine tabi tutulmuştur. Yatay ve dikey yönde alınan numunelerle yapılan çekme testleri sonucunda oluşan test sonuçlarına ait tablolar, Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Yatay Yönde Alınan Numunelerle Yapılan Çekme Testi Ortalama Sonuçları.

Takoz Parça Numarası	Çekme Dayanımı- R_m (Mpa)	Uzama- A_{50mm} (%)
1	149	11.01
2	150	7.09
3	164	8.60
4	134	5.26
5	154	7.94
6	160	9.93
7	139	9.17
8	129	6.19
9	161	13.38

Çizelge 4.2 : Dikey Yönde Alınan Numunelerle Yapılan Çekme Testi Ortalama Sonuçları.

Takoz Parça Numarası	Çekme Dayanımı- R_m (Mpa)	Uzama- A_{50mm} (%)
1	135	6.77
2	148	6.44
3	158	4.01
4	113	2.94
5	157	10.34
6	160	10.91
7	105	2.22
8	105	2.44
9	149	8.13

Her bir takozdan dikey ve yatay yönde alınan numunelerle yapılan çekme testi sonuçları incelendiğinde, üretilen test parçalarının çekme dayanımı ve uzama yüzdeleri değerlerinin takoz parçaların üretimleri sırasında kullanılan değişen parametre değerleriyle birlikte farklılaştığı görülmektedir.

Her bir takoz parça için ulaşılan yatay ve dikey ortalama çekme dayanımı değerleri incelendiğinde, genel olarak dikey yönde ulaşılan maksimum çekme dayanımlarının, yatay yönde ulaşılan maksimum çekme dayanımlarından daha düşük olduğu görülmektedir. Benzer şekilde dikey yönde ulaşılan ortalama uzama yüzde değerlerinin, yatay yönde ulaşılan ortalama uzama yüzde değerlerinden düşük olduğu da görülmektedir.

Özellikle 3 ve 6 numaralı takoz parçalara ait ölçülen ortalama çekme dayanımı değerleri, diğer takoz parçalarında ulaşılan çekme dayanımı değerlerinden daha yüksek ölçülmüştür. 5 ve 9 numaralı takoz parçalarda ölçülen çekme dayanımı değerleri ise üçüncü ve dördüncü sırada en yüksek değerlere sahiptir. Hem yatayda hem de dikeyde ölçülen en düşük ortalama çekme dayanımı değerleri ise 4 ve 8 numaralı takoz parçalara ait test numunelerinde görülmüştür.

4.2.2 Charpy darbe testi sonuçları

Üretilen her bir numune parça levhasından 1 yatay ve 1 dikey test numune parçası çıkarılarak 15 Joule değerine sahip çekiç ile toplam 18 adet numune Charpy darbe testine tabi tutulmuştur. Yatay ve dikey yönde alınan numunelerle yapılan Carpy darbe testleri sonucunda oluşan test sonuçlarını gösteren tablolar, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Yatay Yönde Alınan Numunelerle Yapılan Darbe Testi Sonuçları.

Takoz Parça Numarası	Test Parçası Adı	Darbe Testi Dayanımı (Joule)
1	1-ÇY	2,487
2	2-ÇY	2,820
3	3-ÇY	3,587
4	4-ÇY	3,485
5	5-ÇY	3,063
6	6-ÇY	3,463
7	7-ÇY	3,565
8	8-ÇY	3,499
9	9-ÇY	3,911

Çizelge 4.4 : Dikey Yönde Alınan Numunelerle Yapılan Darbe Testi Sonuçları.

Takoz Parça Numarası	Test Parçası Adı	Darbe Testi Dayanımı (Joule)
1	1-ÇD	2,903
2	2-ÇD	3,333
3	3-ÇD	3,298
4	4-ÇD	2,854
5	5-ÇD	2,854
6	6-ÇD	3,778
7	7-ÇD	3,021
8	8-ÇD	2,328
9	9-ÇD	3,741

Her bir takozdan dikey ve yatay yönde alınan numunelerle yapılan Carpy darbe testi sonuçları incelendiğinde, ulaşılan darbe dayanım değerlerinin takoz parçaların üretimleri sırasında kullanılan parametre değerleriyle birlikte değiştiği görülmektedir.

Yatay yönde alınan numunelerle yapılan Carpy darbe testi sonuçlarına bakıldığında, 1 numaralı takoz parçaya ait değer en düşük çıktığı buna karşı 9 numaralı takoz parçaya ait değer ise en yüksek çıktığı görülmektedir.

