

T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ER110 METAL ÖZLÜ TEL KULLANILARAK WAAM  
PARÇALARI İLE ZİRH ÇELİĞİ PLAKALARI ARASINDAKİ  
BENZER VE BENZER OLMAYAN KAYNAK  
BİRLEŞİMLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fatih KAYMAK**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**AĞUSTOS 2025  
İSTANBUL**



T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ER110 METAL ÖZLÜ TEL KULLANILARAK WAAM  
PARÇALARI İLE ZİRH ÇELİĞİ PLAKALARI ARASINDAKİ  
BENZER VE BENZER OLMAYAN KAYNAK  
BİRLEŞİMLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fatih KAYMAK**  
(221210001)

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Uğur GÜROL**

**2. Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ozan ÇOBAN**

**İstanbul 2025**



T.C.  
**İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ**  
**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü**

**Jüri Tez Onay Formu**

21.08.2025

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ**

Bu çalışma 21.08.2025 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

**Doç. Dr. Uğur GÜROL**

Danışman

İstanbul Gedik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Ozan ÇOBAN**

2. Danışman

İstanbul Gedik Üniversitesi

**Prof. Dr. Mustafa KOÇAK**

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

**Prof. Dr. Gürel ÇAM**

Üye (İmza)

İskenderun Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAŞLAYICI**

Üye (İmza)

İstanbul Medipol Üniversitesi

## YEMİN METNİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Er110 Metal Özlü Tel Kullanılarak Waam Parçaları İle Zırh Çeliği Plakaları Arasındaki Benzer Ve Benzer Olmayan Kaynak Birleşimlerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere uygun şekilde tarafımdan yazıldığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, yararlandığım eserlerin tamamının kaynaklarda gösterildiğini ve çalışmamın içinde kullanıldıkları her yerde bunlara atıf yapıldığını, patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını belirtir ve bunu onurumla doğrularım. (21.08.2025)

Fatih KAYMAK

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>x</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ZIRH ÇELİKLERİ</b> .....	<b>3</b>
<b>3. KAYNAK</b> .....	<b>6</b>
3.1 Katı Hal Kaynak Yöntemleri .....	7
3.1.1 Direnç kaynağı .....	7
3.1.2 Difüzyon kaynağı .....	8
3.1.3 Sürtünme kaynağı .....	8
3.1.4 Sürtünme – karıştırma kaynağı .....	9
3.2 Ergitme Kaynak Yöntemleri .....	9
3.2.1 Tozaltı kaynak yöntemi.....	9
3.2.2 Elektrik ark kaynak yöntemi.....	10
3.2.3 Lazer kaynak .....	11
3.2.4 Plazma ark kaynağı.....	11
3.2.5 Elektron ışın kaynağı .....	12
3.2.6 Oksi-asetilen gaz ergitme kaynağı .....	12
3.2.7 Gazaltı ark kaynağı .....	13
3.2.8 MIG (Metal inert gaz) kaynağı .....	14
3.2.9 MAG (Metal aktif gaz) kaynağı.....	14
3.2.10 TIG (Tungsten inert gaz) kaynağı .....	15
3.3 Robotik Kaynak .....	16
3.3.1 Robotik MIG/MAG kaynağı avantajları.....	16
3.4. Kaynak Kabiliyeti .....	17

3.5 Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti.....	17
<b>4. LİTERATÜR ÖZETİ.....</b>	<b>19</b>
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>24</b>
5.1 Ana Malzeme ve Kaynak Sarf Malzeme Seçimi .....	24
5.2 Kaynak Düzeneklerinin Hazırlanması .....	25
5.3 Tahribatsız Muayene Yöntemleri (NDT).....	28
5.3.1. Gözle muayene (VT).....	28
5.3.2. Sıvı penetrant testi (PT) .....	28
5.3.3. Radyografik muayene (RT).....	28
5.4 Tahribatlı Muayene Yöntemleri (DT).....	29
5.4.1 Çekme testi.....	29
5.4.2 Sertlik testi .....	30
5.5. Metalografik Muayene .....	30
5.5.1. Metalografik numune hazırlığı .....	30
5.5.2 Makroyapı İncelemesi.....	31
5.5.3. Mikroyapı İnceleme .....	32
<b>6. SONUÇLAR .....</b>	<b>34</b>
6.1. Tahribatsız Test Sonuçları .....	34
6.1.1 Görsel muayene ve sıvı penetrant test sonuçları .....	34
6.1.2 Radyografik test sonuçları.....	35
6.2. Makroyapı İnceleme.....	35
6.3. Sertlik Testi Sonuçları .....	36
6.4. Çekme Testi Sonuçları .....	38
6.5. Mikroyapı İnceleme .....	40
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>43</b>
7.1. Sonuçlar .....	43
7.2 Öneriler .....	44
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>46</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>49</b>

## KISALTMALAR

<b>AF</b>	: İğnemsli ferrit
<b>CE</b>	: Karbon eşdeğeri
<b>CGHAZ</b>	: Kaba taneli ısıdan etkilenen bölge
<b>FGHAZ</b>	: İnce taneli ısıdan etkilenen bölge
<b>GBF</b>	: Tane sınırı ferriti
<b>GMAW</b>	: Gaz metal ark kaynağı
<b>HIC</b>	: Hidrojen kaynaklı çatlaklar
<b>IEB</b>	: Isıdan etkilenen bölge
<b>MAG</b>	: Metal aktif gaz
<b>MIG</b>	: Metal soy gaz
<b>PF</b>	: Poligonal ferrit
<b>TIG</b>	: Tungsten soy gaz
<b>WAAM</b>	: Tel ark eklemeli imalat

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b>Sayfa No.</b>
Çizelge 5.1: Kaynak Plakalarının Kimyasal Kompozisyonu (% Ağırlıkça) .....	24
Çizelge 5.2: Kaynak Plakalarının Mekanik Özellikleri .....	25
Çizelge 5.3: Kaynak Parametreleri .....	27
Çizelge 5.4: Dağlayıcı İçerik, Amaç ve Kullanım Şekilleri .....	31
Çizelge 6.1: Çekme Testi Sonuçları .....	38



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 2.1: Zırh Çelikleri Kullanım Alanları.....	4
Şekil 3.1: Kaynak İşlemi.....	6
Şekil 3.2: Direnç Kaynağı .....	7
Şekil 3.3: Difüzyon Kaynağı .....	8
Şekil 3.4: Sürtünme Kaynağı .....	8
Şekil 3.5: Sürtünme-Karıştırma Kaynağı .....	9
Şekil 3.6: Tozaltı Kaynak Yöntemi .....	9
Şekil 3.7: Elektrik Ark Kaynak Yöntemi .....	10
Şekil 3.8: Lazer Kaynak Yöntemi .....	11
Şekil 3.9: Plazma Ark Kaynağı .....	11
Şekil 3.10: Elektron Işın Kaynağı .....	12
Şekil 3.11: Oksi-Asetilen Gaz Ergitme Kaynağı .....	12
Şekil 3.12: MIG Kaynak Yöntemi .....	14
Şekil 3.13: MAG Kaynak Yöntemi .....	14
Şekil 3.14: TIG Kaynak Yöntemi .....	15
Şekil 3.15: Robotik Kaynak .....	16
Şekil 5.1: ER110 WAAM Duvarı.....	25
Şekil 5.2: Kaynak Ağız Tasarımlarının Şematik Gösterimi .....	26
Şekil 5.3: Manyetiklik Giderme İşlemleri.....	27
Şekil 5.4: Çekme Testi Cihazı.....	29
Şekil 5.5: Sertlik Testi Cihazı .....	30
Şekil 5.6: Metalografik Numune Hazırlama İşlemleri a) Zımparalama b) Dağlama .	31
Şekil 5.7: Makro Görüntüleme Cihazı .....	32
Şekil 5.8: Mikro Görüntüleme Cihazı.....	33
Şekil 6.1: Kaynaklı Plaka Görüntüsü .....	34
Şekil 6.2: Radyografik Test Sonuçları .....	35
Şekil 6.3: P500-WAAM ER110 Makro İnceleme Görüntüsü .....	36
Şekil 6.4: Sertlik Test Sonuçları .....	38

Şekil 6.5: Çekme Testi Sonuçları .....	40
Şekil 6.6: Mikroyapı İnceleme Görüntüleri 20X a) WAAM Plakası BM bölgesi b) P500 BM bölgesi c) Kaynak Metal, -WAAM Geçiş d) Kaynak Metali Bölgesi e) Kaynak Metali- P500 Geçiş .....	40
Şekil 6.7: Mikroyapı İnceleme Görüntüleri 50X a) WAAM Plakası BM bölgesi b) P500 BM bölgesi c) Kaynak Metal, -WAAM Geçiş d) Kaynak Metali Bölgesi e) Kaynak Metali- P500 Geçiş .....	41



# ER110 METAL ÖZLÜ TEL KULLANILARAK WAAM PARÇALARI İLE ZIRH ÇELİĞİ PLAKALARI ARASINDAKİ BENZER VE BENZER OLMAYAN KAYNAK BİRLEŞİMLERİNİN İNCELENMESİ

## ÖZET

Zırh çelikleri, yüksek mukavemet ve darbe dayanımı gerektiren savunma sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Protection 500 zırh çeliği, yüksek sertlik, yüksek mukavemet, kaynaklanabilirlik, yüksek tokluk ve balistik özellikleri nedeniyle savunma sanayiinde savaş alanında oluşabilecek tehditlere karşı zırh malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Savunma sanayinde kullanılan bu tür araçlar karmaşık tasarımları nedeniyle tek parça üretilmemekte, bu nedenle kaynak işlemleriyle üretilmesi zorunludur. Bu çeliklerin kaynak işlemi sırasında oluşan ısı çevrimi sebebiyle ısıdan etkilenen bölgede yumuşama gerçekleşir ve ana metale göre daha düşük mukavemetli bir yapı ortaya çıkarır.

Bu çalışmada, ferritik ER110S-G elektrodu kullanılarak Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) yöntemiyle üretilen parça ile MIL-A-46100 standardına tabi haddelenmiş homojen zırh çeliği (Protection 500 kalite), robotik GMAW (Gaz Metal Ark Kaynağı) yöntemiyle birleştirilmiştir. Kaynaklı yapılar, mikro yapı incelemesi, mikrosertlik testi ve çekme testi uygulanarak karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, zırh çeliklerinin kaynağında yaygın olarak tercih edilen ferritik ER110S-G dolgu metalinin, WAAM yöntemiyle yapılan üretimde de tatmin edici sonuçlar sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, WAAM yöntemiyle üretilmiş parçaların zırh çelikleriyle optimize edilmiş parametreler altında yapılan benzer olmayan (dissimilar) kaynaklarında beklenen mekanik özelliklerin sağlanabileceği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Zırh çeliği, Protection 500, Ferritik ER110S-G dolgu metali, Tel Ark Eklemeli İmalat (WAAM), Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAW), Dissimilar kaynak, Mekanik testler*

# INVESTIGATION ON THE SIMILAR AND DISSIMILAR WELD JOINTS BETWEEN WAAM PARTS AND ARMOUR STEEL PLATE USING ER110 METAL CORED WIRE

## ABSTRACT

Armor steels are widely used in defense industry applications that require high strength and impact resistance. Protection 500 armor steel is commonly employed as an armor material in the defense sector due to its high hardness, high strength, weldability, superior toughness, and ballistic performance, providing effective protection against threats encountered in combat environments. Due to the complex designs of defense vehicles, these components cannot be manufactured as a single piece and therefore must be joined through welding processes. However, during the welding of such steels, the thermal cycle introduced leads to softening in the heat-affected zone (HAZ), resulting in a region with lower strength compared to the base metal.

In this study, the part produced by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) using ferritic ER110S-G electrode and rolled homogeneous armor steel (Protection 500 quality) subject to MIL-A-46100 standard were joined by robotic GMAW method. Welded structures were characterized by performing microstructural examination, microhardness test and tensile test. The obtained results revealed that ferritic ER110S-G filler metal, which is widely preferred in welding armor steels, also provides satisfactory results for production with WAAM, and also dissimilar welding of parts produced by WAAM with armor steels with optimized parameters can provide the expected mechanical properties.

**Keywords:** *Armor steel, Protection 500, Ferritic ER110S-G filler metal, Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), Gas Metal Arc Welding (GMAW), Dissimilar welding, Mechanical testing*



## 1. GİRİŞ

Savunma sanayiinde yüksek balistik direnç, darbe tokluğu ve mekanik mukavemet gereksinimlerinin aynı anda karşılanması, malzeme mühendisliğini sürekli daha gelişmiş çözümler üretmeye zorlamaktadır. Özellikle zırh çelikleri gibi yüksek sertlikte alaşımların, sadece mukavemet özellikleriyle değil, aynı zamanda kaynaklanabilirlik, işlenebilirlik, balistik performans ve servis ömrü açısından da optimize edilmesi, modern mühendislik uygulamalarında temel bir gereklilik hâline gelmiştir [1,2]. Bu doğrultuda geliştirilen Protection 500 gibi yerli ve milli zırh çelikleri, yalnızca balistik direnç açısından değil, üretim yöntemlerine uyum potansiyeliyle de dikkat çekmektedir.

Yüksek sertliğe sahip zırh çeliklerinin kaynaklanabilirliği ise hâlen mühendislik açısından çözülmesi gereken kritik bir sorundur. Özellikle ısı girdisine duyarlı olan bu tür malzemelerde, kaynak bölgesinde oluşan IEB (Isıdan Etkilenen Bölge) yumuşaması, tane irileşmesi, sertlik düşüşü, hidrojen kaynaklı çatlaklar (HIC) ve gerilim yığılmaları gibi olumsuz etkiler, birleşim bölgesinin performansını düşürerek yapısal bütünlüğü tehdit etmektedir. Bu durum, hem kaynak parametrelerinin hassas bir şekilde kontrolünü hem de uygun dolgu malzemesinin seçimini zorunlu kılmaktadır [3].

Öte yandan, katmanlı üretim teknolojilerinin (Additive Manufacturing) sanayiye entegrasyonu ile birlikte yeni nesil malzeme çözümleri ve üretim kabiliyetleri doğmuştur. Özellikle Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) yöntemi; kaynak tabanlı, yüksek hacimli ve karmaşık geometrili yapıların üretiminde dikkat çeken, uygun maliyetli ve çevresel etkisi düşük bir teknolojidir. WAAM yöntemi, özellikle niş uygulamalarda, karmaşık geometrilerin hızlı ve esnek üretimi açısından avantaj sağlarken; prosesin yüksek ısı girdisi nedeniyle ortaya çıkan mekanik zayıflamalar, kalıntı gerilmeler ve termal döngülerin neden olduğu mikroyapı heterojenliği gibi sınırlayıcı faktörler nedeniyle hâlâ araştırma ve geliştirme ihtiyacı doğurmaktadır.

Bu tez çalışması, literatürde oldukça sınırlı sayıda örneği bulunan ve Türkiye’de ilk kez uygulanan yenilikçi bir araştırmaya odaklanmaktadır. Çalışmanın temelinde, WAAM yöntemi ile ER110 kaynak teli kullanılarak katman katman üretilmiş yüksek mukavemetli bir metalik plakanın, yerli üretim olan Protection 500 zırh çeliği plakasıyla robotik GMAW (Gas Metal Arc Welding) yöntemiyle kaynakla birleştirilmesi yer almaktadır. Bu kapsamda, WAAM teknolojisinin üretim sonrası kaynaklanabilirliği değerlendirilmiş; zırh çeliği kaynaklı birleşimlerin mekanik dayanımı, sertlik profili ve mikroyapı özellikleri detaylı olarak analiz edilmiştir. Çalışma, hem ileri üretim teknolojilerinin (WAAM) hem de yerli zırh çeliği malzeme kullanımının kaynaklı birleştirmeye uygunluğunu irdeleyerek savunma sanayii ve metal eklemeli imalat teknolojileri için önemli bir mühendislik katkısı sunmayı amaçlamaktadır.

Çalışma kapsamında kullanılan WAAM-ER110 plaka, Gedik Kaynak A.Ş. Ar-Ge merkezi tarafından üretilmiş ve  $15 \times 150 \times 350$  mm boyutlarında hazırlanmıştır. Aynı şekilde, Türkiye’nin ilk milli zırh çeliği olarak geliştirilen Protection 500 plakaları, Millux Oy tarafından sağlanmıştır. Kaynak işlemi, Gedik Kaynak A.Ş.’nin Robotik Kaynak Uygulamaları Ar-Ge Merkezinde, 1.2 mm çaplı ER110 kaynak teli ve M21 gaz karışımı (Ar + CO<sub>2</sub>) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İşlem sırasında yaklaşık  $120 \pm 15$  °C ön ısıtma uygulanmış, pasolar arası sıcaklık 135–150 °C aralığında sabit tutulmuştur. Robotik sistem, kaynak işleminin tekrarlanabilirliğini artırırken, parametre kontrolünün hassas şekilde yönetilmesini sağlamıştır. Çalışmada kullanılan ER110 kaynak teli, orta-yüksek mukavemet sınıfında yer alması, saha uygulamalarında yaygın kullanılması ve Protection 500 ile uyumlu mekanik geçiş sunması nedeniyle seçilmiştir. Ayrıca bu seçim, ilerleyen çalışmalar için daha yüksek mukavemetli tellerin potansiyelinin değerlendirilmesi açısından referans niteliğindedir.

