

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**KAYNAK AĞIZ TASARIMININ YÜKSEK MUKAVEMETLİ
BALİSTİK ZİRH ÇELİKLERİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müesser 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



**KAYNAK AĞIZ TASARIMININ YÜKSEK MUKAVEMETLİ
BALİSTİK ZİRH ÇELİKLERİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Müesser KAYMAK
(221210002)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Uğur GÜROL

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

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

Prof. Dr. Gürel ÇAM

Üye (İmza)

İskenderun Teknik Üniversitesi

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kaynak Ağız Tasarımının Yüksek Mukavemetli Balistik Zırh Çeliklerinin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisinin 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)

Müesser KAYMAK

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, İstanbul Gedik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Yüksek Lisans Programı kapsamında yürütülmüş olup, “Kaynak ağzı tasarımının yüksek mukavemetli balistik zırh çeliklerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi” konusuna odaklanmıştır. Çalışmanın tüm deneysel aşamaları İstanbul Gedik Üniversitesi İktisadi İşletmesi bünyesinde, Gedik Test Merkezi Tahribatlı ve Tahribatsız Birimlerin altyapı desteği ile gerçekleştirilmiştir.

Tez sürecim boyunca bilgi birikimleri, yol göstericilikleri ve her aşamadaki yapıcı katkıları için başta değerli danışmanım Doç. Dr. Uğur Gürol olmak üzere Dr. Öğr. Üyesi Ozan Çoban, Prof. Dr. Mustafa Koçak ve diğer tüm hocalarıma içtenlikle teşekkür ederim. Çalışmanın yürütülmesinde laboratuvar erişimi, teknik ekipman ve tecrübe paylaşımı sağlayan Gedik Kaynak ve Gedik Test Merkezi Tahribatlı / Tahribatsız Birim çalışanlarına destekleri için ayrıca teşekkür ederim.

Bu yoğun süreçte motivasyon ve sabırlarıyla maddi manevi her zaman yanımda olan ailem Yasemin Göçmen, İsmail Göçmen ve Feyza Ünal ile ikinci ailem Hatice Kaymak ve Metin Kaymak’a teşekkür ederim.

Bu çalışmanın her aşamasında sabrı, anlayışı ve koşulsuz desteğiyle yanımda olan; yoğun çalışma dönemlerinde moralimi yüksek tutarak yükümü paylaşması sayesinde bu süreci benim için sürdürülebilir kılan sevgili eşim Fatih Kaymak’a teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos 2025

Müesser KAYMAK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ZIRH ÇELİKLERİ	4
2.1 Zırh Çeliklerinin Üretim Prosesleri ve Sınıflandırılması.....	5
3. KAYNAK	8
3.1 Ergitme Kaynak Yöntemleri.....	9
3.1.1 Gazaltı ark kaynak yöntemi.....	9
3.1.1.1 MIG (Metal inert gaz) kaynağı	9
3.1.1.2 MAG (Metal aktif gaz) kaynağı.....	10
3.1.1.3 TIG (Tungsten inert gaz) kaynağı.....	11
3.1.2 Toz altı kaynağı	12
3.1.3 Elektrik ark kaynağı	13
3.1.4 Lazer kaynak yöntemi	14
3.1.5 Plazma ark kaynak yöntemi.....	14
3.1.6 Oksi-asetilen gaz ergitme kaynak yöntemi.....	15
3.1.7 Elektron ışın kaynak yöntemi	16
3.2 Katı Hal Kaynak Yöntemleri	16
3.2.1 Difüzyon kaynağı	16
3.2.2 Sürtünme kaynağı.....	17
3.2.3 Sürtünme-karıştırma kaynağı	17
3.2.4 Nokta direnç kaynağı.....	18
3.2.5 Dikiş direnç kaynağı.....	19

3.2.6 Kabartılı direnç kaynağı	19
3.2.7 Alın yakma kaynağı.....	20
3.4 Kaynak Kabiliyeti	20
3.5 Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti	21
4. BALİSTİK BİLİMİ.....	24
4.1 Balistik Testlerde Kullanılan Standartlar	24
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	26
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	34
6.1 Kaynak Sarf Malzeme ve Ana Malzemenin Seçimi	34
6.2 Kaynak Düzeneklerinin Hazırlanması	36
6.3 Tahribatsız Muayene.....	38
6.3.1. Sıvı penetrant muayene	38
6.3.2. Radyografik muayene.....	39
6.4 Tahribatlı Muayene.....	39
6.4.1 Eğme testi	40
6.4.2 Çekme testi	40
6.4.3 Çentik darbe testi	42
6.4.4 Sertlik testi.....	43
6.5 Metalografik Muayene.....	43
6.5.1 Test numunesi hazırlığı	43
6.5.2 Makroyapı inceleme	45
6.5.3 Mikroyapı inceleme.....	45
6.5.4 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri.....	46
6.6 Balistik Test	46
7. SONUÇLAR	48
7.1 Tahribatsız Muayene Sonuçları	48
7.1.1 Görsel muayene sonuçları	48
7.1.2 Sıvı penetrant muayene sonuçları.....	48
7.1.3 Radyografik muayene sonuçları	48
7.2 Makroyapı İnceleme	49
7.3 Eğme Testi Sonuçları.....	50
7.4 Sertlik Testi Sonuçları	51
7.5 Çekme Testi Sonuçları.....	53
7.6 Çentik Darbe Testi Sonuçları.....	56
7.7 Mikroyapı İnceleme	57

7.8 Balistik Test Sonuçları.....	63
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66
8.1. Sonuçlar	66
8.2 Öneriler.....	67
KAYNAKÇA	69
ÖZGEÇMİŞ.....	74



KISALTMALAR

BM	: Ana metal
Ceş	: Karbon eşdeğeri
CGHAZ	: Kaba taneli ısıdan etkilenen bölge
CP	: Komple deformasyon
FGHAZ	: İnce taneli ısıdan etkilenen bölge
I/	: Tek eğimli, (tek pah) kaynak ağzı geometrisi
IEB	: Isıdan etkilenen bölge
K	: Çift eğimli, (çift pah) kaynak ağzı geometrisi
KM	: Kaynak metali
MAG	: Metal aktif gaz
MIG	: Metal soy gaz
PP	: Bölgesel deformasyon
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TIG	: Tungsten soy gaz
V	: Tek V kaynak ağzı geometrisi
X	: Çift V kaynak ağzı geometrisi

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa No.
Çizelge 3.1: Kaynak Yöntemleri	8
Çizelge 6.1: M450 Zırh Çeliği Plakalarının Kimyasal Analizi (%Ağ.)	35
Çizelge 6.2: M450 Zırh Çeliği Plakalarının Mekanik Özellikleri.....	35
Çizelge 6.3: GekaTec ER 110 SG Kaynak Telinin Kimyasal Analizi (%Ağ.).....	35
Çizelge 6.4: GekaTec ER 110 SG Kaynak Telinin Mekanik Özellikleri	35
Çizelge 6.5: Kaynak Parametreleri	38
Çizelge 7.1: Çekme Testi Sonuçları	54
Çizelge 7.2: Çentik Darbe Test Sonuçları	56

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 2.1: Zırhlı Araç.....	5
Şekil 2.2: Balistik Test Sonrası Zırh Çeliği Görüntüsü.....	7
Şekil 3.1: MIG Kaynak Yöntemi	10
Şekil 3.2: MAG (Metal Aktif Gaz) Kaynağı.....	11
Şekil 3.3: TIG Kaynak Yöntemi	12
Şekil 3.4: Tozaltı Kaynak Yöntemi	13
Şekil 3.5: Elektrik Ark Kaynağı	13
Şekil 3.6: Lazer Kaynak Yöntemi	14
Şekil 3.7: Plazma Ark Kaynak Yöntemi	15
Şekil 3.8: Oksi-Asetilen Gaz Ergitme Kaynak Yöntemi.....	15
Şekil 3.9: Elektron Işın Kaynak Yöntemi	16
Şekil 3.10: Difüzyon Kaynağı.....	16
Şekil 3.11: Sürtünme Kaynağı	17
Şekil 3.12: Sürtünme Karıştırma Kaynağı	18
Şekil 3.13: Nokta Direnç Kaynağı	18
Şekil 3.14: Dikiş Direnç Kaynağı	19
Şekil 3.15: Kabartılı Direnç Kaynağı.....	19
Şekil 3.16: Alın Yakma Kaynağı.....	20
Şekil 3.17: Metallerin Kaynak Kabiliyetinin Temel Faktörler ile İlişkisi.....	21
Şekil 6.1: Deneysel Çalışmalar Şematik Gösterimi	34
Şekil 6.2: Kaynak Ekipmanları	36
Şekil 6.3: Kaynak Ağız Tasarımlarının Şematik Gösterimi	37
Şekil 6.4: Sıvı Penetrant Muayenesi	39
Şekil 6.5: Radyografik Muayene.....	39
Şekil 6.6: Hidrolik Pres	40
Şekil 6.7: Çekme Testi Numune Ölçüleri.....	41
Şekil 6.8: Çekme Testi Cihazı	41
Şekil 6.9: Çentik Darbe Testi Cihazı.....	42

Şekil 6.10: Sertlik Testi Cihazı.....	43
Şekil 6.11: Zımpara Cihazı.....	44
Şekil 6.12: Makro Görüntüleme Cihazı	45
Şekil 6.13: Mikroyapı İnceleme Cihazı	46
Şekil 6.14: 7,62x51 mm M61 AP Mühimmat Görüntüsü	47
Şekil 7.1: Sıvı Penetrant Test Görüntüleri.....	48
Şekil 7.2: Radyografik Test Sonuçları.....	49
Şekil 7.3: Makroyapı Görüntüleri; a) Tek V b) Çift V c) Tek Pah d) Tek Pah Numuneleri	50
Şekil 7.4: Eğme Testi Sonrasında Farklı Kaynak Ağzı Geometrilerine Ait Numunelerin Görünümü; (a) Tek V, (b) Çift V, (c) Çift Eğimli (Çift Pah), (d) Tek Eğimli (Tek Pah)	51
Şekil 7.4: Ana Metal, IEB, Kaynak Metali Ortalama Sertlik Karşılaştırması	52
Şekil 7.5: Kaynak Bölgesinden Ana Metala Doğru Sertlik Test Sonuçları.....	53
Şekil 7.6: Çekme Testi Sonrası Kırılma Yönü İncelemesi Makro Görüntüleri; a) Tek V b) Çift V c) Tek Pah d) Tek Pah	55
Şekil 7.7: Çekme Testi Kırık Yüzey İncelemeleri; a) Tek V b) Çift V c) Tek Pah d) Tek Pah	56
Şekil 7.8: M450 Ana Metal Mikroyapı Görüntüleri	58
Şekil 7.9: IEB Boyunca Mesafe Üzerinden Pik Sıcaklık Değişiminin Mikrosertlik Noktaları ve Şematik Gösterimi	58
Şekil 7.10: IEB Mikroyapı Görüntüsü	59
Şekil 7.11: Tek V IEB Mikroyapı Görüntüsü; a) CGHAZ, b) FGHAZ, c) ICHAZ... 60	
Şekil 7.12: Çift V IEB Mikroyapı Görüntüsü; a) CGHAZ, b) FGHAZ, c) ICHAZ .. 61	
Şekil 7.13: Çift Pah IEB Mikroyapı Görüntüsü; a) CGHAZ, b) FGHAZ, c) ICHAZ 61	
Şekil 7.14: Tek Pah IEB Mikroyapı Görüntüsü; a) CGHAZ, b) FGHAZ, c) ICHAZ 62	
Şekil 7.15: Kaynak Metali Mikroyapı Görüntüsü; a) Tek V, b) Çift V, c) Çift Pah, d) Tek Pah	63
Şekil 7.16: Balistik Test Öncesi Plakalar	63
Şekil 7.17: Balistik Test Sonrası Plakalar	64
Şekil 7.18: Balistik Test Sonrası Kaynak ve IEB Bölgeleri Makro Kesit Görüntüsü; a) Tek V Kaynak, b) Tek V IEB, c) Çift V Kaynak, d) Çift V IEB, e) Çift Pah Kaynak, f) Çift Pah IEB, g) Tek Pah Kaynak, h) Tek Pah IEB	65

KAYNAK AĞIZ TASARIMININ YÜKSEK MUKAVEMETLİ BALİSTİK ZIRH ÇELİKLERİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, savunma sanayii uygulamalarında yaygın olarak kullanılan yüksek mukavemetli balistik zırh çeliklerinin kaynaklı birleştirmelerinde, farklı kaynak ağız tasarımlarının (Tek V, Çift V, Tek eğimli ve Çift eğimli) mikroyapı, mekanik performans ve balistik dayanım üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında 20 mm kalınlığında M450 kalite zırh çeliği plakalar, sabit ısı girdisi altında MAG kaynağı yöntemi ile GeKaTec ER110-SG dolgu teli kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynak sonrası numunelere görsel muayene, sıvı penetrant ve radyografik muayene uygulanmış olup standart limitlerini aşan herhangi bir süreksizlik tespit edilmemiştir. Ardından optik mikroskop ve stereo mikroskop kullanılarak kaynak bölgesi ve ısıdan etkilenmiş (IEB) bölgelerin makro-mikroyapısal incelemeleri yapılmıştır. Kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, çekme, çentik darbe, sertlik ve eğme testleri yapılmıştır. Çekme testi sonuçları, dört farklı geometri arasında belirgin performans farkları olduğunu göstermiş; dayanım açısından en iyi sonuç çift eğimli geometriden elde edilirken, süneklik bakımından bu tasarımın sınırlayıcı olduğu, dayanım-süneklik dengesi açısından ise çift V geometrisinin daha uygun bir profil sunduğu görülmüştür. Çentik darbe testlerinde ısıdan etkilenen bölgenin tüm geometrilerde kaynak metaline kıyasla daha tok olduğu görülmüş; kaynak bölgesinde en iyi sonuç Tek V geometrisinden, IEB bölgesinde ise Tek eğimli geometriden elde edilmiştir. Sertlik değerlendirmeleri askerî standartlara göre yapılmış olup, çift V ve tek eğimli geometrilerde kritik sertlik eşliğine sırasıyla 9 mm ve 8 mm mesafede ulaşılmış, böylece IEB yumuşama bölgesinin dar kaldığı görülmüştür. Tek V ve çift eğimli geometrilerde bu mesafe sırasıyla yaklaşık 11,5 mm ve 13 mm olup, düşük ısı girdisi ve dar IEB sağlayan geometrilerin sertlik toparlanmasını hızlandırarak balistik performansa katkı sunduğu belirlenmiştir. Balistik test sonrası makro incelemeler, mermi giriş ve nüfuziyet davranışının geometriye bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuş; çift V ve tek eğimli geometriler, daha kısa penetrasyon alanı ve sınırlı çatlak ilerlemesi ile üstün balistik direnç sergilemiştir. Bu bulgular, kaynak ağız tasarımının yalnızca mekanik davranışı değil, aynı zamanda balistik bütünlüğü de doğrudan etkileyen kritik bir parametre olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, kaynak ağız tasarımının yalnızca yerel mekanik davranışı değil, mikro yapısal stabiliteyi ve balistik bütünlüğü de belirleyici düzeyde etkilediğini; uygun geometrik seçimin, askerî platformların gövde imalatında balistik güvenliği azaltmadan mekanik olarak optimize edilebilirlik sağladığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Zırh çeliği, Kaynak ağız geometrisi, MAG kaynağı, IEB, Balistik test, Tahribathı Muayene, Tahribatsız Muayene