Dikey yönde alınan numunelerle yapılan Carpy darbe testi sonuçlarına bakıldığında ise, 8 numaralı takoz parçaya ait değer en düşük çıktığı buna karşı 9 ve 6 numaralı takoz parçalara ait değerlerin ise yüksek çıktığı görülmüştür.

4.2.3 Sertlik testi sonuçları

Üretilen her bir numune parça levhasından çıkarılan test numune parçaları üzerinde sertlik testi uygulamaları yapılmıştır. HBW 2,5/62,5/15 değerleri kullanılarak yapılan sertlik testleri sonucunda ulaşılan test sonuçlarına ait değerleri gösteren tablo, Çizelge 4.5 'de verilmiştir.

Elde edilen sertlik testi sonuçları incelendiğinde; takoz parçaların üretimleri sırasında kullanılan parametre değerlerinin değiştirilmesiyle, ulaşılan sertlik değerlerinin de farklılaştığı görülmektedir.

Parametre değerlerinin değiştirilmesiyle ulaşılan en düşük sertlik değerleri 7 ve 8 numaralı takoz parçalarda görülürken, en yüksek sertlik değeri ise 3 ve 6 numaralı takoz parçalarda görülmüştür.

Çizelge 4.5 : Sertlik Testi Sonuçları.

Takoz Parça Numarası	Sertlik Testi (HBW)
1	42
2	43
3	52
4	45
5	44
6	48
7	40
8	40
9	45

4.3 Taguchi Yöntemi İle Ulaşılan İdeal Test Parametreleri

Tez çalışması kapsamında ideal kaynak parametrelerinin belirlenmesi ve kaynak parametrelerinin üretilen parçaların mekanik özelliklerine etkilerini belirlemek amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Yapılan ön denemeler sayesinde parametrelere ait alt ve üst çalışma sınırları belirlenmiştir. Taguchi yönteminde kullanılacak parametre setleri; tel hızı için 4m/dk, 5m/dk ve 6m/dk değerleri, ark boyu için -10,-20 ve -30 değerleri ve robot hızı için 40cm/dk,50cm/dk ve 60cm/dk seviye değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Taguchi yönteminde kullanılmak amacıyla oluşturulan L9 ortogonal dizini ve test numunelerinin maksimum çekme dayanımları ile “büyük olan değer iyi” kriteri kullanılarak hesaplanan S/N oranları Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Taguchi Deneysel Tasarım Tablosu ve Çekme Dayanım Sonuçları.

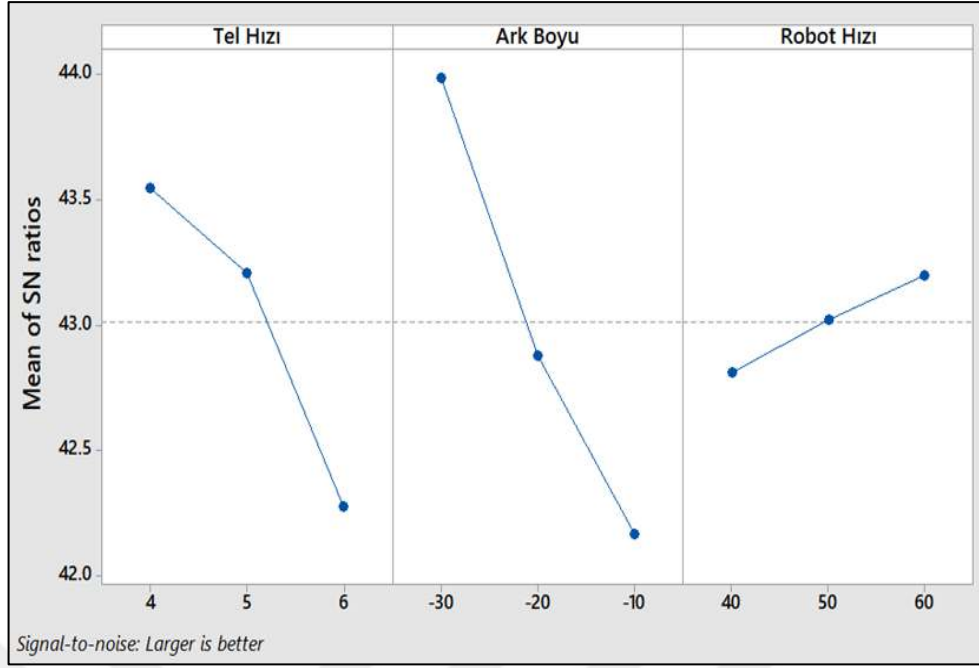
No	Tel Hızı (m/dk)	Ark Boyu (%)	Robot Hızı (cm/dk)	Ort. Çekme Dayanımı (MPa)	S/N Oranı
1	4	-10	40	142	43.0458
2	4	-20	50	149	43.4637
3	4	-30	60	161	44.1365
4	5	-10	50	123	41.7981
5	5	-20	60	155	43.8066
6	5	-30	40	159	44.0279
7	6	-10	60	121	41.6557
8	6	-20	40	117	41.3637
9	6	-30	50	155	43.8066