Özetle çalışmanın hedefi; WAAM ile üretilen bir plakanın yerli zırh çeliği ile robotik GMAW yöntemiyle kaynaklanabilirliğini teknik olarak değerlendirmek, oluşan birleşim bölgesinin mikroyapısını, sertlik dağılımını ve çekme dayanımını ortaya koyarak, bu tür birleşimlerin endüstriyel kullanıma uygunluğunu sorgulamaktır. Balistik testler, alternatif kaynak teknikleri veya ısıl işlemler bu tez kapsamı dışında tutulmuş olup, temel amaç üretilebilirlik ve mekanik bütünlük üzerindeki ilk teknik değerlendirmeyi yapmaktır.

## 2. ZIRH ÇELİKLERİ

Zırh çelikleri, farklı tipteki mermi darbelerine karşı çatlama ve kırılmaya direnç gösterebilmeleri nedeniyle zırhlı savaş araçlarında yaygın olarak kullanılan özel çelik sınıflarıdır. Temel olarak düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelik grubuna giren bu malzemeler, özellikle krom, nikel, molibden, mangan ve silisyum gibi alaşım elementleri ile zenginleştirilmiştir. Bu çeliklerde karbon oranının düşük tutulması; yüksek tokluk, iyi darbe dayanımı, kolay şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirlik gibi kritik özelliklerin sağlanmasına olanak tanımaktadır. Kullanıldıkları savunma ve güvenlik odaklı alanlar nedeniyle zırh çeliklerinin yalnızca yüksek mukavemet ve sertlik gibi statik mekanik özellikleri karşılması yeterli değildir; aynı zamanda ani darbe yükleri altında sünek davranış gösterebilecek seviyede geliştirilmiş tokluk özelliklerine de sahip olması gerekmektedir [4].

Zırh çeliklerinde kullanılan diğer alaşım elementleri, malzemenin mekanik özellikleri ve mikroyapısal yapısı üzerinde kritik etkilere sahiptir. Krom (Cr), sertleşebilirlik gereksinimlerine bağlı olarak belirli oranlarda ilave edilmekte ve grafitleşme eğilimini azaltmaktadır. Kobalt (Co), bazı çalışmalarda kırılma tokluğunu artırdığı bildirilen, ancak bazı araştırmalarda bu etkiyi göstermediği ifade edilen bir elementtir [5,6]. Vanadyum (V) ise güçlü bir karbür yapıcı olup tane inceltme yoluyla mikroyapı iyileştirmesine katkı sağlamaktadır. Nikel (Ni), östenit bölgesini genişleterek  $A_3$  ve  $A_1$  dönüşüm sıcaklıklarını düşürmekte ve böylece daha düşük pik sıcaklıklarda dahi martenzitik yapı oluşumuna olanak tanımaktadır. Ancak temperleme sonrasında iğnemsiz martenzit oluşumunu azaltmasına rağmen, kırılma tokluğu üzerinde olumsuz bir etki gösterebildiği de raporlanmıştır. Silisyum (Si), temperlenmiş martenzitte gevreklik oluşumunu geciktirirken, Mangan (Mn) sertleşebilirlik üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Ayrıca Bor (B), östenitleştirme sonrası hızlı su verme işlemiyle martenzitik ve beyritik dönüşümleri destekleyerek sertleşebilirliği artırır. Titanyum (Ti), Niobyum (Nb) ve Alüminyum (Al) gibi elementler ise karbür oluşumunu teşvik ederek malzemenin sertlik özelliklerinin gelişmesine katkıda bulunmaktadır [7,8].

Zırh çelikleri, mermilerin birden fazla darbesine karşı kırılmaya ve çatlamaya direnç göstermek amacıyla başlıca zırhlı savaş araçlarında tank, uçak, obüs, denizaltı gibi zırhlı araçlarda kullanılmaktadır.



**Şekil 2.1: Zırh Çelikleri Kullanım Alanları**

Zırh çeliklerinin üretim süreci; ergitme, alaşımlandırma, sürekli döküm, haddelme ve ısıl işlem olmak üzere beş temel aşamadan oluşmaktadır [4]. Bu üretim adımlarının her biri, elde edilen çeliğin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Özellikle ısıl işlem parametreleri ile kimyasal bileşim, zırh çeliklerinde orta düzeyde toklukla birlikte yüksek mukavemetin sağlanmasında belirleyici rol oynamaktadır. Bu iki temel faktör, mekanik özellikler üzerinde büyük etkisi bulunan mikroyapısal oluşumları da doğrudan şekillendirmektedir [9].

Dünya genelinde zırh çeliklerinin üretimi ağırlıklı olarak Amerikan askeri standartları olan MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 standartlarına göre gerçekleştirilmektedir. Bu standartlardan MIL-A-46100, yüksek sertliğe sahip zırh çeliklerini tanımlarken; MIL-A-12560 ise homojen haddelenmiş zırh çeliklerini (Rolled Homogeneous Armor – RHA) kapsamaktadır [10].

Uygulanan ısıl işlem yöntemine bağlı olarak zırh çelikleri genellikle Sınıf 1 ve Sınıf 2 olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Sınıf 1 zırh çelikleri, su veya yağ ortamında sertleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra temperleme aşamasından geçirilerek üretilmektedir. Buna karşılık Sınıf 2 çelikler, hava ortamında soğutma yoluyla sertleştirilmekte ve ardından temperleme işlemi

uygulanmaktadır. Bu iki sınıf arasındaki temel farklardan biri karbon eşdeğeri; Sınıf 1 çeliklerde karbon eşdeğeri genellikle maksimum 0,80 ile sınırlandırılırken, Sınıf 2 çeliklerde bu konuda belirli bir sınırlama bulunmamaktadır [11].

Zırhlı araçların üretiminde yaygın olarak Sınıf 1 çelikler tercih edilmektedir. Her iki sınıf benzer kimyasal bileşimlere sahip olmakla birlikte, Sınıf 2 çeliklere uygulanan yüksek sıcaklıklı ısıtma işlemleri sayesinde mekanik şok dayanımı ve parçalanma direnci daha yüksek değerlere ulaşmaktadır [15]. Genel olarak, Sınıf 1 zırh çelikleri delici mühimmat etkisine karşı yüksek direnç gösterecek şekilde tasarlanırken, Sınıf 2 çelikler patlama kaynaklı basınç dalgalarına karşı üstün dayanım sağlamak amacıyla üretilmektedir [12].



### 3. KAYNAK



**Şekil 3.1: Kaynak İşlemi**

**Kaynak:** (www.muhandisce.com)

Kaynak, basınç, ısı ve/veya her ikisinin birlikte uygulanmasıyla aynı cins ya da farklı türdeki iki malzemenin kalıcı olarak birleştirilmesi işlemidir. Bu birleştirme yöntemleri genel olarak ergitme kaynak yöntemleri ve katı hal kaynak yöntemleri olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır [13].

#### 1. Katı Hal Kaynak Yöntemleri

- Difüzyon Kaynağı
- Sürtünme Kaynağı
- Sürtünme-Karıştırma Kaynağı
- Nokta Direnç Kaynağı
- Dikiş Direnç Kaynağı
- Kabartılı Direnç Kaynağı
- Alın Yakma Kaynağı

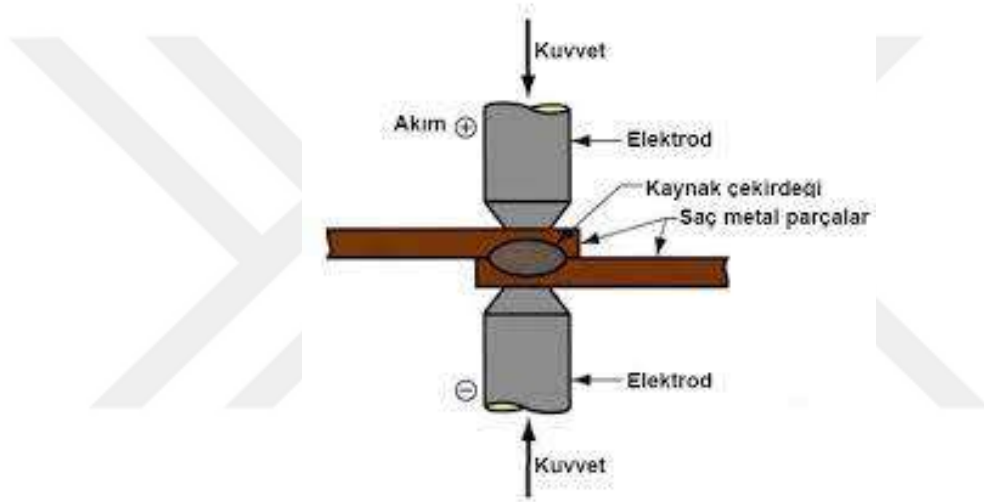
#### 2. Ergitme Kaynak Yöntemleri

- Gaz Ergitme Yöntemi
- Elektrik Ark Kaynak Yöntemi
- TIG(WIG)- Tungsten (Wolfram) Inert Gaz

- MIG/MAG- Metal Inert/Aktif Gaz
- Tozaltı Kaynak Yöntemi
- Lazer Kaynak Yöntemi
- Elektron Işın Yöntemi
- Plazma Işın Yöntemi

### 3.1 Katı Hal Kaynak Yöntemleri

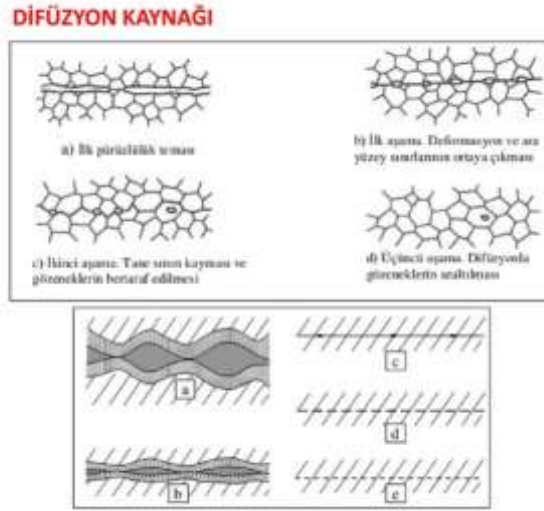
#### 3.1.1 Direnç kaynağı



Şekil 3.2: Direnç Kaynağı [14]

Bu yöntem, kaynaklanacak iki parça arasındaki elektrik direncinden açığa çıkan ısı ile yapılan bir grup ergitme kaynak uygulamasını kapsar. Bu yöntemlerde ısı kaynak yapılacak parçaların ara yüzeyinde elektrik akımına dirençten dolayı açığa çıkar. Isı ve basınç birlikte kullanılmaktadır [13].

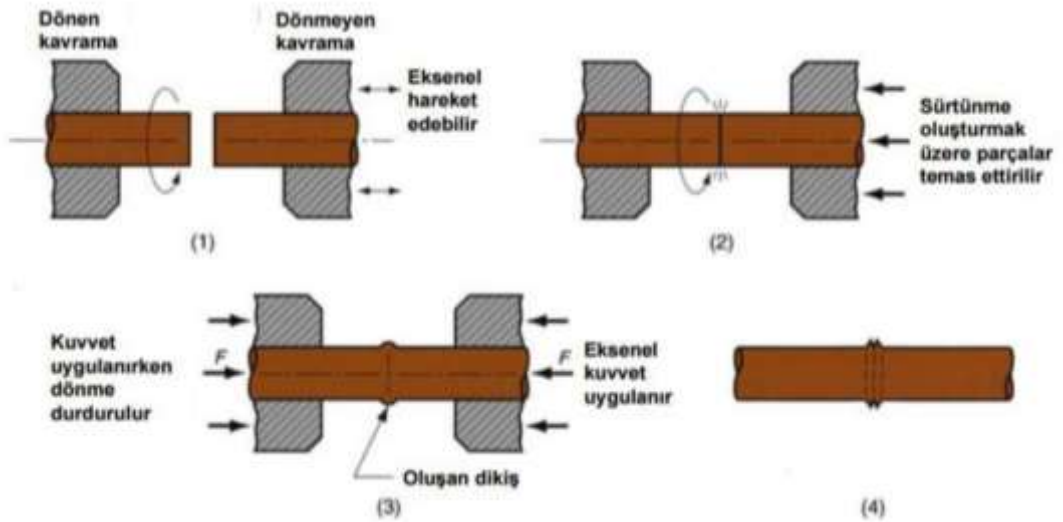
### 3.1.2 Difüzyon kaynağı



Şekil 3.3: Difüzyon Kaynağı [14]

Genellikle kontrollü bir atmosferde birleştirilmek üzere yüzeyleri hazırlanmış ve temizlenmiş üst üste konmuş iki parçaya, difüzyon ve birleştirme için yeterli bir süre ısı ve basınç uygulaması ile gerçekleştirilen bir katı hal kaynak yöntemidir [13].

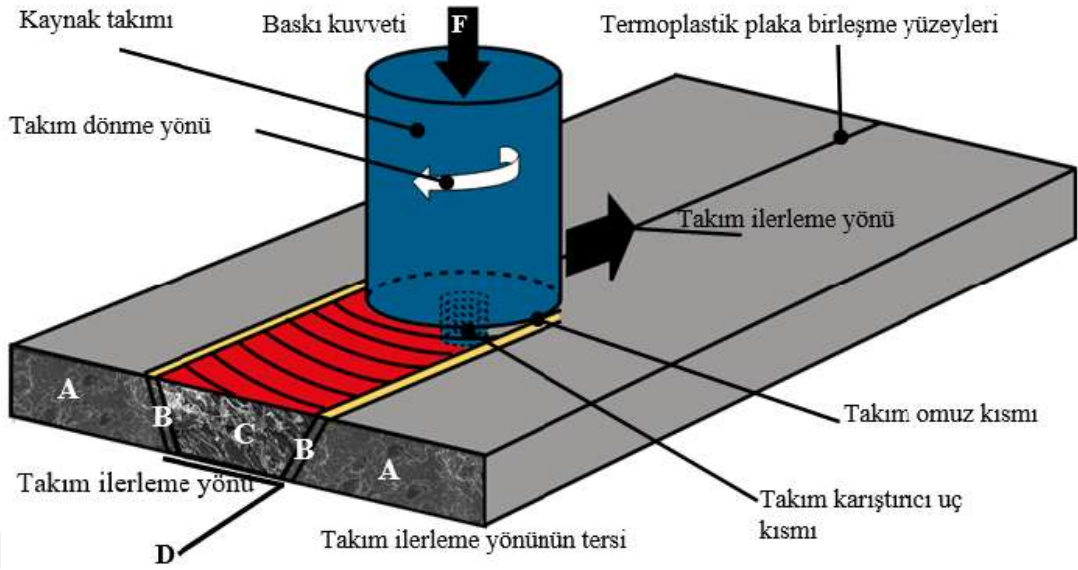
### 3.1.3 Sürtünme kaynağı



Şekil 3.4: Sürtünme Kaynağı [14]

Sürtünme kaynağı, otomasyona uygunluğu ve yaygın ticari kullanımını ile öne çıkan bir kaynak yöntemidir. Diğer kaynak yöntemlerinden farklı olarak, bu yöntemde dışarıdan ısı uygulanmaz; birleştirme işlemi, sürtünme sonucu açığa çıkan ısının ve uygulanan basıncın etkisiyle gerçekleştirilir. Bu özelliğiyle, sürtünme kaynağı katı hal kaynak yöntemleri arasında yer almaktadır [13].

### 3.1.4 Sürtünme – karıştırma kaynağı

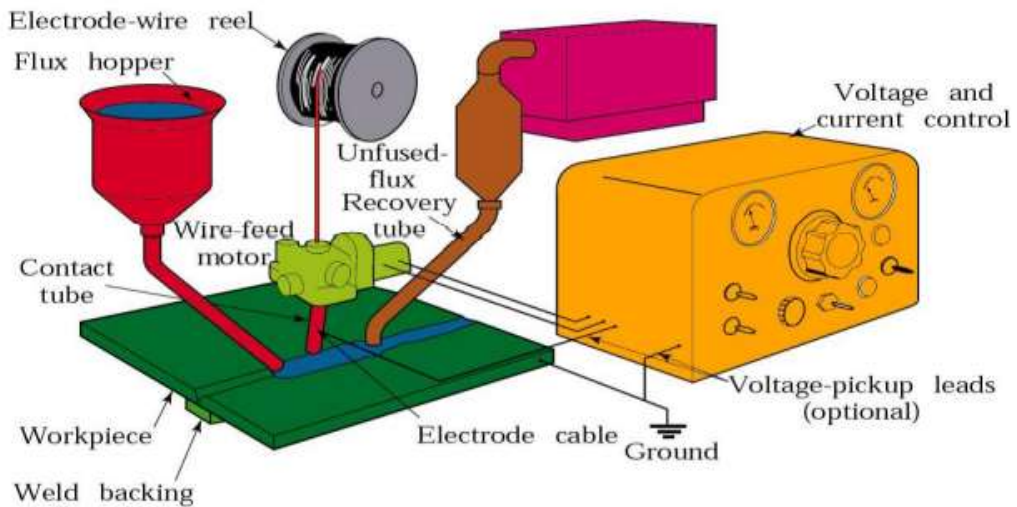


Şekil 3.5: Sürtünme-Karıştırma Kaynağı [14]

Sürtünme karıştırma kaynağı, iki iş parçasının birleştirilecek yüzey hattı boyunca yüksek devirde dönen bir takımın sürekli olarak daldırılmasıyla sürtünme ısısının elde edildiği, metalin mekanik olarak karıştırılması sonucu kaynak dikişinin oluşturulduğu bir kaynak yöntemidir. Yöntemin adı, işlem sırasında gerçekleşen karıştırma hareketinden kaynaklanmaktadır. Bu yöntemde ısı, aşınma direnci yüksek bir takımın metal yüzey ile sürtünmesi sonucu açığa çıkmaktadır [13].

