



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ELİF KARAYEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme

Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Yahya BOZKURT

İSTANBUL, 2022



MARMARA UNIVERSITY
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES
IN PURE AND APPLIED SCIENCES



**INVESTIGATION OF MECHANICAL
PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS
PRODUCED BY WIRE ARC ADDITIVE
MANUFACTURING METHOD**

ELİF KARAYEL

MASTER THESIS

Department of Metallurgy and Material Engineering

Thesis Supervisor

Prof. Dr. Yahya BOZKURT

ISTANBUL, 2022

TEŞEKKÜR

Öncelikle beni bugünlere getiren ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen biricik aileme, bana her zaman güvenlerini ve sevgilerini hissettirdikleri için teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda söz ve fikir sahip olan saygıdeğer tez danışmanım, zor zamanlarda ürettiği çözümlerle bana yardımcı olan ve desteğini her zaman hissettiğim Sayın Prof.Dr. Yahya BOZKURT hocama bana her zaman inandığı ve yardımcı olduğu için teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında teknik bilgileriyle ve dostluklarıyla bana her zaman destek olan ve benden yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Murathan KALENDER ve Cezmi ÖZDEMİR' e teşekkürlerimi sunarım. Proje desteği ile maddi destek sağlayan Üniversitemizin BAPKO birimine minnetlerimi sunarım.

En yakın arkadaşlarım, Tuğba Makbule ÖZTÜRK ve Şulenur SARI'ya bana her zaman destek oldukları ve inandıkları için teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamın en başından sonuna kadar her adımda beni motive eden, hayatımın her yerinde desteğini, sevgisini ve güvenini her zaman hissettiğim Muhammet Emin YILMAZ'a minnetimi sunarım.

Haziran, 2022

Elif KARAYEL

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
SEMBOLLER	vi
KISALTMALAR	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	1
1.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	3
1.2.1. Alüminyum dövme alaşımları	4
1.2.2. Alüminyum dökme alaşımları	5
1.3. Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri Ve Genel Kullanım Alanları	6
1.4. Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti	8
2. EKLEMELİ İMALAT	14
2.1. Eklemeli İmalat Üretim Süreci	15
2.2. Eklemeli İmalat Kullanım Alanları	15
2.3. Eklemeli İmalat Yöntemleri	22
2.3.1. Metal eklemeli imalat	25
2.3.2. Seçici lazer ergitme/sinterleme.....	27
2.3.3. Elektron ışın ergitme	28
2.3.4. Doğrudan enerji biriktirme (DED)	30
2.4. Tel Ark Eklemeli İmalat (TAEİ).....	31
2.5. Sürtünme Karıştırma Eklemeli İmalat	35
LİTERATÜR TARAMASI	38
3.1. TAEİ Üzerine Çalışmalar	38
3.2. Alüminyum Alaşımlarının TAEİ Yöntemiyle Üretimi	39
3.3. Literatür Özeti Ve İlgili Literatür Açığı	44
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45
4.1. Malzemeler	45
4.2. Deney Düzenegi	45
4.3. TAEİ Proses Parametreleri	47

4.4.TAEİ Yöntemiyle Numune Üretimi	47
4.5. Mekanik Deneyler	48
4.5.1. Mekanik deney için numune hazırlama	49
4.5.2. Çekme testi	49
4.5.3.Mikrosertlik ölçümleri	50
4.6. Mikroskop İncelemeleri.....	51
4.6.1. Optik mikroskop (OM).....	51
4.6.2.Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri ve EDS analizi.....	54
4.6.3.X-ışını kırınım yöntemi (XRD)	55
4.6.4.Elektron geri saçılım difraksiyonu (EBSD) analizi.....	56
4.6.5.Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) analizi	57
4.7. Yoğunluk Ölçümü	57
5. DENEYSEL SONUÇLAR	58
5.1. Çekme Testi.....	58
5.2. Mikrosertlik	59
5.3. Mikroyapı İncelemeleri	60
5.4. XRD Analizi	63
5.5. EBSD Analizi	64
5.6. AFM Analizi.....	65
5.7. Yoğunluk Ölçümü	66
6. SONUÇLAR.....	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	78

ÖZET

TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada otomotiv, gemi inşa sanayi, enerji endüstrisi gibi birçok alanda sıklıkla tercih edilen AA5356 alüminyum alaşımı, ilave tel olarak kullanılarak tel ark eklemeli imalat (TAEİ) yöntemi ile parçalar üretilmiştir.

Özellikle, karmaşık geometrilere sahip parçaların kullanıldığı alanlar, TAEİ teknolojisini benimsemektedir. Çalışmamızda, 1,6 mm kalınlığında AA5754 Al levhalar altlık malzeme olarak kullanılmıştır. 2,4 mm çapında AA5356 alüminyum alaşımlı teller argon gazı altında TIG kaynak yöntemi ile levhalar üzerine biriktirilerek, bir duvar örülmüştür. Farklı kaynak parametreleri ile birleştirilmiş bu alüminyum parçaların, mekanik özelliklerinin incelenmesi için mikrosertlik ölçümü ve çekme testi yapılmıştır. Bu incelemeler sonucunda, kaynak dikiş yönüne paralel ve dik hazırlanan numunelerin mekanik özellikler açısından farklı davranışlar gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar mikroyapı incelemeleri ile desteklenmiş ve geleneksel yöntemlerle üretilen parçalarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tel ark eklemeli imalat, TIG kaynak yöntemi, mekanik özellikler, mikroyapı, alüminyum alaşımları.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS PRODUCED BY WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

In this study, parts were produced by wire arc additive manufacturing (WAAM) method by using AA5356 aluminum alloy, which is frequently preferred in many fields such as automotive, shipbuilding industry, and energy industry, as an additional wire.

In particular, areas where parts with complex geometries are used adopt WAAM technology. In our study, 1.6 mm thick AA5754 Al sheets were used as substrate. 2.4 mm diameter AA5356 aluminum alloy wires were deposited on the plates by TIG welding method under argon gas, and a wall was built. Microhardness measurement and tensile test were performed to examine the mechanical properties of these aluminum parts combined with different welding parameters. As a result of these examinations, it was determined that the samples prepared parallel and perpendicular to the weld seam direction showed different behaviors in terms of mechanical properties. These results were supported by microstructural studies and compared with the parts produced by conventional methods.

Keywords: Wire arc additive manufacturing, TIG welding method, mechanical properties, microstructure, aluminium alloys.

SEMBOLLER

A	: Amper
°C/s	: Santigrat/saniye
°C	: Santigrat derece
N/mm²	: Newton/milimetrekare
mm	: Milimetre
%	: Yüzde
V	: Voltaj
µm	: Mikrometre
l/dk	: Litre/dakika

KISALTMALAR

AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
DED	: Doğrudan Enerji Biriktirme
Eİ	: Eklemeli İmalat
EBM	: Elektron Geri Saçılım Difraksiyonu
MAG	: Metal Aktif Gaz
MIG	: Metal İnert Gaz
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SLM	: Seçici Lazer Ergitme
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
SKK	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
TAEİ	: Tel Ark Eklemeli İmalat
TIG	: Tungsten İnert Gaz

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	6
Şekil 1.2. Kaynak kabiliyetine etki eden faktörler.	9
Şekil 1.3. Kaynak kabiliyetine etki eden faktörlerin ayrıntılı gösterimi.	10
Şekil 1.4. Alaşım elementlerinin etkileri	12
Şekil 2.1. Eİ işlem adımları.	15
Şekil 2.2. Eİ teknolojisinin uygulama alanlarından bazıları	16
Şekil 2.3. Eİ ile üretilen otomotiv bileşenleri; a) Gövde paneli, b) Egzoz borusu, c) Hidrolik manifold, d) Turbo şarj cihazı, e) Motosiklet yan aynası.....	17
Şekil 2.4. Eİ teknolojisi ile üretilen havacılık bileşenleri; a) Airbus tarafından üretilen menteşe tutucusu, b) Rolls Royce Trent XWB motoru, c) Sıvı oksijen flanşı, d) Havacılık menteşe parçası, e) Gaz türbini motoru, f) Braket konektörü, g) Leap motoru, h) Karmaşık şekilli braket	19
Şekil 2.5. Eİ sağlık uygulamaları; a) Kalça implantı komponenti, b) femoral komponent, c) asetabular kap, d) kalça bileşeni, e) biyonik kulak, f) protez eller, g) implantların karşılaştırılması	21
Şekil 2.6. Eİ ile parça üretimine yapılan yatırımların yıllara göre değlendirmesi.	22
Şekil 2.7. Eİ yöntemleri.....	22
Şekil 2.8. Metal Eİ kullanım alanları.	26
Şekil 2.9. SLS yönteminin çalışma prensibi	28
Şekil 2.10. EBM çalışma prensibi	29
Şekil 2.11. DED yöntemi, a) Toz malzeme ile üretim, b) Besleyici tel ile üretim	30
Şekil 2.12. TAEİ yöntemi çalışma prensibi	32
Şekil 2.13. TAEİ sistem ekipmanları.	33
Şekil 2.14. SKK yöntemi çalışma prensibi	36
Şekil 2.15. SKK Eİ yönteminin gösterimi.....	37
Şekil 4.1. Deney düzeneği; a) Freze tezgahı üzerine kurulu sistem, b) Tel besleme	46
Şekil 4.2. TAEİ yönteminin şematik gösterimi.	46

Şekil 4.3.	Kaynak tabakalarının biriktirme (ekleme) yönü	47
Şekil 4.4.	TAEİ yöntemiyle üretilen numune.	48
Şekil 4.5.	TAEİ sonrası frezeleme a) Frezeleme işlemi, b) Frezeleme sonrası.....	48
Şekil 4.6.	Çekme testi numuneleri; a) Numunelerin şematik görünümü b) Tel erozyon ile üretilen numuneler.....	49
Şekil 4.7.	Çekme deney numunesinin geometrik şekli ve boyutları	49
Şekil 4.8.	Çekme testi; a) Zwick marka Z010 üniversal tip çekme cihazı, b) çekme numunesi.	50
Şekil 4.9.	Sertlik testi; a) Future-Tech FM310 mikrosertlik cihazı, b) Numunenin mikrosertliğinin ölçülmesi.	51
Şekil 4.10.	Mikroyapı incelemeleri için akış şeması.....	52
Şekil 4.11.	Numune hazırlama; a) Zımpara ve parlatma diskleri, b) Zımparalama ve parlatma cihazı.....	53
Şekil 4.12.	Dağlama işlemi	53
Şekil 4.13.	Optik mikroskop	54
Şekil 4.14.	SEM; a) ZEISS marka cihaz, b) analiz sırasında numuneler	55
Şekil 4.15.	EBSD analizi; a) SEM laboratuvarı, b) Oxford Nordlys dedektörü.	56
Şekil 4.16.	AFM cihazı.	57
Şekil 5.1.	Numunelerin çekme diyagramları; a)Numune 1 çekme testi grafiği, b)numune 2 çekme testi grafiği.	58
Şekil 5.2.	Numune 1 ve 2'nin yatay ve dikey yönde çekme mukavemeti değerleri. .	59
Şekil 5.3.	Numune 1 ve 2 mikrosertlik grafiği.	60
Şekil 5.4.	Optik mikroskop görüntüleri; a) Numune 1, b)Numune 2.....	61
Şekil 5.5.	Parçanın yüzeyinde oluşan Al_2O_3 tabakası; a) Numune 1, b) Numune 2, c) EDS analizi.	63
Şekil 5.6.	TAEİ AA5356 alüminyum alaşımının XRD spektrumu.....	63
Şekil 5.7.	EBSD analizi ile tane yapısının incelenmesi; a) Numune 2'nin alt katmanları, b) Numune 1' in üst katmanları, c) Numune 2'nin alt katmanları.	64
Şekil 5.8.	AM görüntüleri; a) Numune 1 b) Numune 2.	66

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Al'nin genel özellikleri.....	2
Tablo 1.2. Dövme Al alaşımlarının sınıflandırılması	4
Tablo 1.3. Döküm Al alaşımlarının sınıflandırılması.	5
Tablo 1.4. Alaşım elementlerinin etkileri	12
Tablo 2.1. El yöntemlerinin sınıflandırılması	23
Tablo 2.2. El proseslerinin kısa tanıtımı ve sınıflandırılması	24
Tablo 4.1. ER 5356 ve AA5754 altlığın kimyasal kompozisyonu.	45
Tablo 4.2. ER5356 kaynak telinin mekanik özellikleri.	45
Tablo 4.3. Proses parametreleri.	47

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) teknolojisi son yıllarda birçok sektörde kullanılan bir teknolojidir. Günümüzde, imalat endüstrisinde bir teknolojik devrim olduğu düşünülmektedir. Yöntemin temeli, parçanın katmanlar halinde birbiri üzerine eklenerek üretilmesine dayanmaktadır. Eİ, geleneksel yöntemler ile üretilmesi oldukça zor, hatta imkânsız olan, özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanılan karmaşık geometrili parçaları üretebilme avantajına sahiptir. Bunun yanında, malzeme ve zamandan tasarruf sağlayabilme, düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli ve yüksek darbe dayanımına sahip parça üretimini gerçekleştirebilme gibi avantajları da mevcuttur. Bu teknoloji, farklı kaynak yöntemlerine entegre edilebilmektedir. Bunlardan biri tel ark eklemeli imalat (TAEİ) yöntemidir. Bu yöntemde genellikle metal inert/aktif gaz (MIG/MAG) veya tungsten inert gaz (TIG) kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. TAEİ yönteminin temel prensibi, tel formundaki hammaddenin elektrik ark ısıısıyla eritilmesi ve birbiri üzerine katmanlar halinde biriktirilmesidir. Yöntem, Eİ'nin sahip olduğu malzeme tasarrufu, tasarım esnekliği gibi avantajlara sahiptir. Büyük boyutlu ve karmaşık parçaların sorunsuzca üretilmesi, neredeyse hiç atık oluşturmaması ve diğer metal Eİ yöntemlerine göre ekonomik olması, bu tekniği talep gören bir üretim yöntemi haline getirmiştir.

1.1. Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyum ve alaşımları, sahip oldukları $2,7 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk değeriyle, nispeten düşük bir yoğunluğa, yüksek elektrik ve termal iletkenlik özelliklerine sahiptir. Aynı zamanda ortam atmosferi de dahil olmak üzere bazı ortak ortamlarda korozyona karşı gösterdikleri direnç ile karakterize edilirler. Alüminyum alaşımların çoğu, yüksek süneklik özelliğine sahip oldukları için kolayca şekillendirilebilmektedirler. Bu özellikleri, nispeten saf malzemenin haddeleme ile ince alüminyum folyo tabaka haline getirilmesi ile kanıtlanır. Alüminyum yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapısına sahip olduğu için sünekliğini çok düşük sıcaklıklarda bile koruyabilmektedir. Bu özelliklerinin yanı sıra alüminyumun dezavantajı 660°C olan ergime derecesidir. Nispeten düşük ergime derecesi, alüminyumun yüksek sıcaklıklarda kullanımını sınırlandırmaktadır [1,2]. Al genel ve fiziksel özellikleri Tablo 1.1'de gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Al'nin genel özellikleri [3].

Sembol	Al
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı	26,97 g/mol
Kristal Yapısı	YMK
Erime Noktası	660 °C
Yoğunluğu (Oda Sıcaklığında)	2,7 g/cm ³
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150-320 °C
Buharlaşma Noktası	2450 °C
Isıl Genleşme Katsayısı	23,5 µm m ⁻¹ K ⁻¹
Özgül Isısı	0,224 cal/g (100°C'de)
Gizli Erime Isısı	94 cal/g
Çekme Mukavemeti	40-100 N/mm ²
Akma Mukavemeti	10-30 N/mm ²
Elastisite Modülü	72 x 10 ² N/cm ²
Kayma Modülü	27 x 10 ⁵ N/cm ²
% Uzama	45
%Kopma Uzaması	30-40
Sertlik	20 (HV)
Çentik Darbe Tokluğu	100 J/cm ²
Elektrik İletkenliği	%59,5 IACS
Elektrik Direnci	2,65 x 10 ⁻⁸ ohm metre
Katılma Esnasında Kendini Çekme	%6.7
Yansıtıcılık	Tungsten Flamadan Gelen Beyaz Işık için %90

Alüminyum alaşımları haddelenmiş levha ve plakalarda tüp, çubuk, tel ve çubuk formlarının yanı sıra döküm, dövme ve baskı işlemleriyle üretilmektedir. Maliyetinin düşük olmasına ve mukavemet/ağırlık oranının yüksek olmasına ek olarak, alüminyum alaşımları yaygın olarak kullanılan yöntemlerin çoğu tarafından kolayca üretilir ve birleştirilir. Alüminyum alaşımlarının çoğu atmosfer, su, birçok kimyasal madde ve diğer malzemelerin korozyonuna karşı yüksek dirence sahiptir. Bu üstün korozyon direncinin nedeni, üzerinde oluşan oksit tabakasının koruyucu olmasındandır. Alüminyum ve alaşımları toksik olmadıklarından içecekler, yiyecekler ve ilaçlarla yapılan uygulamalarda kullanılabilirler ve ekolojiye zarar vermezler. Hatta özellikle diğer metallere göre sahip olduğu yüksek oranda geri dönüştürülebilme özelliğiyle ekolojik

açından sağladığı fayda, oldukça önemlidir [4,5].

Al ve alaşımlarının diğer üstün özellikleri arasında yüksek elektrik iletkenliği, yüksek ısı iletkenliği bulunmaktadır. Alüminyumun elektrik iletkenliği bakırın iletkenliğinin %60'ı kadar olmasına karşın düşük yoğunluğundan ötürü, birim kütleye düşen iletkenliği bakırdan daha yüksektir. Alüminyumun oda sıcaklığında soğuk şekil değiştirmesi ile çekme ve akma mukavemeti yükselirken, elektrik iletkenliği şekil değiştirme oranına bağlı olarak azalır [6,7]. Al ve alaşımlarının mukavemetini yükseltmenin diğer bir yolu alaşım elementlerinin etkilerinden yararlanmaktır. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde kullanılan başlıca alaşım elementleri, Cu, Mn, Si, Mg, Zn, Sn, Li' dir. Ayrıca, alüminyum alaşımları içerdikleri alaşım elementlerine göre isimlendirilmektedir.

1.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Al alaşımları içerdikleri alaşım elementlerinin türüne göre sınıflandırdıkları gibi, ısıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşımlar olarak da sınıflandırılabilir. Aynı zamanda imalat yöntemine bağlı olarak dövme ve döküm alaşımları olarak iki gruba ayrılırlar. Dövme Al alaşımları, ana alaşım elementlerine göre dört haneli bir numaralandırma sistemi ile sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (ANSI) standardı H35.1 kapsamındadır. Gösterim kodları, alaşımda yer alan ana alaşım elementleri ve bazı durumlarda saflık dereceleri hakkında bilgi verir. Dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı, kullanılan temel alaşım elementini işaret etmektedir. İkinci rakam bu özel kaliteyi üretmek için kullanılan alüminyumun saflığını gösterir. İkinci derecedeki sıfır, Al' nin esas olarak ticari saflıkta olduğunu gösterirken, 1'den 9'a kadar olan ikinci rakamlar bir veya daha fazla bireysel empürite elemanın özel kontrolünü gösterir. Dört haneli gösterim kodundan sonra konan bir tire sonrasında, harf ve sayılarla ifade edilen temper gösterimleri yer alır. Örneğin, Al 7075-T73 gösteriminde, ilk rakam olan 7 temel alaşım elementini (Zn), ikinci rakam olan 0, Al'in ticari saflıkta olduğunu belirtmektedir. Tire sonrasında belirtilen T73, uygulanan ısıl işlemi, temperlemeyi ifade etmektedir. Böylece alaşımın maruz kaldığı mekanik veya ısıl işlemler hakkında bilgi edinilmesine yardımcı olur.

1.2.1. Alüminyum dövme alaşımları

Al alaşımları nispeten düşük sıcaklıklarda kolayca dövülebilmektedir. Dövülme işlemiyle iyi yüzey kalitesi, boyut kontrolü ve yüksek mukavemet elde edilir. Dövme, aynı zamanda karmaşık şekillerin üretimine de izin verir, ancak küçük parçaların büyük çapta işlenmesi için döküme göre daha pahalı bir işlemdir. Bu nedenle dövme işlemi daha büyük parçalar için daha sık kullanılır ve uçakların yapısal elemanlarında kullanımı yaygındır [3].

Amerikan alüminyum birliğine göre, Al dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma ve Al dövme alaşımlarının kimyasal bileşimi Tablo 1.2’de verilmiştir.

Tablo 1.2. Dövme Al alaşımlarının sınıflandırılması [3].

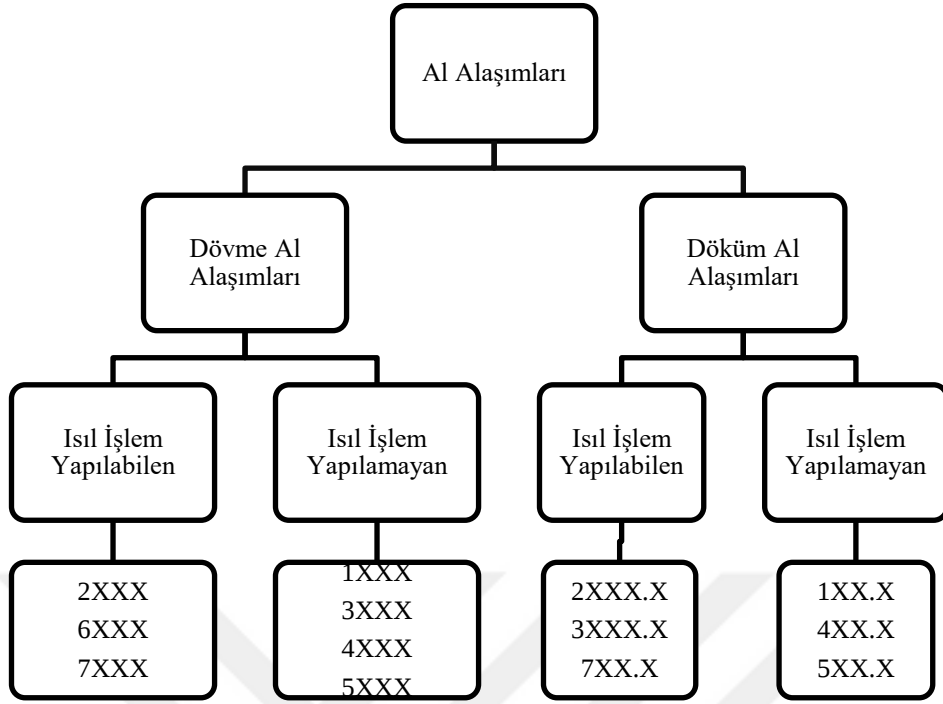
Alaşım	Ana Alaşım Elementi	Kullanım Alanları
1xxx	Saf Alüminyum	Elektrik ve kimya endüstrileri, yiyecek endüstrisi uygulamaları, reflektörler
2xxx	Bakır	Vidalar, bağlantı parçaları, dişliler, saat parçaları, kompresör dişlileri, yapı ve havacılık endüstrisi uygulamaları
3xxx	Manganez	Mimari uygulamalar, pişirme ve gıda işleme aletleri, kimyasal işlem uygulamaları ve çeşitli ürünler
4xxx	Silisyum	Kaynak telleri, dolgu metali, lehim sacı
5xxx	Magnezyum	Otomotiv ve gemi endüstrisi, mimari uygulamaları, tabela, dış mekan ekranları, giysi fermuarları, perçinler ve diğer donanımlar
6xxx	Magnezyum-Silisyum	Mimari ve yapı endüstrisi uygulamaları ve otomotiv endüstrisi, T-Slot ekstrüzyonu, denizcilik endüstrisi uygulamaları
7xxx	Çinko	Havacılık ve uzay endüstrisi uygulamaları, spor ekipmanları, dijital saatler ve yüksek mukavemet beklenen alanlar
8xxx	Kalay ve Lityum	Rulman ve bağlantı çubuğu, yüksek sıcaklığa dayanıklı havacılık komponentleri, uçak gövdesi
9xxx		Gelecekte kullanımı düşünülmektedir.

1.2.2. Alüminyum dökme alaşımları

Al döküm alaşımları, kalıbı ergimiş metalle doldurmak için yeterli akışkanlığı sağlamak amacıyla, çoğunlukla silisyum olan, yeterli miktarda ötektik şekillendirme elemanı içerir. Güçlendirme amacıyla eklenen alaşım elementleri, dövme alaşımlarında kullanılanlara benzerdir. Al dökme alaşımlarının sınıflandırması ve kimyasal bileşimi Tablo 1.3’ de verilmiştir. Dolayısıyla, hem ısıtım işlem görebilen hem de ısıtım işlem görmeyen alaşımlar dökülebilir [4]. Döküm ve dövme Al alaşımlarının ısıtım işlem uygulanabilen ve uygulanamayan serileri Şekil 1.1’de gösterilmektedir [5].

Tablo 1.3. Döküm Al alaşımlarının sınıflandırılması [3].

Alaşım	Ana Alaşım Elementi	Kullanım Alanları
1xx.x	Saf alüminyum, %99.00	Rotor üretimi
2xx.x	Bakır	Havacılık ve uzay endüstrisi uygulamaları
3xx.x	Bakır veya Manganez eklenmiş Silisyum	Üretilen tüm şekilli dökümlerin yaklaşık %90’ı
4xx.x	Silisyum	Kaynaklı yapılar, levha üretimi, otomobil komponentleri
5xx.x	Magnezyum	Gemi endüstrisi uygulamaları
6xx.x	Kullanılmayan Seriler	-
7xx.x	Çinko	Uçak komponentleri
8xx.x	Kalay	Havacılık ve uzay endüstrisi uygulamaları
9xx.x	Diğer elementler	-



Şekil 1.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [5].

1.3. Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri Ve Genel Kullanım Alanları

Al ve alaşımları düşük yoğunluk, yüksek iletkenlik, kolay şekillendirilme, yüksek korozyon direnci, geri dönüştürülebilme, yansıma özelliği, yüksek mukavemet, yüksek ısı iletkenliği ve esneklik özellikleri gibi birçok özelliğe sahiptir. Sahip olduğu bu üstün özellikler, onların, elektrik elektronik, uçak ve uzay, otomotiv, mutfak eşyaları, gıda sektörü gibi birçok alanda yaygın olarak kullanımına imkân sağlamaktadır. Al alaşımları içeriğinde bulunan ana alaşım elementlerine göre isimlendirilmektedir.

1xxx serisi, süper saflıkta Al (%99,99) ve %1'e kadar safsızlık veya küçük ilaveler içeren seridir. Mükemmel iletkenlik, kolay şekillendirilebilme, kaynaklanabilirlik ve korozyon direncine sahiptir. 1000 serisi dövme metal veya 100.0 serisi dökme metal olarak adlandırılan ticari olarak saf Al, Al telleri, kimyasal ekipman, demiryolu tankeri, reflektörler için kaplama, elektrik teli, ısı eşanjörü borusu, kapasitör folyo üretmek için kullanılmaktadır.

2xxx serisi, ana alaşım elementi bakır olan seridir. Bu serinin üyelerine ısıl işlem

uygulanabilir. Yüksek mukavemet, iyi şekillendirilebilme özelliklerine sahip olmakla birlikte korozyon dirençleri düşüktür. Bu alaşımlar geniş sıcaklık alanları içerisinde yüksek mukavemete sahiptir. Sıklıkla uçak ve karayolu taşıtı yapımında kullanılırlar.

3xxx serisi, ana alaşım elementi mangan olan seridir. Bu serinin üyeleri ısıtılma işlemi tabii tutulamaz. Bu alaşımlar iyi şekillendirilebilme ve korozyon direncine sahiptirler. Ayrıca, yüksek sıcaklıkta kullanım için uygunlukla birlikte mukavemetlidir. Kullanım alanları olan mobilya, depolama tankları, mutfak gereçleri, pencere çerçeveleri, otoyol işaretleri, çatı kaplama alaşımları için en iyi dayanım ve korozyon direnci kombinasyonunu sağlar.

4xxx serisi, ana alaşım elementi silisyum olan seridir. Yalnızca bu seri hem ısıtılma işlemi tabii tutulabilen hem de ısıtılma işlemi tabii tutulamayan alaşımlar içermektedir. İçerdiği ana alaşım elementi olan silisyumun etkisiyle akışkanlığını artırılabilir. Düşük erime noktası ve düşük termal genleşme katsayısı özellikleri nedeniyle lehimleme ve kaynaklama için dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Aynı zamanda mimaride ve motor parçalarında kullanımı yaygındır.

5xxx serisi, ana alaşım elementi magnezyum olan seridir. Isıtılma işlemi tabii tutulamaz, ısıtılma işlemi tabii tutulamayan alaşımlar içerisinde en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Nispeten yüksek mukavemetlerinden dolayı, yüksek magnezyum seviyelerine sahip Al-Mg alaşımları, hızla büyüyen otomotiv plakasının alanı için adaydır. Aynı zamanda kaynaklı uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Taşımada yapısal plaka damperli kamyon gövdeleri, benzin, süt ve tahıl taşımak için büyük tanklar ve özellikle kriyojenik depolamanın bulunduğu yerlerde basınçlı kaplar için kullanılır. Yüksek korozyon direnci, onları küçük teknelerin gövdeleri ve okyanus gemilerinin süper yapıları için uygun kılmaktadır. Bu seri, hafif askeri araçlarda balistik zırh plakası için de yaygın olarak kullanılmaktadır.

6xxx serisi, ana alaşım elementi magnezyum ve silisyum olan seridir. Bu serinin üyelerine ısıtılma işlemi uygulanabilir. Bu seri iyi kaynaklanabilirlik, yüksek korozyon direnci ve gerilme-korozyon çatlağına karşı bağışıklık özelliği gibi ek avantajlara sahiptir, orta kuvvette yapısal alaşımlar olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu alaşımlar kolayca ekstrüzyona sokulabilir, şekillendirilebilir. Karayolu taşıtları, köprüler, kaynaklı konstrüksiyon kullanıldıkları alanlardan bazılarıdır.

