

**T.C.  
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TEL ARK EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLMİŞ  
NUMUNELERİN TRİBOLOJİK PERFORMANSININ  
İNCELENMESİ**

**BAKİ BERKAY UĞUZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ RECEP ÖNLER**

**ŞUBAT 2025**

**T.C.  
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TEL ARK EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLMİŞ  
NUMUNELERİN TRİBOLOJİK PERFORMANSININ  
İNCELENMESİ**

**BAKİ BERKAY UĞUZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ RECEP ÖNLER**

**ŞUBAT 2025**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL**

**INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL  
PERFORMANCE OF WIRE ARC ADDITIVE  
MANUFACTURED COMPONENTS**

**BAKİ BERKAY UĞUZ**

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**ADVISOR: ASSIST. PROF. DR. RECEP ÖNLER**

**FEBRUARY 2025**

## YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 10/02/2025 tarih ve 2025/10 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 28/02/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Baki Berkay UĞUZ'un tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Recep ÖNLER

ÜYE

: Prof. Dr. Fevzi BEDİR

ÜYE

: Doç. Dr. Fevzi Çakmak BOLAT

### ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun  
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR



*Aileme*

## ÖZET

Tel Ark Eklemeli İmalat (TAEİ), yüksek üretim hızı, uygulama kolaylığı ve büyük üretim hacmi gibi öne çıkan özellikleri dolayısıyla son yıllarda birçok sektörde daha yaygın hale gelmektedir. Özellikle korozyon dayanımının önemli olduğu birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelikler TEAİ yöntemi ile de yaygın olarak işlenmektedir. Kaynak ile önemli benzerlikler içeren TEAİ yönteminde mevcut durumda ticari olarak ulaşılabilen kaynak telleri ana malzemeyi teşkil etmektedir. Ancak bu kaynak telleri gerek kaynaklanabilirlik gerekse kaynak bölgesinden beklenen özellikler dikkate alınarak kaynakla birleştirilecek malzemelerden farklı kompozisyonlara sahip olabilmektedir. Ayrıca kaynak esnasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklar kompozisyondaki alaşım elementlerinin oranında değişikliklere sebep olabilmektedir. Bu çalışmada 4 farklı paslanmaz çelik tel ( SS307 SS308, SS309, SS316L) kullanılarak TAEİ ile üretilmiş parçaların tribolojik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla, aynı şartlarla TAEİ ile üretilmiş östenitik paslanmaz çelik duvarlardan elde edilen numuneler önce spektrometre ile kompozisyon analizine tabi tutulmuştur. Numunelerin hem kesit hem de yan yüzeylerinden sertlik ölçümleri Vickers sertlik yöntemi ile ölçülmüştür. Daha sonra bütün numuneler aynı şartlar altında bir resiprokal tribometre ile test edilmiş, sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Numuneler ayrıca 400 °C’de bir saat süreyle gerilim giderme tavlamasına tabi tutulmuş, tavlama sonrasında tekrar sertlik davranışları ve tribolojik performansları izlenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda TAEİ işlemi sonrasında numunelerin kimyasal kompozisyonunda farklılaşmalar olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca incelenen numunelerin hepsinde ısıl işlemin tribolojik özelliklere ve sertlik değerlerine etki ettiği gözlemlenmiştir. Bu işlemlerin sonucundan ısıl işlem öncesi ve sonrası olmak üzere karşılaştırmalar ve tartışmalar yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler: Tel ark eklemeli imalat, eklemeli imalat, triboloji, paslanmaz çelik, gerilim giderme tavlaması**

## ABSTRACT

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) has become more widespread in many industries in recent years due to its prominent features, such as high production speed, ease of application, and large production volumes. Stainless steels, commonly used in many engineering applications where corrosion resistance is critical, are also widely processed using the WAAM method. In the WAAM process, which shares significant similarities with welding, commercially available welding wires currently constitute the base material. However, these welding wires may have different compositions than the materials they are intended to join, considering weldability and the expected properties of the welded region. Additionally, the high temperatures generated during the welding process can lead to changes in the proportions of alloying elements in the composition.

In this study, the tribological properties of parts produced by WAAM using four different stainless steel wires (SS307, SS308, SS309, SS316L) were comparatively investigated. For this purpose, samples obtained from austenitic stainless steel walls produced under identical conditions using WAAM were first subjected to composition analysis using a spectrometer. Hardness measurements were conducted on both the cross-sections and side surfaces of the samples using the Vickers hardness method. Subsequently, all samples were tested under identical conditions using a reciprocating tribometer to examine their friction and wear behaviors. The samples were also subjected to stress-relief annealing at 400 °C for one hour, and their hardness behaviors and tribological performances were re-evaluated after annealing.

The examinations revealed changes in the chemical composition of the samples after the WAAM process. Additionally, it was observed that heat treatment influenced the tribological properties and hardness values of all the samples studied. Comparisons and discussions have been made regarding the results before and after the heat treatment.

**Keywords: Wire arc additive manufacturing, additive manufacturing, tribology, stainless steel, stress relief annealing**

## TEŞEKKÜR

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

Bu tez çalıőmasında bilgi, birikim ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, karşılaőtığım zorluklarda sabrı ve tecrübesiyle her aşamada bana destek olan saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Recep ÖNLER'e çok teşekkür ederim.

Tel Ark Eklemeli İmalat numunelerinin temininde yardımcı olan hocam Doç. Dr. Uęur GÜROL'a, numunelerin üretimini yapan Gedik Kaynak firmasına teşekkür ederim.



# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	1
1.1.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri	1
1.1.1.1. Fotopolimerizasyon	2
1.1.1.2. Malzeme Ekstrüzyonu (ME)	3
1.1.1.3. Malzeme Püskürtme (MJ)	4
1.1.1.4. Bağlayıcı Püskürtme (BJ)	5
1.1.1.5. Toz Yatak Füzyonu	6
1.1.1.6. Levha Laminasyonu	7
1.1.1.7. Doğrudan Enerji Depozisyonu	8
1.1.1.7.1. Lazer Işını	9
1.1.1.7.2. Elektron Işını	10
1.1.1.7.3. Plazma	10
1.1.1.7.4. Elektrik Arkı	10
1.1.1.7.5. Toz Soğuk Püskürtme	10
2. TEL ARK EKLEMELİ İMALAT (TAEİ) YÖNTEMİ	11
2.1. Tel Ark Ekelemlı İmalat'ın Avantajları ve Dezavantajları	11
2.2. Tel Ark Eklemeli İmalat'ın Uygulama Alanları	12
3. TRİBOLOJİ	14
3.1. Tel Ark Eklemeli İmalatta Tribolojik Özellikler	14
3.1.1. Mikro Yapı ve Malzeme Özellikleri	14
3.1.2. Sertlik ve Aşınma Direnci	14
3.1.3. Sürtünme Katsayısı	15
3.1.4. Isıl Gerilmeler ve Çatlaklar	15
3.1.5. Yağlama	15
4. ISIL İŞLEM	16
4.1. Gerilim Giderme Tavlaması	16
5. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR	18
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
6.1. Üretim ve Malzemeler	23
6.2. Yapılan Deneyler	24
6.2.1. Vickers Sertlik Deneyi	24
6.2.2. Sürtünme ve Aşınma Testi	25
6.2.3. Gerilim Giderme Tavlaması	27
7. BULGULAR	29
7.1. Vickers Sertlik Testi Sonuçları	29
7.2. Sürtünme ve Aşınma Testi Sonuçları	35

7.3. Yüzey Analiz Sonuçları	44
8. SONUÇLAR	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	55
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR	56



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: Sıcaklık birimi (Celsius)
<i>N</i>	: Kuvvet birimi (Newton)
<i>m</i>	: Uzunluk birimi (Metre)
<i>mm</i>	: Uzunluk birimi (Milimetre)
<i>g</i>	: Kütle birimi (Gram)
SiC	: Silisyum Karbür
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyum Oksit
Cr	: Krom
Ni	: Nikel
Mo	: Molibden
Mn	: Manganez
TAEİ	: Tel Ark Eklemeli İmalat
SS	: Paslanmaz Çelik
WAAM	: Wire Arc Additive Manufacturing (Tel Ark Eklemeli İmalat)
ASTM	: Amerikan Malzeme ve Testler Derneği
SLA	: Stereolitografi
DLP	: Dijital Işık İşleme
2PP	: İki Fotonlu Polimerizasyon
ME	: Malzeme Ekstrüzyonu
MJ	: Malzeme Jetleme
BJ	: Bağlayıcı Püskürtme
DED	: Doğrudan Enerji Depozisyonu
LOM	: Laminat Obje İmalatı
MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
3D	: Üç Boyutlu
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
TIG	: Tungsten İnert Gaz
MIG	: Metal İnert Gaz
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
CMT	: Soğuk Metal Transfer

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Şekil 1.1:</b> Eklemeli imalat yöntemleri.	2
<b>Şekil 1.2:</b> Fotopolimerizasyon yöntemleri.	3
<b>Şekil 1.3:</b> Ekstrüzyon tabanlı eklemeli imalat için farklı tipler ve yaklaşımlar.	4
<b>Şekil 1.4:</b> Mürekkep püskürtmeli malzeme püskürtme.	5
<b>Şekil 1.5:</b> BJ Teknolojisinin çalışma prensibi.	6
<b>Şekil 1.6:</b> Toz yatak füzyonun çalışma prensibi.	7
<b>Şekil 1.7:</b> Levha laminasyonu.	8
<b>Şekil 1.8:</b> DED'in çalışma prensibi.	9
<b>Şekil 1.9:</b> DED yönteminin enerji kaynakları	9
<b>Şekil 2.1:</b> Tel ark eklemeli imalatının çalışma prensibi.	11
<b>Şekil 6.1:</b> Numunelerin hem kesit (A) hemde yanal yüzeyi (B).	24
<b>Şekil 6.2:</b> Instron Wolpert 2100 serisi sertlik ölçüm cihazı.	25
<b>Şekil 6.3:</b> CSM Tribometer TRN 18-323 Aşınma testi cihazı.	26
<b>Şekil 6.4:</b> Veeco Dektak 8 Yüzey profilometre cihazı.	26
<b>Şekil 6.5:</b> Protherm PLF 120/15 laboratuvar fırını.	28
<b>Şekil 7.1:</b> 316L Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ortalama ve standart sapma değerleri.	30
<b>Şekil 7.2:</b> 316L Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ısıtılma işlem öncesi ve sonrası değerleri.	30
<b>Şekil 7.3:</b> 309 Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ortalama ve standart sapma değerleri.	31
<b>Şekil 7.4:</b> 309 Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ısıtılma işlem öncesi ve sonrası değerleri.	31
<b>Şekil 7.5:</b> 308 Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ortalama ve standart sapma değerleri.	33
<b>Şekil 7.6:</b> 308 Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ısıtılma işlem öncesi ve sonrası değerleri.	33
<b>Şekil 7.7:</b> 307 Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ortalama ve standart sapma değerleri.	34
<b>Şekil 7.8:</b> 307 Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ısıtılma işlem öncesi ve sonrası değerleri.	34
<b>Şekil 7.9:</b> 316L Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki yatay ve dikeydeki sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıtılma işlem öncesi ve sonrası değerleri.	36
<b>Şekil 7.10:</b> 316L Paslanmaz çeliğinin B yüzeyindeki yatay ve dikeydeki sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıtılma işlem öncesi ve sonrası değerleri.	36
<b>Şekil 7.11:</b> 316L Paslanmaz sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçları.	37
<b>Şekil 7.12:</b> 309 Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki yatay ve dikeydeki sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıtılma işlem öncesi ve sonrası değerleri.	38
<b>Şekil 7.13:</b> 309 Paslanmaz çeliğinin B yüzeyindeki yatay ve dikeydeki sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıtılma işlem öncesi ve sonrası değerleri.	38

<b>Şekil 7.14:</b> 309 Paslanmaz çeliğinin sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçları.	39
<b>Şekil 7.15:</b> 308 Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki yatay ve dikeydeki sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıtıl işlem öncesi ve sonrası değerleri.	40
<b>Şekil 7.16:</b> 308 Paslanmaz çeliğinin B yüzeyindeki yatay ve dikeydeki sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıtıl işlem öncesi ve sonrası değerleri.	40
<b>Şekil 7.17:</b> 308 Paslanmaz çeliğinin sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçları.	41
<b>Şekil 7.18:</b> 307 Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki yatay ve dikeydeki sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıtıl işlem öncesi ve sonrası değerleri.	42
<b>Şekil 7.19:</b> 307 Paslanmaz çeliğinin sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçları.	43
<b>Şekil 7.20:</b> 316L Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.	44
<b>Şekil 7.21:</b> 316L Paslanmaz çeliğinin B yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.	44
<b>Şekil 7.22:</b> 309 Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.	45
<b>Şekil 7.23:</b> 309 Paslanmaz çeliğinin B yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.	45
<b>Şekil 7.24:</b> 308 Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.	46
<b>Şekil 7.25:</b> 308 Paslanmaz çeliğinin B yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.	46
<b>Şekil 7.26:</b> 307 Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.	47
<b>Şekil 8.1:</b> Numune üzerinde yapılan işlemler	49

## TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 6.1:</b> Malzeme Kompozisyonu .	23
<b>Tablo 6.2:</b> Üretim Parametreleri.	23
<b>Tablo 7.1:</b> 316L ve 309 Paslanmaz çeliklerinin sertlik testi sonuçları.	29
<b>Tablo 7.2:</b> 308 ve 307 Paslanmaz çeliklerinin sertlik testi sonuçları.	32
<b>Tablo 7.3:</b> Paslanmaz çeliklerin (316L,309,308,307) sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçları.	35



# 1. GİRİŞ

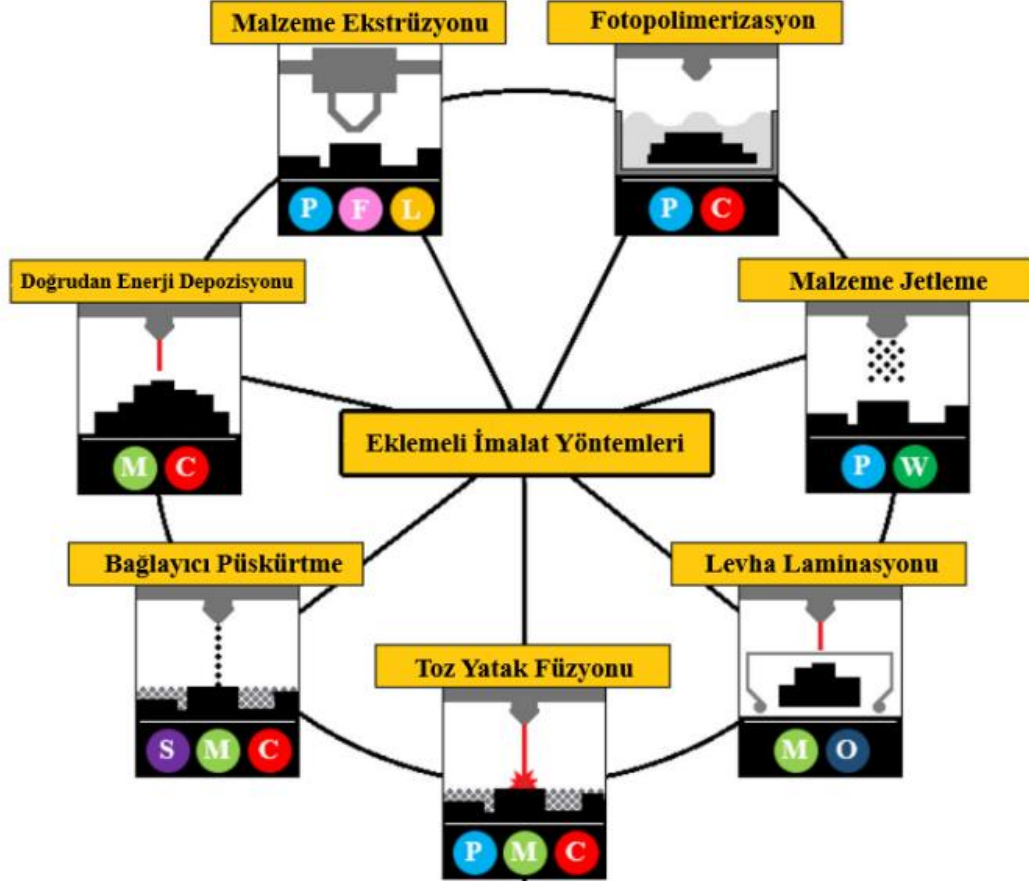
Teknolojik gelişmeler, üretim metotlarının sürekli yenilenmesi ve iyileştirilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda eklemeli imalat, geleneksel yönetim metotlarının önüne geçerek tasarım ve üretim süreçlerine yenilikçi bir bakış açısı kazandırmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinin en önemli avantajları içerisinde malzeme tasarrufu, hızlı üretim, tasarım kolaylığı, kompleks geometrilerin üretebilmesi yer almaktadır. Özellikle otomotiv, havacılık, inşaat ve tıp gibi sektörlerde ön plana çıkmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinden TAEİ, diğer eklemeli imalat yöntemleriyle karşılaştırıldığında yüksek üretim hızı ve düşük maliyetlere sahiptir. TAEİ, elektrik ark kaynağı prensibi ile tel şeklindeki malzemeyi katman katman biriktirerek istenilen yapının üretilmesidir. Büyük ve kompleks metal yapıların üretiminde etkin bir çözüm sunarak malzeme verimliliği kazandırmaktadır. Paslanmaz çelik, TAEİ yöntemi için önemli bir malzeme seçeneği olarak ön plana çıkmaktadır. Yüksek korozyon direnci, mekanik dayanım ve ısıya karşı mukavemeti sebebiyle birçok endüstride tercih edilmektedir. TAEİ ile paslanmaz çelik kullanımı, özellikle ağır yük taşıyan veya zorlu çevre koşullarına maruz kalan yapıların üretiminde büyük avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, tel şeklinde bulunabilen paslanmaz çelik malzemeler, TAEİ işlemlerinde kolayca entegre edilebilir ve yüksek kaliteli, homojen yapılar üretilebilir. Bu çalışmada, paslanmaz çelik malzemelerin tel ark eklemeli imalat yönteminde kullanım potansiyelini görebilmek amacıyla tribolojik performans değerlendirilmesi yapılmaktadır.

## 1.1. Literatür Özeti

### 1.1.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM International)'na göre eklemeli imalat, 3B model verilerinden genellikle katman katman malzemeleri birleştirerek nesnelere oluşturma işlemidir. Bu işlem, eksiltici imalat yöntemlerine karşıt olarak uygulanır [1].

Birden fazla eklemeli imalat prosesi günümüzde aktif olarak kullanılmakta. Bu yöntemler malzemelerin katman katman birleştirilmesi, parça oluşturma ve bazı çalışma yöntemleri olarak farklılık göstermektedir. Bu yöntemler şekil 1.1'de verilmiştir.

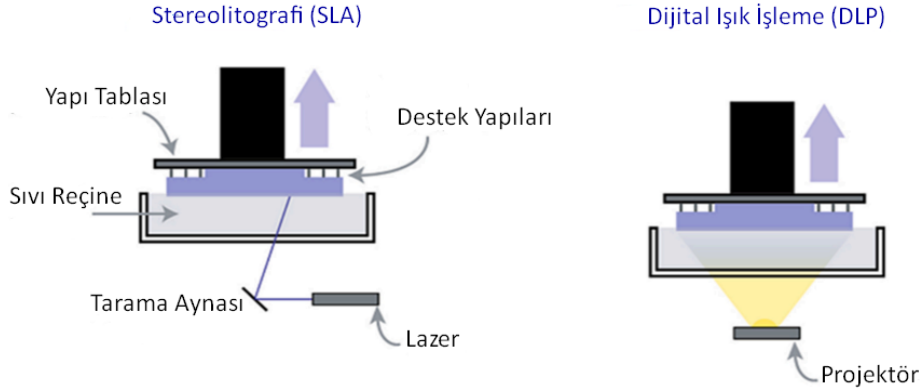


Şekil 1.1: Eklemeli imalat yöntemleri.