Proses parametrelerinin çekme dayanımı S/N oranlarına etki seviyeleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. Bu etki seviyelerinin grafiksel gösterimleri ise Şekil 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Kaynak Parametrelerinin Çekme Dayanımı S/N Oranlarına Etki Seviyeleri.

Seviye	Tel Hızı	Ark Boyu	Robot Hızı
1	*43.55	*43.99	42.81
2	43.21	42.88	43.02
3	42.28	42.17	*43.20
Delta	1.27	1.82	0.39
Rank	2	1	3

*Optimum seviyeler



Şekil 4.10 : Kaynak Parametrelerinin Çekme Dayanımı S/N Oranlarına Göre Etki Seviyeleri.

Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile ulaşılan sonuçlar incelendiğinde, mekanik çekme dayanımını etkileyen en önemli proses parametresinin ark boyu olduğu görülmüştür.

S/N oranlarını maksimum yapan parametreler; tel hızı için 1, ark boyu için 1 ve robot hızı için 3 numaralı parametreler olarak görünmektedir. Bu parametre seviyeleri tel hızı için 4 m/dk, ark boyu için -30 ve robot hızı için 60 cm/dk değerlerine karşılık gelmektedir.

Deney tasarımında bu parametre değerleri kullanılarak 3 numaralı takoz parça numunesi üretildiği için ek olarak doğrulama deneyi amacıyla yeni bir takoz parça üretimine gerek kalmamıştır.

Kaynak parametrelerinin mekanik dayanım üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için uygulanan ANOVA, Çizelge 4.8’de verilmiştir.

ANOVA tablosundan da görüldüğü gibi çekme dayanımını etkileyen en önemli parametre % 54,43 oranı ile ark boyudur. İkinci sırada etkili olan parametre ise %25,46 katkı oranı ile tel hızıdır. Seçilen parametreler arasında en az etkiye sebep olan parametre ise %2,44 oranı ile robot hızıdır.

Test numuneleri üzerinde uygulanan maksimum uzama miktarları ile “büyük olan değer iyi” kriteri kullanılarak hesaplanan S/N oranlarına ait değerler Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.8 : Kaynak Parametrelerinin Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkilerini Gösteren ANOVA Tablosu.

Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	%Katkı
Tel Hızı	2	626.89	313.44	1.44	0.41	25.46
Ark Boyu	2	1340.22	670.11	3.08	0.245	54.43
Robot Hızı	2	60.22	30.11	0.14	0.878	2.44
Kalan hata	2	434.89	217.44			17.66
Toplam	8	2462.22				

Çizelge 4.9 : Taguchi Deneysel Tasarım Tablosu ve Uzama Sonuçları.

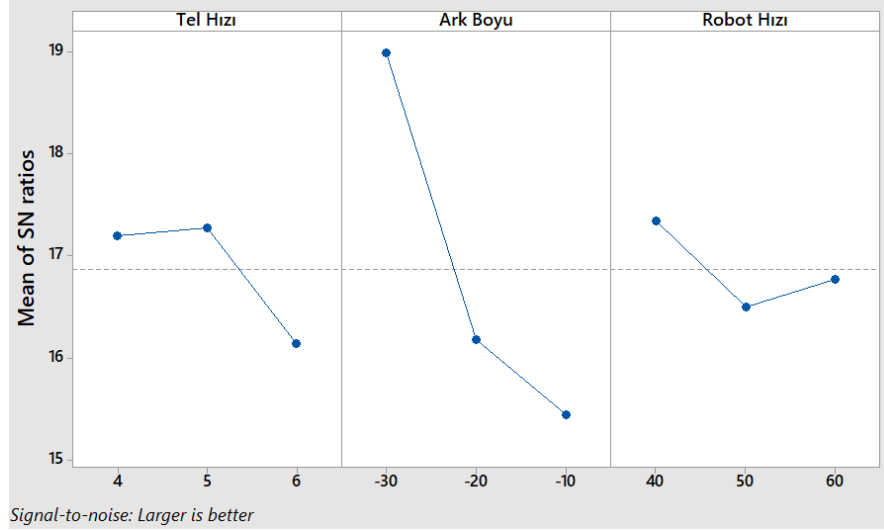
No	Tel Hızı (m/dk)	Ark Boyu (%)	Robot Hızı (cm/dk)	Ort. Uzama (%)	S/N Oranı
1	4	-10	40	8.89	18.9780
2	4	-20	50	6.77	16.6118
3	4	-30	60	6.30	15.9868
4	5	-10	50	4.10	12.2557
5	5	-20	60	9.14	19.2189
6	5	-30	40	10.40	20.3407
7	6	-10	60	5.69	15.1022
8	6	-20	40	4.31	12.6895
9	6	-30	50	10.76	20.6362