## 3.2 Ergitme Kaynak Yöntemleri

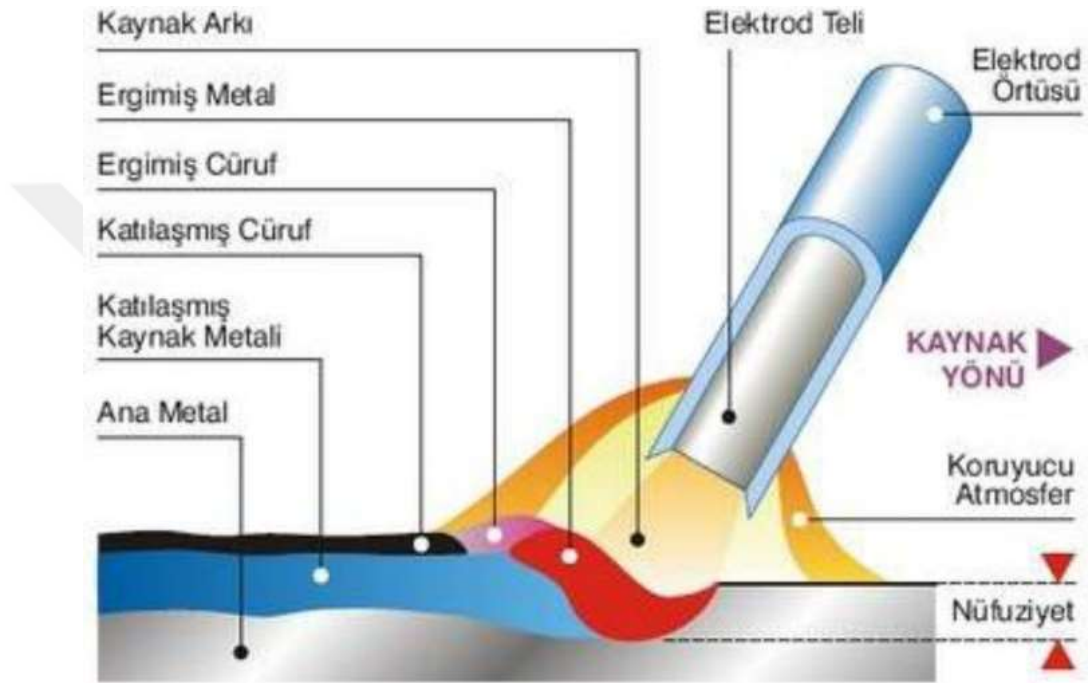
### 3.2.1 Tozaltı kaynak yöntemi



Şekil 3.6: Tozaltı Kaynak Yöntemi [14]

Bir elektrik ark kaynağıdır. Bu yöntemde ark, otomatik olarak kaynak bölgesine gelen çıplak bir elektrot ile iş parçası arasında oluşmaktadır. Ve aynı zamanda, kaynak bölgesine sürekli olarak bir toz dökülür ve ark bu tozun altında yanar. Toz hem koruma hem alaşımlama hem de arkın kararlılığını devam ettirmek için kullanılır. Tozaltı kaynağı kalın parçalar için uygulanır. Yöntem sadece yatay düzlemde gerçekleştirilir [13].

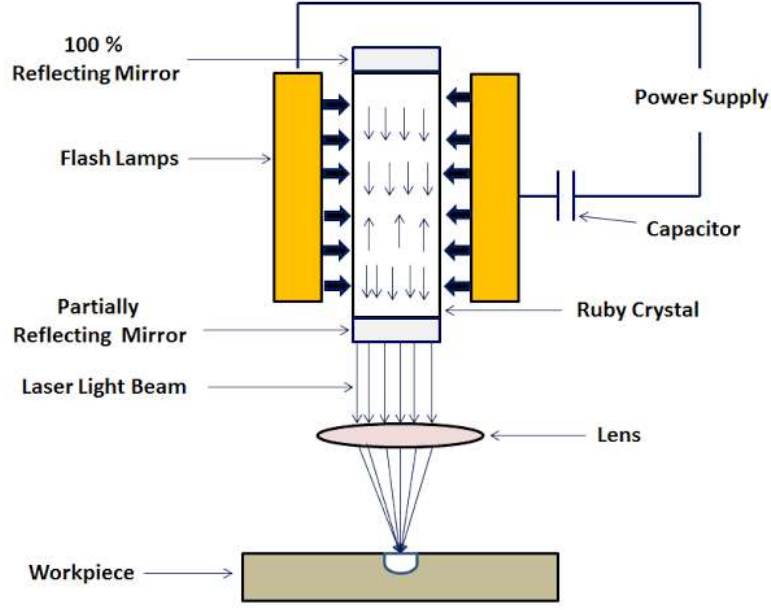
### 3.2.2 Elektrik ark kaynak yöntemi



Şekil 3.7: Elektrik Ark Kaynak Yöntemi[14]

Elektrik ark kaynağı yöntemi, doğru veya alternatif akım kullanarak elektrot ucu ile kaynak yapılacak parçalar arasında oluşturulan ark ile gerçekleştirilir. Ark, katottan çıkan elektronların yüksek bir hızla anoda çarpması sonucunda oluşur. Bu yöntemde arkı başlatmak için elektrot iş parçasına temas ettirilir ve hemen sonra aralarında kısa bir mesafe bırakılarak iş parçasından hızla uzaklaştırılır [13].

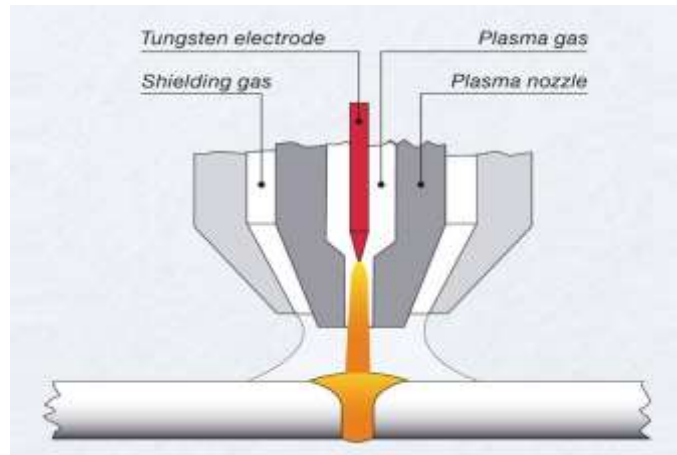
### 3.2.3 Lazer kaynak



Şekil 3.8: Lazer Kaynak Yöntemi [14]

Lazer kaynak, yüksek yoğunluklu aynı dalga boyu ve aynı yöndeki fazda bir ışık demetinin kaynak edilecek iş parçasına odaklanmasıyla birleştirilmenin yapıldığı bir ergitme kaynağı yöntemidir. Bu yöntemde kaynak dikişinde bir buhar kolonu oluşur ve sıvı metalin bu boşluğu doldurması ile nüfuziyet erinliği oldukça yüksek kaynak işlemi yapılabilir. Lazer kaynağı genellikle oksidasyondan korunmak için koruyucu gaz beslenmesiyle yapılır [13].

### 3.2.4 Plazma ark kaynağı

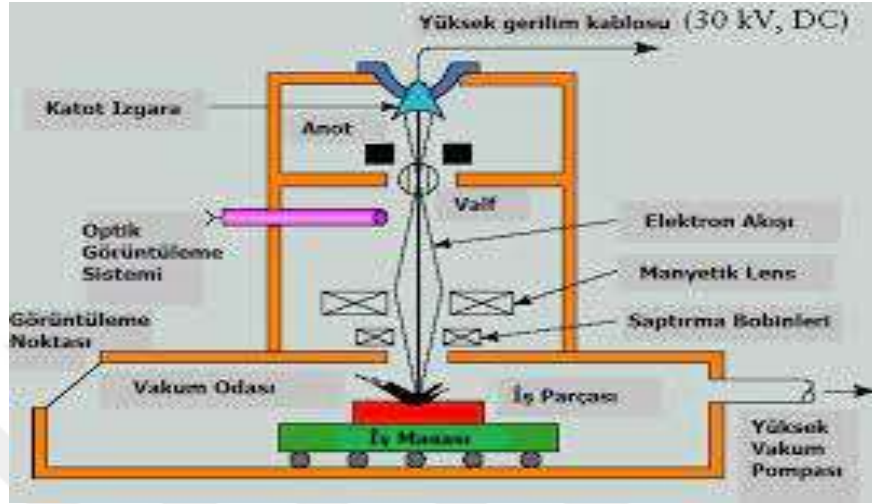


Şekil 3.9: Plazma Ark Kaynağı [14]

Plazma ark kaynağı yöntemi sıkıştırılmış bir plazma arkının kaynak edilecek bölgeye yönlendirilmesiyle yapılan bir kaynaktır. Gaz tungsten ark kaynağının özel

şeklidir. Tungsten elektrot kaynağına takılır. Elektrot etrafından inert gaz yüksek hızda arkın ucuna beslenir. Ark ile ısıtılır. Bu sayede çok sıcak bir plazma ark akışı oluşturulmuş olur [13].

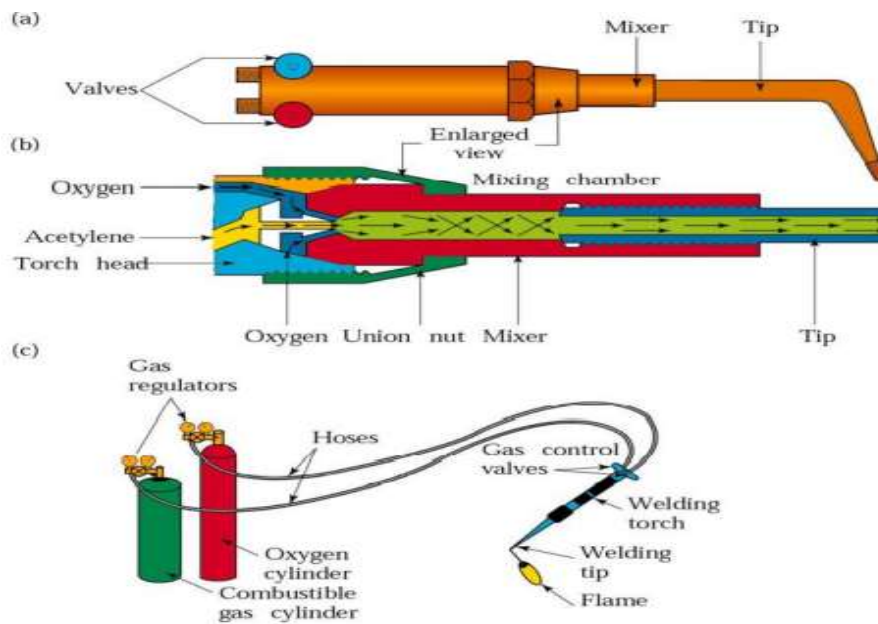
### 3.2.5 Elektron ışın kaynağı



Şekil 3.10: Elektron Işın Kaynağı [14]

Elektron kaynağı yüksek hızlı elektron demetlerinin kaynak edilecek iş parçasına çarpması sonucu kinetik enerjilerinin ısı enerjisine dönüşmesiyle ortaya çıkan ısı enerjisi sayesinde yapılan bir kaynak türüdür. Bu kaynak türü yüksek enerji yoğunluklu bir kaynak yöntemidir [13].

### 3.2.6 Oksi-asetilen gaz ertitme kaynağı



Şekil 3.11: Oksi-Asetilen Gaz Ergitme Kaynağı [14]

Oksi-asetilen kaynak yönteminde gerekli olan ısı ve sıcaklık birisi yakıcı, birisi yanıcı olan iki gazın yaklaşık 3000 °C civarında yanması sonucu elde edilir. Bu yöntemde kaynak yapılacak malzemenin yapısına uygun bir ilave dolgu metali (elektrot) kullanılır ve ilave edilen metalin erimesi sonucu kaynak işlemi gerçekleştirilir. Yanıcı olarak kullanılacak gazdan, gazın ısıl değerinin ve alev sıcaklığının yüksek olması beklenmektedir [13].

### **3.2.7 Gazaltı ark kaynağı**

Gazaltı ark kaynağı yönteminde, birleştirme işlemi bir makara vasıtasıyla sürekli ve otomatik olarak çıplak tel şeklinde beslenen elektrot ucu ile kaynak yapılacak parçalar arasında oluşturulan ark ile yapılmaktadır, başka bir deyişle kaynak için gerekli ısının, tükenen bir elektrot ile iş parçası arasında oluşan ark sayesinde ortaya çıktığı bir ark kaynak yöntemidir. Kaynak bölgesinde sürekli beslenen tel elektrot ergiyerek tükendikçe kaynak metalini oluşturmaktadır. Kaynak işlemi boyunca kaynak dikişi bölgesini atmosferin zararlı etkilerinden korumak için kaynak torcu vasıtasıyla koruyucu gaz beslenir. Kullanılacak koruyucu gaz seçimi kaynak yapılacak metale bağlıdır. Kullanılan koruyucu gaza ilaveten tel elektrot bileşiminde oksit giderici elementler de yer almaktadır [13].

#### **Gazaltı Kaynak Yöntemleri**

Gazaltı ark kaynağı eriyen elektrotla yapılan ve elektrotla yapılmayan gaz altı ark olarak iki gruba ayrılmıştır. Ergiyen tip elektrotla yapılan kaynak yöntemlerinde kullanılan elektrot ergir ve kaynak bölgesini doldurur. Ergimeyen tip elektrot kullanılan yöntemlerde ise elektrot ergimez sadece kaynak bölgesini ertirir.

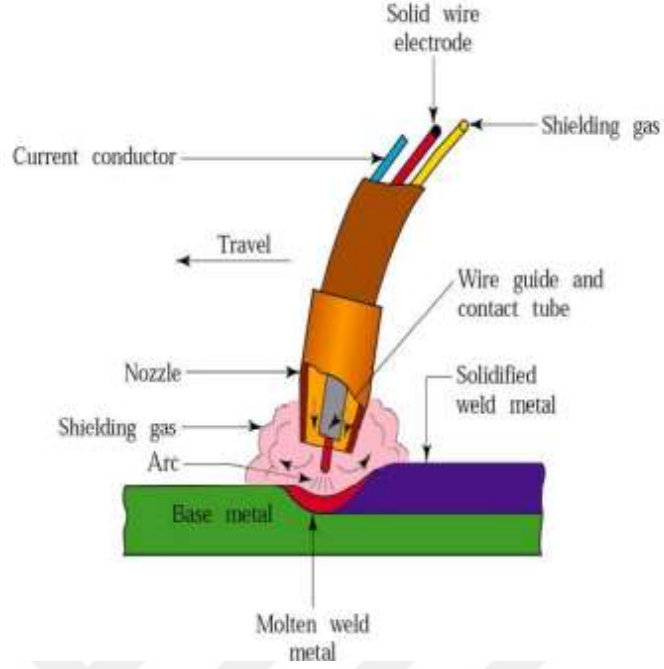
#### **a) Ergiyen Elektrodla Yapılan Gazaltı Ark Kaynak Yöntemleri**

- MIG-Metal Inert Gaz Kaynağı
- MAG- Metal Aktif Gaz Kaynağı

#### **b) Ergimeyen Elektrodla Yapılan Gazaltı Ark Kaynak Yöntemleri**

- TIG/WIG- Tungsten (Wolfram) Inert Gaz

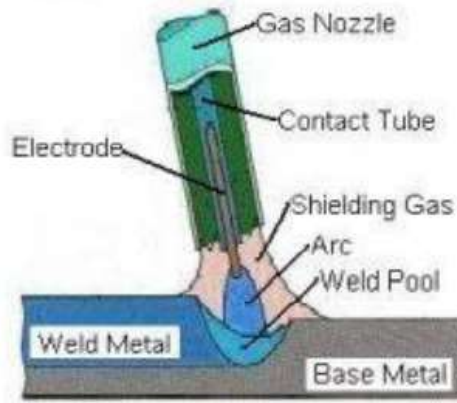
### 3.2.8 MIG (Metal inert gaz) kaynağı



Şekil 3.12: MIG Kaynak Yöntemi [14]

Inert (soy) gaz atmosferi altında eriyen elektrotla yapılan gazaltı kaynak yöntemidir. MIG kaynak yöntemi adını “Metal Inert Gas” ifadesinin baş harflerinden almıştır. Bu yöntemde inert gaz olarak genellikle argon gazı kullanılmaktadır. Nadiren Ar, Ar+ He, Ar+O<sub>2</sub>, He gibi gaz ve/veya gaz karışımları da kullanılmaktadır. Ar+O<sub>2</sub> gaz karışımında oksijen, koruma ve arkın kararlılığını sağlamakta olduğu için kullanılmaktadır. MIG kaynağında doğru akım kullanılır ve elektrot, genellikle pozitif kutba bağlanır (ters kutuplama). Böylece hem derin bir nüfuziyet hem de oksit tabakasının parçalanması sağlanmış olur [13].