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WELD GROOVE DESIGN ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH BALLISTIC ARMOR STEELS

ABSTRACT

In this study, the effects of different weld groove designs (Single-V, Double-V, Single-bevel and Double-bevel) on the microstructure, mechanical performance and ballistic resistance of welded high-strength ballistic armor steels, widely used in defense applications, were investigated. Within the experimental program, 20 mm-thick M450 grade armor steel plates were welded under constant heat input using the MAG process with GeKaTec ER110-SG filler metal. After welding, visual inspection, liquid penetrant and radiographic examinations were performed, and no discontinuities exceeding standard acceptance limits were detected. Subsequently, macro- and microstructural examinations of the weld metal and heat-affected zones were conducted using optical and stereo microscopy. To determine the mechanical response of the welded joints, tensile, Charpy impact, hardness and bend tests were performed. Tensile test results revealed distinct performance differences among the geometries: the Double-bevel configuration exhibited the highest strength but suffered from limited ductility, whereas the Double-V geometry provided a more balanced strength–ductility profile. Charpy impact tests showed that the HAZ exhibited higher toughness than the weld metal in all geometries; the highest toughness in the weld metal was obtained with the Single-V design, while the highest toughness in the HAZ was achieved with the Single-bevel configuration. According to military hardness criteria, the critical hardness threshold was reached at shorter distances in Double-V and Single-bevel geometries (9 mm and 8 mm, respectively), indicating a narrower softened HAZ. In Single-V and Double-bevel geometries, this distance increased to approximately 11.5 mm and 13 mm, respectively, demonstrating that geometries producing narrower HAZ promote faster hardness recovery and thus contribute positively to ballistic performance. Post-ballistic macro examinations showed that penetration depth and crack propagation behavior varied with groove design; Double-V and Single-bevel geometries exhibited shorter penetration paths and restricted crack advancement, indicating superior ballistic resistance. These findings demonstrate that groove geometry is a critical parameter that influences not only the mechanical response but also the ballistic integrity of welded armor structures. Overall, the results indicate that an appropriate groove configuration can maintain ballistic security while enabling mechanical optimization in the manufacturing of armored platforms used in defense applications.

Keywords: *Armor steel, Weld groove geometry, MAG welding, HAZ, Ballistic testing, Destructive testing, Non-destructive testing*

1. GİRİŞ

Tarih boyunca insanlar, saldırılara karşı korunmak ve savunma sağlamak amacıyla sopa, taş, kemik ve deri gibi doğal malzemelerden faydalanmıştır. Zamanla bu maddelerin yerini çelik bronz seramik gibi farklı koruma malzemeleri almıştır. Ateşli silahların kullanımının yaygınlaşmasıyla beraber gelecek balistik tehditleri önlemek adına zırh/koruma teknolojileri geliştirmeye yönelmişlerdir. Günümüzde, askeri ve sivil alanlarda, silah ve patlayıcı gibi ateşli silah tehditlerine karşı koruma sağlamak amacıyla; çelik, titanyum ve alüminyum alaşımları, cam ve elyaf takviyeli farklı kompozit malzemeler ile seramikler zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır [1,2,3,4]. Ateşli silah saldırılarına karşı geliştirilen savunma sistemlerinde hafif zırh malzemelerinin kullanılması, enerji tüketiminin azaltılması ve sistemin hareket kabiliyetinin artırılması açısından önem kazanmaktadır. Ve yine bu bağlamda kaynak kabiliyeti yüksek ve üretimi daha ekonomik olan metallerin kullanımı da öne çıkmaktadır [5].

Savunma sanayinde kullanılan zırhlı araçlar, karmaşık geometrik tasarımları nedeniyle genellikle tek parça olarak üretilememekte; bu nedenle üretimlerinde kaynaklı imalat yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemler arasında, yüksek erime hızı, yüksek tokluk, yüksek biriktirme oranı, derin nüfuziyet, her kaynak pozisyonunda uygulanabilirlik ve operasyonel kolaylık gibi avantajları nedeniyle en yaygın tercih edilen yöntem gazaltı ark kaynağıdır [6,7]. Ayrıca, literatürde en düşük Isı Tesiri Altında Kalan Bölge (IEB) genişliğinin Gazaltı ark kaynağı yöntemi ile elde edildiği bildirilmektedir. IEB genişliğinin minimum seviyede tutulması, zırh çeliklerinin balistik performansını doğrudan etkileyen parametrelerdendir.

Zırh çeliklerinin kaynak parametrelerinin ve kullanılan kaynak metalinin doğru seçimi, zırhlı araçların kullanım alanlarındaki performansı ve hizmet ömrü açısından kritik öneme sahiptir [8]. Zırh çeliklerinin kaynağında genellikle ferritik veya östenitik yapıda teller tercih edilmektedir. Östenitik paslanmaz çelik esaslı dolgu metalleri, yüksek darbe tokluğu özellikleri sayesinde kaynak bölgesinde oluşabilecek kırılğan davranışları minimize etmekte ve özellikle hidrojen kaynaklı

çatlakların önlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Bu dolgu metallerinin düşük hidrojen difüzyon katsayısına sahip olması, çatlak oluşumunu sınırlayan en önemli faktörlerden biridir. Ferritik dolgu metali kullanılan kaynaklı bağlantılarda yüksek mukavemet ve yüksek sertlik elde edilmektedir [9].

Kaynak ağzı geometrisinin ve boyutlarının doğru seçimi kaynak işlemini kolaylaştırmakta, kaynak dolgu malzemesinin nüfuziyetini arttırmakta ve kaynak işlemleri sırasında soğuma sürecinin kontrol edilebilirliğini sağlamaktadır [10,11,12]. Ağır zırhlı askeri araçlarda, farklı bölgeler aynı anda çekme, basma ve eğilme gibi çok eksenli gerilmelere maruz kalabilmekte veya belirli bölgelerde bu yüklem türlerinden biri baskın olarak etkili olabilmektedir. Bu nedenle, endüstriyel uygulamalarda, zırh çeliklerinin bu çeşitli gerilme koşulları altındaki davranışlarının belirlenmesi, optimum kaynak geometrisi ve açı seçimleri açısından büyük önem taşımaktadır [13]. 10 mm kalınlığı aşan zırh tipi çelik plakalar, askeri araç üretimi ile savunma sanayisine yönelik uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Bu kalınlıktaki zırh çeliği levhaların birleştirilmesinde, kaynak nüfuziyetinin artırılması ve kaynak bölgesinin mekanik bütünlüğünün sağlanması amacıyla çift “V” tipi oluk tasarımlarına sahip bağlantılar ile birden fazla paso ile yapılan kaynak tercih edilmektedir [14]. Ancak, birden fazla paso ile yapılan kaynak yöntemleri sırasında oluşan ardışık ısınma ve soğuma döngüleri, kaynak bölgesinde daha geniş bir Isıdan Etkilenen Bölge (IEB) meydana getirmektedir. IEB genişliğindeki artış, malzemenin mikroyapısında istenmeyen değişimlere neden olarak balistik performansın olumsuz yönde etkilenmesine sebep olabilmektedir.

Bu çalışmada, Miilux Oy firması tarafından üretilen 20 mm kalınlığında M450 kalite zırh çeliği levhalar kullanılmıştır. Plakalar, 30° kaynak ağzı açısına sahip olacak şekilde sırasıyla tek V, çift V, tek eğimli (tek pah) ve çift eğimli (çift pah) kaynak ağzı geometrilerine uygun olarak hazırlanmış ve Metal Aktif Gaz (MAG) kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynak işlemlerinde dolgu metali olarak GeKaTech ER110 SG sınıfı kaynak teli tercih edilmiştir. Kaynak işlemlerinin ardından numunelere sırasıyla görsel muayene, sıvı penetrant testi ve radyografik muayene olmak üzere tahribatsız muayene yöntemleri uygulanmıştır. Ardından tahribatlı test yöntemleri kapsamında eğme, çekme ve çentik darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak bölgelerinin iç yapısal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla makroyapı ve mikroyapı incelemeleri yapılmış; ayrıca taramalı elektron

mikroskobu (SEM) ile mikroanalizler gerçekleştirilmiştir. Tüm bu mekanik ve mikroyapısal değerlendirmelerin ardından, kalan plakalara balistik testler uygulanarak farklı kaynak geometrilerinin balistik dayanım üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen veriler doğrultusunda, zırh çeliklerinde uygun kaynak geometrisinin belirlenmesiyle birlikte hem mekanik hem de balistik performansın artırılması hedeflenmiş ve elde edilen bulguların savunma sanayi uygulamalarına katkı sunacağı ngrlmřtir.



2. ZIRH ÇELİKLERİ

Savunma teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler, modern savaş koşullarında zırhlı koruma sistemlerinin önemi artırmış ve buna bağlı olarak zırh malzemelerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Günümüzde birçok ülkede zırh malzemesi olarak zırh çelikleri, seramik ve alüminyum alaşımları tercih edilmektedir [15].

Zırh çelikleri; yüksek sertlik, mukavemet ve yüksek tokluk gibi üstün mekanik özellikleri sayesinde farklı türlerdeki mühimmat darbelerine karşı parçalanma, çatlama ve kırılma gibi hasar türlerine karşı direnç gösterdikleri için savunma sanayisinde kullanılmaktadır. Zırh çeliklerinin bu özellikleri, zırh çeliklerini benzersiz balistik performans sergileyen malzemeler haline getirmektedir. Zırh çelikleri, yüksek sertlik, mukavemet ve tokluk özelliklerinin yanı sıra üstün balistik performansları sayesinde, farklı tipteki mermi darbelerine karşı çatlama, parçacık kopması ve kırılmaya direnç gösterebilen malzemeler olup savunma sanayinde en yaygın kullanılan malzemeler arasında yer almaktadır. Yüksek mukavemetli, düşük alaşımlı çelikler sınıfında bulunan bu malzemeler, başlangıçta öncelikli olarak insan koruması amacıyla kullanılmış, ancak teknolojik gelişmelerle birlikte kara araçlarında da yaygınlaşmıştır. Günümüzde zırh çelikleri; muharebe tankları, zırhlı araçlar, nakit para taşıma araçları, güvenlik kabinleri, kurşun geçirmez yelekler, nöbetçi kulübeleri ve denizaltılar gibi çeşitli savunma ve güvenlik amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır [16,17].



Şekil 2.1: Zırhlı Araç

Kaynak: (www.bmc.com.tr)

2.1 Zırh Çeliklerinin Üretim Prosesleri ve Sınıflandırılması

Zırh çeliklerinin üretim süreci; ergitme, alaşımlandırma, sürekli döküm, haddeme ve ısıl işlem olmak üzere beş temel aşamadan oluşmaktadır [18]. Her bir üretim adımı malzemenin mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir. Zırh çeliklerinde ısıl işlem ve kimyasal bileşim orta derecede tokluk ve yüksek mukavemet özelliklerini sağlayan temel parametrelerdendir. Bu parametreler zırh çeliklerinin mekanik özellikleri üzerinde büyük etkisi olan mikroyapıyı da doğrudan etkilemektedir [19].

Zırh çeliklerinde karbon oranının düşük tutulması, malzemeye yüksek tokluk, iyi kaynaklanabilirlik, üretim sürecinde işlenebilirlik ve üstün darbe dayanımı gibi özellikler kazandırmaktadır. Bu çeliklerin başlıca alaşım elementleri krom, nikel, molibden, mangan ve silisyumdur [18]. Bu alaşım elementleri arasında yer alan krom, grafitleşme eğilimini minimuma indirirken; kobaltın kırılma tokluğunu artırdığını bildiren çalışmaların yanı sıra, kobaltın kırılma tokluğu üzerinde herhangi bir etkisinin bulunmadığını ortaya koyan araştırmalar da mevcuttur. Vanadyum güçlü bir karbür yapıcıdır ve tane iyileştirmesine yardımcı olur, nikel östenit bölgesini genişletir. Nikel, A₃ ve A₁ dönüşüm sıcaklıklarını daha düşük değerlere indirerek, pik sıcaklığın daha düşük seviyelerde gerçekleştiği bölgelerde dahi martenzitik yapının oluşmasına olanak tanır. Nikel miktarındaki artış, temperleme sonrası mikroyapıda karbür yoğunluğunun ve iğnemsiz martenzit oluşumunun azalmasına yol açar; ancak kırılma tokluğu üzerinde olumsuz etkisi olduğu kanıtlanmıştır [20,21]. Silisyum, temperlenmiş martenzitte gevreklik oluşumunu geciktirici bir etki gösterirken;

mangan, sertleşebilirlik üzerinde güçlü ve belirgin bir rol oynamaktadır [22]. Bor, östenitleştirme işleminden sonra uygulanan hızlı su verme ile martenzitik ve/veya beynitik dönüşümleri destekleyerek malzemenin sertleşebilirliğini artırmaktadır. Titanyum, niobyum ve alüminyum elementlerinin karbür oluşumunu sağladığı ve bu sayede sertliği yükselttiği belirtilmiştir [18].

Zırh çelikleri dünya genelinde çoğunlukla MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 ABD askeri standartlarına göre üretilmektedir. Bu standartlardan MIL-A-46100, yüksek sertlikteki zırh çeliklerini; MIL-A-12560 ise homojen haddelenmiş zırh çeliklerini (Rolled Homogeneous Armor – RHA) tanımlamaktadır [23].

Zırh çelikleri, uygulanan ısı işlem yöntemine bağlı olarak Sınıf 1 ve Sınıf 2 olmak üzere iki grupta sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre, Sınıf 1 çelikler su veya yağ ortamında sertleştirme işleminden sonra temperlenerek üretilirken, Sınıf 2 çelikler hava soğutma yoluyla sertleştirilip ardından temperleme işlemi uygulanarak elde edilmektedir. Bu iki sınıf arasındaki bir diğer fark ise karbon eş değeridir, Sınıf 1 çeliklerinde karbon eş değeri en yüksek 0,80 olarak sınırlanırken Sınıf 2 çeliklerde karbon eş değeri açısından bir sınırlandırma bulunmamaktadır[24]. Zırhlı araç üretiminde genellikle Sınıf 1 çelikler kullanılmaktadır. Her iki sınıf benzer kimyasal özelliklere sahip olmakla beraber Sınıf 2 çeliklere yüksek sıcaklıklarda uygulanan ısı işlemler sayesinde mekanik şoka dayanımı ve parçalanma direnci artırılmaktadır [25]. Sınıf 1 zırh çelikleri mühimmat çarpmasına ve delici etkisine karşı dayanım gösterecek şekilde tasarlanmaktadır, Sınıf 2 çelikleri ise patlama kaynaklı yüksek basınç dalgalarına karşı dayanım sağlamak amacıyla üretilmektedir. [26].