7xxx serisi, ana alaşım elementi çinko olan seridir. Bu serinin üyeleri ısıtılma işlemi tabii

tutulabilir. Al alaşımları içerisinde en yüksek mukavemet değerine sahip olan seridir. Yüksek ergime derecesine sahiptir. Bununla birlikte stres korozyon çatlağına gösterdiği yüksek duyarlılık en büyük dezavantajdır. Havacılık, uzay ve spor malzemeleri gibi yüksek performans beklenen uygulamalarda kullanımları yaygındır.

8xxx serisi, ana alaşım elementleri kalay ve lityumdur. Bu seri birkaç seyreltik alaşım içerir. İyi derin çekme nitelikleri nedeniyle şişe kapakları için kullanılabilir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan motorlu taşıtlarda ve kamyonlarda, özellikle de dizel motorların kullanıldığı Al-Sn sistemine dayanan alaşımların taşınmasında önemli bir rol oynamaktadır [6-8].

1.4. Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti

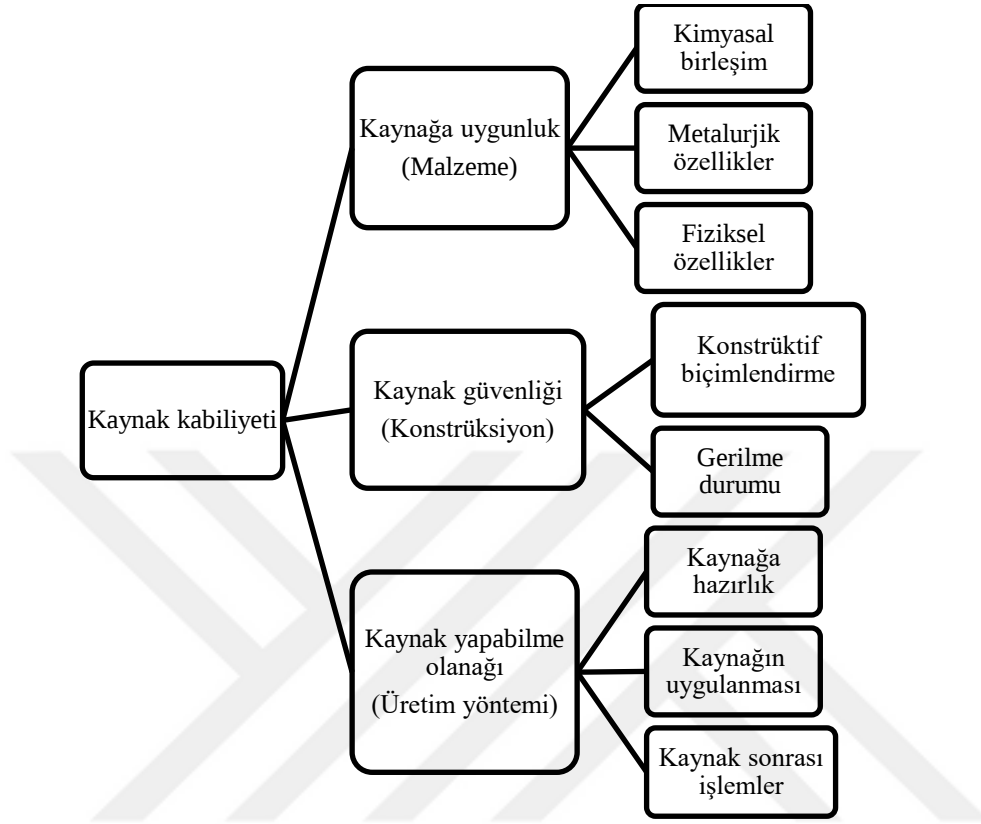
Al ve alaşımlarının kaynak kabiliyetinden bahsetmeden önce, açıklanması gereken birkaç tanım bulunmaktadır. Kaynağın tanımı ve kaynak kabiliyeti bu tanımlardan bazılarıdır. Kaynaklama, iki bileşenin birbirleriyle temas halinde olan yüzeylerin birleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu işlem, iki parçanın birlikte eritilmesi; füzyon/ergitme kaynağı olarak ya da iki parçanın, ara yüzey boyunca metal bir bağ oluşturmak için ısı uygulaması ile basınç altında birleştirilmesiyle de gerçekleştirilebilir. Bu ikinci durum katı faz birleştirme olarak bilinir ve birleştirme tekniklerinin en eskilerinden biridir. Daha modern katı faz tekniklerine sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) örnek olarak verilebilmektedir [9]. Kaynak kabiliyeti ise, kantitatif olarak ifade edilebilen bir özellik olmayıp, karmaşık bir anlam taşımaktadır. Kaynak kabiliyeti, bir metalik malzemenin, bir kaynak yöntemi ile bir dereceye kadar kaynak yapılabilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bir malzemenin yüksek kaynak kabiliyetine sahip olması; kaynak şartları geniş bir aralıkta değişirken hiçbir önleme gerek kalmadan, istenen kaynak kalitesinin elde edilebilmesi anlamına gelmektedir. Fakat kaynak kabiliyeti, yalnızca malzemeye bağlı bir özellik değildir. Aynı zamanda kaynak yöntemine ve kaynaklı konstrüksiyonuna da bağlıdır. Şekil 1.2’de kaynak kabiliyetinin etkilendiği bu unsurlar gösterilmektedir [10].



Şekil 1.2. Kaynak kabiliyetine etki eden faktörler [10].

Malzemelerin kaynaklanabilme kabiliyetleri, malzemenin kaynağa uygunluğu, kaynağın güvenliği ve kaynak yöntemi olarak üç farklı aşamada incelenebilmektedir. Kaynağa uygunluk incelenirken, malzemenin kimyasal bileşimi, metalurjik özellikleri ve fiziksel özellikleri, dikkate alınmaktadır. Kimyasal bileşim açısından dikkate alınan faktörler arasında, sertleşme eğilimi, yaşlanma bulunmaktadır. Ayrıca kimyasal bileşimini, gevrek kırılmaya sebebiyet verip vermeyeceği ve sıcak çatlama meydana getirip getirmeyeceği incelenmektedir. Dikkat edilen metalurjik özellikler ise; segregasyon, kalıntılar, tane boyutu, iç yapı ve anizotropi gibi özelliklerdir. Malzemenin kaynak edilmesini etkileyen fiziksel özelliklerinden bazıları; genleşme özelliği, ısı iletim katsayısı, ergime derecesi, mukavemet ve yoğunluktur. Malzemelerin kaynak kabiliyetlerinin değerlendirilmesinde diğer aşama ise, kaynak yönteminin uygunluğudur. Kaynak işleminin uygunluğu incelenirken, parça kalınlığı, çentik etkisi, rijitlik farklılıkları, gerilme durumu, gerilmelerin tür ve şiddeti, gerilmelerin eksen sayısı ve sıcaklık dikkate alınmaktadır. Kaynağın güvenliği olarak isimlendirilen faktör ise, kaynağa hazırlık, kaynak işleminin uygulanması ve kaynak sonrasında gerçekleşebilecek durumlarla alakalıdır. Kaynak işleminden önce ilave malzemenin türü, birleştirmenin türü, ağız biçimi ve varsa ön tavlama işlemi dikkate alınmalıdır. Kaynak işlemi sırasında ısının uygulanması ve ısının kontrolü kaynak kabiliyetini etkilemektedir. Kaynak sonrasında ise uygulanan ısı işlemler, taşlama ve temizleme gibi yüzey işlemleri kaynağın kalitesinde önemli bir role sahiptir [11]. Kaynak kabiliyetine etki eden tüm faktörler, kaynak üzerinde büyük etkiye sahip olsa da, bu bölümde Al ve alaşımlarının kaynağa uygunluğu, malzeme özellikleri

açısından değerlendirilecektir. Şekil 1.3'te kaynak kabiliyetini etkileyen faktörler gösterilmektedir [9-12].



Şekil 1.3. Kaynak kabiliyetine etki eden faktörlerin ayrıntılı gösterimi [9].

Al pek çok metal ile sıvı halde kolayca karışabilmektedir. Katı halde ise metallerin Al içindeki katı çözünürlükleri düşük seviyelerdedir. Birçok alaşımda metaller arası bileşikler oluşur ve bu bileşikler, alaşımın özelliklerini önemli ölçüde etkilerler. Al içerisinde hiçbir element katı halde tam olarak çözünemez. Metaller arası bileşikler, daha çok yüksek alaşım katılımlarında Al içerisinde çözünemediklerinden oluşurlar; çok sert ve gevrek olduklarından mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilerler, mukavemet yükselir fakat süneklik azalır. Genellikle alaşım elementlerinin toplam miktarı %15 seviyesini geçmez.

Al'a katılan alaşım elementleri mekanik özellikleri geliştirir. Özellikle, mukavemeti artırır, sıcak çatlama ve yırtılma eğilimini azaltır. Al'a katılan başlıca alaşım elementleri Mg, Mn, Si, Cu, Zn, Ni, Ti'dir. Al'a katılan alaşım elementlerinden genellikle malzemenin şekil değiştirme kabiliyetini ve korozyon dayanımını etkilemeden mukavemet özelliklerini geliştirmesi beklenmektedir. Al'a çok az miktarda katılan Mn,

Mg, Si, Cu ve Zn Al'in YMK kristal kafes yapısında yer alarak, katı eriyik oluşturlar ve kristal kafesin kaymaya karşı direncini yükseltirler. Böylelikle şekil değiştirme kabiliyeti fazla etkilenmeden akma mukavemetini yükseltilmiş olmaktadır [8,9]. Alaşım elementleri Al içerisinde üç farklı şekilde bulunabilirler:

1. Alüminyum içerisinde katı halde çözülebilirler.
2. Katı halde alüminyum içerisinde çözülme ya da sınırlı miktarda çözülüp, mekanik karışım oluşturabilirler.
3. Alüminyum ile veya kendi aralarında metaller arası bileşik veya kimyasal bileşik oluşturabilirler.

Alaşım elementlerinin miktarları, malzeme üzerinde büyük etkiye sahiptir. Örneğin, %12 seviyesine kadar ilave edilen Cu dayanımı artırırken, daha fazlası ise gevrekliğe neden olmaktadır. Cu alaşım elementi genellikle şekillendirilebilmeyi artırırken, sıcak çatlama eğilimini azaltıcı etkiye sahiptir.

Zn alaşım elementi ise döküm kabiliyetine negatif etki etmektedir. Yüksek Zn'lu alaşımlarda sıcak çatlama görülmektedir. Bununla birlikte % 10 Zn' den yüksek alaşımlar gerilim korozyon çatlamasına duyarlıdır. Fakat Zn alaşımının diğer alaşım elementleri ile beraber kullanımı olumlu etkiler göstermektedir. Bu etkilerden biri dayanım artışıdır. Dayanımı arttırmakta ve mekanik özellikleri iyileştirebilmektedir.

Mg alaşım elementi Al'in kaynak kabiliyetini, şekillendirilebilmeyi korozyon dayanımını ve aşınma direncini arttırmaktadır. %6'dan fazla Mg içeren alaşımlarda çökeltme sertleşmesi gerçekleşmektedir. Al-Mg alaşımları ısıtıldıklarında kolay oksitlenmekte ve yüzeylerinde gevrek bir oksit tabakası oluşmaktadır. Mg alaşım elementinin korozyon dayanımına sağladığı bu pozitif etki, 5xxx serilerinden anlaşılabilmektedir. Aynı zamanda Mg oranının artışı, alaşımın sertlik ve mukavemetini arttırmaktadır. Yüksek mukavemet ve kaynak kabiliyeti istenen alaşımlarda Mg oranı %3,5 üzerinde olmalıdır.

Mn alaşım elementi, metaller arası bileşiklerin özelliklerini değiştirebilmektedir. Sertlik ve mukavemet değerlerine pozitif etki de bulunan Mn, döküm kabiliyetini arttırmak için Fe alaşım elementi ile birlikte kullanılmaktadır.

Fe, Al cevherlerinde katışkı elementi olarak bulunmaktadır. Fe mukavemet ve sertlik değerlerini arttırmaktadır. Ayrıca Si gibi sıcak çatlama eğilimini azaltmaktadır.

Si alaşım elementi akışkanlığa pozitif etki sunmaktadır. Fakat %13 den fazla Si içeren alaşımların işlenmesi oldukça zordur.

Özet olarak, alaşım elementlerinin her birinin katkısı ve katkı miktarı kayda değer değişikliklere sebep olmaktadır. Olumlu ve olumsuz etkilerin bilinmesi ve istenen özelliklere göre alaşım elementlerinin kullanılması, Al alaşımlarının uygulamaları için büyük önem taşımaktadır. Bazı alaşım elementlerinin etkileri Tablo 1.4’de gösterilmektedir [8,13].

şekil 1. 4. Alaşım elementlerinin etkileri [8].

Nitelikler	Cu	Si	Mg	Zn	Ni	Ti	Mn	Fe	Cr
Kopma Mukavemeti	++	+	+	++	+	+			-
Elastik Sınır	++	+	-	+	-				
Sertlik	++		-		+		+	+	
Isıya Dayanıklılık	++		++		+			+	
Kaynak Kabiliyeti	-	++	+	-	-	+	+		+
Talaş Kaldırma	++	-	+	+	+	++	+	++	+
Elastik Modül	+	++	-	+	+		+	-	
Döküm Kabiliyeti	+	++	-	+		+	-	-	
Süneklik	-	--	+			+		--	
Korozyona Dayanım	-	+	++	+			-	--	++
Anodizasyona Elverişsizlik	--	+	++	+			--		

Al ve alaşımlarının kaynak edilmesinde ortaya çıkan problemlerden biri oksit tabakasıdır. Al ve alaşımlarının yüzeyi, 2072 °C’de ergiyen bir oksit tabakası ile kaplanmaktadır. Bu oksit tabakası alümina (Al₂O₃) olarak isimlendirilmektedir. Yüzeyi sıkı şekilde saran bu oksit tabakası, oksitlenmenin iç kısımlara doğru ilerlemesini önlemektedir. İyi kaynak kalitesi için işlem öncesinde bu tabakanın dağıtılması gerekmektedir. Çünkü oksit tabakası kaynak sıcaklığında ergimemekte ve elektrotun ergimesi ile kaynak dişişine geçmektedir. Bağlantının sürekliliği sağlayan damlacıkların oluşmasına engel olmaktadır. Ayrıca oksit tabakası kaynak banyosu içerisinde kalıp katılaşarak, bağlantının mukavemetini ve korozyon direncini düşürmektedir. Bu durumun oluşmasını önlemek için özel yöntemler veya dekapanlar kullanılmaktadır. Dekapanlar kaynak sıcaklığından

daha düşük bir sıcaklık derecesinde ergir ve alümina ile bileşik oluşturur. Bu sayede camsı bir cüruf oluşturarak yüzeyi örtmektedir. Oksit tabakası ortadan kalktığı için iyi kaynak kalitesi sağlanabilmektedir. Fakat, işlem sonrasında dekapanların temizliği büyük önem taşımaktadır. Çünkü dekapan kalıntıları korozif etkide bulunmakta, kaynak bağlantısının korozyon dayanımını düşürmektedir. Bu nedenle işlem sonrasında dikkatli bir temizlik gerektirmektedir. Bu temizlik işlemi hem külfetli olmakta hem de maliyeti arttırmaktadır.

Al alaşımlarının kaynağında karşılaşılan bir diğer problem ise Al'in yüksek ısı iletkenliğinden kaynaklanmaktadır. Al'in bu özelliği, kaynak bölgesinde yüksek sıcaklığın yoğunlaşmasını engellemekte, ısının parçaya dağılmasına sebep olmaktadır. Bu durum birçok hallerde ön tavı gerekli kılmaktadır. Ayrıca, Al yüksek ısıl genleşme katsayısına sahiptir. Bu nedenle, işlem sırasında, kaynak bölgesinde oluşan ısınma ve soğuma Al içerisinde iç gerilmelere ve büyük çaplı çarpılmalara neden olabilmektedir. Al ve alaşımlarının kaynağında karşılaşılabilecek başka bir problem ise, bazı alaşımların kaynağı sırasında uygulanan ısıl çevrim ile alakalıdır. Bu ısıl çevrim, katı çözelti içerisinde bulunan alaşım elementinin, Al içerisinde çökmesine yol açmaktadır. Oluşan çökelti, alaşımın kimyasal ve mekanik özelliklerini etkilemekte, ana metalden farklılaşmasına sebep olmaktadır.

Al, çeliğe göre düşük ergime derecesine sahiptir ve çeliğin aksine, ergiyen metalin tav rengi göstermemesi kaynak işlemini güçleştirmektedir. Bu şekilde, kaynak bölgesinin kaynak sıcaklığına ulaşp, ulaşmadığını anlamak güçtür. Al ve alaşımlarının kaynağı, çelikler ile karşılaştırıldığında, çeşitli zorluklar göstermektedir. Fakat gerekli önlemler alındığında ve uygun bir teknik kullanıldığında, istenen kaynak bağlantısı elde edilebilmektedir [8,14-16].

2. EKLEMELİ İMALAT

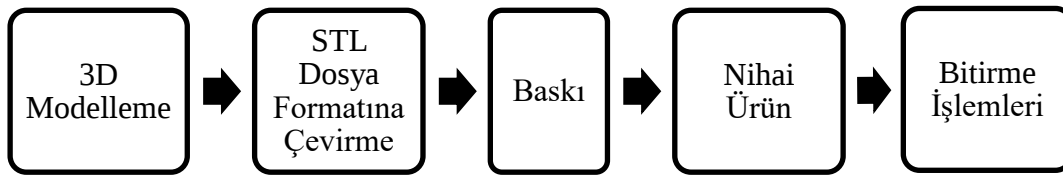
Eİ teknolojisi, tasarım esnekliği, yüksek kalitede malzeme üretimi, malzeme tasarrufu, kalıp gerektirmeme gibi avantajlara sahip, yenilikçi bir teknolojidir. Geleneksel yöntemlerde karşılaşılan üretim ve şekillendirme ile ilgili kısıtlamalar Eİ teknolojisi için geçersizdir. Örneğin, kalıp dövme gibi şekillendirme süreçleri, özel aletler gerektirir ve bu nedenle, üretim için gereken esneklikten yoksundur. Eİ kalıp gerektirmeden tasarım esnekliği sunmaktadır. Bu avantaj büyük kalıpların kullanıldığı gemi endüstrisi gibi birçok sektör için umut vericidir. Bu teknolojinin çeşitli endüstrilerde karşılaşılan tasarım ve üretim süresiyle alakalı problemlerin çözümüne alternatif bir yol olacağı düşünülmektedir.

Malzemeleri keserek, eksilterek üretim yapan geleneksel yöntemden farklı olarak, Eİ, malzemeleri birbirine ekleyerek parça oluşturur. Eİ parça üretmeye sıfırdan başlar. İstenilen parça ilavelerle üretilir, yani geleneksel üretim yöntemleri gibi eksiltici değildir. Ayrıca Eİ, diğer imalat yöntemleriyle kıyaslandığında, minimum atık üretme özelliğine sahiptir. Bu sayede zamandan ve malzemedan tasarruf sağlamaktadır. Son dönemlerde, Eİ sahip olduğu bu avantajları sayesinde, dikkat çeken bir teknoloji haline gelmiştir. Tedarik zincirlerini kısaltmak, nakliye maliyetlerini ortadan kaldırmak ve teslim sürelerini azaltmak isteyen üreticiler, bu yöntemden yararlanmak istemektedir. Günümüz küresel rekabet ortamında bu teknolojinin getirdiği faydalar yadsınamaz. Birçok öncü firma Eİ yöntemini, organizasyonu tamamen yeni bir yöne götürebilecek, yeni iş ve iş modellerinin başlatılmasına yardımcı olabilecek bir olasılıklar dünyası olarak betimlemektedir. Son birkaç yılda bu Eİ makinelerinin artan satışı, onun imalat endüstrisinde yeni bir akım haline geldiğini ispatlamaktadır. Yurt içinde ve yurt dışında birçok öncü firma, bu teknolojinin gelişimi ve benimsenmesi için yatırımlar yapmakta, çeşitli çalışmalar yürütmektedir.

Eİ'nin kullanıldığı alanlardaki başarısı, gelecek için fayda vaat etmektedir. Bu teknolojiyle üretilen parçalar ve yürütülen çalışmalar, gelecekte kullanımıyla alakalı yalnızca küçük ipuçlarıdır. Bu teknolojinin yakın gelecekte vazgeçilmez bir imalat yöntemi haline geleceği ön görülmektedir.

2.1. Eklemeli İmalat Üretim Süreci

Eİ tersine mühendislik uygulamalarından biri olduğu için, birbiri üzerine eklenerek parça oluşumunu sağlamaktadır. Parça üretim süreci bazı işlem adımlarını içermektedir. Bu işlem adımları, tıpkı bir tuğla duvarın inşa edilmesi gibidir. Öncelikle inşa edilmesi planlanan duvarın çizimi gerçekleştirilir ardından tuğlalar birbiri üzerine eklenerek duvar örülür. Eİ yöntemindeki işlem adımları da benzer şekildedir. Üretilmesi planlanan parçanın modellenmesi ile başlar, tıpkı tuğla duvar örneğinde olduğu gibi, tabakalar birbiri üzerine eklenerek parça oluşturulur. Bu sürecin ilk adımı olan modelleme bilgisayar destekli çizim programlarında gerçekleştirilmektedir. Modelleme işleminden sonra ikinci aşamaya geçilmektedir. Elde edilen model baskı işleminin gerçekleştirilmesi için STL formatına dönüştürülür ve katmanlara dilimlenir. STL formatına dönüştürmek bu süreç için kritik bir adımdır. Yazıcının modeli tanımlayabilmesi için bu formata ihtiyaç duyulmaktadır. STL sayesinde model, üçgenlerle tanımlanır ve yazıcının anlayacağı bir dile dönüştürülür. STL, yazıcılar için evrensel bir dil olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle parça üretimi için büyük önem taşımaktadır [17]. Bu aşamadan tamamlandıktan sonra, son aşamaya geçilir. Son aşama parçanın basımıdır. Baskı işlemi sonrasında, isteğe bağlı olarak bitirme işlemleri yapılmaktadır. Bitirme işlemleri üretilen parçanın yüzeyinin iyileştirilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. İstenilen özelliklerde parçanın üretimi için her basamak büyük bir önem taşımaktadır. Bu basamaklar Şekil 2.1’de gösterilmektedir.

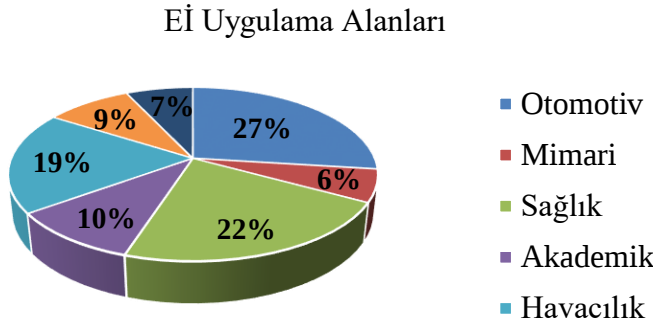


Şekil 2.1. Eİ işlem adımları.

2.2. Eklemeli İmalat Kullanım Alanları

Eİ geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında birçok avantaja sahiptir. Karmaşık parçalar için tasarım özgürlüğü, kişiye özel üretim imkânı, kalıp ve geleneksel üretim yöntemlerinde kullanılan takımlar gibi aletlere ihtiyaç duymaması bu avantajlardan

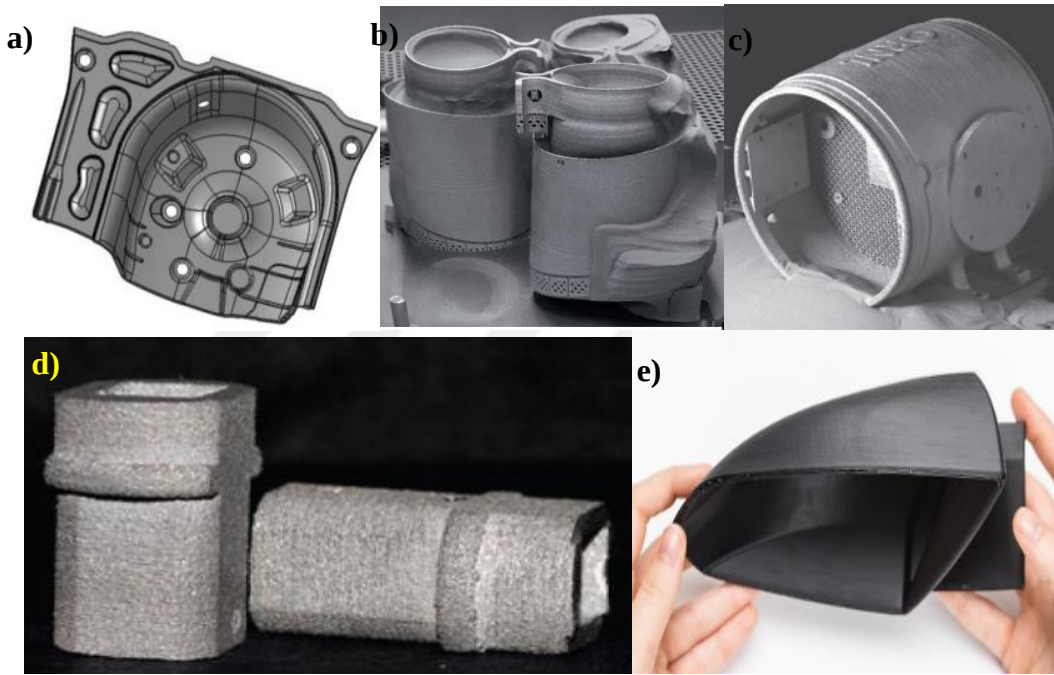
sadece bazılarıdır. Ayrıca Eİ çevre dostu bir teknolojidir. Eİ yöntemlerinde yalnızca, parçayı oluşturmak için gereken malzeme miktarı kullanılmaktadır. Bu sayede atık miktarını en az seviyede tutmaktadır. Bununla birlikte, çoğu Eİ yönteminde, geri dönüştürülebilen veya birden fazla yapı için yeniden kullanılabilen malzemeler kullanılmaktadır. Atık tasarrufu büyük bir avantajdır. Çevresel nedenlerin yanı sıra, atık miktarının azaltılması, gelişmiş endüstrilerde daha fazla iş imkânı yaratmakta hem mali durum üzerinde hem de sosyal açıdan olumlu etkiler sağlamaktadır. Ayrıca atıkların azaltılması enerji tasarrufu sağlamaktadır. Yeni malzemeler yaratmak yerine malzemeleri geri döndürmek için daha az enerji kullanılır. Sahip olduğu bu avantajlar sayesinde Eİ teknolojisi günümüzde popüler bir imalat yöntemi haline gelmiştir. Sağlık sektörü, havacılık ve uzay endüstrisi, otomotiv endüstrisi ve mimari başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulama alanları ve kullanım yüzdeleri Şekil 2.2’de gösterilmektedir [18,19].



Şekil 2.2. Eİ teknolojisinin uygulama alanlarından bazıları [19].

Düşük yoğunluklu parça üretimi hem parça üretim maliyeti hem de yakıt tasarrufu için büyük önem taşımaktadır. Ayrıca bu sayede enerji tasarrufu ve daha az malzeme israfı sağlanmaktadır. Bu nedenle Eİ uzay, havacılık ve otomotiv endüstrisi uygulamaları için tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir [20,21]. Özellikle yoğunluğun azaltılması, kuvvet-ağırlık oranının artırılması bu sektörler için önemlidir. Ayrıca Eİ’nin sağladığı tasarım esnekliği özellikle uçak ve otomotiv bileşenleri için büyük bir avantajdır. Bu nedenle, bu yöntem günümüzde birçok firma tarafından benimsenmekte, çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Şekil 2.3’de Eİ yönteminin otomotiv endüstrisinde uygulamalarından bazıları gösterilmektedir. Şekil 2.3 a)’da gösterilen gövde paneli Eİ yöntemiyle üretilmiştir [22]. Şekil 2.3 b)’de gösterilen egzoz borusu toz yataklı füzyon

işlemi ile üretilmiştir [23]. Bu çalışmada Eİ'nin en büyük avantajlarından biri olan tasarım esnekliğinden yararlanılmıştır. Özellikle egzoz borusu gibi bazı araç aksamaları, içi boş geometriye sahiptir. Eİ bu aksamalar gibi, içi boş veya karmaşık geometriye sahip otomotiv parçaları için ideal bir üretim yöntemi haline gelmiştir. Eİ'nin otomotiv sektöründeki uygulamalarından biri Şekil 2.3 c)'de gösterilmektedir [24]. Küçük boyutlu ve karmaşık bir yapıya sahip olan hidrolik manifold, ONR sponsorluğundaki bir proje ile Oakridge Ulusal Laboratuvarı'nda üretilmiştir. Başka bir örnek, Şekil 2.3 d)'de gösterilen bir otomatik motor için bir turboşarjdır [25]. Son bir örnek olarak, yan ayna verilebilir. Şekil 2.3 e)'de gösterilen yan ayna Eİ yöntemlerinden FDM yöntemiyle üretilmiştir [26].



Şekil 2.3. Eİ ile üretilen otomotiv bileşenleri; a) Gövde paneli, b) Egzoz borusu, c) Hidrolik manifold, d) Turbo şarj cihazı, e) Motosiklet yan aynası [22-26].