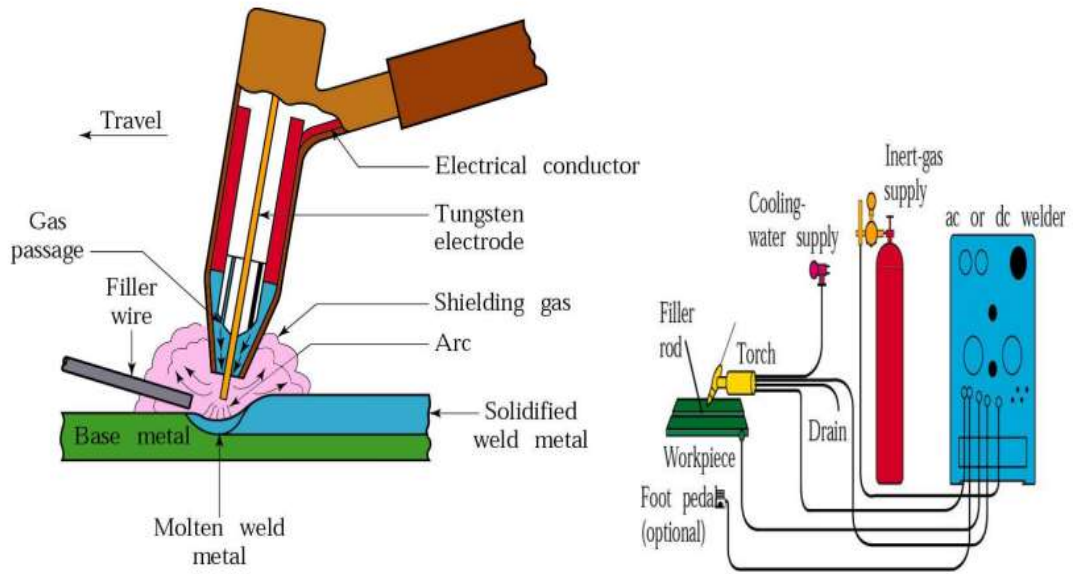
### 3.2.9 MAG (Metal aktif gaz) kaynağı



Şekil 3.13: MAG Kaynak Yöntemi[14]

Ergiyen elektrotla aktif bir gaz olan karbondioksit atmosferi altında yapılan gazaltı kaynak yöntemidir. MIG kaynağından tek farkı koruyucu gaz olarak karbondioksit kullanılmasıdır, kullanılan kaynak donanımları iki yöntemde de aynıdır. Kullanılan koruyucu gazın bileşimi %100 CO<sub>2</sub> ise “CO<sub>2</sub>-C” eğer koruyucu gaz içerisine karışım gazları ilave edilmişse “CO<sub>2</sub>-M” şeklinde ifade edilir. MAG kaynağında ters kutuplama ve doğru akım kullanılmaktadır. Erime gücü akım şiddetine bağlıdır. MAG kaynağında kısa ark boyu ile çalışılır [13].

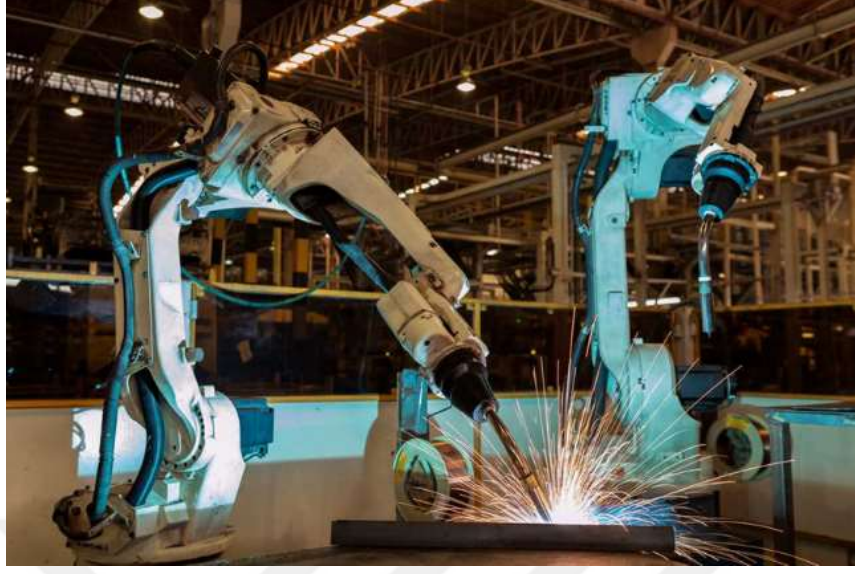
### 3.2.10 TIG (Tungsten inert gaz) kaynağı



**Şekil 3.14: TIG Kaynak Yöntemi [14]**

TIG kaynağı ergimeyen elektrot ve koruyucu gaz kullanılarak uygulanan bir gazaltı ark kaynağı yöntemidir. Bu yöntemde kaynak işlemi tungsten(wolfram) bir elektrot ile iş parçası arasında oluşturulan ark ile yapılır ve elektrotun kendisi ergimez; kaynak bölgesini ertirir. Tungsten elektrot kaynak süresince ergimemekte olup sadece ark oluşumu için kullanılmaktadır. İş parçası 3mm'den kalınsa ilave tel kullanılmaktadır. Kaynak işlemi boyunca elektrot çevresindeki delikler vasıtasıyla kaynak dikişini atmosferin zararlı etkilerinden korumak amacıyla inert koruyucu gaz beslenir. TIG kaynağı ile bütün metal ve alaşımları kaynak edilebilir. TIG kaynak yönteminde kutuplama iki şekilde gerçekleşir; 1) Doğru akım (+) veya (-) kutuplama 2) Dalgalı Kutuplama (alternatif akım) [13].

### 3.3 Robotik Kaynak



**Şekil 3.15: Robotik Kaynak**

**Kaynak:** (www.igunsem.com)

Robotik kaynak uygulamalarında sabit bir iş parçası üzerinde kaynak torcunun hareketini otomatik olarak kontrol etmek için endüstriyel robotlar kullanılmaktadır. Endüstriyel kaynak robotları, ark kaynak yöntemleri (MIG/MAG, TIG, plazma kaynak) ve nokta direnç kaynağı gibi kaynak uygulamalarında kullanılmaktadır. Entegre edildiği sistemler üzerinde kaynak işlemlerini rahatlıkla ve hızlı bir şekilde gerçekleştirebilmektedirler [13].

#### 3.3.1 Robotik MIG/MAG kaynağı avantajları

Robotik mig/mag veya gazaltı kaynak sistemlerinin kalite ve tekrarlanabilirliği yüksektir. Ağır iş parçalarının kaynak işlemlerinde yüksek kaynak hızı ile kusursuz kaynak kalitesi ile kesintisiz olarak çalışabilirler. İş parçasında kaynak yapılacak noktaya erişim açısından ergonomik olmayan ve operatörlerin çalışmakta zorlanacağı yüksek, dik ve düzlemsel olmayan vb. yerlerde rahatça çalışabilirler. İş parçasında kaynak yapılacak noktaya erişim açısından, insanların giremeyeceği kadar dar, geçişli çatımların arasına girerek rahatça çalışabilirler. Robotik kaynak prosesinin tekrarlanabilirliği kesin ve yüksektir (0,05mm). İnsanların tekrarla-bilirliği ölçülememekle birlikte iyi bir kaynak ustası dahi ancak 5-10mm doğrulukta çalışabilir.

### **3.4. Kaynak Kabiliyeti**

Bir malzemenin kaynak kabiliyeti, büyük ölçüde kimyasal bileşimi, metalurjik yapısı ve fiziksel özellikleri (örneğin genleşme katsayısı, ısı iletkenliği vb.) ile doğrudan ilişkilidir. Bu faktörler, kaynak sırasında ve sonrasında ortaya çıkan mikroyapısal dönüşümler üzerinde belirleyici rol oynar. Özellikle karbon eşdeğeri (CE), malzemenin çatlama eğilimini belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Karbon eşdeğerinin artması, kaynak bölgesinde sertleşme eğilimini artırarak soğuk çatlak ve gevrek kırılma riskini yükseltmektedir.

Bununla birlikte, konstrüksiyon tasarımı da kaynaklı birleştirmelerde oluşabilecek artık gerilmelerin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Kaynak dikişlerinin konumlandırılması, birleştirme yönteminin seçimi ve birleşim geometrilerinin tasarımı, kaynak sonrası yapısal bütünlük ve kalıcı deformasyon davranışını doğrudan etkilemektedir.

Kaynak işlemini etkileyen imalat parametreleri arasında; kaynak öncesi hazırlık (yüzey temizliği, ön ısıtma, montaj toleransları), kaynak parametreleri (ısı girdisi, ilerleme hızı, kaynak yöntemi) ve kaynak sonrası uygulanan ısıl işlemler yer almaktadır. Bu süreçlerin optimum düzeyde kontrol edilmesi, kaynak dikişinin kalitesi, mukavemeti ve sürekliliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Tüm bu unsurlar birlikte değerlendirildiğinde, bir malzemenin kaynak kabiliyeti, tasarlanan üretim süreci ve konstrüksiyon koşullarını başarıyla karşılayabilmesi ve hedeflenen kaynak kalitesinin elde edilmesi durumunda yeterli olarak kabul edilmektedir [16].

### **3.5 Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti**

Zırhlı çelikler, zırhlı kara, hava ve deniz platformlarının üretiminde kullanılan, yüksek sertlik ve mukavemet özelliklerine sahip özel alaşımlı çeliklerdir [17,18,19]. Bu çelikler, tasarımları gereği karmaşık geometrilere sahip zırhlı araçlarda yoğun olarak kullanılmakta olup, bu yapıların birleştirilmesinde en yaygın tercih edilen yöntem kaynaklı imalattır [12]. Kaynak, karmaşık gövde geometrilerinin oluşturulmasına olanak sağlaması açısından önemli bir avantaj sunsa da zırh çelikleri genellikle zorlu arazi koşullarında, dinamik yükler altında ve balistik tehditlere maruz kalarak kullanıldığından, uygulanan kaynak yönteminin

malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilememesi kritik öneme sahiptir.

Bu sebeple, zırlı çeliklerin kaynağı sonrasında kaynak dikişinde gözenek, çatlak, cüruf kapanımı, kaynak boşluğu veya sıcak oluk gibi süreksizliklerin oluşmaması; bağlantının hem statik hem de dinamik yükler altında bütünlüğünü koruyabilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda, kaynaklı birleştirmenin balistik tehditlere karşı gövde bütünlüğünü koruyacak şekilde tasarlanmış olması da zorunludur [20].

Zırlı çeliklerinin kaynaklanabilirliğini etkileyen başlıca parametreler; kimyasal bileşim, karbon eşdeğeri, malzeme kalınlığı, kaynak yöntemi ve ısı girdisi ile kullanılan dolgu telinin türü ve kimyasal bileşimi şeklinde sıralanabilir.

Zırlı çelikleri, düşük karbon içeriğine sahip olarak üretilmelerine rağmen, Cr, Mo, Ni, B ve V gibi alaşım elementleri ile alaşımlandırılarak yüksek mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlayan karbür oluşumuna imkân tanınır. Bu durum, mekanik özellikler üzerinde olumlu bir etki oluşturmakla birlikte, karbon eşdeğerini artırdığı için kaynaklı birleştirme süreçlerinde ek önlemler alınmasını gerektirebilir [21,22].

#### 4. LİTERATÜR ÖZETİ

Zırhlı araçlar karmaşık birçok malzemeden üretilmektedir. Malzemenin kullanımını balistik direnci kadar kullanılacakları yere kolay birleştirilmesine de bağlıdır. Zırh çelikleri kullanılarak yapılacak bir üretimde dikkat edilecek en önemli yer malzemenin kaynak noktasıdır [23].

Birleştirme yöntemleri denildiğinde akla gelen ilk tekniklerden biri kaynak olup, zırhlı çeliklerin birleştirilmesinde kaynak yönteminin önemi büyüktür. Kaynak işlemi sırasında ısı ve/veya basınç etkisiyle IEB (Isıdan Etkilenen Bölge) içerisinde meydana gelen metalürjik dönüşümler, malzemenin servis ömrünü doğrudan etkileyebilmektedir. Örneğin, Armox 440 çeliğinin 650 °C’de 5 dakika süreyle tutulması sonucunda sertlik değerinde %40, çekme dayanımında ise %70 oranında azalma meydana geldiği rapor edilmiştir (Kulmann, 2011). Bu nedenle, zırh çeliklerinde kaynak ve kesme gibi işlemler sırasında malzeme sıcaklığının 200 °C’yi aşmaması tavsiye edilmektedir. [24].

Yapılan bir diğer çalışmada, ML-A-12560 zırh çeliğinin kimyasal bileşimine yakın bir alaşım elde edilmesi amaçlanmıştır. Malzemenin üretimi Anadolu Döküm Tesisleri’nde gerçekleştirilmiş, haddeleme ve ısıtma işlemleri ise Erdemir ve FNNS Savunma Sistemleri’nde uygulanmıştır. Üretilen zırh çeliğinin birleştirilmesinde bazik örtülü östenitik paslanmaz çelik elektrot tercih edilmiştir. Kaynak sonrası, kaynak bölgesinde 200–250 HV, kaynak dikişine yakın bölgelerde ise 350–400 HV aralığında sertlik değerleri ölçülmüştür. Çalışma sonucunda, kaynak işleminin malzeme özelliklerinde belirli ölçüde düşüşe neden olabileceği ifade edilmiştir [25].

Armour 500 zırh çeliğine Panzercord-Mn elektrodu kullanarak elektrik kaynak yöntemiyle kaynak yapılmıştır. Bu kaynağı yapıyorken dört farklı ön tav sıcaklığı uygulanmıştır. Bu kaynaklar sonucunda mikro yapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Ön tav sıcaklıklarının önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir [26].

Kara ve Korkut (2012), Armox 500T zırh çeliğine 307Si kaynak teli kullanarak MIG kaynağı uygulamışlardır. Kaynak işleminin ardından gerilim giderme tavlaması yapılmış ve malzemenin mikroyapısı ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Gerilim giderme tavlaması sonrasında, kaynak metali ve IEB'da düzensiz soğuma sonucu oluşan kusurların kısmen azaldığı, buna bağlı olarak darbe enerjisi değerlerinde artış gözlemlendiği rapor edilmiştir [27].

Atabaki ve diğerleri (2014), zırh çeliklerini hibrit ark kaynağı yöntemi kullanarak birleştirmiş ve farklı kaynak ağızı geometrilerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, kaynak ağızı geometrisinin ve lazer ışını ile gaz metal ark kaynağında kullanılan tel ucu mesafesinin artmasının, ısıdan etkilenen bölge genişliğini azalttığı tespit edilmiştir. Uygulama sonrası, sertlik değerlerinin kabul edilebilir aralıkta olduğu ve herhangi bir sıcak ya da soğuk çatlak oluşmadığı belirlenmiştir. Bu nedenle, işlem sonrasında ek bir ısıtma işlemi gerek duyulmadığı ifade edilmiştir [28].

Barenyi vd. lazer, plazma ve su jeti ile kesilen Ramor 500 zırh çeliği numunelerini, Thermanit X ve DT-SG 600 F dolgu telleri kullanarak MAG kaynak yöntemi ile birleştirmiştir. Yapılan birleştirme işlemi sonucunda, kaynak bölgesinin sertliğinin esas metale kıyasla oldukça düşük, iri taneli bölgenin sertliğinin ise oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, numunelerin çekme ve akma dayanımlarında %40–%60 oranında azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Bu nedenle, söz konusu kaynak yönteminin Ramor 500 zırh çelikleri için uygun olmadığı rapor edilmiştir [29].

Kurt (2015), farklı geometri ve kaynak ağızları hazırladığı MIL-A 46100 çeliğini 307Si kaynak teli kullanarak MIG kaynağı yöntemiyle birleştirmiştir. Birleştirme işleminin ardından numunelere sertlik testi, mikroyapı analizi ve çekme testleri uygulanarak ısı girdisinin mikroyapı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kaynak metali sertliği, esas metalin sertliğinden daha düşük bulunmuştur. Çekme testleri sonucunda ise tüm numunelerin kaynak bölgesinden koptuğu gözlemlenmiş, bunun nedeni olarak kullanılan kaynak metalinin mukavemet değerlerinin esas metalden daha düşük olması gösterilmiştir [30].