Şekil 2.2: Balistik Test Sonrası Zırh Çeliği Görüntüsü

Kaynak: (www.milux.com.tr)

3. KAYNAK

Kaynak, ısı, basınç ve/veya her ikisinin birlikte uygulanmasıyla aynı tür ya da farklı iki malzemenin birleştirilmesi işlemidir. Kalıcı bir birleştirme yöntemi olan kaynak sonucunda parçalar tek bir bütün haline gelir ve tekrar demonte edilemez [27]. Bazı kaynak yöntemlerinde ısı ve basınç birlikte kullanılırken, bazı yöntemlerde dışarıdan ısı uygulanmaksızın yalnızca basınç ile birleştirme yapılmakta; diğer bazı yöntemlerde ise birleştirmeyi kolaylaştırmak amacıyla ilave tel (dolgu metali) kullanılmaktadır. Kaynak işlemi, fabrika ortamında, sahada veya su altında; manuel ya da robotik sistemler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Boru, basınçlı kap, buhar kazanı, depolama tankı üretimi; uçak ve havacılık sanayii, çelik yapılar (bina ve köprüler), otomotiv endüstrisi ve gemi inşaatı, kaynağın temel uygulama alanları arasında yer almaktadır. Amerikan Kaynak Derneği (AWS) tarafından yayımlanan katalogda çok sayıda kaynak yöntemi tanımlanmış olup, bu yöntemler ergitme kaynağı ve katı hâl kaynağı olarak iki ana grupta sınıflandırılmaktadır [27]. Kullanılan kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Kaynak Yöntemleri

Ergitme Kaynak Yöntemleri	Katı Hal Kaynak Yöntemleri
• Gazaltı Ark Kaynak Yöntemi	• Difüzyon Kaynağı
• MIG/MAG Kaynak Yöntemi	• Sürtünme Kaynağı
• TIG (WIG) Kaynak Yöntemi	• Sürtünme-Karıştırma Kaynağı (FSW)
• Tozaltı Kaynak Yöntemi	• Nokta Direnç Kaynağı
• Elektrik Ark Yöntemi	• Dikiş Direnç Kaynağı
• Lazer Kaynak Yöntemi	• Kabartılı Direnç Kaynağı
• Plazma Ark Kaynak Yöntemi	• Alın Yakma Kaynağı
• Elektron Işın Kaynak Yöntemi	
• Oksi-Asetilen Kaynak Yöntemi	

3.1 Ergitme Kaynak Yöntemleri

3.1.1 Gazaltı ark kaynak yöntemi

Gazaltı ark kaynağı, kaynak için gerekli ısının, tükenen bir elektrot ile iş parçası arasında oluşan elektrik arki vasıtasıyla sağlandığı bir ark kaynağı yöntemidir. Kaynak bölgesine sürekli olarak beslenen tel elektrot, ergiyerek tükendikçe kaynak metalini oluşturmaktadır. Kaynak işlemi süresince, kaynak dikişinin atmosferin zararlı etkilerinden korunması amacıyla kaynak torcu üzerinden koruyucu gaz beslemesi yapılır. Kullanılacak koruyucu gazın türü, kaynak yapılacak metalin cinsine bağlı olarak seçilmektedir. Ayrıca, kullanılan tel elektrotların bileşiminde, kaynak banyosundaki oksitlerin giderilmesini sağlayan elementler de yer almaktadır [27].

Gazaltı ark kaynağı, kullanılan elektrot tipine bağlı olarak iki ana gruba ayrılmaktadır [28]:

1. Ergiyen Elektrotla Yapılan Gazaltı Ark Kaynak Yöntemleri

- MIG (Metal Inert Gas) Kaynağı
- MAG (Metal Active Gas) Kaynağı

2. Ergimeyen Elektrotla Yapılan Gazaltı Ark Kaynak Yöntemleri

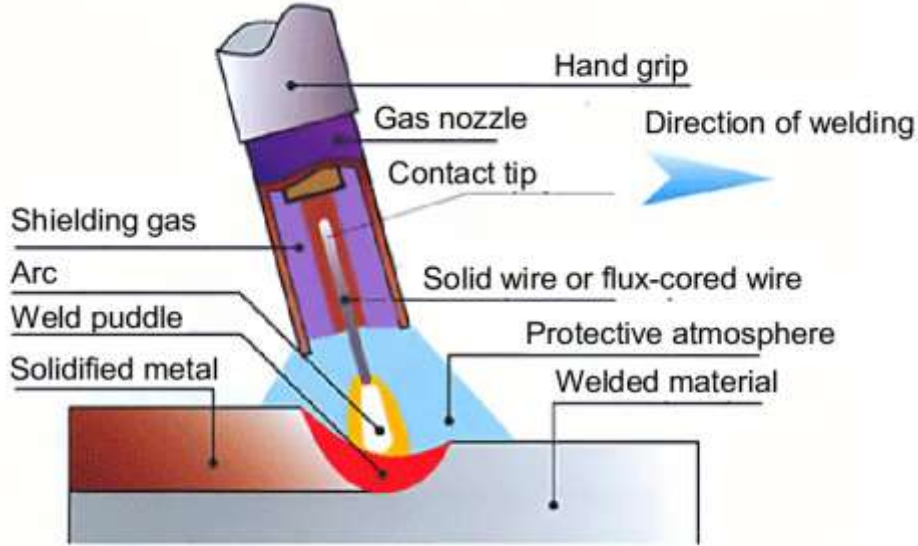
- TIG/WIG (Tungsten/Wolfram Inert Gas) Kaynağı

Ergiyen tip elektrot kullanılan yöntemlerde, elektrot ergir ve kaynak boşluğunu doldurur. Ergimeyen tip elektrot kullanılan yöntemlerde ise elektrot yalnızca kaynak bölgesini ergitmek için ısı kaynağı olarak görev yapar, ergimez.

3.1.1.1 MIG (Metal inert gaz) kaynağı

MIG kaynağı, inert gaz atmosferi altında ergiyen elektrotla gerçekleştirilen bir gazaltı ark kaynak yöntemidir. Adını Metal Inert Gas ifadesinin baş harflerinden alan bu yöntemde, koruyucu gaz olarak genellikle argon (Ar) kullanılmakta olup, nadiren Ar+He, Ar+O₂ veya yalnızca helyum (He) gibi gaz ve gaz karışımları da tercih edilmektedir. Ar+O₂ gaz karışımında oksijen, koruma sağlamak ve arkın kararlılığını artırmak amacıyla kullanılmaktadır.

MIG kaynağında genellikle doğru akım (DC) kullanılır ve elektrot pozitif kutba bağlanır (ters kutuplama). Bu bağlantı tipi, derin nüfuziyet elde edilmesini ve iş parçası yüzeyindeki oksit tabakasının parçalanmasını sağlamaktadır [27].

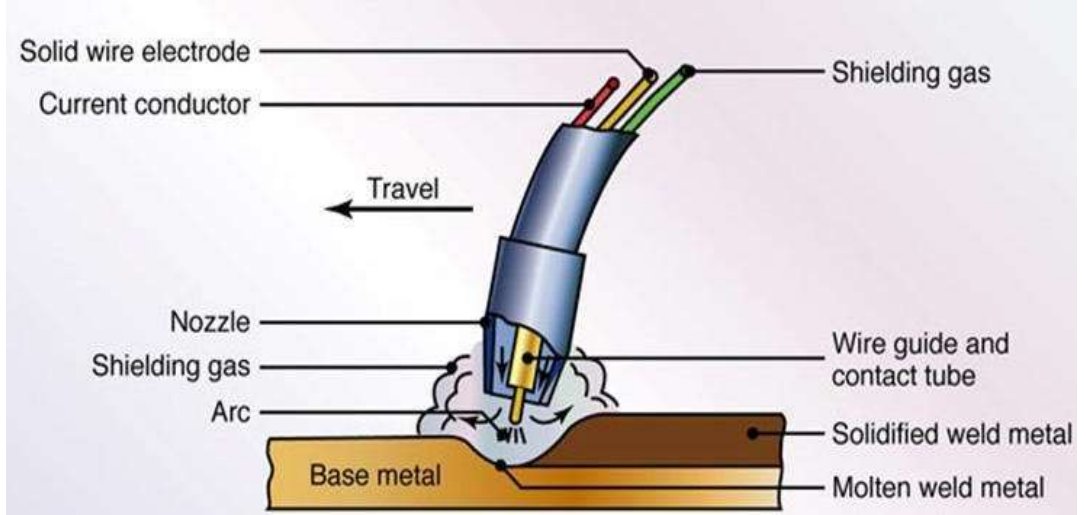


Şekil 3.1: MIG Kaynak Yöntemi

Kaynak: (www. netspaw.pl)

3.1.1.2 MAG (Metal aktif gaz) kaynağı

MAG kaynağı, eriyen elektrotla aktif bir gaz atmosferi altında gerçekleştirilen bir gazaltı ark kaynak yöntemidir. Bu yöntemde koruyucu gaz olarak genellikle karbondioksit (CO_2) kullanılmakta olup, MIG kaynağından temel farkı kullanılan gazın inert değil aktif gaz olmasıdır. Her iki yöntemde de kaynak donanımları temelde aynıdır. Kullanılan koruyucu gazın bileşimi %100 CO_2 olduğunda “ $\text{CO}_2\text{-C}$ ”, koruyucu gaz içerisine karışım gazları ilave edildiğinde ise “ $\text{CO}_2\text{-M}$ ” şeklinde ifade edilmektedir. MAG kaynağında genellikle ters kutuplama ve doğru akım kullanılır. Elektrot erime gücü, uygulanan akım şiddetine bağlıdır. Bu yöntemde, kaynak işlemi kısa ark boyu ile gerçekleştirilmektedir [27].



Şekil 3.2: MAG (Metal Aktif Gaz) Kaynağı

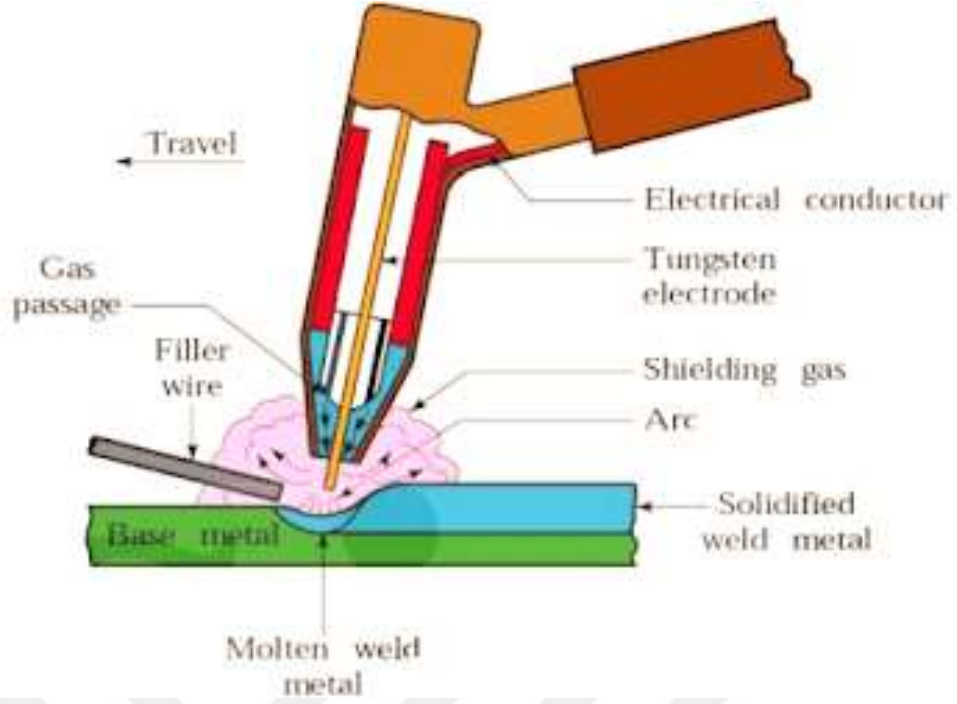
Kaynak: (www.kovinc.com)

3.1.1.3 TIG (Tungsten inert gaz) kaynağı

TIG kaynağı, ergimeyen elektrot kullanılarak gerçekleştirilen bir gazaltı ark kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, tungsten (wolfram) elektrot ile iş parçası arasında oluşturulan elektrik arkı sayesinde kaynak bölgesi ergitilir; elektrotun kendisi ise ergimez. İş parçası kalınlığı 3 mm'nin üzerinde olduğunda ilave dolgu teli kullanılır. Koruyucu gaz olarak inert gazlar tercih edilir ve kaynak işlemi süresince, elektrot çevresindeki nozul deliklerinden koruyucu gaz beslenerek kaynak banyosu atmosferin zararlı etkilerinden korunur [27].

TIG kaynak yöntemi ile hemen her metal ve alaşım kaynatılabilmektedir. Bu yöntemde kutuplama iki şekilde gerçekleştirilebilir:

1. Doğru akım (+) veya (-) kutuplama
2. Dalgalı Kutuplama (alternatif akım)



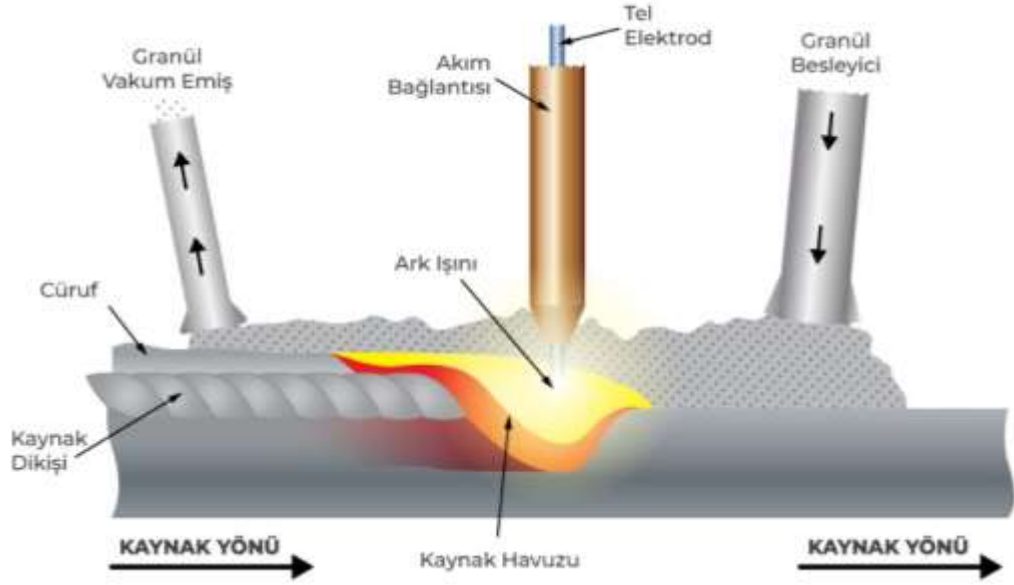
Şekil 3.3: TIG Kaynak Yöntemi

Kaynak: (www.unknownknow.com)

3.1.2 Toz altı kaynağı

Tozaltı kaynak yöntemi, elektrik arkı ile gerçekleştirilen bir kaynak tekniğidir. Bu yöntemde, ark, otomatik olarak kaynak bölgesine beslenen sürekli elektrot ile iş parçası arasında oluşur. Kaynak bölgesine aynı anda sürekli olarak akışkan halde kaynak tozu dökülür ve ark, bu toz tabakasının altında yanar. Kullanılan kaynak tozu; kaynak bölgesinin korunması, ilave alaşımlama yapılması ve arkın kararlılığının sağlanması gibi işlemlere sahiptir.