Havacılık bileşenlerinin imalatı için Eİ teknolojisinin kullanımına dair birçok örnek bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Alanında önde gelen birçok firma bu teknolojinin havacılık sektöründe kullanımını desteklemekte ve çalışmalarını sürdürmektedir. Bu firmalardan biri de Airbus'tur. Airbus, Şekil 2.4 a)'da gösterilen, uçağın menteşe braket bileşenini SLM yöntemi ile üretmiştir [27]. Bu sayede toplam kütle tasarrufu %65'e ulaşmıştır. Benzer çalışmalar yürüten başka firma ise, Rolls-Royce Trent'tir. Şekil 2.4 b)'de gösterildiği gibi, EBM yöntemi ile üretilen havacılık sahasındaki en büyük motor parçasını imal etmiştir [28]. Bu yöntem sayesinde

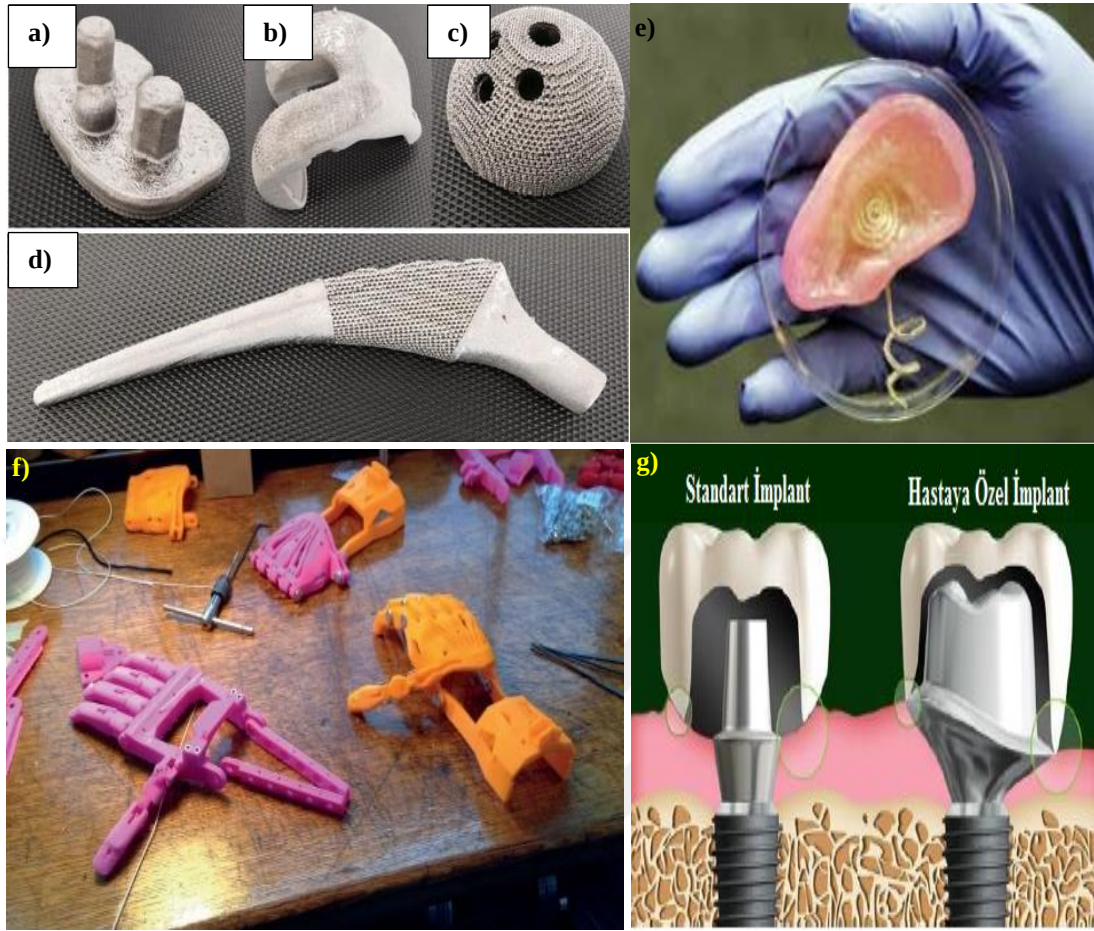
parça üretim hızını arttırmıştır ve üretim süresi %30 oranında azalmıştır. United Launch Alliance (ULA) firması tarafından üretilen oksijen flanşı Şekil 2.4 c)'de gösterilmiştir. Eİ'nin en büyük avantajlarından biri olan tasarım esnekliği bu sektör için büyük önem taşımaktadır [29]. Geleneksel yöntemler ile üretilmesi zor hatta imkansız olan bileşenler bu yöntem ile üretilmektedir. Bunlardan biri Şekil 2.4 d)'de gösterilen menteşedir [30]. Birçok firma yeni teknolojik gelişmelere uyum sağlamakta, küresel rekabet ortamında yeni teknolojileri bir fırsat olarak kullanmaktadır. NASA da bu kurumlardan biridir. Hava aracı bileşenlerinin üretiminde Eİ teknolojisinin havacılık endüstrisinde kullanımına ilişkin birçok çalışma vardır. Şekil 2.4e)'de gösterilen gaz türbini Eİ teknolojisiyle üretilmiştir [31]. Airbus firmasının bir diğer çalışmasında Şekil 2.4 f)'de gösterilen braket konektörünü üretmiştir. SLM yöntemiyle üretilen Ti parça düşük yoğunlukta üretilmiş bu sayede yakıt tasarrufu sağlamıştır [32]. Daha önce de belirtildiği gibi, leap motor üretiminde Eİ yönteminin kullanımı Şekil 2.4 g)'de gösterildiği gibi yaygınlaşmaktadır [33]. Bir başka çalışmada, A Bleed Air Leak Detect (BALD), braketi diye adlandırılan motorun sıcak tarafında kullanılan braketler Eİ ile üretilmiştir. EBM tekniğiyle üretilen braketler Şekil 2.4 h)'da gösterilmektedir [34]. Geleneksel yöntemler ile tasarımı zor olan uçak bileşenlerinden biri braketlerdir. Eİ sayesinde tasarım esnekliğine sahip braketler üretilabilir, aynı zamanda bu parçalar Şekil 2.4 i)'de [35] gösterildiği gibi daha sert ve daha hafiftir.



Şekil 2.4. Eİ teknolojisi ile üretilen havacılık bileşenleri; a) Airbus tarafından üretilen menteşe tutucusu, b) Rolls Royce Trent XWB motoru, c) Sıvı oksijen flanşı, d) Havacılık menteşe parçası, e) Gaz türbini motoru, f) Braket konektörü, g) Leap motoru, h) Karmaşık şekilli braket [27-34].

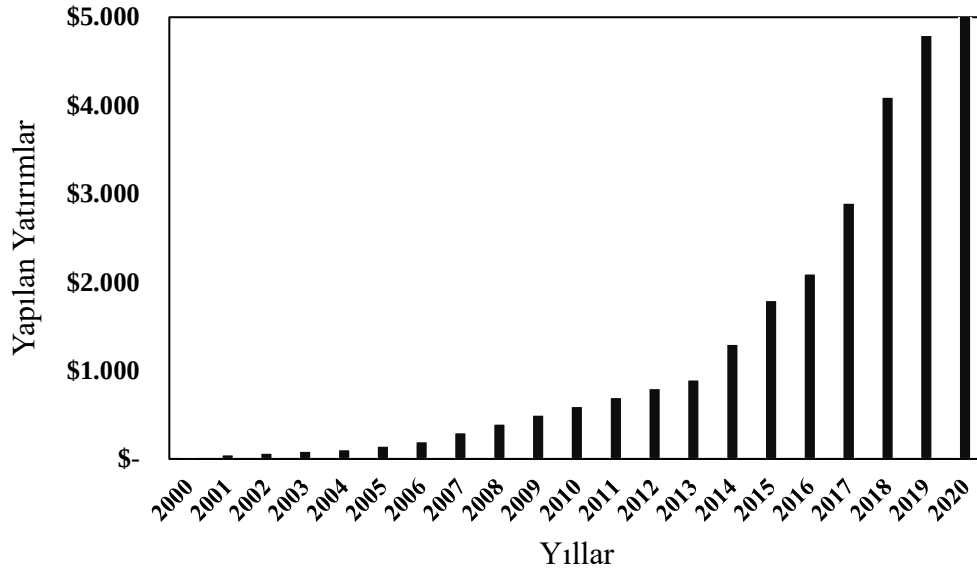
Eİ yönteminin yaygın olarak kullanıldığı alanlardan biri de sağlık endüstrisidir. Eİ'nin kişiye özel üretimi mümkün kılması, bu sektör için büyük önem taşımaktadır. Özellikle kişinin anatomisine göre üretilmesi gereken dental uygulamalarda ve protez üretimlerinde kullanılmaktadır. Eİ ile istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere sahip, hasta ile tam uyumlu implant ve protezlerin kısa sürede üretilmesi sağlanmaktadır. Hastanın anatomisine tam uyumlu, mekanik özellikleri, geleneksel yöntemlerle üretilenlere yakın protezler üretilmektedir. Ayrıca geleneksel yöntemlerle üretilenlerle karşılaştırıldığında

hafiftirler. Protezlerin ağırlıkları hastanın günlük hareketlerini kısıtlayabilmekte, protezden aldığı verimi düşürmektedir. Bu teknolojiyle üretilen protezler daha düşük yoğunluğuna sahip olacaktır ve bu sayede ağırlık problemi ortadan kalkacaktır. Eİ'nin bu sektöre sunduğu bir diğer avantaj ise hastaya ulaşım süresinin kısalmasıdır. Eİ, geleneksel ölçü alma yöntemlerini ortadan kaldırmıştır ve bekleme sürelerini kısaltmıştır. Eİ'nin sağlık sektöründeki uygulama alanları protez ve implantlarla sınırlı kalmamaktadır. Cerrahide, ameliyat öncesi planlama aşamasında, tıbbi aletlerin üretiminde, hastalıkların modellenmesinde ve ilaç endüstrisinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra doku ve organların basımında çeşitli çalışmalarda tercih edilmektedir. Teknolojinin son zamanlardaki uygulamalarına, pandemi sürecindeki çalışmalar örnek gösterilebilmektedir. Koronavirüs salgınından korunmak için gerekli kişisel koruma ekipmanlarının üretiminde bu teknoloji tercih edilmektedir. Artan koruyucu kişisel ekipman talebiyle, bu ekipmanların üretimi ve dağıtımında çeşitli sorunlar ortaya çıkmıştır. Eİ bu süreçte, sağlık krizinin yayılmasını durdurmada kilit bir rol oynamış, maske, eldiven ve yüz siperlikleri gibi çeşitli ekipmanların üretiminde kullanılmıştır [35]. Eİ'nin sağlık endüstrisinde kullanım alanlarına verilen örnekler Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Şekil 2.5 a'da Eİ ile üretilen kalça ve diz implantları gösterilmektedir. Şekil 2.5 b)'de SLM ile üretilen femoral komponent, Şekil 2.5 c)'de asetabular kap gösterilmektedir. Şekil 2.5 d)'de kalça implantı bileşeni gösterilmektedir. Bir diğer uygulama ise özellikle son yıllarda popüler olan doku ve organların basımıyla ilgilidir. 3B biyo-baskı teknolojisi doku ve organların basımını mümkün kılmıştır [36]. Bu uygulamalara örnek, Eİ ile üretilen elektronik bir kulak kepçesidir. Şekil 2.5 e)'de gösterilmektedir [37]. Bir diğer uygulama alanı protez ve implantların üretimidir. Hasta için tam uyumu sağlamak ve kişiye özel üretimi mümkün kılmak için Eİ teknoloji bu uygulamalarda tercih edilmektedir. Şekil 2.5 f)'de Eİ ile üretilen protezler gösterilmektedir [38]. Şekil 2.5 g)'de ise standart geleneksel yöntemlerle üretilen implant ile kişiye uyumlu Eİ ile üretilen implantlar karşılaştırılmıştır [39].



Şekil 2.5. Eİ sağlık uygulamaları; a) Kalça implantı komponenti, b) femoral komponent, c) asetabular kap, d) kalça bileşeni, e) biyonik kulak, f) protez eller, g) implantların karşılaştırılması [36-39].

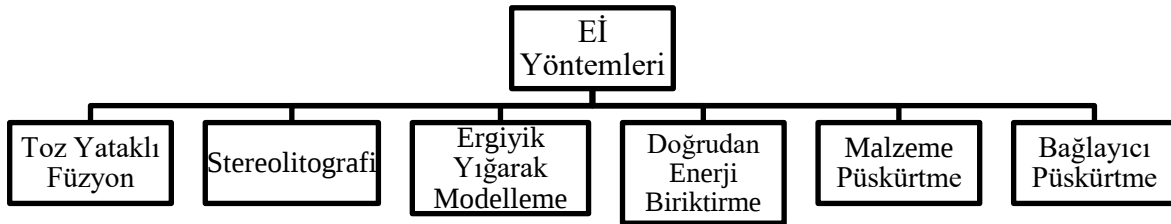
Otomotiv, havacılık ve sağlık endüstrisinin yanı sıra mimari, elektrik elektronik endüstrisi, inşaat, moda, hobi ürünleri ve mesleki eğitimlerde kullanılmaktadır. 2021'deki Wohler raporuna göre özellikle elektronik cihazlarda sağlık endüstrisinde kullanımı daha popüler hale gelmiştir. Rapora göre, tüm sektörleri olumsuz olarak etkilemiş dünya çapındaki salgına rağmen, 2020'de %7,5'lik bir büyüme gerçekleştirdiğini ve yaklaşık 12,8 milyar dolara ulaştığını tespit etmiştir. Wohler Raporu Şekil 2.6'da gösterilmektedir [40].



Şekil 2.6. Eİ ile parça üretimine yapılan yatırımların yıllara göre değenlendirmesi [40].

2.3. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eİ birçok yöntemi bünyesinde barındırmaktadır. Yöntemler arasındaki farklılıklar kullanılan malzeme ve katmanları işleme şekilleri yöntemler arasındaki temel farklılıklardır. Her yöntemin kendine göre avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Bu nedenle Eİ yöntemlerinden biri seçilirken kullanılan malzeme ve yönleme bağlı parametreler dikkate alınmalı ve en uygun yöntem seçilmelidir. Eİ yöntemleri farklı şekilde sınıflandırılabilir bu sınıflandırmalardan biri Şekil 2.7’de gösterilmektedir [41,42].



Şekil 2.7. Eİ yöntemleri

Eİ yöntemleri farklı şekilde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar yöntemde kullanılan ana malzemenin fiziksel durumuna göre katı, sıvı ve toz olarak ya da malzeme türüne göre yapılabilir. Yöntemlerde kullanılan malzemenin formuna göre sınıflandırılması Tablo 2.1’de gösterilmektedir. Ayrıca Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) F42

Komitesi tarafından önerilenler de dahil olmak üzere, AM süreçlerini sınıflandırmak için birkaç sistem vardır. Eİ proseslerinin kısa tanıtımı ve kullanılan başlangıç materyalinin durumuna göre sınıflandırılması Tablo 2.2’de gösterilmektedir [43-45].

Tablo 2.1. Eİ yöntemlerinin sınıflandırılması [43-45].

Eİ Metotları		Malzeme Tipi				Malzeme		
		Sıvı	Toz	Katı	Metal	Seramik	Polimer	Fotopolimer
Toz Yataklı Füzyon	SLS		x		x	x	x	x
	SLM		x		x		x	
	EBM		x		x	x		
VAT- Polimerizasyon	SLA	x				x		x
Eriyik Yığılma ile Modelleme	FDM			x	x	x	x	x
Doğrudan Enerji Biriktirme			x		x			x
Malzeme Püskürtme		x						x
Bağlayıcı Püskürtme		x			x	x	x	

Tablo 2.2. Eİ proseslerinin kısa tanıtımı ve sınıflandırılması [46].

Proses Tipi	Tanıtım	İlgili Teknolojiler	Malzemeler
Toz Yataklı Füzyon Yöntemleri	Termal enerji, bir toz yatağının bölgelerini seçici olarak birleştirir	EBM, SLS, DMLS, SHS	Metal, polimer
Doğrudan Enerji Biriktirme	Odaklanmış termal enerji, malzeme biriktirilirken eritilerek, malzemeleri biriktirmek için kullanılır	LMD	Metal
Malzeme Ekstrüzyonu	Malzeme bölgesel olarak bir nozul yoluyla biriktirilir.	FDM	Çeşitli, genelde polimer
SLA	Sıvı fotopolimer, ışıkla aktive olarak veya UV polimerizasyonu ile kürlenir.	DLP	Fotopolimer
Bağlayıcı Püskürtme	Toz malzemeleri birleştirmek için bir sıvı bağlayıcı madde seçici olarak biriktirilir ve daha sonra ürün, son sertleştirme için bir fırında pişirilir.	PBIH, PP	Çeşitli, polimer, metal ve diğerleri
Malzeme Püskürtme	Ana malzemelerin damlacıkları seçici olarak biriktirilir.	Çoklu jet modelleme (MJM)	Polimer, vax
Sac laminasyonu	Malzeme tabakaları bir nesne oluşturmak için, bir biri üzerine yapıştırılır.	Lamine nesne imalatı (LOM)	Kağıt, metal

Eİ yöntemleri ana malzemeleri ve katmanları işleme şekli farklı olsa da genelde temel işlem basamaklarını izlerler. Bu işlem basamakları, dijital bir verinin işlenmesini ve

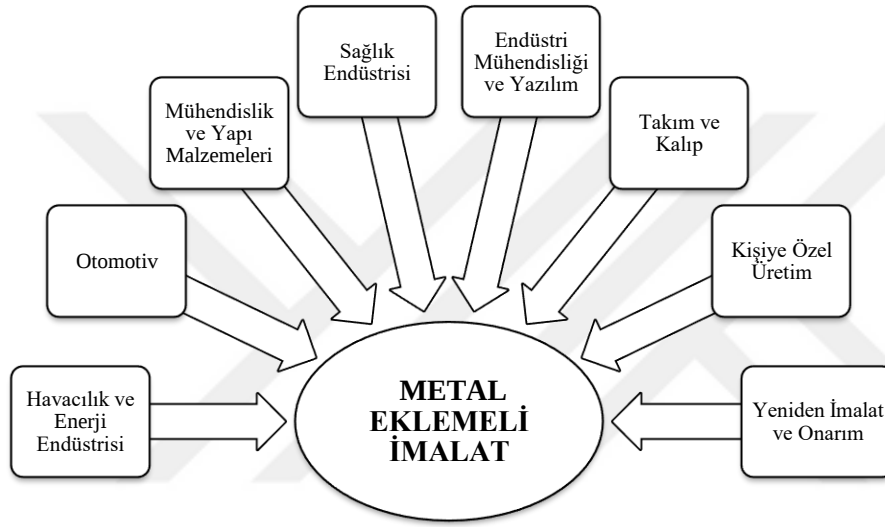
objeye dönüştürülmesini içermektedir. Bunun için, SLM, SLS ve EBM gibi toz yataklı füzyon yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Metal malzemelerin sadece toz yatak füzyon yönteminde değil, bağlayıcı püskürtme ve doğrudan enerji biriktirme (DED) yöntemlerinde de kullanılması başarılı sonuçlar elde etmektedir. Eİ yöntemi ile metal malzemelerin üretiminde geleneksel yöntemlere göre birçok avantaj bulunmaktadır. Geleneksel yöntemlerdeki kısıtlamaların aksine, karmaşık geometriye sahip parçaların boyutsal doğruluğu ve üretilebilirliği yöntemin avantajları arasındadır. Metal malzemeleri kullanan Eİ teknolojilerinin her biri, metal parçaların üretimi için kolaylık sağlayabilir. Örneğin toz yatağı füzyon yöntemlerinden biri olan EBM, yüksek sıcaklıkta gerçekleştirildiği için, iç gerilmelerden kaynaklanan parça distorsiyonu daha düşüktür. Bununla birlikte, bu yöntemin bazı dezavantajları vardır, bunlardan en büyüğü, yüzey çözünürlüğünün çok iyi olmamasıdır. Bir diğeri, lazer tabanlı sistemlerden daha maliyetli olabilmesidir. Ayrıca uzun ısıtma ve soğutma süreleri için gerekli iyileştirmeler yapılmalıdır. Gerekli iyileştirmeler sadece sürekli proses iyileştirme için değil, metal tozları ile çalışırken iş ve çevre sağlığı ve güvenliği için de önemlidir. Tozların ve proses atıklarının yönetimi için alınan önlemler her geçen gün daha rekabetçi hale gelmektedir. Bu nedenle hem yüksek rekabet hem de iş ve çevre sağlığı için önlemler alınmalıdır.

Bağlayıcı püskürtme yöntemi toz yataklı füzyon yöntemlerinin avantajlarının çoğunu yakalar. Sağladığı yüksek çözünürlük, bu tekniği birçok uygulamada kullanılan bir teknoloji haline getirmiştir. Özellikle uçak endüstrisinde vaat ettiği faydalar nedeniyle kullanımının artacağı düşünülmektedir. Ancak önünde uzun bir yol olduğu gerçeğini kabul etmek gerekmektedir. Alüminyum alaşımlarının düşük erime sıcaklığı ve sinterleme davranışı nedeniyle bağlayıcı püskürtme işleminin Al gibi metal malzemeler için başarılı bir işlem olduğunu söyleyemeyiz. Hafif metallerin işlenebilirliği için iyileştirmeye ihtiyaç vardır. Ancak bunun gelişebileceği ve metal malzemeler için Eİ teknolojisinin kullanımının artırılmasının mümkün olduğu söylenebilir [47].

2.3.1. Metal eklemeli imalat

Eİ yöntemleri ile üretilen metal malzemeler otomotiv, havacılık ve sağlık gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Özellikle boyutsal kararlılığın büyük önem taşıdığı bu sektörler için Eİ yöntemi birçok kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca yeniliklerin önemli olduğu bu alanlarda üretim ve ürün geliştirmeyi kolaylaştırır. Şekil 2.8’de metal Eİ

kullanım alanlarından bazıları gösterilmektedir [48]. Eİ yönteminde en sık kullanılan metal malzemeler paslanmaz çelik, titanyum, magnezyum, alüminyum, Cr-Co alaşımlarıdır. Metal malzemeler, özellikle Ti ve Cr-Co alaşımları, biyomedikal uygulamalarda daha çok mekanik özellikleri, biyouyumluluğu, termal, manyetik ve elektriksel iletkenlikleri ve genellikle yüksek sıcaklık dayanımı nedeniyle tercih edilmektedir. Boyutsal kararlılık ve optimum malzeme tüketimi sağlayarak kuyumculuk sektörü için ideal bir işleme tekniği olabilir, bu nedenle yöntem altın, gümüş ve platin gibi değerli metaller için de kullanılabilir [49,50].



Şekil 2.8. Metal Eİ kullanım alanları [50].

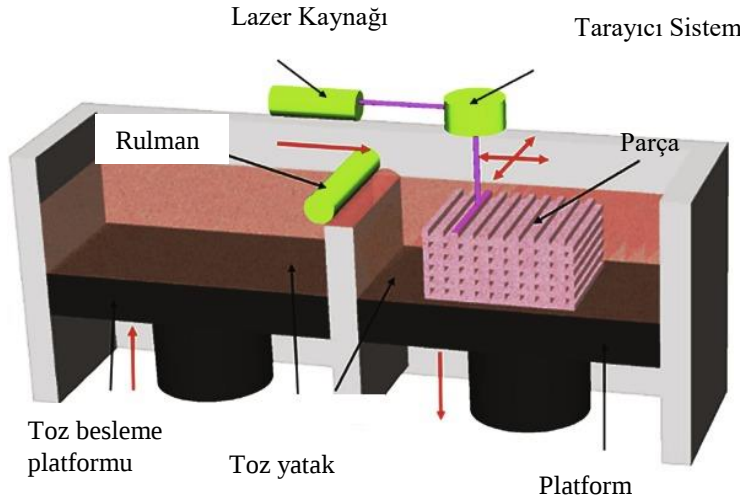
Sadece birkaç yıl önce üretimi mümkün olmayan bileşenler artık çok çeşitli metal tozları kullanılarak yüksek standartlarda yapılabilmektedir. Artık yalnızca bir prototipleme teknolojisi olmayan Eİ, en zorlu uygulamalar için seri bileşenlerin üretimi için kullanılmaktadır. Ticari olarak temin edilebilen çok sayıda çeşitli Eİ ekipmanı vardır ve sayıları artmaya devam etmektedir. Bunlar genel olarak toz yataklı füzyon sistemlerini içermektedirler. Metal Eİ, proseslerinin çoğunda elde edilen nispeten yüksek soğutma hızları, bölünmeyi azaltır ve küçültülmüş tane boyutlarını destekler. Bu sayede mikroyapısal ve mekanik özellik anizotropisi her yerde bulunmaktadır.

Eİ parçalarının seri üretiminin ekonomik uygulanabilirliği, büyük ölçüde maliyete bağlıdır. Özellikle imalatta kullanılan başlangıç malzemelerinin maliyetinin azaltılması büyük önem taşımaktadır. Eİ, ekonomik bir hale getirildiğinde, seri üretime imkan veren bir teknoloji haline getirilebilir. Ayrıca Eİ'nin enerji tüketimini ve karbon ayak izini

azaltarak, çevre üzerinde olumlu bir etkisi yaratması beklenmektedir. Bununla birlikte, daha fazla çalışmanın yapılması gerektiği açıktır. El'yi kullanmanın avantajlarından yararlanmak ve olası zorlukları iyileştirmek için geliştirilmiş bir sistem gerekmektedir.

2.3.2. Seçici lazer ergitme/sinterleme

SLM, metal malzemeler için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Özellikle paslanmaz çelik gibi yaygın metaller için işlevseldir. Yöntemin temel prensibi, ince toz tabakasının lazer tarama ile şekillendirilmesidir. Lazer ışını ile istenilen parça şekli elde edilir. Işınlama üzerine toz malzeme ısıtılır ve yeterli güç uygulanırsa erir ve bir sıvı havuzu oluşturur. Bir katmanın kesiti tarandığında, yapı platformu katman kalınlığına eşit bir miktarda alçalır ve yeni toz tabakası biriktirilir. Daha sonra erimiş havuz hızla katılıp soğur ve malzeme elde edilir. Ürün bitene kadar bu işlem tekrarlanır. SLM ve SLS yöntemleri benzer mekanizmaya sahiptir. Aynı şekilde makineler de benzerdir. SLS yönteminde SLM olduğu gibi toz malzeme eritilir ve tozlar birbirine bağlanır. Böylece katmanlı yapı elde edilir. Toz yatağındaki malzeme, lazer ile seçici olarak eritilerek birinci katman oluşturulur. Daha sonra üst üste eklenerek birkaç katman oluşturulur. İşlemi sağlayan makine sistemi Şekil 2.9'da gösterilmektedir [51-53]. Lazer gücü ve tarama hızı önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin yanı sıra tarama mesafesi, tarama stratejisi, lazer gücü, çalışma odasının sıcaklığı, katman kalınlığı, toz özellikleri de büyük önem taşımaktadır. Düşük gözeneklilik, yüksek mukavemet, sertlik ve iyi mekanik özellikler gibi optimum parça özelliklerine sahiptir. Geleneksel tekniklerinden farklı olarak, karmaşık şekilli parçaların üretiminde çok az kısıtlama vardır, ancak destek yapılarının kullanımı ve deformasyon olasılığı konusunda hala sınırlamalar vardır. Bu kısıtlamalar ve parçanın şekli maliyeti etkiler. Üretim sonrasında yüzey işleme genellikle gereklidir.



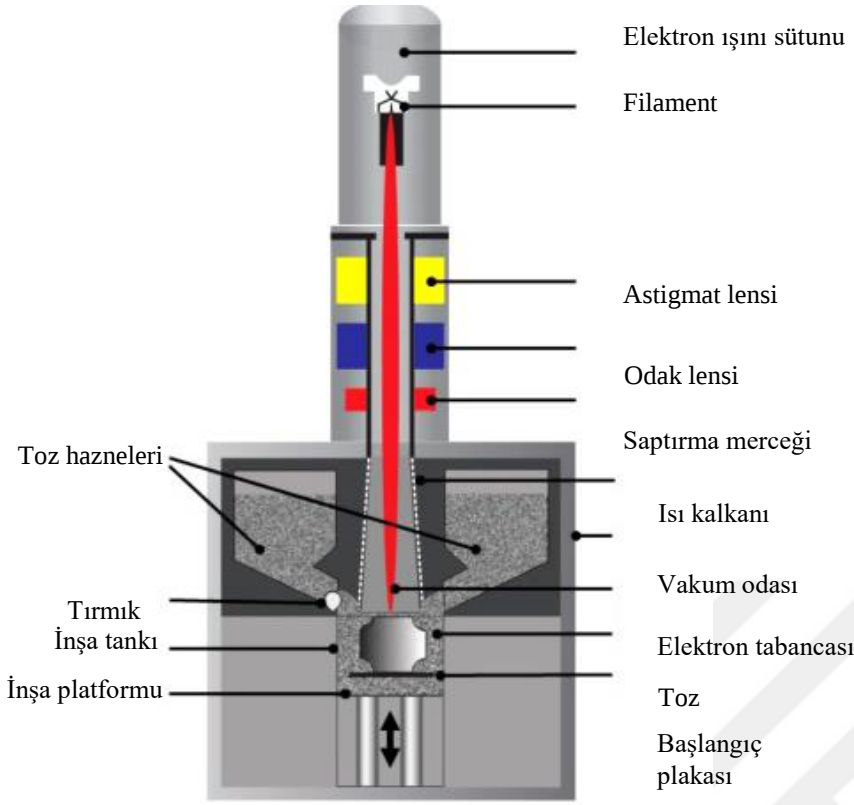
Şekil 2.9. SLS yönteminin çalışma prensibi [53].

Geniş metal yelpazesi, karmaşık şekilleri veya geleneksel üretim yoluyla elde edilmesi inanılmaz derecede zor veya pahalı olan gerçekleştirme yeteneği yöntemin avantajlarından bazılarıdır. Ayrıca aynı anda birden fazla parçanın üretilmesine izin veren bir yöntemdir. Fakat şu anda nispeten küçük parçalarla sınırlı olmaktadır ve elde edilen parçaların yüzeyleri, bitirme işlemleriyle iyileştirilmelidir, çok sayıda son işlem gereklidir.

