

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ROBOTİK TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ VE
YÜKSEK SICAKLIK MALZEMESİ (INCONEL 625) İLE
TÜRBİN KANAT ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sabri Mert SÖĞÜTLÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

**TEMMUZ 2025
İSTANBUL**

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ROBOTİK TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ VE
YÜKSEK SICAKLIK MALZEMESİ (INCONEL 625) İLE
TÜRBİN KANAT ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sabri Mert SÖĞÜTLÜ
(210022009)
0009-0005-8019-5382

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa KOÇAK

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ozan ÇOBAN

İstanbul 2025



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Jüri Tez Onay Formu

30.07.2025

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Bu çalışma 30.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (Tezli Yüksek Lisans) Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Prof. Dr. Mustafa KOÇAK

Danışman

İstanbul Gedik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ozan ÇOBAN

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

Prof. Dr. Gürel ÇAM

Üye (İmza)

İskenderun Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İzzet Paruğ DURU

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Doruk GÜRKAN

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Kıvanç Ali ANIL

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAŞLAYICI

Üye (İmza)

İstanbul Medipol Üniversitesi

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Robotik Eklemeli İmalat Yöntemi ve Yüksek ısı malzemesi ile 3D Türbin Kanat üretimi” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya ’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim (30/07/2025).

Sabri Mert SÖĞÜTLÜ

Bu tez çalışmasını; her daim yanımda olan, bana koşulsuz sevgi ve destek sunan, sabırlarıyla en zor zamanlarımı kolaylaştıran aileme ithaf ediyorum.

Ayrıca, bilimsel merakıma yön veren, mühendislik vizyonumu şekillendiren tüm hocalarıma ve bu süreçte emeği geçen herkese içtenlikle teşekkür ederim.



ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi, Robotik Tel Ark Eklemeli İmalat (WAAM) yöntemiyle Inconel 625 alaşımı kullanılarak türbin kanadı üretimi üzerine odaklanan bir araştırmanın ürünüdür. Tez süreci boyunca literatür çalışmaları, modelleme, üretim hazırlıkları ve deneysel uygulamalar titizlikle yürütülmüştür.

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, akademik desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Mustafa Koçak'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda çalışmamın bilimsel ve uygulamalı derinliğini artıran katkılarıyla yol gösteren eş danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ozan Çoban'a da şükranlarımı sunarım.

Deneysel üretim sürecinde desteğini esirgemeyen ve sürece doğrudan katkı sağlayan değerli Nur İsmet Hanım'a özel olarak teşekkür ederim.

Ayrıca, bu süreçte her zaman yanımda olan, motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan sevgili aileme ve dostlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışmamın, eklemeli imalat teknolojilerinin enerji sektörü özelindeki uygulamalarına katkı sağlaması ve gelecekte yapılacak bilimsel çalışmalara temel oluşturması en büyük temennimdir.

Temmuz 2025

Sabri Mert SÖĞÜTLÜ
Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Konusu	1
1.2 Tezin Amacı	1
1.3 Literatür Araştırması	1
2. GELENEKSEL İMALAT YÖNTEMLERİ	15
2.1 Talaşlı İmalat Yöntemleri.....	16
2.1.1 Tornalama.....	16
2.1.1 Frezeleme.....	18
2.1.3 Delme	19
2.1.4 Taşlama.....	20
2.1.5 Planyalama ve vargelleme	22
2.1.6 Broşlama.....	23
2.1.7 Honlama	25
2.1.8 Lepleme	26
2.1.9 Testere ile kesme	27
2.1.10 Talaşsız imalat yöntemleri.....	28
2.1.11 Döküm yöntemleri.....	29
2.1.12 Kaynak ve birleştirme yöntemleri	29
2.1.13 Plastik şekillendirme yöntemleri	30
3. EKLEMELİ İMALAT	31
4. KAYNAK TELİ İLE EKLEMELİ İMALAT	33

4.1 Kaynak Teli ile Eklemeli İmalatın Avantajları	36
4.2 Geleneksel İmalat Yöntemlerine Göre Avantajları	38
4.3 Diğer Eklemeli İmalat Yöntemlerine Göre Avantajları	39
5. ROBOTİK TEL ARK EKLEMELİ İMALAT	40
6. TÜRBİN KANADI.....	42
6.1 Gaz Türbini Kanadı.....	42
6.2 Buhar Türbini Kanadı.....	43
6.3 Kaynak Teli ile Eklemeli İmalat ile Buhar Türbini Kanadı Uygulamaları	44
7. KAYNAK TELİ İLE EKLEMELİ İMALAT İLE TÜRBİN KANADI	
ÜRETİMİ.....	49
7.1 Giriş.....	49
7.2 Metodoloji	49
7.3 Türbin Kanadı Malzemesi – Inconel 625	51
7.4 Türbin Kanadı Tasarımı	51
7.5 Hızlı Prototip Üretimi ile Tasarım Doğrulanması	57
7.6 Türbin Kanadı Üretimi	58
8. SONUÇLAR	65
KAYNAKÇA	68

KISALTMALAR

WAAM:	Wire Arc Additive Manufacturing
AM:	Additive Manufacturing
TAEİ:	Tel Ark Eklemeli İmalat
Eİ:	Eklemeli İmalat
ORNL:	Oak Ridge National Laboratory
PBF-LB:	Laser Beam Powder Bed Fusion
R-WAAM:	Robotic Wire Arc Additive Manufacturing
DFM:	Design for Manufacturing
GMAW:	Gas Metal Arc Welding
LBM:	Laser Beam Melting
EBM:	Electron Beam Melting
SLS:	Selective Laser Sintering
SLA:	Stereolithography
SLM:	Selective Laser Melting
FDM:	Fused Deposition Modeling
CNC:	Computer Numerical Control
MIG:	Metal Inert Gas
MAG:	Metal Active Gas
TIG:	Tungsten Inert Gas
MAM:	Metal Additive Manufacturing
ASME:	American Society of Mechanical Engineers
NACA:	National Advisory Committee for Aeronautics
CAD:	Computer Aided Design
CAM:	Computer Aided Manufacturing
AS:	Arc Start
AE:	Arc End
CFD:	Computational Fluid Dynamics
CMT:	Cold Metal Transfer
DED:	Directed Energy Deposition

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa No.
Çizelge 7.1: Inconel 625 Malzeme Kimyasal Bileşimi.....	51
Çizelge 7.2: Inconel 625 Malzeme Mekanik Özellikleri	51
Çizelge 7.3: OTC FD-B6L Kaynak Robotu Teknik Özellikleri	59
Çizelge 7.4: WAAM Üretimi için Proses Parametreleri.....	63



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 2.1:Torna Tezgâhı ve Kısımlarının Gösterimi	17
Şekil 2.2:Tornalama İşlemleri (a) Alın Tornalama, (b) Konik Tornalama, (c) Tesviye, (d) Form Verme, (e) Pah Kırma, (f) Kesme, (g) Diş Açma, (h) iç Tornalama, (i) Delme, (j) Tırtıl Çekme.....	17
Şekil 2.3: (a) Yatay ve (b) Düşey Freze Tezgahları.....	18
Şekil 2.4: (a) Çevresel ve (b) Alın Frezeleme.....	19
Şekil 2.5: Örnek Matkap Tezgâhı	20
Şekil 2.6: Delme İşlemi.....	20
Şekil 2.7:Taşlama İşlemleri; (a), (b) Düzlemsel Taşlama, (c), (d) Silindirik Taşlama	21
Şekil 2.8: Taşlama Tezgâhı	22
Şekil 2.9: (a) Vargelleme ve (b) Planyalama İşlemleri	23
Şekil 2.10: (a) Vargel ve (b) Planya Tezgâhları.....	23
Şekil 2.11: Broşlama İşlemi	24
Şekil 2.12: Broşlama ile Üretilen Bazı Parçalar; (a) Dış Broşlama, (b) İç Broşlama	24
Şekil 2.13: Honlama İşlemi.....	25
Şekil 2.14: Lepleme İşlemi (Lens Yüzeyinin İşlenmesi).....	27
Şekil 2.15: (a) Motorlu Kollu Testere, (b) Şerit Testere, (c) Dairesel Testere	28
Şekil 4.1: Tel Ark Eklemeli İmalat (WAAM) Sürecinin Gösterimi	34
Şekil 6.1: TÜBİTAK MAM Tarafından Üretilen Buhar Türbini Kanadı	44
Şekil 6.2: ORNL'de Üretimi Gerçekleştirilen Gaz Türbini Kanadı	45
Şekil 6.3: Siemens Tarafından Üretilen Türbin Kanadı.....	47
Şekil 6.4: Gefertec Tarafından Üretilen Türbin Kanatları	48
Şekil 7.1: Türbin Kanadı Üretimi Akış Şeması	50
Şekil 7.2: NACA 2412 Profil Parametreleri	52
Şekil 7.3: NACA 2412 Profil Kesiti 0° Saldırı Açısı Pozisyonu	53
Şekil 7.4: NACA 2412 Profil Kesiti 15° Saldırı Açısı Pozisyonu	53

Şekil 7.5: SolidWorks Programında NACA 2412 Profili Kesitinden Oluşturulmuş Türbin Kanadı Tasarımı	54
Şekil 7.6: SolidWorks Programında NACA 2412 Profili Kesitinden Oluşturulmuş Türbin Kanadı Tasarımı	55
Şekil 7.7: SolidWorks Programında NACA 2412 Profili Kesitinden Oluşturulmuş Türbin Kanadı	55
Şekil 7.8: SolidWorks Programında Malzeme Kütüphanesinde Inconel 625 Malzeme Tanımlanması	56
Şekil 7.9: SolidWorks Programında NACA 2412 Profili Kullanılarak Tasarlanmış Türbin Kanadı	56
Şekil 7.10: UltiMaker Cura Programında Türbin Kanadı	57
Şekil 7.11: Tasarlanan Türbin Kanadı Prototipi	58
Şekil 7.12: WAAM ile Türbin Kanadı Üretimi Sırasında Kullanılan Üretim Hücresi	59
Şekil 7.13: Üretim için Kullanılan OTC FD-B6L Model Altı Serbestlik Dereceli Endüstriyel Kaynak Robotu	60
Şekil 7.14: OTC FD-B6L 6 Eksen Kaynak Robotu Erişim Alanı	61
Şekil 7.15: OTC FD-B6L Kaynak Robotu Güç Kaynağı	61
Şekil 7.16: Inconel 625 Malzemedен Oluşturulan WAAM Duvar	63
Şekil 7.17: Tamamlanmış Nihai Türbin Kanadı Parçası	64

ROBOTİK TEL ARK EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ VE YÜKSEK SICAKLIK MALZEMESİ (INCONEL 625) İLE TÜRBİN KANAT ÜRETİMİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yüksek sıcaklık uygulamalarına yönelik olarak nikel bazlı bir süperalaşım olan Inconel 625 malzemesi kullanılarak robotik Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) yöntemiyle özel tasarlanmış bir buhar türbini kanadı prototipi üretilmiştir. WAAM, özellikle metal tabanlı bileşenlerin üretiminde malzeme verimliliği, üretim süresi ve tasarım özgürlüğü açısından geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Bu bağlamda, enerji sektöründe yüksek sıcaklığa ve korozif ortamlara dayanıklı türbin parçalarının üretimi için bu yöntemin uygulanabilirliği araştırılmıştır.

Tasarım sürecinde, literatürde aerodinamik performansı ile yaygın şekilde kullanılan NACA 2412 profili temel alınarak özel bir türbin kanadı geometrisi oluşturulmuştur. CAD yazılımı ile dijital modelleme tamamlanmış ve üretim dosyaları STL formatında hazırlanmıştır. Üretim aşamasında OTC FD-B6L altı eksenli kaynak robotu ve Daihen Welbee P500L güç kaynağı kullanılmıştır. Synchro Feed sistemi sayesinde kaynak akımı ve tel sürme hızı senkronize edilmiş, düşük sıçramalı (low spatter) kaynak karakteristiği elde edilmiştir. Üretim parametreleri AS (arc start) ve AE (arc end) segmentlerine göre ayrı ayrı tanımlanmış ve kaynak havuzu kontrolü sağlanmıştır. Katmanlar arasında uygulanan bekleme süresiyle sıcaklık dengesi korunmuş, iç gerilmeler minimize edilmiştir.

Her ne kadar üretim sonrası yüzey pürüzlülüğü ölçümü, mikroyapı analizi ve mekanik testler yapılamamış olsa da elde edilen nihai parçanın tasarım formuna yüksek oranda uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Katmanlar arası tutarlılık ve genel geometrik bütünlük başarılı bulunmuştur. Süreç boyunca malzeme kaybı minimum seviyede tutulmuş, üretim süresi ise geleneksel yöntemlere göre önemli ölçüde kısalmıştır.

Bu çalışma, Oak Ridge National Laboratory (ORNL) tarafından endüstriyel düzeyde gerçekleştirilen WAAM türbin kanadı üretimine benzer bir sürecin laboratuvar ölçeğinde uygulanabilirliğini araştırmaktadır. Elde edilen sonuçlar, WAAM yönteminin yüksek sıcaklık ve zorlu ortam koşullarına maruz kalan bileşenlerin üretimi için umut verici bir teknoloji olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Eklemeli İmalat, Türbin Kanadı, Inconel 625, Robotik Tel Ark Eklemeli İmalat, Yüksek Isı Malzemesi ile Üretim, Özel Kanat Geometrisi*

TURBINE BLADE PRODUCTION WITH HIGH TEMPERATURE MATERIAL (INCONEL 625) BY ROBOTIC WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING

ABSTRACT

This thesis presents the experimental production of a custom-designed steam turbine blade using Robotic Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) technology and Inconel 625, a nickel-based superalloy renowned for its resistance to high temperatures and aggressive environments. WAAM, as an emerging metal additive manufacturing method, offers significant advantages over conventional subtractive techniques, including reduced material waste, shortened lead times, and the ability to manufacture complex geometries. The aim of this study is to evaluate the applicability of WAAM for fabricating turbine components exposed to extreme service conditions, particularly in the energy industry.

The blade geometry was based on the widely used NACA 2412 airfoil profile, selected for its aerodynamic efficiency. The design was modeled using CAD tools, and production files were exported in STL format. The manufacturing process was carried out using an OTC FD-B6L six-axis robotic welding system integrated with a Daihen Welbee P500L power source. The system's compatibility with Synchro Feed technology allowed for precise synchronization between wire feed rate and welding current, ensuring a stable and low-spatter arc during deposition. A segmented parameter approach was adopted, with separate settings for the start (AS) and arc end (AE) regions, enabling better control over the molten pool and layer transitions. Interlayer waiting times were implemented to promote thermal balance and reduce residual stress.

Although no mechanical testing, surface roughness measurements, or microstructural characterizations were performed after production, visual inspection confirmed that the final part exhibited high conformity to the intended design. Layer consistency and general geometric accuracy were deemed successful. Furthermore, the process demonstrated reduced material consumption and improved time efficiency compared to conventional methods.

This study is inspired by the industrial-scale turbine blade production achieved at Oak Ridge National Laboratory (ORNL) and attempts to replicate a similar process in a controlled laboratory setting. The results indicate that robotic WAAM holds strong potential for manufacturing high-performance parts and can be particularly effective in applications such as repair, maintenance, and the production of components with complex, custom geometries operating under extreme conditions.

Keywords: *Additive Manufacturing, Turbine Blade, Inconel 625, Robotic WAAM, High-Temperature Alloy Fabrication, Custom Airfoil Geometry.*

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Konusu

Bu yüksek lisans tezi robotik eklemeli imalat yöntemi ve yüksek ısı malzemesi ile 3D türbin kanat üretimi üzerine odaklanmaktadır. Buhar türbin kanatları gibi üretimi uzun süren karmaşık geometrili metal parçaların geleneksel imalat yöntemleri ile imalatının yanı sıra tel beslemeli ark eklemeli imalat (WAAM) yönetiminin de kullanılabileceği düşünülmüştür.

1.2 Tezin Amacı

Bu yüksek lisans tezinin asıl amacı, Tel Beslemeli Ark Eklemeli İmalat (WAAM) yöntemi ile üretilen parçaların geleneksel imalat yöntemlerine göre sunduğu avantajları belirlemek ve bu yöntemin endüstriyel uygulamalarını geliştirmektir. Buhar türbinlerinin kanatları gibi üretimi uzun süren ve üretiminde birçok farklı imalat yönetiminin kullanıldığı karmaşık geometriye sahip parçaları daha kısa sürede imal edilmesi için kaynak teli ile eklemeli imalat yönteminin kullanılmasının, geleneksel imalat yöntemlerine göre ne gibi avantajlar sunduğunu değerlendirmektedir.

1.3 Literatür Araştırması

Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing- WAAM) yöntemi son yıllarda oldukça dikkat çekmektedir. 2019 yılında Siemens firması EDAG ile iş birliği yaparak, endüstriyel uygulamalar için tel ark eklemeli imalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) teknolojisini geliştirme odaklandı. Bu iş birliği kapsamında, “Next Generation Spaceframe 2.0” adlı bir sistem geliştirildi. Bu sistem, araç gövdeleri için esnek ve hafif yapılar oluşturmayı hedefliyordu. Bu proje, Hannover Messe 2019 fuarında tanıtıldı ve dijital ikiz kullanarak bu dönüşümü başarılı bir şekilde uygulama sürecinin ilk adımlarının atıldığını gösterdi (Siemens 2019). Ayrıca, Siemens, gaz türbini parçalarının onarımında eklemeli imalat

teknolojilerini kullanarak yenilikçi çözümler geliştirdi. Örneğin, lazer ışınli toz yatak füzyonu (Laser Beam Powder Bed Fusion – PBF-LB) yöntemiyle türbin kanatçıklarının onarımını yaptı. Bu süreçte, kanatçık uçlarına soğutma yapıları eklenerek, malzeme kaybı ve performans düşüşünü engellemeye çalıştı (Metal-AM 2021).

Buhar türbini kanadı gibi büyük ve karmaşık parçaların üretimi, geleneksek döküm ve dövme yöntemleri ile yapılır. Ancak, bu yöntemlerin düşük hacimli üretimi oldukça maliyetlidir. Üretim süresi oldukça uzundur. Özellikle COVID-19 salgınında türbin kanadı parçalarının tedarik sürelerinin iki yıla kadar çıkması ve yurt dışına bağımlılığın kritik düzeylere ulaşması, alternatif üretim yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiğini gündeme getirmiştir (Kirka 2024). Alternatif üretim yöntemlerinin geliştirilmesi için Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Siemens Technology şirketi ile yürüttüğü ortak çalışmalarda tel ark eklemeli imalat (Wire Arc Additive Manufacturing- WAAM) büyük ölçekli döner buhar türbini kanatlarının 3D baskısı başarıyla gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, 25 pound (yaklaşık 11,3 kg) üzerindeki parçaların ölçeklenebilir şekilde eklemeli imalat yönetimi ile imal edilebileceğini gösterdi. Geleneksel imalat yöntemleri ile 7-8 ay süren bu tür parçalar, ORNL’de 12 saat içinde yazdırılmış, ardından yapılan talaşlı imalat işlemleriyle iki hafta içinde kullanıma hazır hale getirilmiştir (Kulkarni 2023). Tel ark eklemeli imalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) yöntemi, kaynak robot kolu ile kaynak telinin elektrik arkı yardımı ile ergitilerek katman katman şekil verilmesi prensibine dayanır. Bu çalışma düşük hacimli üretim ve bakım-onarım işlerinde tel ark eklemeli imalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) teknolojisinin potansiyelini ortaya çıkarmıştır. Türbin kanatlarının geometrik olarak paralel ya da dik yüzeyler içermemesi, bu teknolojinin karmaşık geometrilere de başarılı olduğunu kanıtlamıştır. Ayrıca, üretim sırasında yapılan tarama işlemleri sayesinde talaşlı imalat süreçleri daha verimli hale getirilmiştir. Bu gelişme enerji sektöründe yedek parça termin sürelerinin esnekliğini arttırmakta ve on-demand (talep bazlı) imalatın önünü açmaktadır. Bu çalışma ile araştırma ekibi üretim bağımsızlığı ve krizlere karşı esneklik sağlamıştır. Geleneksel imalat yöntemlerinin sınırları kaldırılmış, endüstriyel hafızası kaybedilmiş parçalara dahi yeniden hayat verilmesi sağlanmıştır. Bu gelişme, yalnızca teknik bir başarı değil, aynı zamanda

stratejik bir üretim yaklaşımının da başlangıcı olacaktır (Oak Ridge National Laboratory - ORNL 2023).

Robotik Tel Ark Eklemeli İmalat (Robotic Wire Arc Additive Manufacturing – R-WAAM) yöntemi, farklı metal malzemelerin katmanlar halinde birleştirilmesiyle fonksiyonel gradyanlı ve bimetalik yapıların üretimine olanak sağlar. Bu yenilikçi imalat yöntemi, üretim sürecinde sağladığı verimlilik ve tasarım esnekliği sayesinde endüstriyel uygulamalarda büyük potansiyel ortaya koymaktadır. Gürol ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ferritik ve ostenik (316L paslanmaz çelik) malzemelerin robotik tel eklemeli imalat yöntemi ile bimetalik yapı olarak üretimi gerçekleştirilmiş ve yapıların mikro yapısal özellikleri ile mekanik performansları detaylı olarak karakterize edilmiştir. Çalışmada, ara yüzey bölgesinde gerçekleşen martensitik dönüşümün, malzemenin sertliğinde %95 artış ve kırılma tokluğunda %70 azalma gibi belirgin mekanik özelliklerin değişimlerine yol açtığı saptanmıştır. Ayrıca, katmanlar arası ısı dağılımının optimize edilmesi ve uygulanan bekleme sürelerinin mikro yapının stabilizasyonunda kritik rol oynadığı vurgulanmıştır. Elde edilen bu bulgular, tel ark eklemeli imalat yöntemi ile üretilen bimetalik parçaların tasarım aşamasında ara yüzey özelliklerinin dikkate alınmasının, havacılık, otomotiv ve savunma sanayii gibi yüksek performans ve hassasiyet gerektiren alanlarda bu yöntemin kullanılabilmesini işaret etmektedir (Gürol, Turgut, ve diğerleri 2024).

Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM), son yıllarda metal eklemeli imalat alanında önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu yöntem, kaynak teli ve elektrik arkı kullanılarak eriyen metalin, katmanlar halinde biriktirilmesi prensibiyle parça oluşturulmasına dayanır. Tel ark eklemeli imalat yöntemi, büyük boyutlu parçaların üretiminde sunduğu avantajlar- düşük sistem kurulum maliyetleri, geniş tel besleme seçenekleri ve yüksek üretim kapasitesi- nedeniyle endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir (Turgut, Gürol ve Dilibal, ve diğerleri 2022). Literatürde, tel ark eklemeli imalat yönteminin farklı alaşımların birleştirilmesi ile bimetalik yapıların üretimine dair birçok çalışma yer almaktadır. Farklı kimyasal kompozisyona sahip kaynak tellerinin ardışık kullanımı, parçaların belirli bölgelerinde farklı mekanik ve kimyasal özelliklerin kazandırılmasını mümkün kılmakta ve bu sayede işlevselliğin artırılmasına olanak sağlamaktadır (Turgut, Gürol ve Dilibal, ve diğerleri 2022). Ayrıca, tel ark eklemeli imalat sürecinde kullanılan akım, voltaj, tel besleme hızı, tarama hızı, gibi temel

parametrelerin optimize edilmesi; üretilen parçaların mikroyapı, sertlik ve mekanik dayanım gibi özelliklerine doğrudan etki eder. Bu kapsamda, parametre optimizasyonu ve bimetallik arayüzeylerin karakterizasyonu, üretim kalitesini arttırmaya yönelik kritik araştırma konuları arasında yer almaktadır (Turgut, Gürol ve Dilibal, ve diğerleri 2022). Sonuç olarak, tel ark eklemeli imalat yöntemi ile üretilen bimetallik yapıların, ileri malzeme tasarımlarında sunduğu esneklik ve performans avantajları, endüstriyel uygulamalarda kullanım potansiyelini önemli ölçüde arttırmaktadır. Mevcut araştırmalar, tel ark eklemeli imalat parametrelerinin iyileştirilmesi ve bimetallik arayüzeylerdeki element difüzyonunun kontrolü konularına odaklanarak, bu teknolojinin daha da verimli hale getirilmesi ve uygulama alanlarının artırılması için yol göstermektedir (Turgut, Gürol ve Dilibal, ve diğerleri 2022).

Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) yöntemi, yüksek birikim hızı, düşük maliyet ve geniş tel malzeme seçeneği gibi avantajları kalın cidarlı metal parçaların üretiminde giderek daha fazla tercih edilmektedir. Ancak tel ark eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçaların mekanik ve mikro yapısal özellikleri, kullanılan tel türü, proses parametreleri ve yönelim gibi değişkenlere bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Dağyikan ve diğerlerinin yapmış olduğu detaylı çalışmada, düşük alaşımlı çeliklerin tel ark eklemeli imalat yöntemi ile ER70S-6 (SG2, SG3) ve yüksek mukavemetli ER110S-G kaynak telleri kullanılarak üretilmiş; mikro yapı, mekanik davranış ve kırılma tokluğu açısından değerlendirilmiştir. Katmanlar arası sıcaklık kontrolü (135 – 165 °C) ve yüzey temizliği gibi proses parametreleri optimize edilerek, 60 mm yüksekliğe sahip 27 katmanlı numuneler elde edilmiştir. Radyografi testleri, katmanlar arasında herhangi bir kaynak hatasının olmadığını göstermiştir. Mikro yapı analizlerinde, SG2 ve SG3 telleriyle üretilen numunelerde poligonal ferrit ve perlit, SG3'te ise akiküler ferrit, bainit ve M-A bileşenleri tespit edilmiştir. Bu yapıların, özellikle kırılma tokluğu ve sertlik gibi mekanik özelliklerde belirleyici olduğu bulunmuştur. Çekme ve Charpy V- çentik darbe testleri, tel ark eklemeli imalat parçaların yönelime bağlı olarak anizotropik mekanik davranışlar sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu durum, tel ark eklemeli imalat ile üretilen kalın cidarlı yapıların tasarım ve uygulamalarında, yönelimin ve tel seçiminin kritik rol oynadığını göstermektedir Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive

Manufacturing – WAAM) yöntemi, yüksek üretim hızı ve maliyet avantajları nedeni ile son yıllarda kendinden oldukça söz ettirmektedir. Ancak, bu yöntemdeki yüksek ısı girdisi, katmanlar arasında ısı birikmesine neden olarak boyutsal sapmalar ve mekanik özelliklerde değişikliklere yol açabilmektedir. Bu nedenle, üretim sürecinde ısı birikmesini kontrol etmek amacıyla katmanlar arası bekleme süresi (interlayer dwell time) önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır (Turgut, Gürol ve Onler 2023).