Proses parametrelerinin uzama S/N oranlarına etki seviyeleri Çizelge 4.10’da verilmiştir. Ayrıca bu etki seviyelerinin grafik olarak gösterimleri Şekil 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.10 : Kaynak Parametrelerinin Uzama S/N Oranlarına Etki Seviyeleri.

Seviye	Tel Hızı	Ark Boyu	Robot Hızı
1	17.19	*18.99	*17.34
2	*17.27	16.17	16.50
3	16.14	15.45	16.77
Delta	1.13	3.54	0.83
Rank	2	1	3

*Optimum seviyeler



Şekil 4.11 : Kaynak Parametrelerinin Uzama S/N Oranlarına Göre Etki Seviyeleri.

Taguchi yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde maksimum uzamayı etkileyen en önemli proses parametresinin ark boyu olduğu görülmüştür. Uzama S/N oranlarını maksimum yapan parametreler; tel hızı için 2, ark boyu için 1 ve robot hızı için 1 numaralı parametrelerdir. Bu parametre seviyeleri tel hızı için 5 m/dk, ark boyu için -30 ve robot hızı için 40 cm/dk değerlerine karşılık gelmektedir. Deney tasarımında 6 numaralı takoz parçaya ait numune bu parametre değerleri kullanılarak üretildiğinden dolayı ek olarak doğrulama deneyi yapmak amacıyla yeni bir takoz parça üretimine gerek kalmamıştır.

Kaynak parametrelerinin uzama üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için uygulanan ANOVA, Çizelge 4.11’de verilmiştir. ANOVA tablosundan da görüldüğü gibi uzamayı etkileyen en önemli parametre % 29 oranı ile ark boyudur. İkinci sırada etkili olan parametre ise %2,76 katkı oranı ile tel hızıdır. Seçilen parametreler arasında en az etkiye sebep olan parametre ise %2,25 oranı ile robot hızıdır.

Çizelge 4.11 : Kaynak Parametrelerinin Uzama Üzerindeki Etkilerini Gösteren ANOVA Tablosu.

Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	%Katkı
Tel Hızı	2	1.395	0.6976	0.14	0.96	2.76
Ark Boyu	2	14.653	7.3265	0.44	0.695	29
Robot Hızı	2	1.137	0.5684	0.03	0.967	2.25
Kalan hata	2	33.315	16.657			65.97
Toplam	8	50.500				

Test numunelerinin maksimum darbe dayanımı ile “büyük olan değer iyi” kriteri kullanılarak hesaplanan S/N oranları Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12 : Taguchi Deneysel Tasarım Tablosu ve Darbe Dayanımı Sonuçları.

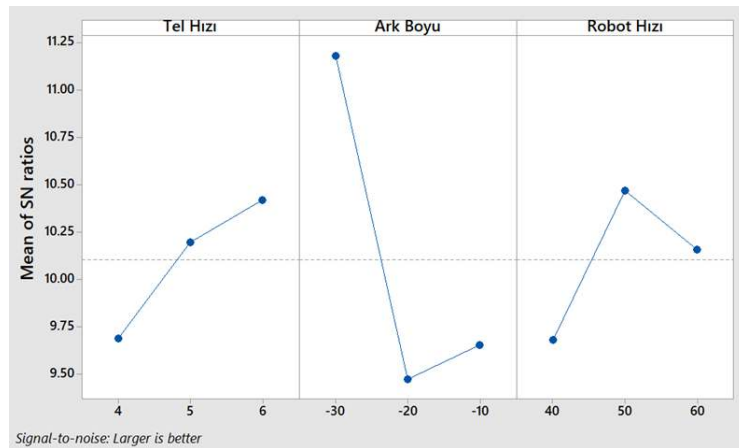
No	Tel Hızı (m/dk)	Ark Boyu (%)	Robot Hızı (cm/dk)	Darbe Dayanımı (Joule)	S/N Oranı
1	4	-10	40	2.69	8.5950
2	4	-20	50	3.07	9.7428
3	4	-30	60	3.44	10.7312
4	5	-10	50	3.17	10.0212
5	5	-20	60	2.95	9.3964
6	5	-30	40	3.62	11.1742
7	6	-10	60	3.29	10.3439
8	6	-20	40	2.91	9.2779
9	6	-30	50	3.82	11.6413

Proses parametrelerinin darbe dayanımı S/N oranlarına etki seviyeleri Çizelge 4.13’de verilmiştir. Ayrıca bu etki seviyelerinin grafik olarak gösterimleri Şekil 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.13 : Kaynak Parametrelerinin Darbe Dayanımı S/N Oranlarına Etki Seviyeleri.