Tozaltı kaynağı, genellikle yüksek et kalınlığına sahip parçaların birleştirilmesinde tercih edilmektedir. Yöntem, yalnızca yatay pozisyonda uygulanabilir ve yüksek kaynak hızı ile derin nüfuziyet sağlaması nedeniyle ağır sanayi, gemi inşaatı, basınçlı kap ve büyük çelik konstrüksiyon imalatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [27].

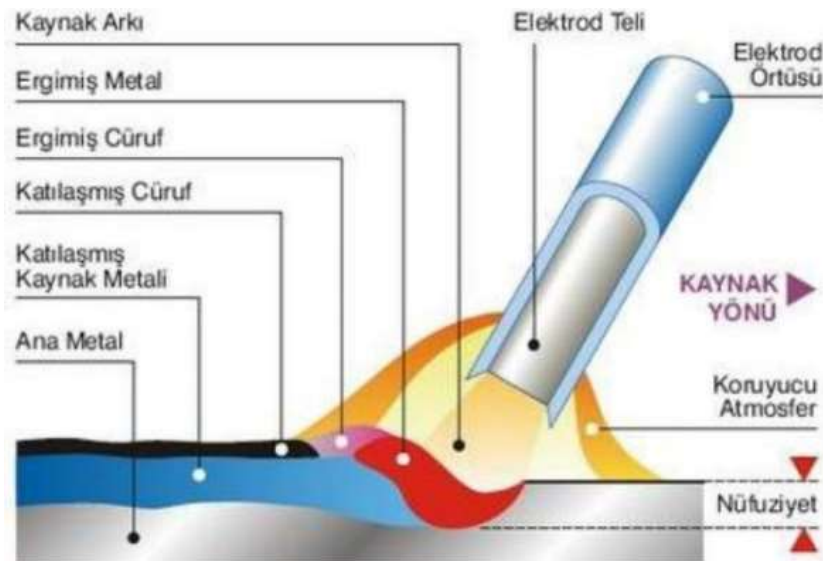


Şekil 3.4: Tozaltı Kaynak Yöntemi

Kaynak: (www.freshweld.com)

3.1.3 Elektrik ark kaynağı

Elektrik ark kaynak yöntemi, alternatif akım (AC) veya doğru akım (DC) kullanılarak, elektrot ile kaynak yapılacak parçalar arasında oluşturulan elektrik arkı ile gerçekleştirilmektedir. Ark, katottan çıkan elektronların yüksek hızla anoda çarpması sonucu oluşan yoğun ısı sayesinde meydana gelir. Kaynak işlemi, arkın başlatılması amacıyla elektrotun iş parçasına kısa süreli temas ettirilmesi ve ardından elektrot ile iş parçası arasında belirli bir mesafe bırakılarak elektrotun hızla uzaklaştırılması ile başlar [27].

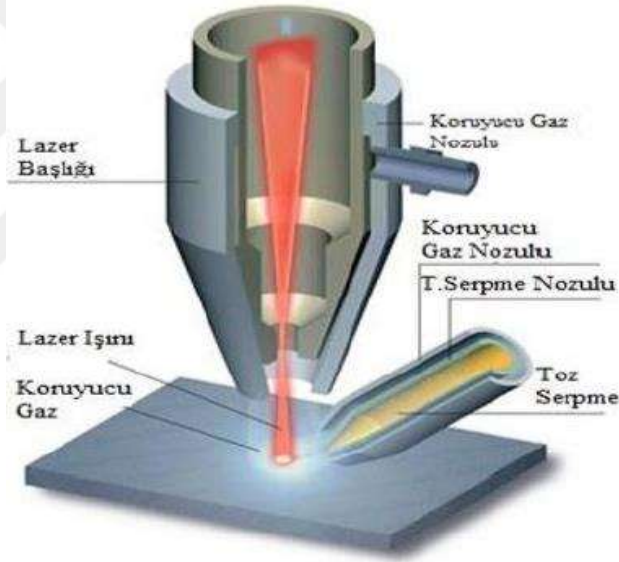


Şekil 3.5: Elektrik Ark Kaynağı [27]

3.1.4 Lazer kaynak yöntemi

Lazer kaynak yönteminde, lazer ışınları optik sistemler aracılığıyla yüksek yoğunluklu, aynı yönde, aynı dalga boyunda ve aynı fazda, küçük çaplı bir ışın demeti şeklinde odaklanır. Yüksek güç yoğunluğuna sahip lazer ışını, iş parçası yüzeyinde dar çaplı bir buhar kolonu oluşturur. Bu buhar kolonu aracılığıyla lazer ışını, malzeme içerisine derinlemesine nüfuz eder. Lazer ışını ilerledikçe, eriyen metal arkadan öne doğru akarak buhar kolonu boşluğunu doldurur ve soğuyarak katılaşır; böylece kaynak işlemi tamamlanır.

Lazer kaynağı ile elde edilen güç yoğunluğu, geleneksel ark kaynak yöntemlerinde elde edilen güç yoğunluğundan oldukça yüksektir. Kaynak uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan lazer türleri, CO₂ gaz lazerleri ile Nd:YAG katı hâl lazerleridir [27].



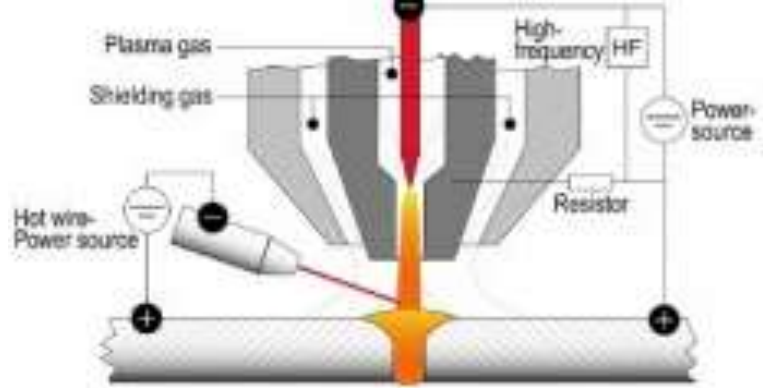
Şekil 3.6: Lazer Kaynak Yöntemi

Kaynak: (www.insapedia.com))

3.1.5 Plazma ark kaynak yöntemi

Plazma ark kaynağı, sıkıştırılmış bir plazma arkının kaynak bölgesine yönlendirilmesiyle gerçekleştirilen bir ergitme ark kaynak yöntemidir. TIG kaynağının özel bir türevi olan bu yöntemde, ergimeyen tungsten elektrot kaynak torcuna yerleştirilir. Elektrot etrafından yüksek hızda inert gaz akışı sağlanır ve bu gaz, ark tarafından ısıtılarak yüksek sıcaklıklı bir plazma haline getirilir. Böylece,

oldukça yoğun enerjiye sahip dar çaplı bir plazma ark akışı elde edilir ve bu akış kaynak bölgesine yönlendirilerek ergitme işlemi gerçekleştirilir [27].



Şekil 3.7: Plazma Ark Kaynak Yöntemi

Kaynak: (www.metaluzmani.com)

3.1.6 Oksi-asetilen gaz ergitme kaynak yöntemi

Oksi-asetilen kaynak yönteminde, gerekli ısı enerjisi, yanıcı ve yakıcı iki gazın yüksek sıcaklıkta yanması ile elde edilir. Kaynak işlemi sırasında, iş parçasının malzeme özelliklerine uygun bir ilave dolgu metali kullanılır ve bu dolgu metalinin alevde ergimesiyle birleştirme işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemde, yanıcı gazın ısı değeri ve alev sıcaklığının yüksek olması, etkin bir kaynak işlemi için kritik öneme sahiptir. Asetilen gazı, yüksek alev sıcaklığı (yaklaşık 3.100 °C) ve yüksek ısı değeri nedeniyle oksiyakıt kaynak yöntemlerinde en yaygın tercih edilen yanıcı gazdır [27].

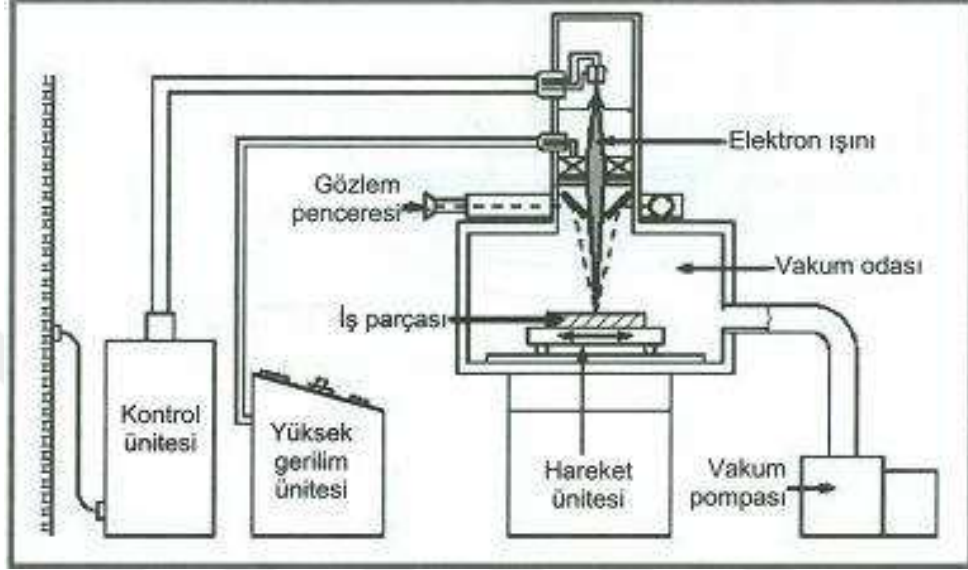


Şekil 3.8: Oksi-Asetilen Gaz Ergitme Kaynak Yöntemi

Kaynak: (www.wikipedia.org)

3.1.7 Elektron ışın kaynak yöntemi

Elektron kaynağı, yüksek hızlı elektron demetlerinin kaynak yapılacak iş parçasına çarpmasıyla kinetik enerjilerinin ısı enerjisine dönüşmesi prensibine dayanan yüksek enerji yoğunluklu bir kaynak yöntemidir. Bu yöntem, odaklanmış enerji kaynağı sayesinde derin nüfuziyet ve yüksek kaynak kalitesi sağlar [27].

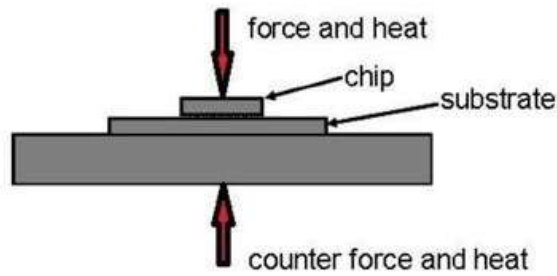


Şekil 3.9: Elektron Işın Kaynak Yöntemi

3.2 Katı Hal Kaynak Yöntemleri

3.2.1 Difüzyon kaynağı

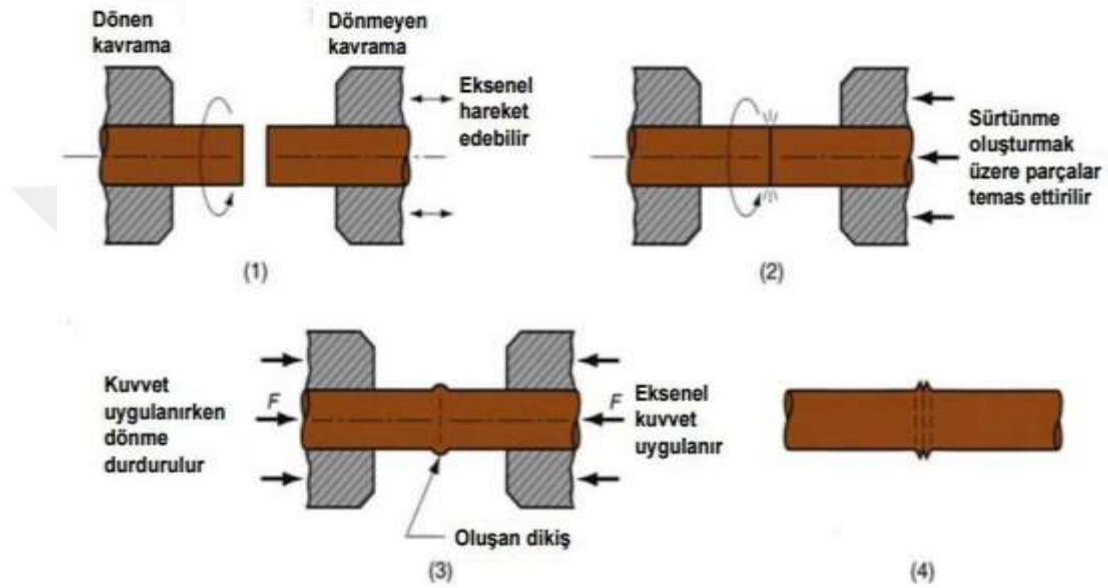
Difüzyon kaynağı, yüzeyleri önceden hazırlanmış, temizlenmiş ve üst üste yerleştirilmiş iki iş parçasının, kontrollü inert gaz veya vakum atmosferi altında, difüzyon ve birleştirme için gerekli ısı, basınç ve uygun sürenin uygulanmasıyla gerçekleştirilen katı hâl kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, malzeme ergime sıcaklığına ulaşmadan atomlar arası difüzyon yoluyla güçlü bir bağlantı sağlanır [27].