Turgut ve diğerlerinin yapmış olduğu detaylı çalışmada, düşük karbonlu alaşımlı çelik bileşenlerin tel ark eklemeli imalat yöntemi ile üretiminde farklı bekleme sürelerinin (0s, 60s ve 120s) etkileri incelenmiştir. Çalışma, bekleme süresinin artması ile, malzeme içerisindeki sıcaklık dağılımının daha homojen hale geldiğini ve durumun mikroyapısal özelliklerde iyileşmelere yol açtığını göstermektedir. Özellikle, 120 saniyelik bekleme süresi uygulanan örneklerde, sürekli biriktirme yapılan örnekler göre ortalama sertlikte %18'lik artma ve akma mukavemetinde %10'luk bir artma gözlenmiştir (Turgut, Gürol ve Onler 2023).

Benzer şekilde, Singh ve diğerlerinin paslanmaz çelik 316L üzerinde gerçekleştirdiği çalışmalarda, 20 ila 80 saniye arasında değişen bekleme sürelerinin etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, bekleme süresinin artması ile duvar yüksekliği ve genişliğinde azalma, tane boyutlarında incelmeye ve mikroyapısal homojenlikte artış olduğunu ortaya koymaktadır. Bu mikroyapısal değişiklikler, malzemenin mikrosertlik ve basma dayanımı gibi mekanik özelliklerinde iyileşmelere neden olmuştur (Singh, ve diğerleri 2021).

Yapılan tüm bu çalışmalar, katmanlar arası bekleme süresinin tel ark eklemeli imalat sürecinde ısı birikimini kontrol altına alınmasında ve elde edilen parçanın kalite düzeyinin iyileştirilmesinde etkin bir değişken olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Bununla birlikte, bekleme süresinin uzatılması, üretim süresinin toplam döngüsünü arttırması nedeni ile bu parametrenin üretim verimliliği üzerindeki etkileri dikkatle değerlendirilmelidir. Dolayısı ile hem kaliteli hem de üretim süresini dengeleyecek optimum bekleme süresinin belirlenmesi önemli bir gerekliliktir.

Eklemeli imalat, son yıllarda üretim teknolojileri arasında hızla önem kazanan bir yöntem olmakla birlikte, geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırmalı analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde bu karşılaştırmaları ele alan birçok

çalışma, her iki yöntemin avantaj ve sınırlılıklarını farklı yönlerde incelemiştir. Selçuk ve Durak çalışmalarında eklemeli imalat ile ve geleneksel yöntemlerle üretilmiş Ti alaşımlarının abrazif aşınma davranışlarını karşılaştırmışlardır. P800A zımpara ile gerçekleştirilen aşınma testlerinde, yüzey pürüzlülüğü, sürtünme katsayısı, kütle kaybı ve sertlik gibi mekanik parametreler değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, eklemeli imalat yöntemi ile üretilen alaşımların, özellikle yüzey kalitesi ve aşınma direnci bakımından geleneksel imalat yöntemleri ile üretilen parçalara kıyasla farklı karakteristikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Kristal yapıdaki farklılıkları, üretim parametrelerinin ve yüzey morfolojisinin bu sonuçlarda belirleyici olduğu ifade edilmiştir (Selçuk ve Durak 2023).

Aktürk ve Korkmaz ise 2021 yılında eklemeli imalat ile üretilen alüminyum alaşımların yapısal özelliklerine odaklanan bir derleme çalışması sunmuşlardır. Çalışmada, alüminyum alaşımlarının eklemeli imalat sürecinde karşılaştığı mikro yapısal değişimler, plastik deformasyonun mekanik davranış üzerindeki etkisi ve simülasyon temelli analizlerin doğruluğu detaylandırılmıştır. Eklemeli imalat ile elde edilen alaşımların daha homojen yapılar oluşturduğu ve bu sayede geleneksel döküm yöntemlerine göre daha yüksek dayanım sergilediği belirtilmiştir. Malzeme seçiminde, toz karışımının tanecik boyutu, bileşim oranları ve uygulanan ısı işlemlerin belirleyici olduğu vurgulanmıştır (Aktürk ve Korkmaz 2021).

Eklemeli imalat teknolojileri ile talaşlı imalat yöntemlerinin etkileşimini 2020 yılında ele alan Dedeakayoğulları ve Kaçal, her iki yöntemin üretim süreçlerinde birbirini tamamlayıcı roller üstlenebileceğini belirtmişlerdir. Eklemeli imalatın düşük maliyetli prototipleme ve kompleks geometrilere sahip parçaların üretimi gibi avantajlarına karşın, yüzey kalitesi ve ölçüsel hassasiyet açısından talaşlı imalat süreçlerine olan gereksinim devam etmektedir. Araştırmalar, eklemeli imalat sonrası uygulanan işleme işlemlerinin verimliliğini artırmak adına, kesme parametrelerinin doğru belirlenmesinin önemli olduğunu göstermektedir. Ayrıca, hibrit üretim yaklaşımlarının stratejik sektörlerde (örneğin savunma ve havacılık) maliyet ve performans açısından potansiyel taşıdığı vurgulanmıştır (Dedeakayoğulları ve Kaçal 2020).

Özsolak tarafından 2019 yılında yürütülen çalışma, eklemeli imalat (Eİ) yöntemleri ile bu yöntemlerde kullanılan malzemeleri kapsamlı bir şekilde değerlendirmektedir. Eklemeli imalat, dijital 3D model verileri temel alınarak

malzemenin katmanlar halinde birleştirilmesi yoluyla fiziksel nesnelerin üretimini sağlayan bir teknolojidir. Bu yöntem, geleneksel çıkarma esaslı imalat tekniklerinden farklı olarak, malzeme israfını azaltmakta ve karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimini kolaylaştırmaktadır. Çalışmada lazer ışını ile eritme (LBM), elektron ışını ile eritme (EBM), seçici lazer sintereleme (SLS), stereolitografi (SLA), eriyik filament modelleme (FDM), malzeme jeti ve bağlayıcı püskürtme gibi temel eklemeli imalat yöntemleri detaylandırılmıştır. Ayrıca eklemeli imalat süreçlerinde yaygın olarak kullanılan titanyum, alüminyum ve kobalt-krom alaşımlarının, özellikle havacılık, otomotiv ve medikal gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde tercih edildiği vurgulanmıştır. Eklemeli imalat teknolojisinin kalıp gerektirmemesi, tasarım özgürlüğü sağlaması, hızlı prototipleme imkânı sunması ve düşük malzeme tüketimi gibi önemli avantajları bulunmaktadır. Bununla birlikte, yüzey kalitesi ve mekanik özellikler açısından bazı sınırlamalar barındırmakta ve bu durum, ek son işleme süreçlerinin gerekliliğini doğurmaktadır. Genel olarak çalışma, eklemeli imalatın üretim süreçlerine sunduğu esneklik ve çeşitlilik ile modern imalat teknolojilerinde dönüşümsel bir rol oynadığını göstermektedir (Özsolak 2019).

Kerbrat ve diğerlerinin yaptığı çalışmada eklemeli imalat (Eİ) ve talaşlı imalatın avantajlarını bir araya getiren yeni bir “Üretim İçin Tasarım” (Design for Manufacturing – DFM) yaklaşımını ortaya koymaktadır. Önerilen hibrit yöntem, eklemeli imalatın karmaşık geometriler üretme kabiliyeti ile talaşlı imalatın yüksek yüzey kalitesi ve hassasiyetini birleştirerek üretim süreçlerinin verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım kapsamında, tasarım sürecinde her iki yöntemin teknik avantajları dikkate alınarak parçaların hem üretim maliyetlerinin azaltılması hem de mekanik performanslarının artırılması hedeflenmiştir. Ayrıca, topoloji optimizasyonu ve şekil optimizasyonu gibi mühendislik teknikleri kullanılarak hem malzeme kullanımı minimize edilmiş hem de yapısal dayanım maksimize edilmiştir. Sonuç olarak, zaman, maliyet ve malzeme açısından tasarruf sağlamakta, aynı zamanda ürün kalitesi ve işlevselliği geliştirilmektedir. Çalışma, özellikle havacılık ve otomotiv gibi yüksek hassasiyet gerektiren sektörler için hibrit üretim stratejilerinin sunduğu yenilikçi ve sürdürülebilir çözümleri vurgulamaktadır (Kerbrat, Mognol ve Hascoët 2011).

Özsolak tarafından gerçekleştirilen çalışmada, eklemeli imalat (Additive Manufacturing – AM) teknolojilerinin temel prensipleri, uygulama alanları ve

kullanılan malzemeler ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Özellikle AM'nin sunduğu tasarım esnekliği ve çok malzemeli karmaşık yapıların üretimine olanak tanınması gibi avantajları vurgulanmıştır. Çalışmada lazer ışını eritme, elektron ışını eritme ve lazerle metal biriktirme gibi metal esaslı eklemeli imalat yöntemleri tanıtılmış; çelik, alüminyum ve titanyum gibi alaşımların bu yöntemlerle üretiminde karşılaşılan avantajlar ve zorluklar ele alınmıştır. Ayrıca, eklemeli imalat teknolojilerinin havacılık, otomotiv, biyomedikal ve enerji sektörlerindeki rolü üzerinde durulmuş; malzeme seçiminin, elde edilen parçaların özelliklerine olan etkisi tartışılmıştır. Sonuç olarak, eklemeli imalatın endüstriyel alandaki konumu ve gelecekteki gelişim potansiyeli değerlendirilmiştir (Özsolak 2019).

Ayan ve Kahraman tarafından yürütülen çalışmada, tel ark eklemeli imalat (TAEİ) yöntemi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi zor olan, karmaşık ve özel tasarıma sahip parçaların üretiminde TAEİ'nin sunduğu avantajlar vurgulanmıştır. Çalışmada, TAEİ'nin temel prensipleri, kullanılan kaynak teknikleri ve bu yöntemin sağladığı yüksek malzeme biriktirme kapasitesi sayesinde büyük ölçekli metal parçaların üretimindeki etkinliği ele alınmıştır. Ayrıca, TAEİ'nin farklı malzemeler üzerindeki uygulamaları ve bu yöntemin endüstriyel üretimdeki potansiyeli üzerine yapılan önceki çalışmalar değerlendirilmiştir (Ayan ve Kahraman 2018).

Aydın'ın çalışmasında, Ti6Al4V alaşımının eklemeli imalatla üretimi ve havacılık sektöründeki uygulamaları derinlemesine analiz edilmiştir. Çalışmada seçici lazer eritme (SLM), elektron ışını eritme (EBM) ve tel ark eklemeli imalat (WAAM) gibi yöntemlerin bu alaşım üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ti6Al4V'nin yüksek mekanik dayanımı, iyi korozyon direnci ve düşük yoğunluğu sayesinde uçak motor parçaları ve türbin kanatları gibi kritik komponentlerde tercih edildiği belirtilmiştir. Ayrıca, eklemeli imalatın geleneksel yöntemlere göre sunduğu üretim esnekliği ve maliyet/performans avantajları detaylı biçimde açıklanmıştır. Süreç parametrelerinin, elde edilen mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki belirleyici rolü özellikle vurgulanmıştır (Aydın 2022).

Bol tarafından hazırlanan bu yüksek lisans tezinde, tel beslemeli eklemeli imalat (özellikle WAAM) süreçlerinde proses parametrelerinin yapay zekâ yöntemleriyle tahmin edilmesi üzerine bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışmada, kaynak akımı, ilerleme hızı ve tel besleme oranı gibi temel işlem parametrelerinin,

elde edilen ürün kalitesi üzerindeki etkisi deneysel olarak değerlendirilmiştir. Bunun yanında, yapay sinir ağları ve regresyon analizi gibi yöntemlerle süreç çıktılarının modellenmesi ve tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, yapay zekâ uygulamalarının proses kontrolünde sağlayabileceği katkıları ve endüstriyel ölçekteki uygulanabilirliğini ortaya koymuştur (Bol 2023).

Frazier' in 2014'te yaptığı çalışmada, metal eklemeli imalat teknolojilerini kapsamlı bir şekilde incelemiş ve bu teknolojilerin geleneksel yöntemlere kıyasla sunduğu yapısal, üretimsel ve ekonomik avantajlara dikkat çekmiştir. Çalışmada özellikle lazerle toz biriktirme, elektron ışını ile eritme ve seçici lazer eritme gibi metal temelli AM teknikleri değerlendirilmiştir. Yazarlar, havacılık ve otomotiv gibi yüksek hassasiyet ve dayanım gerektiren sektörlerde, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde bu yöntemlerin sağladığı esneklik ve verimliliğin altını çizmektedir. Ayrıca, malzeme israfının azalması ve üretim süresinin kısalması gibi unsurların da sürdürülebilir üretim anlayışıyla örtüştüğü vurgulanmıştır (Frazier 2014).

Radhika ve diğerlerinin 2024 yılında yaptıkları çalışmada eklemeli imalat teknolojisinin havacılık sektöründe kullanımını ele alarak, bu alandaki güncel gelişmeleri değerlendirmiştir. Makalede, özellikle titanyum ve yüksek performanslı alaşımların üretiminde AM teknolojilerinin sağladığı hafiflik, yapısal bütünlük ve tasarım esnekliği avantajları tartışılmıştır. Yazarlar, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde geleneksel yöntemlerin sınırlı kaldığını, buna karşın AM ile düşük maliyetle yüksek hassasiyetli parçaların üretilbildiğini vurgulamaktadır. Ayrıca bakım, onarım ve yedek parça üretimi gibi ikincil alanlarda da AM'nin giderek yaygınlaştığı belirtilmiştir (Radhika, Shanmugam ve Ramoni 2024).

Robotik tel ark eklemeli imalat (WAAM) teknolojisi, farklı türde metalik malzemelerin birleştirilmesine imkân tanıyan esnek bir üretim yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Ferritik ve paslanmaz çelik gibi farklı yapısal özelliklere sahip malzemelerin bir arada kullanılması, çok malzemeli bileşenlerin üretimini mümkün kılmakta ve parçaların fonksiyonel performanslarını arttırmaktadır. Yapılan çalışmalar, WAAM süreciyle üretilen bu bileşenlerin mikroyapısal açıdan homojenlik sağladığını ve tatmin edici mekanik özellikler sunduğunu göstermektedir (Gürol 2023).

Gelişmiş WAAM sistemlerinde çoklu robot kullanımı ve lazer tarayıcılarla yapılan gerçek zamanlı kontrol uygulamaları, üretim sürecinin doğruluğunu arttırmaktadır. Lazer tarayıcılar ile katman kalınlığının sürekli izlenmesi ve robotik hareketlerin anlık olarak ayarlanması, üretim hatalarının minimize edilmesini sağlamaktadır. Bu yaklaşım, özellikle hassas ve karmaşık parçaların üretiminde önemli avantajlar sunmaktadır (Lu, ve diğerleri 2025).

Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAW) temelli robotik WAAM uygulamaları, özellikle ince cidarlı blok yapıların üretiminde etkili sonuçlar vermektedir. Bu teknoloji, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha ekonomik ve hızlı bir süreç sunarken, üretilen parçaların mekanik testlerinde yüksek mukavemet ve tokluk değerleri elde edilmiştir (Vidal, Shigapov ve Nguyen 2022).

Roger C. Reed kitabında süperalaşımın yüksek sıcaklıklardaki performanslarını detaylı olarak inceleyerek, bu malzemelerin gaz türbini kanatlarında kullanımını bilimsel temellere oturtmuştur. Yüksek mekanik dayanım, oksidasyon direnci ve uzun süreli termal kararlılık gibi üstün özellikleri sayesinde süperalaşım, özellikle türbinlerde karşılaşılan zorlu çalışma koşulları için vazgeçilmez malzemeler olarak değerlendirilmektedir. Eserde, bu malzemelerin mikro yapı özellikleri ile performans ilişkisi kapsamlı olarak ele alınmakta ve ileri üretim süreçlerinin süperalaşım özelliklerine etkisi açıklanmaktadır. Reed'in bu çalışması, malzeme seçimi ve mühendislik uygulamaları açısından türbin tasarımında önemli bir başvuru kaynağı niteliğindedir (Reed 2006).

Yılmaz'ın 2022 yılında yaptığı çalışmada türbin teknolojilerinde kullanılan malzemelerin seçiminde dikkate alınması gereken mühendislik kriterlerini sistematik bir şekilde ortaya koymuştur. Çalışma, yüksek sıcaklık dayanımı, oksidasyon ve korozyon direnci, mekanik mukavemet ve üretim sürecine uygunluk gibi özelliklerin türbin kanatlarında kritik rol oynadığını göstermektedir. Ayrıca, yeni nesil malzeme geliştirme yaklaşımları ile bu özelliklerin iyileştirilmesine yönelik araştırmalara da yer verilmiştir. Malzeme mühendisliği ve tasarım sürecinin kesişiminde yer alan bu çalışma, özellikle gelişmiş türbin sistemlerinde optimum performans elde edilmesi açısından değerli bilgiler sunmaktadır (Yılmaz 2022).

Yangfan ve diğerlerinin 2019 yılında yapmış oldukları çalışmada, farklı torç hızlarının mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Alt katmanlarda

ince hücreli taneler, üst katmanlarda ise daha kaba ve yönlü taneler gözlenmiştir. Torç hızı arttıkça mikrosertlik, çekme ve akma dayanımları önemli ölçüde yükselmiştir. Elde edilen sonuçlar, CMT-WAAM yönteminin geleneksel döküm proseslerine kıyasla Inconel 625 parçalarında hem yapısal hem de mekanik üstünlük sağlayabildiğini göstermektedir (Yangfan, Chen ve Su 2019).

Ceritbinmez ve diğerlerinin 2023 yılında yapmış oldukları çalışmada, tel ark eklemeli imalat (WAAM) yöntemiyle üretilen Inconel 625 alaşımının delik delme işlemlerine uygunluğu, dövme yöntemiyle üretilmiş numuneler ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada hem termal (die-sinking mikro-EMD ve mikro-EMD delme) hem de mekanik (konvansiyonel ve yörüngesel delme) delme teknikleri kullanılmış ve farklı üretim yöntemlerinin işlenebilirliğe etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, termal delme işlemleri sonucunda WAAM ile üretilen numunelerde dövme numunelere kıyasla daha kalın bir “beyaz katman” oluştuğu gözlemlenmiştir. Mekanik delme işlemlerinde ise bu katman oluşmamış, yüzey pürüzlülüğü açısından en başarılı sonuç konvansiyonel delme yöntemi ile elde edilmiştir. Bu yöntemin, talaşlı tahliyesini kolaylaştıran takım geometrisi sayesinde yüzey kalitesini iyileştirdiği belirtilmiştir. Ayrıca, WAAM numunelerinde daha yüksek artık gerilme ve dislokasyon yoğunluğu gözlenmiş, bu da kesme açılarında farklılıklara neden olmuştur. Bununla birlikte, WAAM yöntemi ile üretilmiş numunelerin daha yüksek sertlik değerleri, bazı mekanik delme işlemlerinde daha iyi yüzey özellikleri elde edilmesini sağlamıştır. Bu çalışma, WAAM ile üretilen süperalaşımın işlenebilirliğine yönelik sınırlı sayıda bulunan araştırmalara katkı sağlamaktadır. Özellikle delik delme gibi ikincil işlemlerde kullanılacak uygun teknik ve parametrelerin belirlenmesi açısından, havacılık ve savunma sanayi gibi ileri teknoloji sektörlerinde yol gösterici bilgiler sunmaktadır (Ceritbinmez, Günen, ve diğerleri 2023).

Bölükbaşı ve diğerlerinin 2023 yılında yapmış oldukları çalışmada WAAM yöntemi ile üretilen Inconel 625 süperalaşımının yüksek sıcaklıktaki oksidasyon direncini arttırmak amacıyla pack aluminizing yöntemi uygulanmıştır. Yüzey modifikasyonu ile WAAM ile üretilmiş Inconel 625 malzeme numunelerinin yüksek sıcaklık koşullarında performansının iyileştirilmesi hedeflenmiş ve bu kapsamda 700 °C’de gerçekleştirilen aluminid kaplama işlemiyle korucuyu bir tabaka oluşturulmuştur. Çalışmada elde edilen bulgular, aluminid tabakanın Inconel 625

süperalaşımının yüzeyinde oksijenin içeriye nüfuz etmesini engelleyerek oksidasyon süreçlerini belirgin şekilde yavaşlattığını göstermiştir. Bu yüzey bariyeri, malzemenin yüksek sıcaklık ortamlarındaki stabilitesini arttırmakta ve oksit tabakası oluşumunu geciktirerek yapısal bozulmaları önlemektedir. Elde edilen bu iyileşme, WAAM ile üretilen parçaların özellikle enerji, havacılık ve otomotiv sektörlerinde uzun süreli kullanımı açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışma, WAAM yöntemi ile üretilen nikel esaslı süperalaşımın yüzey özelliklerinin geliştirilmesine yönelik etkili bir yaklaşım sunmaktadır; aynı zamanda eklemeli imalat sonrası yüzey mühendisliği uygulamalarının malzeme ömrü üzerindeki olumlu etkilerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Literatürde sınırlı sayıda bulunan bu alandaki çalışmalara katkı sağlayan araştırma, ileri imalat teknolojileri ile yüzey kaplama tekniklerinin bütünleştirilmesinin önemini vurgulamaktadır (Bölükbaşı, ve diğerleri 2023).

Günen ve diğerlerinin 2023 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, tel ark eklemeli imalat (WAAM) yöntemi ile üretilmiş Inconel 625 alaşımına uygulanan borlama işleminin yüksek sıcaklıkta aşınma davranışına etkisini incelemişlerdir. Borlama işlemi sonrasında yüzeyde oluşan sert borür tabakasının, özellikle 700°C gibi yüksek sıcaklıklarda malzemenin aşınmaya karşı direncini belirgin şekilde arttırdığı rapor edilmiştir. Bu tabaka, sürtünme kaynaklı yüzey bozulmalarını geciktirmekte ve parçanın kullanım ömrünü uzatmaktadır. Ayrıca, borlama işlemi sonrası yüzey mikroyapısında gözlemlenen homojenlik, yük altındaki deformasyon davranışını da olumlu yönde etkilemiştir. Çalışma, WAAM ile üretilen Inconel 625 alaşımının sadece üretim aşamasında değil, sonrasında uygulanan yüzey modifikasyonlarıyla da performansının artırılabilirliğini göstermekte; bu kapsamda borlama gibi difüzyon temelli yüzey işlemlerinin, ileri uygulamalar için malzeme dayanımını geliştirmede etkili bir araç olabileceğini ortaya koymaktadır (Günen, ve diğerleri 2023).

Ceritbinmez ve diğerleri tarafından 2023 yılında gerçekleştirilen çalışmada, dövme ve tel ark eklemeli imalat (WAAM) yöntemleriyle üretilmiş Inconel 625 alaşım numunelerinin, termal yöntemle hızlı delinmesi sürecinde kullanılan bakır elektrotların aşınma davranışları incelenmiştir. WAAM yöntemi ile üretilen numunelerde, dövme ile üretilenlere kıyasla daha yüksek yüzey pürüzlülüğü, daha fazla elektrot aşınması ve buna bağlı olarak düşük işleme verimi gözlenmiştir. Bu

çalışmada ayrıca, WAAM ile üretilen numunelerdeki elektrot aşınmasının artırılmasının, bu üretim yönteminin oluşturduğu katmanlı yapı, mikro yapıdaki farklılıklar ve yüzey morfolojisinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Bu bulgular, WAAM yöntemi ile üretilen parçaların işlenebilirlik açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler, üretim sonrası işlemlerin optimizasyonu ve uygun parametre seçiminde önemli katkılar sunmaktadır. Ayrıca bu çalışma, WAAM ile üretilen parçaların ileri imalat süreçlerine entegrasyonu konusunda karşılaşılabilecek potansiyel zorluklara dikkat çekerek, eklemeli imalat teknolojilerinin endüstriyel uygulamalara geçiş sürecinde yapılması gereken mikro yapısal ve işleme sonrası değerlendirmelerin önemini vurgulamaktadır (Ceritbinmez, Günen, ve diğerleri 2023).