### 1.1.1.1. Fotopolimerizasyon

Fotopolimerizasyon prosesi, kontrollü bir ortamda ışığa veya radyasyona maruz bırakılan ışığa karşı hassas malzemelerin polimerize edilmiş katmanlar elde edildiği eklemeli imalat yöntemidir [2]. Katman katman birleştirilerek üç boyutlu bir parça oluşturulur. Ancak bu prosenin uygulanabilirliği, ışığa maruz bırakıldığında polimerleşen malzemelerle sınırlıdır. Bu yöntemle reçineler ve fotopolimerler işlenebilir. Sertleştirme (kürleme) tipine bağlı, fotopolimerizasyon yöntemleri şu

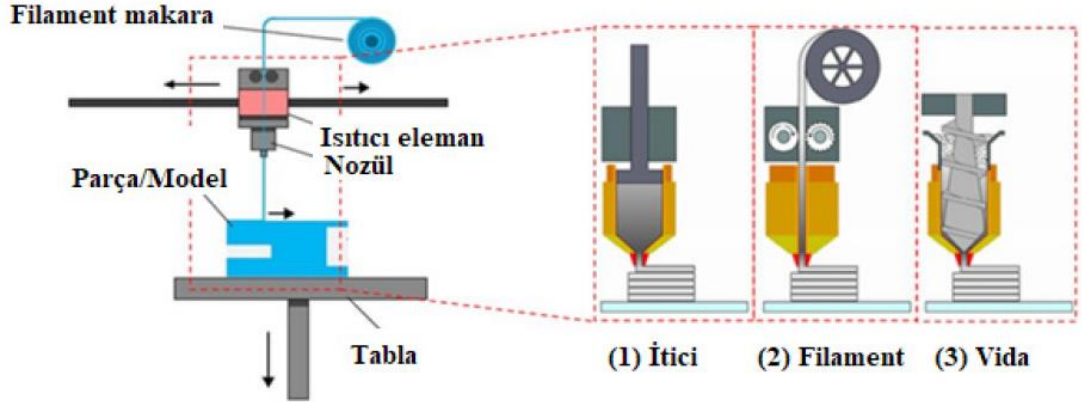
şekilde sınıflandırılabilir. Stereolitografi (SLA), dijital ışık işleme (DLP), iki fotonlu polimerizasyon (2PP) ve hacimsel 3D baskı olmak üzere dörde ayrılır [2]. Şekil 1.2’de fotopolimerizasyon yöntemlerinden bazıları verilmiştir.



Şekil 1.2: Fotopolimerizasyon yöntemleri [2].

### 1.1.1.2. Malzeme Ekstrüzyon (ME)

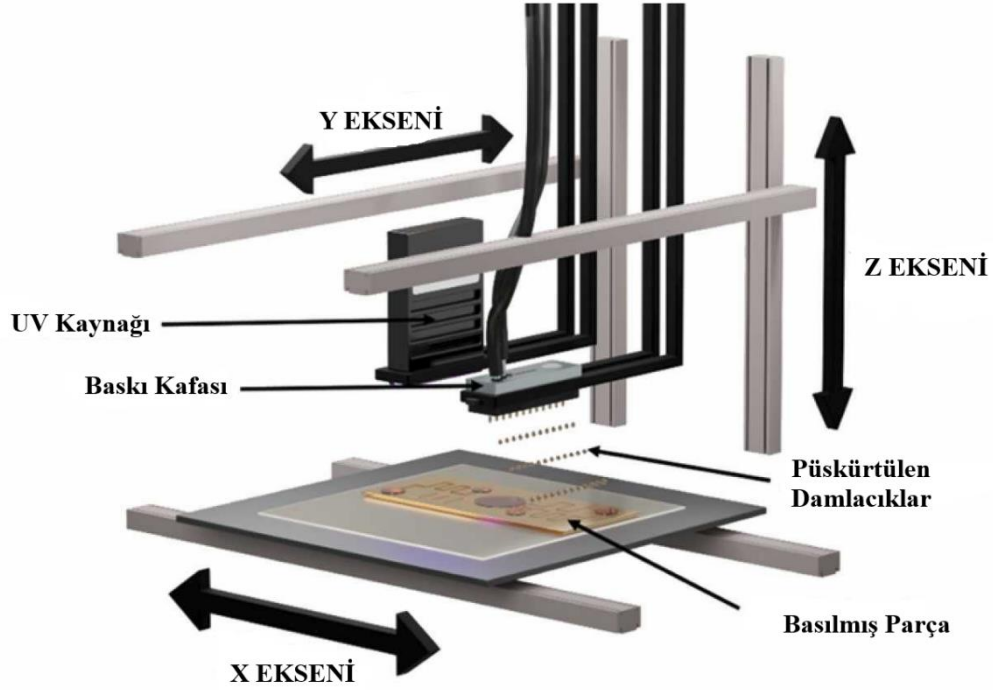
Bir malzemenin ısıtılarak, baskı uygulanarak veya yumuşatılarak bir nozul veya buna benzer bir delikten itilmesi vasıtasıyla malzemenin katman katman birleştirilerek üç boyutlu parça oluşturulmasıdır. En yaygın kullanılan eklemeli imalat yöntemleri arasında bulunmasının sebepleri ME’de kullanılan cihazların sabit çalışabilmesi ve maliyet giderlerinin ucuz olmasıdır. Bu sebeple, ME’nin temel avantajı prototiplerin ekonomik ve hızlı üretilmesidir. Diğer eklemeli imalat yöntemlerinden farklı olarak, malzeme ekstrüzyonlu imalat yöntemi çok malzemeli üretim için uygundur. ME’de genellikle tek bir ekstrüzyon kafası bulunur ancak çoklu üretimler için birden fazla ekstrüzyon kafası ekleme opsiyonu da mevcuttur. Bu da onu diğer yöntemlerden ön plana çıkmasında rol sağlamaktadır [3]. Şekil 1.3’de ekstrüzyon tabanlı eklemeli imalat için farklı tipler ve yaklaşımlar verilmiştir.



Şekil 1.3: Ekstrüzyon tabanlı eklemeli imalat için farklı tipler ve yaklaşımlar [3].

### 1.1.1.3. Malzeme Püskürtme (MJ)

Malzeme püskürtme, çoklu malzeme basımı, maliyeti ve yüksek üretim hacmi sayesinde endüstriyel ve bilimsel pazarda ön plana çıkan rekabetçi ve önemli bir imalat yöntemidir. Malzeme püskürtme, basılı parçaların yüze doku hassasiyeti ve ölçeği bakımından, diğer eklemeli imalat yöntemlerini geride bırakmaktadır. Bu yöntem mürekkep püskürtme teknolojisine bağlı üç boyutlu parçalar üretir. Bu sebeple malzeme püskürtme, mürekkep püskürtme baskısı veya üç boyutlu mürekkep püskürtme baskısı olarak da adlandırılır. Bu teknoloji, birden fazla malzemeyi aynı anda yazdırabilme kapasitesi sahip olması nedeniyle karmaşık sistemleri katman katman üretmeyi mümkün kılan bir potansiyele sahiptir. Baskı işlemleri, çok sayıda nozul aracılığı ile mürekkep damlalarını bir alt tabaka üzerine hassas bir şekilde püskürtür; burada damlacıklar dağılarak birleşir [4]. Mürekkep püskürtmeli malzeme püskürtme şekil 1.4’de verilmiştir.

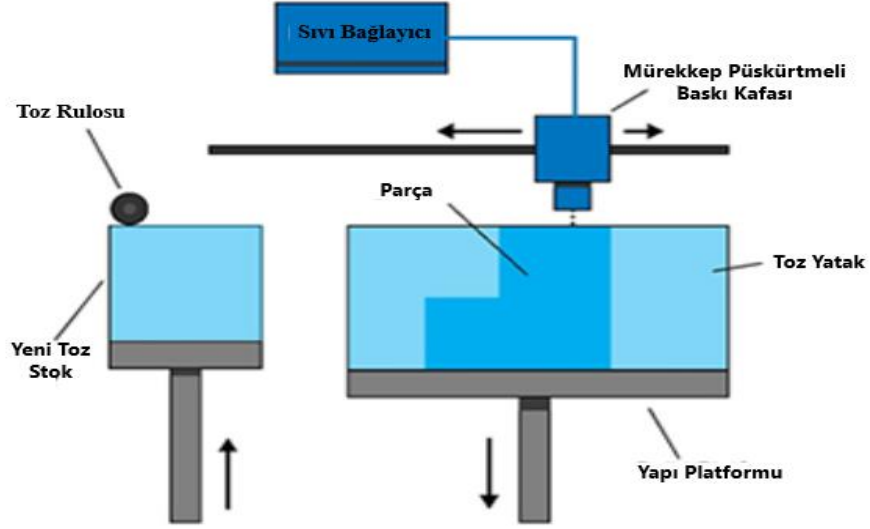


Şekil 1.4: Mürekkep püskürtmeli malzeme püskürtme [4].

#### 1.1.1.4. Bağlayıcı Püskürtme (BJ)

Bağlayıcı püskürtme, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde (MIT) 1993 yılında icat edilmiştir. İmalat sırasında büyük oranda toz-bağlayıcı-toz metoduyla bağlanmaya dayandığı için, toz dağıtma sürecini tamamlayan her malzemeyi basabilecek kapasitededir. Enerji sarfiyatı açısından bağlayıcı püskürtme yöntemi en düşük harcama gereksinimine sahip olan üç boyutlu baskı yöntemidir. Bağlayıcı püskürtme, üretim kapasitesi, geri dönüştürülebilirlik ve düşük termal atık avantajlarına sahiptir. Bu sebeple bağlayıcı püskürtme modeli potansiyeli yüksek bir yöntemdir [5].

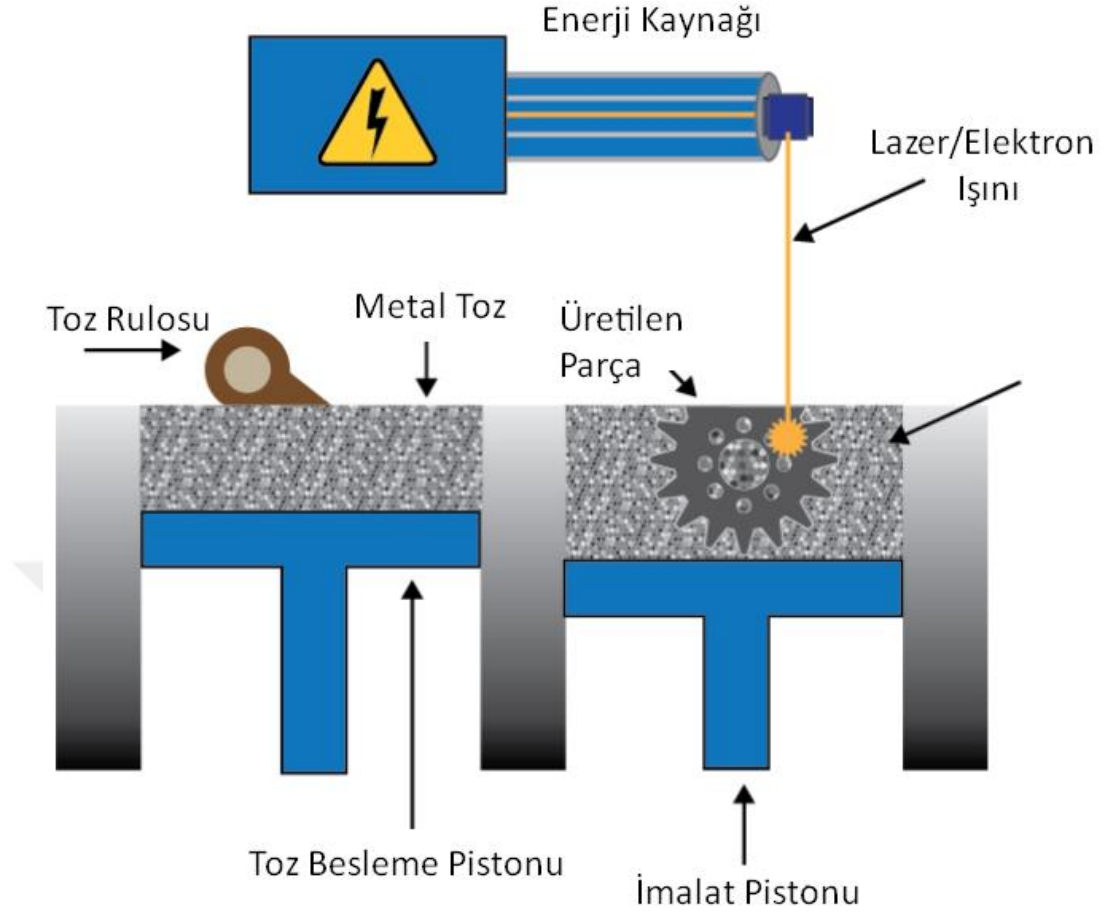
Seçici Lazer Sinterleme yöntemine benzer bir şekilde, toz malzeme baskı tablasına serildikten sonra 3 boyutlu baskının kafası tozun üzerinden geçerek yapıştırma işlemi ve boya püskürtme işlemi gerçekleştirilir. Bir sonraki katmana geçildiğinde, toz malzeme bir silindir aracılığıyla yayılır. Bu işlem parça oluşturulana kadar tekrarlanır [6]. Bağlayıcı püskürtme teknolojisinin çalışma prensibi şekil 1.5'de verilmiştir.



Şekil 1.5: BJ Teknolojisinin Çalışma Prensibi [7].

#### 1.1.1.5. Toz Yatak Füzyonu

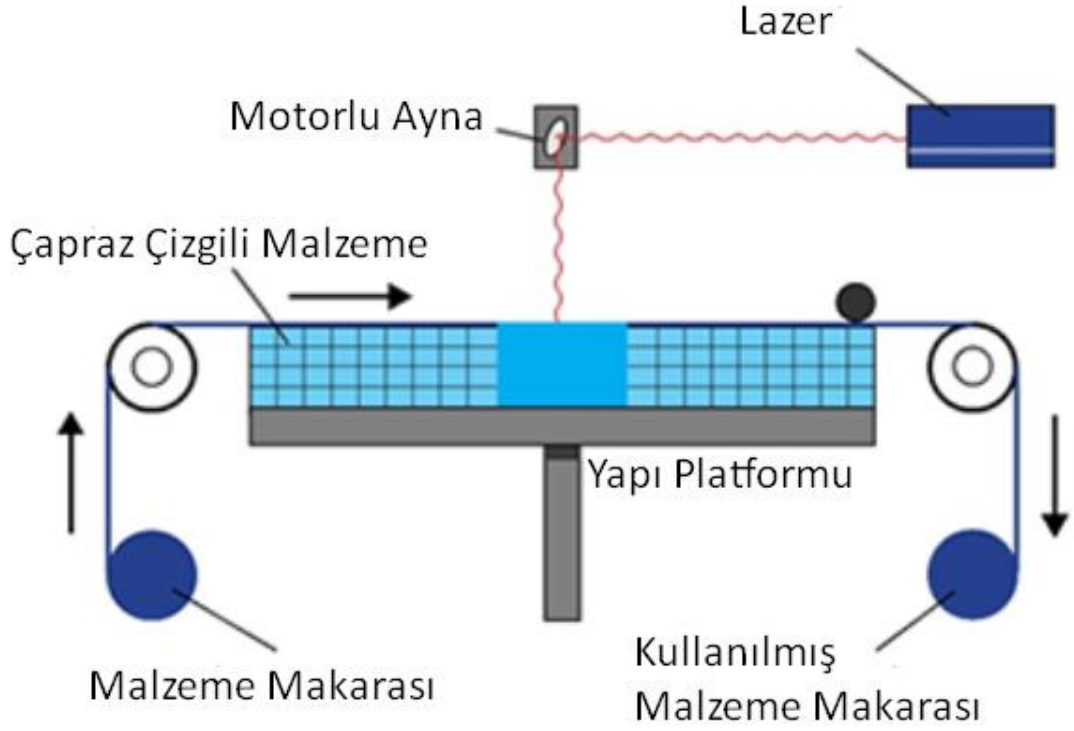
Toz halindeki metallerin ergitilmesi, birleştirilmesi ve ısıtılması metoduna dayanır. Bu sistemde ince toz katmanlarının bir yayıcı tarafından yapı konumlarına dağıtılır ve ısıtılmış bir nozul, lazer veya güçlü bir elektron ışını kullanılarak toz metali katman katman eritir. Bilgisayar destekli bu sistemde tabakaların oluşması ve her aşama sonrasında tablanın aşağıya çekilmesi, yeni tozun serilmesi ve bu işlem istenilen parça imalatına kadar devam eder [8]. Toz yatak füzyonun çalışma prensibi şekil 1.6'da verilmiştir.



Şekil 1.6: Toz yatak füzyonun çalışma prensibi [9].

### 1.1.1.6. Levha Laminasyonu

Levha Laminasyonu yöntemi, laminat obje imalatı (LOM) ve ultrasonik eklemeli imalat gibi yöntemleri içerir. Burada işlemler metal plakaların veya şeritlerin üst üste kaynaklanarak birbirine bağlandığı yöntem türüdür. Laminat Obje Üretimi (LOM) ise benzer bir katman katman yaklaşımı kullanır, ancak bu yöntemde ince katmanlar halinde metal, plastik veya kağıt kullanılır. Her katman, ısı ve basınç kullanılarak birleştirilir veya lamine yapılır. Son olarak da bilgisayar destekli bıçak veya lazer vasıtasıyla istenen geometride kesilir. Laminat parçalar genellikle göze hitap eden estetik görsel modeller için kullanılır. Şekil 1.7’de levha laminasyonuna örnek verilmiştir [10].

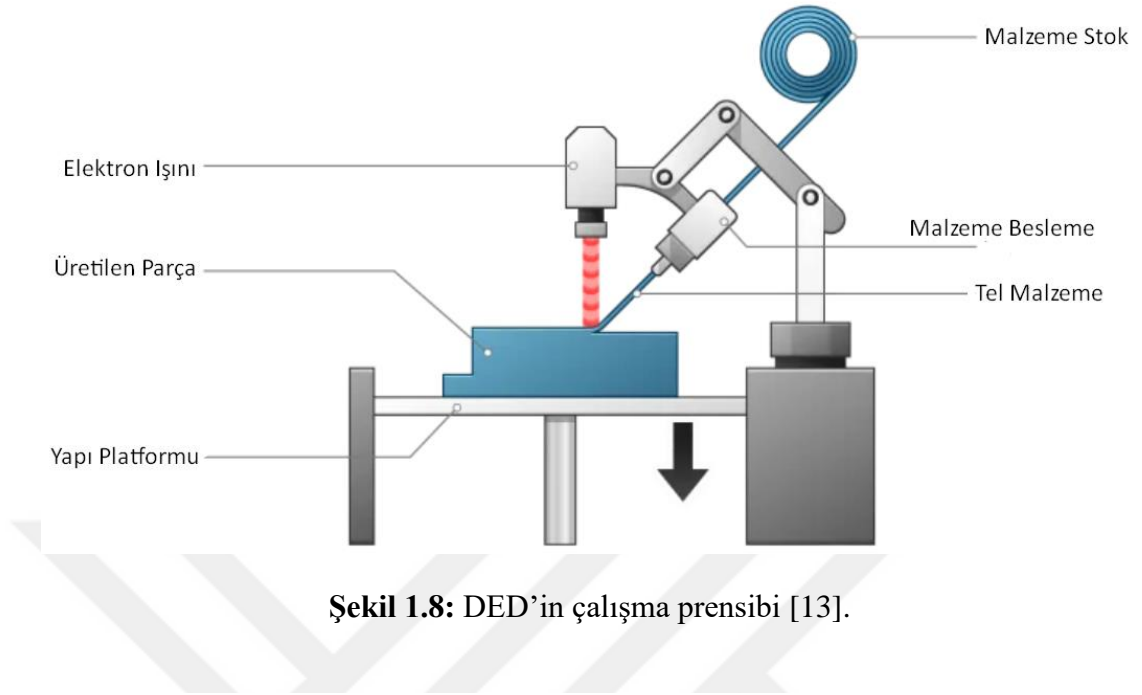


Şekil 1.7: Levha Laminasyonu [10].

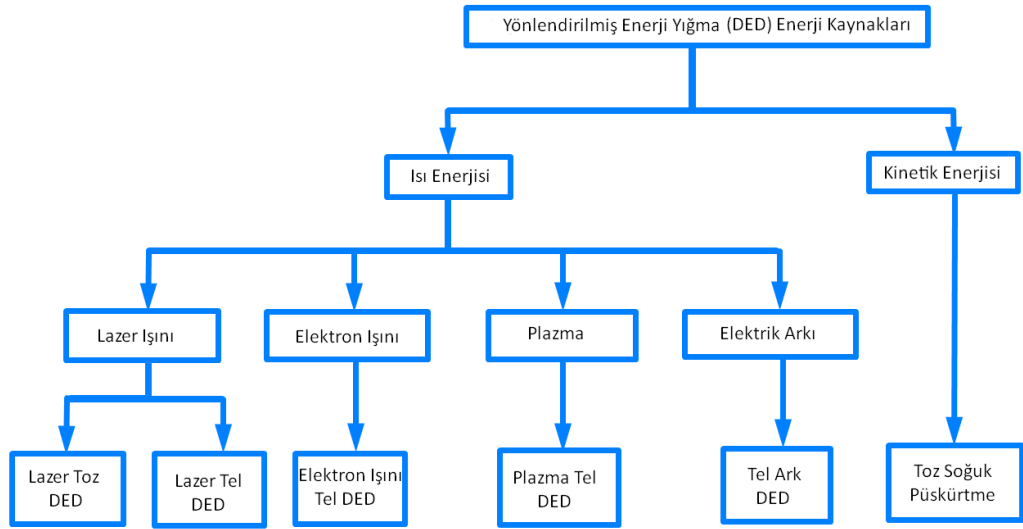
### 1.1.1.7. Yönlendirilmiş Enerji Yığıma (DED)

DED, yüksek enerji kaynağının doğrudan malzemenin hedef yüzeyine yönlendirildiği bir eklemeli imalat yöntemidir. ISO/ASTM 52900 standardına göre ise “odaklanmış termal enerjinin, birleştirilirken eriyerek malzemeleri kaynaştırmak için kullanıldığı bir eklemeli üretim süreci” olarak tanımlanmıştır [11].