Şekil 3.10: Difüzyon Kaynağı

3.2.2 Sürtünme kaynağı

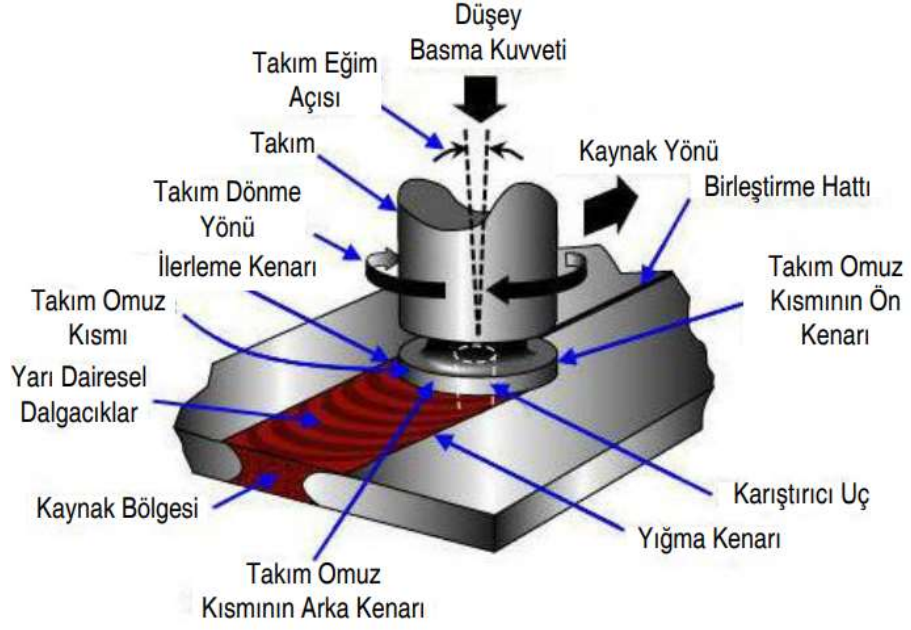
Sürtünme kaynağı, elektrik enerjisi veya diğer harici ısı kaynakları kullanılmadan, malzeme yüzeyleri arasındaki mekanik dönme hareketinin ısı enerjisine dönüştürülmesiyle kaynak için gerekli ısının elde edildiği katı hâl kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, sabit bir iş parçası ile dönen bir iş parçası, sabit veya kontrollü olarak artırılan bir basınç altında, ara yüzey sıcaklığına ulaşana kadar döndürülür. Ardından dönme hareketi durdurularak kaynak işlemi tamamlanır [27].



Şekil 3.11: Sürtünme Kaynağı [29]

3.2.3 Sürtünme-karıştırma kaynağı

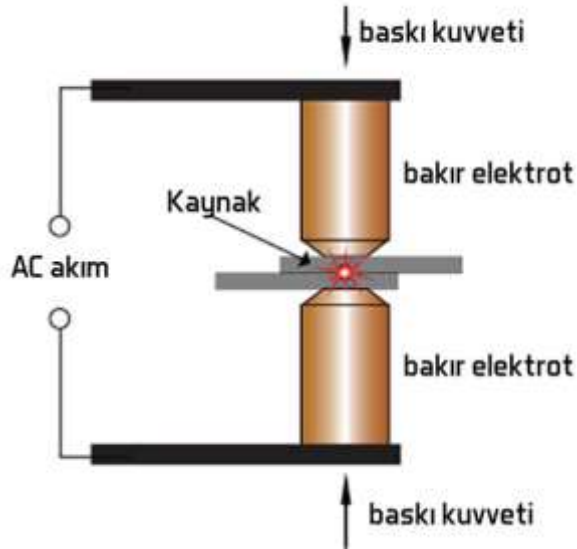
Bu kaynak yöntemi, iki iş parçasının birleştirileceği yüzey hattı boyunca yüksek devirde dönen özel bir takımın sürekli olarak malzemeye daldırılmasıyla sürtünme ısısının elde edildiği ve metalin mekanik olarak karıştırılması yoluyla kaynak dikişinin oluşturulduğu bir katı hâl kaynak yöntemidir. Yöntemde, yüksek aşınma direncine sahip takım ile metal arasındaki sürtünme sonucunda açığa çıkan ısı, kaynak için gerekli enerjiyi sağlar [27].



Şekil 3.12: Sürtünme Karıştırma Kaynağı [30]

3.2.4 Nokta direnç kaynağı

Bu kaynak yönteminde, üst üste yerleştirilen iki levhanın temas yüzeyleri, iki silindirik elektrot kullanılarak elektrik akımı altında ısıtılır ve ergitilerek bindirme kaynağı gerçekleştirilir. Kaynak bölgesinin boyut ve şekli, kullanılan elektrotun geometrisi ve boyutlarına bağlıdır. İşlem süresi oldukça kısa olup, kaynak tamamlandıktan sonra kaynaklı parça yüzeylerinde elektrot izleri kalmaktadır [27].

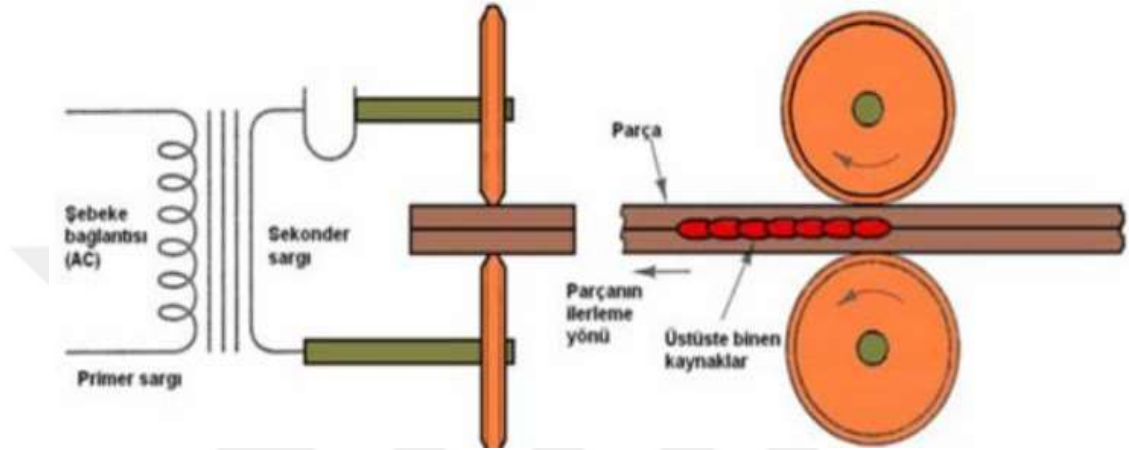


Şekil 3.13: Nokta Direnç Kaynağı

Kaynak: (www.makinaegitimi.com)

3.2.5 Dikiş direnç kaynağı

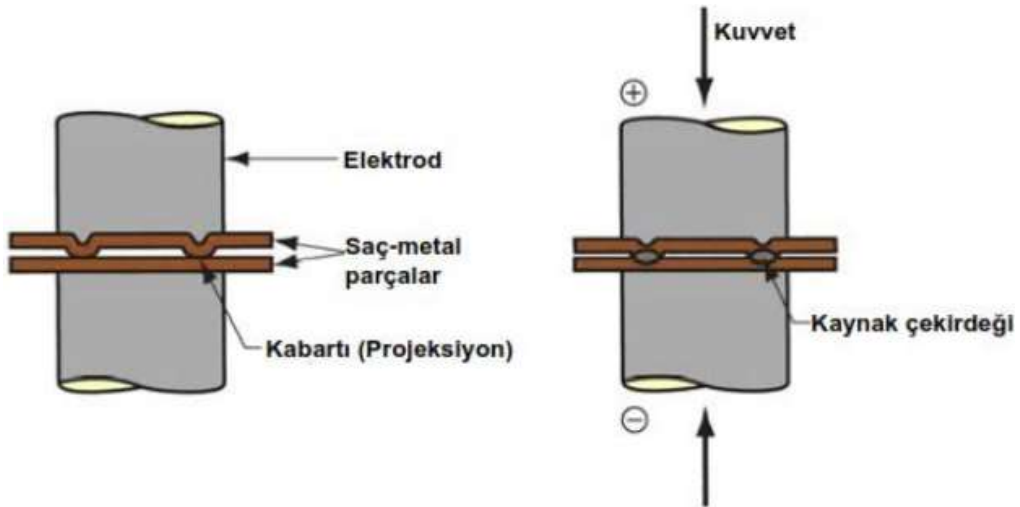
Dikiş direnç kaynağı, uygulama yöntemi açısından nokta kaynağına benzemektedir. Nokta kaynağında ardışık olarak oluşturulan kaynak noktalarının sıralanmasıyla dikiş direnç kaynağı elde edilir. Bu yöntemde, birbiri üzerine bindirilen iş parçalarının temas yüzeylerinden geçen elektrik akımına karşı gösterilen direnç nedeniyle malzeme ergir ve basınç altında birleştirilir[27].



Şekil 3.14: Dikiş Direnç Kaynağı

3.2.6 Kabartılı direnç kaynağı

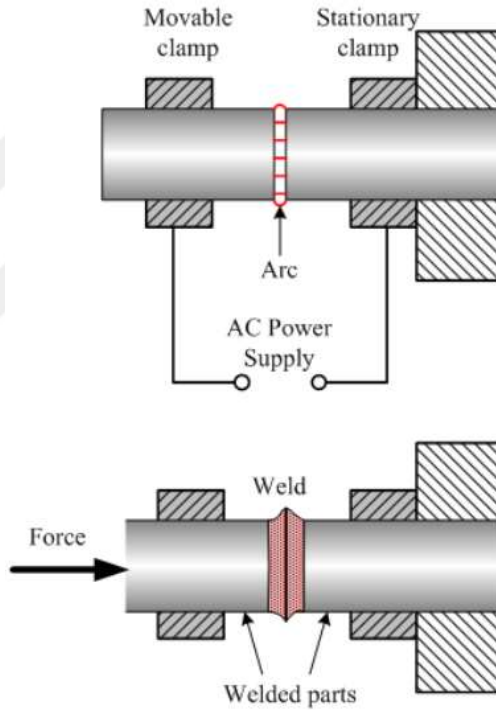
Bu yöntemde, birleşme işlemi, parçalar üzerinde bir veya birkaç küçük temas noktasında oluşan elektrik direnci sayesinde gerçekleşir. Birleştirilecek parçaların temas noktaları, yüzeydeki kabartılar tarafından oluşturulur ve elektrik akımı uygulandığında bu kabartılar üzerinde kaynak çekirdekleri oluşarak birleştirme sağlanır [27].



Şekil 3.15: Kabartılı Direnç Kaynağı

3.2.7 Alın yakma kaynağı

Alın yakma kaynağı yönteminde, birleştirilecek iki parça yüzeyi birbirine temas edecek ancak aralarında belirli bir açıklık kalacak şekilde yaklaştırılır. Yüzeylerin ergime sıcaklığına ulaşması için elektrik akımı uygulanır. Yüzeydeki mikroskobik pürüzlerin teması sonucunda elektrik arkı oluşur ve kaynak için gerekli ısı bu ark ile sağlanır. Pürüzlü yüzeyler hızla ısınarak ergimeye başlar ve oluşan kıvılcımlar yüzey geneline yayılır; böylece parçalar arasında ergime gerçekleşir. Yeterli ergime sağlandıktan sonra parçalar bastırılarak kaynak dikişi oluşturulur. Akım kesildikten sonra hareketli tabla ile ezme işlemi uygulanır ve kaynak tamamlanır [27].



Şekil 3.16: Alın Yakma Kaynağı

Kaynak: (www.substech.com]

3.4 Kaynak Kabiliyeti

Kaynaklı birleştirme işleminin temel amacı, düşük üretim maliyetiyle tasarlanan ürünün işlevini yerine getirebilmesini ve uzun ömürlü kullanımını sağlamaktır. Kaynak kabiliyeti, Şekil 3.17’de gösterildiği üzere üç ana faktöre bağlıdır: malzeme özellikleri, konstrüksiyon tasarımı ve imalat koşulları. Bu faktörlerin her biri kaynaklı birleştirmenin başarısını doğrudan etkilemektedir.



Şekil 3.17: Metallerin Kaynak Kabiliyetinin Temel Faktörler ile İlişkisi

Kaynak: (Vural ve diğ., 2003)

Malzemenin kaynak kabiliyeti, kimyasal bileşimi, metalurjik yapısı, fiziksel özellikleri (genleşme katsayısı, ısı iletkenliği vb.) ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle karbon eşdeğeri, çatlama eğilimini belirleyen temel bir parametre olup, yüksek karbon eşdeğeri kaynak sonrası sertleşme ve çatlama riskini artırmaktadır.

Konstrüksiyon tasarımı ise, kaynak bölgelerinde oluşabilecek gerilmelerin minimize edilmesi açısından önem arz etmektedir. Kaynak dikişlerinin yerleşimi, birleştirme yöntemleri ve birleşim geometrileri, kaynak sonrası yapısal bütünlüğü etkileyen önemli unsurlardır.

İmalat faktörleri kapsamında; kaynağa hazırlık (temizlik, ön ısıtma, bağlantı toleransları vb.), kaynak parametreleri (ısı girdisi, kaynak hızı, kaynak yöntemi) ve kaynak sonrası uygulanan ısıl işlemler yer almaktadır. Bu süreçlerin doğru yönetilmesi, kaynak dikişinin kalitesi ve mukavemeti üzerinde belirleyici rol oynar.

Tüm bu etkenler dikkate alındığında, bir malzemenin kaynak kabiliyeti; tasarlanan üretim süreci ve konstrüksiyon özelliklerini karşılaması ve hedeflenen kaynak kalitesine ulaşması durumunda yeterli kabul edilmektedir [31].

3.5 Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti

Zırhlı çelikleri, karmaşık zırhlı araçların üretiminde kullanılmaktadır [32,33,34]. Kaynak, üretim sırasında karmaşık geometrileri oluşturmayı

kolaylaştırdığı için en yaygın kullanılan montaj tekniğidir [26]. Öte yandan, zırlı araçlar genellikle zorlu arazi koşullarında ve/veya patlayıcı mermi ortamlarında kullanıldığı için uygulanan kaynak yöntemi bu çeliklerin mekanik özelliklerini minimuma indirmemelidir. Kaynağın sağlamlığını sağlamak için kaynak işlemi sonucunda kaynak boşlukları, çatlaklar, cüruf birikintileri, boşluklar veya yanma olukları olmamalıdır. Yüksek hareket kabiliyetine ve balistik füze tehditlerine karşı iyi bir dirence sahip olmalıdır. Kaynak edilebilirliği malzemenin kimyasal bileşimi, çelik üretim prosesi ve termal özellikler / kaynak prosesi belirlemektedir [35].

Zırlı çeliklerinin kaynak kabiliyetinde etken olan parametreler:

- 1- Ceş değeri
- 2- Malzemenin kimyasal içeriği
- 3- Uygulanan kaynak yöntemine bağlı olarak ısı girdisi
- 4- Malzeme kalınlığı
- 5- Uygulanan kaynak yöntemindeki gerekliliğe bağlı olarak ilave tel şeklinde sıralanabilir.