Seviye	Tel Hızı	Ark Boyu	Robot Hızı
1	9.69	*11.182	9.682
2	10.197	9.472	*10.468
3	*10.421	9.653	10.157
Delta	0.731	1.71	0.786
Rank	3	1	2

*Optimum seviyeler



Şekil 4.12 : Kaynak Parametrelerinin Darbe Dayanımı S/N Oranlarına Göre Etki Seviyeleri.

Taguchi yöntemi ile ulaşılan sonuçlar incelendiğinde maksimum darbe dayanımını etkileyen en önemli proses parametresinin ark boyu olduğu görülmüştür . Darbe dayanımı S/N oranlarını maksimum yapan parametreler; tel hızı için 3, ark boyu için 1 ve robot hızı için 2 numaralı parametrelerdir. Bu parametre seviyeleri tel hızı için 6 m/dk, ark boyu için -30 ve robot hızı için 50 cm/dk değerlerine karşılık gelmektedir. Deney tasarımı bu parametre değerleri kullanılarak 9 numaralı takoz parça numunesi üretildiği için ek olarak doğrulama deneyi amacıyla yeni bir takoz parça üretimine gerek kalmamıştır.

Kaynak parametrelerinin uzama üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için uygulanan ANOVA, Çizelge 4.14’de verilmiştir. ANOVA tablosundan da görüldüğü gibi darbe dayanımını etkileyen en önemli parametre % 72,54 oranı ile ark boyudur. İkinci sırada etkili olan parametre ise % 11,25 katkı oranı ile robot hızıdır. Robot hızının etkisine yakın olmakla birlikte seçilen parametreler arasında en az etkiye sebep olan parametre ise % 11,04 oranı ile tel hızıdır.

Çizelge 4.14 : Kaynak Parametrelerinin Darbe Dayanımı Üzerindeki Etkilerini Gösteren ANOVA Tablosu.

Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	%Katkı
Tel Hızı	2	0.11582	0.05791	2.15	0.318	11.04
Ark Boyu	2	0.76042	0.38021	14.09	0.066	72.54
Robot Hızı	2	0.11796	0.05898	2.19	0.314	11.25
Kalan hata	2	0.05396	0.02698			5.14
Toplam	8	1.04816				

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında tel ark eklemeli imalat yönteminde proses parametrelerinin ürün mekanik yapısı üzerinde oluşturdukları etkilerin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın birinci kısmında, yapılan ön denemeler sonucu belirlenen tel hızı, ark boyu ve robot hızı parametrelerine ait seviyeler kullanılarak, Taguchi deneysel tasarım tablosu oluşturulmuş ve bu tabloda belirtilen parametre setlerine göre 9 farklı takoz parça imalatı yapılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında, üretilmiş olan takoz parçaların radyografik X-Ray çekimleri yapılarak, tez kapsamında yapılması planlanan çekme, uzama, darbe ve sertlik testlerinin yapılabilmesi için gereken geometrik ölçülere getirilip test numune parçalarının oluşturulması sağlanmıştır. Çalışmanın son kısmında ise yapılan mekanik testlerin ardından Taguchi yöntemi ile tespit edilmeye çalışılan ideal test parametreleri belirleme çalışmaları yapılarak parça mekanik yapısına en çok etki eden parametreler tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Alüminyum alaşımlı telin kullanıldığı tel ark eklemeli imalat yönteminde üretilen parçalar içinde oluşan boşluklar, çekilen radyografik resimlerle incelenmiştir. X-Ray resimlerde en fazla boşluk oluşumu 4,7 ve 8 numaralı parametre setleriyle üretilen parçalarda görülmüştür. Bu parçalarda görünen boşlukların yapısı hem büyük çapa sahip olup hemde yatay yönlü olarak sıralı şekilde oluşmuşlardır. Bu durumun sonucu olarak da en kötü çekme dayanımı performansı bu takoz parçalarda görülmüştür. Çekme testinde en düşük performans gösteren parça, 8 numaralı parça olup bu parça 117 Mpa değerinde, 7 numaralı parçanın ise 121 Mpa değerinde koptuğu belirlenmiştir. En düşük ortalama mekanik çekme dayanımı gösteren 8 numaralı parça tel hızı 6 m/dk, ark boyu -20 ve robot hızı 40 cm/dk parametreleri ile üretilmiş olan takoz parçadan elde edilmiştir.