Bu yöntemde elektron ışını, lazer, kaynak ısı akısı gibi termal enerji bir önceki katmana odaklanır. Bu süreç zarfında bir nozul vasıtasıyla termal enerjinin odaklandığı bölüme toz veya tel malzemenin beslemesi yapılır. Odaklanmış noktanın çevresinde, bir önceki katmandan kalan malzemenin oluşturduğu eriyik havuz bulunur. Bu havuzun soğumasıyla birlikte biriktirme izi oluşur. Bu işlem üç boyutlu nihai parça oluşumuna kadar tekrarlanır [12]. DED’in çalışma prensini şekil 1.8’de verilmiştir. DED yönteminin enerji kaynakları bulunmaktadır. DED teknolojisinde kullanılan enerji çeşitliliğine göre iki ana başlık altında ayrılmıştır. Bunlar ise ısı enerjisi ve kinetik enerjisidir. Bunlar şekil 1.9’da verilmiştir.



Şekil 1.8: DED'in çalışma prensibi [13].



Şekil 1.9: DED yönteminin enerji kaynakları [14].

### 1.1.1.7.1. Lazer Işını

Lazer ışını, ısı enerjisi ile çalışan bir kaynaktır. Bu kaynak türü ise içerisinde ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan ilki Lazer Toz DED, lazer ışını ile metal tozlarının

eritilmesiyle katman katman üretim yapılır. Bir diğeri ise Lazer Tel DED, lazer ile metalin eritilmesi metoduyla uygulanır [15].

#### **1.1.1.7.2. Elektron Işını**

Elektron ışını, ısı enerjisi ile çalışan bir kaynaktır. Elektron Işını Tel DED, vakum ortamı altında elektorn demeti ile metal teli eritilmesi suretiyle oluşur [16].

#### **1.1.1.7.3. Plazma**

Plazma, ısı enerjisi ile çalışan bir kaynaktır. Plazma Tel DED, plazma arkı ile metal telin eritildiği yöntemdir [17].

#### **1.1.1.7.4. Elektirk Arkı**

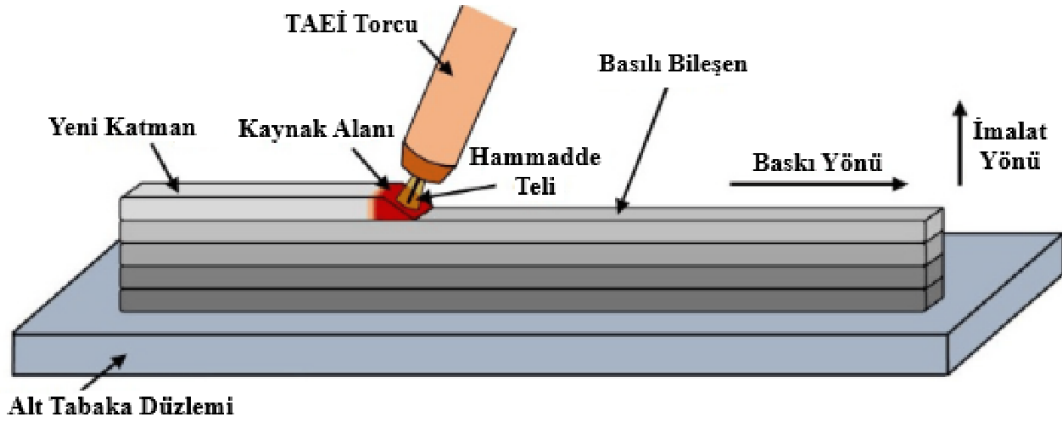
Elektrik arkı, ısı enerjisi ile çalışan bir kaynaktır. Tel Ark DED, Elektrik arkı ile metal telin eritilmesine dayanır. Yüksek birikim hızına sahiptir, bu yüzden üretim hızı yüksektir [18].

#### **1.1.1.7.5. Toz Soğuk Püskürtme**

Toz soğuk püskürtme, kinetik enerji ile çalışan bir kaynak türüdür. Toz parçacıkları yüksek hızda püskürtülerek yüzeye çarptırılır ve mekanik bağlanma ile malzeme biriktirilir [19].

## 2. TEL ARK EKLEMELİ İMALAT (TAEİ) YÖNTEMİ

Isı kaynağı olarak bir elektrik ark ile besleme malzemesi tel olan bir eklemeli imalat türüdür. Metal teli eriten bir ark vasıtasıyla katman katman parçaları oluşturur [20]. Şekil 2.1’de tel ark eklemeli imalatının çalışma prensibi gösterilmiştir. Bu yöntem 1925 yılında ilk kez Baker tarafından süs eşyalarının yapımında kullanılmıştır [21].



Şekil 2.1: Tel ark eklemeli imalatının çalışma prensibi [22].

TEAİ, eklemeli imalat ile kaynak teknolojisinin beraber çalışması işlemidir. Çoğunlukla metal teller kullanılır. Nikel, titanyum, alüminyum alaşımları ve paslanmaz çelik gibi malzeme çeşitliliği vardır. İmalat için ısı kaynağı olarak Tungsten İner Gaz (TIG), Metal İner Gaz (MIG), tozaltı, iskelet veya plazma ark kaynak teknolojileri kullanılır [23]. Baskı işlemi açısından üç boyutlu yazıcıya benzer bir şekilde çalışır ancak malzemeleri metal tabanlıdır. Bu imalat türü, büyük ve karmaşık metal parçaların imalatı için uygundur. İmalat işlemleri CNC cihazlar ve robotik kollar vasıtasıyla hassasiyet sağlar.

### 2.1. Tel Ark Eklemeli İmalat'ın Avantajları ve Dezavantajları

Tel ark eklemeli imalatın avantajları, büyük ve karmaşık metal parçaların üretilmesine olanak tanır. Geleneksel yöntemlere göre daha düşük maliyetlerle büyük boyutlu parçalar üretilebilir. Talaşlı imalat yöntemlerinde malzeme israfı çok yüksektir, ancak TAEİ ile yalnızca ihtiyaç duyulan miktarda malzeme kullanılır, bu da malzeme

tasarrufu sağlar. Diğer eklemeli imalat yöntemlerine kıyasla üretim hızı oldukça yüksektir. Özellikle prototip üretiminde hızlı geri dönüş sağlar. TAEİ, çelik, alüminyum, titanyum gibi birçok metal türüyle çalışabilir ve bu da geniş bir uygulama alanı sunar. TAEİ, bir kaynak makinesi, bir tel besleme sistemi ve bir robotik kol gibi temel ekipmanlarla çalışabilir. Bu da kurulum maliyetlerini azaltır. Geleneksel üretim yöntemleriyle yapılması zor olan karmaşık geometrilere sahip parçalar kolayca üretilebilir. TAEİ, parça üzerindeki mikro yapıların yönlendirilmesiyle mekanik özellikleri optimize etme imkânı sağlar [24].

TAEİ, diğer eklemeli imalat yöntemlerine kıyasla daha düşük boyutsal hassasiyet sunar. Son işlemle hassasiyet artırılabilir ancak bu ek maliyet getirir. Katman katman üretim sırasında oluşan yüksek sıcaklık farkları, parçada ısıl gerilmeler ve deformasyonlara neden olabilir. TAEİ her ne kadar birçok metalle uyumlu olsa da bazı alaşımlar veya malzeme kombinasyonlarında sınırlamalar olabilir. Üretilen parçalar, genellikle son işlemle (frezeleme, taşlama vb.) istenen yüzey kalitesine ve hassasiyete getirilir. TAEİ işlemi sırasında kaynak teknolojisinin kullanımı yüksek enerji tüketimine neden olabilir. TAEİ sistemlerinin kurulumu, çalıştırılması ve optimize edilmesi uzmanlık gerektirir. Bu da eğitim maliyetlerini artırabilir.

Sonuç olarak, TAEİ büyük boyutlu, düşük hassasiyet gerektiren ve hızlı prototipleme projeleri için oldukça avantajlıdır. Ancak, yüzey kalitesi ve hassasiyet gerektiren projeler için ek işlemler ve dikkatli bir planlama gerektirir.

## **2.2. Tel Ark Eklemeli İmalat'ın Uygulama Alanları**

Kanat bağlantı elemanları, iniş takımı parçaları, motor muhafazaları gibi karmaşık ve büyük metal parçaların üretiminde kullanılır. Yüksek sıcaklık ve korozyona dayanıklı malzemeler için uygundur. TAEİ ile üretilen parçalar malzeme tasarrufu ve optimizasyon sağlayarak uçakların ağırlığını azaltır.

Gemilerde kullanılan büyük vidalar, şaftlar ve pervaneler gibi metal bileşenlerin üretiminde veya tamirinde kullanılır. Deniz suyuna dayanıklı malzemeler TAEİ ile kolayca işlenebilir. Büyük parçaların üretilmesi sırasında geleneksel yöntemlere göre maliyet ve zaman tasarrufu sağlar.

Otomotiv sektöründe hızlı prototipleme için kullanılır. Araçların parçaları için kullanılan kalıplar ve döküm modelleri TAEİ ile üretilebilir. Performans artırıcı alaşımlar kullanılarak araç bileşenleri üretilir.

Rüzgâr, gaz ve su türbinleri için büyük ve karmaşık parçalar TAEİ ile üretilebilir. Yüksek dayanım ve ısıya dayanıklı alaşımlardan yapılan parçalar nükleer enerji sektöründe tercih edilir. Borular, bağlantı elemanları ve yüksek basınca dayanıklı bileşenlerin üretiminde kullanılır.

Askeri araçlar için hafif ancak dayanıklı zırh üretiminde kullanılır. Karmaşık ve özel tasarımlar gerektiren savunma parçalarının üretiminde tercih edilir. Mevcut ekipmanların sahada hızlı bir şekilde tamir edilmesine olanak tanır.

Titanyum gibi biyouyumlu malzemelerle kişiye özel implantların üretiminde kullanılır. Karmaşık şekillerdeki cerrahi araç ve gereçler TAEİ ile üretilebilir.

Büyük ölçekli metal strüktürlerin inşasında kullanılır. Özellikle metal heykel ve süsleme işlerinde detaylı tasarımların üretiminde avantaj sağlar.

TAEİ, aşınmış veya hasar görmüş parçaların üzerine malzeme ekleyerek onarım yapılmasına olanak tanır. Madencilik, iş makineleri veya ağır endüstri için büyük parçaların tamirinde kullanılır [24].

## 3. TRİBOLOJİ

Triboloji, yüzeyler arasındaki **sürtünme**, **aşınma** ve **yağlama** olaylarını inceleyen, mühendislik, malzeme bilimi ve fizik alanlarını kapsayan disiplinler arası bir bilim dalıdır. Temel amacı, yüzeylerin etkileşimlerini optimize ederek aşınmayı azaltmak, sürtünmeyi kontrol etmek ve sistem performansını artırmaktır. Hareketli sistemlerde enerji kaybını en aza indirerek mekanik bileşenlerin ömrünü uzatır ve sistemlerin daha verimli çalışmasını sağlar [25].

### 3.1. Tel Ark Eklemeli İmalatta Tribolojik Özellikler

Tel Ark Eklemeli İmalat, metal yüzeyler ve parçaların tribolojik performansını belirleyen özellikleri etkileyen bir üretim yöntemidir. Bu özellikler, malzemenin dayanıklılığı, sürtünme davranışı ve aşınma direnci gibi parametrelerle doğrudan ilgilidir.

#### 3.1.1. Mikro Yapı ve Malzeme Özellikleri

TAEİ, metal malzemeleri katmanlar halinde biriktirirken, ortaya çıkan mikro yapı sürtünme ve aşınma performansını etkiler. İnce taneli ve homojen mikro yapılar, daha iyi tribolojik özellikler sağlar. Ancak katmanlı yapı, yönsel özellikler oluşturabileceğinden homojenliğin sağlanması önemlidir [26].

#### 3.1.2 Sertlik ve Aşınma Direnci

TAEİ ile üretilen parçaların yüzey sertliği, kullanılan tel malzemesi ve üretim sırasında uygulanan ısı ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek sertlik, aşınma dayanımını artırır. Örneğin, çelik veya titanyum alaşımları kullanıldığında sertlik değerleri daha yüksek olur ve bu da sürtünme ile aşınmaya karşı direnç sağlar [27].

### **3.1.3 Sürtünme Katsayısı**

Parçaların yüzey pürüzlülüğü, sürtünme katsayısını etkiler. TAEİ ile üretilen parçalar genellikle pürüzlü yüzeylere sahiptir ve bu durum sürtünme katsayısını artırır. Parçaların tribolojik performansını iyileştirmek için son işlemler (taşlama, parlatma vb.) uygulanarak yüzey düzgünlüğü artırılabilir [27].

### **3.1.4 Isıl Gerilmeler ve Çatlaklar**

TAEİ sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklar ve hızlı soğuma, parçada ısıl gerilmeler ve mikro çatlaklara yol açabilir. Bu tür kusurlar, sürtünme sırasında erken aşınma ve performans kaybına neden olabilir [28].

### **3.1.5 Yağlama**

TAEİ ile üretilen yüzeylerin yağlama uyumluluğu, malzeme türüne ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Düzgün bir yüzey ve uygun mikro yapı, yağlayıcıların yüzeyde etkili bir film tabakası oluşturmasını sağlar [29].

## 4. ISIL İŞLEM

Isıl işlem, metalleri ve alaşımları özel mekanik ve fiziksel özellikler kazandırmak amacıyla belli bir sıcaklığa kadar ısıtma, belirli bir süre boyunca bu sıcaklıkta tutma ve ardından kontrollü bir şekilde soğutma işlemlerini kapsayan bir uygulamadır. Çelik, alüminyum, titanyum ve diğer alaşımlar, farklı ısıl işlem yöntemleri ile istenen özellikleri kazanabilir. En yaygın ısıl işlem yöntemleri şunlardır; Tavlama, normalizasyon, sertleştirme, menevişleme ve yüzey sertleştirme. Tezim sırasında kullandığım metod ise gerilim giderme tavlamasıdır. Isıl işlem, otomotiv, havacılık, savunma sanayii, makine imalatı ve enerji sektörü gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle motor bileşenleri, dişli sistemleri, kesici takımlar ve inşaat makineleri gibi ağır yük altında çalışan parçalar için kritik öneme sahiptir. Sonuç olarak, metal ve alaşımlara istenen mekanik özellikleri kazandırmak için kritik bir üretim sürecidir. Farklı ısıl işlem yöntemleri sayesinde malzemelerin sertliği, dayanıklılığı ve tokluğu kontrol edilebilir, bu da endüstride geniş bir kullanım alanı sunar [30].

### 4.1 Gerilim Giderme Tavlaması

Gerilim giderme tavlaması, metal malzemelerde üretim, kaynak, döküm veya talaşlı imalat süreçleri sırasında oluşan iç gerilmeleri azaltmak amacıyla uygulanan bir ısıl işlem yöntemidir. İç gerilmeler, malzeme üzerinde çatlak oluşumuna veya şekil değişikliklerine neden olabilir. Bu nedenle, gerilim giderme tavlaması, özellikle kritik mühendislik bileşenlerinde yapısal stabilitenin korunması açısından önemli bir işlemdir.

Bu işlem sırasında malzeme, yeniden kristalleşme sıcaklığının altında (genellikle 500-650°C arasında) ısıtılır ve belirli bir süre bu sıcaklıkta tutulduktan sonra yavaşça soğutulur. Kontrollü ısıtma ve soğutma süreci sayesinde, malzeme içindeki gerilmeler dengelenerek mukavemeti ve hizmet ömrü artırılır. Hataları önleme ve malzeme dayanıklılığını artırma açısından bu yöntem, mühendislik alanında kritik bir uygulamadır [31].

Gerilim giderme tavlaması, özellikle büyük kaynaklı yapılar, hassas işlenmiş metal parçalar, büyük döküm bileşenleri ve plastik deformasyona uğramış malzemeler için uygulanır. Havacılık, otomotiv, enerji ve savunma sanayii gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sonuç olarak, gerilim giderme tavlaması, malzeme içindeki istenmeyen gerilmeleri ortadan kaldırarak daha stabil ve güvenilir bileşenler elde edilmesini sağlar. Bu yöntem, üretim sonrası deformasyonları ve malzeme hatalarını minimize etmek için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır[32].



## 5. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Chaoqun Zhang'un yaptığı çalışmalarda farklı paslanmaz çelik türleri ve işlem parametrelerine bağlı olarak TAEİ ile üretilmiş paslanmaz çeliklerin mikro yapısı, mekanik özellikleri ve kusurları gibi konuları kapsayan mevcut durumu incelemiştir. TAEİ ile üretilen bileşenlerin artık gerilmeleri ve deformasyonları tartışılmıştır [33].

Van Thao Le ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda ince cidarlı 308L paslanmaz çelik bileşenlerin tel ve ark eklemeli imalatı rapor etmişlerdir. TAEİ sürecinde kullanılan kaynak akımı, gerilim (voltaj) ve ilerleme hızının tek bir kaynak dikişinin geometrisi üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Bu parametreler ayrıca 308L çelik duvarların biriktirilmesi için optimize ederek TAEİ ile üretilen 308L çelik duvarların mikro yapısı ve mekanik özellikleri incelenmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, TAEİ süreciyle 308L duvarların inşa edilmesi için istenilen kaynak dikişi geometrisini sağlayan optimize edilmiş parametreleri ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. TAEİ 308L çelik duvarlarının mikro yapısı, ağırlıklı olarak dikey büyüyen östenit dendritleri ile östenit matrisinin tane sınırlarında bulunan artık ferrit özelliklerini gösterdiğini belirtmişlerdir [34].

Luis Segovia-Guerrero ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda AISI 316L alt tabakası üzerine iki farklı paslanmaz çeliğin dönüşümlü katmanlar halinde biriktirilmesiyle, Plazma Tel Ark Eklemeli İmalat (Plasma Wire Arc Additive Manufacturing) yöntemi kullanılarak üretmişlerdir. Seçtikleri malzemeler M430 ferritik ve M316L östenitik paslanmaz çeliklerdir. İki farklı malzeme arasındaki ara yüzeyler dâhil olmak üzere çeşitli bölgelerde kapsamlı mikro yapısal karakterizasyon, optik mikroskopi ve elektron geri saçılma kırınımı yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak iki katmanlı çelikler ile alt tabaka arasında iyi bir kaynaklanabilirlik olduğunu ortaya koymuşlardır [35].

Ali Rahimi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda Soğuk Metal Transfer (CMT) tel ark eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş 310 östenitik paslanmaz çeliğin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Parçanın çekme davranışı ve Charpy V-çentik darbe performansı, sıcak haddelenmiş muadili ile karşılaştırmışlardır. Çekme dayanımı, süneklik ve darbe testleri sırasında enerji soğurma kapasitesi, üretilen parçanın anizotropik mikro yapısından etkilenmektedir. Kalın kolonsal tanelerin

yönelimi ile  $\delta$ -ferritin interdendritik ve tane sınırları boyunca hizalanması, TAEİ yöntemiyle üretilmiş SS310 östenitik paslanmaz çeliğin anizotropik çekme özelliklerini etkileyen kritik faktörlerdir belirtmişlerdir [36].

Abdulrahman Alrumayh'ın yaptığı çalışmalarda TAEİ ile üretilmiş numunelerde farklı bölgelerin aşınma davranışları arasındaki farkları incelemiştir. Bu bölgeler, farklı termal çevrim geçmişlerine ve farklı sertlik seviyelerine sahiptir. Bir numune WAAM yöntemiyle üretilmiş ve aşınma testi ölçümleri için hazırlamıştır. Termal çevrimleri farklı olan iki bölge seçmiştir: katmanlar arası bölge ve katman ortası bölge. Bu iki bölge için sürtünme katsayısı, sürtünme katsayısı eğimi, sürtünme kuvveti, hacim kaybı, kütle kaybı ve sertliğini ölçmüş ve hesaplamıştır. Sonuç olarak, katmanlar arası bölgelerinin daha düşük sürtünme katsayısı, negatif sürtünme katsayısı eğimi ve diğer bölgelere göre daha düşük sertliğe sahip olduğunu belirtmiştir. Bu durum, kalıntı gerilmeleri etkileyen termal çevrimden kaynaklanıyor olabileceğini belirtmiştir [37].