Çam ve Günen 2024 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, Directed Energy Deposition – DED yöntemlerinin magnezyum bazlı bileşenlerin üretiminde karşılaşılan temel teknik sorunları ve çözüm yollarını detaylı bir biçimde ele almakta; aynı zamanda bu teknolojilerin endüstriyel uygulamalara sağlayabileceği avantajları kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır. Çalışmada öncelikle magnezyumun yüksek reaktivitesi, buharlaşma eğilimi ve oksitlenmeye yatkınlığı gibi malzemeye bağlı sınırlayıcı özellikleri vurgulanmıştır. Bu zorluklar, DED gibi yüksek enerjili katmanlı üretim tekniklerinde stabil proses koşullarının oluşturulmasını zorlaştırmaktadır. Yazarlar, bu sorunların giderilebilmesi için inert atmosfer kullanımı, lazer gücünün optimize edilmesi, toz besleme oranlarının hassas şekilde ayarlanması ve uygun soğutma stratejilerinin uygulanması gibi önemlerin gerekli olduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte, DED yöntemlerinin sunduğu yüksek geometrik esneklik, lokal özellik kontrolü ve fonksiyonel gradyan yapı üretimi gibi avantajlar sayesinde, magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve mikro yapısal bütünlüğün sağlanması mümkündür. Çalışma, özellikle biyomedikal, otomotiv ve havacılık sektörlerinde hafif ve kompleks yapıların üretimi için DED'nin gelecek vadeden bir teknoloji olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu makale magnezyum parçalarının DED yöntemiyle üretiminde karşılaşılan teknik zorlukları kapsamlı bir şekilde analiz ederken, bu problemlerin üstesinden gelmeye yönelik mühendislik çözümleri ve teknolojik fırsatlara da dikkat çekmektedir. Bu yönüyle çalışma, literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmakta ve yönlendirilmiş enerji

biriktirme teknolojisinin magnezyum uygulamaları için stratejik önemini vurgulamaktadır (Çam ve Günen 2024).

Çam tarafından 2022 yılında yapılan bir çalışmada, alüminyum alaşımları kullanılarak WAAM yöntemiyle parça üretiminin fizibilitesi kapsamlı bir biçimde değerlendirilmiştir. Çalışmada öncelikle alüminyum alaşımlarının WAAM süreçleri için uygunluğu detaylandırılmış; bu malzemenin düşük yoğunluk, iyi korozyon direnci ve yüksek spesifik mukavemet gibi avantajlarının, özellikle havacılık ve otomotiv gibi hafif yapı gerektiren sektörlerde öne çıktığı vurgulanmıştır. Ayrıca WAAM teknolojisinin, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha yüksek üretkenlik ve düşük malzeme israfı sağladığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, WAAM ile alüminyum üretiminde karşılaşılan temel zorluklara da değinilmiştir. Özellikle yüksek ısı iletkenliği ve oksitlenme eğilimi nedeni ile kaynak bölgesinde istenmeyen yapısal kusurlar (porozite, çatlaklar vb.) oluşabilmektedir. Bu doğrultuda, yüzey kalitesi, mikro yapı homojenliği ve artık gerilmelerin kontrolü gibi konuların optimize edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır. Çam'ın çalışması ayrıca, proses parametrelerinin (akım, gerilim, tel ilerleme hızı vb.) dikkatle belirlenmesinin üretim kalitesine doğrudan etki ettiğini göstermektedir. Alüminyum alaşımlarıyla yapılan WAAM uygulamalarında başarı, yalnızca uygun kaynak donanımı ile değil, aynı zamanda malzeme bilimi ve süreç mühendisliği alanlarındaki multidisipliner yaklaşımlarla da ilişkilidir. Sonuç olarak, bu çalışma WAAM teknolojisinin alüminyum parçaların üretiminde uygulanabilirliğini kanıtlarken, aynı zamanda teknolojinin yaygın sanayi uygulamaları için hala çözülmesi gereken teknik sınırlamalar içerdiğini ortaya koymuştur. Özellikle proses kontrolü, termal yönetim ve son işlem gereksinimleri gibi alanlarda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu sonucuna varılmıştır (Çam 2022).

2. GELENEKSEL İMALAT YÖNTEMLERİ

Geleneksel imalat yöntemleri, sanayileşmenin başlangıcından bu yana yaygın bir şekilde kullanılan ve malzemeye şekil verme, işleme veya birleştirme esasına dayanan üretim tekniklerini kapsamaktadır. Bu yöntemler, özellikle yüksek üretim hacmine sahip uygulamalarda hala tercih edilmekte ve endüstriyel üretimin temel taşlarını oluşturmaktadır. Tornalama, frezeleme, taşlama gibi talaşlı imalat teknikleri ile döküm, dövme ve kaynak gibi şekil verme ve birleştirme yöntemleri, geleneksel imalat teknolojilerinin ana bileşenleri arasında yer alır.

Bu yöntemler, üretim süreçlerinde yüksek hassasiyet, iyi yüzey kalitesi ve geniş bir malzeme yelpazesi ile çalışma gibi avantajlar sunmaktadır. Ancak bu avantajlara rağmen, geometrik karmaşıklığın sınırlı olması, kalıp gereksinimleri ve yüksek malzeme israfı gibi önemli dezavantajları da mevcuttur. Örneğin, Özsolak 2019 yılında geleneksel yöntemlerin karmaşık yapılar üretmekte sınırlı kaldığını, bu nedenle malzeme ve zaman açısından verimsiz hale geldiğini belirtmektedir. (Özsolak 2019).

Benzer şekilde Selçuk ve Durak tarafından yapılan bir çalışmada, geleneksel yöntemle işlenmiş titanyum alaşımlarının yüzey özellikleri ile eklemeli imalat ile üretilen parçalar karşılaştırılmış, sonuç olarak yüzey kalitesi açısından avantaj sağlasa da üretim esnekliği bakımından yetersiz kaldığı ortaya konmuştur. Bu durum, özellikle düşük adetli ve özel geometrilere sahip parça üretiminde geleneksel yöntemlerin sınırlı kaldığını göstermektedir (Selçuk ve Durak 2023).

Geleneksel üretim teknolojileri, uzun yıllar boyunca üretim süreçlerinde standartlaşma ve güvenilirlik sağlamış olsa da Dedeakayoğulları ve Kaçal'ın vurguladığı üzere, modern üretim anlayışındaki hız, esneklik ve sürdürülebilirlik ihtiyaçlarını karşılamada yetersiz kalabilmektedir. Bu bağlamda, yeni nesil üretim teknolojileriyle (özellikle eklemeli imalatla) kıyaslandığında, geleneksel yöntemlerin dönüşüme uğraması veya hibrit sistemlerle desteklenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır (Dedeakayoğulları ve Kaçal 2020).

2.1 Talaşlı İmalat Yöntemleri

Talaşlı imalat, iş parçasından kesici takımlar aracılığıyla malzeme kaldırarak istenilen şekil ve boyutlarda parçaların üretilmesini sağlayan bir imalat yöntemidir. Bu süreçte, malzemenin belirli bir kısmı talaş olarak uzaklaştırılır ve geriye istenilen geometriye sahip parça kalır.

2.1.1 Tornalama

Tornalama, silindirik veya konik parçaların üretiminde kullanılan temel bir talaşlı imalat yöntemidir. Bu yöntemde, iş parçası kendi eksenini etrafında dönerken, sabit bir kesici takım iş parçası üzerinde ilerleyerek malzeme kaldırır. Tornalama işlemi, dış çap tornalama, iç çap tornalama, alın tornalama, konik tornalama ve vida açma gibi alt işlemleri içerir (Çolak 2014).

Teknik özellikleri:

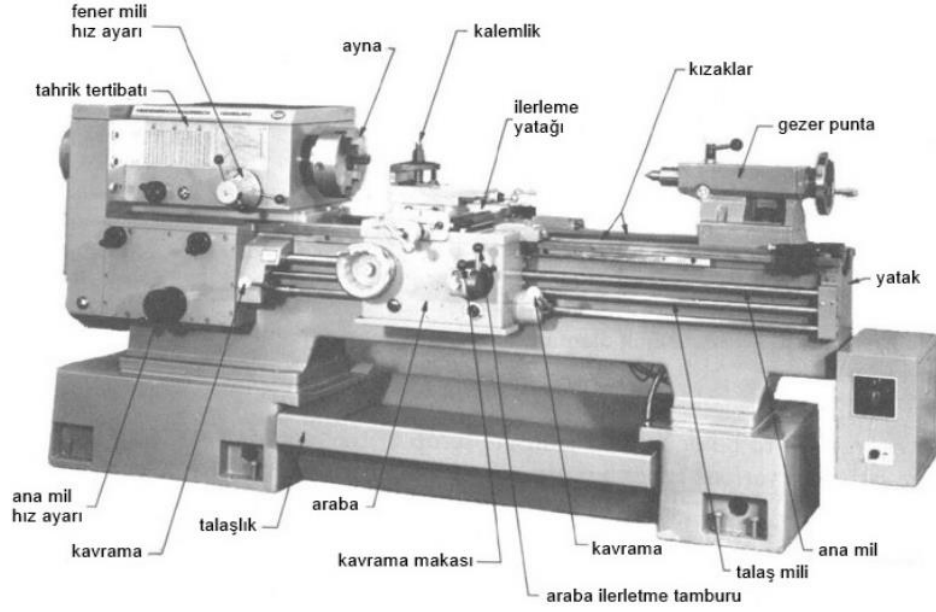
- Kesme hareketi: İş parçasının dönme hareketi.
- İlerleme hareketi: Kesici takımın aksel veya radyal yönde ilerlemesi.
- Kullanım alanları: Mil, burç, flanş gibi parçaların üretimi.
- Tezgâh türleri: Üniversal torna, CNC torna, revolver torna.

Avantajları:

- Yüksek yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyet sağlar.
- Silindirik parçaların üretiminde etkilidir.
- Otomasyona uygundur; CNC tezgâhları ile seri üretim yapılabilir.

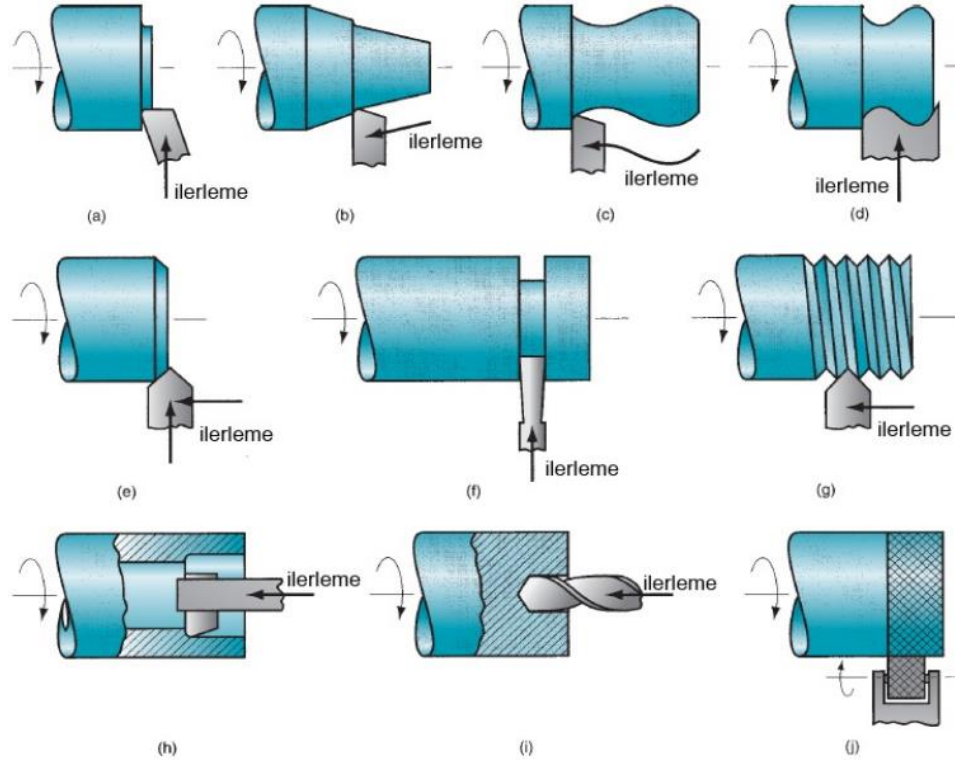
Sınırlamaları:

- Karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimi zordur.
- Malzeme israfı fazladır, çünkü talaş çıkarılır.
- Kesici takım ve iş parçası arasındaki temas nedeniyle ısıl genleşme ve takım aşınması oluşabilir.



Şekil 2.1:Torna Tezgâhı ve Kısımlarının Gösterimi

Kaynak (Çelik 2016)



Şekil 2.2:Tornalama İşlemleri (a) Alın Tornalama, (b) Konik Tornalama, (c) Tesviye, (d) Form Verme, (e) Pah Kırma, (f) Kesme, (g) Diş Açma, (h) iç Tornalama, (i) Delme, (j) Tırtıl Çekme

Kaynak: (Çelik 2016)

2.1.1 Frezeleme

Frezeleme, düzlemsel, açılı, kavisli veya karmaşık yüzeylerin işlenmesinde kullanılan çok yönlü bir talaşlı imalat yöntemidir. Bu yöntemde, döner bir kesici takım iş parçası üzerinde ilerleyerek malzeme kaldırır. Frezeleme işlemi, yüzey frezeleme, kanal açma, dişli frezeleme ve profil frezeleme gibi alt işlemleri kapsar (Atatürk Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi 2019).

Teknik özellikleri:

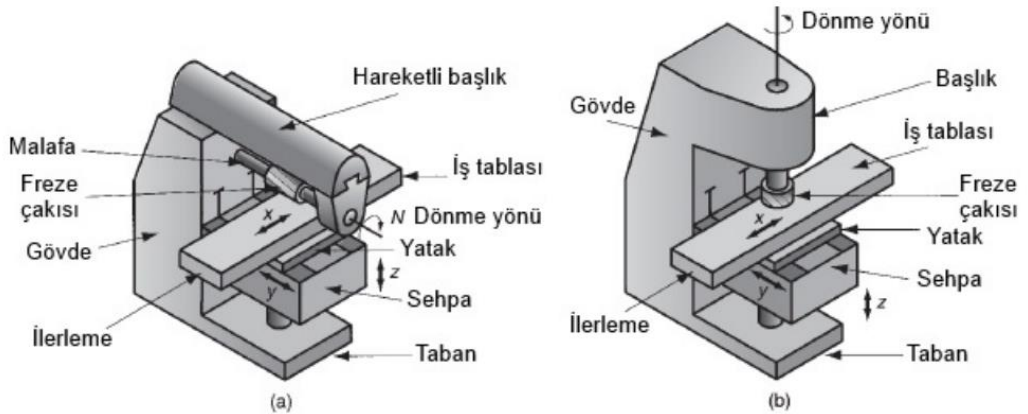
- Kesme hareketi: Kesici takımın dönme hareketi.
- İlerleme hareketi: İş parçasının veya takımın ilerlemesi.
- Kullanım alanları: Kalıp, dişli, kanal ve yüzey işleme.
- Tezgâh türleri: Dikey freze, yatay freze, CNC freze.

Avantajları:

- Düz, eğimli, yuvarlak veya karmaşık yüzeylerin işlenmesine olanak tanır.
- Yüksek üretim hızlarına ve geniş malzeme uyumluluğuna sahiptir.
- CNC frezeler sayesinde otomatik ve hassas üretim mümkündür.

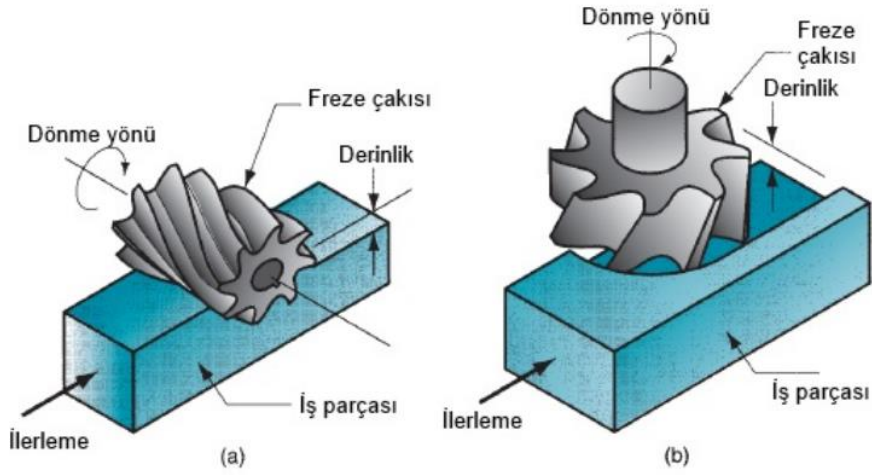
Sınırlamaları:

- Kesici takım aşınması frezeleme işleminin verimliliğini etkileyebilir.
- Sert ve aşındırıcı malzemeler için takım ömrü kısalmaktadır.



Şekil 2.3: (a) Yatay ve (b) Düşey Freze Tezgahları

Kaynak: (Çelik 2016)



Şekil 2.4: (a) Çevresel ve (b) Alın Frezeleme

Kaynak: (Çelik 2016)

2.1.3 Delme

Delme işlemi, iş parçasında silindirik deliklerin açılmasını sağlayan bir talaşlı imalat yöntemidir. Genellikle matkap uçları kullanılarak gerçekleştirilir. Delme işlemi, ön delme, rayba çekme ve kılavuz çekme gibi alt işlemleri içerebilir (Kalpakjian ve Schmid 2014).

Teknik özellikleri:

- Kesme hareketi: Matkap ucunun dönme hareketi.
- İlerleme hareketi: Matkap ucunun aksenal yönde ilerlemesi.
- Kullanım alanları: Bağlantı delikleri, vida delikleri, geçme delikleri.
- Tezgâh türleri: Matkap tezgâhı, CNC delik delme tezgâhı.

Avantajları:

- Delme işlemi, basit ve hızlı olması nedeniyle seri üretimlerde tercih edilir.
- Çok çeşitli malzemelerde uygulanabilir ve farklı çaplarda delikler açılabilir.
- Delme için kullanılan ekipmanlar genellikle kompakt ve maliyet açısından uygundur.

Sınırlamaları:

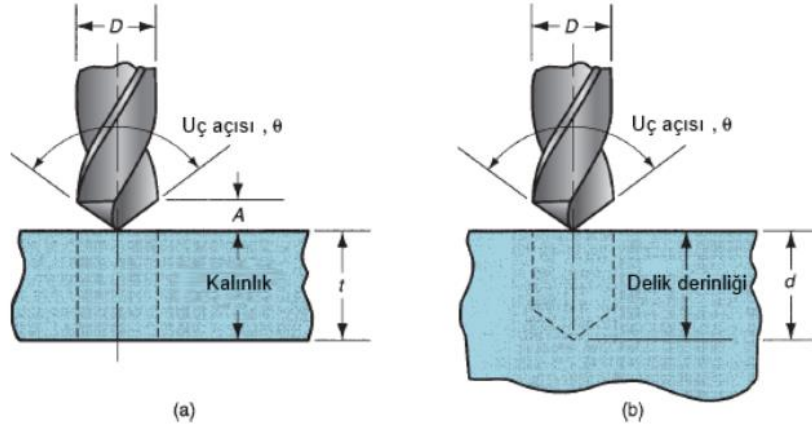
- Delme sırasında meydana gelen ısı ve talaş birikimi, kesici takım aşınmasına ve malzeme yüzeyinde deformasyona neden olabilir.
- Derin delme işlemlerinde delik doğruluğu ve yüzey kalitesi düşebilir.

- Sert ve kırılğan malzemelerde çatılama riski bulunmaktadır.



Şekil 2.5: Örnek Matkap Tezgâhı

Kaynak: (Çelik 2016)



Şekil 2.6: Delme İşlemi

Kaynak: (Çelik 2016)

2.1.4 Taşlama

Taşlama, yüksek yüzey kalitesi ve hassasiyet gerektiren parçaların işlenmesinde kullanılan bir talaşlı imalat yöntemidir. Bu yöntemde, aşındırıcı taneciklere sahip taşlama taşı yüksek hızda dönerken, iş parçası üzerinde ilerleyerek çok ince talaşlar kaldırır (Kalpakjian ve Schmid 2014).

Teknik özellikleri:

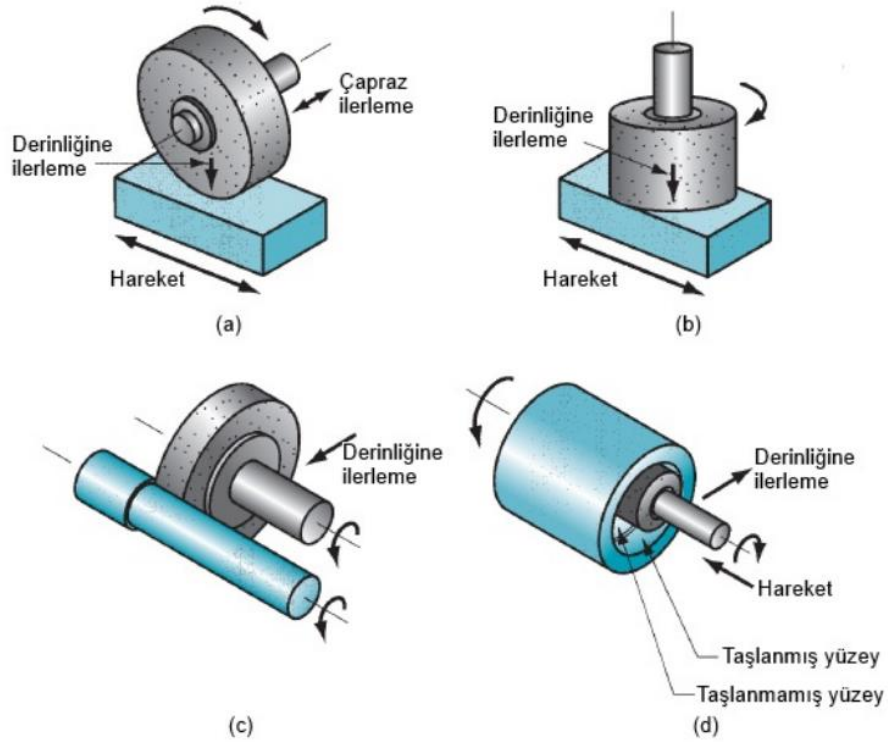
- Kesme hareketi: Taşlama taşının dönme hareketi.
- İlerleme hareketi: İş parçasının veya taşın ilerlemesi.
- Kullanım alanları: Sertleştirilmiş yüzeyler, hassas ölçüler, pürüzsüz yüzeyler.
- Tezgâh türleri: Düzlem taşlama, silindirik taşlama, iç taşlama tezgâhları.

Avantajları:

- Taşlama, yüksek yüzey kalitesi ve hassas toleranslar elde etmek için ideal bir işlemdir.
- Sert ve aşınmaya dirençli malzemelerin işlenmesinde etkilidir.
- Talaş kaldırma oranı düşüktür, bu da daha kontrollü bir işlem sağlar.

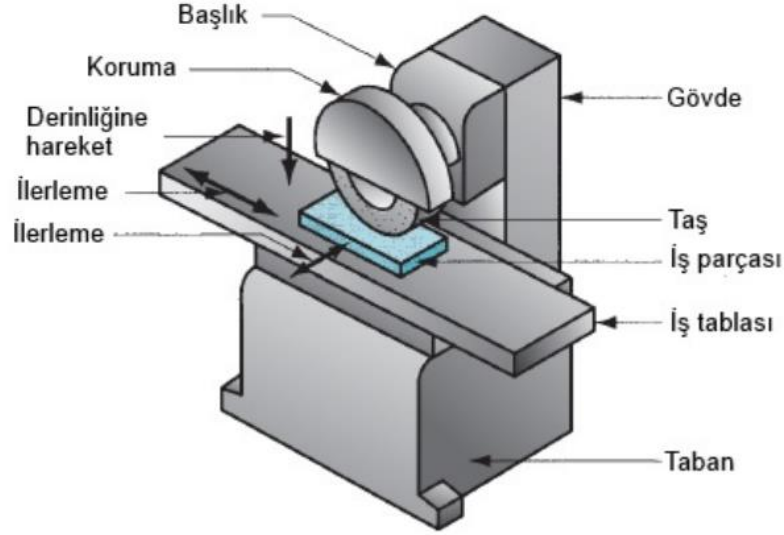
Sınırlamaları:

- İşlem hızı diğer talaşlı imalat yöntemlerine göre daha düşüktür.
- Taşlama tezgâhları ve taşlar maliyetli olabilir.
- Uygun soğutma kullanılmazsa yüzeyde yanma ve deformasyon riski vardır.



Şekil 2.7: Taşlama İşlemleri; (a), (b) Düzlemsel Taşlama, (c), (d) Silindirik Taşlama

Kaynak: (Çelik 2016)



Şekil 2.8: Taşlama Tezgâhı

Kaynak: (Çelik 2016)

2.1.5 Planyalama ve vargelleme

Planyalama ve vargelleme, düzlemsel yüzeylerin işlenmesinde kullanılan talaşlı imalat yöntemleridir. Planyalama işleminde iş parçası doğrusal hareket ederken, vargelleme işleminde kesici takım doğrusal hareket eder (Çolak 2014).

Teknik özellikleri:

- Kesme hareketi: Planyalamada iş parçasının, vargellemede takımın doğrusal hareketi.
- İlerleme hareketi: Kesme hareketine dik yönde adım adım ilerleme.
- Kullanım alanları: Büyük düz yüzeyler, kızaklar, yatak yüzeyleri.
- Tezgâh türleri: Planya tezgâhı, vargel tezgâhı.