Aralarındaki temel fark SLM yönteminde tamamen ergitme söz konusudur. Diğer bir fark ise destekleyici yapıların kullanımı ile ilgilidir. Her iki yöntemde de toz yatak sürece fiziksel destek verse de SLM yöntemi için bu yetersizdir, destekleyici yapılara ihtiyaç duymaktadır. Prosesteki katı hal sinterleme sayesinde, SLM ile yüksek mukavemetli ve düşük gözenekli parçalar üretilabilir, bu da SLM yöntemini SLS' den üstün kılar. Her iki sürecin de birbirinden üstün veya zayıf olduğu noktalar vardır [54,55].

2.3.3. Elektron ışın ergitme

EBM yöntemi, Ti ve alaşımları gibi reaktif metal malzemeler için sıklıkla tercih edilen yöntemdir. EBM yöntemi basitçe ifade edilecek olursa, tıpkı diğer füzyon yöntemlerinde olduğu gibi belirli bir kesit alanında gerçekleşen ergitme ve katılaştırma işlemidir. Ancak bu sefer lazer yerine yüksek enerjili bir ışın kullanılır. Tıpkı lazer gibi elektron ışını da toz tabakasını tarar, önce parça ışının sağladığı ısı ile erir, ardından katılaşır [56-58]. EBM teknolojisinin üretim prosesleri ve makine Şekil 2.10'da gösterilmektedir [59].

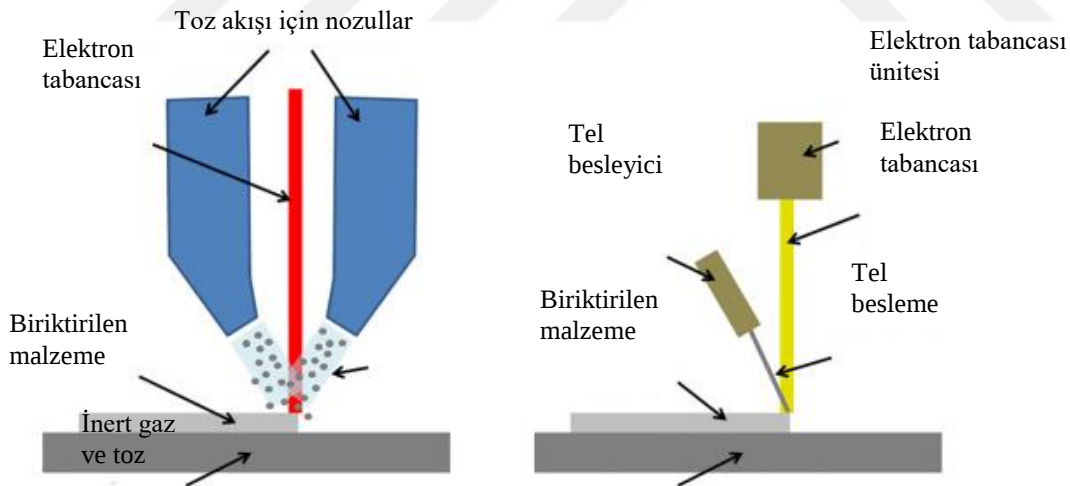


Şekil 2.10. EBM çalışma prensibi [59].

Toz, elektron ışını tarafından taranmadan önce ısıtıldığı için EBM, SLS'den çok daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir. Bu nedenle oksidasyondan korunmak için işlem vakum altında gerçekleştirilir. Malzeme, atmosferik gazların ve çevre kirliliğinin etkilerinden korunacağı için, istenen özellikler elde edilmektedir. Soğutma sırasında, oksidasyondan korumak için proste olduğu gibi vakumlanmalı veya inert olarak kullanılmalıdır. Özetle EBM yöntemi genellikle metal malzemeler için kullanılır, pratikte iletkenliği yüksek malzemelerle çalışılmaktadır. Diğer toz yataklı füzyon yöntemlerine göre yüksek verim gibi bazı avantajları vardır. Ama temelde aynı prensibe sahiptir: Platform üzerine ince bir metal tozu sermekle başlar. Toz lazer yerine elektron ışınları ile taranır, bu işlem diğer yöntemlere göre daha hızlıdır. Hareketli platform sayesinde son kat tozun üzerine ince bir toz tabakası serilerek katmanlı yapı elde edilir. Parça oluşana kadar bu işlem tekrarlanır. İşlem sırasında erime ve soğuma olduğundan oksidasyon önlemleri büyük önem taşır [60,61]. Genel olarak, toz özellikleri, proses stabilitesi için esastır ve ortaya çıkan malzeme özelliklerini belirlemektedir. Görünen yoğunluk ve sıkıştırılmış yoğunluk ile karakterize edilen tozun akışkanlığı, mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. Toz boyutu da prosesin başarısını etkilemektedir.

2.3.4. Doğrudan enerji biriktirme (DED)

Bu teknikte, doğrudan bir enerji ışını uygulanarak üretilen tabakalar, birbiri üzerine eklenmektedir. DED’ deki elektron ışını sistemleri, malzemeyi oksidasyondan korumak için vakum gerektirmektedir. DED makinelerinde genellikle, nozullardan toz ile birlikte inert gaz üflenmektedir. Böylece erimiş bölgeyi kaplayarak oksitlenme oranını düşürür. Bu durum, toz yataklı füzyon sistemine kıyasla, daha hızlı inşa oranları sağlamaktadır. Fakat bir yandan, ek işleme gerektirebilecek daha düşük yüzey kalitesine yol açar. Üretim gerçekleştirildikten sonra ek işlemler ile yüzey iyileştirilebilir. İyi mekanik özellikler sunan yöntem, diğer yöntemlere göre nispeten daha büyük parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 2.11’de gösterilmektedir. Bu yöntemde toz şeklindeki malzeme üretilebilir Şekil 2.11 a)’da gösterilirken, Şekil 2.11 b)’de besleyici tel ile parça üretimi gösterilmektedir. Besleyici tel ile üretim, toz malzemeye göre daha yüksek biriktirme oranı sağlamaktadır. Fakat bu yöntemin baskı çözünürlüğü daha düşüktür. İki yöntem birbiriyle karşılaştırıldığında, aynı malzeme için tel besleme daha ekonomik bir yöntemdir [62,63].



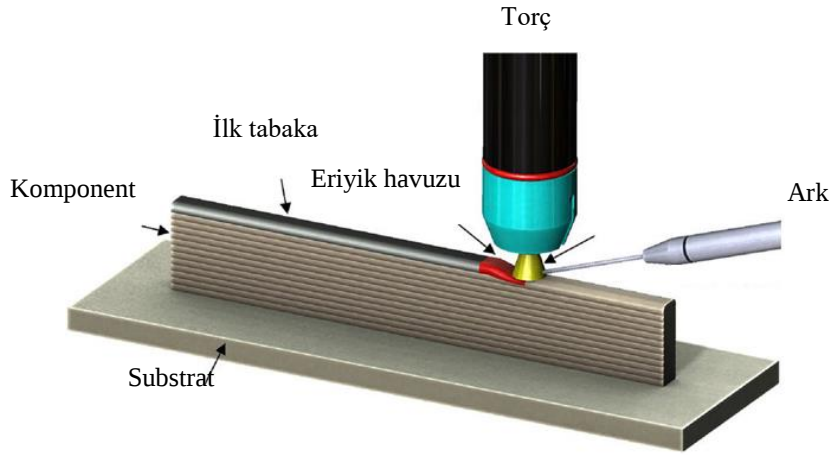
Şekil 2.11. DED yöntemi, a) Toz malzeme ile üretim, b) Besleyici tel ile üretim [63].

DED yöntemi, malzemeyi hızlı bir şekilde biriktirme potansiyeli nedeniyle, özellikle nispeten basit ancak büyük boyutlu parçalar için endüstride de kullanılmaktadır. Ayrıca yöntemin malzeme tüketimi düşük olduğu için havacılık ve otomotiv gibi bu kritere önem veren sektörlerde kullanılmaktadır. DED yöntemi, tasarım yoluyla sistem verimliliğini

artırmaktır. Bu verimliliği birbirine benzemeyen malzemeleri biriktirme yeteneği ile sağlamaktadır. Sınırlı uygulamalarla üretim aşamasındadır, ancak ilerleme öngörülmektedir [64].

2.4. Tel Ark Eklemeli İmalat (TAEİ)

TAEİ bir ısı kaynağı olarak kullanılan bir elektrik arkının ve besleme malzemesi olarak kullanılan bir telin, kombinasyonu olarak tanımlanmaktadır. TAEİ yönteminin temel prensibi, tel formundaki hammaddenin elektrik ark ısısıyla eritilmesi ve birbiri üzerine katmanlar halinde biriktirilmesidir. Bu yöntemde, metal inert gaz (MIG)/metal aktif gaz (MAG) kaynak yöntemi veya tungsten inert gaz (TIG) kullanılabilir. Gaz metal ark kaynağı, içerdiği gaz karbondioksit gibi aktif bir gaz içeriğine sahipse MAG (metal aktif gaz), içerdiği koruyucu gaz argon ya da helyum gibi bir inert gaz ise MIG (metal inert gaz) olarak ifade edilmektedir. MIG/MAG kaynak yöntemi bir inert veya aktif koruyucu gazın koruması altında, kaynak telinin ucu ile iş parçası arasında oluşturulduğu füzyon bazlı bir ark kaynağı işlemidir. TIG kaynağının sembolü ise “Tungsten Inert Gaz” kelimelerinin baş harflerinin alınmasıyla meydana getirilmiştir. TIG kaynağında tungsten elektrod ile iş parçası arasında ark kurulmuştur ve bu ark havanın tesirinden argon veya helyum gazı atmosferiyle korunmaktadır. TIG kaynağının üstünlükleri arasında, yüksek kaynak hızı ve kaynak dikişlerinin temizliği sayılmaktadır. Ayrıca kaynak ısısı bir bölgeye toplayabilir, ısıl distorsiyonları azdır ve kolay mekanize edilebilmektedir. Bununla birlikte TIG kaynak yöntemi çok geniş bir uygulama alanına sahiptir, kaynakçı tarafından kullanılması kolaydır. TIG kaynak yönteminin diğer bilinen ve endüstride sık uygulanan eritme kaynağı yöntemlerine göre en önemli üstünlüğü, ısı girdisinin ve eriyen ek kaynak metali miktarının birbirlerinden bağımsız oluşudur. Bu önemli özellik yöntemin çok ince parçalara uygulanabilmesine olanak sağlamaktadır. TIG ve MIG kaynak yöntemlerinin üstünlüğünden, Eİ tekniğine entegre edilerek, faydalanılmaktadır. Şekil 2.12’de TAEİ yöntemi gösterilmektedir [65,66].

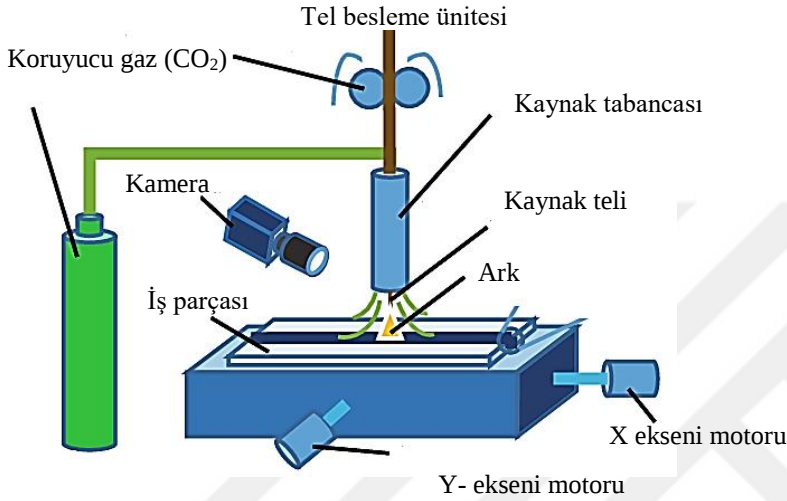


Şekil 2.12. TAEİ yöntemi çalışma prensibi [66].

Biriktirme hızları, biriktirilen malzeme ve proses parametrelerine bağlı olarak değişse de, biriktirme hızı yüksektir, bu da onu kısa zaman aralıklarında büyük ölçekli parçaların üretimi için ideal hale getirmektedir. Elektrik arkına dayalı kaynak, genel olarak karmaşık olabilir, çünkü son parçaların iyi kalitede olması için birkaç işlem parametresinin kontrol edilmesi gerekir. Proses parametreleri şunları içerir: akım yoğunluğu, voltaj, koruyucu gaz tipi ve akış hızı, temas ucu ile çalışma mesafesi, tel besleme hızı, hareket hızı ve torç açısı. Bu nedenle, ilgili her ekipman ve malzeme için bunların optimize edilmesi gerekir. Parametrelerin doğru seçimi, kaynak genişliği, penetrasyon ve boyutu, biriktirme oranı ve yüzey pürüzlülüğü, transfer modunu etkiler.

Diğer metal Eİ yöntemleri ile karşılaştırıldığında, TAEİ işlemi düşük maliyetli, yüksek malzeme kullanımı ve yüksek birikme hızına sahiptir. Bu avantajları sayesinde büyük metalik parçaların üretilmesi için uygundur. Maliyet açısından rekabetçi olmasıyla, yakın gelecekte geleneksel yöntemlerin yerini alabileceği düşünülmektedir. Bu teknoloji, özellikle havacılık ve otomotiv, yedek parça üretimi uygulamalar için karmaşık parçaların üretiminde kullanılabilir. Isı kaynağı olarak ark ve hammadde için tel kullanan TAEİ yöntemi, 1990' lardan beri Eİ prosesleri için araştırma konusu olmuştur. Bu yöntemin son zamanlarda büyük ölçekli mühendislik yapıları üretme potansiyeline sahip olduğu kanıtlanmıştır. TAEİ süreci, diğer metal Eİ yöntemlerine kıyasla, düşük maliyetle özelleştirilmiş büyük parçaların üretimi için araştırılmaktadır. Bu yöntem, sayısal kontrollü bir freze makinesi veya bir robot eklenerek ark kaynağı ekipmanına uygulanabilmektedir. TAEİ prosesi, bilgisayar kontrollü bir robotik sistem, bir kaynak güç kaynağı, bir kaynak torcu ve bir tel besleme sistemi dahil olmak üzere parçalardan oluşturulabilmektedir. TAEİ, teli prosese otomatik olarak besleyen bir tel besleme sistemi

olan, çoğunlukla lazer olan bir enerji kaynağı ve robotik bir sistemden oluşmaktadır. Diğer aksesuarlar arasında koruyucu gaz, ön ısıtma veya soğutma sistemi, soğuk silindir vb. bulunmaktadır. Bu sistem Şekil 2.13’de gösterilmektedir. TAEİ yöntemi çeşitli sistem tasarımlarını içermektedir. İnert gaz koruma ortamı sağlamak için kapalı bir oda tasarımı, bu tasarımlardan birine örnek olarak verilebilir, bir diğer tasarım örneği ise, yüksek yapıları imal edebilen lineer ray üzerinde konumlandırılmış bir robotun kullanıldığı tasarımıdır [67].



Şekil 2.13. TAEİ sistem ekipmanları [67].

Bileşenlerin üretimi için diğer Eİ tekniklerine göre daha az malzeme kullanılması, tüketim açısından faydalı olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca ekipman maliyeti nispeten düşüktür. Araştırmalar, enerji tüketiminin ve malzeme israfının lazer yöntemine göre nispeten daha düşük olduğunu göstermektedir. TAEİ büyük bileşenlerin imalatında kullanılabilir. Bu yöntem ile üretilen bileşenlerin yüzey kalitesi, Lazer Eİ süreci tarafından geliştirilenlerden daha düşüktür. Düşük ısı girdisi ile erimiş metal birikimini kontrol etmek için daha iyi ve daha kararlı bir süreç arayışında, soğuk metal transferi (CMT) olarak bilinen bir gaz metal ark kaynağı çeşidi, Eİ üretimine uyarlanmıştır. Bu yöntemde, yüksek biriktirme oranları elde etmek için iki tel eriyik havuzuna beslenmektedir [68,69]. Bu yöntem arkı korumak için yüksek miktarda enerji gerektirir, bu nedenle ergimiş havuz şeklini kontrol etmek için ısı dağılımını artıran bazı iyileştirmeler gereklidir. Kaynaklı parçaların mekanik performansı hakkında önemli ölçüde bilgi birikimi olduğu için, Eİ uygulamaları için başarıyla kullanılmıştır. Bununla birlikte, TAEİ’ de, en aza indirilmiş kalıntı gerilmeler ile tamamen yoğun parçalar elde etmek için optimum parametrelerin belirlenmesi, çok katmanlı birikme sırasında

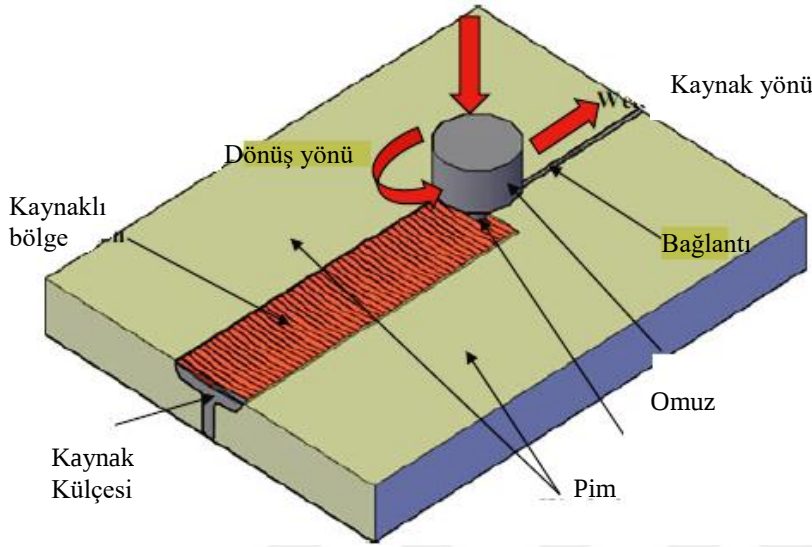
mikroyapısal evrimin kontrolü ve diğerlerinin yanı sıra katmanlar arasındaki sıcaklığın etkisi gibi hala araştırmaya ihtiyaç duyan konular vardır. Bazı araştırma grupları, yukarıda bahsedilen sorunlardan bazılarını azaltmak için yeni süreç varyantları geliştirmektedirler. Örneğin katmanlar arasında mekanik deformasyon uygulayarak veya aktif ısıtma ve soğutma uygulayarak özellikleri iyileştirme çabası içindedirler. Hala araştırılması gereken konuların olmasının yanı sıra bu teknolojiyi hala engelleyen önemli bir husus, parçaların sertifikalandırılması ve tahribatsız muayenesi hakkındaki tartışmalardır. Yapılan araştırmalar sonucunda, yakın gelecekte, ihtiyaç duyulan bilgilerin edinileceği ve standartların bu doğrultuda belirlenebileceği ön görülmektedir.

Bitmiş ürünlerin büyük ölçekli imalatının malzeme özelliklerini iyileştirmek ve üretim süresini azaltmak için araştırmalar yapılmaktadır. Tüm olası sorunları çözebilecek tek bir sistem yerine belirli bir uygulamayı optimize etmek için çeşitli TAEİ sistem tasarımlarının geliştirilmesi beklenmektedir. Toz bazlı yöntemle karşılaştırıldığında tel beslemenin yalnızca kullanım kolaylığı ve daha düşük maliyetinden faydalanmakla kalmaz, aynı zamanda hacim başına daha düşük bir yüzey alanına sahiptir. Toz bazlı prosese göre %100 kullanım verimliliğine sahiptir. Bu avantajları sayesinde, TAEİ, büyük bileşenlerin üretimi için endüstride ve akademide büyük ilgi görmektedir. Hem geleneksel yöntemlere göre, hem de diğer Eİ yöntemlerine göre çok sayıda avantaja sahiptir. Örneğin, kapalı kalıp dövme gibi şekillendirme süreçleri, özel aletler gerektirir ve bu nedenle, ürün varyantlarını üretmek için gereken esneklikten yoksundur. TAEİ yöntemi, kalıp gerektirmeden tasarım esnekliği sunmaktadır. Bu avantaj büyük kalıpların kullanıldığı gemi endüstrisi gibi birçok sektör için umut vericidir. Çünkü bu sektörlerde takım ve kalıp elemanlarının boyutlarının tasarım ve üretim süresi gibi sorunlar mevcuttur. Teknolojinin bu sorunların çözümüne alternatif bir yol olacağı düşünülmektedir. TAEİ yöntemi, türbin kanatları ve kalıplar gibi özel parçaların onarımı için iyi bir seçenektir. Bu yöntemle hasarlı parçaların yüzeyine yeni malzeme biriktirilerek parçaların onarılması sağlanabilir. Bu sayede yeni bir parça üretimine ihtiyaç duyulmadan, önemli ölçüde ekonomik tasarruf sağlanır. TAEİ süreçleri oldukça esnektir ve özellikle küçük parti boyutlarında karmaşık geometrilerin üretimi için uygundur, büyük parça geometrileri için de geliştirilmekte olan bir teknolojidir. Toz, lazer ve elektron ışını gibi alternatif füzyon kaynaklarına kıyasla önemli maliyet tasarrufu sağlayabilmekte, yüksek mekanik özelliklere sahip parçalar elde edebilmektedir.

2.5. Sürtünme Karıştırma Eklemeli İmalat

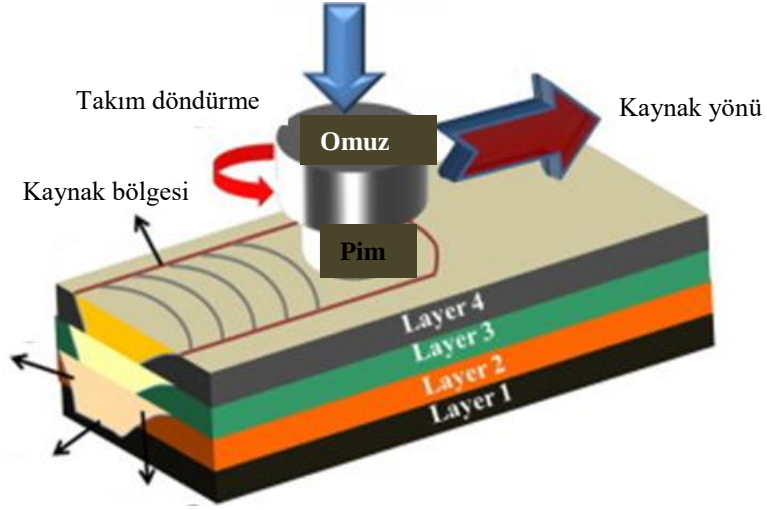
SKK, 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü tarafından icat edilen hafif metaller için basit, temiz ve yenilikçi bir birleştirme teknolojisidir. SKK bağlantılarının yüksek mukavemeti sayesinde, hafif yapılarda geleneksel birleştirme teknolojilerine kıyasla önemli ağırlık tasarrufu sağlamaktadır. SKK, iki sac parçası arasına daldırılan ve birleştirme hattı boyunca ileri doğru hareket eden silindirik bir omuzdan çıkan dönen bir pimin prensibi ile çalışır. Malzeme dönen omuz ile iş parçası yüzeyi arasındaki sürtünme ile ısıtılır ve birleştirilecek iki parça arasında katı bir faz bağı bırakarak profilli pim ile eşzamanlı olarak karıştırılır. Kaynak dikişinin ve dolgu tellerinin özel hazırlığı gerekli değildir. SKK, kaynak teknolojilerine göre sayısız avantaja sahiptir. SKK işlemi, birleştirilecek metallerin erime noktasının altındaki katı fazda gerçekleşebilir ve bunlarla sınırlı olmamak üzere Al, Cu, Ti, çelik, Mg ve alaşımları gibi sayısız malzemeyi kaynaklayabilir. Aynı zamanda füzyon kaynak işlemlerinden çok daha az bozulma sağlar ve birçok uygulamada maliyet düşüşü sağlar. Böylece, kaynaşmış bir malzemenin katılaşması ile ilgili tüm problemlerden kaçınılır. Havacılık endüstrisinde kullanılan yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları gibi kaynaşma kaynağı olarak sınıflandırılan malzemeler, mukavemet bakımından küçük bir kayıp ile birleştirilebilir. Küçük ölçekli sanayi, özellikle SKK için gereken mekanik ekipmanın düşük yatırım maliyetlerinden yararlanabilir. SKK, birçok avantaja sahiptir. Erime noktasının altındaki sıcaklıklarda yapılması, mükemmel gerilme ve yorulma dayanımı, sıçramanın ve dumanın olması, düşük enerji tüketimi, düşük büzülme, dolgu telinin kullanılmaması, kaynak dikişinin basit hazırlanması gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca SKK metallerin ergitilmesini ve katılaşmasını içermediği için döküm hatalarının önlenmesini sağlar ve ergitme kaynak yöntemlerine göre daha az bağlantı hatası vardır. Ergitme kaynak işleminde döküm yapısının dezavantajları arasında oksidasyon, gözeneklilik, sıcak çatlama, mikro ayrışma ve bağlantıdaki diğer makro ve mikro yapısal kusurlar da bulunur. SKK yöntemi sayesinde bu sorunlar çözülebilmektedir. Öte yandan işlemin daha yavaş hareket hızları, daha az esnek olması ve takım geri çekildiğinde çıkış deliği kalması gibi bazı dezavantajları da vardır. Ancak SKK' nın, ergitme kaynağı işlemlerine kıyasla sahip olduğu avantajlar, bu yöntemi kaynak teknolojisinde devrim niteliğinde bir gelişme haline getirmiştir. Özellikle kaynak yapılamayan alaşımlardaki başarısı büyük bir

gelişmez. SKK, Al' nin bazı serileri gibi füzyon yöntemleriyle kaynaklanamayan benzer ve farklı malzemeleri kaynaklayabilmektedir. SKK, farklı Al alaşımlarının kombinasyonu için çok başarılı bir tekniktir, bu nedenle otomotiv, havacılık ve demiryolu gibi birçok endüstride kullanılmaktadır. SKK yönteminin çalışma prensibi Şekil 2.14'te gösterilmektedir [70,71].



Şekil 2.14. SKK yöntemi çalışma prensibi [71].

SKK tekniğiyle birleştirme gerçekleştirilerek, katmanlı yapı elde edilir. Bu yöntem ile üretilen malzemelerde artık gerilmelerin oluşması, malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sorunu aşmak için Eİ ile üretilen metalik malzemelere ısıtılma işlemi prosesi uygulanmaktadır. Proses parametrelerinin parça kalitelerini etkilemesine göre hassasiyet analizi yapılarak bazı problemler çözülebilmektedir. Bu yöntem kullanılarak yüksek mukavemetli parçaların başarılı bir şekilde üretilmesi mümkündür çünkü yöntem ince yapılı parçaların üretilmesini sağlar. Bu sayede ana metale göre daha yüksek süneklik ve yapısal performans geliştirilir. Ek olarak, yöntem mikroyapısal modifikasyon elde etme ve önemli ölçüde iyileştirme yeteneğine sahiptir, bu nedenle benzersizdir. Bu avantajlarının yanı sıra büyük bileşenleri üretme yeteneğine, çeşitli malzemeleri kaynaklayabilme, spesifik olarak değişken mikro yapılar üretebilme, yüksek derecede tekrarlanabilirlik gibi üstün özelliklere sahiptir. Yöntem ile ilgili çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Şekil 2.15'de SKK yöntemiyle birbiri üzerine eklenme süreci gösterilmektedir [72-78].



Şekil 2.15. SKK Eİ yönteminin gösterimi [78].

LİTERATÜR TARAMASI

3.1. TAEİ Üzerine Çalışmalar

TAEİ teknolojisi yenilikçi, ekonomik ve birçok üstün özelliğe sahip bir yöntem olması sebebiyle son zamanlarda bu teknolojinin gelişimine olan ilgi artmış ve pek çok bilimsel çalışma yapılmıştır [79-82]. Yapılan çalışmalar bu imalat yöntemi ile üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini geleneksel yöntemlerle üretilen malzemelere kıyasla benzer ve daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğunu belirtmektedir [83,84]. Literatüre baktığımızda; TAEİ metodunun farklı malzeme ve gaz altı kaynak yöntemleriyle kullanımına örnekler görebilmekteyiz. Wagas ve arkadaşları [85] MIG kaynak yöntemi kullandıkları TAEİ ile üretilen çelik parçaların mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Tel besleme hızı, voltaj, ark boyu ve kaynak ilerleme hızı gibi kaynak parametrelerini kontrol etmişlerdir. Bu kaynak parametreleri kontrol edilerek homojen mikroyapı sağlanabileceğini, elde edilen yapının mekanik özelliklerinin ve sertliğinin, sektörde ticari olarak kullanılan düşük karbonlu çelik yapılardan daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Bir diğer çalışma ise Xiong ve arkadaşları [86] tarafından gerçekleştirilmiştir. MAG kaynak yöntemi kullandıkları, TAEİ ile düşük karbonlu çelik malzeme üretmişlerdir. Düşük torç eğim açısı, tel besleme hızı ve kaynak ilerleme hızının mikroyapıya etkilerini incelemişlerdir. İşlem için 1.2 mm çaplı HO_8Mn_2Si elektrod teli kullanmışlardır. Koruyucu gaz olarak %95 Ar ve % 5 CO_2 içeriği tercih etmişlerdir. İşlem parametrelerinin 150A, 22V, 5 mm/sn ekleme hızı olduğunu belirtilmiş, parametrelerin çelik malzemenin mikroyapısına etkisini incelemişlerdir. Optimum mikroyapı için akımın sabit tutulmasını, ekleme hızının ve ark voltajının artırılmasını önermişlerdir. Nemani ve arkadaşları [87] TAEİ teknolojisi ile ASTM A36 yumuşak çelik altlık malzeme üzerine bir duvar oluşturmuşlardır. Çalışmalarında 0.9 mm elektrot çaplı ER70S-6 teli, koruyucu gaz olarak saf argon kullanmışlardır. Amaçları elde ettikleri numunelerin yatay ve dikey yönde çekme dayanımı değerlerini ölçmek ve karşılaştırmaktır. Çalışmalarının sonucunda dikey numunelerde sünekliğin azaldığını, ısıdan etkilenen bölgelerde tane kabalaşması gözlemlediklerini söylemişlerdir. Normalizasyon ısı işlemi uygulayarak, ısıdan etkilenen bölgelerde lokalize kırılğan bölgelerin oluşumunu ve tane büyümesini ortadan kaldırmışlardır Yapılan bir diğer çalışma yöntemin yalnızca çelik malzemeler için değil,

Al alaşımları için de başarılı olduğunu göstermektedir. Haselhuhn ve arkadaşları [88] TAEİ ile Al alaşımları üretmişlerdir. MAG kaynak yöntemiyle oluşturdıkları Al parçayı, geleneksel yöntemlerle üretilmiş numuneler ile kıyaslamışlardır. TAEİ yöntemiyle üretilen Al alaşımlarının benzer veya üstün mekanik özellikler gösterdiğini rapor etmişlerdir. Parametrelerin optimum olması sürecin başarısı için oldukça önemlidir. Genel bir ifade ile, TAEİ yöntemi çelik [89] malzemeler başta olmak üzere, Al [90,91], Ni [92], Ti [93] metal ve alaşımlarının üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Sürecin başarısı, genellikle, geleneksel yöntemler ile üretilen aynı metal ve alaşımlar ile kıyaslanarak değerlendirilmektedir. Yakın gelecekte parametrelerin optimizasyonu ile daha başarılı sonuçlar elde edileceği ve TAEİ yönteminin alternatif bir üretim yöntemi olarak benimseneceği düşünülmektedir.