Yashwant Koli ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda ağır yükleme koşullarında kuru kayma altında TAEİ ile işlenmiş 308L östenitik paslanmaz çeliğin aşınma durumlarını sunmuştur. Aşınma testleri, yüksek yükte çalışan klasik bir pim-disk tribometresi kullanılarak kuru (yağsız) koşullarda gerçekleştirmiştir. Daha düşük ısı girdisi ile işlenmiş eklemeli imalatla üretilmiş östenitik paslanmaz çelik örnekleri, daha düşük sürtünme katsayısı (COF) ve aşınma oranı sergilediğini belirtmiştir [38].

C. V. Haden ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda incelenen malzemeler paslanmaz çelik 304 ve yumuşak çelik ER70S'dir. Paslanmaz çelik 304'te, biriktirme yönünde ve Z yüksekliğinde yerel termal geçmişlerdeki farklılıklara bağlı olarak aşınma ve sertlik açısından dereceli malzeme özellikleri gözlemiştir. Aşınma oranları, biriktirilen malzeme boyunca anlamlı şekilde azaldığını belirtmiştir. Aynı yön boyunca mikrosertlik değerleri ise anlamlı şekilde arttığını belirtmiştir. Bununla birlikte, paslanmaz çelik 304'ün akma ve çekme dayanımı, biriktirme yönü boyunca istatistiksel olarak anlamlı bir fark göstermediğini belirtmiştir. Ayrıca yumuşak çelik (ER70S) örneklerinde, dikey ve yatay yönler arasında akma dayanımı açısından anlamlı bir fark gözlemlememiştir [39].

Vittoria Laghi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda TAEİ yöntemiyle üretilmiş paslanmaz çelik malzemenin temel geometrik ve mekanik özelliklerinin değerlendirilmesidir. Özellikle yüzey düzensizliklerinin çeşitli ölçüm teknikleriyle

karakterize edilmesi ve malzemenin çekme ve basma dayanımı, Young modülü ve elastik sonrası davranışı gibi temel mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi üzerinde durmuşlardır. Elde edilen test sonuçları, ortalama değerleri belirlemek ve hem geometrik hem de mekanik parametrelerin değişkenliği hakkında bilgi toplamak amacıyla istatistiksel yöntemler aracılığıyla yorumlamışlardır [40].

Ravi Kumar ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda denizcilik ve çeşitli otomotiv uygulamaları için uygun yapısal bütünlük ve performans sağlamak üzere, ER 2209'un yüksek kaliteli birikimini sağlayacak TAEİ işlem parametrelerini optimize etmektir. Üretilen numunelerin mikro yapısal analizi, yaklaşık eşit oranlarda ferrit ve östenit fazlarından oluşan çift fazlı yapının, birikim katmanları boyunca homojen şekilde dağıldığını ortaya koymuşlardır. Bu dengeli mikro yapı, alaşımın üstün mekanik özelliklerine katkı sağlamaktadır. Numunelerin hem üretim yönünde hem de ilerleme yönündeki akma dayanımı, uzama ve nihai çekme dayanımı ölçümleri, dövme alaşım ile karşılaştırılabilir düzeyde bulmuşlar ve TAEİ yönteminin ER 2209 dubleks paslanmaz çeliğin mekanik bütünlüğünü olumsuz etkilemediği sonucuna varılmışlardır [41].

Gaurav Sharma ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda TAEİ ile üretilen 304L paslanmaz çeliğin tribolojik performansı çeşitli koşullar altında değerlendirmişlerdir. İncelenen konular arasında, SiC (silisyum karbür) parçacıklarıyla yapılan darbe dokulama ve nano ölçekli yüzey bilyeleme gibi yüzey işlemleri sayesinde aşınma direncinde ve sürtünme azaltımında elde edilen önemli iyileşmeler yer almaktadır. Ayrıca, molibden ve krom içeriği daha yüksek olan 316L paslanmaz çeliğin, 304L'ye kıyasla aşınma ve korozyon direncinde gösterdiği üstün performans da değerlendirmişlerdir. Çalışmada aynı zamanda ortam sıcaklığının AISI 304L paslanmaz çeliğin aşınma performansına etkisini de incelemişlerdir. Sıcaklık değişimlerinin sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarında değişkenlik yarattığı ortaya koymuşlardır [42].

Louriel O Vilarinho'nun yaptığı çalışmalarda yöntemiyle üretilen 316L paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi, mikro yapısı, mekanik ve elektrokimyasal davranışını değerlendirmeyi ve aynı alaşımın tavllanmış durumda olan örneğiyle karşılaştırmayı amaçlamıştır. Sonuçlar, ER316LSi telinin kullanılmasının, bileşimi konvansiyonel 316L alaşımına denk olan bir bileşen ürettiğini gösterdiğini belirtmiştir. Ancak, depozite edilen malzemenin mikro yapısı, östenitik matris içinde ferrit bulunmasıyla

farklıdır. Ayrıca, mikro yapıları farklı olan iki bölge de tespit etmiştir. Depozit katmanlar arasındaki füzyon hattına yakın bölgede, ostenit taneleri daha küçük olup, ferrit oranı daha yüksektir. Bu durum, bu bölgede mikro sertliğin artmasına neden olmaktadır, bu bölge her katmanın merkezine kıyasla daha sert olacağını belirtmiştir [43].

Sritam Kumar Dash'ın yaptığı çalışmalarda TIG (Tungsten İner Gaz) kaynak yöntemi kullanarak, 2219 alüminyum alaşımı taban malzeme ve 2319 alüminyum alaşımı dolgu teli ile incelemiştir. Üç bağımsız değişkenle kaynak hızı, tel besleme hızı ve akım olmak üzere bir deney tasarımı (DOE - Design of Experiment) gerçekleştirmiştir. Bu DOE ile istenen kaynak dikişi şekline göre gerçekleşen malzeme birikiminin kapsamı incelenmiştir. Kaynak dikiş geometrisine ek olarak, oluşan malzemenin sertliği, dikişler üzerinde kontur haritası oluşturularak Vickers sertlik test cihazı ile test edilmiştir. Daha sonra ısıdan etkilenmiş bölge de incelenmiştir [44].

Kumar Murugesan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda düşük karbon içeriği, korozyon direnci, sıcaklık dayanımı ve artırılmış mekanik mukavemeti gibi önemli özellikleri nedeniyle SS316L paslanmaz çelik alaşımı kullanılmışlardır. Çalışmalarının temel amacı, Doğrudan Metal Lazer Sinterleme tekniğinin eklemeli imalatla üretilen SS316L alaşımının mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisini incelemektir. Özellikle, 45°'lik üretim yöneliminin etkisi araştırılmışlardır. ASTM standartlarına uygun olarak yapılan çekme, darbe ve aşınma testlerinin, yazdırılmış numunelerin mekanik ve tribolojik özelliklerine nasıl etki ettiğini anlamışlardır. Elde edilen bulgular, 45° yönelimle eklemeli imalatla üretilen numunelerin, geleneksel üretim teknikleriyle üretilenlere kıyasla daha iyi özellikler gösterdiğini ortaya koyduğunu belirtmişlerdir [45].

Nabeel Ahmed Siddiqui ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda tel ark eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak biriktirilen parçaların mekanik, mikro yapısal ve makro yapısal özellikleri ile ısı girişi arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Çalışmalarında kapsamlı bir şekilde incelenen ısı girişi, tel ark eklemeli imalat sürecinin kararlılığı için çok önemlidir ve üretim süreci sırasında parçaların mekanik özelliklerini ve mikroyapısal gelişimini etkiler. Çalışmalarında malzemelerin, mikro yapıları, makro yapıları ve mekanik özelliklerini ele almışlardır [46].

Tezimin literatüre katkısı, 4 farklı paslanmaz çelik tel (SS307, SS308, SS309, SS316L) kullanılarak TAEİ ile üretilmiş parçaların tribolojik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla, aynı şartlarla TAEİ ile üretilmiş östenitik paslanmaz çelik duvarlardan elde edilen numuneler önce spektrometre ile kompozisyon analizine tabi tutulmuştur. Numunelerin hem kesit hem de yan yüzeylerinden sertlik ölçümleri Vickers sertlik yöntemi ile yapılmıştır. Daha sonra bütün numuneler aynı şartlar altında bir resiprokal tribometre ile test edilmiş, sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Numuneler ayrıca 400 °C'de bir saat süreyle gerilim giderme tavlamasına tabi tutulmuş, tavlama sonrasında tekrar sertlik davranışları ve tribolojik performansları izlenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda, TAEİ işlemi sonrasında numunelerin kimyasal kompozisyonunda farklılaşmalar olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca incelenen numunelerin hepsinde, ısıtılma işleminin tribolojik özelliklere ve sertlik değerlerine etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bu işlemlerin sonucunda, ısıtılma işlem öncesi ve sonrası karşılaştırmalar yapılarak tartışmalar sunulmuştur.

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 6.1. Üretim ve Malzemeler

Tezimiz sırasında 4 farklı paslanmaz çelik tel (SS307, SS308, SS309, SS316L) kullanılarak TAEİ ile Gedik Kaynak firmasında üretilmiştir. Numunelerin hem kesit hem de yan yüzeylerinden sertlik ölçümleri Vickers sertlik yöntemi ile ölçülmüştür. Daha sonra bütün numuneler aynı şartlar altında bir resiprokan tribometre ile test edilmiş, sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Numuneler ayrıca 400 °C’de bir saat süreyle gerilim giderme tavlamasına tabi tutulmuş, tavlama sonrasında tekrar sertlik davranışları ve tribolojik performansları izlenmiştir. Şekil 6.1’de 316L numunesinin hem kesit hemde yan yüzeyi verilmiştir.

**Tablo 6.1:** Malzemelerin Kompozisyonu.

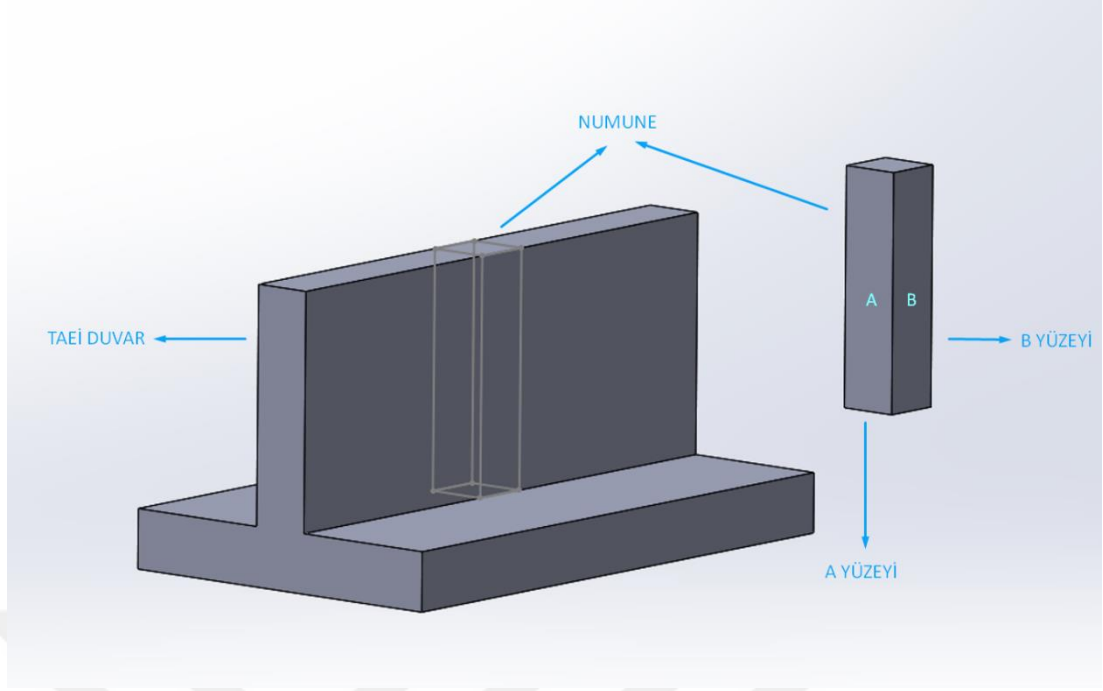
Malzeme	316 %	309 %	308 %	307 %
Cr	20.02	23.51	18.43	18.72
Ni	9.13	12.51	11.54	8.22
Mo	0.148	0.063	2.21	0.087
Mn	1.94	2.00	1.64	6.02

Tel ark eklemeli imalatımızdaki numunelerde kullanılan malzemelerin kompozisyonları tablo 6.1’de verilmiştir.

**Tablo 6.2:** Üretim Parametreleri.

Parametreler	Birim	Değerler
Akım	A	110
Voltaj	V	14
Tel Çapı	mm	1.2
Kaynak Hızı	mm/s	7.5
Kaynak Modu	-	Düşük Sıçrama
Dikiş Tekniği	-	İnce Dikişler
Torç Açısı	Derece	90°
Temas ucu ile iş mesafesi	mm	14
Koruyucu gaz türü	-	%97.5 Ar + %2.5 CO <sub>2</sub>
Gaz akış hızı	L/dakika	15

Tel ark eklemeli imalatımızdaki numunelerin üretiminde kullanılan parametreler tablo 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.1: Numunelerin hem kesit (A) hemde yanal yüzeyi (B).

## 6.2. Yapılan Deneyler

### 6.2.1. Vickers Sertlik Deneyi

Vickers Sertlik Deneyi, malzemelerin sertliğini ölçmek için kullanılan bir mikrosertlik test yöntemidir. Bu test, genellikle ince kesitler, küçük parçalar veya ince kaplamalar gibi hassas alanlarda sertliği belirlemek için tercih edilir. Test, bir malzemenin yüzeyine uygulanan belirli bir yükün, bir piramit şeklindeki elmas uçla oluşturduğu iz derinliğine bağlı olarak sertliği ölçer. Avantajları bakımından küçük alanlarda ve ince malzemelerde güvenilir sonuçlar sağlar. Metal, seramik, plastik gibi birçok malzeme için kullanılabilir. ASTM E92 veya ISO 6507 gibi uluslararası standartlara uygundur. Dezavantajları açısından test izinin küçük olması, özellikle sert olmayan malzemelerde ölçüm zorluklarına neden olabilir. Cihaz maliyeti nispeten yüksektir. Test sonucu yüzey pürüzlülüğü ve kaplama özelliklerinden etkilenebilir.

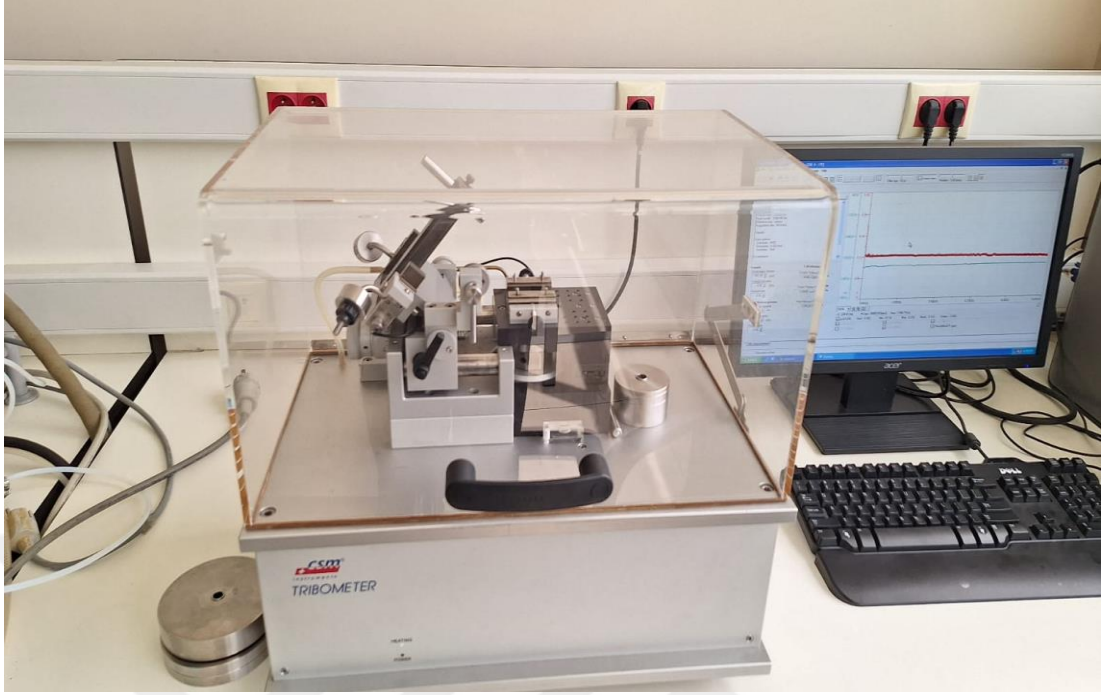
Çalışmamızda vickers sertlik deneyini 500g 10 saniye süre parametrelerinde Instron Wolpert 2100 serisi cihazında gerçekleştirdik. Veriler 2mm aralıklar sonucunda alınmıştır. Şekil 6.2’de Instron Wolpert 2100 serisi sertlik ölçüm cihazı verilmiştir.



Şekil 6.2: Instron Wolpert 2100 serisi sertlik ölçüm cihazı [47].

### 6.2.2. Sürtünme ve Aşınma Testi

Bu test, iki yüzeyin birbiriyle temas halinde hareket ettikleri durumlarda oluşan sürtünme kuvvetini ve yüzey aşınmasını ölçmek için kullanılır. Bu testte iki yüzey arasında oluşan sürtünme kuvvetinin, normal yüke oranı olan sürtünme katsayısı ölçülmüştür. Aynı zamanda yapısal değişimi, pürüzlülüğü ve yüzey morfolojisinin analiz edilmiştir. Çalışmamız CSM Tribometer TRN 18-323 cihazında 12N normal yük, 100m toplam yol ve  $\frac{1}{2}$  genlik olarak 8.5mm parametrelerinde yapılmıştır. Test sırasında bilyanın boyutu 6mm ve malzemesi  $Al_2O_3$ . Çevre koşulları olarak sıcaklık 25 °C ve %55 nem şartları altında yapılmıştır. Yüzey profilometresi Veeco Dektak 8 cihazında yapılmıştır. Şekilde 6.3’de CSM Tribometer TRN 18-323 Aşınma testi cihazı verilmiştir. Şekil 6.4’de Veeco Dektak 8 Yüzey profilometre cihazı verilmiştir.



Şekil 6.3: CSM Tribometer TRN 18-323 Aşınma testi cihazı [48].



Şekil 6.4: Veeco Dektak 8 Yüzey profilometre cihazı [49].

### 6.2.3. Gerilim Giderme Tavlaması

Gerilim Giderme Tavlaması, malzemelerde imalat süreçleri (kaynak, döküm, talaşlı imalat, sıcak şekillendirme, eklemeli imalat vb.) sırasında oluşan artık gerilmeleri azaltmak için uygulanan bir ısıtma işlemi yöntemidir. Bu işlem, malzemenin iç yapısındaki dengesizlikleri gidererek deformasyon, çatlak oluşumu ve boyutsal değişim risklerini en aza indirmeyi amaçlar. Özellikle mekanik dayanım ve boyutsal kararlılığın kritik olduğu durumlarda yaygın olarak kullanılır. Gerilim giderme tavlaması şu şekilde yapılmaktadır; Malzeme, kontrollü bir hızla belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Sıcaklık değeri, genellikle malzemenin türüne ve iç yapısına bağlıdır (örneğin, karbon çeliklerinde 500-700 °C, paslanmaz çeliklerde 400-600 °C, alüminyum alaşımlarında 200-300 °C). Çalışmamızı Protherm PLF 120/15 Laboratuvar Fırınında 400 °C’de 1 saat süre ile gerçekleştirdik. Malzeme, bu sıcaklıkta belirli bir süre (genellikle 1 saat/25 mm kalınlık kuralına göre) tutulur. Bu süre boyunca malzeme içindeki atomlar hareket ederek gerilmelerin dengelenmesini sağlar. Malzeme, fırında veya kontrollü bir ortamda yavaşça soğutulur. Hızlı soğutma, yeni gerilmeler oluşturabileceği için genellikle tercih edilmez. Şekil 6.5’de Protherm PLF 120/15 Laboratuvar Fırını verilmiştir.