Zırlı çeliklerinin kaynaklanabilirliğine malzeme içinde karbon dışında bulunan alaşım elementleri de sertlik bakımından etki etmektedir, bu sebepten iş parçasına kaynak öncesi bir ön tav işlemi gerçekleştirmek gerekebilmektedir. Bunu karbon eş değerini bularak hesaplayabiliriz. Karbon eş değeri çeliğin bileşimindeki alaşım elementlerinin oluşturduğu sertliğe eşdeğer sertliği veren karbon miktarına denilmektedir [36,37].

$$Ceş = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (3.1)$$

Bu formül, çeliklerde kaynak sırasında hızlı soğumayı engellemek için kullanılan ön tavlama işlemi için bir kılavuz olarak gösterilmektedir. Ceş değeri 0,3 ve altındaysa bu tarz çelikler düşük sertleşebilirliğe sahip olduğundan ön tavlama yapılmadan kaynak yapılabilir, bu değer üstündeyse ön tav gerekir ve belirlenen tabloya göre ön tav sıcaklığı değişmektedir [38].

Zırlı çelikleri düşük karbon içeriğiyle üretilse de Cr, Mo, Ni, B, V gibi alaşım elementi ile alaşımlayarak, beklenen üstün mekanik özellikleri veren karbür oluşumuna izin verilir. Bu durum mekanik özelliklerini olumlu yönde etkiler iken

karbon eř değerliğini artırdığından kaynaklı birleştirme sırasında tedbir alınmasını gerektirebilir. Literatürde kaynaklı birleştirmeleri çalışılan zırh çeliklerinin karbon eř değerliği incelendiğin de %1 civarında olduğu görülmüştür.



4. BALİSTİK BİLİMİ

"Fransızca balistique kelimesinden türetilen 'balistik' terimi, bir merminin silahtan (namludan) çıkışından itibaren hedefe ulaşana kadar geçen süreçteki hareketlerini; atış ortamındaki değişkenlere bağlı olarak izlediği rotayı; hedefe çarpmasıyla birlikte enerjisinin absorblanması sonucu meydana gelen bozulma ve deformasyon davranışlarını inceleyen bilim dalını ifade eder [39,40,41].

Balistik bilimi genel olarak üç alt başlık altında sınıflandırılmaktadır: iç balistik, dış balistik ve terminal balistik. İç balistik, merminin namlu içerisindeki hareketlerini; dış balistik, merminin havadaki hareketlerini; terminal balistik ise, merminin hedefe çarpmasından sonra hedefte meydana gelen deformasyon ve enerji transferi süreçlerini ele almaktadır [40,41].

4.1 Balistik Testlerde Kullanılan Standartlar

Balistik teknolojisi, mermi ve füzelerin itme kuvvetleri, uçuş süreci ve hedefe çarpma etkilerini inceleyen bir bilim dalıdır. Bu alanda yapılan bilimsel ve uygulamalı çalışmaların güvenilirliğini sağlamak amacıyla çeşitli standartlar geliştirilmiştir. Günümüzde uluslararası düzeyde en yaygın olarak kullanılan balistik test standartları; Avrupa Birliği tarafından yayımlanan CEN (European Committee for Standardization) standardı, NATO tarafından oluşturulan STANAG (Standardization Agreement) standardı ve Amerika Birleşik Devletleri tarafından geliştirilen NIJ (National Institute of Justice) standardıdır.

Bu standartlarda, mermilerin kütlesi, kalibresi, hızı, üretildiği malzeme, kullanılan ateşli silah tipi ve hedef materyaline göre uygulanması gereken test koşulları ayrıntılı biçimde tanımlanmıştır [42].

Avrupa Birliği tarafından yayımlanan EN 1522 standardı ise, pencere, kapı, panjur gibi yapı elemanlarının delinmeye karşı dayanımını ve bu ürünlerin sınıflandırılmasına ilişkin gereklilikleri tanımlar. Bu standarda göre, mermiye karşı artan direnç seviyeleri FB1 ile FB7 arasında sınıflandırılmıştır. FB1 seviyesi, en

düşük mermi direncini temsil ederken, FB7 seviyesi en yüksek direnç gereksinimini karşılamaktadır [43].



5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Gürol ve arkadaşları (2023), östenitik ve ferritik dolgu metalleri kullanılarak gerçekleştirilen robotik MIG kaynak uygulamasında, eşit ısı girdisi koşullarında oluşan kaba taneli (CGHAZ) ve ince taneli (FGHAZ) ısıdan etkilenen bölgelerin mikroyapılarını karşılaştırmıştır. Yapılan analizlerde, östenitik karakterli ER307 dolgu metalinin daha düşük ısı iletkenliğe sahip olması nedeniyle, kaynak çevresindeki belirli bir mesafeye etki eden pik sıcaklığın ve soğuma hızının azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, CGHAZ ve FGHAZ bölgelerinde tane boyutunun küçülmesine neden olmuştur. Özellikle FGHAZ bölgesinde temperlenmiş martenzitin yanı sıra beynitik fazların da oluştuğu tespit edilmiştir. Bu mikroyapısal bulgular, elde edilen mikrosertlik sonuçları ile de desteklenmiştir. Örneğin, östenitik ER307 dolgu metalıyla elde edilen FGHAZ bölgesinde sertlik 550 HV iken, ferritik karakterli ER110S-G dolgu metali kullanıldığında bu değer 570 HV'ye yükselmiştir. Ancak daha yüksek ısı iletkenliğe sahip ferritik dolgu metalinin kullanılması, ICHAZ bölgesinde M-A (martenzit-östenit) yapılarının daha büyük boyutlarda oluşmasına neden olmuş ve bu da ilgili bölgede daha düşük sertlik değerlerinin elde edilmesine yol açmıştır. Ayrıca ICHAZ bölge genişliğinin ferritik dolgu metal kullanımında daha fazla olduğu gözlemlenmiştir [44].

Sabramani ve arkadaşları (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, MIG kaynak yöntemiyle birleştirilen yapılarda farklı dolgu metalleri kullanılarak kaynak performansı değerlendirilmiştir. Çalışmada düşük hidrojenli ferritik (LHF), östenitik ve dubleks dolgu metalleri kullanılmış; kaynaklı birleştirme sonrası kaynak metali bölgesine 7.62 mm çapında mühimmatla balistik testler uygulanmıştır. Testler sonucunda, bölge yoğunluğu ve penetrasyon derinliği parametreleri dikkate alınarak değerlendirme yapılmış ve en iyi balistik performansın östenitik dolgu metali kullanılan numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. Bu sonuç, östenitik dolgu metallerinin yüksek enerji absorplama kapasitesine sahip olması ve ısıdan etkilenen bölgede (IEB) daha düşük ve daha dar sertlik düşüşü göstermesi ile ilişkilendirilmiştir [45]

Saxena ve arkadaşları (2021), ArmoX 500 zırh çeliği üzerinde östenitik ve ferritik dolgu metalleri kullanarak MIG kaynak uygulamaları gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada, kaynaklı numunelere çekme ve çentik darbe testleri uygulanmış ve elde edilen mekanik özellikler karşılaştırılmıştır. Çekme testi sonuçlarına göre, ferritik dolgu metali ile yapılan birleştirmelerde elde edilen çekme dayanımı, ana malzemenin çekme dayanımının yaklaşık %41'i seviyesinde olurken, östenitik dolgu metali kullanıldığında bu oran %31 düzeyinde kalmıştır. Bu sonuçlar, ferritik dolgu metalinin östenitik dolgu metaline kıyasla kaynaklı yapının mukavemetini daha fazla koruduğunu ortaya koymuştur [46].

Souza ve arkadaşları (2021) tarafından yürütülen çalışmada, 8 mm kalınlığa ve yaklaşık 500 HV sertliğe sahip, MIL-DTL-46100 standardına uygun zırh çeliği üzerine düşük hidrojenli ferritik (LHF) dolgu metali kullanılarak SMAW (Shielded Metal Arc Welding) yöntemiyle kaynak işlemi uygulanmıştır. DeneYlerde, iki farklı ısı girdisi seviyesi olan 0,8 kJ/mm ve 1,2 kJ/mm kullanılmıştır. Kaynaklı numunelere çekme ve çentik darbe testlerinin yanı sıra, 7.62 mm çapında mühimmat ile ABD Askerî Standartları ve ABD Askerî Kodları doğrultusunda, balistik limit hızı (V_{50}) yöntemi kullanılarak balistik testler gerçekleştirilmiştir. Balistik testler hem kaynak metali bölgesi hem de ısıdan etkilenen bölge (IEB) üzerinde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, düşük ısı girdisi uygulandığında hem çekme dayanımı hem de darbe dayanımı birlikte artış göstermiştir. Balistik test bulguları da bu durumu desteklemiş ve düşük ısı girdisinin balistik limit hızı (V_{50}) ve absorbe edilen darbe enerjisi değerlerini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Bu gelişimin özellikle IEB bölgesinde düşük ısı girdisi ile oluşan beynitik mikro yapı ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada dikkat çeken bir diğer bulgu ise sertlik toparlanma mesafelerine yöneliktir. Düşük ısı girdisiyle (0,8 kJ/mm) yapılan kaynak işleminde, kaynak merkezinden itibaren yaklaşık 13 mm mesafede, zırh çeliğine özgü yüksek sertlik değerlerine yeniden ulaşılırken; yüksek ısı girdisi durumunda (1,2 kJ/mm), bu mesafenin yaklaşık 25 mm'ye çıktığı tespit edilmiştir [47]

Çoban ve arkadaşları (2021) tarafından yürütülen çalışmada, farklı kalınlıklara sahip MIL-A-46100 standardına uygun Protection 500 kalite zırh çelikleri, ferritik karakterli ER110 SG dolgu metali kullanılarak kaynaklanmıştır. Çalışmada robotik gaz altı kaynak yöntemi tercih edilmiş ve 6 mm, 10 mm ve 15 mm kalınlığındaki zırh çeliği plakaları üzerinde işlemler gerçekleştirilmiştir. Tüm kaynak

işlemleri 0,7 kJ/mm ısı girdisi ile uygulanmış ve kaynakların hatasız şekilde tamamlandığı belirtilmiştir. Ayrıca kaynak sonrası yapılan sertlik analizlerinde, plaka kalınlığının artmasıyla birlikte ısıdan etkilenen bölge (IEB) sertliğinde artış gözlemlendiği raporlanmıştır [48].

Güven ve arkadaşları (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Ramor 500 zırh çeliği üzerinde üç farklı kaynak yöntemi kullanılarak mikro yapı ve mekanik özelliklerin karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Uygulanan kaynak yöntemleri sırasıyla MIG (GMAW), soğuk metal transfer (CMT) ve hibrit plazma ark kaynağı (HPAW) olup, tüm yöntemlerde dolgu metali olarak yüksek tokluk özelliklerine sahip östenitik karakterli 307 Si kullanılmıştır. Her bir kaynak yöntemi için proses parametreleri optimize edilerek belirlenmiş ve kaynak uygulamaları bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre, kaynaklı numunelerin çekme dayanımlarının ana malzeme dayanımına oranları sırasıyla CMT için %45, GMAW için %50 ve HPAW için %65 olarak belirlenmiştir. Çentik darbe testleri sonucunda ise darbe dayanımı bakımından en başarılı sonuç CMT yöntemi ile elde edilmiştir. Kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan incelemelerinde, GMAW ve HPAW yöntemlerinde gevrek kırılma karakteristiği gösteren klivaj düzlemleri tespit edilirken; CMT yönteminde sünek kırılmaya işaret eden çukurcuk yapılar (dimples) gözlemlenmiştir. CMT yöntemiyle kaynaklanan numunelerde, çekme testi sırasında kırılmanın kaynak metalinin füzyon hattına yakın bölgesinden gerçekleştiği raporlanmıştır. Bu durum, CMT yöntemiyle elde edilen kaynak metalinde ana malzeme ile yeterli karışımın sağlanamadığını göstermektedir. Ayrıca, CMT yöntemiyle yapılan kaynakta düşük ısı girdisi nedeniyle ana malzemeye doğru nikel difüzyonunun sınırlı kaldığı ve bu nedenle kaynak metalinin östenit kararlılığının yüksek olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, GMAW ve HPAW yöntemlerinde daha yüksek ısı girdisi sebebiyle artan nikel difüzyonunun, kaynak metalinde soğuma sonrası martenzitik dönüşüme neden olduğu ve bu yapının spektral analizlerle doğrulandığı belirtilmiştir. Bu dönüşüm, kaynak metalinde daha yüksek sertlik ve mukavemet değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca CMT yönteminde ısıdan etkilenen bölgede (IEB) gözlemlenen daha yüksek sertlik değerleri, düşük ısı girdisine bağlı olarak temperlenmemiş martenzit oluşumu ve ince taneli yapı ile ilişkilendirilmiştir [49].

Kostak (2021) tarafından yapılan çalışmada, Armox 500T zırh çeliği üzerine farklı türde dolgu metalleri kullanılarak MIG kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ferritik, östenitik paslanmaz çelik ve dubleks paslanmaz çelik dolgu metalleri ile 0,4 kJ/mm ısı girdisi altında kaynak uygulamaları yapılmıştır. Yapılan mekanik testler sonucunda, östenitik ve dubleks paslanmaz çelik dolgu metalleri kullanıldığında çekme dayanımının belirgin şekilde azaldığı, buna karşılık darbe dayanımında hafif bir artış gözlemlendiği belirlenmiştir. Bu durum, özellikle sünek yapıya sahip dolgu metalleriyle yapılan kaynaklarda enerji absorplama kapasitesinin artmasına rağmen, mukavemetin düşme eğilimi göstermesiyle ilişkilendirilmiştir [50].

Kurt (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ülkemizde ilk kez yerli olarak üretilen Protection 500 kalite zırh çeliği üzerinde robotik gaz altı kaynak yöntemi kullanılarak, farklı ilave tel türlerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda, ferritik yapıya sahip ER110 SG ve SG3, östenitik paslanmaz yapıya sahip ELOX 309LSi, ile dubleks paslanmaz yapıya sahip ELOX SG2209 kaynak telleri kullanılmıştır. Isı girdisinin kontrollü şekilde uygulanabilmesi amacıyla robotik kaynak yöntemi tercih edilmiş ve işlem sırasında maksimum ısı girdisi 1,08 kJ/mm olarak hesaplanmıştır. Uygulamalar herhangi bir ön ısıtma gerektirmeden başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal incelemeler sonucunda, ER110 SG kaynak teli ile yapılan birleştirmelerde kaynak metalinde asiküler ferrit (AF) ve kısmen beynit (B) fazlarının oluştuğu ve bu fazların çekme dayanımı üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiştir. Bu numunelerde elde edilen çekme mukavemetinin, ana malzemenin mukavemetine oranı yaklaşık %62 olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, en düşük çekme dayanımı SG3 kaynak teli kullanılan numunelerde gözlemlenmiş ve bu oranın %48 seviyesinde kaldığı raporlanmıştır. Çentik darbe testi sonuçlarına göre ise en yüksek tokluk değeri, ortalama 97 J ile ELOX 309LSi kaynak metali kullanılarak yapılan birleştirmelerde elde edilmiştir. En düşük tokluk değeri ise ortalama 37 J ile ER110 SG kaynak teli kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerde tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, ilave tel kimyasal bileşiminin kaynak metalinin mekanik özellikleri üzerindeki belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır [51].