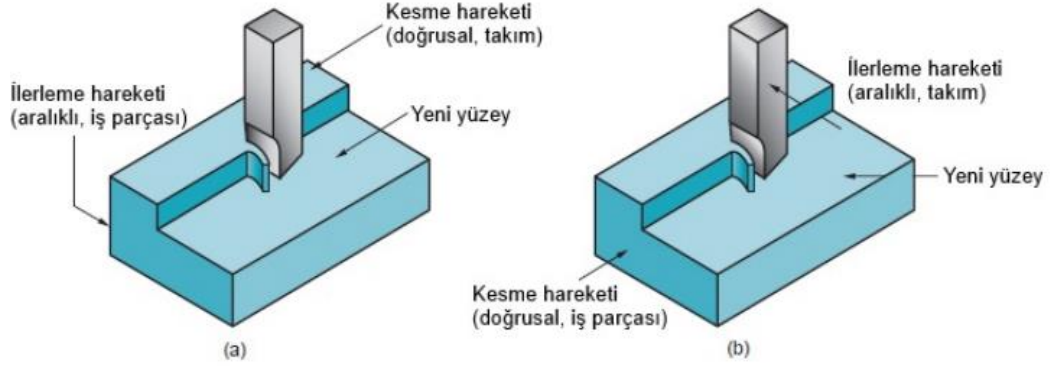
Avantajları:

- Büyük yüzeylerin ve düzlemsel yüzeylerin işlenmesinde etkilidir.
- Karmaşık şekillerden ziyade basit geometrilerin üretiminde ekonomiktir.
- Tezgâhların kurulumu ve kullanımı nispeten basittir.

Sınırlamaları:

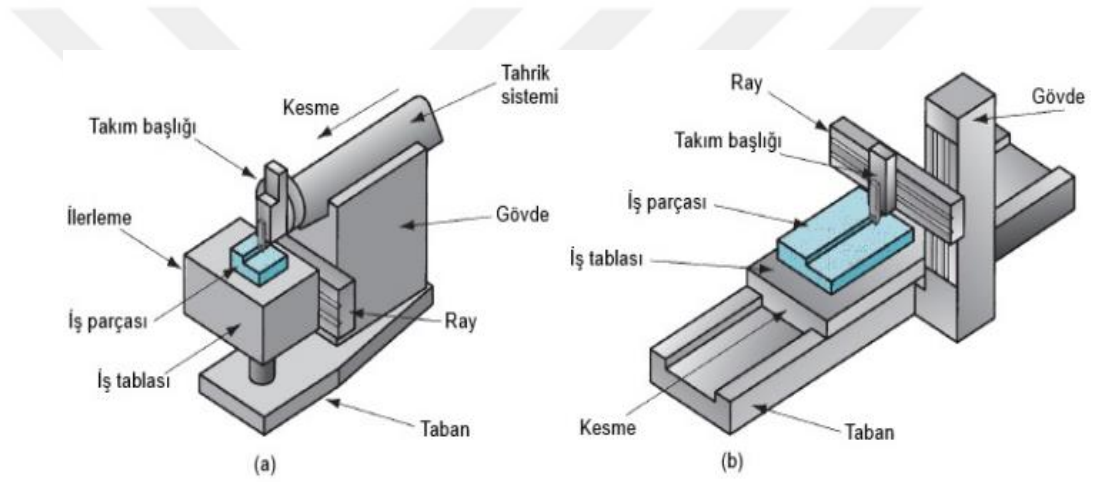
- İşlem süresi diğer yöntemlere göre daha uzundur.
- İş parçasının boyut ve şekline bağlı olarak sınırlı kullanım alanı vardır.

- Karmaşık geometrilerin işlenmesi mümkün değildir.



Şekil 2.9: (a) Vargelleme ve (b) Planyalama İşlemleri

Kaynak: (Çelik 2016)



Şekil 2.10: (a) Vargel ve (b) Planya Tezgâhları

Kaynak: (Çelik 2016)

2.1.6 Broşlama

Broşlama, özel şekilli kesici takımlar kullanılarak iç ve dış yüzeylerin hassas işlenmesini sağlayan bir talaşlı imalat yöntemidir. Bu yöntem, özellikle dişli, kama ve spline gibi profilli yüzeylerin işlenmesinde tercih edilir (Çolak 2014).

Teknik özellikleri:

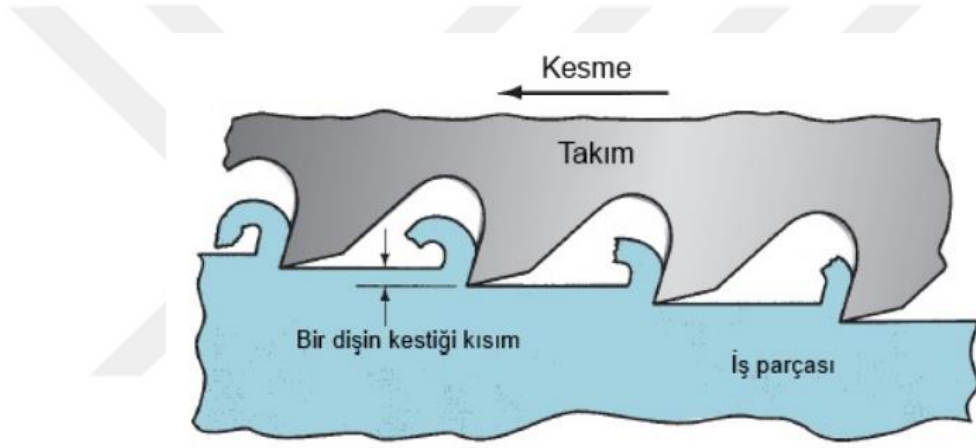
- Kesme hareketi: Broş takımının doğrusal hareketi.
- İlerleme hareketi: Broş takımının sürekli ilerlemesiyle sağlanır.
- Kullanım alanları: Dişli, kama, spline, altıgen delikler.
- Tezgâh türleri: Dikey ve yatay broş tezgâhları.

Avantajları:

- Yüksek üretim hızına sahiptir ve seri üretime uygundur.
- Karmaşık iç ve dış profillerin hassas işlenmesini sağlar.
- Tek bir geçişte yüksek doğruluk ve yüzey kalitesi elde edilir.

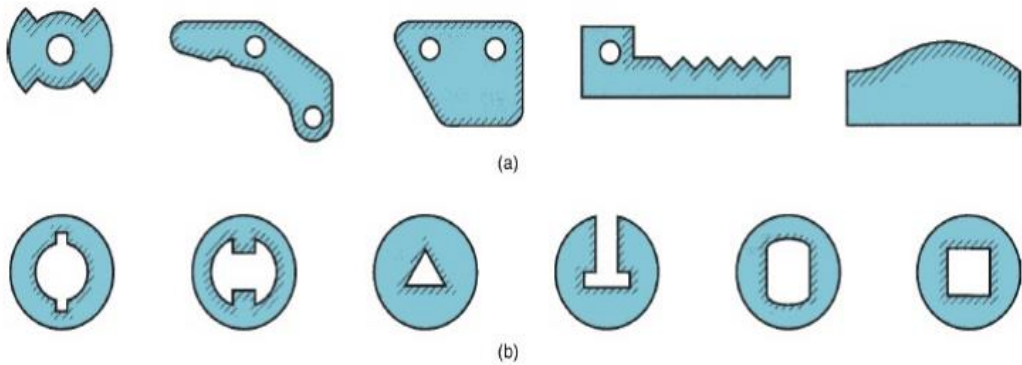
Sınırlamaları:

- Broş takımları maliyetlidir ve sadece belirli profiller için uygundur.
- Esnek olmayan bir yöntemdir, tasarım değişiklikleri için yeni broş gerekebilir.
- İşlem genellikle sadece düz ve dairesel şekillere uygundur.



Şekil 2.11: Broşlama İşlemi

Kaynak: (Çelik 2016)



Şekil 2.12: Broşlama ile Üretilen Bazı Parçalar; (a) Dış Broşlama, (b) İç Broşlama

Kaynak: (Çelik 2016)

2.1.7 Honlama

Honlama, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ve hassas ölçüler elde etmek için kullanılan bir son işlem yöntemidir. Bu yöntemde, aşındırıcı taşlar düşük hızda dönerken, iş parçası üzerinde ileri-geri hareket eder (Günay 2009).

Teknik özellikleri:

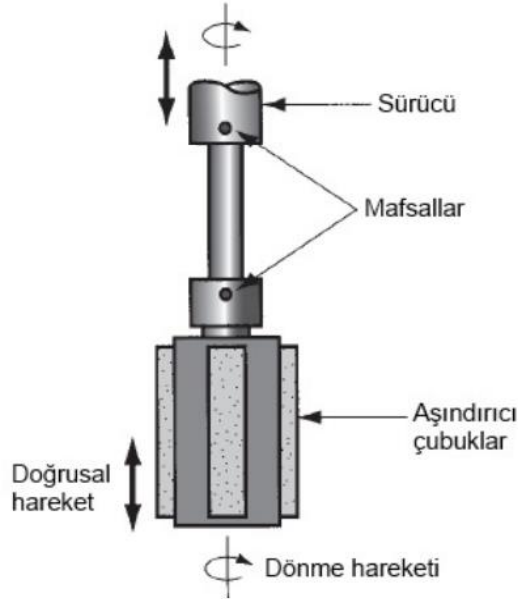
- Kesme hareketi: Honlama taşının dönme ve ileri-geri hareketi.
- İlerleme hareketi: Taşın iş parçası üzerinde ilerlemesi.
- Kullanım alanları: Silindir iç yüzeyleri, motor blokları, hidrolik silindirler.
- Tezgâh türleri: Honlama tezgâhı.

Avantajları:

- Yüksek hassasiyetli ve ince yüzey kalitesi sağlar.
- İç çapların ve silindirik yüzeylerin işlenmesinde etkilidir.
- Talaş kaldırma miktarı düşük olup, iş parçasının boyutsal doğruluğunu artırır.

Sınırlamaları:

- İşlem süresi diğer yöntemlere göre daha uzun olabilir.
- Ekipman maliyeti ve işletme zorluğu yüksektir.
- Sadece belirli tip yüzey ve geometriler için uygundur.



Şekil 2.13: Honlama İşlemi

Kaynak: (Çelik 2016)

2.1.8 Lepleme

Lepleme, çok yüksek yüzey kalitesi ve hassasiyet gerektiren parçaların işlenmesinde kullanılan bir son işlem yöntemidir. Bu yöntemde, ince taneli aşındırıcılar ve lepleme plakası kullanılarak yüzeyler işlenir (Günay 2009).

Teknik özellikleri:

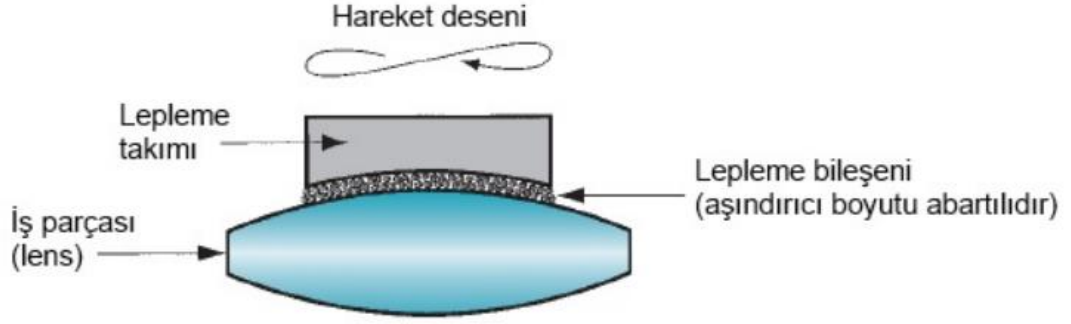
- Kesme hareketi: Lepleme plakası ve iş parçasının karşılıklı hareketi.
- İlerleme hareketi: Aşındırıcıların yüzey üzerinde dağılımı.
- Kullanım alanları: Optik parçalar, ölçü aletleri, valf yüzeyleri.
- Tezgâh türleri: Lepleme makineleri.

Avantajları:

- Yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde azaltarak nanometre seviyesinde düzgün yüzeyler elde edilmesini sağlar.
- Mikron altı hassasiyetle yüzey düzlüğü ve paralelliği sağlanabilir.
- İş parçasında minimum mekanik gerilim oluşur, bu da özellikle hassas parçalar için uygundur.
- Seramikler, sert metaller ve cam gibi zor işlenebilir malzemelerde kullanılabilir.

Sınırlamaları:

- Lepleme işlemi yavaş bir süreçtir ve büyük miktarlarda malzeme kaldırmak için uygun değildir.
- Sürecin kontrolü hassas olduğundan operatör deneyimi önemlidir; ayrıca sürecin otomatize edilmesi zordur.
- Genellikle taşlama gibi bir ön işlem sonrasında uygulandığı için tek başına bir üretim süreci değildir.



Şekil 2.14: Lepleme İşlemi (Lens Yüzeyinin İşlenmesi)

Kaynak: (Çelik 2016)

2.1.9 Testere ile kesme

Testere ile kesme işlemi, malzemelerin istenilen boyutlarda ayrılması amacıyla kullanılan temel talaşlı imalat yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, kesme işlemi dişli yapıdaki kesici takım (testere) ile gerçekleştirilir. Malzemenin fiziksel yapısına, kesim hassasiyetine ve işlem hızına göre farklı testere türleri (şerit testere, dairesel testere, pistonlu testere vb.) tercih edilir.

Teknik özellikleri:

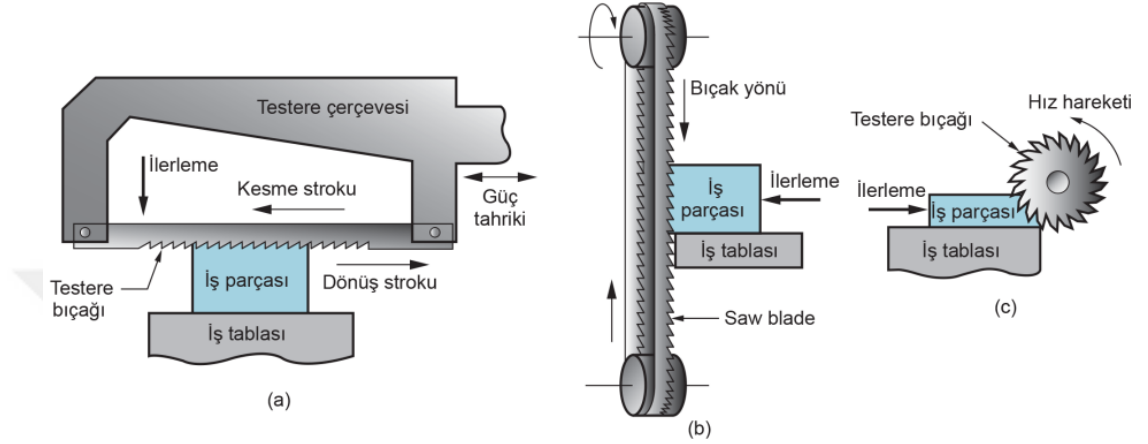
- Kesme hareketi: Testere bıçağının dönme (dairesele testere) veya ileri-geri (şerit testere veya pistonlu testere) hareketi.
- İlerleme hareketi: İş parçasının kesici takım boyunda beslenmesi.
- Kullanım alanları: Profil, boru, çubuk, levha gibi yarı mamul malzemelerin ölçülendirilmesi.
- Tezgâh türleri: Dairesel testere tezgâhı, Şerit testere tezgâhları, Otomatik kesim hatları (CNC kontrollü kesim sistemleri).
- Kesim tipleri: Düz kesim, açılı kesim, seri kesim işlemleri mümkündür.

Avantajları:

- Farklı çap ve kesitlerdeki malzemelerin kolayca kesilebilmesi.
- Düşük maliyetli ve pratik bir yöntem olması.
- Seri üretim hatlarında otomatikleştirilebilir yapıya uygun olması.

Sınırlamaları:

- Talaş kaldırma kabiliyeti düşüktür; şekillendirme amacıyla değil, ölçülendirme amacıyla kullanılır.
- Kesim yüzeyi genellikle ikincil bir işlem gerektirecek düzeydedir. (Örneğin çapak alma veya taşlama).



Şekil 2.15: (a) Motorlu Kollu Testere, (b) Şerit Testere, (c) Dairesel Testere

Kaynak: (Gülmez tarih yok)

2.1.10 Talaşsız imalat yöntemleri

Talaşsız imalat yöntemleri, malzemenin hacmini büyük ölçüde değiştirmeden plastik şekil değişimi prensibine dayalı olarak yapılan üretim yöntemleridir. Bu yöntemlerde, malzeme kesilmeden şekillendirilir. Dolayısıyla, talaşlı imalata göre malzeme kaybı azdır ve üretim süreci daha ekonomiktir (Kalpakjian ve Schmid 2014).

Başlıca yöntemler şunlardır:

- Haddeme: Metalin iki döner merdane arasında sıkıştırılarak inceltmesidir. Sac üretiminde yaygındır.
- Dövme: Metalin darbe kuvvetiyle kalıpta şekillendirilmesidir. Dayanımı yüksek parçalar için uygundur.
- Ekstrüzyon: Metalin bir kalıptan geçirilerek kesit oluşturulmasıdır. Boru ve profil üretiminde tercih edilir.
- Çekme: Tel, çubuk gibi ürünlerin kesitinin inceltmesi amacıyla kalıptan geçirilmesidir.

- Bükme ve Şekillendirme: Sac malzemelerin istenilen geometriye getirilmesi işlemidir.

2.1.11 Döküm yöntemleri

Döküm, sıvı haldeki metalin bir kalıba dökülerek şekillendirilmesi esasına dayanır. Bu yöntemler, karmaşık geometrilere sahip parçaların düşük maliyetle üretilebilmesini sağlar (Groover 2020).

Başlıca yöntemler:

- Kum Döküm: En yaygın döküm yöntemidir. Kalıplar kumla yapılır; prototipleme için uygundur.
- Basınçlı Döküm: Metal yüksek basınç altında kalıba enjekte edilir. Hassas ve düzgün yüzeyli parçalar elde edilir.
- Yatırım Döküm: Balmumu model kullanılarak hassas parçaların dökümü sağlanır.
- Kabuk Kalıp Döküm: Kum kalıpların reçine ile sertleştirilmiş versiyonudur.
- Sürekli Döküm: Sürekli üretim hattında uzun ürünlerin elde edilmesini sağlar.

2.1.12 Kaynak ve birleştirme yöntemleri

Kaynak yöntemleri, iki ya da daha fazla malzemenin (genellikle metal) birleştirilmesi amacıyla uygulanan termal veya mekanik işlemlerdir. Kalıcı birleştirme sağlayarak montaj süreçlerinde etkin rol oynarlar (Messler 2004).

Yaygın yöntemler:

- Elektrik Ark Kaynağı: Elektrot ile iş parçası arasında oluşan ark sayesinde erime sağlanır.
- Gazaltı Kaynağı (MIG/MAG): Koruyucu gaz atmosferi altında kaynak yapılır, kaliteli ve hızlıdır.
- TIG Kaynağı: Tungsten elektrot ile yapılan hassas kaynak yöntemidir.
- Direnç Kaynağı: Elektriksel direnç ısısı ile metallerin eritilmesi esasına dayanır.

- Lehimleme ve Sert Lehimleme: Ergitme sıcaklığı daha düşük olan malzemelerin kullanılmasıyla birleşme sağlanır.
- Perçinleme: Mekanik bağlantı yöntemi olup sökülebilir bağlantılarda tercih edilir.

2.1.13 Plastik şekillendirme yöntemleri

Bu yöntemler, plastik malzemelerin ısıtılıp yumuşatılarak kalıplar içinde şekillendirilmesine dayanır. Hafiflik ve esneklik avantajı nedeniyle otomotiv, tıp ve tüketici elektroniği gibi birçok sektörde tercih edilir (Rosato 2004).

Başlıca yöntemler:

- Enjeksiyon Kalıplama: Erimiş plastiğin kalıba enjekte edilmesiyle şekil oluşturulur.
- Şişirme Kalıplama: Özellikle plastik şişe üretiminde kullanılır.
- Ekstrüzyonla Şekillendirme: Sürekli kesitli plastik ürünlerin üretimini sağlar.
- Termoform: Isıtılmış plastik levhanın kalıba çekilerek şekillendirilmesidir.
- Rotasyon Kalıplama: Plastik tozlarının kalıp içinde döndürülerek şekillendirilmesidir.

3. EKLEMELİ İMALAT

Eklemeli imalat (Eİ) 3 boyutlu (3B) dijital model verilerinden katmanlar halinde malzeme biriktirerek yapılan yenilikçi bir imalat yöntemidir. Bu üretim yönteminde, geleneksel imalat yöntemlerinden farklı olarak talaş kaldırma gibi eksiltmeli ya da şekillendirmeli yöntemler yerine, malzemenin sadece ihtiyaç duyduğu bölgelerde katman katman biriktirilmesidir. Eklemeli imalat, “katmanlı imalat”, “üç boyutlu baskılama” ve “doğrudan dijital imalat” gibi ifadeler ile sektörde sıkça kendinden söz ettirmektedir (Güler, Serindağ ve Çam 2022); (Arti90 2024).

İlk çıkış yıllarında sadece hızlı prototipleme amacıyla kullanılan polimer malzemelere odaklanan eklemeli imalat teknolojisi, son yıllarda çok hızlı gelişmiş ve polimer malzemelerin yanında metalik malzemelerin işlenmesine olanak sağlayan süreçlerin gelişmesi çok daha geniş bir uygulama alanına ulaşmıştır. Özellikle havacılık, uzay, otomotiv, enerji, tıp ve savunma sanayii gibi ileri teknolojilere dayalı sektörlerde, yüksek performanslı ve karmaşık geometrili metal parçaların üretiminde önemli rol oynamaktadır (Güler, Serindağ ve Çam 2022).

Eklemeli imalat süreci, bilgisayar destekli tasarım (CAD), sayısal kontrol ve kaynak/işleme gibi farklı mühendislik disiplinlerini eş zamanlı olarak bir araya getirir. Bu bütünleşik yapı sayesinde hem üretim süresi hem de üretim maliyetinde kayda değer azalmalar sağlanabilir. Özellikle karmaşık şekilli parçaların doğrudan ya da son ürüne çok yakın geometrilerle üretilebilmesi, ek işlem ihtiyacını azaltmakta ve malzeme kullanım verimliliğini artırmaktadır. Hurda oranının düşük olması, çevresel sürdürülebilirlik açısından da eklemeli imalatı cazip kılmaktadır (Güler, Serindağ ve Çam 2022).

Frazier'in 2014 yılında yaptığı bir çalışmada metal eklemeli imalatın (MEİ) mevcut durumunu ve endüstriyel uygulamalarını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışmada, MEİ'nin geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla sunduğu avantajlar, özellikle karmaşık geometrilerin üretimi, malzeme israfının azaltılması ve üretim süresinin kısaltılması gibi konular ele alınmıştır. Ayrıca, havacılık, otomotiv ve

biyomedikal gibi sektörlerde MEİ'nin kullanım alanları ve potansiyeli vurgulanmıştır (Frazier 2014).

Radhika ve diğerlerinin 2024 yılında yapmış olduğu bir çalışmada, havacılık endüstrisinde eklemeli imalatın (Eİ) uygulamalarını ve bu teknolojinin sektöre sağladığı faydaları incelemiştir. Çalışmada, Eİ'nin karmaşık parçaların üretiminde sağladığı tasarım esnekliği, hafiflik ve maliyet etkinliği gibi avantajlar üzerinde durulmuştur. Ayrıca, Eİ'nin havacılıkta bakım ve onarım süreçlerinde nasıl kullanıldığı ve bu alandaki gelecekteki potansiyeli tartışılmıştır (Radhika, Shanmugam ve Ramoni 2024).



4. KAYNAK TELİ İLE EKLEMELİ İMALAT

Geleneksel imalat yöntemlerine alternatif olarak geliştirilen eklemeli imalat (Additive Manufacturing – AM) yöntemleri, üretim sırasında malzeme israfını minimuma indirmesi, karmaşık geometrideki parçaların üretiminde sağladığı tasarımsal özgürlük ve hızlı prototipleme olanaklarıyla endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla tercih edilmektedir. Metal esaslı üretimde öne çıkan Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) yöntemi, kaynak teli kullanımıyla yüksek verimlilik ve maliyet etkinliği sunan bir üretim süreci olarak dikkat çekmektedir (Gedik 2023).

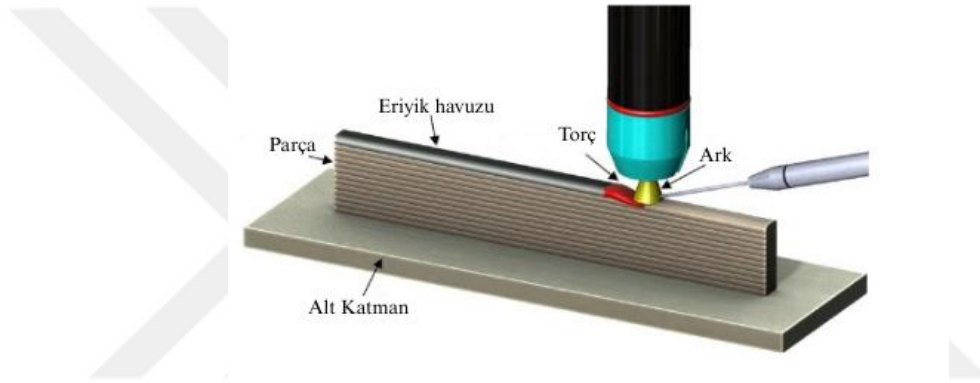
Tel ark eklemeli imalat yöntemi, elektrik arkı kaynak teknolojisine dayanarak metal telin kontrollü bir şekilde eritilmesi ve bu eriyik malzemenin katman katman üst üste biriktirilmesi olarak ifade edilebilir. Bu sayede hem büyük boyutlu parçaların üretimi mümkün hale gelmekte hem de yüksek üretim hızları sağlanmaktadır. Süreçte düşük maliyetli tel elektrotların kullanılması, bu yönetimi oldukça ekonomikleştirirken, enerji tüketimindeki verimlilik de önemli bir avantajdır. Özellikle düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin üretiminde yaygın olarak kullanılan tel ark eklemeli imalat, Türkiye'deki yüksek kaynak teli üretim kapasitesi göz önünde bulundurulduğunda yerli imalat sektörü için stratejik bir öneme sahiptir (Gedik 2023).