Çoban ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan bir araştırmada, 8 mm kalınlığındaki Miilux Oy Protection 600 (MIL-A-46100) zırh çeliği üzerine AWS A5.9 GeKa ER307 östenitik dolgu teli kullanılarak köşe kaynağı işlemi

gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 0.3–1.2 kJ/mm aralığında beş farklı ısı girdisiyle robotik MIG/MAG kaynak yöntemi uygulanmış ve ısı girdisinin kaynak metalinin ile ısıdan etkilenmiş bölgenin (IEB) mikroyapı, elementel değişim, mikrosertlik ve boyutsal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırmanın amacı, bu çelik sınıfı ve dolgu metali kombinasyonu için MIL-STD-1185 standardında belirtilen kalite gerekliliklerini sağlayan uygun kaynak parametrelerini belirlemektir. Makro ve mikroyapı ile mikrosertlik analizleri sonucunda, ısı girdisinin artmasıyla birlikte hem kaynak metalinde hem de IEB’de sertliğin azaldığı, buna karşın IEB genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Düşük ve yüksek ısı girdilerinde kaynak metalinde homojen sertlik dağılımı elde edilirken, 0.5 ve 0.7 kJ/mm ısı girdilerinde sertliğin kökten yüze doğru arttığı tespit edilmiştir. 0.7 kJ/mm üzerindeki ısı girdilerinde kısmi dönüşüm bölgesi (interkritik IEB) ile temperlenmiş bölgedeki (subkritik IEB) sertlikte belirgin bir düşüş gözlemlenmiş ve bu durum yumuşama davranışı ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, subkritik IEB’nin genişliğinde belirgin bir artış meydana gelmiştir. Kaynak ağzı kenarından itibaren ana malzeme sertliğine ulaşmak için gerekli mesafenin 1.2 kJ/mm ısı girdisinde MIL-STD-1185 standardında belirtilen 15.9 mm sınırını aştığı, diğer ısı girdisi değerlerinde ise standardın gerekliliklerinin karşılandığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, tane boyutu, martenzit-bainit oranı, M/A (martenzit/östenit) morfolojisi ve delta ferrit yapısındaki mikroyapısal değişimlerle ilişkilendirilmiştir. Çalışma sonunda, düşük dayanımlı (undermatched) östenitik dolgu metali kullanılarak robotik GMAW yöntemiyle gerçekleştirilen kaynak işleminin, MIL-STD-1185 standardında belirtilen şartları sağlayabildiği ortaya konulmuştur [31].

Kurt tarafından 2022 yılında gerçekleştirilen çalışmada, 15 mm kalınlığında ve V kaynak ağzı geometrisine sahip Protection 500 kalite zırh çeliğinin farklı dolgu metalleri kullanılarak robotik gazaltı yöntemiyle kaynaklanabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada ferritik (ER110 SG, SG3), paslanmaz (ELOX SG 2209) ve östenitik paslanmaz (ELOX 309LSi) yapıdaki dolgu telleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, ferritik (ER110 SG) dolgu metali ile yapılan birleştirmelerde çekme mukavemetinin ana malzemeye oranının %62 olduğu belirlenmiştir. Bu durumun, kaynak metalinde oluşan asiküler ferrit ve kısmen beyritik fazların mekanik dayanımı olumsuz yönde etkilemesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ayrıca, çentik darbe testleri sonucunda en yüksek tokluk değerinin ortalama 97 J ile östenitik

paslanmaz (ELOX 309LSi) dolgu metali kullanılan numunelerde, en düşük tokluk değerinin ise ortalama 37 J ile ferritik (ER110 SG) dolgu metali kullanılan numunelerde elde edildiği rapor edilmiştir [32].

Çoban ve arkadaşları [76] tarafından 2021 yılında yürütülen araştırmada, farklı kalınlıklarda üretilmiş Protection 500 kalite zırh çeliği (MIL-A-46100) ile ferritik yapıda ER110 SG kaynak dolgu metali kullanılarak kaynaklı birleştirmelerin özellikleri incelenmiştir. Robotik gazaltı yöntemiyle 6, 10 ve 15 mm kalınlıklarındaki levhalar 0,7 kJ/mm düşük ısı girdisi altında kaynaklanmış ve hatasız birleştirmelerin elde edildiği bildirilmiştir. Çalışmada, levha kalınlığının artmasıyla birlikte ısıdan etkilenmiş bölgedeki sertlik değerlerinin yükseldiği belirlenmiş, bunun artan termal kütleinin soğuma hızını etkilemesiyle ilişkili olduğu vurgulanmıştır [33].

Gürol ve arkadaşları [64] tarafından 2021 yılında yapılan başka bir çalışmada, 10 mm kalınlığındaki Protection 500 zırh çeliği üzerinde robotik gazaltı kaynağı ile köşe kaynak uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemlerinde östenitik paslanmaz yapıya sahip ER307 ve ferritik karakterde ER100 S-G dolgu telleri kullanılmış, tüm kaynaklarda 0,70 kJ/mm ısı girdisiyle kusursuz birleştirme elde edildiği raporlanmıştır. IEB bölgelerinde yapılan mikrosertlik ölçümlerinde, en yüksek sertlik değerinin ince taneli IEB (FGHAZ) bölgesinde, en düşük sertliğin ise kısmen dönüşüme uğramış bölgede (ICHAZ) meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, MIL-STD-1185 standardına göre kaynak bitişinden itibaren 6 mm mesafede ana malzeme sertlik değerine ulaşıldığı ifade edilmiştir [34].

Çelik C. [52] tarafından gerçekleştirilen bir başka araştırmada, zırh çeliklerinin kaynaklı birleştirmelerinde dolgu metali seçiminin ve sandviç kaynak tasarımının mekanik ile balistik performansa etkileri incelenmiştir. Protection 500 kalite zırh çeliği üzerinde östenitik paslanmaz ve sert dolgu telleri kullanılarak robotik gazaltı yöntemiyle iki farklı tasarımda kaynaklı birleştirmeler yapılmış; tahribatsız muayenelerin ardından mikroyapı, sertlik, çekme, çentik darbe ve balistik testleri uygulanmıştır. Bulgular, tamamen östenitik dolgu metali kullanılan birleştirmelerin mekanik dayanım bakımından daha yüksek performans sergilediğini, sandviç (sert + östenitik) tasarımın ise çentik darbe dayanımında belirgin bir azalma olmadan balistik performansı geliştirdiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, zırh çeliklerinde yalnızca ısı girdisinin kontrolünün değil, dolgu metali seçimi ve kaynak tasarımının da birleşim kalitesi üzerinde önemli rol oynadığını göstermektedir [35].

Özdemir [77] tarafından 2020 yılında yürütülen çalışmada, MIL-A-46100 standardına uygun zırh çeliği kullanılmış ve kaynak işlemleri östenitik paslanmaz 307 Si ile gaz korumalı özlü dolgu metali FCH 330 kullanılarak gazaltı yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Araştırmada X ve V kaynak ağzı geometrilerinin karşılaştırması yapılmış; çentik darbe testleri sonucunda V kaynak ağzına sahip numunelerin, X geometrisine sahip olanlara kıyasla daha yüksek darbe dayanımı sergilediği belirlenmiştir. Bu durumun, V geometrisinin daha kontrollü ısı dağılımı ve nüfuziyet sağlamasıyla ilişkili olduğu değerlendirilmiştir [36].

Mevcut literatürde, WAAM yöntemiyle üretilmiş bir yapının yerli zırh çeliği ile kaynaklanmasına yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Bu yönüyle çalışma, hem ulusal hem de uluslararası düzeyde bir ilk olma niteliği taşımaktadır. Çalışma kapsamında, WAAM teknolojisiyle üretilen yapıların kaynaklanabilirliği değerlendirilmiş; elde edilen birleşimlerin mekanik özellikleri, sertlik dağılımı ve mikroyapısal karakteristikleri detaylı biçimde analiz edilmiştir. Bu doğrultuda çalışma, ileri üretim teknolojileri ile yerli malzeme entegrasyonunun kaynaklı imalat süreçlerindeki uygulanabilirliğini ortaya koyarak, savunma sanayii ve metal katkı imalat teknolojileri alanında literatüre önemli bir mühendislik katkısı sunmayı hedeflemektedir.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, ferritik ER110S-G kaynak elektrodu kullanılarak Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) yöntemiyle üretilen numune ile, MIL-A-46100 standardına uygun haddelenmiş homojen zırh çeliği olan Protection 500 kalite çelik, robotik Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAW) yöntemiyle birleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, WAAM yöntemiyle üretilen yapıların kaynaklanabilirliğini üretim sonrası koşullarda değerlendirmek ve elde edilen birleşimlerin mekanik dayanımı, sertlik dağılımı ve mikroyapısal özelliklerini detaylı biçimde analiz etmektir. Bu bağlamda, hem ileri üretim teknolojilerinden WAAM yönteminin hem de yerli üretim zırh çeliği malzemelerinin kaynaklı birleştirme süreçlerine uygunluğu araştırılmış; elde edilen bulgular savunma sanayii ve metal katkı imalat teknolojilerine yönelik önemli mühendislik katkıları sunacak nitelikte değerlendirilmiştir.

### 5.1 Ana Malzeme ve Kaynak Sarf Malzeme Seçimi

Bu çalışmada, askeri ve güvenlik odaklı uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen, ticari adı Protection 500 Zırh Çeliği olan 10 mm kalınlığındaki çelik plakalar, kaynak işlemlerinde kullanılmak üzere Miilux OY firmasından temin edilmiştir. Karşı parça olarak kullanılan WAAM-ER110 plakalar ise Gedik Kaynak A.Ş. Ar-Ge Merkezi tarafından Tel Ark Eklemeli İmalat (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) yöntemiyle üretilmiş olup, 15 × 150 × 350 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Kaynak işlemleri öncesinde, her iki plaka türüne de Gedik Test Merkezi'ne bağlı mekanik atölyede uygun kaynak ağzı hazırlama işlemleri uygulanmıştır.

**Çizelge 5.1: Kaynak Plakalarının Kimyasal Kompozisyonu (% Ağırlıkça)**

Malzeme	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
Protection500	%0,25	%0,42	%0,97	%0,52	%0,34	%0,17	-
WAAM plakası + Dolgu teli	%0,09	%0,75	%1,70	%0,3	%2,0	%0,5	%0,2

**Çizelge 5.2: Kaynak Plakalarının Mekanik Özellikleri**

Malzeme	Kalınlık	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	%Uzama	Charpy-V -40°C (Joule)	Sertlik Aralığı HBW
1.Plaka Protection500	10 mm	1250	1600	8	20	530-550
2. Plaka WAAM plakası	10 mm	690	760	19	47	250-350

## 5.2 Kaynak Düzeneklerinin Hazırlanması

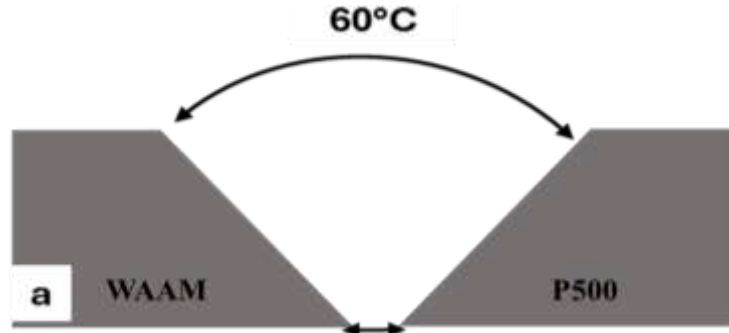
İki farklı metalik malzemenin birleştirilmesine yönelik kaynak işlemleri, Gedik Kaynak A.Ş.'nin Robotik Kaynak Uygulamaları Ar-Ge Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Bu kaynak uygulamaları OTC marka, 6 eksenli VDL8 model endüstriyel kaynak robotu ile Gekamac marka Power MIG GPS WB P500L model kaynak makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 5.1: ER110 WAAM Duvarı**

Kaynak işlemlerinde, TS EN ISO 9692-1 "Kaynak ve Benzer İşlemler – Kaynak Ağzı Hazırlığı için Tavsiyeler" standardı doğrultusunda kaynak ağzı hazırlıkları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, orijinal kalınlığı 15 mm olan WAAM plakası, birleştirme öncesinde karşı plaka ile kalınlık uyumu sağlamak amacıyla talaşlı imalat yöntemiyle 10 mm'ye düşürülmüş ve tüm plakalar 30° kaynak ağzı

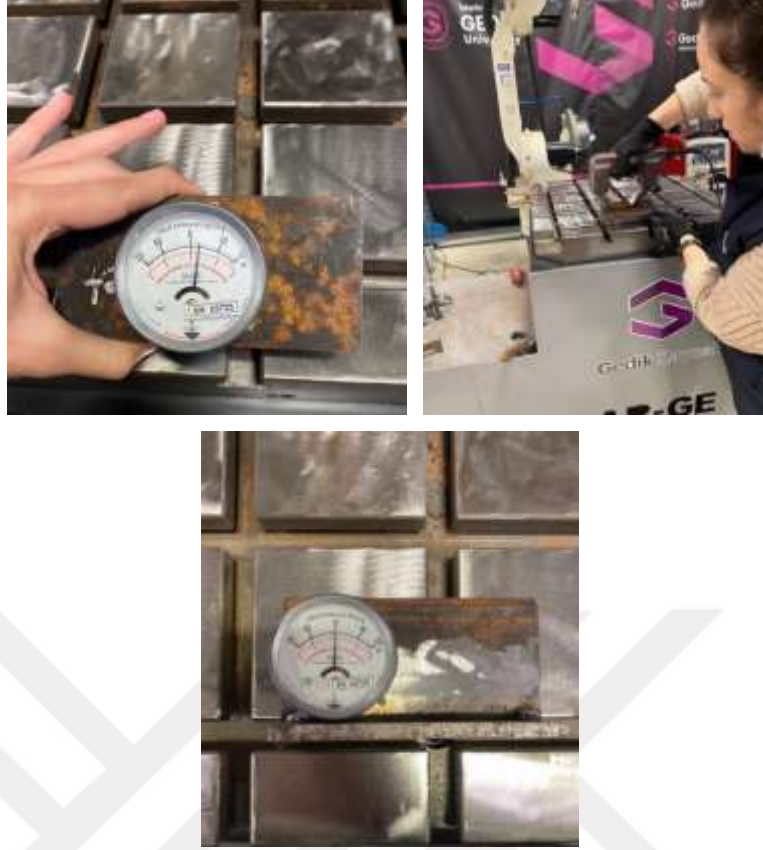
açısına sahip olacak şekilde işlenmiştir. Kaynak öncesinde, kaynak ağzı bölgelerinin yüzeyleri mekanik ve kimyasal yöntemlerle tüm kir, oksit tabakası ve yağ kalıntılarında arındırılarak uygun şekilde temizlenmiştir.



**Şekil 5.2: Kaynak Ağzı Tasarımlarının Şematik Gösterimi**

Kaynak işlemi sırasında, her iki plakanın kaynak başlangıç ve bitiş bölgelerine 2 mm kök aralığına ve 2 mm pah kırığına sahip ek çelik parçalar punta kaynağı ile sabitlenmiştir. Tam nüfuziyetli tek taraflı kaynak yapılabilmesini sağlamak amacıyla, seramik altlıklar uygun konumda yerleştirilmiş ve bu altlıklar folyo bant yardımıyla kaynak parçasına tutturulmuştur. Kaynak sırasında oluşabilecek deformasyonları engellemek ve sabitliği sağlamak amacıyla plakalar, çift işkence düzeneği ile kaynak tablasına sağlam bir şekilde sabitlenmiştir.

Kaynak işlemine başlamadan önce, parçalar üzerinde bulunan artık manyetikliğin giderilmesi amacıyla manyetiklik giderme işlemi uygulanmıştır. Çelik malzemelerde oluşabilen kalıntı manyetizma, kaynak işlemi sırasında arkın yön değiştirmesine ve dengesiz şekilde davranmasına neden olabilmektedir. Bu durum, kaynak dikişi boyunca gözenek oluşumu, penetrasyon eksikliği ve birleştirme hataları gibi ciddi kusurlara yol açabilir. Şiddetli durumlarda ise arkın kararsız hale gelmesi nedeniyle kaynak işlemi tamamen başarısız olabilir. Bu tür problemleri önlemek amacıyla, çelik malzemelerin kaynağından önce manyetiklik giderme işlemi yapılması kritik öneme sahiptir. Özellikle robotik kaynak uygulamalarında, ark stabilitesini sağlamak ve sıçrama riskini azaltmak adına bu işlem zorunlu hale gelmektedir. Manyetiklik giderme işlemi, parçanın boyutuna ve mıknatıslanma seviyesine bağlı olarak sabit veya taşınabilir tipteki demanyetizasyon cihazları ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada da benzer şekilde, WAAM-ER110 ve Protection 500 çelik plakalarına kaynak öncesinde manyetiklik giderme işlemi uygulanarak ark kararlılığı artırılmış ve kaynak kalitesinin olumsuz etkilenmesinin önüne geçilmiştir.



**Şekil 5.3: Manyetiklik Giderme İşlemleri**

Kaynak işlemlerinde, 1.2 mm çapında ER110 kaynak teli ile M21 gaz karışımı (80% Argon + 20% Karbondioksit) kullanılmıştır. İşlem sırasında, kaynak öncesi yaklaşık  $120 \pm 15$  °C sıcaklıkta ön ısıtma uygulanmış; pasolar arası sıcaklık ise 135–150 °C aralığında sabit tutulmuştur. Uygulanan bu ısıl rejim, çatlak oluşumunun önlenmesi ve kaynak bölgesinde istenilen mikroyapısal bütünlüğün sağlanması açısından kritik rol oynamaktadır.