3.2. Alüminyum Alaşımlarının TAEİ Yöntemiyle Üretimi

TAEİ yöntemiyle Al alaşımlarının üretimini inceleyen araştırmaların azlığı, literatürde önemli bir eksikliklerdir. MIG/MAG kaynak yönteminin kullanıldığı çalışmalar daha fazlayken, çalışmamızda bahsedilen çalışmalar dışında TIG kaynak yönteminin kullanıldığı çalışmalara tarafımızca rastlanılamamıştır. Tarafımızca, Mayıs 2022 sonuna kadar yapılan, Google scholar başta olmak üzere birçok kaynak kullanılan literatür taramasında aşağıda belirtilen çalışmalara rastlanmıştır.

TAEİ yeni bir teknoloji olması ve bazı kısıtlamaları olması nedeniyle henüz ticarileştirilmemiştir. Fakat bu teknolojinin iyileştirilmesine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. TAEİ ile Al üretiminde karşılaşılan en büyük zorluklar, çatlaklar, yüzey oksidasyonu ve gözenekliliktir. Al alaşımlarının kaynağı ile ilgili diğer önemli özellikler arasında yüksek termal iletkenlik, yüksek termal genleşme katsayısı, yüksek katılaşma büzülmesi, geniş katılaşma sıcaklık aralığı ve yüksek hidrojen çözünürlüğü bulunmaktadır [94]. Al alaşımlarının kaynağında gözeneklilik en sık karşılaşılan problemlerden biridir. Gözeneklilik, parçaların toplam yoğunluğunu düşürmektedir ve böylece üretilen bileşenlerin mekanik özelliklerini (çekme mukavemeti gibi) negatif etkide bulunmaktadır [95]. Gözenekler, çoğu Al alaşımının üretiminde ve şekillendirilmesinde genel bir problemdir. Mekanik özelliklerin negatif yönde etkilenmesinden kaçınmak için, gözeneklilik, mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Gözeneklilik, ark kaynağı prosesi, proses parametreleri, pasolar arası sıcaklık, tel kalitesi

ve alaşım bileşimi gibi çeşitli faktörlerin bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Gözenek oluşumunun en büyük nedeni ergimiş Al’de yüksek çözünürlüğe sahip olan, ancak katı içinde çok düşük çözünürlüğe sahip olan hidrojen dir. Hidrojen, Al sıvıda 100 g başına 0.69 cm³’te ve katıda 100 g’da 0.036 cm³’te çözünmektedir. Bu çözünürlük farkı nedeniyle, hidrojen, Al’in TAEİ ile üretim sırasında, gözenek oluşumunun, itici güçlerinden biridir [96]. Başlıca hidrojen kaynaklarından biri, yüzeyinde arkta buharlaşabilen ve atomik hidrojene dönüşebilen nem, yağ ve hidrokarbon kirleticileri olan teldir. Ayarkwa ve arkadaşları [97] istenmeyen kirleticilerin önceden varlığının hidrojen çatlaması için büyük bir itici güç olduğunu vurgulayarak, nihai parça özelliklerinin tel kalitesinin etkisini incelemiştir. Proses optimizasyonunun tane yapısını ve gözeneklilik üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla mikroyapısal analizleri yapmışlardır. Tel besleme hızının artmasıyla gözenekliliğin arttığı gözlemlenmişlerdir. Ayrıca tel kalitesinin de gözeneklilik ile yakından ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir.

TAEİ yönteminde Al alaşımlarında kullanımı, gözeneklilik problemi sebebiyle sınırlıdır. Bu tür sınırlamalar, Al parçalarındaki ısııl işlemlerin etkisi hakkında bazı araştırmalara yol açmıştır. Ancak, her Al alaşımı ısııl işleme tabi tutulamamaktadır. Ayrıca ısııl işlem her zaman pozitif etki vermemektedir. Isıl işlem uygulanması, bazı durumlarda Ostwald mekanizmasıyla, küçük gözeneklerin daha büyük olanlarla birleşmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak, ısııl işlem den sonra gözeneklilik daha da yüksek olabilmekte ve mekanik özelliklere negatif etkide bulunabilmektedir. Derekar ve arkadaşları [98] TAEİ tarafından üretilen Al parçaların gözenekliliği üzerindeki pasolar arası sıcaklığın etkisini araştırmıştır ve pasolar arası daha yüksek sıcaklığın gözenekliliği azalttığını gözlemlemiştir. Isı girdisi, katmanlar arası sıcaklık ve katmanlar arası bekleme süresinin, gözeneklilik oluşumu ile ilişkisini rapor etmişlerdir. Al’in TAEİ yönteminde, gözenekliliğin azaltılması, farklı araştırmacılar tarafından uzun süredir araştırılan kritik bir konudur. Gözeneklilik oluşumunu bastırmak için çeşitli yöntemler geliştirilmektedir. Maider ve arkadaşları [99] Al-Mg alaşımlarının CMT ile kaynağında gözenek problemini incelemişlerdir. Biriktirme stratejisinin türünün, koruyucu gazın ve gaz akış hızının gözenekliliği doğrudan etkilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca pasolar arası sıcaklık, tel kalitesi ve alaşım bileşimi gibi çeşitli faktörler de gözenek problemine sebep olabilmektedir. Gaz akış hızı arttıkça, porozite oranının azaldığını, göz önüne sermişlerdir. Bununla birlikte, çok katmanlı bir TAEİ işleminde, üst üste binen yeni

katmanın ısı girdisi gözeneklerin büyümesine katkıda bulunabilmektedir. Ark modlarının, mikro yapı özellikleri ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini inceleyen Lu ve ark. [100], gözenek oluşumunda 5183 alüminyum alaşımı biriktiren ark modlarının etkisini analiz etmiştir. Biriktirme sırasındaki ısı girdisinin yüksek bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. E. M. Ryan ve ark. [101], ER2319 tel ile yaptıkları çalışmalarında, gözenek oluşumunu önlemek için en kritik parametreyi belirlemek istemişlerdir. Tel besleme hızı başta olmak üzere birçok parametreyi incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, proses parametrelerinin, parçanın nihai kalitesi üzerinde, tel yüzey kalitesi kadar büyük bir etkisi olmadığını rapor etmişlerdir. Bu anlamda, pürüzlü bir tel yüzeyinin, biriken malzemedeki hidrojen absorpsiyonunu arttıran gözenekliliği, artırabildiğini ifade etmişlerdir. Tel yüzeyinin, nem, kirlenici maddeler ve oksitlerin tutulması için yüzeysel alanın ve tercihli bölgelerin genişlemesi ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Ryan ve ark, kaynak telindeki partiden partiye değişkenliğin, gözeneklilik alanı ve boyut dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Tel karakterizasyonunun yüzey kalitesinden etkilendiğini rapor etmişlerdir. Al TAEİ bileşenlerinde gözenek oluşumunu anlamak için yüzey işlemleri, yüzey hidrojen içeriği ve ark stabilitesinin daha fazla araştırılması gerektiğini belirtmişlerdir [102]. Ayrıca, yüzey kaplamasının, kontaminasyon için tuzak alanları oluşturan çentikler ve yüzey alanında artışa neden olan pürüzlü bir yüzey nedeniyle tel üzerindeki hidrojen içeriğini etkileyeceğini belirtmişlerdir. Hidrojen içeriğindeki bir artış gözenekliliği artıracığını rapor etmişlerdir. Bu sonuç, yapılan diğer çalışmalarla da benzeşmektedir. Telin temizliğinin, üretimin gerçekleştiği ortamın şartlarının, koruyucu gazın ve koruyucu gazın akış hızının, gözenek oluşumuna etkisi yadsınamazdır. Gözenekliliği azaltmak ve hatta ortadan kaldırmak için prosesler geliştirilmekte, telin karakterizasyonu değerlendirilmekte ve üretim sonrası ısıtma işlemleri araştırılmaktadır [103].

Oksit tabakasının oluşumu ve katılaşma davranışı nedeniyle Al alaşımlarının kaynağı her zaman sorunlu olmuştur. Oksidasyon yeniden eritme süreçlerinden kaynaklanan gözenekler ve çatlaklar gibi kusurları etkilemektedir. Daha yüksek bir erime noktasına sahip olan alümina, eriyik havuzuna girer, erimiş havuzun içinde kalır ve bu durum gözeneklere ve iç kusurlara neden olmaktadır. Bu nedenle oksidasyon ele alınması gereken önemli bir sorundur. Farklı sıcaklıklarda, farklı özellikler gösteren, farklı oksidasyon olayları nedeniyle, sıcaklıklar proses moduna, tel besleme hızına, gerilime ve

akıma bağılı olarak büyük ölçüde değişebileceğinden TAEİ için önemli bir konudur. Bu sebeple konu hakkında birçok çalışma yürütölmekte, oksit probleminin yol açtığı gözeneklilik gibi diğör sorunların çözümü aranmaktadır. Parametrelerin değişime etkisi incelenmekte, alakalı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan birini yürüten Geng ve arkadaşları [104], akımını, tel besleme hızını ve ilerleme hızını değiştirerek 5A06 Al alaşımı ile deneyler yapmışlardır. Akım değörlerinin 160A kadarlık artışıyla en yüksek mekanik özellikleri elde etmişlerdir. Kaynak parametrelerinin yanı sıra soğutma süresi, biriktirme yönü ve hızı da yöntemin başarısı için büyük önem taşımaktadır. Oyama ve arkadaşları [105] CMT tekniğı ile ürettikleri Al alaşımlarının her katmanını için ısı kaynağının modifikasyonunu ayarlamış, biriktirme stratejilerinin yöntem başarısı için önemli olduğunu belirtmişlerdir. Birçok araştırmacı, Al ve alaşımlarının mekanik ve mikro yapısı gibi özelliklerini iyileştirmek için deneyler yapmakta ve işlem modifikasyonları benimsemektedir. Heard ve arkadaşları [106] 4047-Al, TAEİ yöntemi için MIG kaynak yöntemi kullanmıştır. Heard, Si-ötektik fazların, dökme 4047-Al ile karşılaştırıldığında sünekliğı iki katına çıkaran lifli bir morfolojiye sahip olduğunu gözlemlemiştir. Arana ve arkadaşları [107] 1,2 mm çapında ER5356 dolgu metaliyle (CMT) esaslı TAEİ gerçekleştirmiştir. 4 mm kalınlığında AA6082-T6 substratı kullanmışlardır. Gaz akış hızını, 18 L/dk 25 L/dk ve 30 L/dk olarak değiştirmişlerdir. Gaz akış hızının oluşturulan parçaya etkisini tartışmışlardır. Artan gaz akışının, gözenekliliğı olumlu etkide bulunduğunu belirtmişlerdir. Genel bir ifade ile TAEİ teknolojisiyle istenen özelliklerde parça üretimi için, işlem parametreleri büyük öneme sahiptir.

TAEİ yöntemiyle yüksek mekanik özelliklere sahip numuneler elde etmek amacıyla, birçok metot denenmektedir. Fu ve arkadaşları [108] gözenekliliğı, sıcak tel yardımıyla önemli ölçüde azaltılabileceğini belirtmişlerdir ve Al bileşenlerin mekanik özelliklerinin, gözenekliliğın azaltılmasıyla iyileştirildiğini rapor etmişlerdir. Tel yüzeyindeki nem, yağ ve diğör hidrojen kirleticiler, yüksek sıcaklık koşullarında gaz halinde hidrojen üretmek için ayrıştırılabilmekte ve buharlaştırılabilmektedir. Uyguladıkları sıcak tel tekniğinin, tel yüzey koşullarının iyileştirilmesinde olumlu bir rol oynadığını söylemişlerdir. Isının, eriyik havuzuna girmeden önce tel yüzeyindeki hidrojen kirleticilerini buharlaştırıp, ayrıştırarak telin yüzey koşullarını iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Zhao ve arkadaşları [109] gaz metal ark kaynağı tabanlı işleme parametrelerinin biriken katmanın geometrik boyutları üzerindeki etkisini analiz etmek

için 5356 Al alaşımını üretmişlerdir. Birikmiş tabakanın genişliği, ark akımının artmasıyla doğrusal olarak arttığını ve tarama hızının artmasıyla bunun tersi bir eğilim meydana geldiğini belirtmişlerdir. Tarama hızı sabit olduğunda, biriktirilen katman sayısı arttıkça, genişliğin biraz arttığını ve her katmanın yüksekliğinin biraz azaldığını ortaya koymuşlardır. Farklı metotlardan biri olan çift tel veya çoklu tel besleme ile alaşım elementi içeriğini iyileştirebilmektedir. Wang et al. [110] 4043'ün mikro yapısını ve özelliklerini incelemişlerdir. Ark voltajı, kaynak akımı, kaynak hızı ve tel besleme oranı gibi parametrelerin, boyutsal doğruluk üzerinde ve Al alaşımının mikro yapısı ve mekanik özellikleri belirleyici bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kisarev ve Kobernik [111] farklı alt katman sıcaklık etkisini incelemek için, katmanlar arası süreyi değiştirmişlerdir. Alt tabakanın sıcaklığına bağlı olarak, CMT tekniğiyle ER5556A üretmişlerdir. Alt katman sıcaklığının, işlem sırasında her katmanın geometrisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Alt katmanın sıcaklığına göre genişlik ve yüksekliğin bağımlılığının doğrusal olduğunu söylemişlerdir. Hönnige ve arkadaşları [112] TAEİ ile üretilmiş Al parçada haddelemenin etkisini incelemiştir. ER2319 kaynak teli kullanmışlardır. İşlem sonrasında haddelemenin parçalarda artık gerilmeleri ve bozulmayı kontrol etmede çok etkili olduğunu rapor etmişlerdir. Genel bir ifade ile, TAEİ yöntemiyle üretilen Al alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için proses parametreleri incelenmekte, farklı teknikler denenmektedir.

TAEİ yönteminin başarısını, döküm gibi geleneksel yöntemlerle üretilen alaşımlar ile karşılaştırarak, kanıtlayan çalışmalar mevcuttur. Langelandsvik ve arkadaşları [113] bu çalışmalardan birine imza atmıştır. TAEİ ve döküm yöntemiyle üretilen Al-Si alaşımlarının mikroyapısı ve mekanik özellikleri incelenmiş, farklı yöntemlerle üretilen numuneler birbirleriyle kıyaslanmıştır. TAEİ ile üretilen Al alaşımının katılaşma sırasında daha yüksek soğutma hızına ve dolayısıyla daha ince bir mikro yapıya sahip olduğunu belirtmişlerdir. TAEİ ile üretilenlerin, döküm yöntemiyle üretilenlere göre, üstün mekanik özellikler gösterdiğini ifade etmişlerdir. Fakat döküm yöntemine kıyasla oldukça yavaş bir üretim yöntemi olduğunu, bu nedenle, yüksek mekanik bütünlük gerektiğinde veya döküm kalıbı tasarımları çok karmaşık hale geldiğinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak, TAEİ yöntemi ile farklı içeriğe sahip tel malzemeleri aynı anda biriktirilmektedir. Qi ve arkadaşları [114] iki farklı Al kaynak telleri kullanarak, TIG kaynağı ile farklı serilerin üretimi

gerçekleştirmişlerdir. ER2319 ve ER5087 tellerini kullanmışlar, numunelerin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. TAEİ yöntemiyle benzer veya benzer olmayan alaşımlar kullanılabilmekte, farklı içeriğe sahip iki kaynak teli aynı zamanda biriktirilebilmektedir.

3.3. Literatür Özeti Ve İlgili Literatür Açığı

TAEİ yönteminin, lazer destekli yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmesine rağmen, literatürde henüz çok sayıda çalışma yapılamamıştır. Yapılan çalışmalar, çoğunlukla diğer metal Eİ yöntemlerine dayanmaktadır. Bu durumun yanı sıra literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, MIG/MAG yönteminin kullanıldığı, TIG kaynak yönteminin kullanımıyla alakalı çok az çalışma olduğu görülebilmektedir. TAEİ, büyük yapısal parçaların etkin üretimi için en verimli işleme yöntemlerinden biri olarak kabul edilmiştir [115-118]. Bununla birlikte, yöntemle alakalı bilinmeyenlerden dolayı süreç, Al alaşımları için yaygın olarak kullanılmamaktadır. Literatürde AA5356 Al alaşımının TIG kaynaklı TAEİ yönteminde kullanımını içeren hiçbir makaleye rastlanılamamıştır. Bu literatür açığına şu durumun sebep olduğu düşünülmektedir: Yüksek biriktirme oranı gibi çeşitli faydaları doğrultusunda, soğuk metal transfer (CMT) tekniğine odaklanılmış ve araştırma yönü MIG/MAG yöntemlerine kaydırılmıştır. O zamandan beri Al'nin TAEİ için TIG uygulamasına yönelik neredeyse hiçbir çalışma yapılmamıştır [119]. Dolayısıyla tez, literatüre özgün katkılarda bulunacaktır.

Yukarıda bahsedildiği gibi bu tezi, yapılan diğer tezlerden ayıran birçok unsur vardır. Bu farklardan en belirginini, malzeme seçimidir. YÖK tez tarama merkezindeki TAEİ yöntemini konu alan az sayıda tezlerin, hiçbirisi Al alaşımlarını içermemektedir. Düşük alaşımlı çelik dışında farklı bir malzeme konu alınmamıştır. Literatürün kapsamlı incelenmesi sonucunda, Al alaşımları için TAEİ yönteminde TIG kaynağının kullanımını konu alan yeterince çalışma olmadığı, literatür eksikliği bulunduğu gözlemlenmektedir. Tel içeriği, tel çapı, altlık (substrat) malzeme içeriği ve yöntem parametreleri, tezi özgün kılan diğer faktörlerdendir. Bütün bu farklılıklarıyla, literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılmaktadır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzemeler

Bu çalışmada altlık olarak AA5754 Al alaşımı kullanılmış, ilave tel olarak 2,4 mm çapında ER5356 Al alaşımı seçilmiştir. ER5356 teli ve 1,6 mm kalınlığında AA5754 alt tabakasının bileşimleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir [120]. Ayrıca ER5356 kaynak telinin mekanik özellikleri Tablo 4.2’de gösterilmektedir [121]. TAEİ işlemi ile üretime başlamadan önce yüzey mekanik olarak temizlenmiştir. Önce metalik parlaklık açığa çıkana kadar yüzey bir tel fırça ile zımparalanmıştır ve ardından aseton ile temizlenmiştir. Bu sayede yüzeyindeki yağ, kir ve korozyon tabaka ortadan kaldırılmıştır.

Tablo 4.1. ER 5356 ve AA5754 altlığın kimyasal kompozisyonu [120].

Alaşımlar	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Ti	Al
ER5356	<0,25	<0,40	<0,10	4,9	0,05-0,20	0,05-0,20	0,06-0,20	Kalan
AA5754	0,0-0,40	0,0-0,40	0,0-0,10	2,60-3,60	0,0-0,50	0,0-0,30	0,0-0,15	Kalan

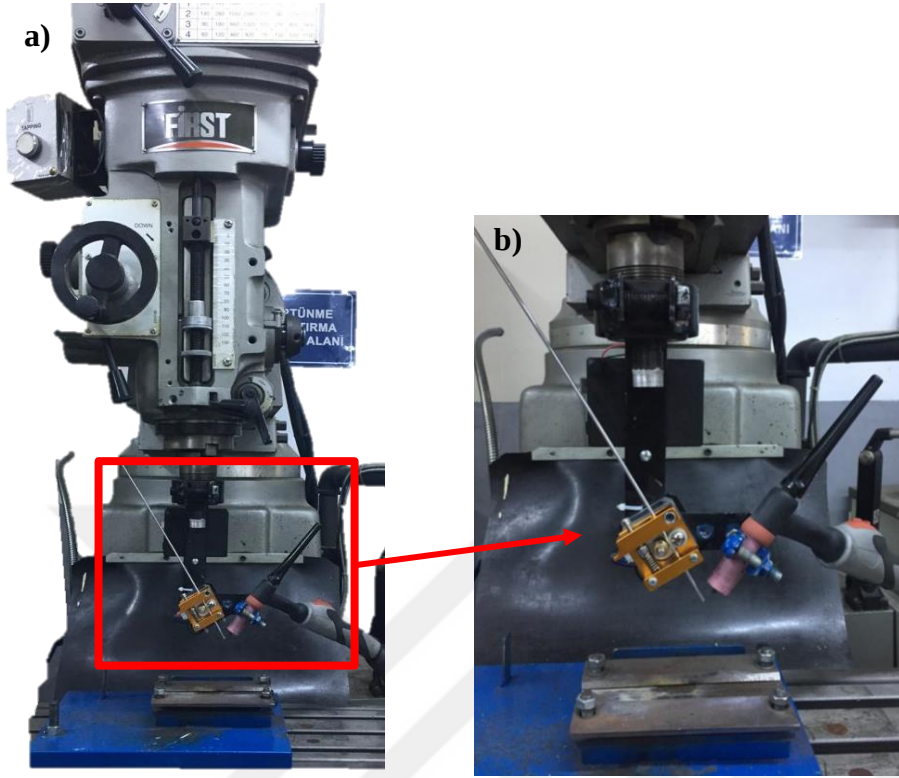
Tablo 4.2. ER5356 kaynak telinin mekanik özellikleri [121].

Özellikler	Değerler
Akma Dayanımı	110-120 MPa
Çekme Dayanımı	240-296 MPa
Uzama	17-26 (%)
Ergime Derecesi	562-633 °C

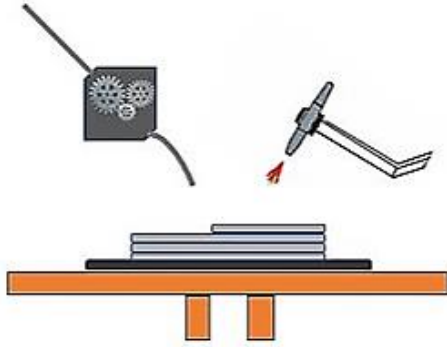
4.2. Deney Düzenegi

Deneyde kullanılan TAEİ sistemi için üç eksenli bir freze, bir TIG kaynak makinesi ve otomatik tel besleme ünitesi kullanılmıştır. TAEİ işlemi, Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde bulunan nümerik kontrollü dikey freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Deney düzenegi Şekil 4.1’de gösterilmektedir. 2100 kg ağırlık kapasiteli, 3 yönlü tabla hareketi olan 16 kademeli devir gücüne sahip freze Şekil 4.1 a)’da gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.1 b)’de otomatik tel besleme ünitesi de gösterilmektedir. TIG kaynak makinesi bir Fronius AC/DC çift amaçlı kaynak makinesidir ve AC güç kaynağı seçilmiştir. Deney sisteminin ve numune

oluşturma işleminin şematik gösterimi şekil 4.2’de görülmektedir.



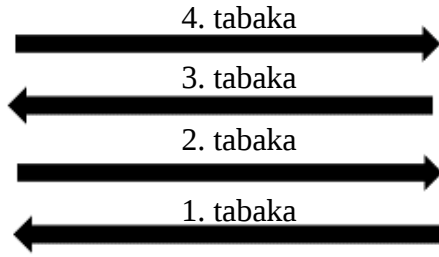
şekil 4.1. Deney düzeneği; a) Freze tezgahı üzerine kurulu sistem, b) Tel besleme nitesi.



şekil 4.2. TAEİ yönteminin şematik gösterimi.

TAEİ işlemi sırasında tel besleme nitesi ve TIG kaynak torcu frezeye entegre edilmiştir. Frezenin 3 yönlü tabla hareketi kullanılarak, kaynak torcunun ve tel besleme ünitesine bağlı kaynak telinin hareketi sağlanmıştır. Otomatik olarak tel beslenirken, belirli açıyla sisteme entegre edilen TIG kaynak torcu kaynak işlemini gerçekleştirmektedir. Atılan her kaynak tabakasından sonra kaynak yönü değiştirilmiştir. Bunun sebebi önceki kaynakta

oluşan hataların düzeltilmesini sağlamaktır. Bu sayede biriktirme (ekleme) yönü değiştirilerek, numune üretimi gerçekleştirilir. Strateji Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Kaynak tabakalarının biriktirme (ekleme) yönü [122].

4.3.TAEİ Proses Parametreleri

TAEİ prosesi ile ön deneysel çalışmalar sonrasında Tablo 4.3’de belirtilen optimum kaynak parametreleri ile iki numune üretilmiştir. Tel besleme hızı 0,7 m/dk. ve hareket hızı 320 mm/dk. dır. Koruyucu gaz olarak %99,99 Argon kullanılmıştır. Korucu gaz akış hızı 12 l/dk olarak belirlenmiştir. Ark voltajı 14-18 V ve ark yüksekliği 5 mm’ dir. Parametreler Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Proses parametreleri.

Parametreler	Parametre değerleri
Akım (A)	90-105
Kaynak hızı (mm/dak)	320
Tel besleme hızı (m/dak)	0.7
Voltaj (V)	14-18
Koruyucu gaz akış hızı (L/dak)	12
Ark boyu (mm)	5

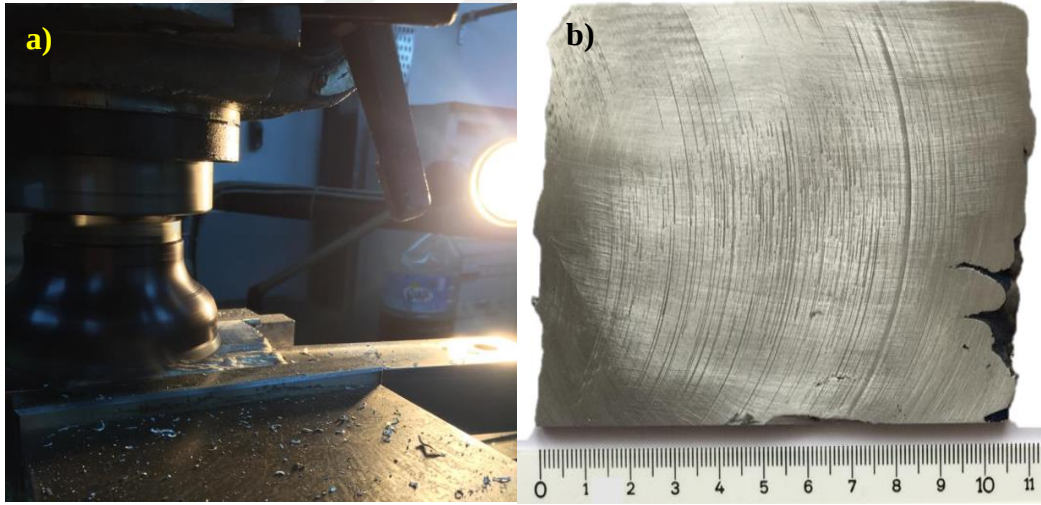
4.4.TAEİ Yöntemiyle Numune Üretimi

TAEİ yöntemiyle üretilen numune 1’in boyutları 105 x 64 x 7 mm numune 2’ nin boyutları ise 120x70x10 mm’dir. Numune 1’in üretiminde 90 katman biriktirilmiştir ve her bir katmanın kalınlığı yaklaşık 1,16 mm ve yüksekliği 0,7 mm’dir. Numune 2’de 120 katman biriktirilmiştir. Her bir katman kalınlığı yaklaşık 1 mm ve yüksekliği 1,7 mm’dir. Akım değeri arttıkça katman genişliği artmaktadır. Katmanlar arası soğutma süresi, Ar gazı koruması altında 45 s olarak belirlenmiştir. Numune 2 Şekil 4.4’te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. TAEİ yöntemiyle üretilen numune.

Busachi ve ark. kaynak tabakalarının üst üste yığılmasından dolayı yaklaşık 1-2 mm girintili yüzeyler oluşturduğunu ve bu kusurların talaş kaldırma yöntemleri ile düzeltilebileceğini ifade etmişlerdir. Bu nedenle TAEİ işleminden sonra, pasoların oluşturduğu kaynak duvarları, 5754 alt taban plakasından ayrılmış, numunelerin yüzeyleri freze işlemiyle düzeltilmiştir TAEİ sonrası bitirme işlemi Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Şekil 4.5 a)'da freze işlemi ve Şekil 4.5 b)'de işlem görmüş numune gösterilmektedir.