**Şekil 6.5:** Protherm PLF 120/15 Laboratuvar Fırını [50].

## 7. BULGULAR

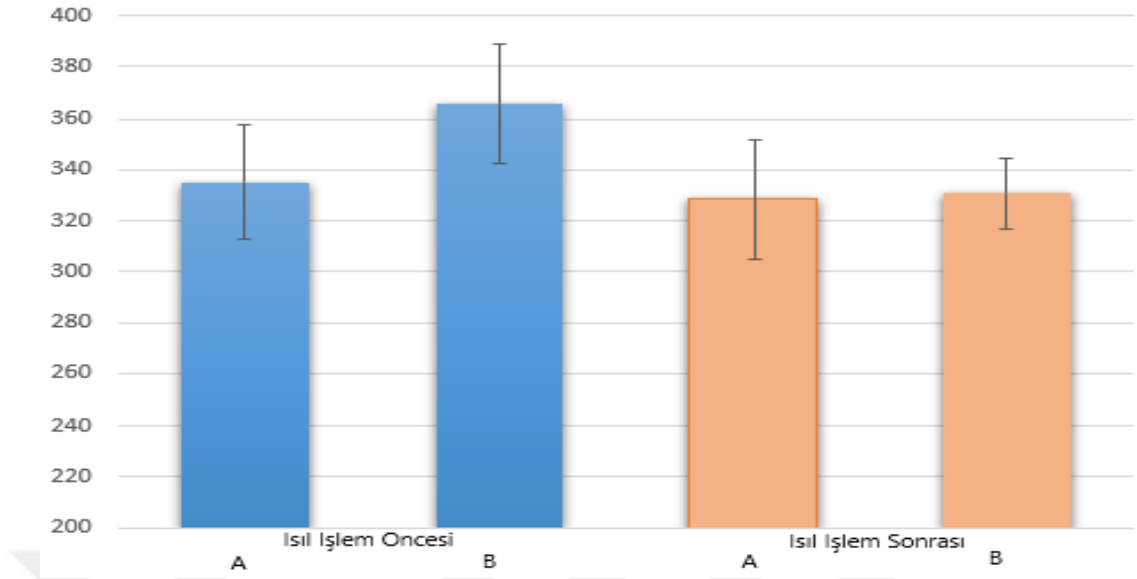
### 7.1. Vickers Sertlik Testi Sonuçları

**Tablo 7.1 :** 316L ve 309 Paslanmaz çeliklerinin sertlik testi sonuçları.

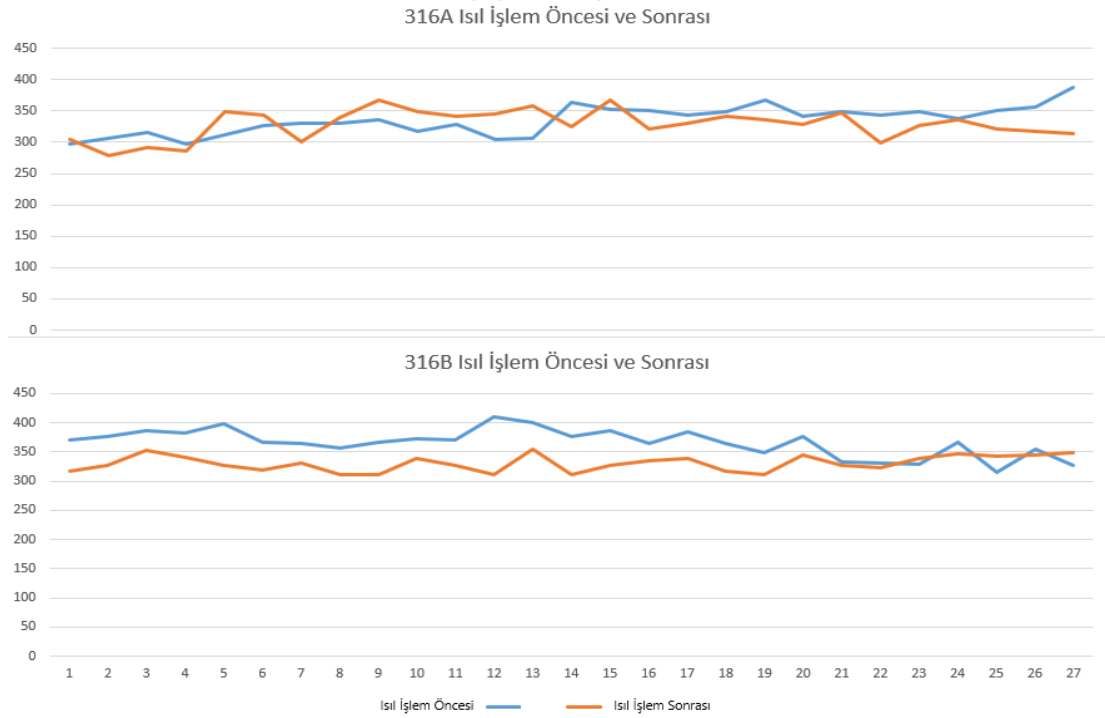
No	Isıl İşlem Öncesi 316		Isıl İşlem Sonrası 316		Isıl İşlem Öncesi 309		Isıl İşlem Sonrası 309	
	A	B	A	B	A	B	A	B
1	298	371	304	318	370	297	359	335
2	307	376	279	328	364	324	357	328
3	316	386	291	352	374	314	335	324
4	297	382	287	341	392	349	344	314
5	312	398	349	327	363	322	339	337
6	327	366	343	320	404	324	330	343
7	331	364	301	331	374	345	347	385
8	331	357	340	318	357	347	344	334
9	336	366	368	311	358	358	371	323
10	317	373	348	338	378	331	323	334
11	329	371	341	328	357	339	313	315
12	305	410	345	311	347	343	384	339
13	306	400	359	354	340	359	350	324
14	363	376	325	312	342	350	364	355
15	352	386	368	327	353	338	339	333
16	350	364	322	334	363	360	358	359
17	343	385	331	339	370	352	322	330
18	348	364	341	317	373	339	325	357
19	367	349	336	311	374	373	315	348
20	341	376	329	345	373	357	308	344
21	348	333	348	327	367	324	306	341
22	343	331	299	324	376	338	315	359
23	349	329	327	339	380	360	321	368
24	338	367	336	347	347	367	304	340
25	350	316	321	343	325	336	283	352
26	356	354	318	344	350	352	280	324
27	388	328	314	349	343	344	271	321
Ortalama	335,11	365,85	328,48	330,70	363,48	342,29	329,85	339,48
S.Sapma	22,52	23,27	23,59	13,68	17,06	17,25	27,93	16,86

316L ve 309 Paslanmaz çeliklerinin sertlik testi sonuçları tablo 7.1’de verilmiştir.

## 316L Ortalama ve Standart Sapma Değerleri



Şekil 7.1: 316L Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ortalama ve standart sapma değerleri.

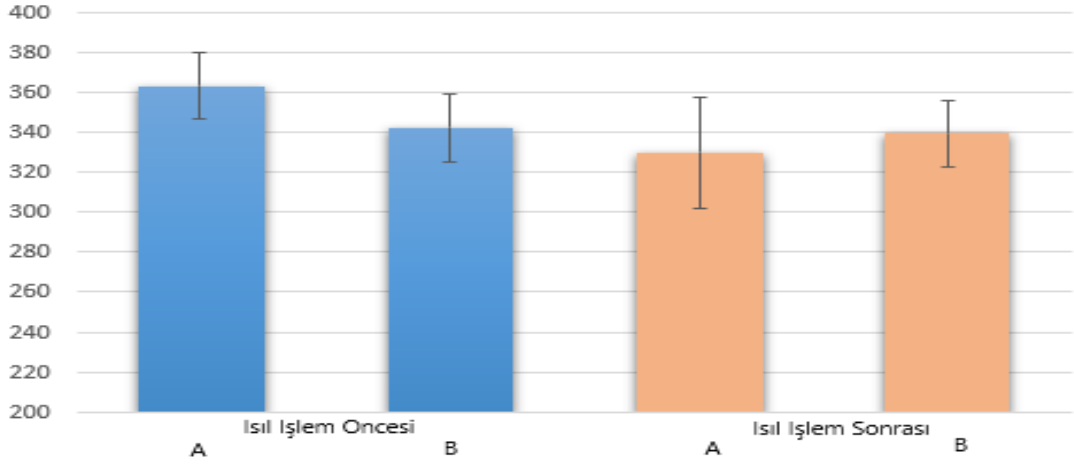


Şekil 7.2: 316L Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ısıtıl işlem öncesi ve sonrası değerleri.

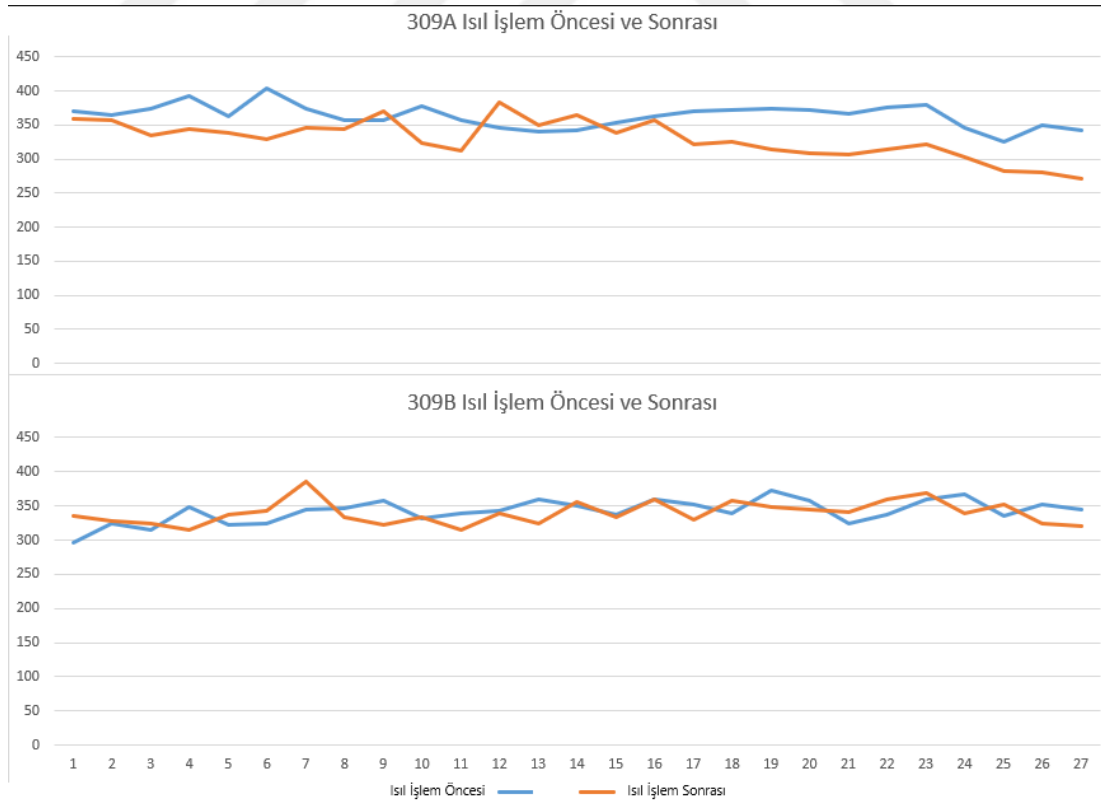
316L çeliği için gerilim giderme tavlama sonrasında sertliğinde bir düşüş gözlemlendi. 316A yüzeyi için ısıtıl işlem öncesinde sertlik sonuçları daha geniş bir yelpazede iken ısıtıl işlem sonrasında sertlik düşmüş olup daha kararlı hale geldiği

gözlemlenmiştir. 316B yüzeyi için ısıtım işlem öncesinde sertlik değeri daha yüksek ve dalgalı bir şekilde seyir etmektedir. Isıtım işlem sonrasında sertlik sonuçlarında düşüş gözlemlenmiş olup, daha stabil hale gelmiştir.

### 309 Ortalama ve Standart Sapma Değerleri



**Şekil 7.3:** 309 Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ortalama ve standart sapma değerleri.



**Şekil 7.4:** 309 Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ısıtım işlem öncesi ve sonrası değerleri.

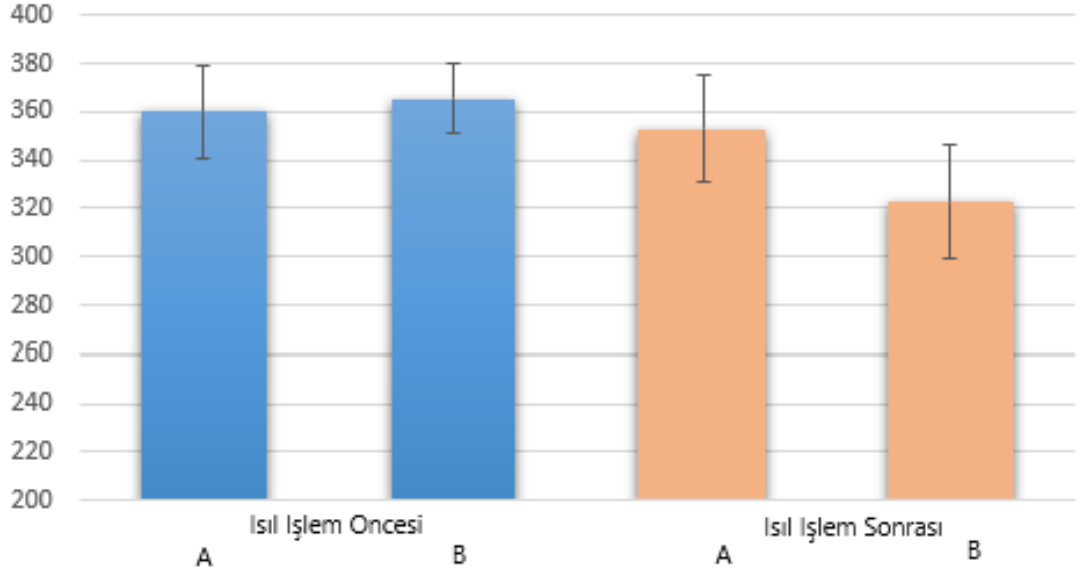
309 çeliği için gerilim giderme tavlaması sonrasında sertliğinde belirgin bir düşüş gözlemlendi. Isıl işlem sonrasında 309A yüzeyinde standart sapma oldukça yüksek çıktığı gözlemlendi ve sonuçlar daha değişken hale geldi. 309B yüzeyinde ise ısıl işlem sonrasında sertlik değişimi daha stabil ve istikrarlı hale bürünmüştür.

**Tablo 7.2:** 308 ve 307 Paslanmaz çeliklerinin sertlik testi sonuçları.

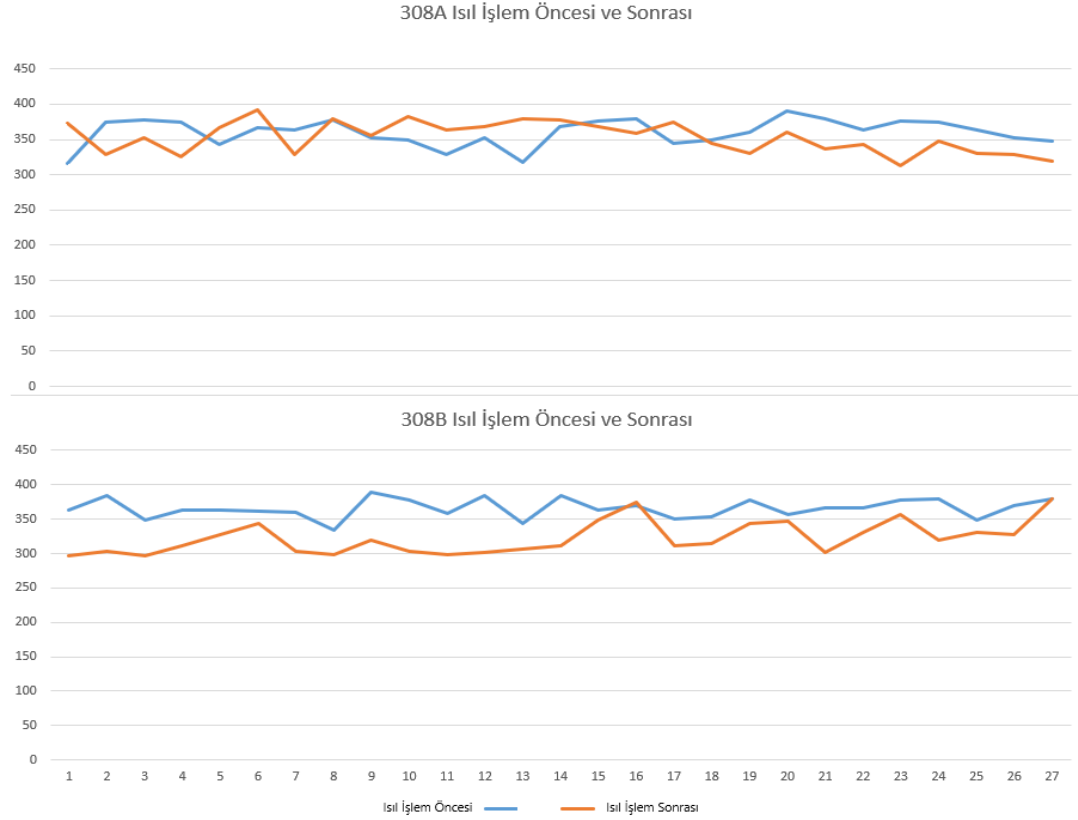
No	Isıl İşlem Öncesi 308		Isıl İşlem Sonrası 308		Isıl İşlem Öncesi 307	Isıl İşlem Sonrası 307
	A	B	A	B	A	A
1	316	363	373	296	261	231
2	374	384	329	303	280	314
3	377	348	352	297	280	268
4	374	364	325	312	265	280
5	343	363	366	328	266	283
6	367	361	392	343	272	305
7	363	360	328	304	288	308
8	377	334	380	298	294	349
9	353	386	356	320	297	324
10	350	377	382	304	277	282
11	329	359	363	298	314	328
12	353	385	369	302	309	339
13	318	344	380	306	328	341
14	368	385	377	312	268	334
15	376	364	368	349	302	339
16	380	370	359	374	321	341
17	345	350	374	312	271	344
18	349	363	344	315	301	415
19	361	377	331	343	261	356
20	391	356	361	347	264	351
21	380	366	336	301	280	333
22	363	367	343	331	267	285
23	376	377	313	357	269	274
24	347	380	347	320	255	264
25	364	349	331	331	285	255
26	352	370	328	328	243	236
27	347	380	320	376	268	248
Ortalama	360	365,74	352,85	322,59	280,96	308,03
S.Sapma	18,92	14,06	22,24	23,66	21,10	43,30

308 ve 307 Paslanmaz çeliklerinin sertlik testi sonuçları tablo 7.2'de verilmiştir.

### 308 Ortalama ve Standart Sapma Değerleri

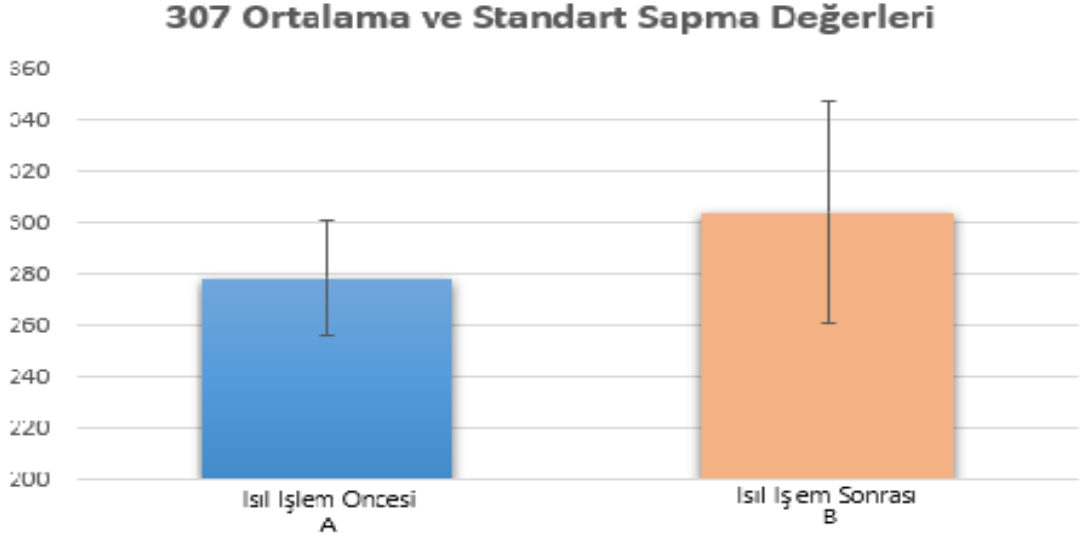


Şekil 7.5: 308 Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ortalama ve standart sapma değerleri.