Çelik C. tarafından yürütülen bir çalışmada, zırh çeliklerinin kaynaklı bağlantılarında dolgu metali seçimi ve sandviç kaynak tasarımının performans

üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda Protection 500 kalite balistik çeliğe, östenitik paslanmaz ve sert dolgu telleri kullanılarak robotik gazaltı kaynağı ile iki farklı tasarımda birleştirme uygulanmış; kaynak sonrası tahribatsız muayenelerin ardından mikroyapı, sertlik, çekme, çentik darbe ve balistik testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tamamen östenitik dolgu metali ile yapılan birleştirmelerin mekanik dayanım açısından üstünlük sağladığı, ancak sandviç (sert dolgu + östenitik) kaynak tasarımının çentik darbe direncinde anlamlı bir düşüşe yol açmadan balistik dayanımı artırdığı rapor edilmiştir. Bu bulgular, balistik çeliklerde yalnızca ısı girdisinin kontrolünün değil, aynı zamanda kaynak tasarımı ve dolgu metali kombinasyonunun da performans belirleyicisi olduğunu ortaya koymaktadır [52].

Genel olarak kalınlığı 10 mm'nin üzerinde olan zırh sınıfı çelik levhalar, özellikle askeri araç üretimi ve savunma sanayii uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip yüksek kalınlıktaki sacların kaynağında, çift "V" oluklu bağlantı konfigürasyonu ve çok pasolu kaynak yöntemlerinin tercih edilmesi önerilmektedir [53]. Ancak çok pasolu kaynak işlemleri, sürekli ısınma ve soğuma döngüleri nedeniyle daha geniş bir ısıdan etkilenen bölge (IEB) oluşumuna neden olmakta ve bu durum balistik performansın düşmesine yol açabilmektedir.

Kurt (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 1 mm çapında 307Si östenitik dolgu metali kullanılarak 517 HV sertliğe sahip zırh çeliği üzerinde farklı kaynak ağzı açılımlarına sahip "V" ve "X" dikiş geometrilerinde kaynak işlemleri uygulanmıştır. Deneylede kaynak ağzı açılımları 30°, 36°, 42°, 48°, 54° ve 60° olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, kaynak ağzı açısındaki artışa bağlı olarak çekme dayanımı "V" tipi dikişte 670 MPa'dan 773 MPa'a, "X" tipi dikişte ise 551 MPa'dan 726 MPa'a yükselmiştir; ancak 54° ve 60° açılarda çekme dayanımında düşüş gözlenmiştir. Genel değerlendirme sonucunda, "X" kaynak dikişi geometrisinin "V" geometrisine kıyasla daha düşük çekme dayanımı sunduğu belirlenmiştir [54].

Özdemir (2020) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise yalnızca dolgu metali değil, kaynak dikişi geometrisinin darbe dayanımı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Bu kapsamda, ArmoX 500 zırh çeliği üzerine MIG kaynağı uygulanarak "V" ve "X" kaynak geometrileri oluşturulmuş; dolgu metali olarak östenitik MI 307Si ve ferritik FCH 330 tercih edilmiştir. Oda sıcaklığında

gerçekleştirilen çentik darbe testleri sonucunda, “V” tipi kaynakta östenitik dolgu metali ile 94 J, ferritik dolgu metali ile ise 41 J darbe dayanımı elde edilmiştir. “X” tipi kaynak geometrisinde ise her iki dolgu metali için de darbe dayanımı değeri 29 J olarak tespit edilmiştir [55].

Benzer bir araştırma İpek ve Elaldı (2012) tarafından yürütülmüş olup, 490 HB sertliğe ve 12 mm kalınlığa sahip zırh çeliği üzerine östenitik dolgu metali ile GMAW (MIG) kaynağı uygulanmıştır. Deneylerde “V” ve “X” kaynak dikişleri ile birlikte 48°, 54° ve 60° kaynak ağzı açıları kullanılmıştır. Uygulanan çekme ve basma testlerinin yanı sıra nümerik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, “V” konfigürasyonunun çekme gerilmeleri açısından daha avantajlı olduğu, “X” konfigürasyonunun ise basma gerilmeleri açısından daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. En yüksek çekme ve basma dayanımı değerleri, “V” tipi kaynakta 54° ve “X” tipi kaynakta 48° kaynak açılarında elde edilmiştir [56].

Kim ve Yi (2017) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise MIL-STD-12560 sınıfı zırh çeliğine dar aralıklı kaynak ağzı (Narrow Gap Welding-NGW) açılarak GMAW yöntemi uygulanmış ve bu geometri, geleneksel “X” tipi kaynak dikişi ile karşılaştırılmıştır. Bulgular, NGW yöntemi ile hazırlanan numunelerin “X” tipi dikişe kıyasla daha yüksek akma dayanımı, çekme dayanımı ve uzama yüzdesi sunduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, NGW yönteminde daha düşük toplam ısı girdisi oluşması ve sünek özellikler sağlayan dar ve düşük sertliğe sahip IEB bölgesinin oluşması ile açıklanmıştır. Aynı zamanda yapılan balistik testler sonucunda da NGW geometrisinin, ilgili standartların gerektirdiği balistik performans kriterlerini sağladığı belirlenmiştir [57].

Göde ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Armox 600T zırh çeliği, en yaygın karşılaşılan balistik tehditlerden biri olan 7.62 mm M61 AP (Armor Piercing) mühimmata karşı test edilmiştir. Gerçekleştirilen balistik testlerde, en kötü senaryonun gözlemlenebilmesi amacıyla çoklu darbe (multi-hit) koşulları tercih edilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, Armox 600T çeliğinin kırılma davranışlarını daha iyi anlayabilmek için hasar görmüş ve hasar görmemiş bölgelerde detaylı mikroyapısal incelemeler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, balistik testlere ilişkin nicel verilerin elde edilebilmesi amacıyla üç boyutlu (3D) optik tarama yöntemleri kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre, 12 mm kalınlığındaki Armox 600T çeliği, çoklu darbe koşullarında, 815–829 m/s hızla gelen 7.62 mm M61 AP mühimmatını

durdurabilmiştir. Bu balistik tehdide karşı ArmoX 600T'nin sergilediği başlıca kırılma davranışı, öncelikle kalınlık boyunca bir çatlağın oluşması, ardından bu çatlağın yatay yönde ilerleyen ikincil çatlaklarla devam etmesi şeklindedir. Bu nedenle, hasar oluşumunu boşluk oluşumu ve birleşmesi üzerinden açıklayan sünek hasar modelleri (örneğin Johnson–Cook hasar modeli) bu tür kırılma davranışlarını temsil etmede yetersiz kalmaktadır. Yapılan mikroyapısal incelemelerde, çatlakların önceki östenit tanelerinin sınırları boyunca intergranüler (tane sınırı boyunca) ilerlediği gözlemlenmiştir. Bu durum, balistik dayanımın artırılmasına yönelik mikroyapı mühendisliği çözümleri açısından önemli ipuçları sunmaktadır. ArmoX 600T çeliğinin mikroyapısı, neredeyse tamamen temperlenmiş martenzit fazından oluşmakta olup, %1'in altında kalıntı östenit içermektedir. Bu da, balistik dayanımda TRIP (Transformation-Induced Plasticity) etkisinin belirgin bir katkısının olmadığını göstermektedir. İnce martenzitik yapısı nedeniyle çoğu tane boyutu 1 mikrometreden küçük olmakla birlikte, az miktarda poligonal ve iğne (asiküler) ferrit fazları da tespit edilmiştir. Malzeme boyunca elde edilen sertlik dağılımı tamamen homojen olmamakla birlikte, her iki yüzeyde ölçülen sertlik değerlerinin, ilgili standartlar kapsamında kaldığı belirlenmiştir [58].

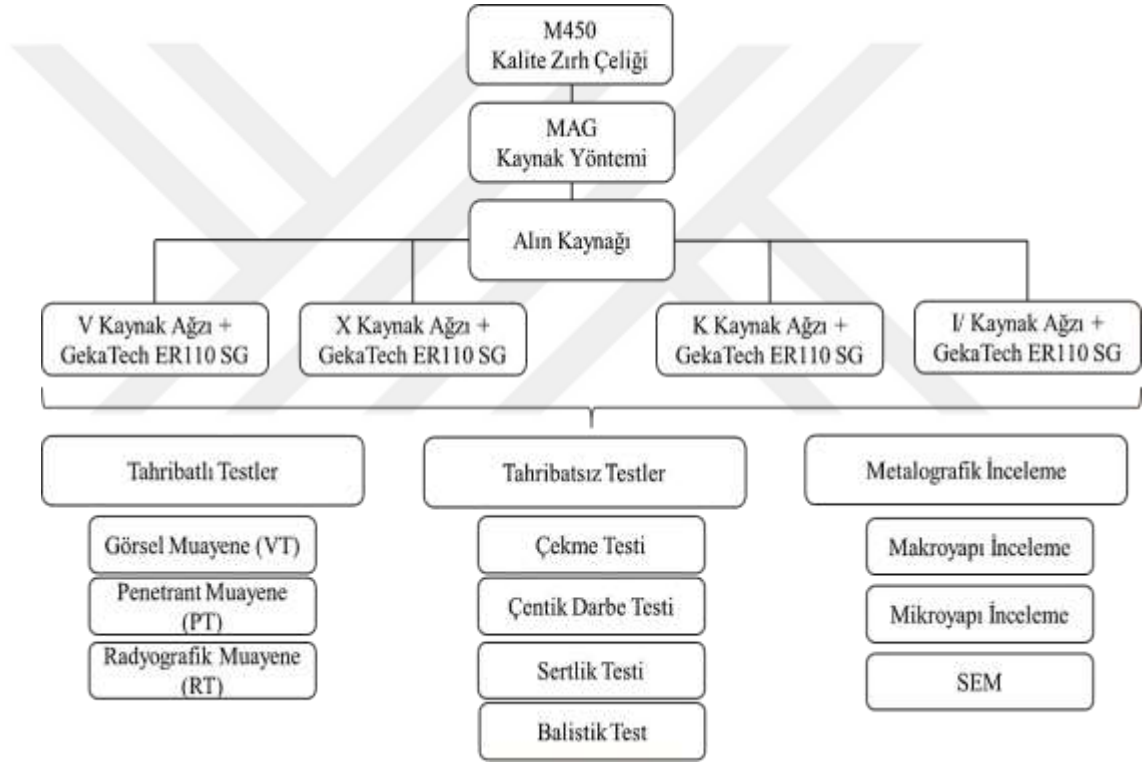
Savic vd. yaptığı çalışmada, farklı ısı girdilerine sahip (1.29 kJ/mm ve 1.55 kJ/mm) iki adet zırh çeliği kaynağı, GMAW (Gas Metal Arc Welding) yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve bu birleştirmelerin balistik koruma performansları test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 1.55 kJ/mm ısı girdisinde, Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB)'de yer alan eriyik sınırının sertliğinde azalma meydana gelmiş ve bu durum, balistik koruma performansında düşüşe neden olmuştur. Isı girdisi azaldıkça, kaynak metalinin sertliğinde artış gözlemlenmiştir. Darbe tokluğu açısından ise, temel metal (ana malzeme) her iki ısı girdisinde de iyi tokluk özellikleri sergilemiştir; ancak IEB bölgesinin balistik direnci, artan ısı girdisiyle birlikte belirgin şekilde azalmıştır. Çalışmada, 1.43 kJ/mm ısı girdisine sahip kaynak parametrelerinin, yüksek performanslı birleştirmeler için optimum olduğu ifade edilmiştir. Kaynak metalinin (WM) mikroyapısı, ısı girdisinden bağımsız olarak ağırlıklı biçimde δ ferrit fazı içermektedir. Isı girdisinin azalması, kaynak metalindeki δ ferrit miktarının artmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, IEB'de tane büyüme bölgesi (CGHAZ) mikroyapısı, artan ısı girdisiyle birlikte lath bainit/martenzit yapısından, iri taneli granüler bainit yapısına dönüşmüştür. 1.29 kJ/mm ısı girdisine sahip kaynaklı

numune, 1.55 kJ/mm'lik numuneye kıyasla önemli ölçüde daha yüksek sertlik değerleri göstermiştir. Bu bulgu, balistik performansla sertlik arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Genel olarak, ısı girdisinin artması, malzemenin sünek ve daha yumuşak bir yapıya dönüşmesine neden olarak, balistik performansta düşüşe yol açmaktadır. Özellikle 7.62 mm zırh delici (AP) mühimmat için, malzemenin sertliği ve dayanımı, etkin balistik koruma açısından kritik parametrelerdir. Bu bağlamda, 1.55 kJ/mm ısı girdisiyle elde edilen kaynaklı numune, söz konusu mühimmatın delici etkisine karşı yeterli direnç göstermemiştir [59].

Literatür özetinde de görüldüğü üzere, zırh çeliklerinin kaynak kabiliyetinin iyileştirilmesine yönelik olarak geçmişten günümüze çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiş ve bu alandaki çalışmalar günümüzde de artan bir ivmeyle devam etmektedir. Ancak, mevcut çalışmaların büyük bir bölümünde balistik test sonuçlarının, mikroyapı incelemeleri ve mekanik özelliklerle birlikte kapsamlı şekilde değerlendirilmediği görülmektedir. Bu bağlamda, sunulan çalışma; yüksek mukavemetli balistik zırh çeliklerinde kaynak ağız tasarımının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini, balistik performans verileriyle birlikte çok yönlü olarak inceleyerek literatürdeki bu eksikliği gidermeyi amaçlamaktadır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada zırh çeliklerinin kaynağında kaynak geometrisindeki değişikliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla MIG/MAG kaynak yöntemi kullanılmıştır. Kaynak metali olarak GeKaTec ER110 SG kullanılmıştır. Çalışmanın şematik gösterimi Şekil 6.1 'de gösterilmektedir.



Şekil 6.1: Deneysel Çalışmalar Şematik Gösterimi

6.1 Kaynak Sarf Malzeme ve Ana Malzemenin Seçimi

Yapılan çalışmada ana malzeme olarak Miilux Oy firmasında üretilen yerli zırh çeliklerinden 20 mm kalınlığında M450 kalite plakalar kullanılmıştır. Bu plakalar Gedik Test Merkezi bünyesindeki mekanik atölyede kaynak ağız açısı 30° ve yine kaynak ağız geometrisi sırasıyla V, X, K ve I/ olacak şekilde hazırlanmıştır. Plakalardan alınan numunelerin % ağırlıkça kimyasal analizi ve mekanik özellikleri

de yine Gedik Test Merkezi kimyasal ve mekanik laboratuvarında bulunan cihazlarla yapılmış olup sonuçlar Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.1: M450 Zırh Çeliği Plakalarının Kimyasal Analizi (%Ağ.)