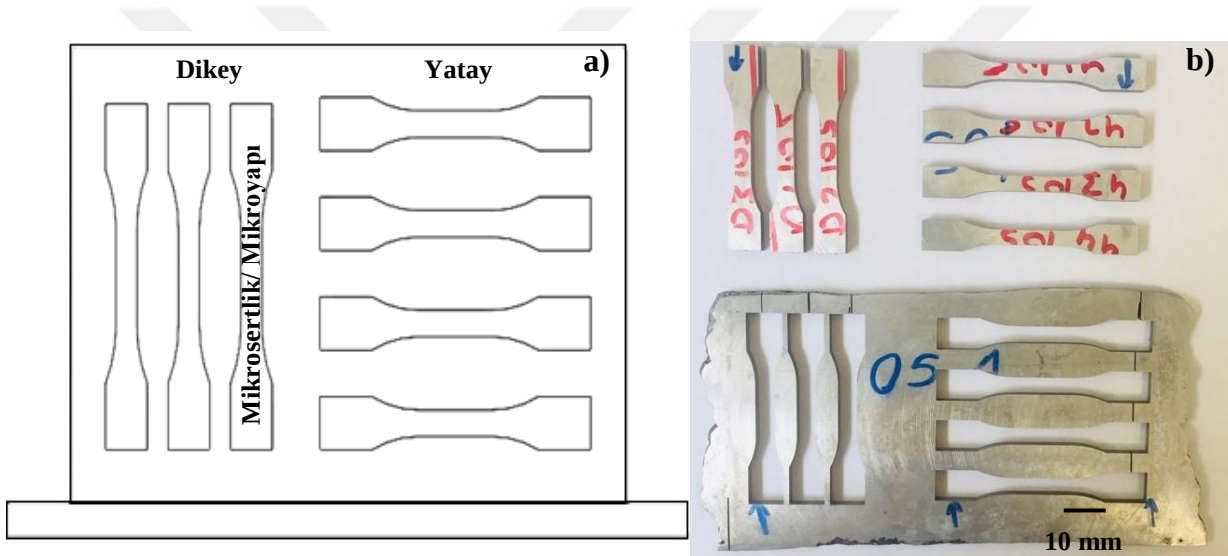
Şekil 4.5. TAEİ sonrası frezeleme a) Frezeleme işlemi, b) Frezeleme sonrası.

4.5. Mekanik Deneyler

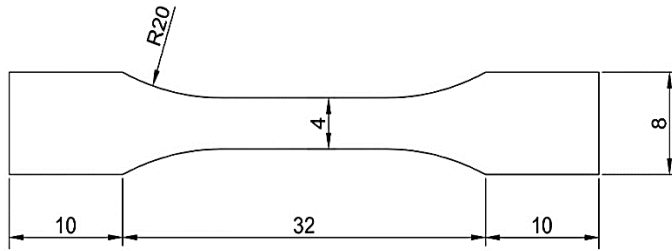
TAEİ yöntemiyle üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi ve geleneksel yöntemler ile üretilen AA5356 alaşım ile karşılaştırma yapılması için çekme testi uygulanacaktır.

4.5.1. Mekanik deney için numune hazırlama

Dört farklı yükseklik seviyesindeki numunelerden dört yatay ve üç dikey çekme numunesi alınmıştır. Çekme numuneleri Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Şematik gösterimi Şekil 4.6 a)'da gösterilmektedir. Çekme numuneleri, kaynak dikişine paralel ve dik olarak ISO 6892-1-2009 standardına göre tel erozyon kesme yöntemiyle hazırlanmıştır [123]. Çekme numunesi örneği Şekil 4.6 b)'de gösterilmektedir. Mikroyapı ve mikrosertlik analizi için çekme numunelerinin ortasından bir parça alınmıştır. Bu şekilde, katmanlar arası sertlik değişimi ve mikroyapı analizi yapılmıştır. Tel erozyon yöntemiyle kesilen numuneler Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Çekme testi numuneleri; a) Numunelerin şematik görünümü b) Tel erozyon ile üretilen numuneler.

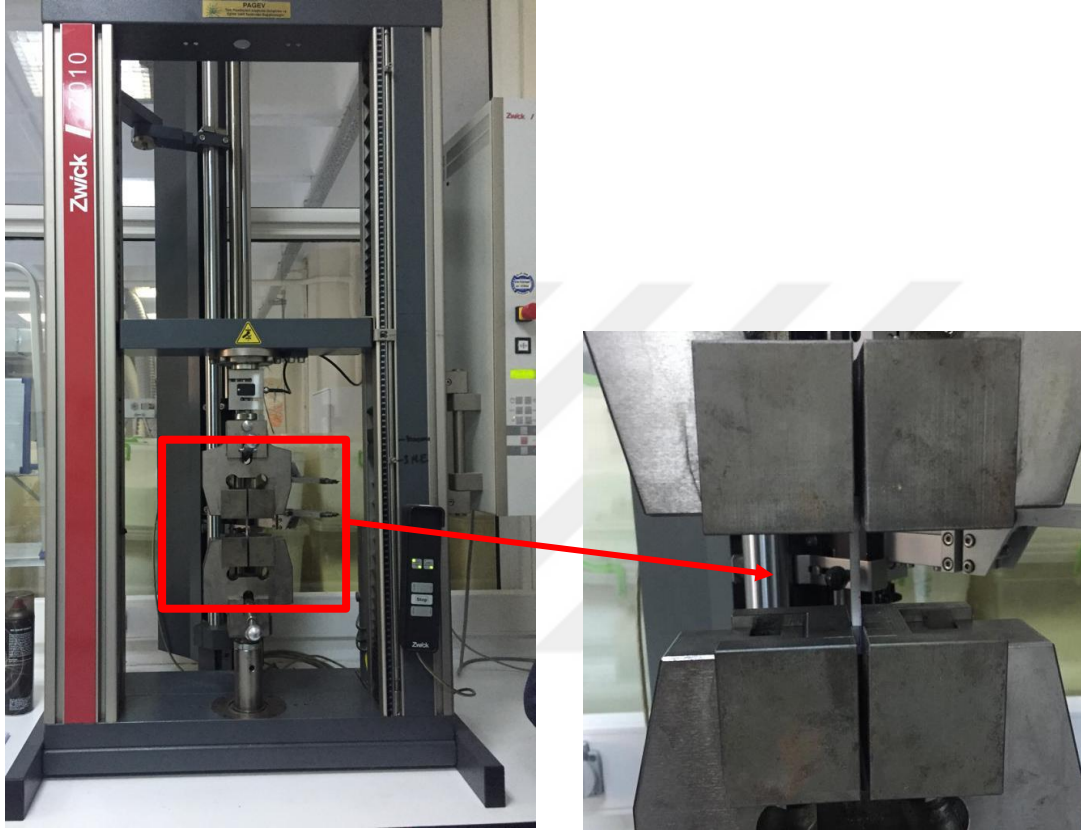


Şekil 4.7. Çekme deney numunesinin geometrik şekli ve boyutları.

4.5.2. Çekme testi

AA5356 numunelerin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve sünekliği gibi mekanik

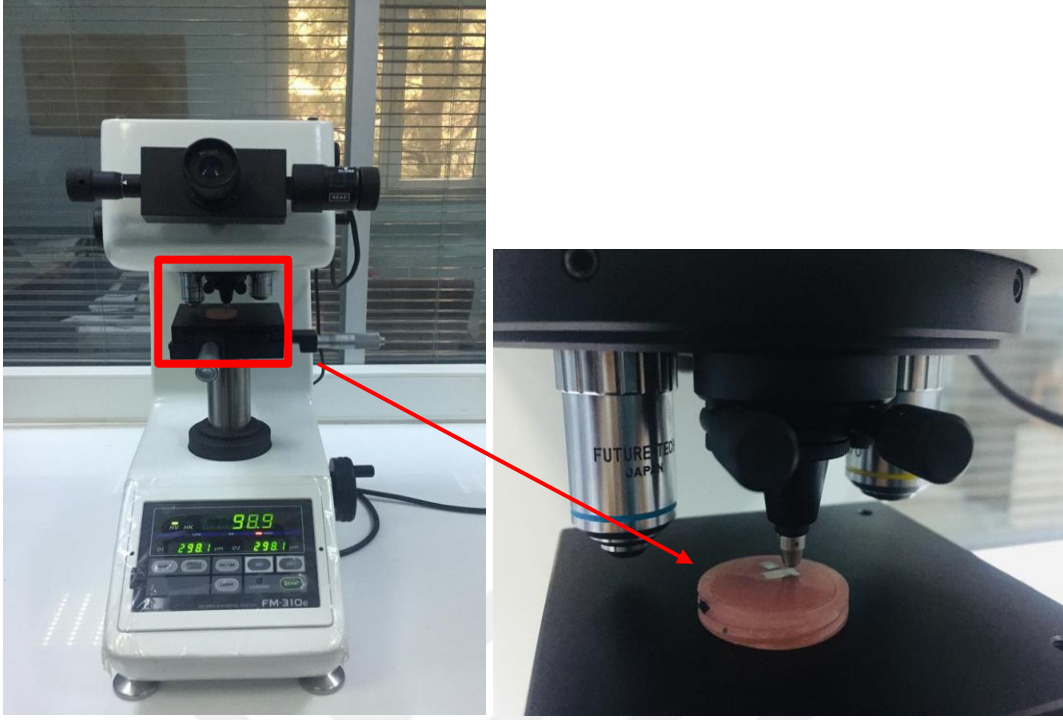
özelliklerinin değerlendirilmesi ve geleneksel yöntemler ile üretilen AA5356 alaşımlar ile karşılaştırılması için çekme testi yapılmıştır. Çekme testi Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Çekme testi 5 mm/dak hızında, oda sıcaklığında, universal bir makine ile gerçekleştirilmiştir [124]. Zwick marka Z010 universal tip çekme cihazı Şekil 4.8 a)’da gösterilmektedir. Çekme numunesi Şekil 4.8 b)’de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Çekme testi; a) Zwick marka Z010 universal tip çekme cihazı, b) çekme numunesi.

4.5.3. Mikrosertlik ölçümleri

Zımpara ve parlatma işleminin ardından TAEİ ile üretilen parçanın mekanik özelliklerini incelemek amacıyla sertlik testi yapılmıştır. Test Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Katmanlar arasındaki sertlik değişimlerini incelemek için Future-Tech FM310 marka mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Cihaz Şekil 4.9 a)’da gösterilmiştir. 200 g yük kullanılarak gerçekleştirilen işlemde on farklı ölçüm yapılarak, doğru sonuç için elde edilen mikrosertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır. Sertlik numunesi Şekil 4.9 b)’de gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Sertlik testi; a) Future-Tech FM310 mikrosertlik cihazı, b) Numunenin mikrosertliğinin ölçülmesi.

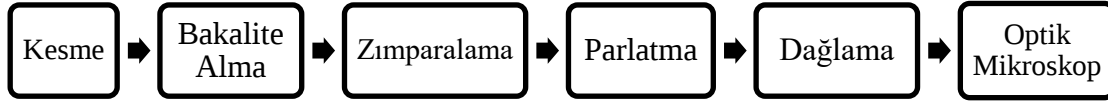
4.6. Mikroskop İncelemeleri

Üretim yönteminin mikroyapı üzerindeki etkilerini görmek ve mekanik testlerin etkilerini anlamak için optik mikroskop ve SEM görüntüleri alınmıştır. Ayrıca XRD, EDS ve EBSD analizleri yapılarak sürecin malzeme üzerindeki etkisinin detaylı olarak incelenmesi amaçlanmaktadır.

4.6.1. Optik mikroskop (OM)

Numunelerin mikroyapısal değişikliklerinin gözlemlenebilmesi için, mikroskopla bakılmadan önce belirli işlem basamaklarından geçirilmesi gereklidir. Bu işlem basamakları, kesme, kalıplama, zımparalama, parlatma ve dağlamadır. Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Öncelikle görüntülenmek istenen bölgelerden kesitler alınır. Alınan kesitler sertlik analizleri ve mikroskopik görüntülemenin yapılabilmesi için kalıplanmalıdır. Numunelerin yüzeyleri pürüzlü ve çiziklidir. Mikroskopta görüntülenebilmesi için son derece düzgün bir yüzeye ihtiyaç duyulur bu nedenle düzgün bir yüzey elde edebilmek için zımparalama işlemi yapılmalıdır. Zımparalama işlemini

parlatma ve daşlama işlemleri takip etmektedir. Bu işlem basamakları sayesinde, düzgün yüzeyler elde edilmektedir ve mikroskopta numunelerin mikroyapıları incelenebilmektedir.



Şekil 4.10. Mikroyapı incelemeleri için akış şeması

TAEİ yöntemiyle üretilen parçaların mikroyapılarını incelemek için numuneler hassas kesme cihazıyla kesilmiştir. Üst ve alt katmanlar arası farklılıkların incelenebilmesi, iki ayrı amperde üretilen parçaların arasındaki farkların gözlemlenebilmesi ve kırılma yüzeylerinin değerlendirilebilmesi için uygun bölgelerden kesitler alınmıştır. Bu kesitler, mikroyapının incelenmesi ve sertlik analizi için soğuk kalıplama yöntemiyle bakalite alınmıştır. Bu işlem için bir birim sıvı sertleştirici ve iki birim toz ile hazırlanan akrilik çözeltisi kullanılmıştır. Bakalite alınan numuneler sırasıyla 400, 800, 1200 ve 2500 disklerle zımparalanmıştır. Zımpara işlemi kademeli olarak gerçekleştirilmektedir. Her aşamada daha ince aşındırıcılar kullanılmaktadır. Bu sayede her kademede numunede oluşan çizikler ve deformasyon bir sonraki zımparada en aza indirilmektedir. Zımpara işleminden sonra parlatma işlemi yapılmaktadır. Parlatma işlemi otomatik, elektrolitik ve kimyasal olarak yapılabilir. Çalışmamızda mekanik parlatma işlemi kullanılmıştır. Bu işlem için parlatma çuhası ve 3µm elmas partiküllü parlatma solüsyonu kullanılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için numune hazırlama Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Şekil 4.11 a)'da zımpara diskleri, parlatma keçesi ve Şekil 4.11 b)'de zımpara/parlatma cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Numune hazırlama; a) Zımpara ve parlatma diskleri, b) Zımparalama ve parlatma cihazı.

Numuneler tüm hazırlık kademelerinden sonra yıkanmıştır. Parlatılan numune alkol ile yıkanarak temizlenmiştir. Yıkama işleminden sonra ılık hava ile kurutulmuştur. Ardından dağlama işlemine geçilmiştir. Dağlama işlemi, iç yapıda bulunan fazların ve tane sınırlarının metal mikroskobunda görüntülenebilmesi için gereklidir. Mikroyapı incelemeleri için kimyasal dağlama yapılmıştır. AA5356 Al alaşımı için, Al alaşımlarının dağlanmasında yaygın kullanılan Keller dağlama reaktifi kullanılmıştır. Keller asit çözeltisi, 5 ml nitrik asit (HNO_3), 3 ml hidroklorik asit (HCl), 2 ml hidroflorik asit (HF) ve 190 ml sudan oluşmaktadır. Dağlama işleminde kullanılan asitler Şekil 4.12’de gösterilmektedir. Dağlama işlemi yaklaşık 30-40 saniye sürmüştür.



Şekil 4.12. Dağlama işlemi

Mikroskopik yapıdaki değişiklikleri gözlemek için optik mikroskop kullanılmaktadır. Optik mikroskop çeşitli malzeme gruplarının içyapısını incelemek için kullanılır. Zımparalama, parlatma ve dağlama numune hazırlama işlemlerinden sonra optik mikroskopta görüntü elde edilebilmektedir. Şekil 4.13'te optik mikroskop gösterilmektedir.



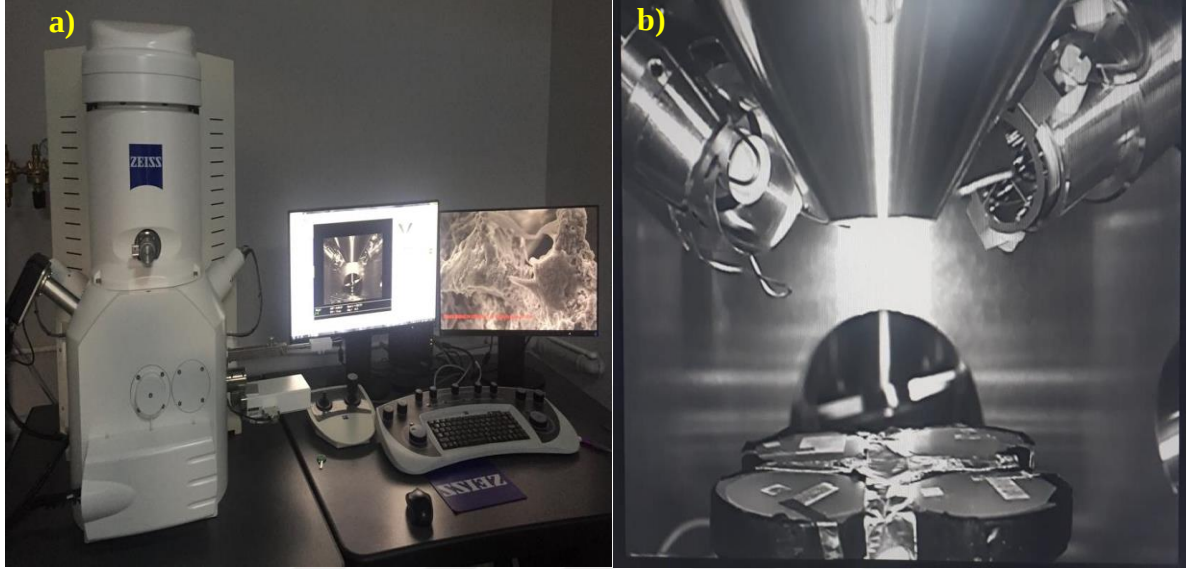
Şekil 4.13. Optik mikroskop

4.6.2.Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri ve EDS analizi

SEM analiz için büyütölmüş bir görüntü üretmek üzere bir elektron ışını ile bir numuneyi tarayan bir test işlemidir. Elektron mikroskobunda yüksek büyötmelerde gerçekleştirilir, yüksek çözönlörlöklö görüntöler üretilmektedir ve çok küçök özellikleri ve nesneleri hassas bir şekilde ölçebilmektedir. EDS analizi ise malzemelerin kimyasal karakterizasyonunu/element analizini sağlayan analitik bir tekniktir. Bir atom elektron demetine maruz kaldığında, atom numarasına özğü karakteristik X-ışınları yaymaktadır. Örneğin tek bir noktada veya geniş bir bölgede, çizgi tarama ve elementel haritalama dahil olmak üzere, bir numunenin element kompozisyonunun analiz edilmesini sağlamaktadır [125,126].

TAEİ ile üretilen numunelerin mikroyapılarını incelemek amacıyla, SEM incelemesi yapılmıştır ve miroyapıyı daha iyi tanımlayabilmek için mikroyapı fotoğrafları üzerinden

elementel analizler (EDS) alınmıştır. SEM analizi Şekil 4.14'te gösterilmektedir. SEM görüntüleri Şekil 4.14 a)'da gösterildiği gibi ZEISS cihazı kullanılarak elde edilmiştir. SEM analizi için makineye yerleştirilen numuneler de Şekil 4.14 b)'de gösterilmektedir. OM için önceden hazırlanmış iş parçaları kullanılmıştır.



Şekil 4.14. SEM; a) ZEISS marka cihaz, b) analiz sırasında numuneler

4.6.3.X-ışını kırınım yöntemi (XRD)

XRD tekniği, bir kristal düzleminin birim hücre boyutlarıyla birlikte kristalin atom düzlemleri arasındaki uzaklığı belirleyebilen bir tekniktir. Kristaller, düzenli atom dizileridir. X ışınları ise elektromanyetik radyasyon dalgaları olarak düşünülebilir. Kristal atomlar, esas olarak atomların elektronları ile etkileşim yoluyla gelen X-ışınlarını saçmaktadır. Bu fenomen elastik saçılma olarak bilinir; elektron saçıcı olarak bilinir. Düzenli bir saçılım dizisi, düzenli bir küresel dalga dizisi üretir. Yönlerin çoğunda, bu dalgalar yıkıcı girişim yoluyla birbirlerini yok ederler, ancak Bragg yasasıyla belirlendiği gibi birkaç spesifik yöne yapıcı bir şekilde eklerler:

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (4.1)$$

d, kırınım yapan düzlemler arasındaki boşluk olduğunda, θ gelen açıdır, n bir tamsayıdır ve λ ışın dalga boyudur. Spesifik yönler, yansıma adı verilen kırınım deseninde noktalar olarak görünür. Sonuç olarak, X-ışını kırınım desenleri, düzenli bir saçıcı dizisine çarpan elektromanyetik dalgalardan kaynaklanmaktadır [127].

XRD, faz tanımlamasının yanı sıra, iç gerilimler ve kusurlar nedeniyle gerçek yapının ideal olandan nasıl saptığı hakkında da bilgi vermektedir. TAEİ ile üretilen numunenin ana malzemeden bir değişiklik olup olmadığını saptamak amacıyla yapılmıştır.

4.6.4. Elektron geri saçılım difraksiyonu (EBSD) analizi

EBSD, bir numunenin mikro yapısı hakkında kristalografik bilgi veren SEM tabanlı bir tekniktir. EBSD'de, sabit bir elektron ışını, eğik bir kristalin numune ile etkileşime girer ve kırınan elektronlar, bir floresan ekranla tespit edilebilen bir model oluşturur. Kırınım deseni, kristal yapısının ve üretildiği numune bölgesindeki oryantasyonun karakteristiğidir. Bu nedenle kırınım modeli, kristal oryantasyonunu belirlemek, kristalografik olarak farklı fazlar arasında ayırım yapmak, tane sınırlarını karakterize etmek ve yerel kristalin mükemmellik hakkında bilgi sağlamak için kullanılmaktadır. EBSD, kristalografik bilgi sağlamak için kullanılan SEM' e bir eklenti bir dedektör olarak kullanılmaktadır. Malzeme karakterizasyonuna yardımcı olmakta ve çok sayıda farklı uygulama alanına uygulanmaktadır. Yaygın olarak kullanıldığı alanlardan biri de Eİ teknolojisi [128,129].

EBSD analizi ile numunelerin tane yapısı hakkında bilgi edinmek amaçlanmıştır. Numuneler, birbiri üzerine kaynaklanarak üretildiği için, ilk katman ve son katman arasındaki farkların izlenmesi hedeflenmiştir. EBSD analizi Şekil 4.15'te gösterilmektedir. EBSD analizinin yapıldığı, SEM laboratuvarı Şekil 4.15 a)'da gösterilmektedir. Tescan Maia3 XMU ile bir EBSD Oxford, Nordlys dedektörü Şekil 4.15 b)'de gösterilmektedir.



Şekil 4.15. EBSD analizi; a) SEM laboratuvarı, b) Oxford Nordlys dedektörü.

4.6.5. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) analizi

AFM analizi, yüzey topografisini ölçmek için atomik çözünürlüğe sahip görüntüler sağlamaktadır. Numunelerin yüzey pürüzlülüğünü angstrom ölçeğine kadar ölçebilmektedir. AFM analizi, bir yüzey görüntüsü sunmaya ek olarak, yükseklikler ve diğer boyutlar gibi özellik boyutlarının nicel ölçümlerini de sağlamaktadır. Ek olarak, AFM, ölçümlerinin gelişmiş modları, yapışma, modül, katkı dağılımı, iletkenlik, yüzey potansiyeli, elektrik alanı ve manyetik alanlar gibi çeşitli diğer fiziksel özelliklerin kalitatif haritalanmasına izin vermektedir. AFM, TAEİ ile üretilen numunelerin, nano ölçekte ve mikro ölçekte morfolojisini ve mekanik özelliklerinin makroskopik özellikleriyle nasıl ilişkili olduğunu araştırmak için kullanılmıştır [130]. AFM cihazı Şekil 4.16'da gösterilmektedir.



Şekil 4.16. AFM cihazı.

4.7. Yoğunluk Ölçümü

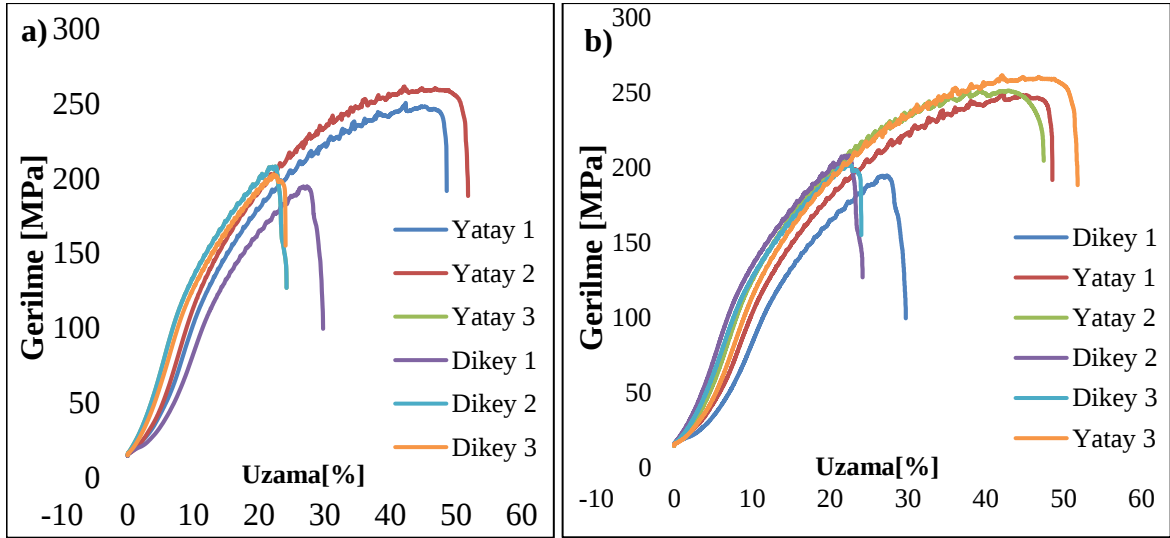
TAEİ yöntemiyle üretilen parçalarda gözeneklilik en sık karşılaşılan problemlerden biridir. Genellikle düşük yoğunluğun temel sebebidir. Bu nedenle iki numunenin yoğunluğu Arşimet prensibi kullanılarak ölçülmüştür. Arşimet prensibi en genel ifadeyle, bir kısmı bir sıvıya batan cisme, sıvı tarafından uygulanan kaldırma kuvvetinin, cismin taşıdığı sıvının ağırlığına eşit olmasıdır [131]. Arşimet prensibi denklem 4.1'de gösterilmektedir.

$$\frac{V_{\text{batan}}}{V_{\text{tüm}}} = \frac{d_{\text{cism}}}{d_{\text{sıvı}}}$$

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Çekme Testi

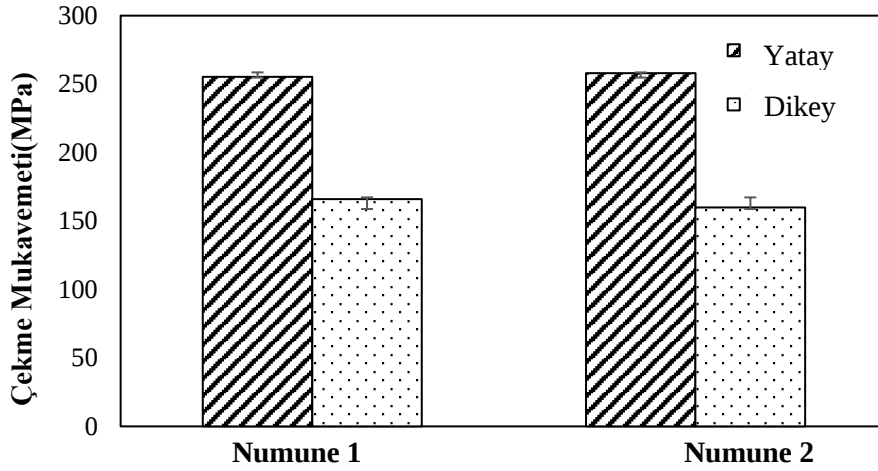
Numune 1’den dikey yönde alınan numunelerin ortalama çekme değeri 160 MPa, yatayda ise 258 MPa olarak elde edilmiştir. Dikey yönde elde edilen uzama değeri %18, yatayda ise %37’dir. Numune 2’den dikey yönde alınan numunelerin ortalama çekme değeri 166 MPa, yatay çekme değeri 255,3 MPa’dır. Dikey yönde ortalama uzama değeri %16.3 iken, yatay numunelerin ortalama uzama %40 olarak elde edilmiştir. ER5356 akma dayanımı 110-120 MPa, çekme dayanımı 240-296 MPa ve uzama %17-26’dır. Geleneksel yöntemler ile üretilen Al alaşımlarının akma mukavemeti yaklaşık 239 MPa, çekme değerleri yaklaşık 327 MPa olup, ortalama uzama değeri %12’dir. Geleneksel yöntemler ile üretilen Al parçalarla karşılaştırıldığında, bu yöntem ile nispeten daha düşük akma ve çekme mukavemeti elde edilmiştir. Çekme testi grafikleri Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Numune 1 çekme grafiği Şekil 5.1 a)’da gösterilmiştir. Numune 2 çekme grafiği Şekil 5.1 b)’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Numunelerin çekme diyagramları; a) Numune 1 çekme testi grafiği, b) numune 2 çekme testi grafiği.

İki numunenin çekme, akma ve uzama değerleri incelendiğinde aralarında önemli bir fark olmadığı görülmüştür. Numune 2’de yatay yönde yapılan kaynağın, belirgin bir fark olmamasına rağmen, daha yüksek dayanım sağladığı söylenebilmektedir. Her iki numunede yatay doğrultudaki çekme dayanımının, dikeyden daha yüksek olduğunu gözlemlenmiştir. Her iki numune için de yatay çekme değerleri diğer çalışmalara ve

ER5356'nın çekme değerine yakın bulunmuştur. Yatay ve dikey çekme numunelerinin çekme dayanımları arasındaki fark Şekil 5.2'de gösterilmektedir.