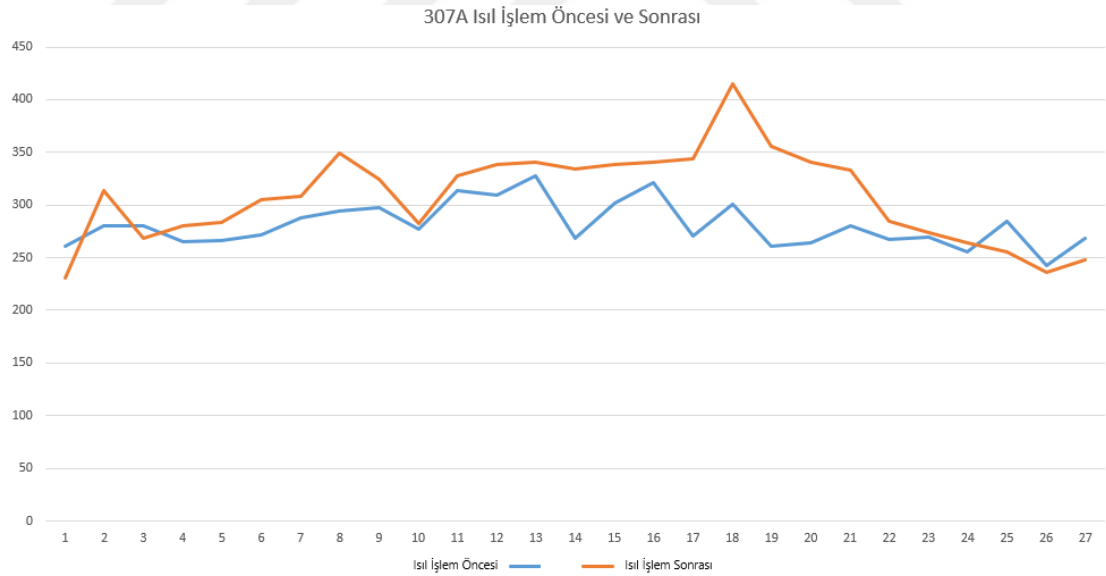


Şekil 7.6: 308 Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ısıtılma öncesi ve sonrası değerleri.

308 çeliği için gerilim giderme tavlaması sonrasında sertliğinde bir düşüş gözlemlendi. Isıl işlem sonrasında 308B yüzeyinde ısıl işlem sonrasında belirgin bir azalma ve standart sapma değerinde küçülme gözlemlendi.



**Şekil 7.7:** 307 Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ortalama ve standart sapma değerleri.



**Şekil 7.8:** 307 Paslanmaz çeliğinin sertlik testi sonuçlarına göre ısıl işlem öncesi ve sonrası değerleri.

308 çeliği için gerilim giderme tavlaması sonrasında sertliğinde bir artış gözlemlendi. Isıl işlem sonucunda standart sapma değerinde belirgin bir artış bulunmaktadır.

## 7.2. Sürtünme ve Aşınma Testi Sonuçları

**Tablo 7.3:** Paslanmaz çeliklerin (316L, 309, 308, 307) sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçları.

	Isıl İşlem Öncesi		Isıl İşlem Sonrası		Isıl İşlem Öncesi		Isıl İşlem Sonrası		
	316A_D	316A_Y	316A_D	316A_Y	316B_D	316B_Y	316B_D	316B_Y	
316									
Sürtünme Katsayıları	0,457	0,479	0,448	0,466	0,46	0,474	0,466	0,477	
Penetrasyon Derinliği	0,3	0,25	0,45	0,3	0,25	0,4	0,2	0,33	
	Isıl İşlem Öncesi		Isıl İşlem Sonrası		Isıl İşlem Öncesi		Isıl İşlem Sonrası		
	309A_D	309A_Y	309A_D	309A_Y	309B_D	309B_Y	309B_D	309B_Y	
309									
Sürtünme Katsayıları	0,589	0,597	0,584	0,579	0,558	0,586	0,584	0,571	
Penetrasyon Derinliği	0,4	0,2	0,52	0,35	0,2	0,3	0,4	0,35	
	Isıl İşlem Öncesi		Isıl İşlem Sonrası		Isıl İşlem Öncesi		Isıl İşlem Sonrası		
	316	308A_D	308A_Y	308A_D	308A_Y	308B_D	308B_Y	308B_D	308B_Y
316									
Sürtünme Katsayıları	0,513	0,546	0,539	0,535	0,533	0,544	0,555	0,525	
Penetrasyon Derinliği	0,4	0,17	0,3	0,55	0,25	0,22	0,58	0,36	
	Isıl İşlem Öncesi		Isıl İşlem Sonrası		Isıl İşlem Öncesi		Isıl İşlem Sonrası		
	316	307A_D	307A_Y	307A_D	307A_Y	307A_D	307A_Y	307A_D	307A_Y
316									
Sürtünme Katsayıları	0,398	0,429	0,358	0,404					
Penetrasyon Derinliği	0,03	0,01	0,2	0,17					

Paslanmaz çeliklerin (316L, 309, 308, 307) sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçları tablo 7.3’de verilmiştir.



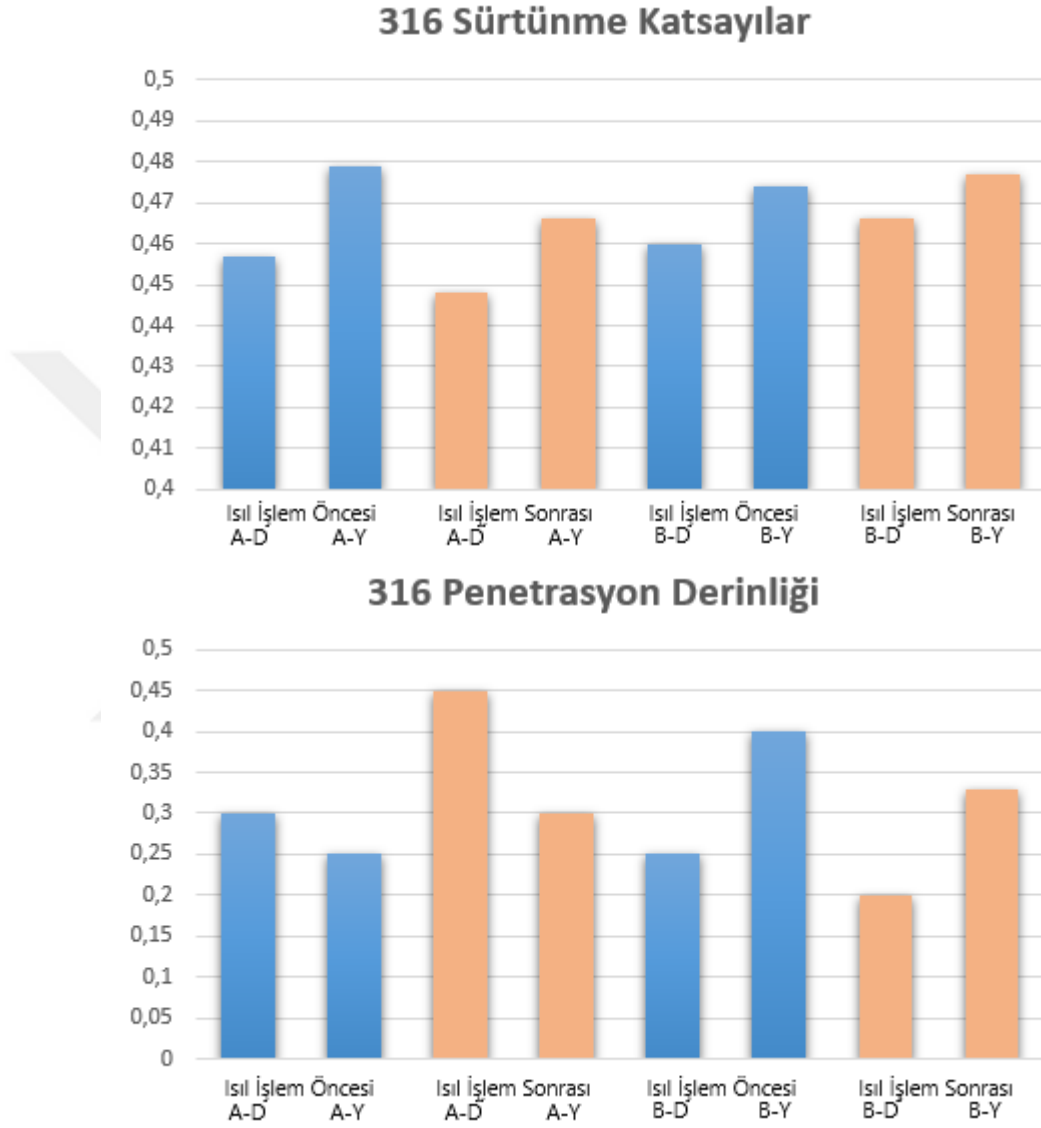
**Şekil 7.9:** 316L Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki yatay ve dikeydeki sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıt işlem öncesi ve sonrası değerleri.



**Şekil 7.10:** 316L Paslanmaz çeliğinin B yüzeyindeki yatay ve dikeydeki sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıt işlem öncesi ve sonrası değerleri.

316L paslanmaz çeliği ısıt işlem öncesi, sürtünme katsayısı başlangıçta ortalama bir seviyede olup zamanla sabit bir seyir izliyor. Penetrasyon derinliği düşük seviyede

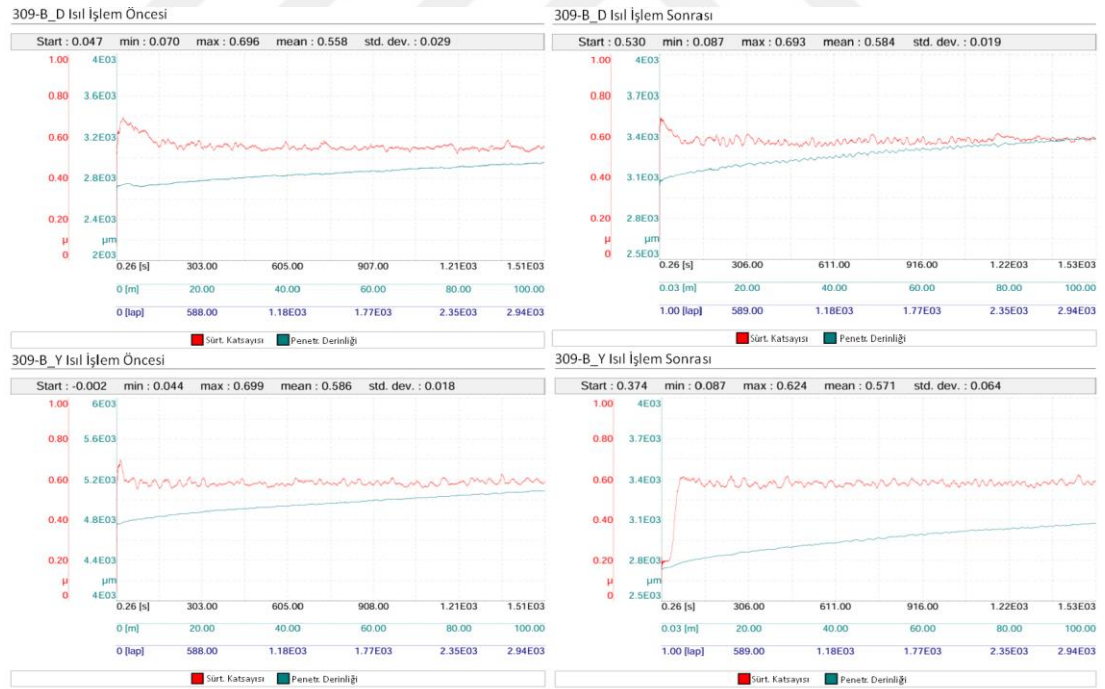
başlıyor ve zamanla kademeli bir artış gösteriyor. Ancak ısıtım işlem sonrasında sürtünme katsayısında büyük bir değişiklik görünmezken penetrasyon derinliği daha kararlı ve hızlı bir artış eğiliminde.



**Şekil 7.11:** 316L Paslanmaz sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçları.

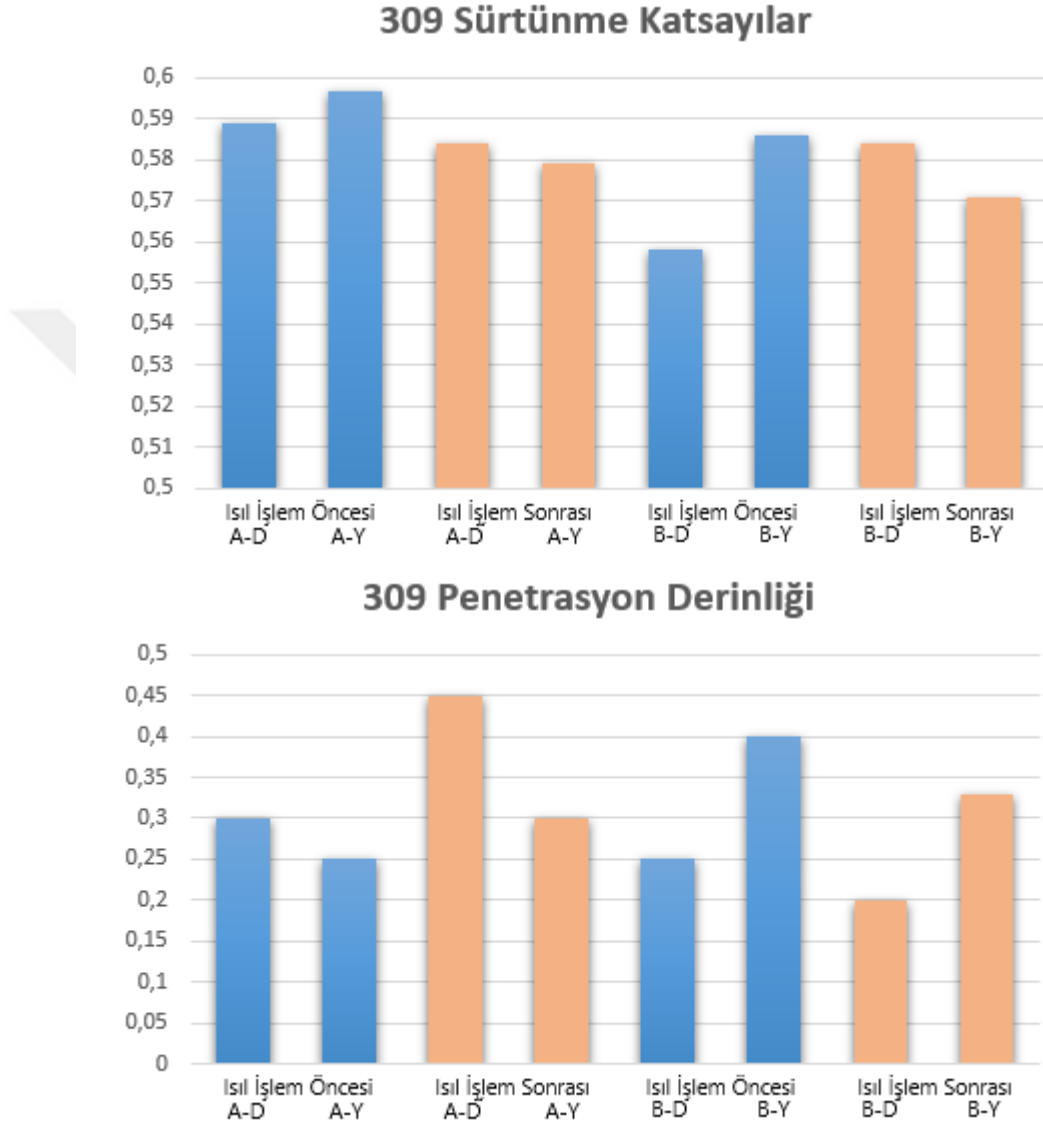


**Şekil 7.12:** 309 Paslanmaz çeliğinin A yüzündeki yatay ve dikeydeki sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıtım işlem öncesi ve sonrası değerleri.



**Şekil 7.13:** 309 Paslanmaz çeliğinin B yüzündeki yatay ve dikeydeki sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıtım işlem öncesi ve sonrası değerleri.

309 paslanmaz çeliği ısıtıl işlem öncesi, sürtünme katsayısı nispeten stabil ve düşük seviyelerde seyrediyor. Penetrasyon derinliği ise zamanla düzenli bir artış eğiliminde. Isıtıl işlem sonrasında ise sürtünme katsayısı yine stabil kalırken penetrasyon derinliği daha erken ve daha kararlı artış göstermiş.



**Şekil 7.14:** 309 Paslanmaz çeliğinin sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçları.



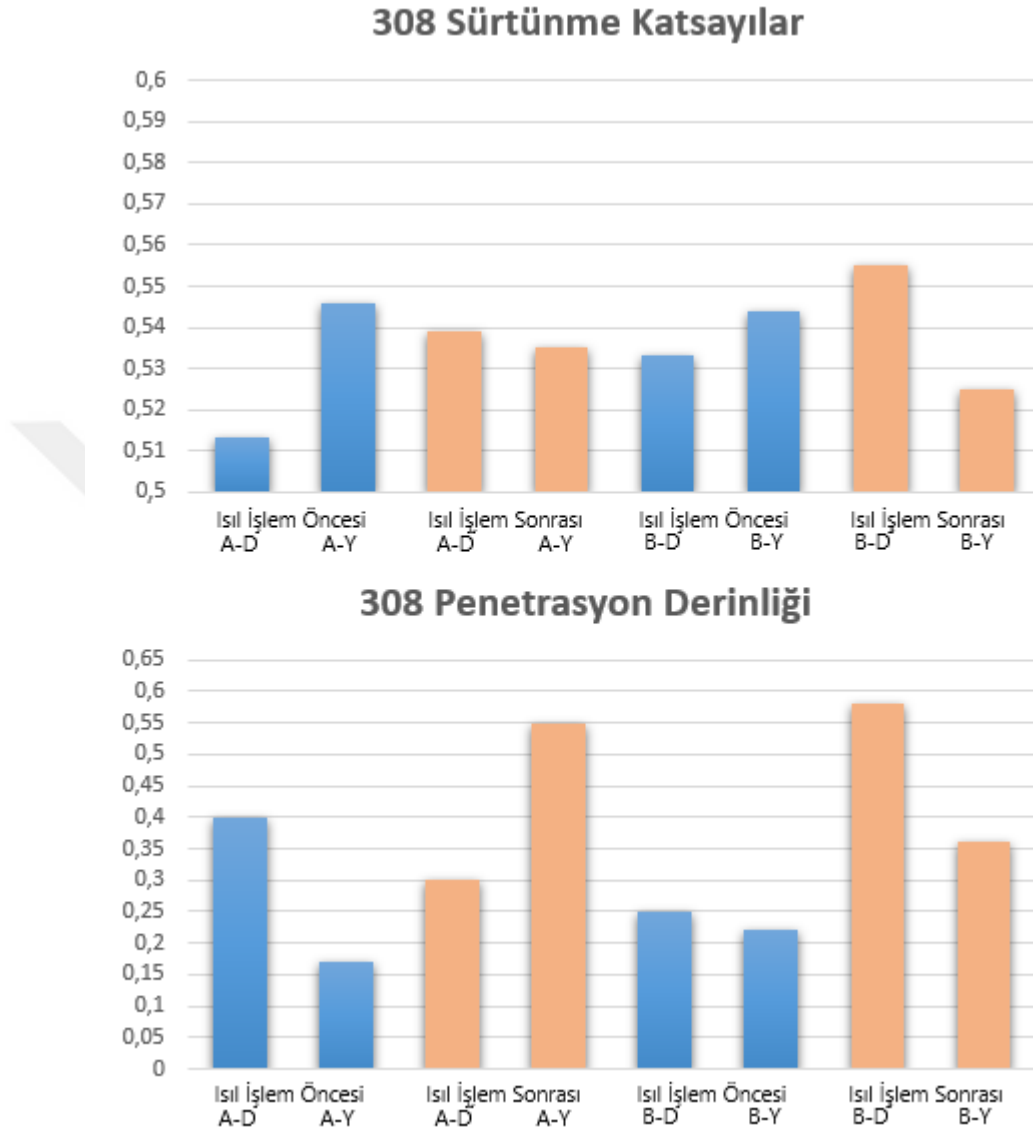
**Şekil 7.15:** 308 Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki yatay ve dikeyde sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıtım işlem öncesi ve sonrası değerleri.