Kaynak işlemi sırasında, kaynak makinesi üzerinden elde edilen gerçek zamanlı parametre değerleri not edilerek her bir kaynak geçişine ait ısı girdisi hesaplanmıştır. Elde edilen kaynak akımı, gerilimi ve kaynak hızı değerleri değerlendirilmiş ve bu parametreler Çizelge 5.3'te sunulmuştur.

**Çizelge 5.3: Kaynak Parametreleri**

Malzeme	Akım	Voltaj	Kaynak Hızı	Ark Uzunluğu	Isı girdisi
1.Plaka Protection500	200	24	5.5	-	698

### **5.3 Tahribatsız Muayene Yöntemleri (NDT)**

#### **5.3.1. Gözle muayene (VT)**

Kaynak işlemleri tamamlanan parçalar, oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Soğuma sonrasında, TS EN ISO 17637 standardı doğrultusunda görsel muayene gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemede, kaynak dikişlerinin homojen bir görünüme sahip olduğu, dikiş boyunca sürekliliğin sağlandığı ve kaynaklı parçanın boyutsal olarak tasarım ölçülerine uygun olduğu belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak dikişleri, TS EN ISO 5817-B standardında belirtilen kabul kriterlerine göre değerlendirilmiş ve ilgili kalite seviyesini karşıladığı tespit edilmiştir.

#### **5.3.2. Sıvı penetrant testi (PT)**

Gözeneksiz malzemelerdeki yüzey süreksizliklerini ve kusurları tespit etmek amacıyla sıvı penetrant yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde, temizlenmiş yüzeye uygulanan penetrant sıvısı, yüzey süreksizliklerine kılcal (kapiler) etki ile nüfuz etmektedir. Yeterli nüfuziyet süresinin ardından, yüzeydeki penetrant fazlası uygun temizleme işlemi ile uzaklaştırılmıştır. Yüzey süreksizliklerine nüfuz etmiş penetrant, geliştirici (developer) uygulanmasıyla yüzeye geri çekilmiş ve parçanın yüzeyinde görünür göstergeler oluşturmuştur. Deneyler TS EN ISO 3452-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak dikiş bölgelerinin değerlendirilmesinde, TS EN ISO 23277 standardında belirtilen Seviye 1 kabul kriterleri esas alınmış ve yapılan incelemelerde herhangi bir yüzeysel süreksizlik tespit edilmemiştir.

#### **5.3.3. Radyografik muayene (RT)**

Nüfuz edici kısa boylu radyasyon dalgaları kullanılır. Malzeme içindeki yoğunluk farkı sayesinde hata tespiti yapılır. Malzeme üzerine gönderilen ışın film üzerine yansıtılır. Film üzerine yansıyan görüntü malzemenin içinden ki yapının gölgesini oluşturur. Bu yöntemle parça içerisindeki hatalar tespit edilir. Bu muayene Gedik Test Merkezi bünyesinde bulunan ERESKO MF4-300KW RT cihazı kullanılarak sonra ISO 17636-1 standartına göre yapılmıştır.

## 5.4 Tahribath Muayene Yöntemleri (DT)

Tahribath muayene yöntemleri, malzeme veya kaynaklı birleşimlerin mekanik ve metalurjik özelliklerini değerlendirmek amacıyla belirli standartlara uygun olarak gerçekleştirilen test süreçlerini kapsar. Bu yöntemler sırasında, numune fiziksel olarak tahrip edildiği için testler genellikle üretim partisini temsil eden örnekler üzerinde uygulanır.

### 5.4.1 Çekme testi

Çekme testleri, TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerden, EN ISO 4136 standardında belirtilen esaslara göre, kaynak dikişinin eksenini kapsayacak şekilde 2 adet çekme numunesi çıkarılmıştır. Testler, oda sıcaklığında belirli bir hızda çekme kuvveti uygulanarak gerçekleştirilmiş ve akma dayanımı, çekme dayanımı ile uzama miktarı gibi mekanik özellikler belirlenmiştir. Deneyler, Gedik Test Merkezi Mekanik Laboratuvarı bünyesinde bulunan Zwick/Roell Z 600E marka çekme cihazı kullanılarak yapılmıştır. Test sırasında, çekme makinesi ile entegre çalışan MakroXtens marka ekstansometre sayesinde numunelerin % uzama değerleri hassas bir şekilde ölçülmüştür.



Şekil 5.4: Çekme Testi Cihazı

#### 5.4.2 Sertlik testi

Malzemenin yüzeyine, belirli bir yük altında sivri uçlu bir penetratör uygulanarak yüzeyde oluşan izin ölçülmesi ile sertlik değeri hesaplanmıştır. Brinell (HB), Rockwell (HR) ve Vickers (HV) gibi çeşitli yöntemlerle yapılabilen bu ölçümler, EN ISO 9015 standardına uygun olarak, Gedik Test Merkezi Metalografi Laboratuvarı bünyesinde bulunan Emcotest Durascan marka otomatik sertlik ölçme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, kaynak dikişinin merkezinden başlayarak her iki yönde ısı tesiri altında kalan bölge (IEB) ve ana malzeme bölgelerini kapsayacak şekilde yapılmıştır. Sertlik değerleri, HV1 (1 kgf) yük kullanılarak ve ölçüm noktaları arasında 0,5 mm mesafe bırakılarak alınmıştır. Bu yöntem sayesinde, malzemenin veya kaynaklı birleştirmenin performansını etkileyebilecek iç yapısal ya da mekanik yetersizlikler tespit edilerek üretim kalitesi ve güvenilirliği hakkında somut veriler elde edilmiştir.



Şekil 5.5: Sertlik Testi Cihazı

#### 5.5. Metalografik Muayene

Kaynaklı plakalardan metalografik muayene amacıyla alınan numuneler üzerinde hem makroyapı hem de mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

##### 5.5.1. Metalografik numune hazırlığı

Makroyapı, mikroyapı ve sertlik testlerine yönelik kaynak plakalarından alınan numunelere yüzey hazırlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak

zımparalama işlemi 80-2500 mesh'lik zımpara kağıtları kullanılarak sırayla gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki zımpara kağıdına geçildiğinde parça 90° döndürülmüştür. Bunun sebebi yüzeyi istenmeyen çiziklerden uzaklaştırmaktır. Zımparalama işlemi tamamlandıktan sonra bir sonraki aşama olan parlatma işlemine geçilmiştir.

Parlatma işlemi ince kavlı çuha üzerine 1µm'lik elmas süspansiyon sıkılarak numune yüzeyinde herhangi bir çizik kalmayana kadar yani numune yüzeyi ayna görüntüsü elde edilene kadar parlatılmıştır. Bu işlem şekil 26 'da verilmiştir.

Parlatma işlemi tamamlanan numunelerin mikroyapı ve makroyapı incelenmesi için dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Dağlayıcı türü, içeriği, amaç ve uygulanışı aşağıdaki tabloda verilmiştir.



**Şekil 5.6: Metalografik Numune Hazırlama İşlemleri a) Zımparalama b) Dağlama**

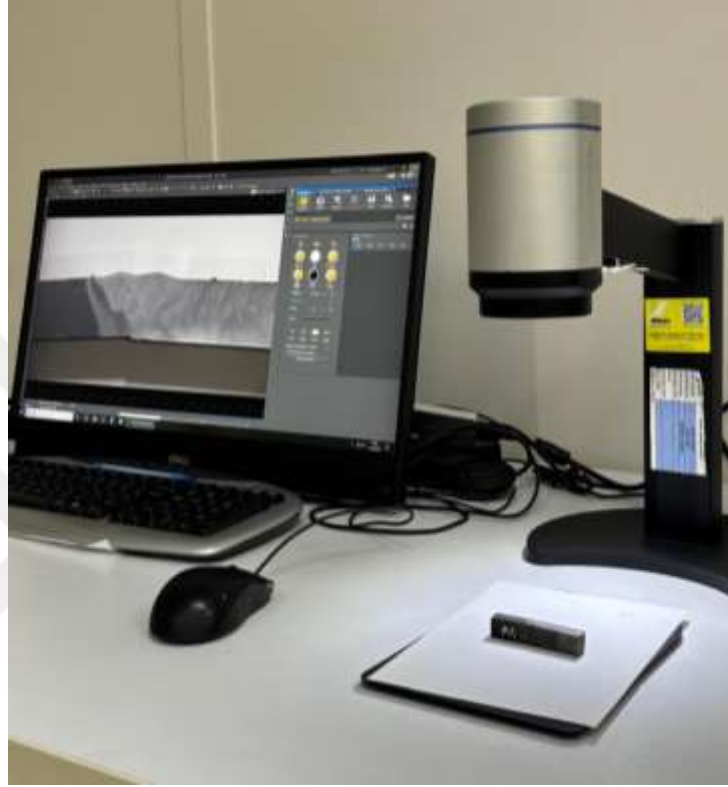
**Çizelge 5.4: Dağlayıcı İçerik, Amaç ve Kullanım Şekilleri**

<b>Dağlayıcı</b>	<b>İçerik</b>	<b>Amaç ve Kullanım</b>
%3 Nital	97 ml Ethanol +3 ml HNO <sub>3</sub>	Kaynak metali Makro dağlama için, parçaya pamuk yardımıyla sürülerek uygulanır

### **5.5.2 Makroyapı İncelemesi**

Metalografik yüzey hazırlığı tamamlanan numunelerin makro yapı görüntüleri Nikon INSPECTIS makro görüntüleyici ile elde edilmiştir. Kritik kaynaklar genellikle EN ISO 5817 standardında [19] açıklanan artırılmış “kalite

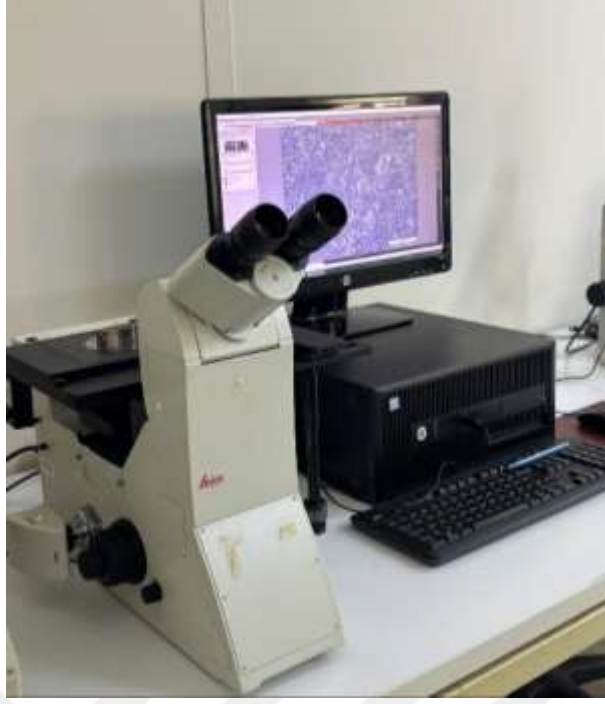
seviyesi B'ye göre test edilir. Makroyapı incelemesi amacıyla hazırlanan numune üzerinde; kaynak bölgesi, pasolar arası birleşim yüzeyleri, ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) ve kaynak dikişi genişliği detaylı olarak incelenmiştir. Bu inceleme kapsamında, kaynak dikişinin bütünlüğü, paso uyumu, nüfuziyet durumu ve olası içsel kusurların varlığı değerlendirilmiştir.



**Şekil 5.7: Makro Görüntüleme Cihazı**

### **5.5.3.Mikroyapı İnceleme**

Makroyapı incelemesinin tamamlanmasının ardından, aynı numune üzerinde mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizinde; kaynak pasoları, paso birleşim bölgeleri, ısıdan etkilenmiş bölgeler (IEB) ve ergime bölgeleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu incelemeler, kaynak bölgesindeki mikroyapısal farklılıkların, tane boyutu değişimlerinin ve olası mikroskobik kusurların tespit edilmesi amacıyla yapılmıştır. Mikroyapı gözlemleri, Gedik Test Merkezi bünyesinde bulunan ve Şekil 5.8'de gösterilen Leica DMI8 M model metalografik inceleme mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 5.8: Mikro Görüntüleme Cihazı**

## 6. SONUÇLAR

### 6.1. Tahribatsız Test Sonuçları

#### 6.1.1 Görsel muayene ve sıvı penetrant test sonuçları

Kaynak işlemi tamamlanan numuneler, oda sıcaklığında havada soğumaya bırakılmış ve soğuma tamamlandıktan 24 saat sonra tahribatsız muayene işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak görsel muayene gerçekleştirilmiş; yüzeyde çatlak, gözenek, ergime eksikliği, sıçrıntı ve benzeri yüzey kusurlarının olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Görsel muayenenin ardından, yüzeyde bulunabilecek açık çatlak ve süreksizliklerin tespiti amacıyla sıvı penetrant testi (PT) uygulanmıştır. Bu testler, ilgili standartlara uygun olarak yürütülmüş ve tüm kaynak dikişi yüzeyleri kapsamlı biçimde incelenmiştir.

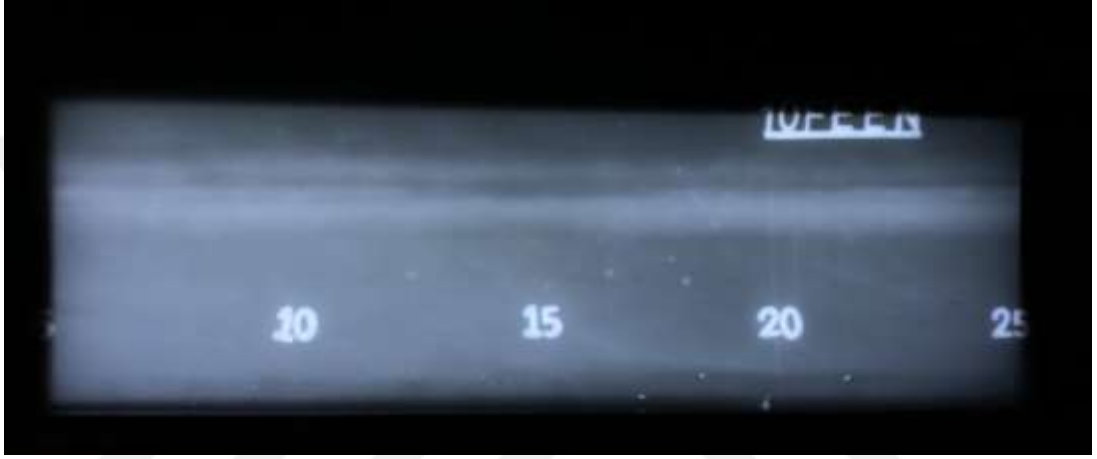
Yapılan görsel ve penetrant muayeneleri sonucunda herhangi bir yüzey hatasına rastlanmamıştır. Bu durum, uygulanan kaynak parametrelerinin ve birleşim geometrisinin yeterli kaynak kalitesi sağladığını göstermektedir.



Şekil 6.1: Kaynaklı Plaka Görüntüsü

### 6.1.2 Radyografik test sonuçları

Şekil 6.2’de Kaynak işlemleri yapılmış plakaların radyografik muayene sonuçları gösterilmiştir. Bu çalışmada yapılan radyografik muayene, Gedik Test Merkezi bünyesinde bulunan Eresco MF4 – 300 kW model X-ray cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulama sırasında cihazın uygun gerilim, akım ve pozlama süresi ayarları yapılmış; test filmleri ilgili standarda uygun yerleştirilerek gerekli çekimler tamamlanmıştır. Radyografik muayene sonucunda EN ISO 5817 standardı B kalite seviyesini aşan çatlak ve gözenek gibi hacimsel hatalar gözlemlenmemiştir.



Şekil 6.2: Radyografik Test Sonuçları

### 6.2. Makroyapı İnceleme

Metalografik hazırlama işlemlerine tabi tutulan makroyapı numunelerinin görüntüleri, Gedik Test Merkezi Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan Nikon Inspectis makro inceleme cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen makroyapı görüntüleri, Şekil 6.3’de sunulmaktadır. Yapılan incelemeler sonucunda, numuneler üzerinde TS EN ISO 5817 standardı esas alınarak yapılan değerlendirmelerde herhangi bir penetrasyon eksikliği, pasolar arası ergime noksanlığı, çatlak ya da gözenek gibi hacimsel veya hat yüzeyine yansıyan kusur tiplerine rastlanmamıştır. Bu durum, uygulanan kaynak parametrelerinin ve birleşim geometrisinin, kaynak dikişi bütünlüğü ve kalite seviyesi açısından uygun olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, kaynaklı birleşimlerin metalurjik bütünlüğünün sağlandığını ve prosesin tekrarlanabilirliği açısından güvenilir olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, literatürde benzer yapıların kaynaklı birleşimlerinde bildirilen kusur oranlarına kıyasla oldukça olumlu bir tablo ortaya koymaktadır. Özellikle WAAM yöntemiyle

Üretilen yüksek mukavemetli yapılar ile zırh çeliği gibi kritik öneme sahip malzemelerin birleştirilmesinde, yüzeysel ve hacimsel kaynak kusurlarının gözlenmemiş olması, bu yöntemlerin savunma ve imalat sanayiinde daha yaygın kullanılabilirliğini desteklemektedir.