Radyografik çekimlerde en az sayıda boşluğun görüldüğü parçalar ise 3 ve 6 numaralı parametre setleriyle üretilen parçalardır. Bu parçalardaki boşlukların dağılımı çok seyrek olmanın yanı sıra tekil olarak dağılmış olup boşlukların küçük çapa sahip oldukları gözlemlenmiştir. Bu görüntünün sonucu çekme dayanımı testine de olumlu şekilde yansyarak 3 numaralı parçanın 161 MPa'da, 6 numaralı parçanın ise 159 Mpa

gibi yüksek değerlerde koptuğu görülmüştür. Bu  ekme dayanım değerleri tüm test parçaları arasında en yüksek çekme dayanım değerleri olarak belirlenmişt r. En yüksek ortalama mekanik çekme dayanımı gösteren 3 numaralı parça tel hızı 4 m/dk, ark boyu -30 ve robot hızı 60 cm/dk parametreleri ile  retilmişt r. Taguchi yöntemi ile belirlenen kaynak parametrelerinin çekme dayanımı S/N oranlarına göre etki seviyelerine bakıldığında da aynı sonuç tespit edilmektedir.

Kaynak parametrelerinin ortalama çekme dayanımı üzerindeki tekil etkilerini belirlemek amacıyla uygulanan ANOVA yöntemi sonucuna göre çekme dayanımı üzerindeki en etkili parametrenin %54,43 oranı ile ark boyu olduğu görülmüştür. İkinci sıradaki en etkili parametrenin ise %25,46 oranı ile tel hızı olduğu tespit edilmişt r. Robot hızı etkisinin ise %2,44 oranında kaldığı görülmüştür.

Maksimum uzama miktarlarına bakılarak yapılan testlerde ise 9 ve 6 numaralı parametre setleriyle üretilen parçaların daha iyi performans gösterdikleri görülmüştür. 6 m/dk tel hızı, -30 ark boyu ve 50cm/dk robot hızı parametreleri ile üretilen 9 numaralı parçanın %10,76 uzadığı görülürken 6 numaralı parça da %10,40'lık uzama performansı g stermişt r. Uzama testinde en kötü performansı ise çekme dayanım testinde olduğu gibi 4,7 ve 8 numaralı parçalar g stermişt r. 4 numaralı parçanın %4,10 değerine kadar, 7 numaralı parçanın %5,69 değerine kadar ve 8 numaralı parçanın da %4,31 değerine kadar uzayabildiği görülmüştür. Bu durumun da radyografik görüntülerinde tespit edilen yoğun ve büyük çaplı boşt ğa sahip yapılarından kaynaklandığı tespit edilmişt r.

Kaynak parametrelerinin ortalama uzama üzerindeki tekil etkilerini belirlemek amacıyla uygulanan ANOVA yöntemi sonucuna göre uzama dayanımı üzerindeki en etkili parametrenin %29 oranı ile ark boyu olduğu görülmüştür. İkinci sırada etkili olan parametrenin %2,76 oranı ile tel hızı ve en az etkiye %2,25 oranı ile robot hızının sahip olduğu belirlenmişt r.

Her takoz parçadan yatay ve dikey yönlerde alınan numunelere ait çekme ve uzama test sonucu değerleri incelendiğinde, genel olarak yatay yönde alınan test numuneleri ile ulaşılan çekme dayanımı ve uzama yüzde değerlerinin, dikey yönde alınan test numuneleri ile ulaşılan çekme dayanımı ve uzama yüzde değerlerinden daha yüksek olduğu tespit edilmişt r.

Darbe dayanımı miktarlarına bakılarak yapılan testlerde ise uzama testlerinde olduğu gibi 9 ve 6 numaralı parametre setleriyle üretilen parçaların daha iyi performans gösterdikleri görülmüştür. 6 m/dk tel hızı, -30 ark boyu ve 50cm/dk robot hızı parametreleri ile üretilen 9 numaralı parçanın 3,82 Joule darbe dayanımı gösterdiği görülürken 6 numaralı parça da 3,62 Joule'lük darbe dayanım performansı göstermiştir. Darbe dayanımı testinde en kötü performansı ise 2,69 Joule değeri ile 1 numaralı parça göstermiştir. Bu parçanın radyografik görünümünde de çok sayıda, tekil ve büyük çaplı boşluklar görünmektedir.