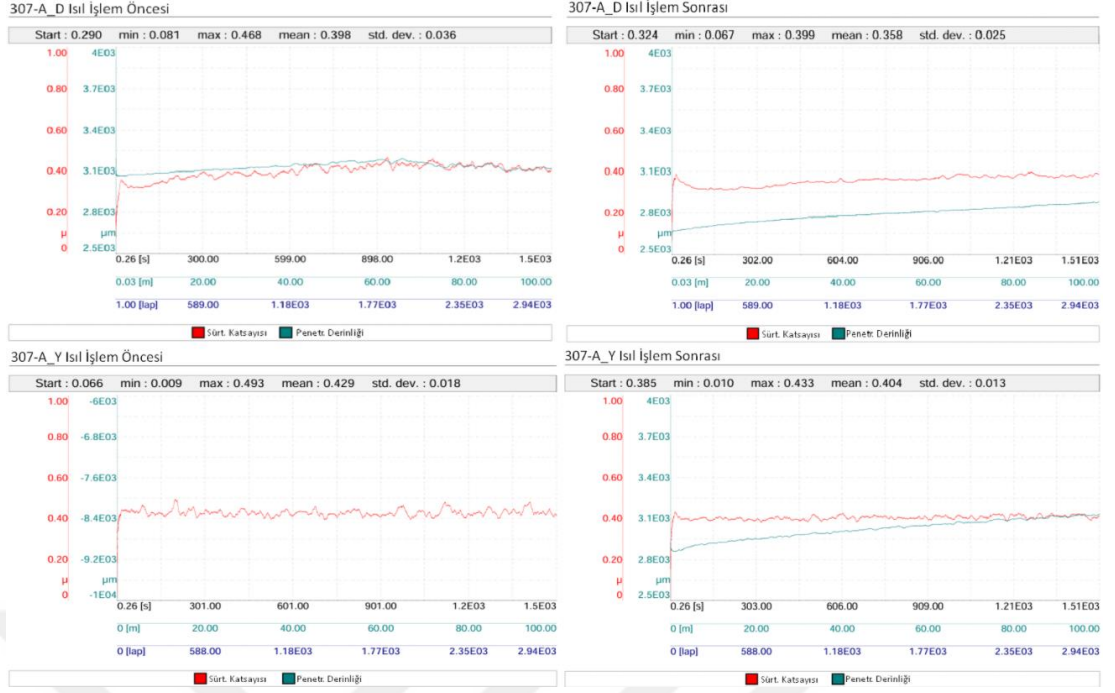
**Şekil 7.16:** 308 Paslanmaz çeliğinin B yüzeyindeki yatay ve dikeyde sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıtım işlem öncesi ve sonrası değerleri.

308 paslanmaz çeliği ısıtım işlem öncesinde, sürtünme katsayısı başlangıçta düşük olup zamanla hafif dalgalanmalar gösteriyor. Penetrasyon derinliği ise düzenli ve yavaş bir

artış gösteriyor. Isıl işlen sonrasında ise sürtünme katsayısı stabil kalırken penetrasyon derinliği hızlı ve belirgin bir artış göstermiş.

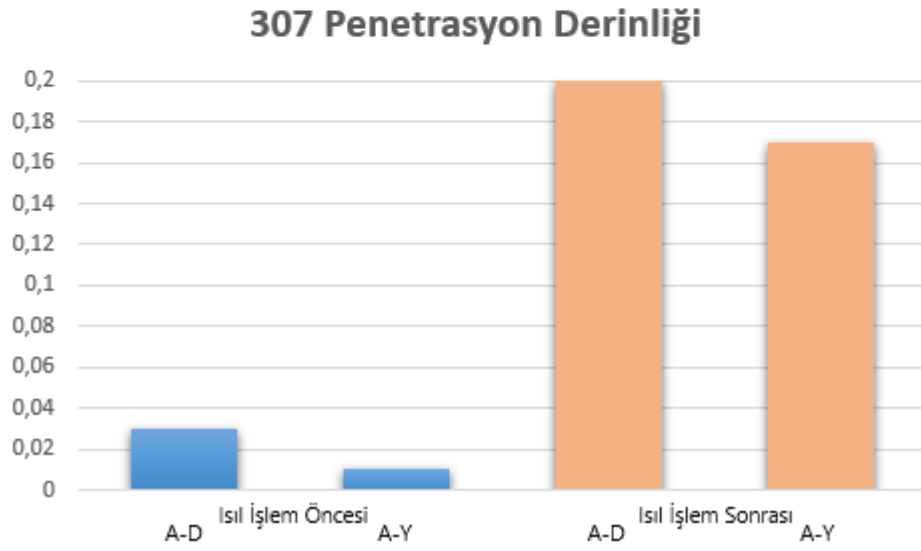
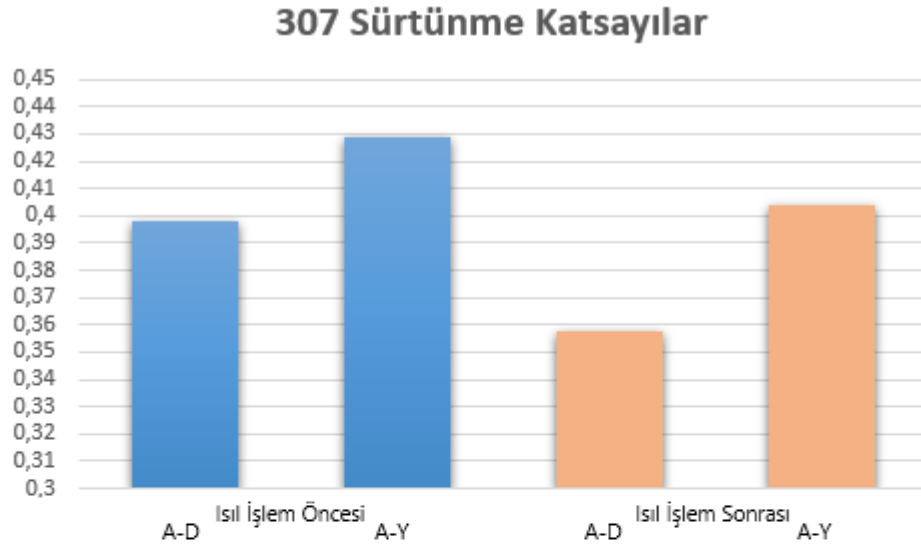


**Şekil 7.17:** 308 Paslanmaz çeliğinin sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçları.



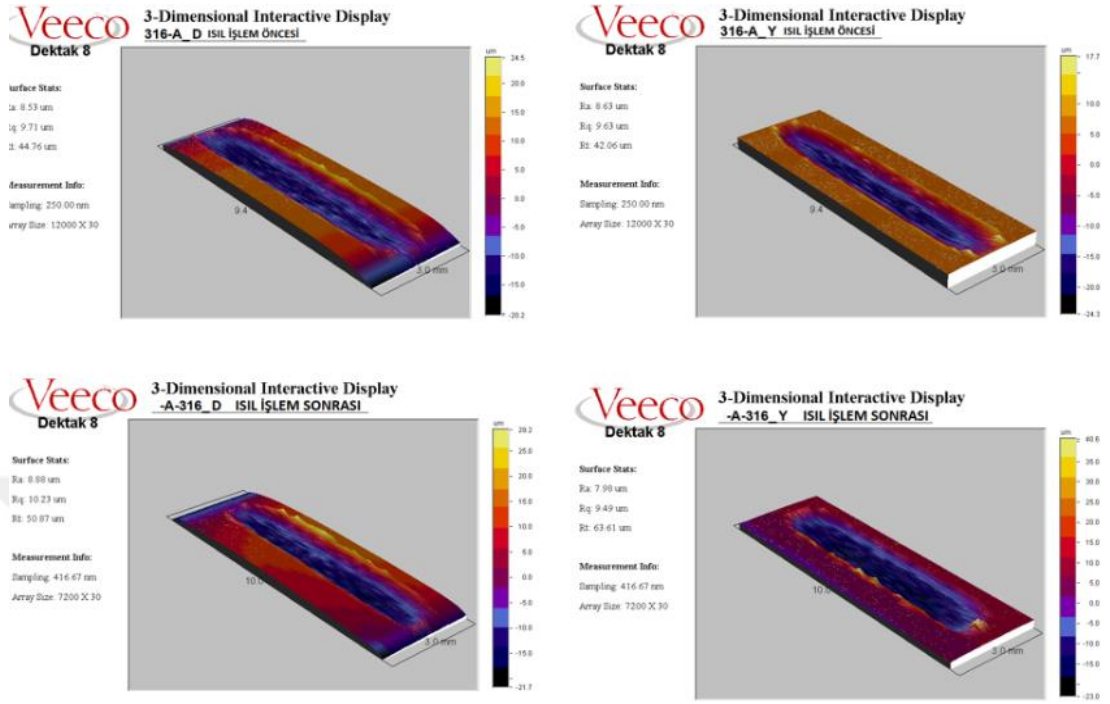
**Şekil 7.18:** 307 Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki yatay ve dikeydeki sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçlarına göre ısıl işlem öncesi ve sonrası değerleri.

307 paslanmaz çeliği ısıl işlem öncesinde, sürtünme katsayısı başlangıçta orta seviyede ve zamanla dalgalı bir seyir izliyor. Penetrasyon derinliği ise oldukça düşük ve stabil kalıyor. Isıl işlem sonrasında ise sürtünme katsayısında hafif düşüş görülmüş, penetrasyon derinliğinde ise daha belirgin bir artış ortaya çıkmıştır.

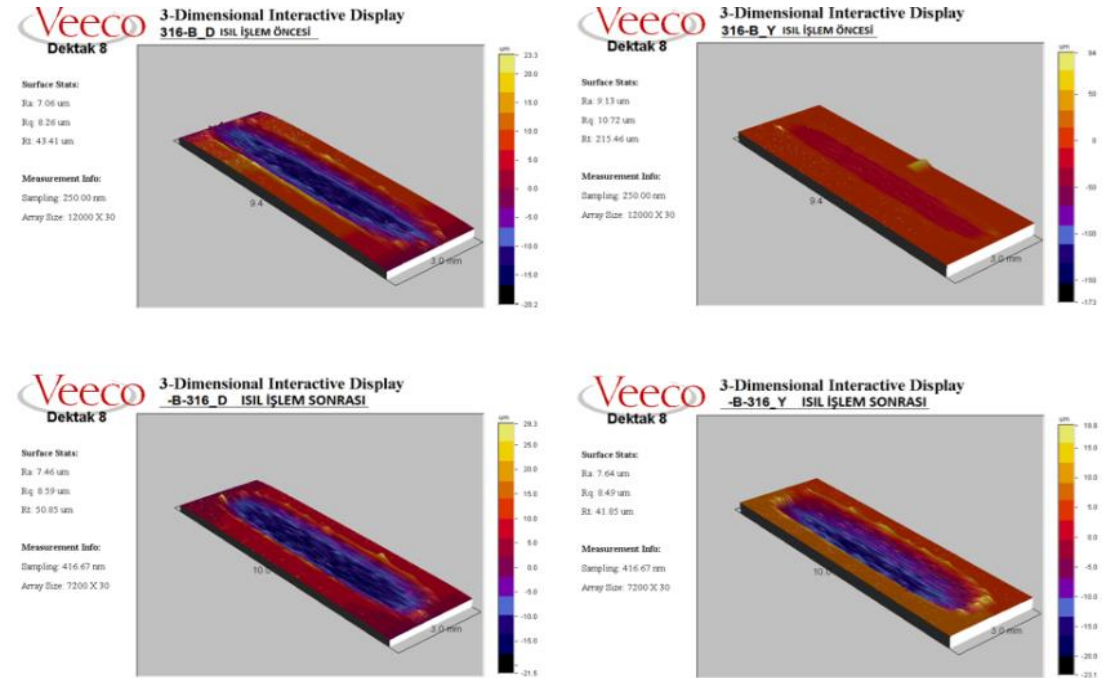


**Şekil 7.19:** 307 Paslanmaz çeliğinin sürtünme katsayıları ve penetrasyon derinliği sonuçları.

## 7.3. Yüzey Analiz Sonuçları

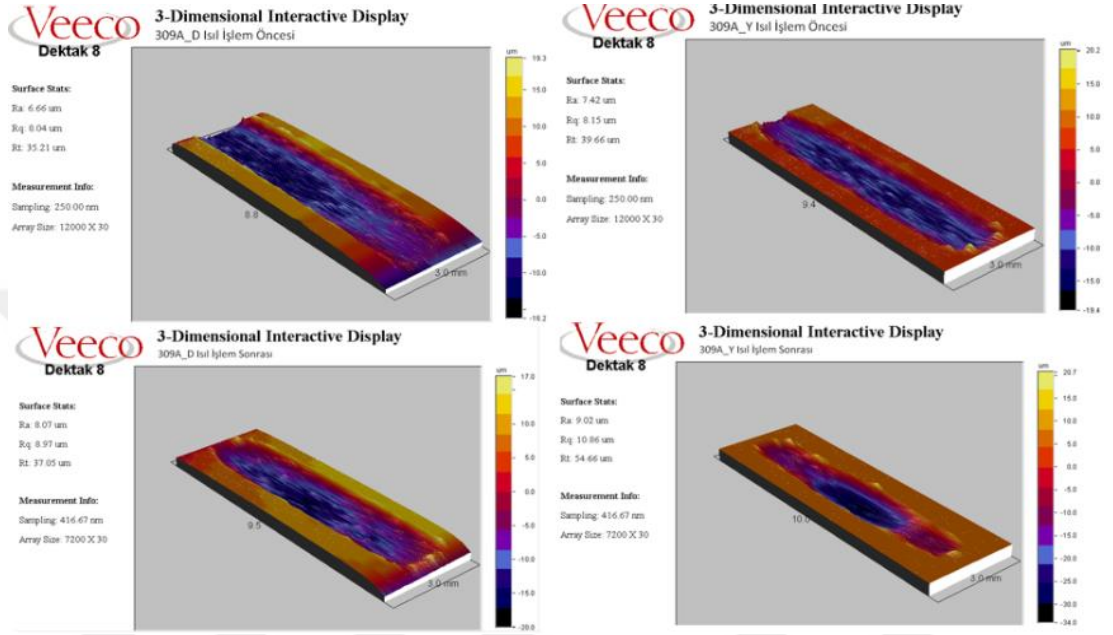


Şekil 7.20: 316L Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.

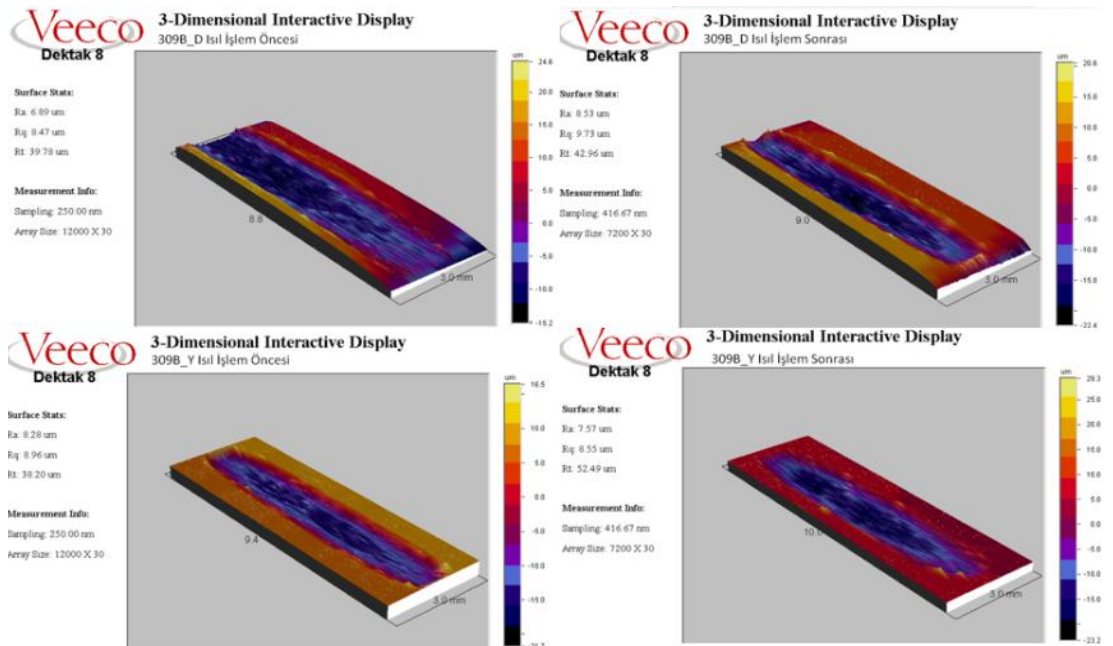


Şekil 7.21: 316L Paslanmaz çeliğinin B yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.

316L paslanmaz çeliği ısıl işlem öncesinde; yüzey daha düzensiz, belirgin dalgalanmalar içeriyor. Kırmızı ve turuncu alanlar yüksek pürüzlülüğü temsil ediyor. Isıl işlem sonrasında ise daha homojen ve düzgün bir yüzey yapısı gözlemleniyor. Pürüzlülük seviyesinde düşüş var. Mavi ve yeşil tonları daha baskın gözüküyor. Isıl işlem yüzey düzgünlüğünü artırmış, aşındırıcı yüzey yapısını azaltmış.

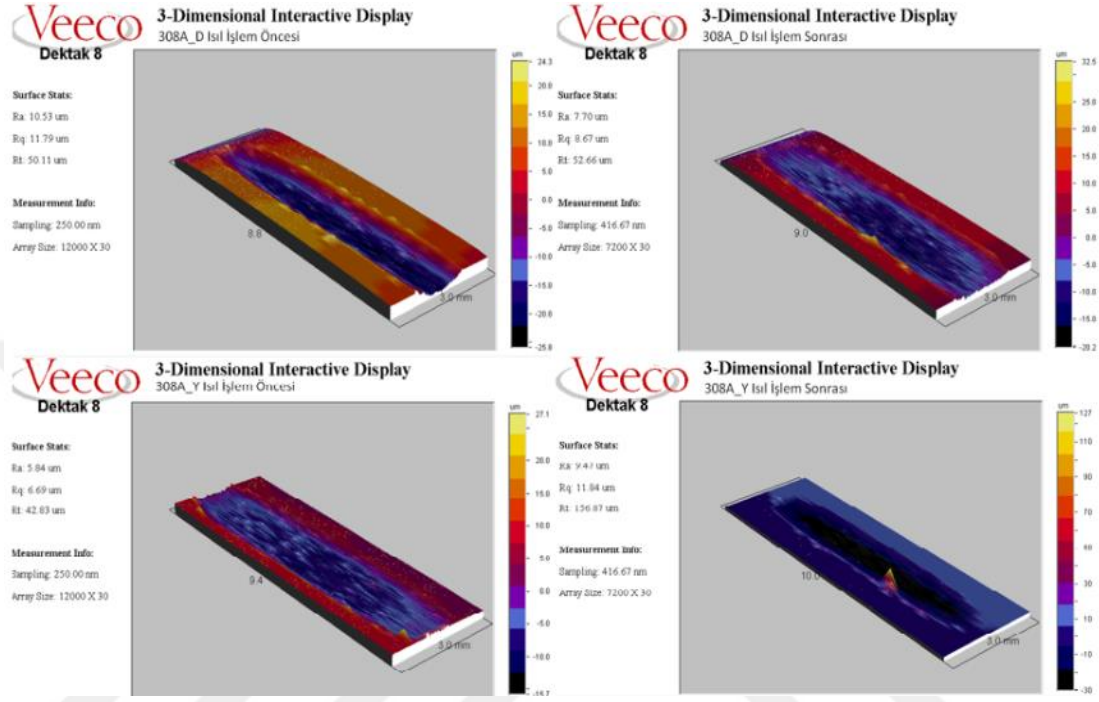


Şekil 7.22: 309 Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.

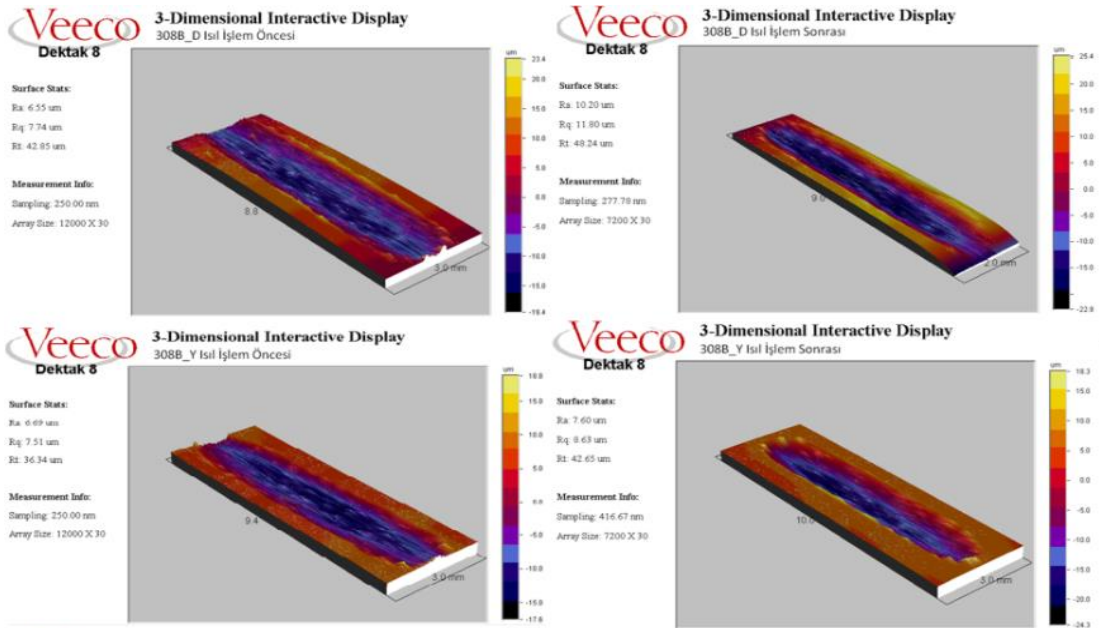


Şekil 7.23: 309 Paslanmaz çeliğinin B yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.