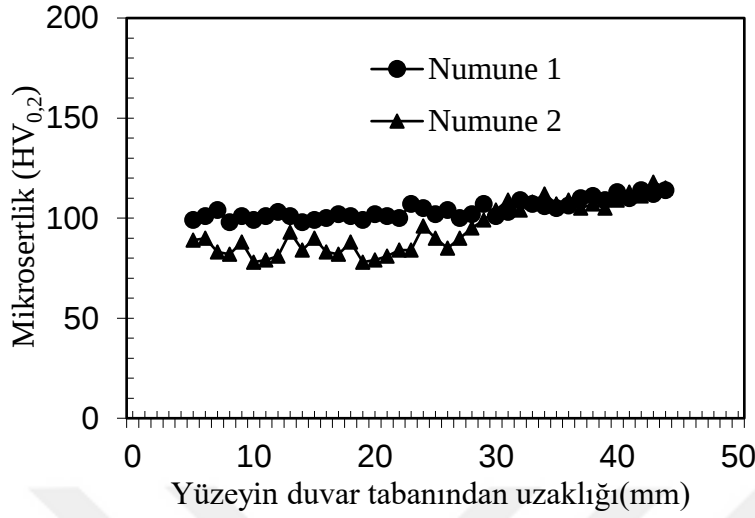


Şekil 5.2. Numune 1 ve 2'nin yatay ve dikey yönde çekme mukavemeti değerleri.

Numunelerin yataydaki çekme ve akma dayanımlarının düşeydekilere göre daha yüksek olması birçok çalışmada gözlemlenmektedir [132,133]. TAEİ yönteminde kaynak işleminde her paso ardışık olarak birbiri üzerine eklenmekte, çok pasolu kaynak işlemi uygulanmaktadır. Bu yöntem ile üretilen parçalar, birbiri üzerine kaynaklanarak oluşturulduğundan, homojen olmayan ısı dağılımı ortaya çıkmaktadır. Kaynak dikiş yönüne dik olan numuneler aynı homojenliğe sahip olmadığından, mikroyapısal farklılıklar göstermektedir. Sonuçta, homojen olmayan ısı dağılımı, farklı mikroyapısal dönüşümler meydana getirmekte ve bu durum mekanik özellikleri anizotropik olarak etkilemektedir.

5.2. Mikrosertlik

Numunelerin yüzey ve yüzey altındaki sertlik değişimleri incelenmiştir. Alt ve üst tabakalarından alınan numunelerin sertlikleri karşılaştırılmıştır. Numune 1'in alt katmanındaki sertlik değeri ortalama 84 HV_{0,2} iken, üst katmandaki sertlik değeri 101,8 HV_{0,2} değerindedir. Numune 2'de alt katmanda 105,38 HV_{0,2}, üst katmanda 109,28 HV_{0,2} değeri elde edilmiştir. Numune 1 ve 2'nin mikrosertlik grafiği Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



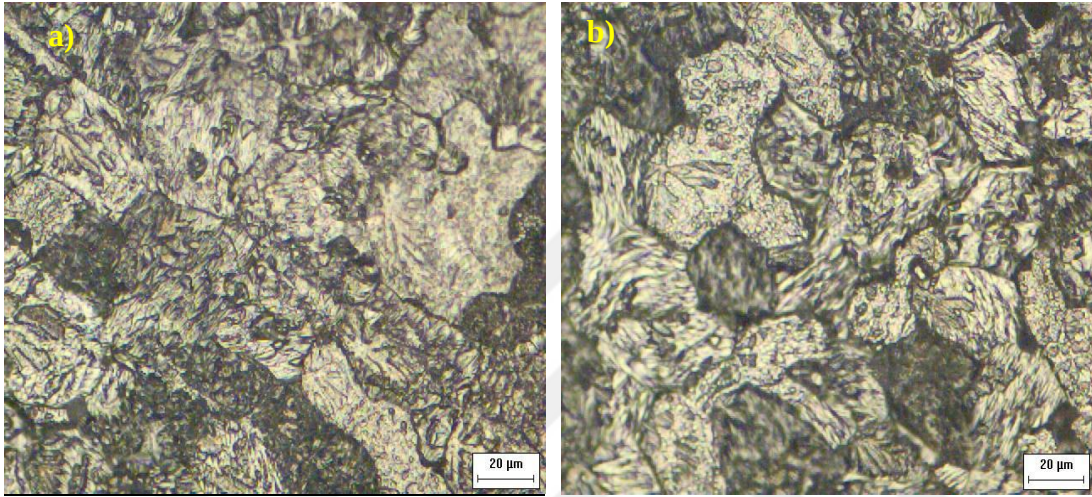
Şekil 5.3. Numune 1 ve 2 mikrosertlik grafiği.

Her iki numunede de üst katmanlarda daha yüksek sertlik değeri elde edilmiştir. Bunun nedeni ısı birikimidir. Çoklu kaynak işlemiyle oluşturan numunenin alt tabakaları yavaş soğumakta, yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadır. Üst üste kaynak işlemi yapıldıkça, yükseklik arttıkça, ısı birikimi artmaktadır. Yüksek sıcaklık sebebiyle alttaki tabakalar çok daha yavaş soğurken, üstteki tabakalar nispeten daha hızlı soğumaktadır. Soğuma hızından kaynaklı olarak üst katmanlarda daha yüksek sertlik değerleri elde edilmektedir [134].

5.3. Mikroyapı İncelemeleri

TAEİ ile üretilen parçalarda sık karşılaşılan bir problem olan gözeneklilik, genellikle yüksek ısı sebebiyle ortaya çıkmaktadır. Isı girdisinin artışıyla, α -Al dendritlerin daha kaba hale geleceği, gözenek boyutu ve sayısının önemli ölçüde değişebileceği beklenmektedir [135]. Fakat, numunelerin optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, gözeneklilik, çatlak gibi TAEİ üretim yöntemiyle üretilen parçaların çoğunda karşılaşılan problemler gözlemlenmemiştir. Optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.4'de gösterilmektedir. Şekil 5.4 a)'da numune 1, Şekil 5.4 b)'de numune 2 gösterilmektedir. Akım, tel besleme hızı, koruyucu gazın çeşidi ve akış hızı, voltaj, pasolar arası bekleme süresi ve gibi çeşitli işlem parametrelerinin optimizasyonu gibi işlem parametreleri mikroyapıları etkilemektedir. Bu tezde, diğer parametreler sabit tutularak, amper

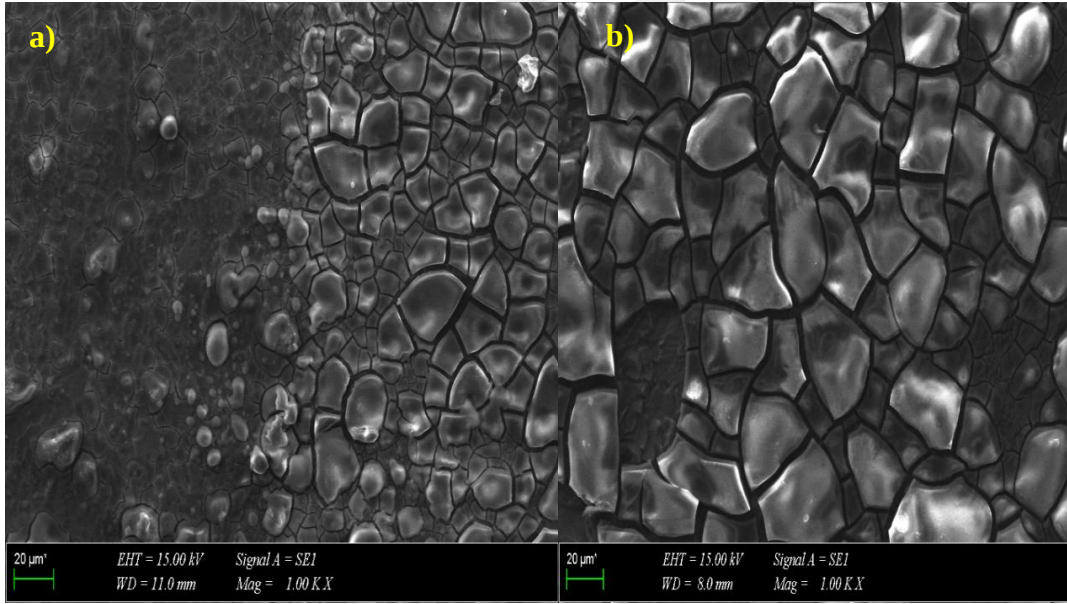
değişikliğinin mikroyapıya etkisi incelenmiştir. 90A ve 105A olmak üzere, iki farklı amperde üretilen numunelerin mikroyapı görselleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu ölçüde bir amper değişiminin numunelerin mikroyapısı üzerinde, anlamlı bir farklılığa sebep olmadığı gözlemlenmiştir. Akım değişimine bağlı olarak, tane boyutunda veya gözeneklilik oranında değişiklik gözlemlenmemiştir. Mikroyapı görselleri sonrasında, EBSD analizi ve yoğunluk ölçümleriyle de desteklendiği gibi, gözeneklilik problemine rastlanmamıştır.

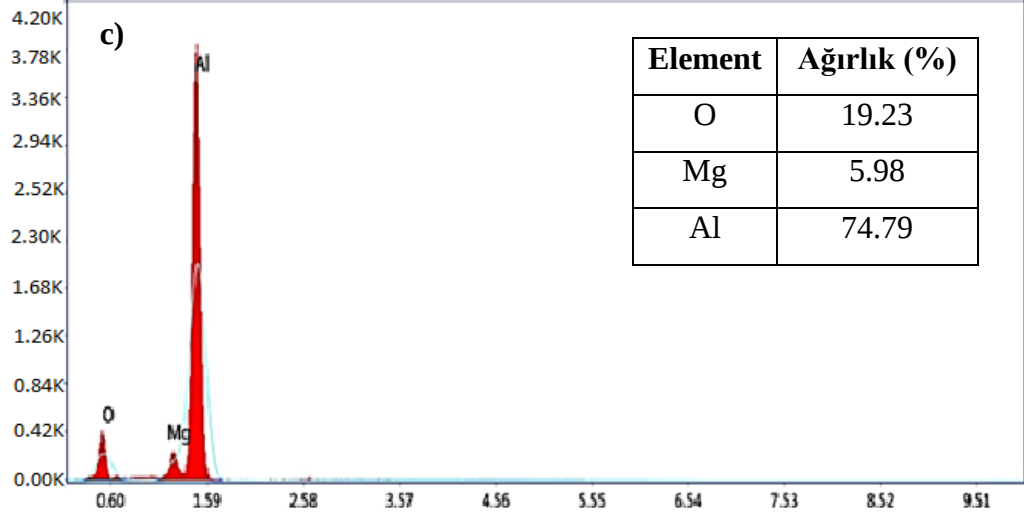


Şekil 5.4. Optik mikroskop görüntüleri; a) Numune 1, b) Numune 2.

Al alaşımlarının TAEİ ile üretiminde ortaya çıkan çeşitli problemler mevcuttur. Bu problemlerden bazıları gözeneklilik, çatlaklar ve oksidasyondur. Bu zorluklar parça kalitesini, parçanın mekanik ve mikroyapısal özelliklerini etkilemektedir. Akım, tel besleme hızı, koruyucu gazın çeşidi ve akış hızı, voltaj, pasolar arası bekleme süresi gibi çeşitli işlem parametrelerinin optimizasyonu ile problemler önemli ölçüde iyileştirilebilse de birçok çalışma alüminyum alaşımlarının TAEİ ile üretimi için oksidasyonun kaçınılmaz olduğu çalışmalarla ortaya konmuştur [136]. Kaynak prosesi sırasında ısınan alüminyum, ortam havasının içerdiği oksijen ile temas ettiğinde, ekzotermik reaksiyon gerçekleşir. Bu reaksiyon sonucunda, alümina olarak isimlendirilen, güçlü bir alüminyum oksit tabakası (Al_2O_3) oluşmaktadır. Alümina, alüminyuma mükemmel korozyon direncini veren çok dayanıklı bir oksittir. Genellikle metallerin oksitleri, ergime sıcaklığında veya bu sıcaklığın altında ergimektedir. Bu durumun aksine, alümina 660 °C’ de eriyen alüminyuma kıyasla, 2060°C gibi çok yüksek bir ergime noktasına sahiptir. Parçalar üzerinde oluşan oksit tabakası Şekil 5.5’de verilmiştir . Numune 1 ve 2’ nin

mikro yapıları sırasıyla Şekil 5.5a) ve Şekil 5.5 b)’de gösterilmiştir. Mikroyapı görüntülerinde alüminyum parçalar üzerindeki oksit tabakası net bir şekilde görülebilmektedir. İşlem inert gaz tarafından korunsa bile kaynak sırasında yükselen ısı nedeniyle, ısınan alüminyum ortamdaki oksijenle temas ettiğinde güçlü bir yüzey oksit oluşur. Özellikle Al-Mg alaşımları ısıtıldığında kolayca oksitlenir, 5xxx serisi alaşımların yüksek korozyon direnci bu duruma bağlıdır. Kolay oksitlenen AA5356 numune birbiri üzerine kaynak yapılarak üretildiği için sabit ısı girdisine maruz bırakılmıştır. TAEİ işlemi oksidasyon sürecini hızlandırmakta ve kısa sürede yüzey oksit tabakası oluşturmaktadır. Örneklerin EDS analizi Şekil 5.5 c)’de verilmiştir. Parça yüzeylerinin belirli kısımlarının EDS analizinde Al, O ve Mg pikleri ve bunların ağırlık oranları görülmektedir. Tel içeriğine göre AA5356 Al alaşımı %5’ten fazla Mg içerir. Parçaların yüzeyinde oluşan Al_2O_3 tabakası nedeniyle Mg’ nin yanı sıra O pikleri de gözlenmiştir [137-139].

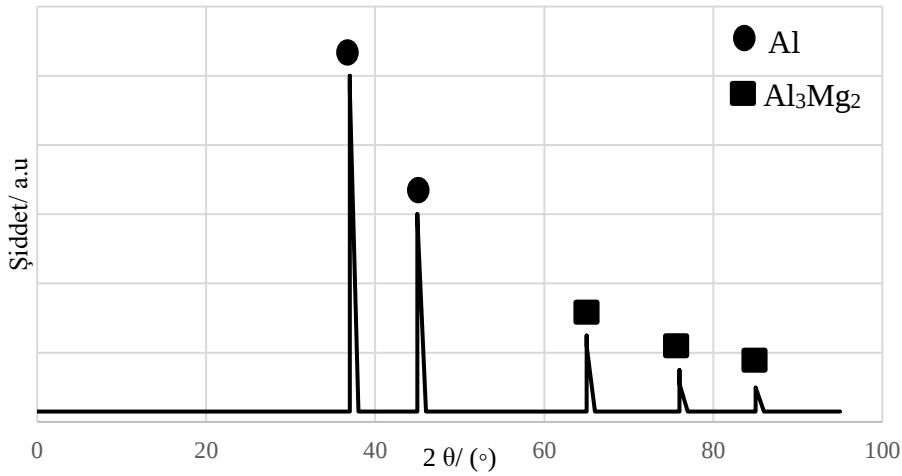




Şekil 5.5. Parçanın yüzeyinde oluşan Al_2O_3 tabakası; a) Numune 1, b) Numune 2, c) EDS analizi.

5.4. XRD Analizi

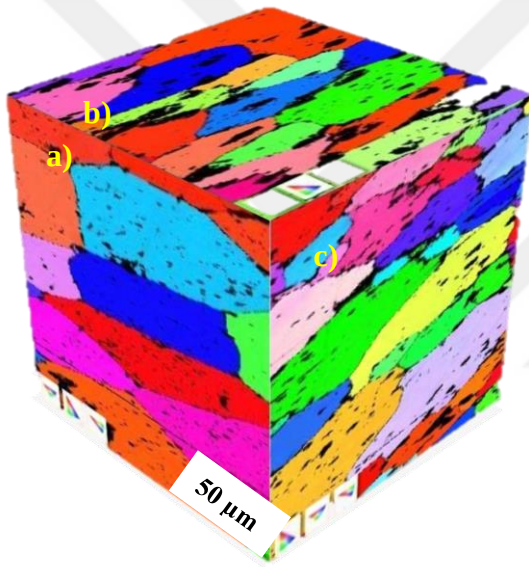
Her iki numunenin malzeme karakterizasyonu incelendiğinde, Al_2Mg bileşiği piklerinin varlığı gözlemlenmiştir. Ayrıca SEM görüntüleriyle de desteklendiği gibi, ortamdaki oksijenin varlığından dolayı kaynak işleminden meydana gelen ısı sebebiyle oksitlenme gerçekleşmiş ve Al_2O_3 fazı oluşmuştur. Bu durumun yanı sıra kirlilikten veya prosesten kaynaklı beklenmedik bir faz oluşmamıştır. XRD grafiği, kaynak yönüne paralel alınan numunelerden oluşturulmuş. XRD grafiği Şekil 5.6’da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. TAEİ AA5356 alüminyum alaşımının XRD spektrumu

5.5. EBSD Analizi

Akımın, numunelerin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisini incelemek için, üst ve alt katmanlardan numuneler alınmış ve bu numunelere EBSD analizi yapılmıştır. EBSD haritaları Şekil 5.7’de gösterilmektedir. Numune 2’nin ilk katmanlarının alt bölgelerinde oluşan iri taneli yapı Şekil 5.7a)’da gösterilmektedir. Numune 1’in üst katmanları Şekil 5.7b)’de gösterilmiştir. Numune 2’nin üst katmanlarında oluşan ince taneli yapılar Şekil 5.7c)’de gösterilmektedir. Şekil 5.7b) ve c) ile karşılaştırıldığında, mevcut aralığın tane boyutu üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Ancak Şekil 5.7a) ve c)’de görüldüğü gibi tabakalar arasında tane boyutu farklılıkları gözlenmiştir. Alt tabakalarda iri taneli yapılar, üst tabakalarda ise ince taneli yapılar gözlenmiştir [140].



Şekil 5.7. EBSD analizi ile tane yapısının incelenmesi; a) Numune 2’nin alt katmanları, b) Numune 1’ in üst katmanları, c) Numune 2’nin alt katmanları.

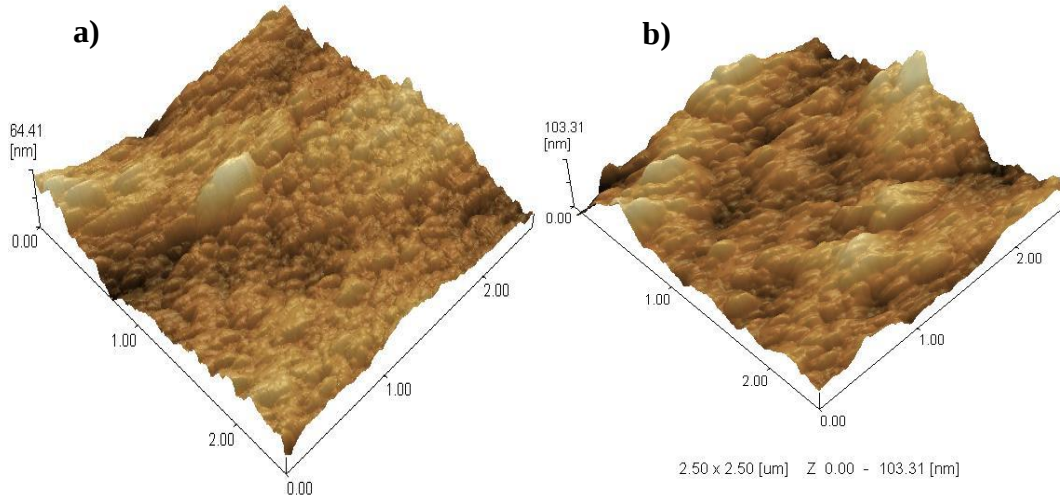
EBSD analizi sonucunda akımın tane boyutu üzerinde önemli bir etkisinin olduğu söylenemez. Ancak tabakalar arasında tane boyutu farklılıkları gözlenmiştir. Alt tabakalarda iri taneli yapılar, üst tabakalarda ise ince taneli yapılar gözlenmiştir. EBSD analiz sonuçları, çekme testi sonuçlarına ve Hall-Petch kuralına uygundur. Hall-Petch denklemi 5.1 numaralı denklemde gösterilmektedir. Birçok çalışmada benzer sonuçlar gözlemlenmektedir. Tane boyutu arttıkça çekme değeri azalmaktadır. Üst katmanlarla karşılaştırıldığında, alt katmanlarda kaba tane yapısı ve düşük çekme mukavemeti tespit edilmiştir [141].

$$\sigma_y = \sigma_0 + k y d^{-1/2} \quad (5.1)$$

5.6. AFM Analizi

TAEİ teknolojisi esasen bir eklemeli çok pasolu kaynak işleminden oluştuğundan, her yeni katman biriktirme sırasında önceki katmanın üst kısmı kısmen erimektedir. Katılma meydana geldiğinde, taneler zaten katılmış malzemeden, maksimum sıcaklık gradyanının yönünü izleyerek yüzeye dik olarak büyür. Ayrıca, her yeni katmanın birikmesinin neden olduğu ısınma nedeniyle, alt katmanda irileşme meydana gelebilmektedir.

Yüzey topografisi incelendiğinde kaynak katmanları arasında yükselti ve alçaltılara rastlanmıştır. TAEİ işleminden sonraki frezeleme işlemi, numunelerin ilk durumuna kıyasla yalnızca görsel olarak nispeten düz bir yüzey elde edilmesine yardımcı oldu. Yüzey topografyası incelendiğinde, Şekil 5.8'de verilen kaynak katmanları arasında yükselmeler ve çöküntüler bulunmuştur. Numune 1' in yüzey özellikleri Şekil 5.8 a) ve Numune 2'nin Şekil 5.8 b)'de verilmiştir. TAEİ teknolojisi çok pasolu bir kaynak işlemine dayandığından, her yeni katman biriktirme sırasında önceki katmanın üst kısmı kısmen eritilir. Yüzey pürüzlülüğü birçok katmanın bir araya gelmesiyle oluşan kısımda oluşur. TAEİ bir Eİ yöntemi olduğundan, genellikle bitirme işlemi gereklidir ve yüzey pürüzlülüğü, frezeleme gibi işleme yöntemleriyle iyileştirilebilir. Ancak yüzey pürüzlülüğünün önemli bir kriter olduğu kullanım alanlarında, yüzey özelliklerini iyileştirmek için bitirme işlemi parametrelerinin optimize edilmesi veya farklı yöntemler kullanılması gerekmektedir [142]



Şekil 5.8. AM görüntüleri; a) Numune 1 b) Numune 2.

5.7. Yoğunluk Ölçümü

Numunelerin yoğunluk ölçümü sonuçları incelendiğinde, Numune 1 ve 2'nin yoğunluk değerleri sırasıyla $2,58 \text{ g/cm}^3$ ve $2,68 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir. Akım arttırıldığında, yoğunluk artışı gözlemlenmiştir. Bu durum, literatürdeki diğer çalışmalarda da gözlemlenmiştir [143]. Akım artışının gözenekliliğin iyileştirilmesinde etkili bir parametre olduğunu belirten çalışmalar mevcuttur. Numunelerin yoğunluk değerleri, $2,7 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip AA5356 ile karşılaştırıldığında ise, mukavemetten kayıp olmadan biraz daha düşük yoğunluklu parça üretimi gerçekleştirildiği söylenebilmektedir. Yoğunluk ölçümleri mikroyapı görüntüleriyle de doğrulanmıştır. Mikroyapı görüntülerinde yüksek gözenekliliğe rastlanmamıştır. Bu durum, ana malzemeye yakın değerde elde edilen yoğunluk değerini desteklemektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, AA5356 alüminyum alaşımının, 90 A ve 105 A olmak üzere, iki ayrı akımda TAEİ imalat yöntemiyle üretilmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri ve mikroyapıları incelenmiştir.

- Numunelerin mekanik değerleri karşılaştırıldığında, iki ayrı amperde üretilen numuneler arasında anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir. Fakat 105 A'da üretilen numunenin nispeten daha yüksek mekanik özellikler gösterdiği söylenebilmektedir. Çekme testi sonrasında, kaynak dikiş yönüne dik ve paralel hazırlanan numunelerin mekanik özellikler açısından farklı davranışlar gösterdiği gözlemlenmiştir.
- Yatay yönde alınan numunelerin, numune 1 ve 2 olmak üzere, çekme değerleri sırasıyla, 250 MPa ve 258 MPa olarak elde edilirken, dikeydekilerin çekme dayanımları 160 MPa ve 165 MPa olarak belirlenmiştir. Bu anizotropik davranışın sebebi, homojen olmayan ısı dağılımıdır. Boyuna numunenin düşük mekanik özellikleri, yumuşama bölgesi olarak kabul edilen katmanlar arası alanın yüksek sıcaklıktan kaynaklanmaktadır.
- Akma, çekme dayanımı ve mikrosertlik değerleri olmak üzere, numunelerin mekanik özellikleri, AA5356 kaynak teli ile karşılaştırılmış ve değerlerin birbirlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Geleneksel yöntemler ile üretilen Al alaşımlarının mekanik değerleri aralığındadır fakat daha yüksek çekme dayanımı elde edilememiştir.
- Alt ve üst yüzeylerden numuneler alarak, biriktirme yüksekliğinin, sertliğe etkisi incelenmiştir. Üst bölgelerden alınan numunelerin daha yüksek sertlik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Isı birikimi sebebiyle alt tabaka daha yüksek sıcaklığa maruz kalırken, üst katmanlardakiler nispeten daha hızlı soğuduğundan dolayı yüksek sertlik göstermektedir.
- Mikroyapı analizleri incelendiğinde, TAEİ yöntemiyle üretilen parçalarda sık karşılaşılan sorunlardan biri olan oksit problemi gözlemlenmiştir.
- Numunelerden alt ve üst katmanlarda numuneler alınarak, EBSD analizi yapıldığında, üst katmanlarda daha ince tane yapısı gözlemlenirken, alt katmanlarda kaba taneler gözlemlenmiştir. Isının etkisiyle üst katman, alt bölgeye göre nispeten daha hızlı soğuma gösterdiği için, bu homojen olmayan tane yapısının sebebi ısı birikimi olduğu saptanmıştır.

TAEİ yöntemi henüz yeni bir teknoloji olduğu için daha fazla araştırılma yapılması, sistem modifikasyonlarının, farklı malzeme ve parametreler ile denenmesi gereklidir. Örneğin çalışmamızda 3 yönlü freze kullanılarak gerçekleştirilen TAEİ işlemi, farklı eksenlerde bir arada çalışılabilen robotlar ile geliştirilebilir. Daha fazla otomasyon sağlayan bilgisayar yazılımları ile desteklenebilir. Deney düzeneğindeki değişikliklerin yanısıra, parametre değişimleri de büyük önem taşımaktadır. Soğutma hızının, parçanın mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkileri yadsınamazdır. Bu nedenle parçalar arasındaki mekanik anizotropiyi engellemek, ısısal homojenizasyonu sağlamak için ısıtma işlemi proseleri geliştirilebilir. Farklı düzene, malzeme ve parametreler ile parça üretimini konu alan yakın gelecekteki çalışmaların, bu teknolojinin gelişimini ve yaygınlaşmasını destekleyeceği tarafımızca öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Calister, W.D.; Rethwisch, D.G.: "Materials Science and Engineering", WILEY, U.S.A. **(2011)** 408-410.
- [2] Schweitzer, P.A.: "Metalic Metarials Physical, Mechanical, and Corrosion Properties", Marcel Dekker, Pennsylvania, U.S.A. **(2003)** 575-581.
- [3] Tlbenti, K.: "Alminyum ve Alaşımlarının Kaynağı", Bhler yayını, **(1990)**.
- [4] Murray, G.T.: " Handbook Of Materials Selection For Engineering Applications Mechanical Engineering", Markel Dekker, Washington, U.S.A., **(1997)**.
- [5] Polmear, J.: "Light Alloys", Monash University, Melbourne, Avustralya, **(2006)** 129-149.
- [6] Davis, R.: "Aluminium and Aluminium Alloys", ASM International, **(1998)** 26-28.
- [7] Russell, M.A.: "Structure–Property Relations in Nonferrous Metals", WILEY, U.S.A., **(2005)** 365-368.
- [8] Oğuz, B.: "Demir Dışı Metallerin Kaynağı" OERLIKON Yayını, **(1990)** 251-256.
- [9] Anık, S.: "Kaynak Teknolojileri El Kitabı", Gedik Eğitim Vakfı,**(1991)** 91-93.
- [10] Tlbenti, K.: "Gaz Ergitme Kaynağı Ve Oksijen İle Kesme" ,TMMOB, **(2003)** 68-79.
- [11] Tlbenti, K.; "MIG-MAG Eriyen Elektrod İle Gaz Altı Kaynağı", Gedik Eğitim Vakfı, **(1990)** 128-129.
- [12] Mathers, G.H.: 'The Welding Of Aluminium And Its Alloys' , Woodhead Publishing Limited, Washington, U.S.A. **(2003)** 18-34.
- [13] Fayomi, O.S.I.; Popoola, P.; Udoeye, N.: "Effect of Alloying Element on the Integrity and Functionality of Aluminium-Based Alloy" , Aluminium Alloys - Recent Trends in Processing, Characterization, Mechanical Behavior and Applications, **(2017)**.
- [14] Singh, V.P.; Patel, S.K.; Ranjan, A.; Kuriachen, B.: "Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: a critical review" Journal Of Materials Research And Technology, 9 **(2020)** 6217-6256.
- [15] Varshney, D.; Kumar, K.: "Application And Use Of Different Aluminium Alloys With Respect To Workability, Strength And Welding Parameter Optimization" Ain Shams Engineering Journal, 12 **(2021)** 1143-1152.
- [16] Iqbal, M.P.; Tripathi, A.; Jain, R.; Mahto, R.P.; Pal, S.K.; Mandal, P.: "Numerical modelling of microstructure in friction stir welding of aluminium alloys" , International Journal Of Mechanical Sciences, 185 **(2020)** 105882.
- [17] Kumar, M.; Sharma, A.; Mohanty U.K.; Simhambhatla, S.: "Additive Manufacturing With Welding "Indian Institute of Technology Hyderabad, **(2019)**.
- [18] Murr, L.E.: "Metallurgy Of Additive Manufacturing: Examples From Electron Beam Melting", Additive Manufacturing, 5 **(2015)** 40-53.
- [19] Wohler Raporu, <https://www.wohlersassociates.com/2014report.htm>, 20 Nisan **(2022)**.
- [20] Blant, M.: "Laser Additive Manufacturing: Materials,Design,Technologies And Applications, WOODHEAD, İngiltere **(2017)** 353.