Kaynak parametrelerinin ortalama darbe dayanımı üzerindeki tekil etkilerini belirlemek amacıyla uygulanan ANOVA yöntemi sonucuna göre darbe dayanımı üzerindeki en etkili parametrenin %72,54 oranı ile ark boyu olduğu görülmüştür. Robot hızı ve tel hızı parametreleri ise birbirlerine çok yakın değerler ile sırasıyla %11,25 ve %11,04 değerleri ile ikinci ve üçüncü sırada etkili olan parametrelerdir.

Tel ark eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçalar üzerinde yapılan çekme dayanımı, uzama ve darbe dayanımı test sonuçlarına göre genel olarak kaynak ile üretilen parçaya ait mekanik özellikleri en çok etkileyen parametrenin ark boyu olduğu tespit edilmiştir. İkinci en çok etkileyen parametre tel hızı ve üçüncü en çok etkileyen parametrenin robot hızı olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Adamidis, O., Alber, S., Anastasopoulos, I.** (2018). Investigation into 3D printing of granular media. *Physical Modelling in Geotechnics*, 113-118.
- Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H., Barlow, J.** (1995). Direct selective laser sintering of metals. *Rapid Prototyping Journal*, 1(1), 26-36.
- Busachi, A., Erkoyuncu, J., Colegrove, P., Martina, F., Ding, J.** (2015). Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications. *Procedia CIRP*, 37, 48-53.
- Chaput, C., Chartier, T.** (2007). Fabrication of ceramics by stereolithography. *RTEjournal-Forum für Rapid Technologie*, 4(1).
- Chua, C. K. & Leong, K. F.** (2014). *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications (with Companion Media Pack) of Rapid Prototyping*. World Scientific Publishing Company.
- Derekar, K., Lawrence, J., Melton, G., Addison, A., Zhang, X., Xu, L.** (2019). Influence of Interpass Temperature on Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminium Alloy Components. *MATEC Web of Conferences*, 269, 05001.
- Dilberoglu, U., Gharehpapagh, B., Yaman, U., Dolen, M.** (2017). The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545-554.
- Dinovitzer, M., Chen, X., Laliberte, J., Huang, X., Frei, H.** (2019). Effect of Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process Parameters on Bead Geometry and Microstructure. *Additive Manufacturing*, 26, 138-146.
- Dudek, P. F. D. M.** (2013). FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58(4), 1415-1418.
- Dupláková, D., Hatala, M., Duplák, J., Radchenko, S., Steranka, J.** (2018). Direct Metal Laser Sintering–Possibility of Application in Production Process. *Science and Research Journal*, 1(4), 123-127.
- Gierth, M., Henckell, P., Ali, Y., Scholl, J., Bergmann, J.** (2020). Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of aluminum alloy AlMg5Mn with energy-reduced Gas Metal Arc Welding (GMAW). *Materials*, 13, 2671.
- Hanssen, J., Moe, Z. H., Tan, D., Chien, O. Y.** (2013). Rapid Prototyping in Manufacturing. *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, 1-16.
- Hauser, T., Da Silva, A., Reisch, R., Volpp, J., Kamps, T., Kaplan, A.** (2020). Fluctuation effects in Wire Arc Additive Manufacturing of aluminium