309 paslanmaz çeliğinin ısıtım işlem öncesinde genel olarak yüzeyde yüksek pürüzlülük mevcut. Yüksek tepe ve çukur alanlar dikkat çekiyor. Isıtım işlem sonrasında ise daha dengeli bir yüzey görünümü mevcut. Pürüzler ve aşırı yükseklik farkları azalmış. Isıtım işlem yüzeyin homojenleşmesini sağlamış ve pürüzlülüğü önemli ölçüde azaltmış.

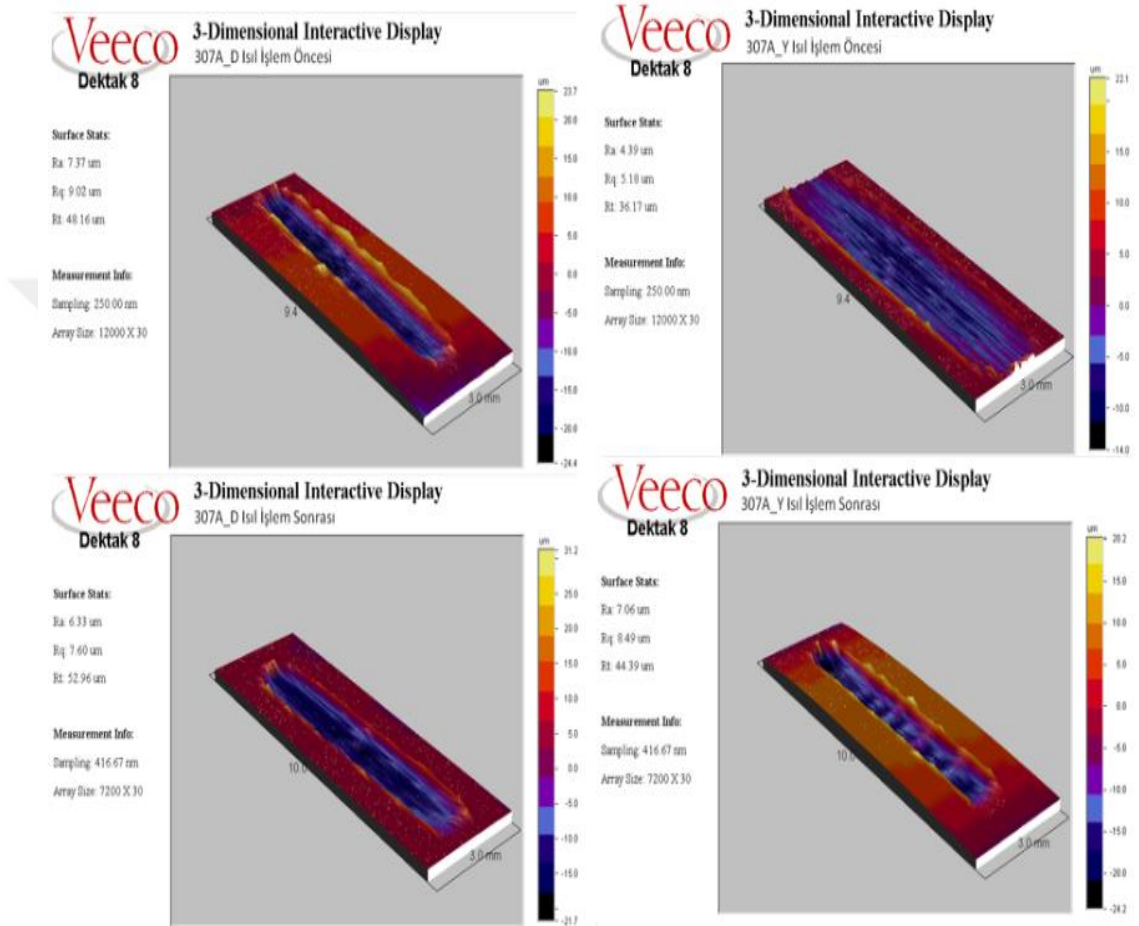


Şekil 7.24: 308 Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.



Şekil 5.25: 308 Paslanmaz çeliğinin B yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.

308 paslanmaz çeliğinde ısıtım işlem öncesi yüzey oldukça düzensiz; kırmızı ve turuncu bölgeler baskın. Derin çukur alanlar da göze çarpıyor. Isıtım işlem sonrasında yüzey yapısında belirgin bir iyileşme var. Daha pürüzsüz bir yapı mavi ve yeşil tonlarıyla ifade edilmiş. Isıtım işlem burada yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde azaltarak homojen bir yapı sağlamış.



**Şekil 5.26:** 307 Paslanmaz çeliğinin A yüzeyindeki dikey ve yatay yüzey analiz sonuçları.

307 paslanmaz çeliğinde ısıtım işlem öncesi yüzey genel olarak daha düzensiz ve karışık yükseklik profillerine sahip. Çukur ve tepe bölgeleri belirgin. Isıtım işlem sonrasında ise yüzey daha dengeli ve düzleşmiş. Turuncu ve kırmızı bölgelerin yerini daha fazla mavi ve yeşil tonlar almış.

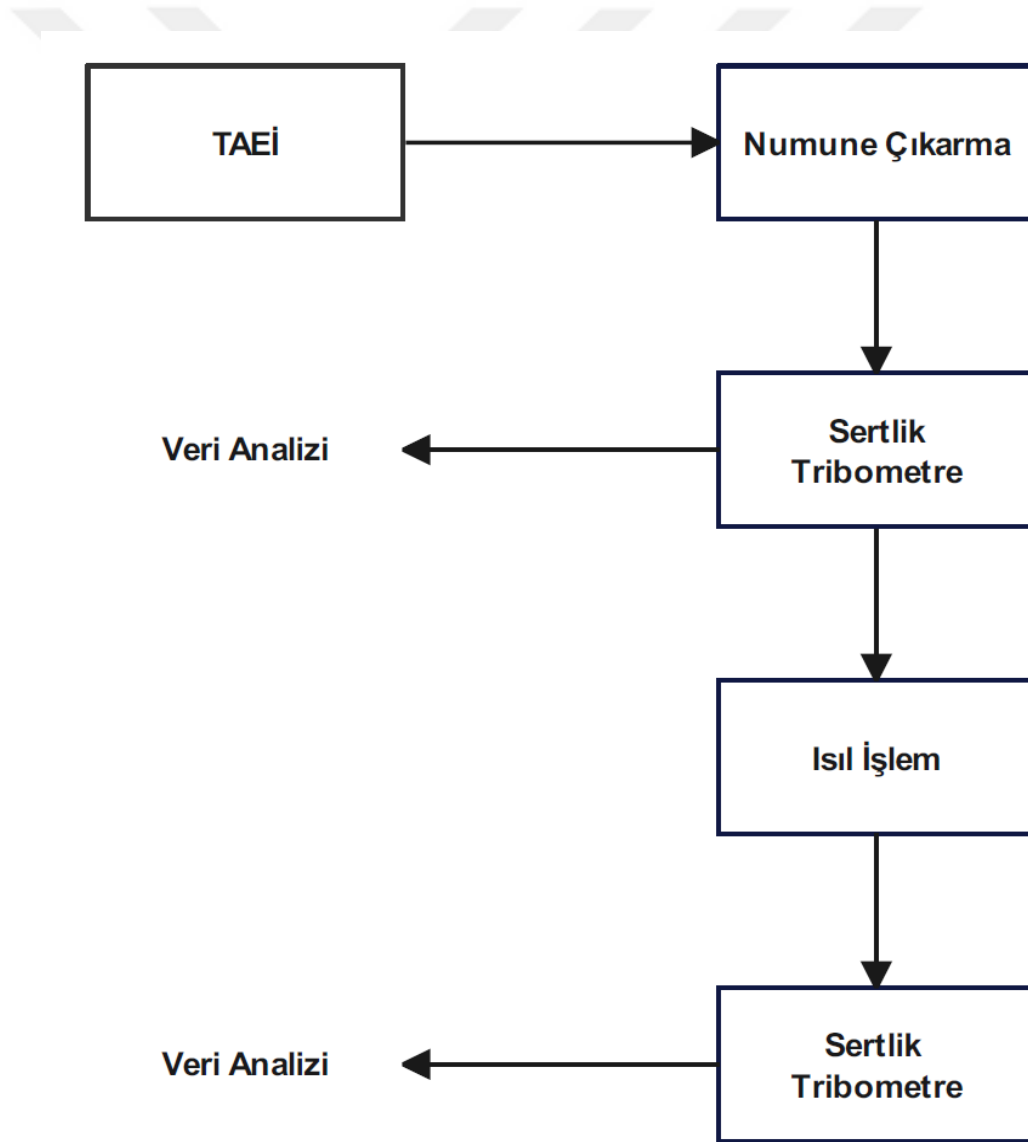
316L paslanmaz çeliği, diğer çeliklere göre daha stabil bir standart sapma göstermiştir. 307 çeliği sertliği artırırken, 316L, 309 ve 308 çeliklerinde genellikle azalma görülmektedir. Penetrasyon derinlikleri baz alındığında; Isıtım işlem sonrasında özellikle

308 ve 307 çeliklerinde bu artış daha belirgin. Sürtünme katsayıları bakımından ısıtılma işlemi etkisi çok görülmemektedir. Ancak 307 çelik türünde hafif bir düşüş eğilimi dikkat çekmiştir. Yüzey analizleri sonucunda ise ısıtılma işlemi sonrası 308 ve 309 çelik gruplarında bu iyileşme daha belirgin.



## 8. SONUÇLAR

Tez çalışmamız kapsamında gedik kaynak firmasında üretilen numunelerimiz üniversitemizin laboratuvarlarında sırasıyla malzeme analizi, sürtünme ve aşınma, yüzey analizi, sertlik testleri yapılmıştır. Bu testlerden alınan veriler kaydedilmiştir. Sonrasında gerilim giderme tavlamasına tabi tutulup aynı testler yine üniversitemizdeki aynı cihazlarda ve aynı parametrelerde tekrar test edilmiştir. Çıkan veriler sonucunda karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 6.1’de numune üzerinde yapılan işlemler verilmiştir.



Şekil 8.1: Numune üzerinde yapılan işlemler.

316L, 309 ve 308 paslanmaz çelikleri için ısıtılma işlemi sonucunda sertlik değerlerinde düşmüştür. 307 paslanmaz çeliği için ısıtılma işlemi sonucunda sertlik artmıştır. Sertlik düşüşünün en belirgin olanı 308 paslanmaz çeliğidir. 307 paslanmaz çeliğinde standart sapma önemli ölçüde artış göstermiştir. Bu, ısıtılma işlemi sonrası numuneler arasındaki sertlik farklarının oldukça fazla olduğunu gösterir. 309 ve 308 paslanmaz çeliklerinde standart sapma artmıştır, bu da daha dengesiz sertlik sonuçları karşılaştığı ifade eder. 316L paslanmaz çeliği, diğer çeliklere göre daha stabil bir standart sapma göstermiştir. Sonuç olarak, ısıtılma işleminin her çelik türünde farklı etmenler ortaya çıkardığı açıkça görülmektedir. 307 çeliği sertliği artırırken, 316L, 309 ve 308 çeliklerinde genellikle azalma görülmektedir. Bu değişimler, malzeme seçiminde önemli bir faktör olarak göz önünde alınmalıdır. Penetrasyon derinlikleri baz alındığında; Isıtılma işlemi sonrası tüm çelik türlerinde penetrasyon derinliklerinin daha hızlı ve düzenli arttığı dikkat çekiyor. Özellikle 308 ve 307 çeliklerinde bu artış daha belirgin. Sürtünme katsayıları bakımından ısıtılma işlemi sürtünme katsayıları üzerinde büyük bir etki göstermemiştir. Ancak 307 çelik türünde hafif bir düşüş eğilimi dikkat çekmiştir. Yüzey analizleri sonucunda ise ısıtılma işlemi sonrası tüm çelik türlerinde yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve daha homojen bir yapıya dönüştüğü açıkça gözlemleniyor. Özellikle 308 ve 309 çelik gruplarında bu iyileşme daha belirgin. Isıtılma işlemi sonrası mavi ve yeşil tonların artışı, yüzey homojenliğinin arttığını gösteriyor.

## KAYNAKLAR

- [1] ASTM-International, (2012), ASTM Standard F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies
- [2] Rashid A. A., Ahmed W., Khalid M. Y., Koç M., (2021), “Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications”.
- [3] Gonzalez-Gutierrez J., Cano S., Schuschnigg S., Kukla C., Sapkota J., Holzer C., (2018), “Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives”.
- [4] Elkaseer A., Chen. K. J., Janhsen J., Refle O., Hagenmeyer V., Scholz S., (2022), “Material jetting for advanced applications: A state-of-the-art review, gaps and future directions”.
- [5] Zhao K., SU Z., YE Z., Cao W., Pang J., Wang X., Wang Z., Xu X., Zhu J., (2023), “Review of the types, formation mechanisms, effects, and elimination methods of binder jetting 3D-printing defects”.
- [6] Dilek E., Yıldırım M. İ., Uzun M., (2021), Tekstilna Industrija, “Additive Manufacturing (3D Printing) In Technical Fashion Industry Applications”.
- [7] Qin J., Hu F., Liu Y., Witherell P., Wang C. C.L., Rosen D. W., Simpson T. W., Lu Y., Tang Q., (2022), “Research and application of machine learning for additive manufacturing”.
- [8] Özkan D. Ç., (2019), Mühendis ve Makine, “Hızlı Prototipleme Teknolojisinin Gelişimi, Çeşitleri Ve İmalat Sektöründe Sağladığı Avantajlar”.
- [9] Web 1, (2025), <https://www.amamweb.org/Processes/PowderBedFusion.aspx> (Erişim tarihi: 30.01.2025)
- [10] Web 2, (2025), <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/> (Erişim tarihi: 23.01.2025)
- [11] International Organization for Standardization (2018). Additive manufacturing General principles Terminology. ISO/ASTM 52900.
- [12] Ahn D., (2020), “Directed Energy Deposition (DED) Precess: State of the Art”.
- [13] Web 3, (2018), <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/introduction-to-additive-processes> (Erişim tarihi: 30.01.2025)
- [14] Özel T., Shokri H., Loizeau R., (2023), “A Review on Wire-Fed Directed Energy Deposition Based Metal Additive Manufacturing”.

[15] Kong Y., Zhao L., Zhu L., Huang H., (2022), “The selection of laser beam diameter in directed energy deposition of austenitic stainless steel: A comprehensive assessment”.

[16] Web 4, (2025), [https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology?view=category&id=8#:~:text=Directed%20Energy%20Deposition%20\(DED\)%20is,leaving%20deposited%20material%20on%20the](https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology?view=category&id=8#:~:text=Directed%20Energy%20Deposition%20(DED)%20is,leaving%20deposited%20material%20on%20the) (Erişim tarihi: 30.01.2025)

[17] Chen X., Wang C., Ding J., Qu R., Wang Y., Pardal G., Williams S., (2023), “Thermal fluid dynamics of the effect of filler wire on deposition rate and bead formation intending plasma arc-based DED”.

[18] Li K., Chen W., Gong N., Pu H., Luo J., Zhang D. Z., Murr L. E., (2023), “A critical review on wire-arc directed energy deposition of high-performance steels”.

[19] Ashokkumar M., Thirumalaikumarasamy D., Sonar T., Deepak S., Vignesh P., Anbarasu M., (2022), “An overview of cold spray coating in additivemanufacturing, component repairing and otherengineering applications”.

[20] Rosli N. A., Alkahari M.R., Abdollah M. F., Maidin S., Ramli F. R., Herawan S. G., (2021), “Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process”.

[21] Ralph B., (1925), “Method of making decorative articles”, US patent no. 1533300.

[22] Sharifi S. S., Fritsche S., Holzinger C., Enzinger N., (2023), “Selection of Parameters for Optimized WAAM Structures for Civil Engineering Applications”.

[23] Treutler K., Wesling V., (2021), “The Current State of Research of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A Review”.

[24] Web 5, (2025), <https://www.metalworm.com/tel-ark-eklemeli-imalat-waam/> (Erişim Tarihi: 26.01.2025)

[25] Soydan Y., (2016), “Elektrikli ve konvansiyonel otomobil tribolojisi: Yeni eęilimler ve uygulamalar”.

[26] Akselsen O. M., Bjørge R., Anes h. W., Reb X., Nyhus B., (2022), “Microstructure and Properties of Wire Arc Additive Manufacturing of Inconel 625”.

[27] Hemachandra M., Thapliyal S., Mahammod B. P., Kumar A., (2024), “Influence of Microstructural Characteristics on the Mechanical and Wear Behavior of Wire Arc Additive Manufactured and Cast Eutectic Al-Si Alloy”.

[28] Güler S., Serindaę H. T., am G., (2022), Mühendis ve Makina, “Tel Ark Eklemeli İmalat: Son Gelişmeler ve Deęerlendirmeler”.

- [29] Adebayo A., Mehnen J., Tonnellier X., (2013), ‘‘Effects of solid lubricants on wire and arc additive manufactured structures’’.
- [30] ASM International, (2014), Heat Treating Handbook
- [31] Totten G. E., (2006), Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies
- [32] Davis J. R., (2002), ASM International, Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics
- [33] Zhang C., (2020), Wire Arc Additive Manufacturing of Stainless Steels: A Review
- [34] Le V. T., Mai D. S., Doan T. K., Paris H., (2020), Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties
- [35] Segovia-Guerrero L., Baladés N., Attard B., Nicolás M. D., Scotti A., Zammit A., Sales D. L., (2024), Multi-material stainless steel fabrication using plasma wire arc additive manufacturing
- [36] Rahimi A., Yazdizadeh M., Ara M. V., Pouranvari M., (2024), CMT wire-arc additive manufacturing of 310 austenitic stainless steel: Microstructure-properties relationships
- [37] Alrumayh A., (2024), Wear Performance of Wire Arc AM SS 316L Plate For Different Thermal History Regions
- [38] Koli Y., Aravindan S., Rao P. V., (2023), Wear Characteristics of Wire-Arc Additive Manufactured SS308L
- [39] Haden C. V., Zeng G., Carter III F.M., Ruhl C., Krick B.A., Harlow D. G., (2016), Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties
- [40] Laghi V., Palermo M., Gasparini G., Girelli V. A., Trombetti T., (2020), Experimental results for structural design of Wire-and-Arc Additive Manufactured stainless steel members
- [41] Kumar R., Aravind A., Jerome S., (2025), Evaluation on Mechanical and Metallurgical Properties of Wire Arc Additive Manufactured ER 2209 Duplex Stainless Steel for Automotive and Marine Applications
- [42] Sharma G., Rathore S., Kumar H., Yadav K. K., (2024), Wear Properties of Wire and Arc Additive Manufacturing Components: A review on recent developments on Processes, Materials and Parameters
- [43] Vilarinho L. O., (2022), Characterization of an austenitic stainless steel preform deposited by wire arc additive manufacturing

[44] Dash S. K., (2019), Study of Wire Arc Additive Manufacturing With Aluminum Alloy 2219

[45] Murugesan K., Singaravelu D. L., Vingeshwaran S., Vijay G., Arwindan V., (2023), Mechanical and Tribological Characterization of Additive Manufactured SS316L Alloy

[46] Siddiqui N. A., Muzamil M., Jamil T., Hussain G., (2024), Heat sources in wire arc additive manufacturing and their impact on macro-microstructural characteristics and mechanical properties – An overview

[47] Web 6, (2025), <https://merlab.metu.edu.tr/en/hardness-testers> (Erişim tarihi: 30.01.2025)

[48] Web 7, (2025), <https://www.gtu.edu.tr/kategori/2302/0/display.aspx> (Erişim tarihi: 30.01.2025)

[49] Web 8, (2025), <https://www.gtu.edu.tr/kategori/2301/0/display.aspx> (Erişim tarihi: 30.01.2025)

[50] Web 9, (2025), <https://www.gtu.edu.tr/kategori/2299/0/display.aspx> (Erişim tarihi: 30.01.2025)

## ÖZGEÇMİŞ

Baki Berkay UĞUZ, 2021 yılında Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2022 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimi sırasında erasmus kapsamında University of Szeged Macaristan'da eğitimini tamamladı. Başlıca çalışma alanları proses imalatı ve tasarımı, süperkritik ekstraksiyon sistemlerinin imalatı ve tasarımıdır.



## TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

Uğuz B.B., Önler R., Turgut B., Gürol U., (2025), ‘‘Tel Ark Eklemeli İmalat Yöntemi İle Üretilen Paslanmaz Çelik Numunelerin Tribolojik Davranışlarının İncelenmesi’’  
4. Uluslararası Malzeme Mühendisliği ve İleri İmalat Teknolojileri Kongresi (IMEAMTC'25), İstanbul, Türkiye, 26 Ocak.