Metal parçaların üretiminde kullanılan ve bu alana özgü olarak geliştirilen eklemeli imalat teknikleri, literatürde genel olarak metal eklemeli imalat (Metal Additive Manufacturing – MAM) olarak adlandırılmaktadır.

Metal eklemeli imalatın birçok çeşidi vardır. Bunlar: (i) toz sermeli (yataklı) sistemler, (ii) toz beslemeli sistemler ve (iii) tel beslemeli sistemlerdir (Frazier 2014). Metal eklemeli imalatın birçok çeşidi olmasına rağmen son yıllarda özellikle Türkiye'de daha ekonomik ve erişilebilir olması nedeniyle tel beslemeli sistemler sektörde geniş uygulama alanlarına ulaşmaktadır. Bu kapsamda öne çıkan yöntemlerden biri de Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) yöntemidir. Bu yöntem malzeme israfını azaltarak üretim süresi

kısaltmakta ve geleneksel imalat yöntemlerine göre daha verimli bir alternatif sunmaktadır (Güler, Serindağ ve Çam 2022).

Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM), bir elektrik arkı ısı kaynağı (örneğin plazma arkı veya metal inert gaz – MIG kaynağı) kullanılarak, tel formundaki metal hammaddeyi katmanlar halinde ergitip biriktirerek parça üretimi gerçekleştiren bir eklemeli imalat teknolojisidir. Bu yöntemle üretim, her bir katmanın kontrollü bir şekilde üst üste (katman katman) eklenmesi yoluyla gerçekleştirilir. Yaşanan son gelişmeler ile metre ölçeğinde büyük boyutlu ve karmaşık geometrideki metal bileşenlerin üretimi mümkün hale gelir (McAndrew, Rosales, ve diğerleri 2018).



Şekil 4.1: Tel Ark Eklemeli İmalat (WAAM) Sürecinin Gösterimi

Kaynak: (McAndrew, Rosales, ve diğerleri, Interpass rolling of Ti–6Al–4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. 2018)

Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) yöntemi endüstriyel uygulamalarda fonksiyonel parçaların üretimi için umut vaat eden yenilikçi bir yöntemdir. Bu yöntemde, kaynak telinden sağlanan malzeme, ark deşarjının etkisi ile eritilerek katmanlar halinde biriktirilir. (Turgut, Gürol ve Dilibal, ve diğerleri 2022). Farklı kimyasal kompozisyonlara sahip kaynak tellerinin, önceden oluşturmuş katmanların üzerine eklenmesi ile bimetalik bileşenlerin üretimi de mümkün hale gelir. Tel Ark Eklemeli imalat, düşük sistem kurulum maliyetleri, geniş tel besleme seçenekleri ve orta ile büyük ölçekli üretim yetenekleri gibi avantajları sayesinde birçok araştırma merkezinde ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir (Turgut, Gürol ve Dilibal, ve diğerleri 2022).

Tel ark eklemeli imalat (WAAM), kaynak teknolojilerinin eklemeli imalat alanına adaptasyonu ile gelişen, özellikle büyük ölçekli metal parçaların üretiminde

verimli bir çözüm sunan bir yöntemdir. Ayan ve Kahraman'ın çalışmasında, bu yöntemin temel prensipleri açıklanmış, yüksek birikim hızı ve malzeme verimliliği ile öne çıktığı vurgulanmıştır. WAAM, tel formundaki metalin ark kaynağı ile ertilerek katman katman bir yapı oluşturması esasına dayanır. Bu yöntem, özellikle karmaşık olmayan geometrideki ancak büyük hacimli parçalarda üretim süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır (Ayan ve Kahraman 2018).

Bol'un 2023 yılında yazmış olduğu yüksek lisans tezinde, tel ark eklemeli imalat süreçlerinde kullanılan parametrelerin yapay zekâ teknikleri ile tahmin edilebilirliği araştırılmıştır. Tel beslemeli yöntemlerde kaynak akımı, hız ve tel ilerleme oranı gibi parametrelerin kontrolü, ürün kalitesi açısından kritik önemdedir. Bu çalışmada, proses optimizasyonunun yapay sinir ağları ile modellenmesi sayesinde hem üretim verimliliğinin hem de kalite güvenliğinin artırılacağı ortaya konmuştur (Bol 2023).

Aydın'ın çalışmasında tel ark eklemeli imalat, titanyum alaşımı Ti6Al4V'nin üretimi bağlamında değerlendirilmiştir. Özellikle havacılık uygulamalarında bu alaşımın tercih edilmesinin nedeni, hafifliği, yüksek mekanik dayanımı ve korozyon direncidir. WAAM yöntemi, bu gibi yüksek performanslı alaşımların hem hızlı hem de ekonomik şekilde üretimini mümkün kılmaktadır (Aydın 2022).

Siemens ve ENAG firmaları, 2019 yılında gerçekleştirdikleri iş birliği kapsamında, kaynak teli ile eklemeli imalat (WAAM) teknolojisinin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini ortaya koyan önemli bir proje yürütmüştür. Proje, enerji ve otomotiv gibi sektörlerde kullanılan yüksek dayanımlı metal parçaların, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve verimli şekilde üretilmesini hedeflemiştir (Siemens 2019).

Siemens, dijital ikiz teknolojisiyle üretim sürecini sanal ortamda simüle ederek sürecin doğruluğunu ve verimliliğini artırmayı amaçlamıştır; ENAG ise yapısal optimizasyon ve üretime uygun tasarım geliştirme konularına katkı sağlamıştır. Bu iş birliği, WAAM yönteminin yalnızca prototipleme değil, seri üretime uygun fonksiyonel parça imalatında da kullanılabileceğini göstermiştir.

Directed Energy Deposition (DED) yöntemleri, yüksek enerjili bir lazer veya plazma arkı kaynağının eş zamanlı tel beslemesiyle malzeme eklenerek katmanlı üretim sağlar. Magnezyum alaşımlarının yüksek reaktivitesi, düşük buharlaşma eşiği

ve oksitlenmeye yatkın yapısı, DED sürecinde stabil bir ergime havuzu oluşturmayı güçleştirir. Çam ve Günen (2024), bu zorlukların üstesinden gelebilmek için inert gaz atmosferi kullanımı, lazer gücünün optimize edilmesi, tel besleme hızının hassas kontrolü ve soğutma stratejilerinin uygulanmasının kritik olduğunu vurgulamaktadır. Bu optimizasyonlarla DED, yüksek biriktirme oranı, geometrik esneklik ve fonksiyonel gradyan yapı üretimi gibi avantajlar sunarak özellikle hafif ve karmaşık magnezyum bileşenlerin imalatı için stratejik bir çözüm oluşturur (Çam ve Günen 2024).

4.1 Kaynak Teli ile Eklemeli İmalatın Avantajları

Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) yöntemi ile parça üretiminde sadece parçanın gerektirdiği kadar malzeme kullanılması sayesinde minimum malzeme israfı yapılmaktadır. Aynı zamanda karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimi, kalıplama veya talaşlı imalat gibi ara işlemler gerekmeden mümkün hale gelmektedir. Tel ark eklemeli imalat yöntemi, yüksek üretim hızı ve büyük boyutlu parçalarında uygulamalarda kullanılması bu yönetimi cazip bir üretim yöntemi haline getirmektedir. Bu yöntemde, düşük maliyetli tel elektrotların kullanılması ve enerji verimliliği sağlanması ile geleneksel imalat yöntemlerine göre sürdürülebilir bir çözüm haline gelmektedir.

Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) yöntemi, havacılık endüstrisinde, topoloji optimizasyonu ile uygulandığında bu yöntem hem hafif hem de yüksek mukavemetli parçaların yekpare (tek parça) üretilmesini sağlar. Bu durum, montaj ihtiyacını azaltarak üretim süreçlerini sadeleştirirken, aynı zamanda sistem performansını da ciddi ölçüde iyileştirir (Güler, Serindağ ve Çam 2022).

Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) katman biriktirme hızının yüksek olması, kısa üretim süreleri, düşük imalat maliyeti ve malzeme israfını azaltarak hammadde maliyetlerinin azaltılması ve istenilen nihai ürün şekline yakın üretim kabiliyeti sayesinde, özellikle Ti-6Al-4V gibi yüksek maliyetli alaşımların kullanıldığı havacılık ve uzay sanayisinde önemli bir potansiyele sahiptir. Geleneksel imalat yöntemlerinde, büyük miktarlarda malzeme talaşlı imalat (eksiltmeli imalat) sırasında atık hale gelmesi sonucunda buy-to-fly (BTF) oranı 20:1 gibi düşük seviyelere ulaşabiliyorken, Tel Ark Eklemeli İmalat

teknolojisi bu oranı yaklaşık 1.5:1 düzeyine kadar düşürebilmektedir (McAndrew, Rosales, ve diğerleri 2016).

Tel Ark Eklemeli İmalat yönteminin üretimin hızının yüksek olmasının yanı sıra malzeme kullanımını daha verimli hale getirerek parça maliyetlerinde önemli ölçüde azalma sağlamaktadır. Ayrıca, bu yöntem tasarım esnekliği konusu da iyileştirerek tasarım esnekliğini arttırmakta, daha da hafif yapılar oluşturulmasına ve karmaşık geometrideki parçaların yekpare (tek parça) halinde üretimine olanak tanımaktadır (Cotteleer ve Joyce 2014).

WAAM yöntemi, diğer eklemeli imalat yöntemlerine kıyasla daha yüksek biriktirme hızına sahiptir ve bu sayede üretim sürelerini kayda değer ölçüde azaltmaktadır. Aynı zamanda daha düşük maliyetli sarf malzemeler (ör. kaynak teli) ile çalışılabilmesi, büyük ve hacimli parçaların ekonomik üretimine olanak tanır (Ayan ve Kahraman 2018).

Bol'un çalışması, WAAM'ın yapay zekâ tabanlı proses kontrolü ile birleştiğinde üretim verimliliğini daha da artırabileceğini göstermektedir. Parametrelerin dijital olarak modellenmesi, insan hatasını azaltmakta ve kaliteyi sabitlemektedir. Bu durum, endüstriyel süreçlerde sürdürülebilir üretim için ciddi bir avantaj sağlamaktadır (Bol 2023).

WAAM teknolojisiyle yapılan üretimlerde kaynak teli, üretim sürecinin otomasyonunu ve tekrarlanabilirliğini arttırarak üretim kalitesini iyileştirir. Telin sürekli beslenmesi sayesinde, işlem duraksamadan devam eder ve üretim hızı yükselir. Bu durum, özellikle seri üretim ve büyük ölçekli uygulamalarda maliyet avantajı sağlar. Ayrıca, proses sırasında uygulanan interlayer dwell time ve parametrelerin optimizasyonu sayesinde ürün yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk arttırılabilir (Bol 2023); (Turgut, Gürol ve Onler 2023).

Tel ark eklemeli imalat, özellikle büyük boyutlu metal parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri, üretim sürecinde yüksek hız ve esneklik sağlamasıdır. Üstelik, farklı alaşımların kolaylıkla kullanılabilmesi, tasarımda özgürlük ve fonksiyonellik açısından büyük avantajlar sağlar. Bu sayede havacılık ve enerji sektörlerinde karmaşık yapıların ekonomik ve dayanıklı şekilde üretilmesi mümkün olmaktadır (Aydın 2022); (Güler, Serindağ ve Çam 2022).

Eklemeli imalat süreçlerinde kullanılan kaynak teli, malzeme seçimi açısından geniş bir yelpaze sunar ve bu da ürünlerin mekanik özelliklerinin optimize edilmesini sağlar. Tel bazlı besleme sistemi, katmanlar arası sağlam bağlar oluştururken, mikro yapısal homojenliği artırır. Bu durum, imal edilen parçaların yüksek mukavemet ve tokluğu sahip olmasını sağlar. Ayrıca, kaynak teli kullanımı süreç parametrelerini daha kolay kontrol edilmesine olanak tanır (McAndrew, Rosales, ve diğerleri 2016); (Singh, ve diğerleri 2021).

4.2 Geleneksel İmalat Yöntemlerine Göre Avantajları

Tel Ark Eklemeli İmalat yöntemi, geleneksel imalat yöntemleri ile kıyasla çok ciddi avantajlar sağlar. Parça boyutlarına bağlı olarak, bu yöntem parça imalat sürelerini %40 ila %60 arasında azaltabilmekte ve ek proses gereksinimini %15-%20 oranında düşürebilmektedir (Wu, Pan ve Ding 2018).

Aydın'ın çalışmasında, WAAM yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşım parçaların geleneksel döküm ve talaşlı imalat yöntemlerine göre daha kısa sürede ve daha az malzeme kaybıyla üretilebildiği belirtilmiştir. Ayrıca karmaşık geometrilerin tek parça halinde üretilebilmesi, birleştirme ve montaj işlemlerine olan ihtiyacı azaltmaktadır (Aydın 2022).

Özsolak'ın makalesinde, eklemeli imalatın geleneksel yöntemlere göre sunduğu en önemli avantajlardan biri olarak tasarım esnekliği öne çıkmaktadır. Karmaşık ve iç yapıya sahip parçaların üretimi, geleneksel yöntemlerle mümkün değilken AM yöntemleriyle kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir (Özsolak 2019).

Kaynak teli ile eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Öncelikle, bu yöntemle yüksek hacimli ve karmaşık geometriye sahip parçalar daha hızlı ve düşük maliyetle üretilebilmektedir. Özellikle tel ark eklemeli imalat (WAAM) gibi teknolojiler, yüksek malzeme kullanım verimliliği ve düşük enerji tüketimi ile çevresel sürdürülebilirliği destekler. Ayrıca, kaynak teli malzeme beslemesi sayesinde, parça üretimi sırasında malzeme atığı minimuma indirilmektedir (Ayan ve Kahraman 2018); (Aktürk ve Korkmaz 2021).

Kaynak teli ile eklemeli imalat, konvansiyonel talaşlı imalat yöntemlerine göre hem hammadde tasarrufu hem de üretim süresi açısından üstünlük sağlar. Karmaşık geometriye sahip parça tasarımlarının doğrudan dijital modelden

üretilebilmesi, tasarım değişikliklerinin hızlı uygulanmasını mümkün kılar. Bu da özellikle Ar-Ge süreçlerinde prototip üretiminin hızlandırır ve maliyetleri düşürür. Bunun yanı sıra, bu yöntemle parçaların onarımı ve modifikasyonu da ekonomik ve pratik bir şekilde gerçekleştirilebilir (Aktürk ve Korkmaz 2021); (Arti90 2024).

4.3 Diğer Eklemeli İmalat Yöntemlerine Göre Avantajları

Tel ark eklemeli imalat, SLM veya EBM gibi toz tabanlı yöntemlere göre daha ucuz ekipman ve sarf malzeme gereksinimiyle öne çıkmaktadır. Ayrıca, toz malzemelerin iş güvenliği açısından yarattığı risklerin WAAM'da bulunmaması, yöntemi daha güvenli hale getirmektedir (Ayan ve Kahraman 2018).

Bol'un tezinde, WAAM yönteminin süreç kontrolünün dijitalleştirilebilmesi sayesinde diğer yöntemlere göre daha esnek bir üretim hattı oluşturulabildiği belirtilmiştir. Özellikle seri üretimde kalite tutarlılığı sağlamak adına yapay zekâ destekli bu yöntem, SLM gibi tekniklere göre daha az operatör müdahalesi gerektirmektedir (Bol 2023).

5. ROBOTİK TEL ARK EKLEMELİ İMALAT

Robotik tel ark eklemeli imalat yöntemi, farklı malzemelerin katman katman birleştirilerek bimetalik yapılar oluşturulmasını sağlar, bu sayede fonksiyonel gradyanlı malzemelerin üretimi mümkün olmaktadır (Gürol, Turgut, ve diğerleri 2024).

Robotik WAAM süreci, farklı metal tellerin kontrollü bir şekilde katman katman birleştirilmesiyle çok malzemeli yapılar üretmeyi mümkün kılmaktadır. Özellikle ferritik ve paslanmaz çelik gibi malzemeler arasında başarılı birleşimler elde edilmiştir. Bu üretim yaklaşımı hem malzeme tasarrufu sağlamakta hem de ürünlerin fonksiyonel olarak farklı bölgelerde farklı özellikler göstermesine olanak tanımaktadır. Mikroyapı analizleri ve mekanik testler, malzemeler arası geçiş bölgelerinde yapısal bütünlüğün korunduğunu ortaya koymuştur (Gürol 2023).

Yeni nesil WAAM sistemlerinde, üretim doğruluğunu artırmak amacıyla çoklu robot teknolojisi kullanılmaktadır. Bu sistemlerde robotlar eşzamanlı çalıştırılarak üretim alanının verimli kullanılmasını sağlarken, bütünleşmiş lazer tarayıcılar katman kalınlığını anlık olarak ölçerek robotik sistemlerin hızını ve yörüngesini dinamik şekilde ayarlamaktadır. Böylece üretim hataları azaltılmakta ve karmaşık geometrilere sahip parçaların yüksek hassasiyetle üretilmesi mümkün olmaktadır (Lu, ve diğerleri 2025).

Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAW) tabanlı WAAM sistemleri, ince cidarlı yapılar gibi hassas üretim gerektiren uygulamalarda etkin çözümler sunmaktadır. Robotik kontrol sayesinde düzgün katman yapıları elde edilebilmekte, üretim süreci sırasında oluşabilecek bozulmalar minimize edilmektedir. Yapılan mekanik testler, üretilen parçaların yüksek dayanım, süneklilik ve tokluk gibi istenilen özelliklere ulaştığını göstermiştir (Vidal, Shigapov ve Nguyen 2022).

Robotik Tel Ark Eklemeli İmalat sistemleri, metal parçaların katmanlı üretiminde tel beslemeli kaynak yöntemlerini kullanılarak yüksek verimlilik ve esneklik sağlamaktadır. Bu sistemler, özellikle titanyum, alüminyum, nikel esaslı

alaşım ve çelik gibi mühendislik malzemelerinin üretiminde ekonomik ve hızlı çözümler sunmaktadır. Tel ark eklemeli imalatın avantajları arasında, metal tozlarına kıyasla daha düşük maliyetli olan tel malzemelerin kullanılması ve küçük ile orta ölçekli parçaların üretiminde yüksek verimlilik sağlaması bulunmaktadır. Ancak, bu yöntemde karşılaşılan deformasyon, porozite ve çatlak oluşumu gibi hataların nedenleri ve çözüm yolları üzerine yapılan çalışmalar, tel ark eklemeli imalatın endüstriyel uygulamalarda daha yaygın kullanılabilmesi için önem arz etmektedir (Güler, Serindağ ve Çam 2022).

WAAM, yüksek malzeme verimliliği ve esnek geometrik tasarım olanağı sunarak geleneksel talaşlı imalata kıyasla üretim sürelerini kısaltır ve maliyetleri azaltır. Cold Metal Transfer (CMT), WAAM uygulamalarında tercih edilen bir kaynak yöntemi olarak ısı girdisini minimize eder. CMT’de telin ark döngüsüyle senkronize hareketi sayesinde kaynak banyosuna kontrollü ısı transferi gerçekleşir, bu da termal deformasyonu ve gerilmeleri azaltır. Ayrıca, tel damlacıklarının kontrollü aktarımıyla sıçrama (spatter) neredeyse ortadan kalkar; bu sayede yüzey kalitesi ve katman sürekliliği iyileşir. Robotik kol veya gantri sistemine entegre edilen CMT ünitesi, tel besleme hızı, torç seyahat hızı ve ark voltajı gibi parametrelerin yazılım aracılığıyla hassas şekilde yönetilmesine imkân verir (Öztürk, ve diğerleri 2024).

Yangfan ve diğerlerinin 2019 yılında yapmış olduğu” çalışmasında Inconel 625 süperalaşımı, farklı torç seyahat hızlarında CMT-WAAM ile üretilmiştir. Mikro yapısal analizler, alt katmanlarda ince ve hücresel tanelerin hâkim olduğunu, üst katmanlarda ise tanelerin belirgin biçimde büyüüp yönlüleştiğini göstermiştir. Bu farklılaşma, katmanlar arası soğuma hızı ve ısı transferi şartlarındaki değişkenliğe bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Mekanik test sonuçları; mikrosertlik değerinin 248 HV’den 253 HV’ye, çekme dayanımının 647 MPa’dan 687 MPa’ye ve akma dayanımının 376 MPa’dan 400 MPa’ye yükseldiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, CMT-WAAM ile üretilen Inconel 625 parçaların, geleneksel döküm yöntemleriyle üretilen muadillerine kıyasla üstün mekanik performans sergilediğini göstermektedir. Düşük termal deformasyon, yüksek yüzey kalitesi, geliştirilmiş mekanik özellikler ve karmaşık geometrileri üretme esnekliği, CMT-WAAM teknolojisinin havacılık, uzay ve enerji sektörleri gibi yüksek katma değerli alanlarda benimsenmesini güçlendirmektedir (Yangfan, Chen ve Su 2019).

6. TÜR BİN KANADI

Türbin kanatları, termal ve mekanik yükler altında çalışan ve enerji dönüşüm süreçlerinde temel rol üstlenen kritik bileşenlerdir. Gaz ve buhar türbinlerinde kullanılan kanatlar, yüksek sıcaklık, basınç ve aşındırıcı ortam koşulları altında işlevlerini kaybetmeden uzun süre çalışabilmelidir.

Gelişen üretim teknolojileri sayesinde türbin kanatlarının üretiminde eklemeli imalat yöntemleri öne çıkmaya başlamıştır. Özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde sağladığı tasarım özgürlüğü, geleneksel imalat yöntemlerine göre önemli bir avantaj sunmaktadır (Yılmaz 2022).

Ayrıca farklı alaşımların birlikte kullanılması, soğutma kanallarının iç yapıya entegre edilmesi gibi özellikler, türbin kanatlarının performansını artırmaktadır.

Gaz türbinleri ve buhar türbinleri için kullanılan kanatlar hem tasarım hem de üretim süreçleri açısından farklılık göstermektedir. Gaz türbini kanatlarında daha yüksek sıcaklık direnci ön plandayken, buhar türbinlerinde korozyon ve erozyon direnci daha belirleyici olmaktadır (Yılmaz 2022).

Yeni nesil üretim tekniklerinin, özellikle kaynak teliyle yapılan eklemeli imalatın buhar türbini kanatları üzerindeki potansiyel etkileri, günümüzde önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir.

6.1 Gaz Türbini Kanadı

Gaz türbini kanatları, jet motorları ve enerji santrallerinde sıkça kullanılan, yüksek sıcaklıklara ve gaz hızlarına maruz kalan bileşenlerdir. Bu nedenle, bu kanatlarda kullanılan malzemelerin termal yorulmaya, oksidasyona ve sürtünmeye karşı yüksek direnç göstermesi gerekir (Reed 2006).

Kanat geometrisi, akışkan dinamiğini optimize edecek şekilde aerodinamik tasarıma sahiptir. Ayrıca, iç yapılarında yer alan karmaşık soğutma kanalları sayesinde, metal yüzey sıcaklıkları azaltılarak dayanım artırılır. Bu tür geometrilerin üretilmesi geleneksel yöntemlerle oldukça zorken, eklemeli imalat ile daha kolay ve

hassas üretim yapılabilir. Gaz türbini kanatlarının üretiminde döküm, hassas işleme ve kaplama teknikleri gibi geleneksel yöntemler uzun süredir kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda selektif lazer ergitme (SLM) ve yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) gibi yöntemler de kullanılmaktadır.

6.2 Buhar Türbini Kanadı

Buhar türbinleri, enerji üretim tesislerinde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren makinelerdir. Buhar türbinleri, buharın yüksek basınç ve sıcaklıkta türbin kanatları üzerinden geçerken yaptığı iş ile milin dönmesini sağlar ve bu hareket elektrik jeneratörünü çalıştırarak elektrik enerjisi üretir. Çalışma prensibi, sıvı veya gazların türbin kanatlarına çarparak türbinin mekanik enerji üretmesidir. Bu süreç, termodinamik açıdan enerji dönüşümünün en temel örneklerinden biridir (Çengel ve Boles 2015).

Buhar türbini kanatları yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışan oldukça hassas parçalardır. Üretimi oldukça hassastır. Hassas döküm ve hassas talaşlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Bu özel üretim teknikleri nedeni ile buhar türbin kanatları yurtdışından ithal edilmektedir. Yeniköy Elektrik Üretim A.Ş. (YEAŞ) tarafından yürütülen ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Marmara Araştırma Merkezi (MAM) koordinasyonunda gerçekleştirilen proje kapsamında, Türkiye'de ilk defa buhar türbin kanatları yerli olarak üretilmiştir. Proje için yaklaşık iki yılı aşkın araştırma-geliştirme süreci takip edilmiştir. Yurtdışından temin edilen üçüncü ve dördüncü kademe türbin kanatlarında tersine mühendislik çalışmaları yapılmış, metalürjik özellikler ve geometrik boyutlar analiz edilmiştir. Bu kapsamda 1.4021 kalite paslanmaz çelikten dövme yöntemi ile şekillendirme, ıslah ve talaşlı imalat işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yüzey sertliği ihtiyacının karşılanmasında ise daha önce kaynakla yapılan stellite kaplama yerine indüksiyonla sertleştirme yöntemi tercih edilmiştir. Üretilen kanatların birim maliyeti, ithal edilen ürünlerin maliyetine kıyasla %50'nin üzerinde azaltılarak 4350 avro' da 2063 avro 'ya düşürülmüştür. Bu çalışma Türkiye'de daha önce üretilen kritik türbin parçalarının yerli üretim ile yapılabileceği kanıtlanmış ve enerji sektöründe dışa bağımlılığın azaltılması için önemli katkı sağlamıştır (TÜBİTAK MAM 2014).