- [21] Thompson, S.M.; Bian, L.; Shamsaei N.; Yadollahi, A.: “An Overview Direct Laser Deposition For Additive Manufacturing; Part 1:Transport Phenomena,Modeling And Diagnostics” , Additive Manufacturing 8 **(2015)** 36-62.
- [22] Niaki, M.K.; Nanino, F.: “The Management Of Additive Manufacturing” Springer, **(2017)**.
- [23] Zah, M.F.: “Wirtschaftliche Fertigung Mit Rapid-Technologienanwender-Leitfaden Zur Auswahl Geeigneter Verfahren” , Münschen: Hanser, **(2017)**.
- [24] Bourell, D.; Campbell, I.: “The International Journal Ontechnologies For Rapid Product Development And Direct Manufacturing” , Rapid Prototyp J, 10 **(2004)** 7-10.
- [25] Hyndhavi, D.; Murthy, S.B.: “Rapid Prototyping Technology – Classification And Comparison” , Int Res J Eng Technology, 3 **(2017)** 3107-3109.
- [26] Levy, G.N.; Schindel, R.; Kruth, J.P.: “Rapid Manufacturing Andrapid Tooling With Layer Manufacturing Technologies: State Of The Art And Future Perspectives” , CIRP Ann, 52 **(2003)** 483-695.
- [27] Özsoy, K.; Duman, B.; Gültekin, D.: “Metal Part Production With Additive Manufacturing For Aerospace And Defense Industry” Int J Technol Sci, 11 **(2019)** 201-210.
- [28] Schiller, G.J.: “Additive Manufacturing For Aerospace” , In: IEEE aerospace conference **(2015)**.
- [29] Kamal, M., Rizza, G.: “Design For Metal Additive Manufacturing For Aerospace Applications” , Addit Manuf Aerospace Ind., **(2019)** 67-86.
- [30] Misra, A.; Grady, J.; Carter, R.; “Additive Manufacturing Of Aerospace Propulsion Components” , Additive Manufacturing Conference, 7 **(2015)**.
- [31] Liu, R.; Wang, Z.; Sparks, T.; Liou, F.; Newkirk, J.: “Aerospace Applications Of Laser Additive Manufacturing” , Laser Additive Manufacturing, **(2017)** 358.
- [32] Ciobota, N.D.; Gheorghe, G.I.; Despa, V.: “Additive Manufacturing As An Important Industry Player For The Next Decades” , The Scientific Bulletin of VALAHIA University, Mater Mech, 17 **(2019)** 68-71.
- [33] Dehoff, R.R.; Tallman, C.; Duty, C.: “Case Study: Additive Manufacturing Of Aerospace Brackets”, Adv Mater Process, **171 (2013)** 3.
- [34] Petrovic, V.; Haro, J.V; Jorda, O.; Delgado, J.; Blasco, J.R.; Portoles, L.: “Additive Layer Manufacturing: State Of The Art İn Industrial Applications Through Case Studies” , Int J Prod Res, **(2010)** 8-13.
- [35] Bozkurt, Y.; Gülsoy, H.; Karayel, E.: “Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Tıbbi Ekipmanların Üretiminde Kullanımı”, El-Cezeri, 8 **(2021)**.
- [36] Sing, S.L.: “Selective Laser Melting Of Novel Titanium- Tantalum Alloy As Orthopaedic Biomaterial”, Singapur, **(2019)**.
- [37] Mills, D.K.: “Future Medicine: The Impact of 3D Printing”, Journal of Nanomaterials& Molecular Nanotechnology, 4 **(2015)** 1-3.
- [38] Giannopoulos, A.A.; Mitsouras, D.; Yoo, S.J.; Liu, P.P.; Chatzizisis, Y.S.; Rybicki, F.J.; “Applications Of 3D Printing İn Cardiovascular Diseases”, Nature Reviews Cardiology, 13 **(2016)** 701-718.
- [39] Kara, E.; Buldum, B.B.; Yılmaz, Ç.; Özkaya, N.: “B yazıcı ile kişiye özgü implant

- tasarımı” 3B Baskı Teknolojileri Uluslar arası Sempozyumu, s. 219-226, **(2016)**.
- [40] Wohler Raporu, <https://gfxspeak.com/2017/04/04/wohlers-printing-industry>, (Erişim Tarihi: 25 Nisan 2022).
- [41] Thompson, M.K.; Moroni, G.; Vanekar, T.; Fadel, I.R.; Campbell, T.; Gibson, I.; Marina, F.: “Design For Additive Manufacturing: Trends, Opportunities, Considerations And Constrains” , CIRP Annals, 65 **(2016)** 737-760.
- [42] Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; Ramani, K.; Chen, Y.; Williams, C.B.; Zavattieri, P.D.: “The Status Challenges And Future Of Additive Manufacturing İn Engineering” , Computer-Aided Design, 69 **(2015)** 65-89.
- [43] Lewandowski, J.J.; Seifi, M.: “Metal Additive Manufacturing:A Review Of Mechanical Properties” Annual Review Of Materials Research” 46 **(2016)** 151-153.
- [44] King, W.E.; Anderson, A.T.; Ferencz, R.M.; Hodge, N.E.; Kamath C.; Khairallah, S.A.; Rubenchik, A.M.: “Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Of Metals:Physics, Computational And Materials Challenges” Applied Physics Reviews, 2 **(2015)** 2-5.
- [45] Redwood, B.; Schöffner, F.; Garret, B.: “The 3D Handbook Technologies, Design And Applications” , 3D HUBS, Amsterdam **(2017)** 36-264.
- [46] Introduction To Additive Manufacturing: Part Two, <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&LN=TR&N M=432>, Erişim Tarihi: 29 Nisan 2022.
- [47] Feilden. E.: “Additive Manufacturing Of Ceramics And Ceramic Composites Via Robocasting” , Thesis, Imperial College London **(2017)** 24.
- [48] Dietrich, D.M.; Kenworthy, M.; Cudney, E.A.: “Additive Manufacturing Change Management Best Practices” , CRC Press, U.S.A **(2019)** 31-34.
- [49] Jayanath, S.; Achuthan, A: “A Computationally Efficient Hybrid Model For Simulating The Additive Manufacturing Process Of Metal” , International Journal of Mechanical Sciences, 160, **(2019)** 255-269.
- [50] Milewski, J.O.: “Additive Manufacturing Of Metal From Fundamental Technology To Rocket Nozzles,Medical İmplants And Custom Jewelry” , Springer, U.S.A, **(2017)** 7-8.
- [51] Thijs, L.; Verhaeghe, F.; Craegh, T.; Humbeeck, J.V.; Kruth, J.P.: “A study of the micostructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V” , Acta Materialia, 6 **(2010)** 3303-3312.
- [52] Yadroitsev, I.; Bertrant, P.; Smurov, I: “Parametric analysis of the selective laser melting process” , Applied Surface Science, 253 **(2007)** 8064-8069.
- [53] Yap, C.Y.; Chua, C.K.; Dong, Z.L.; Liu, Z.H.; Zhang, D.Q.; Loh, L.E.; Sing, S.L.: “Reriew of selective laser melting:Materials and applications” , AIP Publishing, 2 **(2015)**.
- [54] Louvis, E.; Fox, P.; Sutcliffe, C.J.: “Selective Laser Melting Of Aluminium Components”, Journal of Materials Processing Technology, 211 **(2011)** 275-284.
- [55] Kumar, S.; Singh, A.K.; Choudhary, A.K.S.; Gupta, A.K.: “A comparison Of Additive Manufacturing Technologies” , International Journal For Innovative Research In Science & Technology, 3 **(2016)** 147-152.
- [56] Körner, C.:“Additive Manufacturing Of Metallic Components By Selective Electron

- Beam Melting — A Review”, *International Materials Reviews*, 61 **(2016)** 361-377.
- [57] Galati, M.; Luliano L.: “A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations”, *Additive Manufacturing*, 19 **(2018)** 1-20.
- [58] Gokuldoss, P.K.; Kolla, S.; Eckert, J.: “Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines”, *Materials*, 10 **(2017)** 672.
- [59] Arcam Grup, <https://www.ge.com/additive/who-we-are>, Erişim Tarihi: 01.05.2022.
- [60] Vayre, B.; Vignat, F.; Villeneuve, F.: “Identification On Some Design Key Parameters For Additive Manufacturing: Application On Electron Beam Melting”, *Procedia CIRP*, 7 **(2013)** 264-269.
- [61] Schwerdtfeger, J.; Körner, C.: “Selective Electron Beam Melting Of Ti–48Al–2Nb–2Cr: Microstructure And Aluminium Loss” *Intermetallics*, 49 **(2014)** 29-35.
- [62] Kale, S.A.; Mishra, A.K.: “An Overview of Metallic Materials Fabrication By Direct Energy Deposition”, *Key Engineering Materials*, 882 **(2021)** 11-20.
- [63] Sing, S.L.; Tan, J.H.K.; Tey, C.F.; Yeong, W.Y.; Huang, S.: “3D Printing Of Metals In Rapid Prototyping Of Biomaterials: Techniques In Additive Manufacturing”, *Rapid Prototyping of Biomaterials*, **(2020)** 17-40.
- [64] Singh, A.; Kapil, S.; Das, M.: “A Comprehensive Review Of The Methods And Mechanisms For Powder Feedstock Handling In Directed Energy Deposition”, *Additive Manufacturing*, 35 **(2020)**.
- [65] Rosli, N.A.; Hasan, R.; Sudin, M.N.: “Review Of Wire Arc Additive Manufacturing For 3d Metal Printing”, *International Journal of Automation Technology*, 13 **(2019)** 346-353.
- [66] Mcandrew, A.R.; Rosales, M.A.; Colegrove, P.A.; Ho, A.; Fayolle, R.; Eytayo, K.; Stan, L.; Sukrongpang, P.; Crochemore, A.; Pinter, Z.: “Interpass Rolling Of Ti-6Al-4V Wire + Arc Additively Manufactured Features For Microstructural Refinement”, *Microstructural Optimisation of Large Scale Additive Manufactured Ti6Al4V*, 21 **(2018)**.
- [67] Wang, X.; Yu, G.; Liang, B.; Li, Y.; Shi, Y.: “Grove Center Detection In Gas Metal Arc Welding Using Template-Matching Method”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 86 **(2016)** 2791-2801.
- [68] Fang, X.; Zhang, L.; Li, H.; Li, C.; Huang, K.; Lu, B.: “Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of 2219 Aluminum Alloys Additively Fabricated by the Cold Metal Transfer Process”, *Materials*, 11 **(2018)** 812.
- [69] Ayan, Y.; Kahraman, N.: “Metal Additive Manufacturing: Wire Arc Method And Applications”, *International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry*, 2 **(2018)** 74-84.
- [70] Lohwasser, D.; Chen, Z.: “Friction Stir Welding From Basis To Applications”, Woodhead, North America, **(2010)** 1-7.
- [71] Mubiayi, M.P.; Akinlabi, E.T.; Makhatha, M.E.: “Current Trends In Friction Stir Welding And Friction Stir Spot Welding”, Springer **(2019)** 1-12.
- [72] Karayel, E.; Bozkurt, Y.: “Additive Manufacturing Method And Different Welding Applications”, *Journal Of Materials Research And Technology*, 9 **(2020)** 11424-11438.

- [73] Bozkurt, Y.; Uzun, H.; Salman, S.: “Microstructure and mechanical properties of friction stir welding particulate reinforced AA2124/SiC/25p-T4 composite” , Journal of Composite Materials, 45 **(2011)** 2237-2245.
- [74] Smith, C.B.; Mishra, R.S.: “Friction Stir Processing For Enhanced Low Temperature Formability” , BH **(2014)** “1-6.
- [75] Mishra, R.S.; Haridas, R.S.; Agrawal, P.: “Friction Stir-Based Additive Manufacturing” , Science and Technology of Welding and Joining, 27 **(2022)**.
- [76] Rathee, S.; Srivastava, M.; Pandey, P.M.; Mahawar, A.; Shukla, S.: “Metal Additive Manufacturing Using Friction Stir Engineering: A Review On Microstructural Evolution, Tooling And Design Strategies” , CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 35 **(2021)** 560-588.
- [77] Yu, H.Z.; Mishra, R.S.: “Additive Friction Stir Deposition: A Deformation Processing Route To Metal Additive Manufacturing” , Materials Research Letters 9 **(2021)** 71-83.
- [78] Palavinel, S.; Nelaturu, P.; Glass, B.; Mishra, R.S.: “Friction Stir Additive Manufacturing For High Structural Performance Through Microstructural Control In An Mg Based WE43 Alloy, Material Design, 65 **(2015)** 934-952.
- [79] Horgar, A.; Fostervoll, H.; Nyhus, B.; Ren, X.; Eriksson, M.; Akselsen, O.M.: “Additive Manufacturing Using WAAM With AA5183 Wire” Journal of Materials Processing Technology, 259 **(2018)** 68-74.
- [80] Müller, J.; Grabowski, M.; Müller, C.; Hensel, J.; Unglaub, J.; Thiele, K.; Kloft, H.; Dilger, K.: “Design And Parameter Identification Of Wire And Arc Additively Manufactured (WAAM) Steel Bars For Use In Construction” , Metals, **(2019)** 725.
- [81] Silva, L.J.; Souza, D.M.; Araujo, D.B.; Reis, R.P.; Scoti, A.: “Concept And Validation Of An Active Cooling Technique To Mitigate Heat Accumulation In WAAM” , The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107 **(2020)** 2513-2523.
- [82] Çam, G.: “Prospects Of Producing Aluminum Parts By Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)” , Materials Today Proceedings, **(2022)**.
- [83] Suryakumar, S.; Karunakaran, K. P.; Chandrasekhar, U.; Somashekara, M. A.: “A Atudy Of The Mechanical Properties Of Objects Built Through Weld-Deposition” , Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 227 **(2013)** 1138–1147.
- [84] Haden, C.V.; Zeng, G.; Carter, F.M.; Ruhl, C.; Krick, B.A.; Harlow, D.G.: “Wire And Arc Additive Manufactured Steel: Tensile And Wear Properties” , Additive Manufacturing, 16 **(2017)** 115–123.
- [85] Wagas, A.; Xiansheng, Q.; Jiangtao, X.; Chaoran, Y.; Fan, L: Impact Toughness of Components Made By GMAW Based Additive Manufacturing” , Procedia Structural Integrity, 13 **(2018)** 2065-2070.
- [86] Xiong, J.; Lei, Y.; Li, R.: “Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures” , Applied Thermal Engineering, 126 **(2017)** 43-52.
- [87] Nemani, A.V.; Ghaffari, M.; Nasiri, A.: “Comparison Of Microstructural Characteristics And Mechanical Properties Of Shipbuilding Steel Plates Fabricated

By Conventional Rolling Versus Wire Arc Additive Manufacturing” , Additive Manufacturing, 32 (2020) 101086.

- [88] Haselhuhn, S.A.; Buhr, M.W.; Wijnen, B.; Sanders, P.G.; Pearce, J.M; “Structure-Property Relationships of Common Aluminum Weld Alloys Utilized As Feedstock For GMAW-Based- 3-D Metal Printing” , Materials Science and Engineering:A, 673 (2016).
- [89] Lopes, J.G.; Machado, C.M.; Duarte, R.; Rodrigues, A.T.; Santos, T.G.; Oliveira, J.P: “Effect Of Milling Parameters On HSLA Steel Parts Produced By Wire And Arc Additive Manufacturing (WAAM)” , Journal of Manufacturing Process”, 59, (2020) 739-749.
- [90] Gierth, M.; Henckell, P.; Ali, Y.; Scholl, J.; Bergman, J.P.: “Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminum Alloy AlMg5Mn with Energy-Reduced Gas Metal Arc Welding (GMAW)” , Materials, 13 (2020) 2671.
- [91] Qui, Z.; Qi, B.; Cong, B.; Sun, H.; Zhao, G.; Ding, J.: “Microstructure And Mechanical Properties Of Wire + Arc Additively Manufactured 2024 Aluminum Alloy Components: As-Deposited And Post Heat-Treated” Journal Of Manufacturing Process, 40 (2019) 27-36.
- [92] Seow, E.; Zhang, J.; Cui, H.; Coules, E.; Wu, G.; Jones, C.; Ding, J.; Williams, S.: “Effect Of Crack-Like Defects On The Fracture Behaviour Of Wire + Arc Additively Manufactured Nickel-Base Alloy 718” Additive Manufacturing, 36 (2020).
- [93] Kennedy, J.R.; Davis, A.E.; Caballero, A.E.; Williams, S.; Pickering, E.J.; Prangnell, P.B.: “The Potential For Grain Refinement Of Wire-Arc Additive Manufactured (WAAM) Ti-6Al-4V By Zrn And Tin Inoculation” , Additive Manufacturing, 40 (2021).
- [94] Derekar, K.S.: “A Review Of Wire Arc Additive Manufacturing and Advances in Wire Arc Additive Manufacturing Of Aluminium”, Materials Science and Technology, 34 (2018) 895-916.
- [95] Mathers, G.: “The Welding Of Aluminium And Its Alloys” , Woodhead, U.S.A. (2003) 18-24.
- [96] Lancaster, J.F.: “Metallurgy of Welding”, George Allen & Unwin, Londra (1980) 200-204.
- [97] Hauser, T.; Reisch, R.T.; Breese, P.P.; Lutz, B.S.; Pantano, M.; Nalam, Y.; Bela, K.; Kamps, T.; Volpp, J.; Kaplan, A.F.H.: “Porosity In Wire Arc Additive Manufacturing Of Aluminium Alloys” , Additive Manufacturing, 41 (2021).
- [98] Derekar, K.; Lawrence, J.; Melton, G.; Addison, A.; Zhang, X.; Xu, L.: “Influence of Interpass Temperature on Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminium Alloy Components” MATEC konferans, 269 (2019) .
- [99] Arana, M.; Ukar, E.; Rodriguez, I; Iturrioz, A.; Alvarez, P.: “Strategies to Reduce Porosity in Al-Mg WAAM Parts and Their Impact on Mechanical Properties”, Metals, 11 (2021) 524.
- [100] Fang, X.; Zhang, L.; Chen, G.; Dang, X.; Huang, K.; Wang, L.; Lu, B.: “Correlations between Microstructure Characteristics and Mechanical Properties in 5183 Aluminium Alloy Fabricated by Wire-Arc Additive Manufacturing with Different Arc Modes” , Materials, 11 (2018) 2075.

- [101] Ryan, E.M.; Sabin, T.J.; Watts, J.F.; Whiting, M.J.: “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 **(2018)** 577-584.
- [102] Gu, J.; Ding, J.; Williams, S.W.; Gu, H.; Ma, P.; Zhai, Y.: “The Effect Of Inter-Layer Cold Working And Post-Deposition Heat Treatment On Porosity In Additively Manufactured Aluminum Alloys” , Journal Of Materials Processing Technology, 230 **(2016)** 26-34.
- [103] Cong, B.; Ding, J.; Williams, S.: “Effect Of Arc Mode In Cold Metal Transfer Process On Porosity Of Additively Manufactured Al-6.3%Cu Alloy” , The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76 **(2015)** 1593-1606.
- [104] Geng, H.; Li, J.; Xiong, J.; Lin, X.; Zhang, F.: “Geometric Limitation and Tensile Properties of Wire and Arc Additive Manufacturing 5A06 Aluminum Alloy Parts” , Journal of Materials Engineering and Performance, 26 **(2017)** 621-629.
- [105] Oyama, K.; Diplas, S.; Mhamdi, M.; Gunnaes, A.E.; Azar, A.S.: “Heat Source Management In Wire-Arc Additive Manufacturing Process For Al-Mg And Al-Si Alloys” , Additive Manufacturing, 26 **(2019)** 180-192.
- [106] Heard, D.W.; Brophy, S.; Brochu, M.: “Solid Freeform Fabrication Of Al-Si Components Via The CSC-MIG Process” Can. Metall. Q. 51 **(2012)** 302–312.
- [107] Arana, M.; Ukar, E.; Rodriguez, I; Iturrioz, A.; Alvarez, P.: “Strategies to Reduce Porosity in Al-Mg WAAM Parts and Their Impact on Mechanical Properties”, Metals, 11 **(2021)** 524.
- [108] Fu, R.; Tang, S.; Lu, J.; Cui, Y.; Li, Z.; Zhang, H.; Xu, T.; Chen, Z.; Liu, C.: “Hot-wire arc additive manufacturing of aluminum alloy with reduced porosity and high deposition rate” , Materials & Design, 199 **(2021)**.
- [109] Li, S.; Zhang, L.; Ning, J.; Xiang, W.; Zhang, F.; Zhang, J.; Na, S.; Bodaghi, F.: “Comparative Study On The Microstructures And Properties Of Wire+Arc Additively Manufactured 5356 Aluminium Alloy With Argon And Nitrogen As The Shielding Gas” , Additive Manufacturing, 9 **(2020)** 13770-13780.
- [110] Yang, Q.; Xia, C.; Deng, Y.; Li, X.; Wang, H.: “Microstructure and Mechanical Properties of AlSi7Mg0.6 Aluminum Alloy Fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing Based on Cold Metal Transfer (WAAM-CMT)” Materials, 12 **(2019)** 2525.
- [111] Kisarev, A.V.; Kobernik, N.V.: “Study On Formation Of Aluminum Alloy Thin Wall Produced With WAAM Method Under Various Thermal Conditions” , IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 759 **(2020)**.
- [112] Hönnige, J.R.; Colegrove, P.A.; Ganguly, S.; Eimer, E.; Kabra, S.; Williams, S.: “Control Of Residual Stress And Distortion In Aluminium Wire + Arc Additive Manufacture With Rolling” Additive Manufacturing, 22 **(2018)** 775-783.
- [113] Langelandsvik, G.; Horgar, A.; Furu, T.; Roven, H.J.; Akselsen, O.M.: “Comparative Study Of Eutectic Al-Si Alloys Manufactured By WAAM And Casting” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 110 **(2020)** 935-947.
- [114] Qi, Z.; Qi, B.; Cong, B.; Zhang, R.: “Microstructure And Mechanical Properties Of

Wire + Arc Additively Manufactured Al-Mg-Si Aluminum Alloy” , Materials Letter, 233 (2018) 348-350.

- [115] Vimal, K.E.K.; Srinivas, M.N.; Rajak, S.: “Wire Arc Additive Manufacturing Of Aluminium Alloys: A Review” , Materials Today, 41 (2021) 1139-1145.
- [116] Thiplied, S.: “Challenges Associated With The Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Of Aluminum Alloys” , Materials Research Express, 6 (2019).
- [117] Williams, S.W.; Martina, F.; Addison, A.C.; Jing, J.; Pardal, G.; Colegrove, P.: “Wire+Arc Additive Manufacturing”, Material Science And Technology, 32 (2015) 641-647.
- [118] Rosli, N.A.; Alkahari, M.R.; Abdollah, M.F.; Maidin, S.; Ramli, F.R.; Herawan, S.G.: “Review On Effect Of Heat Input For Wire Arc Additive Manufacturing Process” , Journal Of Material And Research Technology, 11 (2021) 2127-2145.
- [119] Karmuhilan, M.; Sood, A.K.: “Intelligent Process Model For Bead Geometry Prediction In WAAM” , Materials Today Proceedings 5 (2018) 24005-24013.
- [120] Köhler, M.; Hensel, J.; Dilger, K.: “Effects Of Thermal Cycling On Wire And Arc Additive Manufacturing Of Al 5356 Components” , Metals 10 (2020) 952.
- [121] Welding Material Sales, <https://weldingmaterialsales.com/catalog/er5356/>, Erişim Tarihi: 5 Mayıs 2022.
- [122] Ding, J.; Colegrove, P.; Mehnen, J.; Ganguly, S.; Almeida, P. M. S.; Wang, F.; Williams, S.: “Thermo-Mechanical Analysis Of Wire And Arc Additive Layer Manufacturing Process On Large Multi-Layer Parts”, Computational Materials Science, 50 (2011) 3315-3322.
- [123] ISO Standardı, <https://www.iso.org/standard/51081.html> Erişim Tarihi: 5 Mayıs 2022.
- [124] Liu, J.; Xu, Y.; Ge, Y.; Hou, Z.; Chen, S.: “Wire And Arc Additive Manufacturing Of Metal Components: A Review Of Recent Research Developments”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 111 (2020) 149-198.
- [125] A Brief Introduction to SEM (Scanning Electron Microscopy), <https://www.scimed.co.uk/education/sem-scanning-electron-microscopy/#:~:text=What%20Happens%20During%20SEM%3F,which%20act%20to%20focus%20it>, Erişim Tarihi: 7 Mayıs 2022.
- [126] Bozkurt, Y.: “Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniği İle Birleştirilen Aa2124/Sicp/25 Kompozit Levhaların Mekanik Özellikleri Ve Mikroyapı Karakterizasyonu” Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 129, (2008).
- [127] Braggs Law, <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/braggs-law>, Erişim Tarihi: 7 Mayıs 2022.
- [128] Electron Backscatter Diffraction, <https://www.ebsd.com/ebsd-applications/additive-manufacturing>, Erişim Tarihi: 12 Mayıs 2022.
- [129] Humphreys, F.J.: “Characterisation Of Fine-Scale Microstructures By Electron Backscatter Diffraction (EBSD)” , Scripta Materialia, 51 (2004) 771-776.
- [130] Dazzi, A.; Prater, C.B.: “AFM-IR: Technology and Applications in Nanoscale Infrared Spectroscopy and Chemical Imaging” , Chemical Reviews, 117 (2017) 5146-5173.

- [131] Hughes, S.W.: “Measuring Liquid Density Using Archimedes' Principle” *Physics Education*, 41 **(2006)** 445.
- [132] Köhler, M.; Fiebig, S.; Hensel, J.: “Wire And Arc Additive Manufacturing Of Aluminium Components” , *Metals-Open Access Metallurgy Journal*, 9 **(2019)** 608.
- [133] Sun, J.; Yang, K.; Wang, Q.; Ji, S.; Bao, Y.; Pan, J.: “Microstructure And Mechanical Properties Of 5356 Aluminium Alloy Fabricated By TIG Arc Additive Manufacturing” *Acta Metall Sin.*, 57 **(2021)** 665-674.
- [134] Singh, S.; Sharma, S.K.; Rathod, D.W.: “A Review On Process Planning Strategies And Challenges Of WAAM” , *Materials Today: Proceedings*, 47 **(2021)** 6564-6575.
- [136] Li, C.; Gu, H.; Wang, W.; Wang, S.; Ren, L.; Wang, Z.; Zhai, Y.: “Effect of Heat Input on Formability, Microstructure, and Properties of Al-7Si-0.6Mg Alloys Deposited by CMT-WAAM Process” , *Applied Sciences*, 10 **(2019)** 70.
- [137] Hauser, T.; Reisch, R.; Breese, P.P.; Kaplan, A.; Nalam, Y.; Joshi, K.; Bela, K.; Volpp, J.: “Oxidation in Wire Arc Additive Manufacturing of Aluminium Alloys” , *Additive Manufacturing*, 41 **(2021)**.
- [138] Xiangfang, X.; Ding, J.; Ganguly, S.; Diao, C.; Williams, S.: “Oxide Accumulation Effects On Wire + Arc Layer-By-Layer Additive Manufacture Process” , *Journal of Materials Processing Technology*, 252 **(2017)** 739-750.
- [139] Wang, B.; Yang, G.; Zhao, S.; Cui, C.; Qin, L.: “Effects of On-Line Vortex Cooling on the Microstructure and Mechanical Properties of Wire Arc Additively Manufactured Al-Mg Alloy” , *Metals*, 10 **(2020)** 1004.
- [140] Rodrigues, T.; Duarte, V.; Avila, J.A.; Santos, T.G.; Miranda, R.M.; Oliveira, J.P.: “Wire And Arc Additive Manufacturing Of HSLA Steel: Effect Of Thermal Cycles On Microstructure And Mechanical Properties” , *Additive Manufacturing* 11 **(2019)** 440-450.
- [141] Astafurova, E.G.; Melnikov, E.; Astafurov, S.; Panchenko, M.; Reunova, K.; Moskvina, V.; Maier, G.; Kolubaev, E.: “Microstructure And Mechanical Properties Of Low-Carbon Steel Fabricated By Electron-Beam Additive Manufacturing” , *Letters on Materials*, 11 **(2021)** 427-432.
- [142] Tian, H.; Lu, Z.; Li, F.; Chen, S.: “Predictive Modeling of Surface Roughness Based on Response Surface Methodology after WAAM” *Konferans*, **(2019)**.
- [143] Wu, B.; Pan, Z.; Ding, D.; Cuiuri, D.; Li, H.; Xu, J.; Norrish, J.: “A Review Of The Wire Arc Additive Manufacturing Of Metals: Properties, Defects And Quality Improvement” , *Journal of Manufacturing Process*, 35 **(2018)** 127-139.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini İnkılap İlköğretim okulunda tamamladı. 2015 yılında Tevfik Seno Arda Anadolu Lisesinden mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi'nde Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümüne başladı. 2018-2019 yılları arasında Panepistimio Thessalias Üniversitesinde erasmus öğrenci değişim programı kapsamında eğitim aldı. 2020 yılında Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Özel bir firmada proje mühendisliği pozisyonunda çalışmaktadır.