- analysed by high-speed imaging. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 1088-1098.
- Horgar, A., Fostervoll, H., Nyhus, B., Ren, X., Eriksson, M., Akselsen, O.M.** (2018). Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire. *Journal of Materials Processing Technology*, 259, 68-74.
- Karayel, E., & Bozkurt, Y.** (2020). Additive manufacturing method and different welding applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 11424-11438.
- Köhler, M., Fiebig, S., Hensel, J., Dilger, K.** (2019). Wire and Arc Additive Manufacturing of Aluminum Components. *Metals*, 9, 608.
- Kumar, P., Mahamani, A., Prasad, B.** (2020). Design and fabrication of screw feeding device in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 46.
- Lee, S.** (2020). Optimization of Cold Metal Transfer-Based Wire Arc Additive Manufacturing Processes Using Gaussian Process Regression. *Metals*, 10, 461.
- Lehmann, T., Jain, A., Jain, Y., Stainer, H., Wolfe, T., Henein, H., Qureshi, A. J.** (2020). Concurrent geometry- and material-based process identification and optimization for robotic CMT-based wire arc additive manufacturing. *Materials & Design*, 194, 108841.
- Luo, Y., Li, J., Xu, J., Zhu, L., Han, J., Zhang, C.** (2018). Influence of pulsed arc on the metal droplet deposited by projected transfer mode in wire-arc additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 259, 353-360.
- Montevecchi, F., Venturini, G., Scippa, A., Campatelli, G.** (2016). Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process. *Procedia CIRP*, 55, 109-114.
- Moore, P., Addison, A., Nowak, M., Coventry, M.** (2019). Mechanical properties of wire plus arc additive manufactured steel and stainless steel structures. *Welding in the World*, 63, 1521-1530.
- Müller, J., Grabowski, M., Müller, C., Hensel, J., Unglaub, J., Thiele, K., Kloft, H., Dilger, K.** (2019). Design and Parameter Identification of Wire and Arc Additively Manufactured (WAAM) Steel Bars for Use in Construction. *Metals*, 9, 725.
- Oliveira, J. P., Santos, T., Miranda, R.M.** (2020). Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice. *Progress in Materials Science*, 107, 100590.
- Oropallo, W., Piegl, L. A.** (2016). Ten challenges in 3D printing. *Engineering with Computers*, 32(1), 135-148.
- Ortega, A., Galvan, L., Salem, M., Moussaoui, K., Segonds, S., Rouquette, S., Deschaux, F., Beaume, F.** (2019). Characterisation of 4043 aluminium alloy deposits obtained by wire and arc additive manufacturing using a Cold Metal Transfer process. *Science and Technology of Welding and Joining*, 24, 1-10.

- Oyama, K., Diplas, S., M'Hamdi, M., Gunnæs, A., Azar, A.** (2019). Heat Source Management in Wire-Arc Additive Manufacturing Process for Al-Mg and Al-Si Alloys. *Additive Manufacturing*, 26, 180-192.
- Prado, J.L., Cerqueira, J.L., Diéguez, J., Camacho, A.** (2017). Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM). *Procedia Engineering*, 13, 895-902.
- Ramya, A., Vanapalli, S. L.** (2016). 3D printing technologies in various applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 7(3), 396- 409.
- Rodrigues, T. Duarte, V., Miranda, R.M., Santos, T., Oliveira, J. P.** (2019). Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), *Materials*, 12, 1121.
- Ryan, E., Sabin, T.J., Watts, J., Whiting, M.** (2018). The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319. *Journal of Materials Processing Technology*, 262, 577-584.
- Sürmen, H.K.** (2019). Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24, 373-392.
- Udroiu, R., Braga, I. C.** (2017). Polyjet technology applications for rapid tooling. *MATEC*, 112, 3011.
- Venturini, G., Montevecchi, F., Scippa, A., Campatelli, G.** (2016). Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features. *Procedia CIRP*, 55, 95-100.
- Vimal, K.E.K., Srinivas, M., Rajak, S.** (2020). Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review. *Materials Today: Proceedings*, 41.
- Wong, K. V., Hernandez, A.** (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012.
- Yüce, C.** (2018). Yüksek Mukavemetli Çelikler İle Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı İle Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi (Doktora tezi). Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Zhang, Y., Gao, M., Zeng, X.** (2018). Effect of Process Parameters on Mechanical Properties of Wire and Arc Additive-Manufactured AlCu6Mn. *JOM*, 71.
- Zhou, J., Jia, C., Guo, M., Chen, M., Gao, J., Wu, C.S.** (2020). Investigation of the WAAM processes features based on an indirect arc between two non-consumable electrodes. *Vacuum*, 183, 109851.

Url-1 <<https://webstore.ansi.org/>>, erişim tarihi 09.11.2021

Url-2 <<http://amtech3d.com/3d-printing-techniques/>>, erişim tarihi 09.11.2021.

Url-3 <<https://www.mmo.org.tr/>>, erişim tarihi 09.11.2021.

Url-4 <<https://www.fronius.com/>>, erişim tarihi 09.11.2021.

Url-5 <<https://www.zwickroell.com>>, erişim tarihi 09.11.2021.

Url-6 <<https://standards.iteh.ai/catalog/>>, erişim tarihi 09.11.2021.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mehmet Nuri ERTEKİN
Doğum Tarihi ve Yeri :
E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2000, Orta Doğu Tek. Üniv., Mühendislik Fak., Makina Müh.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- TOFAŞ AŞ / İleri Araştırmalar Uzmanı 2015 - Halen
- TOFAŞ AŞ / Boya Üretim Teknolojileri Uzmanı 2013 - 2015
- TOFAŞ AŞ / Gövde Üretim Teknolojileri Uzmanı 2005 - 2013
- TOFAŞ AŞ / Gövde Ürün Proses Uzmanı 2002 - 2005