Şekil 6.1: TÜBİTAK MAM Tarafından Üretilen Buhar Türbini Kanadı

6.3 Kaynak Teli ile Eklemeli İmalat ile Buhar Türbini Kanadı Uygulamaları

Buhar türbini kanatlarının üretiminde, karmaşık geometrilerin yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında uzun süreli dayanıklılıkla birleştirilmesi kritik öneme sahiptir. Geleneksel döküm ve işleme yöntemleriyle üretilen türbin kanatları, üretim sürecinde yüksek maliyet, uzun teslim süresi ve tasarım esnekliğinin sınırlılığı gibi önemli zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu bağlamda, özellikle kaynak teli ile eklemeli imalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) gibi teknolojilerin enerji sektörüne entegrasyonu, bu sınırlamaları aşmak adına büyük bir potansiyel sunmaktadır.

Bu alanda gerçekleştirilen en önemli çalışmalardan biri, ABD Enerji Bakanlığı'na bağlı Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı (ORNL) tarafından yürütülmüştür. ORNL araştırmacıları, kaynak teli ile metalik malzeme kullanarak bir buhar türbini kanadını 3D yazıcı teknolojisi ile üretmeyi başarmış ve bu çalışma, büyük boyutlu, yüksek dayanım gerektiren enerji bileşenlerinin eklemeli imalat ile üretimin mümkün olduğunu kanıtlayan öncü bir örnek teşkil etmiştir (Oak Ridge National Laboratory - ORNL 2023).

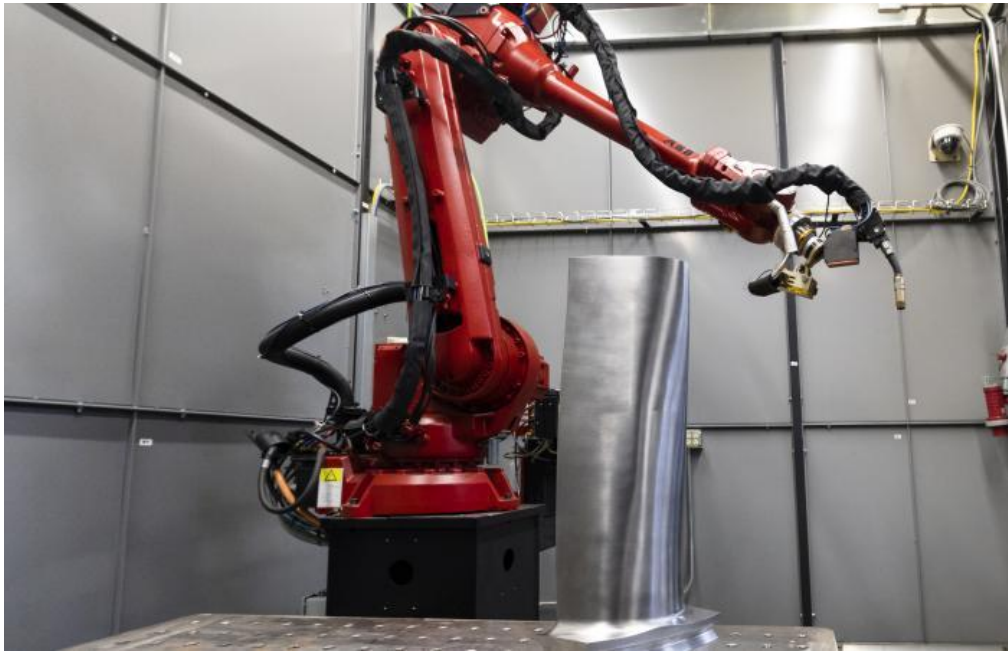
Çalışmada, yaklaşık 20 kilograma ulaşan bir buhar türbini kanadı, WAAM yöntemiyle paslanmaz çelik malzemedен üretilmiştir. Üretim süreci boyunca, yapının hem geometrik hassasiyeti hem de mikro yapısal bütünlüğü sürekli olarak izlenmiş ve optimize edilmiştir. Bu işlem, Directed Energy Deposition (DED)

benzeri bir yaklaşımın robotik sistemlerle entegre edilerek büyük hacimli parçaların üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir (Gartner 2023).

Elde edilen kanat, sadece laboratuvar ortamında değil, aynı zamanda endüstriyel ölçekte test edilmiş ve geleneksel yöntemlerle üretilmiş benzer parçalarla karşılaştırılabilir mekanik ve termal performans göstermiştir. ORNL'nin bu çalışması, sadece bir prototip üretimiyle sınırlı kalmayıp, enerji santrallerinde kullanılabilecek düzeyde güvenilirlik sağlayabilecek üretim parametreleri ve kalite kontrol mekanizmaları üzerine yoğunlaşmıştır (Engineering.com 2023).

Bu çığır açıcı çalışma, WAAM gibi tel bazlı eklemeli imalat yöntemlerinin yüksek mukavemetli, karmaşık enerji bileşenlerinin üretiminde geleneksel yöntemlerin yerini alabilecek düzeyde olduğunu göstermektedir. Ayrıca, tasarım özgürlüğünün artması, üretim süresinin ve malzeme israfının azaltılması gibi avantajlarla enerji sektöründe dijital üretim devrimini mümkün kılmaktadır.

ORNL araştırmacıları tarafından yürütülen bu çalışma, robotik WAAM teknolojisinin buhar türbini kanatları gibi kritik parçaların üretiminde nasıl etkin bir şekilde kullanılabileceğini gösteren en somut örneklerden biridir. ORNL tarafından yapılan bu çalışma, yalnızca akademik değil, aynı zamanda endüstriyel uygulamalar açısından da öncü nitelik taşımaktadır ve bu teknolojiye yönelik gelecekteki gelişmeleri yönlendirme potansiyeline sahiptir.



Şekil 6.2: ORNL'de Üretimi Gerçekleştirilen Gaz Türbini Kanadı

Kaynak: (Oak Ridge National Laboratory - ORNL 2023)

Siemens tarafından geliştirilen ve tam yük koşullarında başarıyla test edilen 3D baskı türbin kanatları, kaynak teli ile eklemeli imalat teknolojisinin enerji sektöründeki potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Bu kanatlar, 13.000 devir/dakika dönüş hızında ve 1.250 °C üzerindeki sıcaklıklarda gerçek motor şartlarında test edilmiştir. Siemens, bu testlerle birlikte, katmanlı imalatla üretilen parçaların yüksek sıcaklık ve mekanik yüklerin hâkim olduğu enerji uygulamalarında güvenle kullanılabileceğini göstermiştir (American Society of Mechanical Engineers 2017); (3DPrint 2021).

Bu başarı, Siemens'in İsveç Finspong'daki türbin tesisleri ile Birleşik Krallık merkezli katmanlı imalat uzmanı Materials Solutions iş birliğiyle gerçekleştirilmiştir. Material Solutions, havacılık gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde onaylı parçalar üretme konusunda tecrübeli bir üretici olup, Siemens'in katmanlı üretim yetkinliklerinin gelişmesine önemli katkı sağlamıştır (American Society of Mechanical Engineers 2017).

Siemens'in geliştirmiş olduğu türbin kanatları, bütünleşmiş soğutma kanalları gibi geleneksel üretim yöntemleriyle elde edilmesi zor olan karmaşık geometrik özelliklere sahiptir. Bu sayede, türbin verimliliği ve genel performansı önemli ölçüde arttırabilmiştir (Energy Focus 2021).

Kaynak teli ile eklemeli imalat teknolojisi, türbin kanadı üretiminde tasarım esnekliği, malzeme verimliliği ve üretim sürecinin önemli ölçüde kısalması gibi ciddi avantajlar sunmaktadır. Siemens, bu yöntemle prototipleme süresini yaklaşık iki yıldan iki aya indirerek geliştirme süreçlerinde kayda değer bir hızlanma elde etmiştir. Ayrıca, üretilen parçaların dayanımı ve performansı kapsamlı test süreçleriyle doğrulanmıştır. Bu gelişmeler, kaynak teli ile eklemeli imalatın buhar türbini gibi yüksek hassasiyet ve güvenilirlik gerektiren uygulamalarda etkin bir alternatif olduğunu göstermektedir (Enerji Günlüğü 2018).

Siemens'in bu alandaki öncü çalışmaları, Amerikan Makine Mühendisleri Derneği (ASME) tarafından "Emerging Technology Award" ile ödüllendirilmiştir. Bu ödül sadece teknik bir başarının değil, aynı zamanda katmanlı imalat teknolojisinin endüstriyel ölçekte kabul görmesinin de bir göstergesidir (Endustri40 2017).

Sonuç olarak, Siemens'in liderliğinde gerçekleştirilen bu çalışmalar, kaynak teli ile eklemeli imalatın buhar türbini kanadı üretiminde geleneksel yöntemlere göre üstünlük sağladığını ve enerji sektöründe yüksek performanslı, sürdürülebilir üretim çözümlerine katkı sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 6.3: Siemens Tarafından Üretilen Türbin Kanadı

Kaynak: (Energy Focus 2021)

Kaynak teli ile eklemeli imalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM), buhar türbini kanatlarının üretiminde hem maliyet hem de üretim süreci açısından çığır açıcı avantajlar sunmaktadır. Geleneksel imalat yöntemlerinde türbin kanatları, yüksek mukavemetli ve ısıya dayanıklı alaşımlar kullanılarak talaşlı işleme yoluyla üretilmekte; bu da yüksek malzeme kayıplarına, uzun teslimat sürelerine ve artan üretim maliyetlerine neden olmaktadır. WAAM teknolojisi, tel elektrot ile ark kaynağının katmanlı üretim mantığına entegre edilmesiyle, bu zorlukları ortadan kaldırmak üzere geliştirilmiştir.

Gefertec GmbH tarafından geliştirilen WAAM süreci, CAD verilerinin doğrudan CNC kontrollü kaynak kafasına aktarılmasıyla, yüksek hassasiyetli ve otomatik bir üretim süreci sunmaktadır. Bu yöntem sayesinde, karmaşık geometrilere sahip ve büyük hacimli türbin kanatları, yüksek tekrarlanabilirlik ve kalite ile üretilabilmektedir. Söz konusu üretim sistemleri tam otomasyonla üç vardiya esasına

göre çalışmakta ve şimdiye dek 1.000'den fazla buhar türbini kanadı üretmiştir (Gefertec GmbH 2025).

Yapılan uygulamalarda WAAM yöntemi, üretim sürecindeki talaşlı işleme ihtiyacını önemli ölçüde azaltmış; bu da yaklaşık %15 oranında maliyet tasarrufu ve %75'e varan teslimat süresi kısalması sağlamıştır. Üstelik bu teknoloji, yerel üretim olanaklarını arttırarak tedarik zinciri üzerindeki dışa bağımlılığı azaltmakta ve acil üretim ihtiyaçlarına hızlı çözümler sunmaktadır. Böylece, enerji üretiminde kritik rol üstlenen türbin bileşenleri, daha esnek, ekonomik ve sürdürülebilir bir üretim modeliyle elde edilebilmektedir.

Sonuç olarak, Gefertec'in WAAM tabanlı üretim yaklaşımı, buhar türbini kanadı üretiminde yalnızca teknik değil, aynı zamanda stratejik kazanımlar da sağlamaktadır. Kaynak teli ile eklemeli imalat yöntemi, özellikle enerji sektörü gibi yüksek güvenilirlik gerektiren alanlarda endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini kanıtlamış ve gelecekteki üretim standartlarını yeniden tanımlama potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 6.4: Gefertec Tarafından Üretilen Türbin Kanatları

Kaynak: (Gefertec GmbH 2025)

7. KAYNAK TELİ İLE EKLEMELİ İMALAT İLE TÜRBİN KANADI ÜRETİMİ

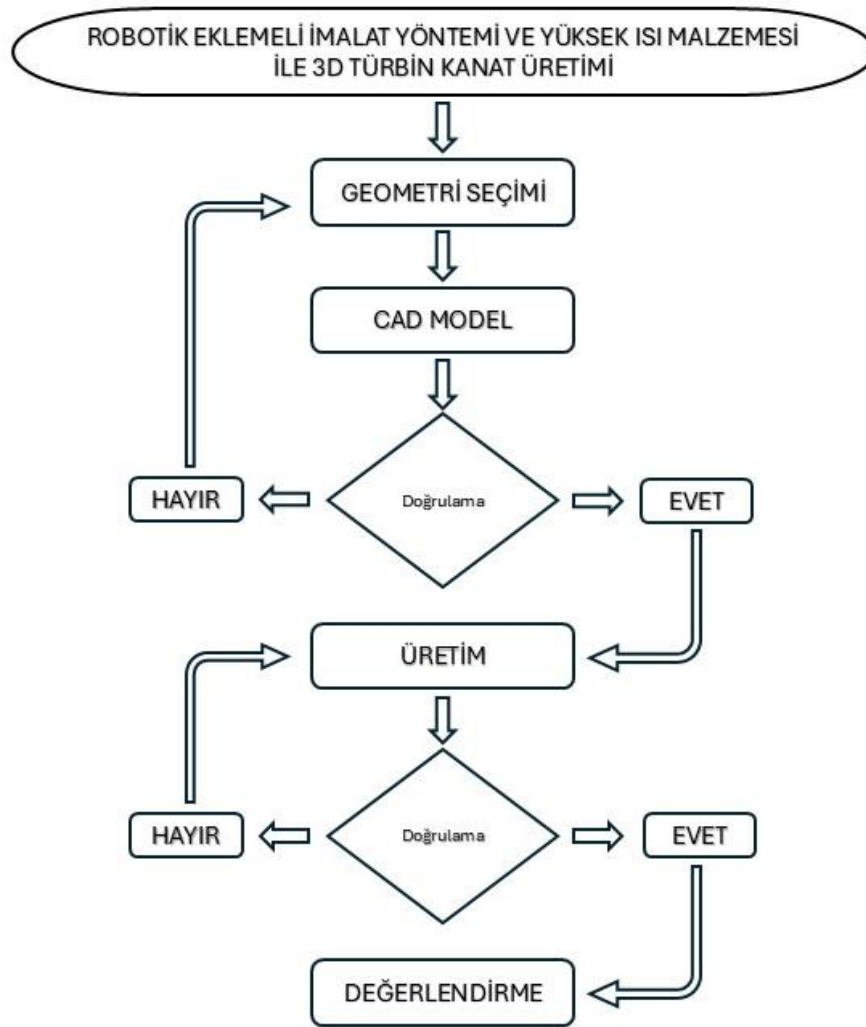
7.1 Giriş

Kaynak teli ile eklemeli imalat (WAAM) teknolojisi, metal parça üretiminde yüksek verimlilik ve tasarım özgürlüğü sağlayan ileri üretim yöntemlerinden biridir. WAAM, özellik büyük ve karmaşık geometrilerdeki bileşenlerin katman katmanlı olarak imal edilmesinde tercih edilmektedir. Bu yöntem, kaynak teli kullanılarak malzemenin kontrollü bir şekilde biriktirilmesini mümkün kılarak, geleneksel üretim tekniklerine kıyasla malzeme israfını azaltmakta ve üretim süresini kısaltmaktadır. Türbin kanadı gibi yüksek performans gerektiren kritik parçaların üretiminde WAAM yöntemi, tasarım esnekliği ve mekanik özelliklerin optimize edilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada, NACA 2412 kanat profili tercih edilerek türbin kanadı tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan türbin kanadının WAAM teknolojisi kullanılarak üretim süreci detaylandırılmış ve bu yöntemin türbin kanadı üretimindeki uygulama potansiyeli değerlendirilecektir. WAAM teknolojisinin temel prensipleri ve endüstrideki uygulamaları tarafından belirtildiği üzere, eklemeli imalatın gelecekteki üretim süreçlerinde kritik bir rol oynayacağı öngörülmektedir (Gedik 2023).

7.2 Metodoloji

WAAM yöntemiyle türbin kanadı üretimi bir dizi adımı içerir. İlk adım, tasarım aşamasıdır: Türbin kanadının 3D CAD modeli hazırlanır ve gerekli boyutsal ve aerodinamik özellikler belirlenir. Sonraki aşamada, CAD model üzerinden kaynak parametreleri ve tel besleme gibi işlem yolları planlanır. Bu süreçte üç aşama izlenir; 1) Ürün geliştirme için CAD modelinin oluşturulması, 2) Modelden kaynak parametreleri ve biriktirme yollarının belirlenmesi, 3) Kaynak robotu ile kaynak yapılarak katman katman üretilmesi. Bu aşamalar arasındaki geçişlerde simülasyon ve optimizasyon çalışmaları yapılır; örneğin nihai tasarım, simülasyon yazılımlarıyla doğrulanarak üretim öncesi hataların tespiti sağlanabilir, AM yöntemi kullanılarak

hızlı prototipleme ile uygun geometri kontrolü yapılabilir. İmalat aşamasında, kaynak makinesi ve robot programı çalıştırılarak Inconel 625 teli eritilir ve parça katman katman oluşturulur. Bu sırada, gerekirse prosesin durumu gerçek zamanlı olarak izlenir. ORNL'den Kulkarni ve diğerlerinin belirttiği gibi, WAAM işlemi sırasında kanat üzerinde taramalar yapılarak hem şekil bilgisi elde edilebilir hem de sonraki talaşlı işlem için işleme ekiplerine veri sağlanabilir. Bu tür bir kalite güvencesi ile parçada meydana gelebilecek sapmalar anında düzeltilir. Metodoloji boyunca her adımda gerekli malzeme akışı, enerji tüketimi ve kalite kontrolleri takip edilerek sürecin etkinliği değerlendirilebilir (Kulikov, ve diğerleri ty).



Şekil 7.1: Türbin Kanadı Üretimi Akış Şeması

7.3 Türbin Kanadı Malzemesi – Inconel 625

Inconel 625, %58'den fazla Ni, %20-23 Cr, %8-10 Mo ve %3.15-4.15 Nb içeren nikelde zengin bir süperalaşımdır. Molibden ve niobyum katılımı, alaşımın sertliğini arttırarak presipitasyon sertleştirmeye gerek bırakmaz. Bu bileşim hem yüksek sıcaklıklarda hem de korozif ortamlarda olağanüstü performans sağlar. Inconel 625'in mekanik özellikleri yüksektir: tavlanmış durumda çekme dayanımı yaklaşık 965 MPa, akma dayanımı ~480 MPa ve uzama %50 civarındadır. (24 saat 982°C'ye ısıtma sonrası değerler). Ayrıca yorulma mukavemeti ve oksidasyon direnci oldukça yüksektir, kaynaklanabilirliği, şekil verme kabiliyeti ve işlenebilirliği iyidir. Bu özellikleri sayesinde Inconel 625, deniz platformlarında donanım, nükleer reaktör bileşenleri, kimyasal işlem üniteleri, uçak motorları, gaz türbinleri gibi zorlu uygulamalarda tercih edilir. Örneğin, yoğun bileşenlerin büyük kısmı Inconel 625 gibi nikel esaslı süperalaşımlar ile üretilir. WAAM ile üretilmiş Inconel 625 parçaların mekanik testleri, endüstri standartlarını karşılayabildiğini ve benzer alaşımlar üzerinde yapılmış önceki çalışmalara kıyasla yüksek dayanımlar gösterdiğini ortaya koymuştur (Special Metals Corporation ty); (Sword, Galloway ve Toumpis tarih yok).

Çizelge 7.1: Inconel 625 Malzeme Kimyasal Bileşimi

Element %	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti
625 SG	Min. 58	20-23	Max. 5	3.14-4.15	8-10	Max. 0.40
Element %	C	Mn	Si	Co	P	S
625 SG	Max. 0.1	Max. 0.5	Max. 0.5	Max. 1	Max. 0.015	Max. 0.015

Kaynak:(Varzene Metal SAN. ve TİC. A.Ş. ty)

Çizelge 7.2: Inconel 625 Malzeme Mekanik Özellikleri

Mekanik Özellikler	Akma Dayanımı [MPa]	P[kg/m ³]	K[W/m-k]	Cp [J/kg-k]	Erime Noktası [°C]	Young Modülü [GPa]	Poisson Oranı
Inconel 625	448	8440	9.8	550	1350	207.5	0.3

7.4 Türbin Kanadı Tasarımı

Bu çalışmada, buhar türbini kanadı tasarımında referans kesit olarak NACA 2412 profil tercih edilmiştir. NACA (National Advisory Committee for

Aeronautics)’nın dört rakamlı seri profilleri, maksimum kamber (eğrilik), maksimum kamberin konumu, maksimum kalınlık oranını tanımlar. “2412” kodu, %2 maksimum kamber (eğrilik), %40 maksimum kamberin konumu (hücum kenarından itibaren %40 chord uzunluğunda), %12 maksimum kalınlık (chord uzunluğunun %12’si) oranı anlamına gelir. Bu sayısal tanım yöntemi, profillerin parametrik olarak modellenmesine ve karşılaştırmalı değerlendirmelere olanak sağlar (Airfoil Tools 2025).

NACA 2412 profilinin, aerodinamik karakteristikleri açısından birçok akademik çalışmada referans alınan, geniş çapta incelenmiş ve doğruluğu literatürde kanıtlanmış bir geometridir. %2 kamber ve %12 kalınlık oranları hem akışın dengeli yönlendirilmesini hem de yeterli yapısal dayanımın sağlanmasını mümkün kılmaktadır. Kapalı arka kenar yapısı, özellikle kanat ucunda meydana gelebilecek akış ayrılmalarını azaltarak performans kayıplarını sınırlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde, NACA 2412 profili; orta dereceli aerodinamik yükler, kontrollü akış davranışı ve yapısal verimlilik gerektiren buhar türbini kanat tasarımlarında uygun bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (Abbott ve Doenhoff 1959) ; (Başekin ve Selver 2023).

NACA 2412 profiline ait parametre ayarları şekil 7.2’de verilmiştir. Profili oluşturan nokta sayısı 100 olarak belirlenmiştir. Buhar türbini kanadı gövdesini oluşturacak her kesit için airfoil tools sitesi üzerinden 0° ve 15° pitch veya saldırı açısı (angle o attack) ve giriş uzunluğu (chord) 100 mm olacak şekilde profil koordinatları hazırlanmıştır. Saldırı açısı, profilin giriş çizgisi ile akış yönü arasındaki açıyı ifade etmektedir. Hazırlanan koordinatlar Solidworks programında kullanılmak üzere DAT formatına çevrilmiştir.

The image shows two side-by-side screenshots from the Airfoil Tools website. The left screenshot displays the parameter input form for the NACA 2412 profile. The right screenshot shows the resulting DAT file content.

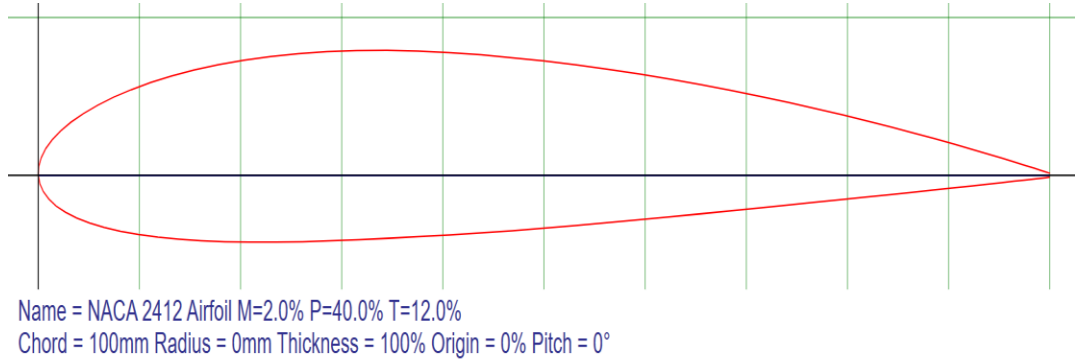
Parameter	Value	Constraint
Max Camber (%)	2	First digit. 0 to 9.5%
Max camber position (%)	40	Second digit. 0 to 90%
Thickness (%)	12	Third & fourth digit. 1 to 40%
Number of points	100	20 to 200
Cosine spacing	<input checked="" type="checkbox"/>	Cosine or linear spacing
Close Trailing edge	<input checked="" type="checkbox"/>	Open or closed TE

Dat file

```
NACA 2412 AirFoil M=2.0% P=40.0% T=12
1.000000 -0.000000
0.999023 0.000209
0.996095 0.000832
0.991228 0.001863
0.984438 0.003289
0.975752 0.005092
0.965201 0.007252
0.952825 0.009744
```

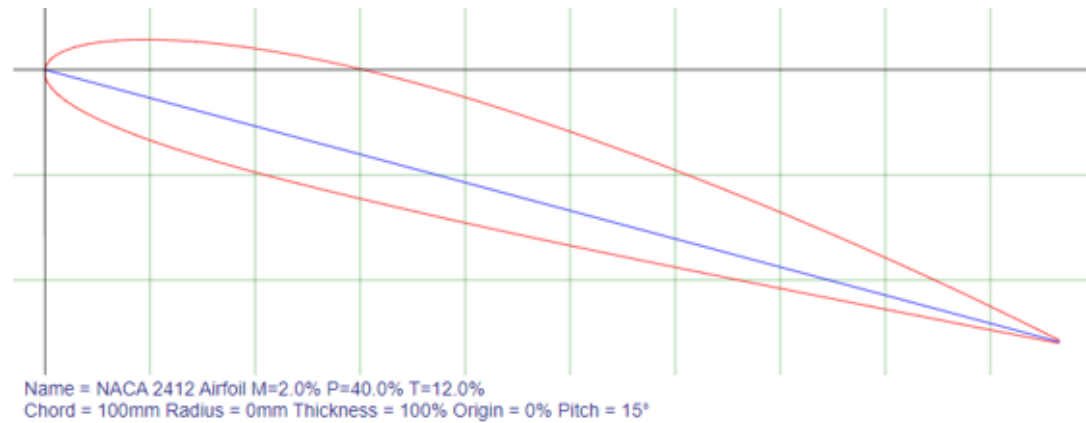
Şekil 7.2: NACA 2412 Profil Parametreleri

NACA 2412 profilinin 0° saldırı açısındaki (nötr pozisyon) kesiti Şekil 7.3'te verilmiştir. Bu pozisyon, aerodinamik kuvvetlerin temel referans düzeyde etkili olduğu bir pozisyonudur ve analizlerin başlangıç noktası olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 7.3: NACA 2412 Profil Kesiti 0° Saldırı Açısı Pozisyonu

Şekil 7.3'te gösterilen NACA 2412 profilinin 15° saldırı açısındaki konfigürasyonu, kaldırma kuvvetinin maksimuma ulaştığı durumu temsil etmektedir. Bu açı, türbin kanadı gibi yüksek enerji dönüşümüne dayalı uygulamalarda avantaj sağlamaktadır. Ancak bu açının akış ayrılması (stall) sınırına yakın olması, özellikle kontrolsüz koşullarda aerodinamik verimlilikte ani düşümlere ve sistem kararlılığında problemlere yol açabilir.