**şekil 6.3: P500-WAAM ER110 Makro İnceleme Görüntüsü**

### **6.3. Sertlik Testi Sonuçları**

şekil 6.4'te, WAAM yöntemiyle ER110 kaynak teli kullanılarak katmanlı imalatla üretilmiş plaka ile yerli retim Protection 500 zırh çeliği plakasının robotik GMAW yöntemiyle birleştirilmesinden elde edilen kaynaklı numuneye ait mikrosertlik profilleri sunulmuştur. Sertlik lmleri, kaynak bölgesine dik olarak alınan kesit üzerinden, numunenin üst yüzeyinden 2 mm aşağıdan (ÜST), orta eksenenden (ORTA) ve alt yüzeyinden 2 mm yukarıdan (ALT) olmak üzere üç farklı hat boyunca, her 0.5 mm'de bir HV1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Grafikte, sıfır (0) noktası kaynak merkez hattı olarak alınmış olup; negatif eksen WAAM (ER110) plakasını, pozitif eksen ise Protection 500 zırh çeliği plakasını temsil etmektedir.

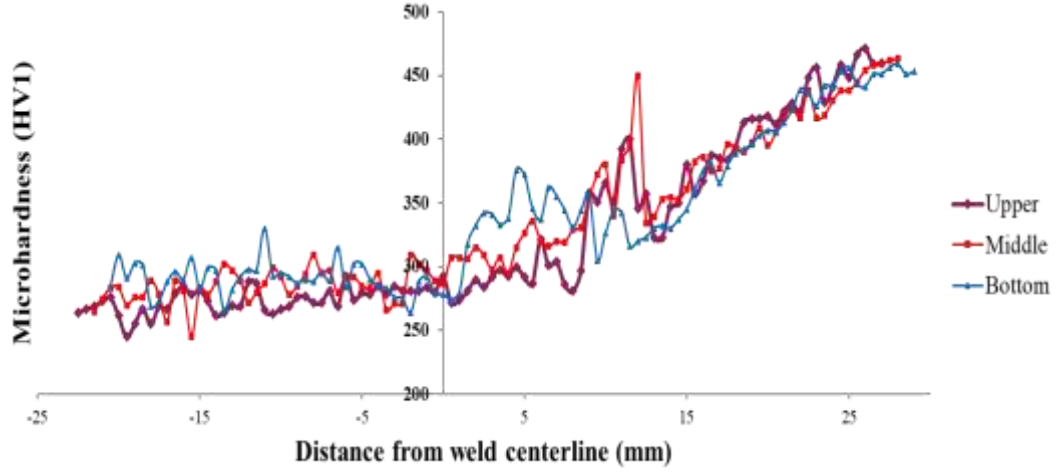
WAAM tarafında, tüm hatlar boyunca ölçülen sertlik değerleri yaklaşık olarak 250-290 HV aralığında seyretmektedir. Bu homojen ve dengeli dağılım, WAAM yönteminin kontrollü parametrelerle uygulanması sonucunda elde edilen kararlı mikroyapının bir göstergesidir. Sıfır noktasına yakın bölgede, kaynak metalinin Protection 500'e yakın olan yarısında hafif bir sertlik artışı gözlemlenmektedir. Bu bölgedeki sertlik değerleri üst bölgede daha çok 270-300 HV arasında iken; orta bölgede 300-340 arasında, alt bölgede ise 320-380 arasında seyretmektedir. Üst bölgelere gidildikçe sertlik değerlerinin azalması V kaynak ağzı nedeniyle daha fazla kaynak metalinin yığılması neden olarak gösterilebilir. Alt bölgelerdeki daha dar kaynak ağzı nedeniyle Protection 500 eliği ile daha fazla karışım meydana gelmektedir. Kısacası, kaynak banyosunda Protection 500'n

yüksek alaşım ve karbon içeriğinin kaynak metaline difüzyon yoluyla karışması sonucunda, dilution etkisiyle alt bölgelerde daha yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür.

Protection 500 tarafındaki IEB bölgelerine bakıldığında en yüksek sertlik, üst ölçüm hattında +14 mm civarında yaklaşık 450 HV ile kaydedilmiş; orta hatta 400 HV, alt hatta ise 376 HV seviyelerine ulaşılmıştır. Bu değerler, Protection 500 tarafındaki IEB (CGHAZ veya FGHAZ) bölgelerinde martenzitik yapılar oluştuğunu göstermektedir. Sertliğin üst bölgede pik yapmasının olası sebebi, üst hattın son kaynak pasosuna denk gelmesi ve tavlama etkisi oluşturacak başka bir paso ile yeniden ısıtılmamasıdır. Diğer hatlarda daha düşük pik değerlerinin ölçülmesi ise, sonraki kaynak pasolarının önceki tabakaları tavlamaıyla açıklanabilir.

Sertlik profili, yüksek sertlik seviyesinin hemen ardından üç hatta da belirgin bir düşüş göstermiştir. Bu düşüş, Protection 500 çeliğinin IEB bölgesindeki termal döngülerle meydana gelen temperleme etkisine bağlı yumuşama ile ilişkilendirilmektedir. Alt hatta minimum sertlik 316 HV, orta hatta 339 HV, üst hatta ise 323 HV olarak ölçülmüştür. Bu noktalar, IEB içerisinde balistik performansı azaltabilecek gevrek olmayan ancak yumuşamış alanlar olarak değerlendirilebilir. İlerleyen bölgelerde ise, tüm hatlarda sertlik değerleri kademeli olarak tekrar artış göstermiş ve +30 mm sonrasında WAAM ve kaynak metalinden bağımsız olarak Protection 500 zırh çeliğinin baz sertlik değeri olan yaklaşık 460 HV seviyelerine ulaşılmıştır.

Bu gözlemler, özellikle zırh çeliklerinin kaynaklanmasında lokal mikroyapı değişimlerinin sertlik üzerine doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, robotik kaynak kontrolü ve optimum interpass sıcaklığına rağmen, bazı bölgelerde aşırı sertlik oluşumunun önüne geçilemediği ve bu bölgelerin potansiyel gevrek davranış sergileyebileceği değerlendirilmektedir.



**Şekil 6.4: Sertlik Test Sonuçları**

#### 6.4. Çekme Testi Sonuçları

Bu çalışmada, robotik GMAW yöntemiyle birleştirilmiş olan WAAM-ER110 ve Protection 500 zırh çeliği plakalarından hazırlanan kaynaklı numuneler üzerinde çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel prosedürler ISO 6892-1 standardına uygun olarak yürütülmüş, testler oda sıcaklığında ve kaynak yönüne dik (transverse) olarak çıkarılan numuneler üzerinde yapılmıştır. Çekme numuneleri, kaynak bölgesi redüksiyon (daralma) bölgesine gelecek şekilde yerleştirilmiş ve hem WAAM tarafı hem de Protection 500 tarafı test numunesi içinde kalacak şekilde çıkarılmıştır.

Testler sonucunda iki adet kaynaklı numune değerlendirmeye alınmış, sonuçlar Çizelge 6.1'de sunulmuştur.

**Çizelge 6.1: Çekme Testi Sonuçları**

Numune	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Kırılma Bölgesi
1	653	834	10.May	Kaynak Bölgesi
2	669	842	Ağu.85	Kaynak Bölgesi
<b>Ortalama</b>	<b>661</b>	<b>838</b>	<b>Eyl.45</b>	-

Tüm numunelerde kırılmanın kaynak bölgesinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, kaynak metalinin ve/veya ısıdan etkilenmiş bölgenin (IEB) mekanik performans açısından bir zayıflık bölgesi oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek sertliğe ve mukavemete sahip olan Protection 500

ana malzemesiyle karşılaştırıldığında, kaynak bölgesinin bu mukavemeti tam olarak koruyamadığı görülmektedir.

Protection 500 çeliği için yapılan testlerde: Akma dayanımı: 1250 MPa, Çekme dayanımı: 1600 MPa, Uzama: %8 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerle karşılaştırıldığında, kaynaklı numunelerin ortalama akma dayanımı Protection 500'e göre yaklaşık %47 daha düşüktür (661 MPa vs 1250 MPa), çekme dayanımı ise %48 daha düşüktür (838 MPa vs 1600 MPa). Ancak dikkat çekici bir durum, uzama değerlerinin %9.45 ortalama ile Protection 500'ün üzerine çıkmış olmasıdır. Bu durum, kaynak metalinde veya birleşim bölgesinde sünekliğin görece yüksek olduğunu; mukavemetin düşmesine rağmen deformasyon kapasitesinin korunduğunu göstermektedir.

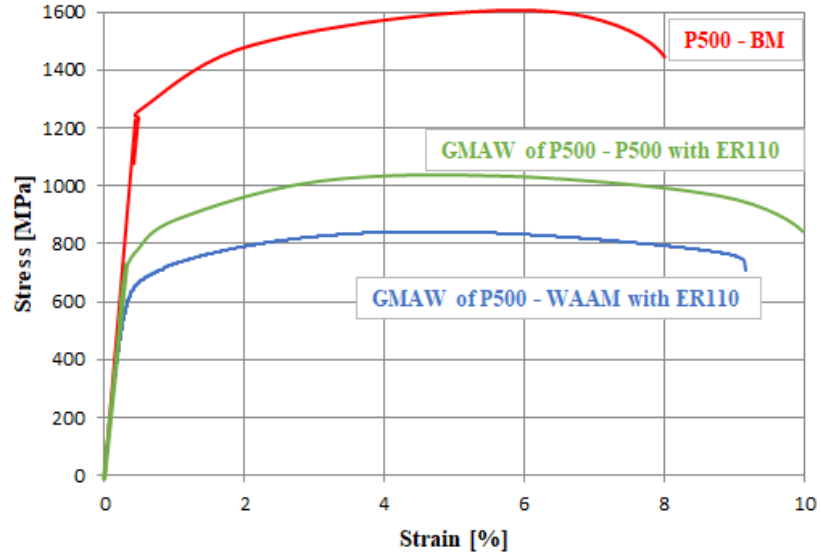
Diğer yandan, WAAM yöntemiyle üretilmiş ER110 plakasından ayrıca çıkarılan numunede elde edilen değerler: Akma dayanımı: 690 MPa, Çekme dayanımı: 760 MPa, Uzama: %19 şeklindedir. Bu sonuçlar, WAAM ile üretilen yapının kaynaklı bölgede mukavemet anlamında belirleyici olduğunu, ancak birleşim sonrası oluşan IEB ve mikroyapı değişimlerinin çekme dayanımı üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde:

WAAM-ER110 tarafı görece daha sünek ve düşük mukavemetli bir yapı sunarken, Protection 500, çok daha yüksek dayanım ve düşük uzama ile karakterize olmaktadır.

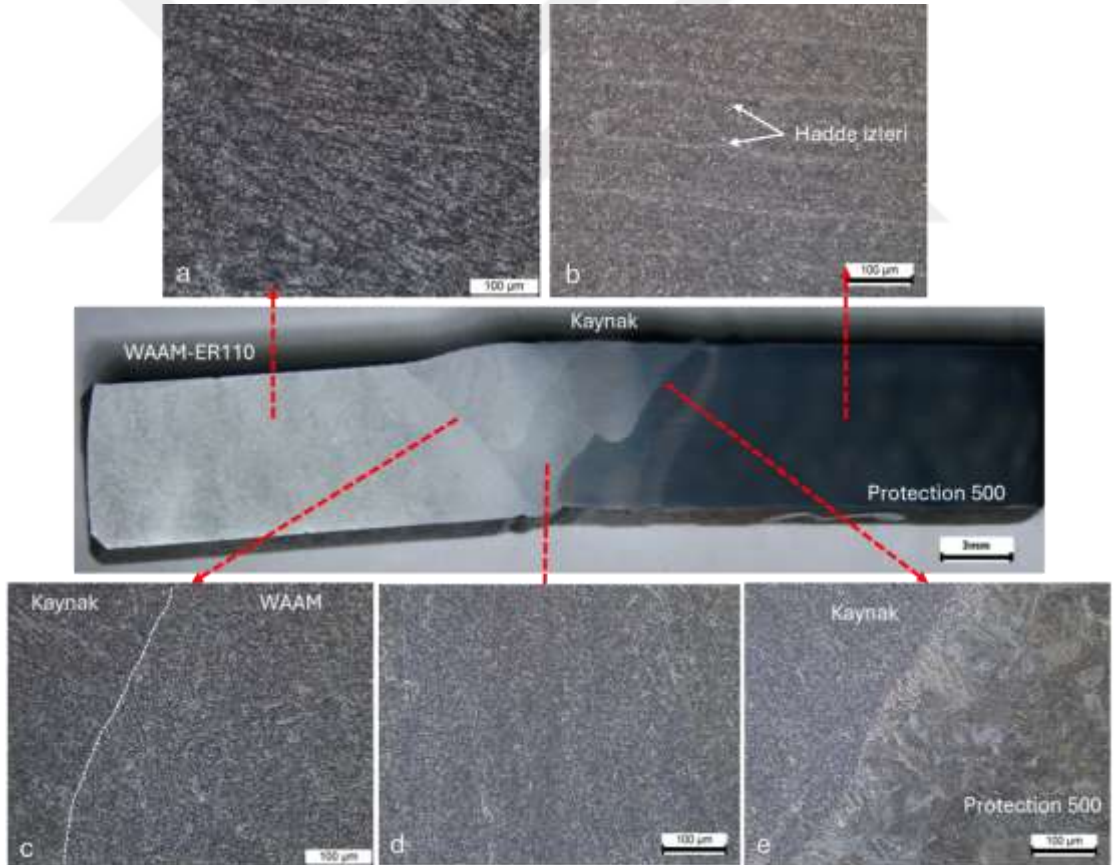
Kaynaklı bölge ise bu iki farklı karakteristiğin birleştiği bir geçiş zonu olarak davranmakta; her iki malzemenin özelliklerinden ödün verilmiş karma bir performans profili sergilemektedir.

Yapılan bu çekme testleri, WAAM yöntemiyle üretilmiş yapılar ile yüksek dayanımlı zırh çeliklerinin kaynakla birleştirilmesinde mekanik performans açısından hala geliştirme alanları bulunduğunu göstermektedir. Özellikle kaynak parametrelerinin ve interpass sıcaklıklarının daha rafine edilmesi, uygun dolgu telinin seçimi ve olası post-weld ısı işlemlerin uygulanması, birleşim bölgesindeki mukavemet kaybının önüne geçilmesi açısından gelecekteki çalışmalar için önem arz etmektedir.

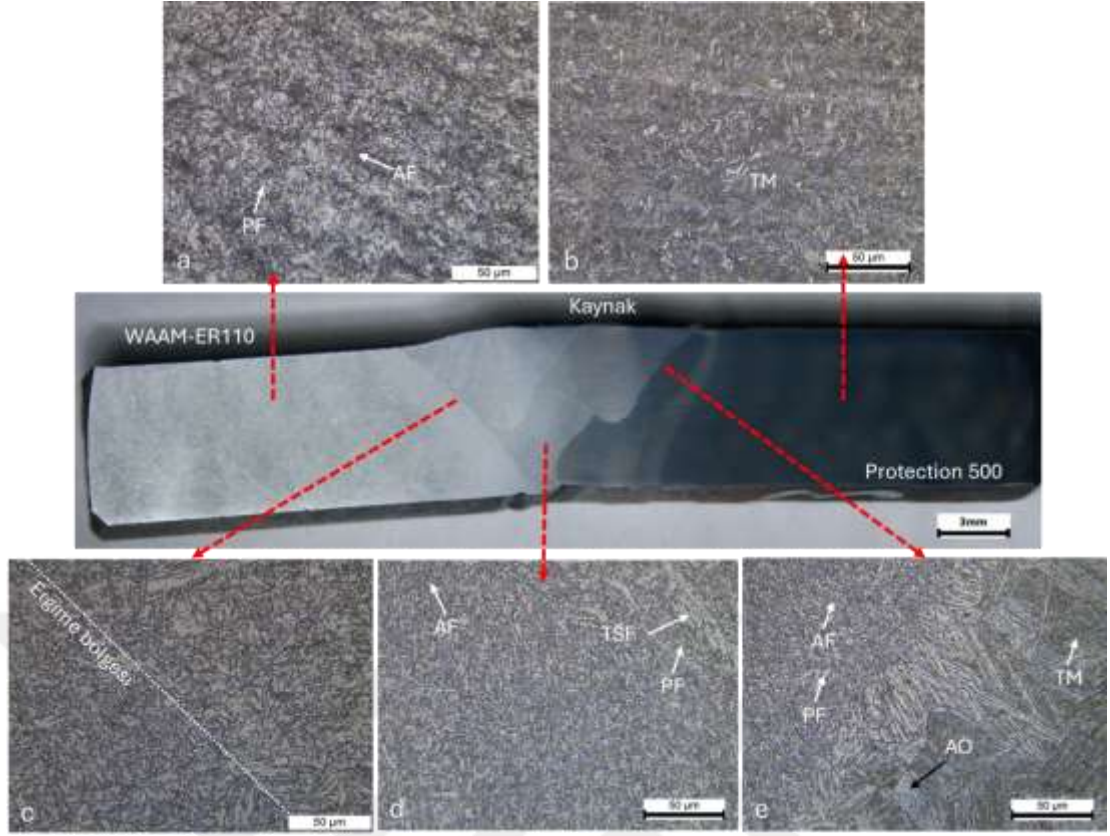


Şekil 6.5: Çekme Testi Sonuçları

### 6.5. Mikroyapı İnceleme



Şekil 6.6: Mikroyapı İnceleme Görüntüleri 20X a) WAAM Plakası BM bölgesi b) P500 BM bölgesi c) Kaynak Metal, -WAAM Geçiş d) Kaynak Metali Bölgesi e) Kaynak Metali- P500 Geçiş



**Şekil 6.7: Mikroyapı İnceleme Görüntüleri 50X a) WAAM Plakası BM bölgesi b) P500 BM bölgesi c) Kaynak Metal, -WAAM Geçiş d) Kaynak Metali Bölgesi e) Kaynak Metali- P500 Geçiş**

Makro görünüm, mikroyapılarla birlikte Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de verilmiştir. WAAM ve GMAW işlemlerinde aynı dolgu metalinin kullanılması nedeniyle, kaynak metali (WM) ile WAAM geçiş bölgesi arasında belirgin bir mikroyapısal farklılık gözlemlenmemiştir. Bununla birlikte, WAAM tarafında biraz daha fazla poligonal ferrit (PF) oluşumu tespit edilmiştir. Mikrosertlik değerlerinde gözlemlenen hafif düşüş, ısı çevrim etkisiyle soğuma hızının yavaşlamasına bağlanmakta; bu durum, iğnemsî ferrit (AF) miktarında hafif azalma ve PF oranında artışa neden olmaktadır.