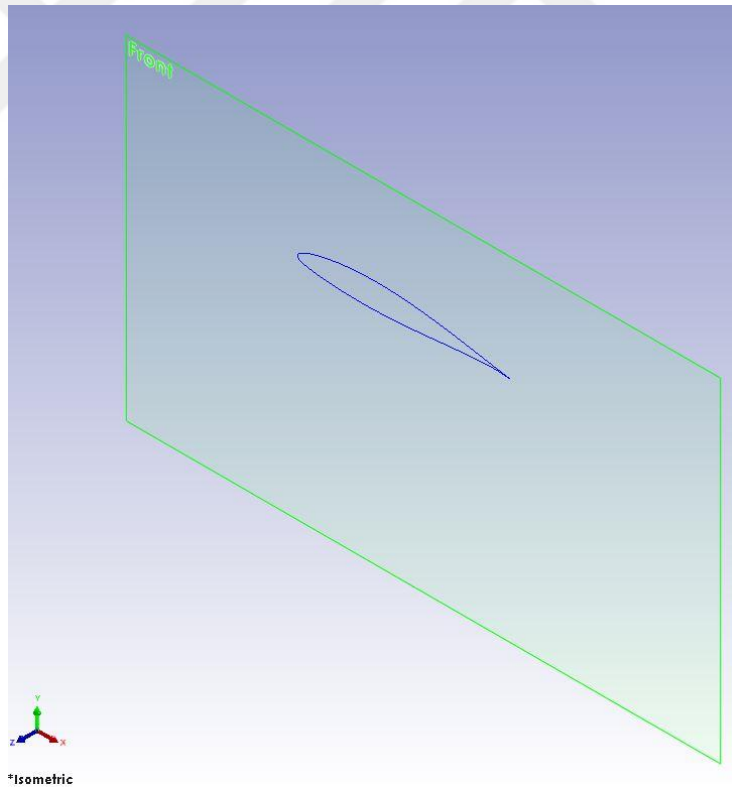


Şekil 7.4: NACA 2412 Profil Kesiti 15° Saldırı Açısı Pozisyonu

Katı modelleme aşamasında SolidWorks gibi il düzey CAD yazılımı kullanılmıştır. SolidWorks, Dassault Systèmes tarafından geliştirilen, parametrik ve özellik tabanlı 3B bilgisayar destekli tasarım yazılımıdır. Parça modelleme, montaj oluşturma ve teknik resim çıkarma modüllerini tek bir bütünleşmiş ortamda sunmasıyla, tasarım değişikliklerinin tüm dokümanlara eş zamanlı yansımaları sağlar. 1995 yılında piyasaya sürülen SolidWorks, masaüstü ortamda çalışan ilk 3B

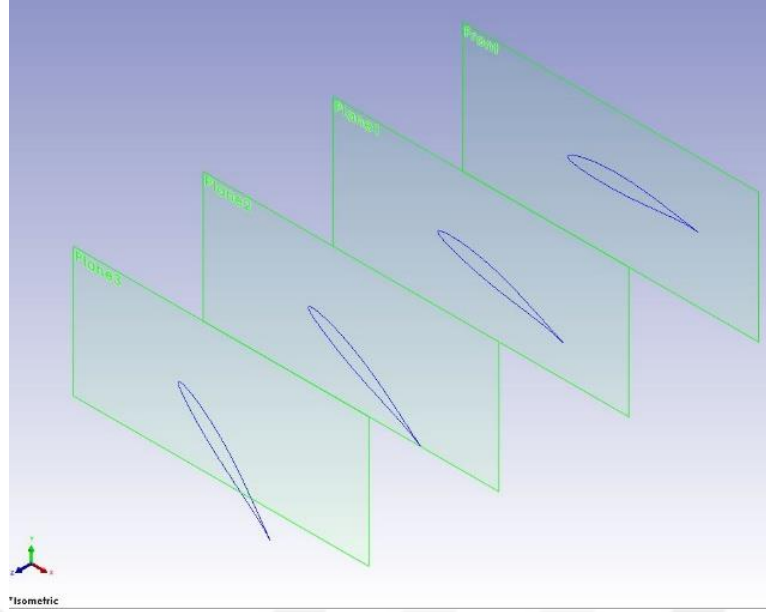
CAD uygulamalarından biri olmasıyla öne çıkar. Geleneksel büyük iş istasyonlarına göre yaygın bilgisayar donanımlarında çalışabilmesi, tüm mühendislerin yazılıma erişimini kolaylaştırmıştır. Yazılımın temel modülleri arasında parametrik parça tasarımı, model oluşturma ve 2B teknik resim hazırlama bulunur. Tek bir “ana model” üzerinde yapılan her türlü ölçüsel veya geometrik değişiklik, ilişkili montaj ve resim dosyalarına otomatik olarak aktarılır. Bu sayede tutarlı belgelendirme ve tasarım bütünlüğü sağlanır. SolidWorks sadece tasarım yapmakla kalmayıp, hareket analizi, yapısal simülasyon, ürün veri yönetimi ve CNC için CAM veri üretimi gibi modüllerle kavramsal tasarımdan imalata kesintisiz bir iş akışı sunar (Dassault Systèmes ty).

SolidWorks programında türbin kanadı parçasını oluşturmak için 4 farklı yüzey oluşturulur. Bu yüzeylere daha önce hazırlanan DAT formatındaki dosyalar sırası ile eklenir. Şekil 7.5’te NACA 2412 profilinin 0° saldırı açısı pozisyonundaki kesitinin Solidworks programına aktarıldığı hali gösterilmektedir.



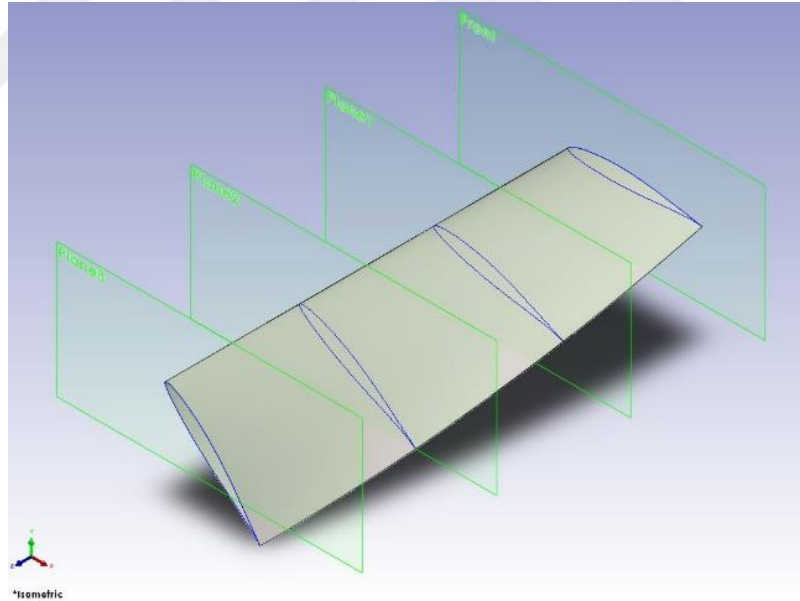
Şekil 7.5: SolidWorks Programında NACA 2412 Profili Kesitinden Oluşturulmuş Türbin Kanadı Tasarımı

Daha sonra türbin kanadı parçasının gövde geometrisini oluşturacak daha önce hazırlanmış DAT dosyaları da uygun yüzeylere yerleştirilir. Gövde geometrisini oluşturacak yüzeylere yerleştirilen profil kesitleri Şekil 7.6’da gösterilmiştir.



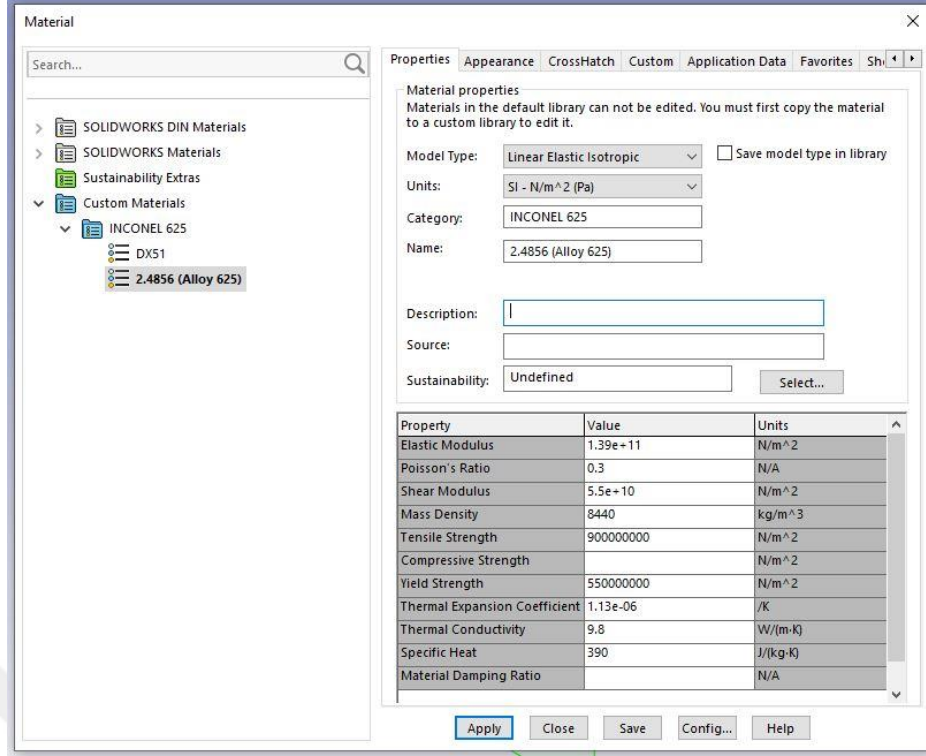
Şekil 7.6: SolidWorks Programında NACA 2412 Profili Kesitinden Oluşturulmuş Türbin Kanadı Tasarımı

Oluşturulan gövde geometrisi katı model haline getirilir. 3B oluşturulan türbin kanadı Şekil 7.7’de gösterilmiştir.



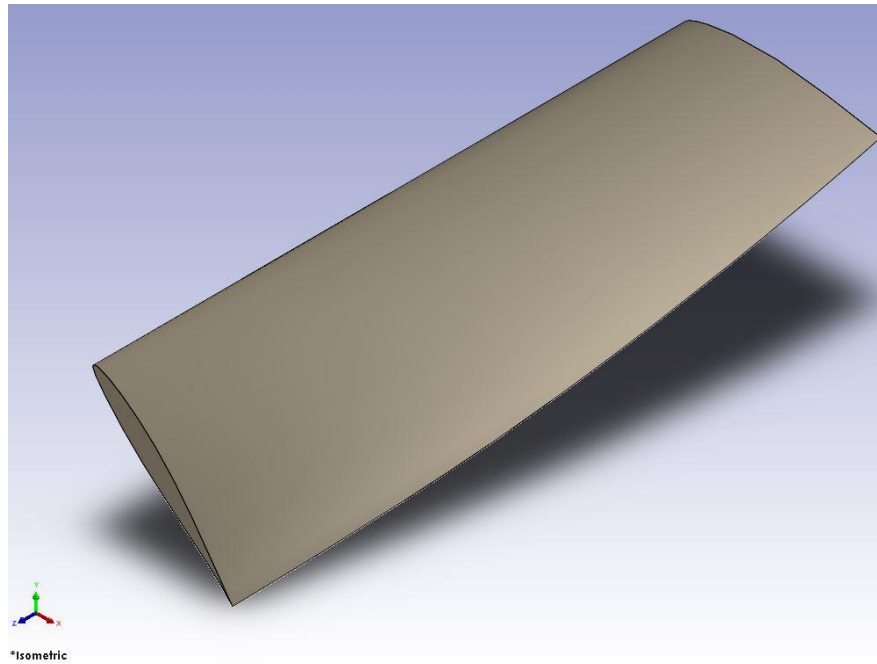
Şekil 7.7: SolidWorks Programında NACA 2412 Profili Kesitinden Oluşturulmuş Türbin Kanadı

SolidWorks programının standart malzeme kütüphanesinde inconel 625 malzeme tanımlı olmadığı için malzeme kütüphanesine inconel 625 malzeme manuel olarak eklenmiştir. Şekil 7.8’de Malzeme kütüphanesine tanımlanmış inconel 625 malzeme özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 7.8: SolidWorks Programında Malzeme Kütüphanesinde Inconel 625 Malzeme Tanımlanması

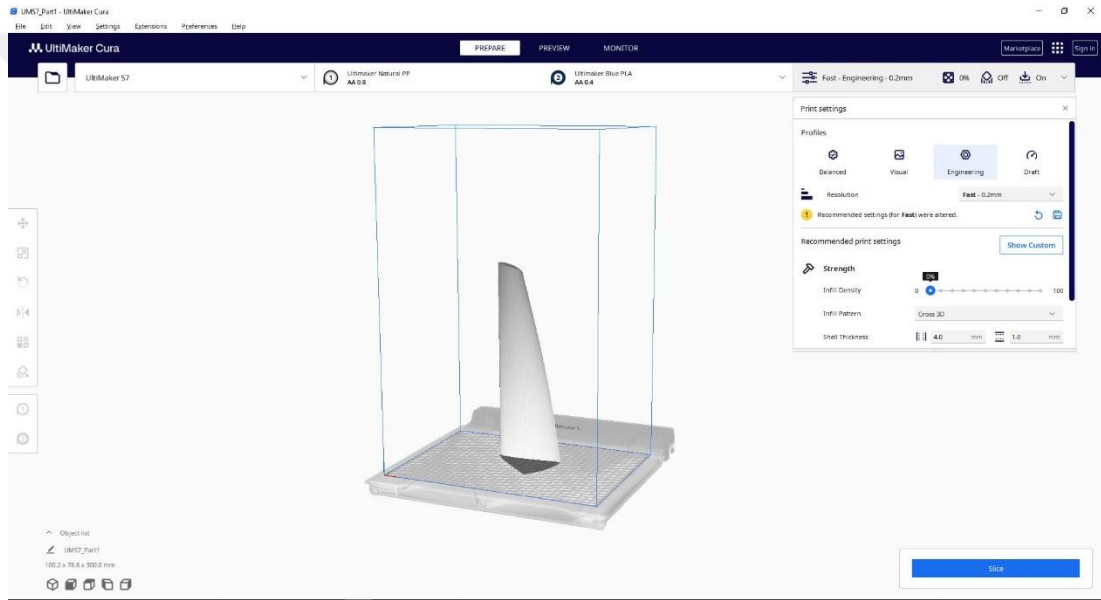
Katı modellemesi tamamlanan NACA 2412 kanat profili ile oluşturulmuş türbin kanadı parçasına, inconel 625 malzemesi tanımlanmıştır ve 3B tasarım aşaması tamamlanmıştır. Şekil 7.9'da tasarım aşaması tamamlanmış türbin kanadı parçası gösterilmiştir.



Şekil 7.9: SolidWorks Programında NACA 2412 Profili Kullanılarak Tasarlanmış Türbin Kanadı

SolidWorks ortamında tamamlanan 3B model, STL formatında dışa aktarılmıştır. Bu dosya, Ultimaker Cura yazılımı kullanılarak 3B baskıya uygun şekilde dilimlenmiştir. Şekil 7.10'da türbin kanadı parçasının Cura yazılımı ortamındaki görünümü gösterilmiştir.

Ultimaker Cura, Fused Filament Fabrication (FFF) teknolojisini kullanan 3B yazıcılar için en yaygın kullanılan dilimleme (slicing) yazılımlarından biridir. Kullanıcıların 3B CAD modellerini baskı için hazırlamasına, katman yüksekliği, doluluk oranı, destek yapısı gibi birçok baskı parametresini ayarlamasına olanak tanır. Açık kaynak kodlu olması ve sürekli güncellenen materyal profilleri sayesinde hem amatör hem profesyonel kullanıcılara hitap eder (UltiMaker ty).



Şekil 7.10: UltiMaker Cura Programında Türbin Kanadı

7.5 Hızlı Prototip Üretimi ile Tasarım Doğrulanması

Tasarım doğruluğu, eklemeli imalatın yaygınlaşması ile hızlı prototipleme yöntemiyle yapılmaktadır. Hazırlanan CAD modeli, plastik filament kullanılarak ölçekli bir prototip şeklinde üretilmiştir. Elde edilen fiziksel model, montaj uyumluluğu, geometrik uyumluluk ve parça yerleşimi açısından değerlendirilmiştir. Bu aşamada tespit edilen hatalar olsaydı, CAD model üzerinde düzeltilebilir ve prototipleme süreci tekrarlanabilirdi. Bu sayede hatalı tasarımlar, maliyetli metal üretim aşamasına geçilmeden önce elimine edilmiş olmaktadır. Hızlı prototipleme, tasarım döngüsünü kısaltmakta ve nihai üretim sürecindeki riskleri minimize etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, NACA 2412 profiline dayalı olarak

oluşturulan CAD model, plastik filament kullanılarak 3B yazıcıda üretilmiş ve kanat yapısı fiziksel olarak incelenerek tasarım doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.11’de, prototip üretimi tamamlanmış parça sunulmaktadır.



Şekil 7.11: Tasarlanan Türbin Kanadı Prototipi

7.6 Türbin Kanadı Üretimi

Nihai tasarıma geçmeden önce üretim hazırlıkları tamamlanmıştır. Inconel 625 kaynak teli ve uygun koruyucu gaz Gedik Holding sayesinde temin edilmiştir. Kaynak robotu üretim pozisyonuna yerleştirilmiş, referans noktaları tanımlanmıştır. Küçük boyutlu test katmanları üretilerek kaynak akım şiddeti, tel besleme hızı ve ilerleme hızı gibi parametreler optimize edilmiştir. Ayrıca literatürde inconel 625 ile yapılmış WAAM uygulamaları taranmış ve parametre ayarları gözden geçirilmiştir. Son CAD modeli üzerinden ölçü ve malzeme kalınlıkları kontrol edilmiş, güvenlik önlemleri gözden geçirilmiştir. Bu tez kapsamında üretim işlemi, Gedik Holding bünyesinde yer alan kaynak hücresinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.12’de ilgili üretim hücresi gösterilmiştir.



Şekil 7.12: WAAM ile Türbin Kanadı Üretimi Sırasında Kullanılan Üretim Hücresi

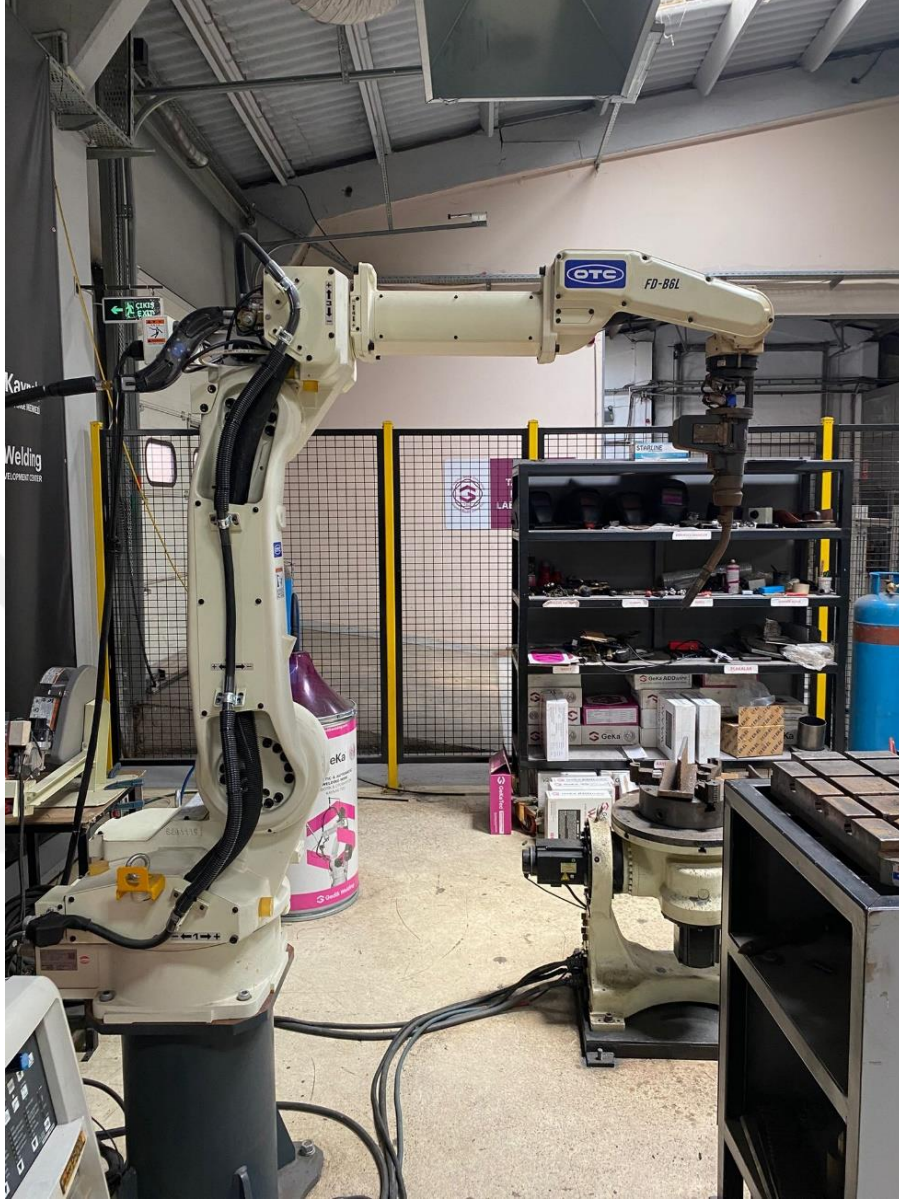
Üretim sürecinde OTC FD-B6L model, altı serbestlik dereceli endüstriyel kaynak robotu kullanılmıştır. OTC markasına ait bu kaynak robotunun teknik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3: OTC FD-B6L Kaynak Robotu Teknik Özellikleri

Eksen Sayısı		6		
Maksimum Kapasite		6 kg		
Tekrarlanabilirlik		±0.08 mm		
Erişim Mesafesi		2008 mm		
Sürücü Kapasitesi		4832 W		
Kütle / Ağırlık		287 kg		
Kurulum Yöntemi		Zemin / Tavan / Duvar		
Eksenler		Çalışma Aralığı	Hareket Hızı	İzin Verilen Moment
Kol	J1 (Dönme)	±170° (±50°)	3.40 rad/s (195°/s)	-
	J2 (Alt Kol)	-155° to +100°	3.49 rad/s (200°/s)	-
	J3 (Üst Kol)	-170° to +190°	3.49 rad/s (200°/s)	-
Bilek	J4	±155°	7.50 rad/s (430°/s)	10.5 N•m
	J5	-45° to +225°	7.50 rad/s (430°/s)	10.5 N•m
	J6	±205°	11.00 rad/s (630°/s)	5.9 N•m

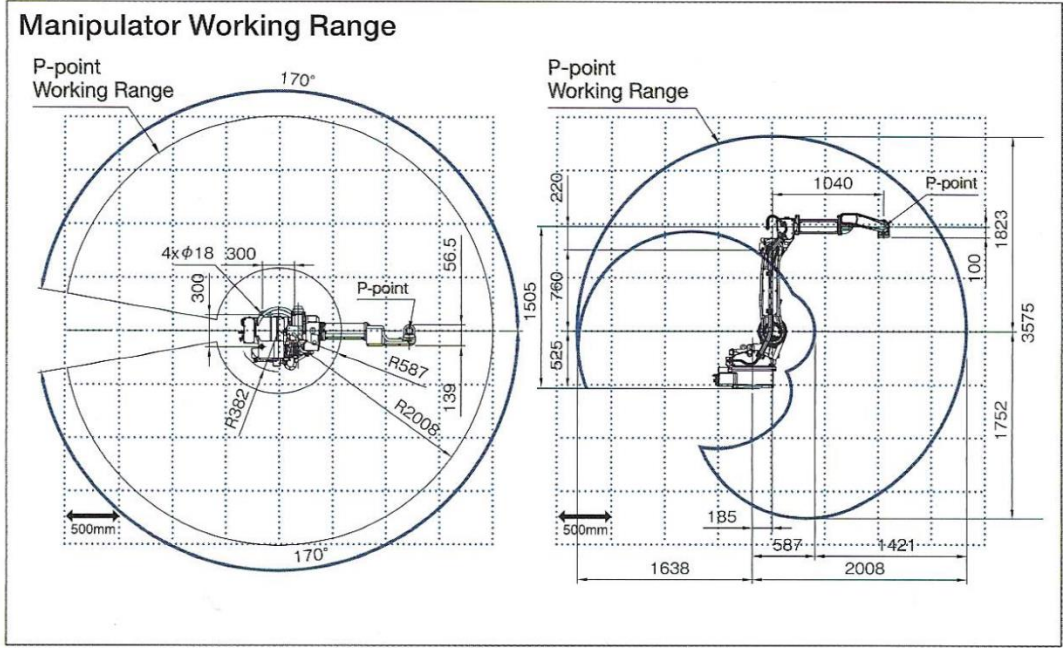
Kaynak: (Roboweld ty)

Şekil 7.13'te Gedik Holding bünyesindeki kaynak hücresinde yer alan OTC FD-B6L model endüstriyel robot gösterilmiştir.



Şekil 7.13: Üretim için Kullanılan OTC FD-B6L Model Altı Serbestlik Dereceli Endüstriyel Kaynak Robotu

OTC FD-B6L model endüstriyel kaynak robotunun çalışma erişim alanı Şekil 7.34'te gösterilmiştir.



Şekil 7.14: OTC FD-B6L 6 Eksen Kaynak Robotu Erişim Alanı

OTC FD-B6L altı eksenli kaynak robotunun güç kaynağı olarak Daihen Welbee P500L modeli kullanılmıştır. Bu cihaz, WAAM işlemi sırasında gerekli akım ve gerilim değerlerini sağlayarak kaynak stabilitesinin korunmasını sağlamaktadır. Şekil 7.15'te, kullanılan Welbee P500L güç kaynağı görsel olarak sunulmaktadır.



Şekil 7.15: OTC FD-B6L Kaynak Robotu Güç Kaynağı

Bu tez çalışmasında, Inconel 625 alaşımı kullanılarak bir gaz türbini kanadı prototipi, robotik Tel Ark Eklemeli İmalat (WAAM) yöntemiyle deneysel olarak üretilmiştir. Üretimde Ø1.2 mm çapında Inconel 625 kaynak teli tercih edilmiş, işlem parametreleri katman kalitesi, geometrik doğruluk ve kaynak kararlılığını sağlamak üzere planlanmıştır.

WAAM sürecinde her bir katman, başlangıç (AS – Arc Start) ve bitiş (AE – Arc End) olmak üzere iki ana segment üzerinden yönetilmiştir. Bu segmentasyon, üretim kontrolünü artırmak ve dikiş kalitesini optimize etmek amacıyla uygulanmıştır.

AS segmentinde, kaynak akımı 210 A, ark uzunluğu ise 6 birim olarak belirlenmiştir. Tel sürme hızı 55 cm/dk değerindedir ve segmentin ilerleyişiyle birlikte kaynak hızı 80 cm/dk seviyesine çıkarılmıştır. Bu segmentte kaynak karakteristiği, düz ve stabil bir eriyik havuzu oluşturacak biçimde yapılandırılmıştır. Segment geçişlerinde kaynak hızı, kontrollü olarak 120 cm/dk'yı kadar azaltılmıştır.

AE segmentinde, kaynak akımı 190 A'e düşürülerek son katman geometrisinin dengeli şekilde tamamlanması hedeflenmiştir. Bu aşamada kaynak dikişinin sonlandığı noktada oluşabilecek kraterin kontrol altına alınabilmesi için 0.6 saniyelik bir krater süresi tanımlanmıştır. Kaynak sonrası koruyucu gazın bir süre daha akışta kalması amacıyla post-flow süresi de yine 0,6 saniye olarak belirlenmiştir. Telin kaynak sonrası eriyik bölgede kalıntı bırakmaması adına, burnback voltajı 21.6 V olarak ayarlanmıştır.

Katmanlar arası termal dengeyi sağlamak ve iç gerilmeleri azaltmak amacıyla her katman arasında 3 dakikalık bir bekleme süresi uygulanmıştır. Bu uygulama aynı zamanda sıcaklık gradyanlarının kontrol altına alınmasına yardımcı olmuş ve katmanlı üretim sırasında meydana gelebilecek metalürjik kusurların önüne geçilmesini sağlamıştır.

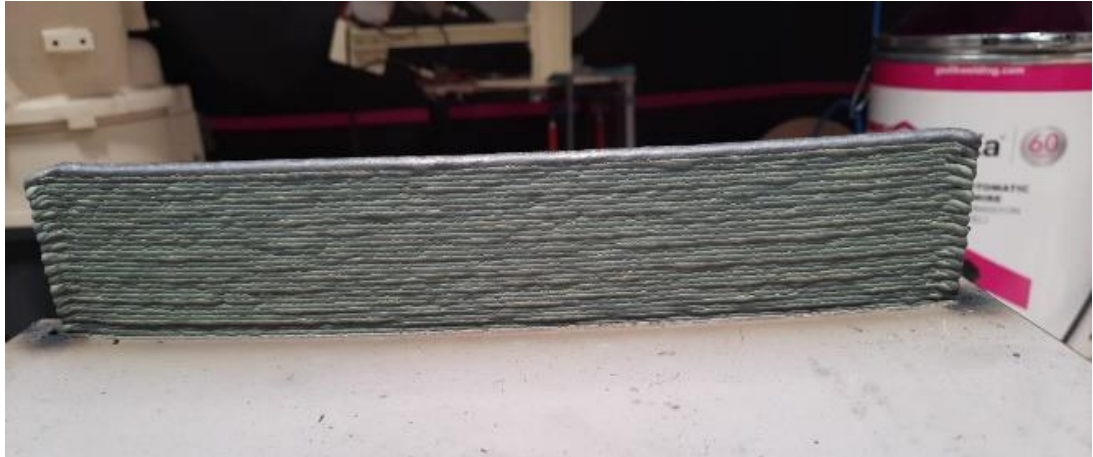
Üretimde kullanılan kaynak makinesi, OTC marka, 500 A kapasiteli MIG-2 DC modelidir. Bu cihaz, WAAM süreci için kritik öneme sahip olan low spatter (düşük sıçrama) moduna sahiptir. Ayrıca, Synchro Feed adı verilen ileri düzey tel sürme teknolojisi sayesinde, tel ilerleme hızı ve kaynak akımı senkronize edilerek kaynak havuzu üzerinde hassas kontrol sağlanmıştır. OTC kaynak makinesinin

robotik sistemle tam uyumlu çalışması sayesinde üretim süreci kararlı ve tekrarlanabilir hale getirilmiştir.

Çizelge 7.4: WAAM Üretimi için Proses Parametreleri

Parametre	AS Segmenti	AE Segmenti
Kaynak Akımı	210 A	190 A
Ark Uzunluğu Ayarı	6	6
Tel İlerleme Hızı	55 cm/dk	-
Krater Süresi	-	0.6 sn
Post-Flow Süresi	-	0.6 sn
Burnback Voltajı	-	21.6 V

Türbin kanadı üretimine geçilmeden önce, Inconel 625 malzemesi kullanılarak bir WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) yöntemiyle test amaçlı bir duvar yapısı üretilmiştir. Şekil 7.16'da, oluşturulan WAAM duvarı gösterilmektedir.



Şekil 7.16: Inconel 625 Malzemedan Oluşturulan WAAM Duvar

WAAM yöntemiyle oluşturulan test duvarının ardından nihai üretim aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada, Inconel 625 malzemesi kullanılarak türbin kanadı parçası başarıyla üretilmiştir. Şekil 7.17'de, üretimi tamamlanmış nihai türbin kanadı parçası gösterilmektedir.



Şekil 7.17: Tamamlanmış Nihai Türbin Kanadı Parçası

8. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, NACA 2412 aerodinamik profili esas alınarak tasarlanan Inconel 625 gaz türbini kanadı, robot destekli Tel Ark Eklemeli İmalat (WAAM) yöntemiyle üretime alınmış ve üretim süreci deneysel olarak yürütülmüştür. Yüksek sıcaklık ve oksidatif ortam koşullarına uygunluğu bilinen Inconel 625 malzemesi, bu çalışma ile WAAM sürecine entegre edilerek üç boyutlu bir türbin kanadı formunda şekillendirilmiştir.

Tasarlanan türbin kanadı profili için NACA 2412 profili tercih edilmiştir. NACA 2412 profili %2 kamburluk ve %12 kalınlığa sahip klasik bir profil olarak birçok aerodinamik deney ve sayısal çalışmada kullanılmıştır. Bu sayede profil koordinatları, basınç dağılımı ve kaldırma/sürükleme verileri literatürde geniş biçimde bulunmaktadır. Tel ark eklemeli imalat teknolojisi, çok ince geometri detaylarının (özellikle <2mm kalınlığındaki arka kenar gibi) üretilmesinde sınırlı kalabilmektedir. NACA 2412 profilinin close trailing edge (kapalı arka kenar) opsiyonu, arka kenar kalınlığının birkaç milimetre düzeyine çıkmasına olanak sağlar ve bu boyutlar WAAM süreç parametreleriyle uyumludur. Böylece, kritik bir bölge olan trailing edge'de katı kurulum gerektirmeden üretim yapılabilmiştir.

Bu tezde aerodinamik optimizasyondan ziyade “WAAM ile türbin kanadı üretilbilirliğini göstermek” hedeflenmiştir. Bu bağlamda, kapsamlı rüzgâr tüneli ya da CFD analizlerini gerektiren yüksek performanslı profiller yerine, deneysel üretim ve malzeme davranışının ön planda olduğu standart bir profil seçilmiştir.

Üretim sırasında uygulanan segment bazlı parametre stratejisi, katmanlar arası geometrik sürekliliği ve kaynak havuzu kararlılığını desteklemiştir. Özellikle AE segmentinde düşürülen kaynak akımı, belirlenen krater ve postflow süreleri ile son katman geometrisinin dengeli şekilde sonlanmasına katkı sağlamıştır. Ayrıca, katman geçişlerinde uygulanan 3 dakikalık bekleme süresi, birikimli ısıl gerilmelerin azaltılmasına yardımcı olmuş ve termal dengeyi koruyarak üretim kalitesine olumlu katkı sunmuştur.

Üretimde kullanılan OTC marka MIG-2 DC kaynak makinesinin low spatter modu sayesinde kaynak sırasında minimum sıçrama elde edilmiş, bu da yüzey kalitesini olumlu yönde etkilemiştir. Synchro Feed sisteminin bütünleşerek kullanılmasıyla tel sürme ve akım senkronizasyonu optimize edilmiş, kaynak havuzu kontrolü geliştirilmiştir. Bu özellikler, WAAM süreçlerinde yüksek hassasiyet ve işlem kararlılığı açısından belirleyici avantajlar sağlamıştır.

Üretim süreci boyunca yapılan teknik gözlemler, katman birleştirme bölgelerinde tutarlı bir eriyik transferi sağlandığını, kaynak telinin kontrollü biçimde aktarıldığını ve parçanın genel geometrisinin başarıyla oluşturulduğunu ortaya koymuştur. Ancak, üretim sonrası süreçlerde geometrik doğrulama, yüzey pürüzlülüğü analizi veya mikroyapısal karakterizasyon gibi ölçümsel testler uygulanamamıştır. Bu nedenle değerlendirme, yalnızca gözlemsel veriler üzerinden yapılmış ve kalite kriterleri niteliksel olarak tanımlanmıştır.

Sonuç olarak, elde edilen bulgular WAAM yönteminin yüksek sıcaklık uygulamaları için karmaşık geometriye sahip parçaların üretiminde potansiyel bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Literatürde yer alan ve Oak Ridge National Laboratory (ORNL) gibi kurumlarca yürütülen benzer çalışmalar da bu yöntemin endüstriyel düzeyde uygulanabilirliğini desteklemektedir. Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla WAAM, üretim esnekliği, malzeme verimliliği ve daha kısa üretim süreleri gibi avantajları ile dikkat çekmektedir.

Gelecekteki çalışmalar kapsamında, NACA 6412 kanat profili %6 kamburluk ve %12 kalınlığa sahip olup, NACA 2412 kanat profiline kıyasla daha yüksek kavis oluşturur. Daha yüksek kamburluk, özellikle düşük hücum açılarında kaldırma katsayısını yükselterek verim artışı sağlayabilir. Yüzeyde daha dengeli bir basınç profili oluşturarak türbülans kaynaklı titreşim ve gürültü seviyelerini azaltabilir. NACA 6412 gibi yüksek kamburluk seviyesine sahip profillerin hem CFD (Computational Fluid Dynamics) hem de deneysel rüzgâr tünelleri analizleri değerlendirilebilir ve böylece tel ark eklemeli imalat ile yüksek performanslı profillerin gerçek üretilebilirliği ve aerodinamik davranışı ile ortaya konabilir. WAAM yöntemiyle üretilen parçaların yüzey kalitesinin nicel olarak değerlendirilebilmesi amacıyla yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, üretim sonrası parçaların geometrik doğruluğunun belirlenmesi için hassas ölçüm sistemleriyle detaylı analizler yapılması önem arz

etmektedir. Üretim süreçlerinin daha derinlemesine anlaşılması ve malzeme performansının doğrulanabilmesi adına, elde edilen numunelerin mikroyapı ve faz dağılımı açısından incelenmesi de gereklidir. Tüm bu analizlerin yanı sıra, kullanılan üretim parametrelerinin sistematik bir şekilde optimize edilmesiyle, üretim sürecinin tekrarlanabilirliği ve kararlılığı artırılarak endüstriyel uygulamalar için daha güvenilir sonuçlar elde edilebilir.



KAYNAKÇA

- 3DPrint*. 2021. <https://3dprint.com/197302/siemens-asme-award-blades/>.
- Abbott, ve Doenhoff. *Theory of Wing Sections*. New York: Dover Publications, INC., 1959.
- Airfoil Tools*. 2025. <http://airfoiltools.com/index>.
- Aktürk, ve Korkmaz. «Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Alüminyum Alaşımlarının Malzeme Yapısal Parametrelerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Derleme.» *Manufacturing Technologies and Applications*, 2021: 49-60.
- American Society of Mechanical Engineers. 2017. https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/resourcefiles/aboutasme/news%20media/first-3d-printed-gas-turbine-blades_siemens.pdf.
- Arti90. 2024. <https://arti90.com/tr/eklemeli-imalat-avantajlari/>.
- Atatürk Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi. *Makine ve Teçhizat*. Erzurum: Atatürk Üniversitesi Yayınları, 2019.
- Ayan, ve Kahraman. «Metal Eklemeli İmalat: Tel Ark Yöntemi ve Uygulamaları.» *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2018: 74-84.
- Aydın. «Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının havacılıktaki uygulamaları.» *Journal of Aviation Studies and Management*, 3(2), 2022: 93-101.
- Başekin, ve Selver. «NACA 2412 uçak kanadının aerodinamik parametrelerinin araştırılması, 12(2).» *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2023: 566-580.
- Bol. «Eklemeli imalatta proses parametrelerinin yapay zeka yöntemleri ile tahmini.» *Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi*, 2023.
- Bölükbaşı, Serindağ, Gürol, Günen, ve Çam. «Improving oxidation resistance of wire arc additive manufactured Inconel 625 Ni-based superalloy by pack aluminizing.» *Surface & Coatings Technology*, 2023: 475.
- Ceritbinmez, Günen, Gürol, ve Çam. «Dövme ve Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilmiş Inconel 625 Alaşımların Termal Yöntemle Hızlı Delinmesinde Elektrot Aşınmasının İncelenmesi.» *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 2023: 89-99.
- . «A comparative study on drillability of Inconel 625 alloy fabricated by wire arc additive manufacturing.» *Journal of Manufacturing Processes*, 89, 2023: 150–169.
- Cotteleer, ve Joyce. «3D opportunity – additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth.» *Deloitte Rev.*, vol. 14., 2014.

- Çam. «Tel ark eklemeli imalat (WAAM) ile alüminyum parça üretme olasılıkları.» *Materials Today: Proceedings*, 2022: 77–85.
- Çam, ve Günen. «Yönlendirilmiş enerji biriktirme prosesleriyle magnezyum parçalarının üretiminde karşılaşılan zorluklar ve fırsatlar.» *Magnezyum ve Alaşımları Dergisi*, 2024: 1663–1686.
- Çelik. «Makine ve Techizat Ünite 5.» *Makine ve Techizat Ünitesi [Ders notları]*. 2016. https://abs.cu.edu.tr/Dokumanlar/2016/432166255_makine-ve-techizat-unite-5-www.isgbolumu.com_.pdf.
- Çengel, ve Boles. *Thermodynamics: An Engineering Approach (9th ed.)* içinde, yazar Boles Çengel, 229. 2015.
- Çolak. *Talaşlı İmalat Yöntemleri*. Seçkin Yayıncılık, 2014.
- Dağyikan, Gürol, ve Koçak. «Characterization and fracture toughness evaluation of the thick-walled wire arc additively manufactured low alloy steels.» *Welding in the World*, 67, 2023: 1009–1019.
- Dassault Systèmes. *What is Solidworks 3D CAD?* ty. <https://www.solidworks.com/product/solidworks-3d-cad>.
- Dedeakayoğulları, ve Kaçal. «Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Kullanılan Talaşlı İmalat Yöntemleri.» *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2020: 1-12.
- Endustri40. *Siemens'in ilk 3D baskıyla üretilen türbin kanatlarına Amerika'dan ödül.* *Endustri40.com*. 2017. <https://endustri40.com/siemensin-ilk-3d-baskıyla-uretilen-turbin-kanatlarına-amerikadan-odul/>.
- Energy Focus. *Siemens achieves breakthrough with 3D printed gas turbine blades.* *Energy-Focus.net*. 2021. <https://www.energy-focus.net/siemens-achieves-breakthrough-with-3d-printed-gas-turbine-blades/>.
- Enerji Günlüğü. *Siemens 3D yazıcı ile gaz türbini kanatları üretti.* *EnerjiGunlugu.net*. 2018. <https://www.enerjigunlugu.net/siemens-3d-yazıcı-ile-gaz-turbini-kanatları-uretti-21940h.htm>.
- Engineering.com*. 18 Aralık 2023. <https://www.engineering.com/ornl-3d-prints-metal-steam-turbine-blades-for-power-plants/>.
- Frazier. «Metal Additive Manufacturing: A Review.» *J. of Materi Eng and Perform* 23, 2014: 1917–1928.
- Gartner. *3printr*. 13 Aralık 2023. <https://www.3printr.com/us-researchers-3d-print-metal-steam-turbine-blade-for-power-generation-0467614/>.
- Gedik*. 30 Mart 2023. <https://gedik.com.tr/blog/eklemeli-imalat-waam-nedir>.
- Gefertec GmbH. *Over 1,000 turbine blades already produced with Gefertec's Wire Arc Additive Manufacturing.* *Metal Additive Manufacturing*. 2025. <https://www.metal-am.com/over-1000-turbine-blades-already-produced-with-gefertecs-wire-arc-additive-manufacturing/>.
- Groover. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems (7th ed.)*. Wiley, 2020.
- Güler, Serindağ, ve Çam. «Tel Ark Eklemeli İmalat: Son Gelişmeler ve Değerlendirmeler.» *Mühendis ve Makina Dergisi*, 2022: 82-116.

- Gülmez. «Modern İmalatın Prensipleri.» İTÜ. tarih yok.
<https://web.itu.edu.tr/gulmezt/IMAL%20USULLERI/ch22-Talasi%20Imalat%20Yontemleri.pdf>.
- Günay. *İmal Usulleri*. Nobel Yayıncılık, 2009.
- Günen, Gürol, Koçak, ve Çam. «Investigation into the influence of boronizing on the wear behavior of additively manufactured Inconel 625 alloy at elevated temperature.» *Progress in Additive Manufacturing*, 2023.
- Gürol. *Robotik Tel Ark Eklemeli İmalat (WAAM) ile Çok Malzemeli Bileşenlerin Geliştirilmesi*. 2023. <https://tkta.org.tr/eklemeli-imalat-teknolojileri/robotik-tel-ark-eklemeli-imalat-waam-ile-cok-malzemeli-bilesenlerin-gelistirilmesi>.
- Gürol, Turgut, Kumek, Dilibal, ve Koçak. «Fabrication and Characterization of Wire Arc Additively Manufactured.» *Metals and Materials International (2024) vol: 30*, 2024: 1342–1355.
- Kalpajian, ve Schmid. *Manufacturing engineering and technology (7th ed.)*. Pearson Education, 2014.
- Kerbrat, Mognol, ve Hascoët. «A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing.» *arXiv preprint arXiv:1106.3176*, 2011.
- Kirka. *Oak Ridge National Laboratory*. 2024. <https://www.ornl.gov/news/metal-steam-turbine-blade-shows-cutting-edge-potential-critical-large-3d-printed-parts>.
- Kulikoy, Nebyshinets, Sidorova, ve Balanovskii. «3D printing technology for metal products: From an automatic design system to a real part.» *Proc. ISTU 2020, 24*, ty: 728–739.
- Kulkarni. *ornl.gov*. 2023. <https://www.ornl.gov/news/metal-steam-turbine-blade-shows-cutting-edge-potential-critical-large-3d-printed-parts>.
- Lu, et al. «Multi-Robot Scan-n-Print for Wire Arc Additive Manufacturing.» *ASME Letters Trans. Robotics*, 2025.
- McAndrew, et al. «Interpass rolling of Ti–6Al–4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement.» *Additive Manufacturing*, 2018: 340–349.
- . «The effect of interpass deformation on microstructure and mechanical properties of wire and arc additively manufactured Ti-6Al-4V.» *Materials Science and Engineering: A*, 2016: 644–652.
- Messler. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. Wiley-Interscience, 2004.
- Metal-AM. 2021. https://www.metal-am.com/siemens-additive-manufacturing-enables-advanced-turbine-blade-repair-and-upgrade/?utm_source=chatgpt.com.
- Oak Ridge National Laboratory - ORNL*. Aralık 2023. <https://www.ornl.gov/news/metal-steam-turbine-blade-shows-cutting-edge-potential-critical-large-3d-printed-parts>.

- Özsolak. «Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler.» *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3(1), 2019: 9-14.
- Öztürk, Bölükbaşı, Gürol, Günen, ve Çam. «Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by cold metal transfer wire arc additive manufacturing (CMT-WAAM).» *Materials Today Communications*, 2024: 42,.
- Radhika, Shanmugam, ve Ramoni. «A Review on Additive Manufacturing for Aerospace Application.» *Materials Research Express*, 2024: 2001.
- Reed. *The superalloys: Fundamentals and applications*. Cambridge University Press., 2006.
- Roboweld. *roboweld.com.tr*. ty. <https://roboweld.com.tr/product/fd-b6l/>.
- Rosato. *Plastic Product Material and Process Selection Handbook*. Elsevier, 2004.
- Selçuk, ve Durak. «Eklemeli İmalat Ve Geleneksel Yöntemle İmal Edilmiş Titanyum Alaşımli Malzemenin Abrazif Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi.» *Journal of Engineering Sciences and Design*, 2023: 660-670.
- Siemens. *Siemens Press*. 2019. <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-and-edag-cooperate-projects-industrial-application-additive-manufacturing>.
- Singh, Jinoop, Tarun Kumar, Palani, Paul, ve Prashanth. «Effect of interlayer delay on the microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufactured wall structures.» *Materials*, 14(15), 2021: 4187.
- Special Metals Corporation. «Inconel® alloy 625 [Technical bulletin].» ty. <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf>.
- Sword, Galloway, ve Toumpis. «Analysis of environmental impact and mechanical properties of Inconel 625 produced using wire arc additive manufacturing.» *Sustainability*, 16(10), tarih yok: 4178.
- Turgut, Gürol, Dilibal, Baykal, Kümek, ve Koçak. «Manufacturing and Characterization of Waam-Based Bimetallic Cutting Equipment.» *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 6(3), 2022: 548-555.
- Turgut, Gürol, ve Onler. «Effect of interlayer dwell time on output quality in wire arc additive manufacturing of low carbon low alloy steel components.» *Int J Adv Manuf Technol* 126, 2023: 5277–5288.
- TÜBİTAK MAM. 2014. <https://mam.tubitak.gov.tr/tr/haber/turkiyede-ilk-kez-uretilen-buhar-turbin-kanatlari-yenikoy-termik-santraline-teslim-edildi>.
- UltiMaker. ty. <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>.
- Varzene Metal SAN. ve TİC. A.Ş. *varzene*. ty. [https://www.varzene.com/pdfs/Alloy%20625%20\(2.4856\).pdf](https://www.varzene.com/pdfs/Alloy%20625%20(2.4856).pdf).
- Vidal, Shigapov, ve Nguyen. «Wire Arc Additive Manufacturing with Robotic GMAW.» *WELD Magazine*, 2022.
- Wu, Pan, ve Ding. «A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement.» *J Manuf Process*, vol. 35, 2018: 127-139.

Yangfan, Chen, ve Su. «Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing.» *Surface and Coatings Technology*, 374,, 2019: 116–123.

Yılmaz. «Türbin teknolojilerinde malzeme seçim kriterleri.» *Makine Teknolojileri Dergisi*, 19(3), 2022: 45-54.