Kaynak metalinde (kaynak metali dolgusunda), oldukça düşük miktarda tane sınırı ferriti (GBF) ve yüksek oranda iğnemsî ferrit (AF) oluştuğu belirlenmiştir. Plaka (zırh çeliği) tarafında ise büyük ön östenit taneleri içerisinde temperlenmiş martenzit ve kalıntı östenit fazları gözlemlenmiştir. Mikrosertlik, temel metal (ana malzeme) yönünde kademeli olarak artmakta; en yüksek sertlik ince taneli ısıdan etkilenmiş bölgede (FGHAZ) görülmekte, ardından orta ve kaba taneli IEB geçiş

bölgesinde (ICHAZ-SCHAZ) minimum seviyeye inmekte ve soğumaya bağlı temperleme etkisiyle baz metal sertliğine ulaşmaktadır.



## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 7.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, ferritik ER110S-G kaynak teli kullanılarak WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) yöntemiyle üretilmiş yüksek mukavemetli metal plaka ile yerli üretim Protection 500 zırh çeliği, robotik GMAW (Gas Metal Arc Welding) prosesi ile birleştirilmiştir. Kaynaklı birleşimin tahribatsız muayene sonuçları, mikroyapı karakterizasyonu, mikrosertlik dağılımı ve mekanik performansı detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen başlıca bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Tahribatsız muayene sonuçlarında ulusal ve uluslararası standartların belirttiği limit değerleri aşan herhangi bir süreksizlik tespit edilmemiş olup; kaynaklı plakanın yapısal bütünlüğü sağladığı görülmüştür.
- WAAM üretilen plakada ortalama ısı girdisi 330 J/mm olup, elde edilen mikroyapı; iğne (asiküler) ferrit, poligonal ferrit ve az miktarda tane sınırı ferrit fazlarından oluşmaktadır. Mikrosertlik ölçümleri, 250–290 HV aralığında oldukça kararlı bir dağılım sergilemiş; gevrekleşmeye ya da ani sertlik düşüşlerine rastlanmamıştır. Bu durum, WAAM üretiminin kontrollü bir termal döngü ile uygulandığını ve ferritik yapının homojenliğinin korunduğunu göstermektedir.
- Kaynak bölgesinde, merkez hatta yakın bölgelerde sertlik değerleri hafif artış eğilimi göstermiştir. Bu artış, kullanılan kaynak telinin kimyasal kompozisyonu ile ana malzeme arasında oluşan seyrelme durumuyla ilişkilendirilmiştir. Protection 500 tarafına ilerledikçe, kaynak bölgesinde ve özellikle IEB (Isıdan Etkilenmiş Bölge) içerisinde, hızlı soğumanın etkisiyle sertlik sonuçlarında anlamlı bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle iri ve küçük taneli ısı tesiri altındaki bölgeye karşılık gelen bölgede mikrosertlik, üst hatta 450 HV'ye kadar ulaşmıştır. Bu artışın ardından, IEB içerisindeki yumuşama bölgesinde sertlik değerlerinde 310-320 HV bantlarına kadar düşüş izlenmiş;

ardından ana malzeme sertliğine yaklaşmış ve tekrar 460 HV seviyelerine ulaşılmıştır.

- Çekme testlerinde, kaynaklı numunelerde ortalama akma dayanımı 661 MPa, çekme dayanımı 838 MPa ve uzama %9.45 olarak elde edilmiştir. Bu değerler, Protection 500 ana malzemeye kıyasla sırasıyla %47 ve %48 oranında düşüş göstermektedir. Ancak süneklik açısından, kaynak bölgesinde uzama değerinin daha yüksek olması dikkat çekicidir. Bu durum, kaynak bölgesinde mekanik enerji absorpsiyon kabiliyetinin korunduğunu ve sünek bir kırılma davranışının sürdürülebildiğini göstermektedir.

Bu çalışma, WAAM yöntemiyle ER110 kaynak teli kullanılarak üretilmiş yüksek mukavemetli bir metal plakanın, yerli üretim Protection 500 zırh çeliği ile robotik GMAW yöntemiyle başarıyla birleştirilebileceğini deneysel olarak göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, WAAM parçalarının zırh sınıfı malzemelerle kaynağında yapısal bütünlüğün sağlanabildiğini ortaya koymakta ve bu yöntemin savunma sanayinde hibrit üretim çözümleri için umut vadeden bir alternatif olduğunu göstermektedir.

## 7.2 Öneriler

WAAM üretilen plakaların mikrosertlik profilinde gözlenen stabil dağılım, düşük ısı girdisiyle optimize edilmiş bir termal çevrimin etkili olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, ilerleyen çalışmalarda farklı ısı girdisi seviyeleri, çoklu paso stratejileri ve farklı tel besleme hızlarının mikroyapı ve sertlik homojenliği üzerindeki etkisi araştırılabilir.

WAAM ile üretilen numunelerde sünek kırılma davranışının korunmuş olması, bu yöntemin zırh çeliği uygulamalarında mekanik açıdan güvenilir olduğu fikrini desteklemektedir. Gelecek çalışmalarda, bu davranışın doğrulanması için darbe testi, yorulma testi ve dinamik kopma testleri gibi ek yükleme tipleri uygulanmalıdır.

Protection 500 çeliği ile WAAM üretilen plakaların birleşiminde IEB bölgesinde gözlenen sertlik artışı, hızlı soğuma etkisine dayanmaktadır. Bu nedenle, soğuma hızını kontrol eden ön ısıtma, ara paso sıcaklığı ve kaynak sonrası ısıl işlem parametreleri optimize edilerek IEB içerisindeki sertlik gradyanı azaltılabilir.

WAAM–zırh çeliği birleşimlerinde elde edilen yapısal bütünlük umut verici olsa da, farklı dolgu metali kompozisyonları (ör. ferritik yerine martenzitik veya nikel alaşımlı kaynak telleri) test edilerek hem sertlik hem süneklik dengesinin geliştirilmesi hedeflenebilir.

Bu çalışma tek yönlü çekme yüklemesi temelinde gerçekleştirilmiştir. Gelecekte, balistik darbe altındaki davranışı incelemek amacıyla birleşim bölgesine çoklu mermi, farklı açı ve hızlarda balistik testler uygulanmalı ve WAAM+zırh çeliği bağlantısının gerçek saha koşullarındaki performansı değerlendirilmelidir.

WAAM plakasının mekanik özelliklerinin ana malzemeye kıyasla belirli oranda düşüş gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle, mekanik özellikleri iyileştirmek için ısıtılma işlemi uygulanmış WAAM plakalarının aynı birleşim koşullarındaki performansının karşılaştırılması önerilmektedir.

Savunma sanayii uygulamaları açısından, WAAM yöntemi ile zırh çeliği bileşenlerin entegre üretim sürecinin maliyet–performans analizi yapılmalı; seri üretime uygunluk, üretim süresi, malzeme verimliliği ve bakım/onarım avantajları değerlendirilmelidir.

Ayrıca, WAAM yöntemiyle üretilen parçaların sandviç kaynak tasarımı, hibrit birleştirme teknikleri veya çok katmanlı zırh mimarisi ile birlikte kullanılması, balistik dayanımın artırılması açısından gelecek çalışmalara konu olabilir

## KAYNAKÇA

- [1] L. Kuzmikova, An investigation of the weldability of high hardness armor steel, Ph.D. dissertation, University of Wollongong, Wollongong, Australia, 2013.
- [2] G. Magudeeswaran, V. Balasubramanian, and G. M. Reddy, Effect of welding processes and consumables on fatigue crack growth behaviour of armour grade quenched and tempered steel joints, *Defence Technology*, vol. 10, 2014, pp. 47–59.
- [3] C. Çelik, M. Göçmen, O. Çoban, H. Baykal, U. Gürol, and M. Koçak, Balistik zırh çeliklerinin kaynaklanabilirliği, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 28, no. 3, 2023, doi:10.17482/uumfd.1333002.
- [4] H. Şoykan, Z. Aslanoğlu, and Y. Karakaş, Zırh çeliklerinin metalurjisi, Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Müdürlüğü, Türkiye.
- [5] S. K. Das and G. Thomas, On the morphology and substructure of martensite, *Metallurgical Transactions*, vol. 1, no. 1, 1970, pp. 325–327.
- [6] G. Malakondaiah, M. Srinivas, and P. Rama-Rao, Ultrahigh-strength low-alloy steel with enhanced fracture toughness, *Progress in Materials Science*, vol. 42, 1997, pp. 209–242.
- [7] H. H. Kolla et al., Development of an ultrahigh strength low alloy steel for armour applications, *Materials Science and Technology*, vol. 27, no. 2, 2011, pp. 551–555.
- [8] H. Ş. Atapek, Bor katkılı bir zırh çeliğinin fiziksel metalurjik esaslar doğrultusunda geliştirilmesi ve balistik performansının değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011.
- [9] S. Naveen Kumar, V. Balasubramanian, S. Malarvizhi, A. H. Rahman, and V. Balaguru, Effect of failure modes on ballistic performance of gas metal arc welded dissimilar armour steel joints, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 37, 2022, pp. 570–583, doi:10.1016/j.cirpj.2022.03.004.
- [10] S. J. Cimpoeu, The mechanical metallurgy of armour steels, Land Division Defence Science and Technology Group, Australia, 2016. [11] MIL-DTL-46100E, Detail specification: Armor plate, steel, wrought, high-hardness, 2019.
- [11] MIL-DTL-46100E, Detail specification: Armor plate, steel, wrought, high-hardness, U.S. Department of Defense, 2019.
- [12] C. Akça and A. Karaaslan, Weldability of class 2 armor steel using gas tungsten arc welding, *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 34, no. 2, 2008, pp. 110–112.
- [13] G. Çam, Kaynak bilimi ve teknolojisi, Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 2020.
- [14] Kaynak Tekniği Föyü, Bilecik Üniversitesi, Türkiye.

- [15] Ş. Karagöz and H. Atapek, Bor katkılı zırh çeliklerinin kırılma davranışı, in Uluslararası Kırılma Konferansı, 2007, pp. 186–196.
- [16] M. Vural, F. Piroğlu, Ö. B. Çağlayan, and E. Uzgider, Yapı çeliklerinin kaynaklanabilirliği, TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri, no. 426, 2003/4.
- [17] D. Janicki, Disk laser welding of armor steel / Spawanie laserem dyskowym stali pancerniej, Archives of Metallurgy and Materials, vol. 59, no. 4, 2014, pp. 1641–1646, doi:10.2478/amm-2014-0279.
- [18] A. Cabrilo and K. Geric, Weldability of high hardness armor steel, Advanced Materials Research, vol. 1138, 2016, pp. 79–84, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1138.79
- [19] O. Slyvinsky, Y. Chvertko, and S. Bisyk, Effect of welding heat input on heat-affected zone softening in quenched and tempered armor steels, High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes, vol. 23, no. 3, 2019, doi:10.1615/HighTempMatProc.2019031690.
- [20] S. J. Alkemade, The weld cracking susceptibility of high hardness armour steel, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Australia, 1996. [21] N. Krishna Murthy, G. D. Janaki Ram, B. S. Murty, G. M. Reddy, and T. J. P. Rao, Carbide-free bainitic weld metal: A new concept in welding of armor steels, Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 45, no. 6, 2014, pp. 2327–2337, doi:10.1007/s11663-0140120-1.
- [21] N. Krishna Murthy, G. D. Janaki Ram, B. S. Murty, G. M. Reddy, and T. J. P. Rao, Carbide-free bainitic weld metal: A new concept in welding of armor steels, Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 45, no. 6, 2014, pp. 2327–2337, doi:10.1007/s11663-0140120-1.
- [22] R. Neuvonen, T. Skriko, and T. Björk, Discretization and material parameter characterization for a HAZ in direct-quenched armor steel, European Journal of Mechanics - A/Solids, vol. 89, 2021, doi:10.1016/j.euromechsol.2021.104305.
- [23] G. P. Rajeev, M. Kamaraj, and S. R. Bakshi, Al-Si-Mn alloy coating on aluminum substrate using cold metal transfer (CMT) welding technique, The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society (TMS), vol. 66, no. 6, 2014, pp. 1061–1067.
- [24] I. Barényi, Secondary processing of UHSLA Armox 500 steel with heat-based technologies, University Review, vol. 6, no. 2, 2012, ISSN 1337-6047.
- [25] Ş. Karagöz and H. Ş. Atapek, Fiziksel metalurjik esaslarla geliştirilen bor katkılı zırh çeliğinin kaynaklanabilirliği, in 1. Uluslararası Kaynak Teknolojisi Konferansı, 2009, pp. 840–849.
- [26] E. Zengin, Farklı ön tav sıcaklıklarında kaynaklı birleştirilen zırh çeliklerinin mekanik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [27] S. Kara and M. H. Korkut, Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan zırh plakalarında kaynak sonrası ısıl işlemin birleşim mukavemetine etkisinin araştırılması, Savunma Bilimleri Dergisi, vol. 11, no. 2, 2012, pp. 159–171.
- [28] M. M. Atabaki, J. Ma, G. Yang, and R. Kovacevic, Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations, Materials and

Design, Research Center for Advanced Manufacturing (RCAM), Southern Methodist University, Dallas, TX, USA, 2014.

- [29] I. Barényi, O. Hřeš, and P. Lip, Changes in mechanical properties of armoured UHSLA steel Armox 500 after over tempering, *Problems of Mechatronics Armament, Aviation, Safety Engineering*, vol. 14, 2013, pp. 7–14.
- [30] S. Kurt, Farklı kaynak ağzı açısı ve geometrilerinde gerçekleştirilen kaynakların MIL-A 46100 zırh çeliği mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, T.C. Kara Harp Okulu, Savunma Bilimleri Enstitüsü, Teknoloji Yönetimi Anabilim Dalı, Ankara, 2015
- [31] O. Çoban, F. Kaymak, U. Gürol, and M. Koçak, Characterization of fillet welded armor steel performed by robotic gas metal arc welding: Effect of heat input on microstructure and microhardness, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 33, no. 1, 2024, pp. 1–18, doi:10.1007/s11665-023-09058-y.
- [32] R. M. Kurt, Zırh çeliklerinin robotik MIG/MAG kaynağı ile birleştirilmesinde ilave metallerin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gedik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2022.
- [33] O. Çoban, U. Gürol, S. Erdöl, and M. Koçak, Effect of plate thickness on the microstructure and hardness of robotic fillet welded armour steels, 2021.
- [34] U. Gürol, T. Karahan, S. Erdöl, O. Çoban, H. Baykal, and M. Koçak, Characterization of armour steel welds using austenitic and ferritic filler metals, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 75, no. 3, 2022, doi:10.1007/s12666-021-02464-7.
- [35] C. Çelik, Sandviç kaynak yöntemi ile birleştirilen zırh çeliklerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gedik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2023.
- [36] T. Özdemir, Mechanical & microstructural analysis of armor steel welded joints, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 2020, doi:10.29137/umagd.488104.

## ÖZGEÇMİŞ

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Önlisans** : 2018, Marmara Üniversitesi, Makine
- **Lisans** :2022, İstanbul Gedik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2025, İstanbul Gedik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

### MESLEKİ DENEYİM:

- **2015-2020** : Haksan Makine – CNC Operatörü
- **2021** : AFS Hassas Döküm- Stajyer
- **2022-Halen** : Haksan Makine – Üretim Mühendisi

### YAYINLAR VE KATILIMLAR:

- O. Çoban, F. Kaymak, U. Gürol, and M. Koçak, Characterization of fillet welded armor steel performed by robotic gas metal arc welding: Effect of heat input on microstructure and microhardness, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 33, no. 1, 2024, pp. 1–18, doi:10.1007/s11665-023-09058-y.
- F. Kaymak, O. Çoban, U. Gürol, and M. Koçak, “Investigation on the similar and dissimilar weld joints between WAAM parts and armor steel plate using Elcor ER110 metal-cored wire,” in *Proc. 2nd International Hybrid Conference on Advances in Welding and Metal Additive Manufacturing Technologies (WAM 2024)*, Nov. 2024, Istanbul, Turkey.