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Ceş
M450 Zırh Çeliği	0,26	0,7	1,7	1,3	0,8	0,5	0,025	0,01	0,63

Çizelge 6.2: M450 Zırh Çeliği Plakalarının Mekanik Özellikleri

	Akma Dayanımı MPa	Çekme Dayanımı MPa	%Uzama	Çentik Darbe Dayanımı (ISO-V/-40°C) (J)
M450 Zırh Çeliği	1177	1514	11	23

Çalışmada kaynak sarf malzemesi olarak Gedik Kaynak A.Ş. tarafından üretilen Ø1,2 mm’lik yüksek dayanımlı MAG kaynak teli GekaTec ER 110 SG kullanılmıştır. Bu kaynak teli üretici beyanına göre Yüksek mukavemetli yapı çelikleri ve zırh çeliklerinin kaynaklanmasında kullanılmaktadır. Kaynak telinin mekanik test değerleri, ürün üzerinde yer alan sertifika değerlerine dayanarak belirlenmiş olup, bu değerler Çizelge 6.4’te sunulmuştur. Kullanılan kaynak teli için, kaynak dolgu metallerinin kimyasal analizlerini belirlemek amacıyla saf kaynak metali örneği hazırlanmıştır. Yüzey hazırlama işlemleri tamamlandıktan sonra, hazırlanan numunelere Hitachi FM Expert cihazı ile kimyasal analiz yapılmıştır. İlgili testlere ait sonuçlar Çizelge 6.3’te verilmiştir.

Çizelge 6.3: GekaTec ER 110 SG Kaynak Telinin Kimyasal Analizi (%Ağ)

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
GekaTec ER 110 SG	0,07	0,40	1,20	0,31	1,56	0,28	95,90

Çizelge 6.4: GekaTec ER 110 SG Kaynak Telinin Mekanik Özellikleri

	Akma Dayanımı MPa	Çekme Dayanımı MPa	%Uzama	Çentik Darbe Dayanımı (ISO-V/-40°C) (J)
GekaTec ER 110 SG	min.690	770-940	min.17	47

Kaynak: (file.gedik.com.tr)

6.2 Kaynak Düzeneklerinin Hazırlanması

Çalışmada gerçekleştirilen tüm kaynak işlemleri, Gedik Eğitim Vakfı bünyesinde yer alan kaynak atölyesinde, Gekamac marka Power MIG GPS WB P500L model kaynak makinesi kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan kaynak ekipmanları Şekil 6.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 6.2: Kaynak Ekipmanları

TS EN ISO 9692-1 "Kaynak ve benzer işlemler – Kaynak ağızı hazırlığı için tavsiyeler" standardına göre, kaynak ağızı açısı 30° olacak şekilde plakalar; sırasıyla Tek V, Çift V, Tek eğimli (tek pah) ve Çift eğimli (çift pah) kaynak ağızı tiplerine uygun olarak hazırlanmıştır.

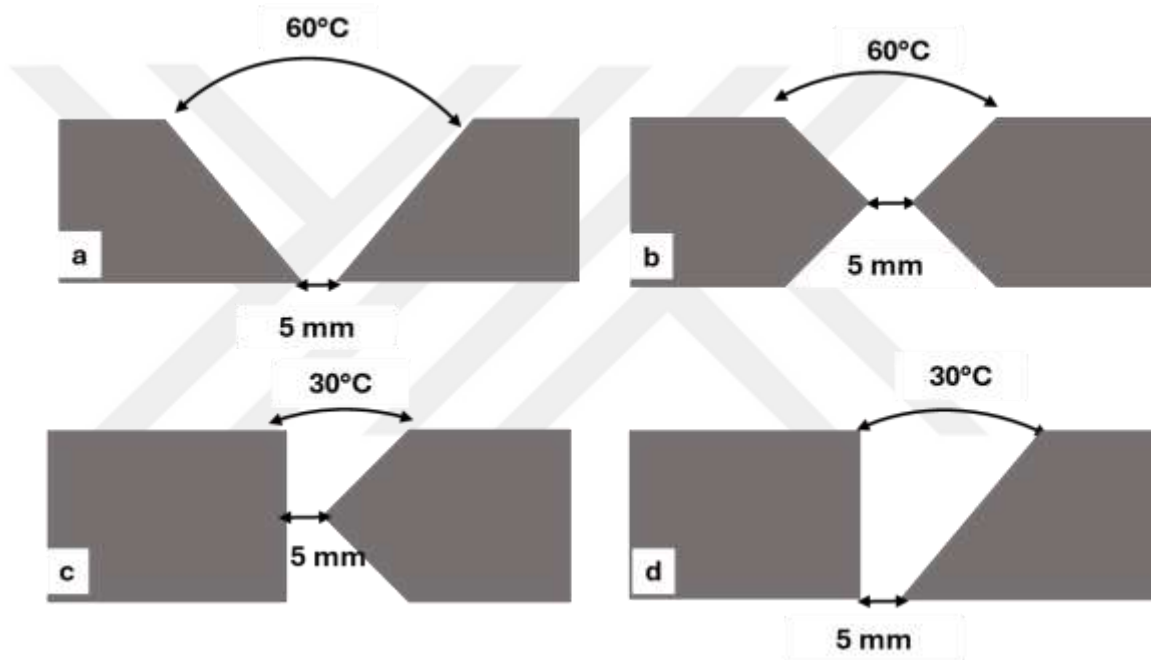
Çalışmada kullanılan kaynak plakalarının uçlarına 2 mm'lik pah kırılmış ve kaynak işlemi için 5 mm kök aralığı bırakılmıştır. Kaynak başlangıç ve bitiş bölgelerine, hizalama ve kaynak sürekliliğini sağlamak amacıyla ek çelik parçalar puntalanarak yerleştirilmiştir. Tam nüfuziyetli kaynak elde edilebilmesi için seramik altlıklar, folyo bant yardımıyla plakanın alt yüzeyine sabitlenmiştir. Kaynak esnasında parça stabilitesini sağlamak amacıyla, plakalar çift işkence yöntemiyle kaynak tablasına sabitlenmiştir.

Zırh çeliklerinin üretim sürecinde, manyetik özelliğe sahip taşıyıcı ekipmanlarla taşınmaları sonucunda parçalarda artık manyetik alan oluşabilmektedir. Bu manyetik alan, ark kaynağı sırasında ark yörüngesinin sapmasına ve dolayısıyla ark üflemesi (arc blow) olgusuna neden olmaktadır. Bu durumun kaynak kalitesini olumsuz etkilemesini önlemek amacıyla, kaynak işleminden önce plakalarda gaussmetre kullanılarak artık manyetik alan şiddeti ölçülmüştür, Elde edilen

değerlere göre, plakalar üzerinde el yökesi yardımıyla demanyetizasyon işlemi uygulanmıştır.

Kaynak işlemi öncesinde kullanılan zırh çelik plakalarının karbon eşdeğer değerleri dikkate alınarak Propan tüp ve şaloma yardımıyla, plakaların yüzeyine 120 ± 10 °C olacak şekilde ön ısıtma uygulanmıştır. Kaynak işlemi çok pasolu olarak gerçekleştirilmiş olup, işlem sırasında pasolar arasındaki sıcaklığın maksimum 150 °C'yi geçmemesine özen gösterilmiştir.

Çalışmada kullanılan plakaların ölçüleri ve kaynak ağız tasarımları Şekil 6.3'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.3: Kaynak Ağız Tasarımlarının Şematik Gösterimi

Kaynak işlemi sırasında kaynak makinesinden elde edilen değerler kaydedilmiş ve bu veriler kullanılarak Eşitlik 1'e göre ısı girdisi hesaplanmıştır. Ölçülen parametre değerleri farklı kaynak ağız tasarımları için Çizelge 6.5'te verilmiş olup, parametrelerdeki değişime rağmen ısı girdisinin dört farklı kaynak geometrisinde de sabit kaldığı görülmüştür.

Çizelge 6.5: Kaynak Parametreleri

	Gaz Debisi (1/dk)	Koruyucu Gaz	Akım (A)	Voltaj (V)	Kaynak Hızı (cm/dk)	Isı Girdisi (kJ/mm)
Tek V	15	%82 Ar + %18 CO ₂	250	30	30,7	1,1
Çift V			250	30	34	1,1
Çift eğimli (çift pah)			228	30	34	1,08
Tek eğimli (tek pah)			224	30	34	1,07

Kaynak işlemleri sırasında kullanılan gazlar TS EN ISO 14175- Kaynak sarf malzemeleri- Ergitme kaynağı ve benzeri işlemler için gazlar ve gaz karışımları standardına göre ER110-SG teli için M21 grubu %82 Ar + %18 CO₂ karışım gazı kullanılmıştır.

6.3 Tahribatsız Muayene

Kaynak işlemleri tamamlanan test numuneleri, ortam koşullarında kendi hâlinde soğumaya bırakılmıştır. Soğuma işleminin ardından, numunelerde olası hacimsel ve yüzeysel hataların tespiti amacıyla tahribatsız muayene işlemleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, TS EN ISO 17637 standardına uygun olarak görsel muayene yapılmış ve elde edilen bulgular TS EN ISO 5817 standardı esas alınarak değerlendirilmiştir. Görsel muayene sonucunda kabul kriterlerini karşılayan numunelere, sırasıyla sıvı penetrant ve radyografik muayene yöntemleri uygulanmıştır.

6.3.1. Sıvı penetrant muayene

Test parçalarında malzeme yüzeyinde ve yüzeye yakın bölgelerinde bulunan çatlak, gözenek, sızıntı gibi süreksizliklerin tespiti amacıyla TS EN ISO 3452-1 standardına göre sıvı penetrant muayene yapılmıştır. Yüzey yağ, kir, pas ve diğer kalıntılardan arındırılmak için temizlenmiştir. Temizleme işleminin ardından, yüzeye kapiler etkiyle yüzeydeki açıklıklara nüfuz edebilen renkli veya floresan özellikte bir penetrant sıvı uygulanır. Belirli bir süre boyunca penetrantın süreksizliklere nüfuz etmesi için beklenmiştir. Daha sonra, yüzeyde kalan fazla penetrant dikkatlice temizlenmiştir. Ardından, süreksizliklerde kalan penetrantın yüzeye çekilmesini sağlayan geliştirici madde uygulanmıştır. Son olarak, yüzey uygun aydınlatma

koşullarında incelenip ve tespit edilen süreksizlikler TS EN ISO 23277 standardına göre değerlendirilmiştir.



Şekil 6.4: Sıvı Penetrant Muayenesi

Kaynak: (gediktestmerkezi.com)

6.3.2. Radyografik muayene

Test parçalarında kaynak bölgesinde hacimsel süreksizliklerin (gözenek, cüruf, çatlak vb.) tespit edilmesi amacıyla TS EN ISO 17636-1 standardına göre radyografik muayene yapılmıştır. Bu yöntemde, X-ışınları kullanılarak malzeme içerisine nüfuz eden radyasyon, karşı yüzeye yerleştirilen bir film veya dijital detektör üzerinde iz bırakır. Radyasyon, yoğunluğu düşük olan bölgelerden daha fazla geçerken, yoğunluğu yüksek olan hatalı bölgelerde daha az geçer. Böylece film üzerinde kontrast farkı oluşur ve iç yapıda bulunan süreksizlikler görüntülenebilir. Bu muayene yöntemi Gedik Test Merkezi bünyesinde bulunan Eresco MF4 – 300 KW radyografik muayene cihazı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6.5: Radyografik Muayene

Kaynak: (gediktestmerkezi.com)

6.4 Tahribatlı Muayene

Görsel muayene, sıvı penetrant muayene ve radyografik muayene gibi tahribatsız muayene yöntemleri sonucunda kabul kriterlerini karşılayan test

numunelerine, malzemenin mekanik ve yapısal özelliklerini değerlendirmek amacıyla çekme, çentik ve sertlik testleri gibi tahribatlı testler uygulanmıştır. Bu testler için ilgili standartlarda belirtilen ölçülerde, iki eğme numunesi, iki çekme numunesi, bir makro numunesi, bir mikro numunesi, kaynak bölgesinden 3 adet IEB'den 3 adet çentik darbe numunesi Gedik Test Merkezi mekanik atölyesinde hazırlanmıştır.

6.4.1 Eğme testi

EN ISO 5173 standardına göre eğme testi, özellikle kaynaklı bağlantıların ve metal malzemelerin sünekliği, esnekliği ve çatlama eğilimi gibi mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla yapılmaktadır. Her kaynaklı test plakasından 2'şer adet test numunesi alınmış ve testler, Gedik Test Merkezi Tahribatlı Test laboratuvarında bulunan Şekil 6.6'da gösterilen hidrolik eğme makinesi kullanılarak 180° eğilme açısıyla gerçekleştirilmiştir.

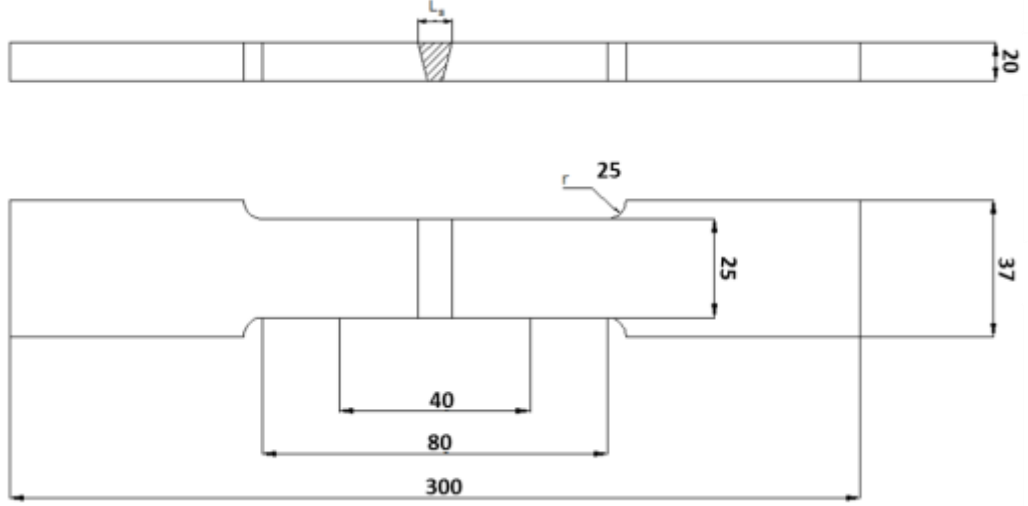


Şekil 6.6: Hidrolik Pres

6.4.2 Çekme testi

Her bir kaynaklı plakadan 2'şer adet olmak üzere toplam numuneler alınmış ve enine çekme testi uygulanabilmesi amacıyla numuneler EN ISO 4136 standardına

uygun olarak hazırlanmıştır. Çekme testi numunelerinin ölçüleri Şekil 6.7’de sunulmuştur. Testler, Gedik Test Merkezi’nde bulunan Şekil 6.8’de gösterilen Zwick/Roell Z 600E marka çekme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları doğrultusunda cihazdan elde edilen akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri alınmış ve değerlendirilmek üzere karşılaştırılmıştır.



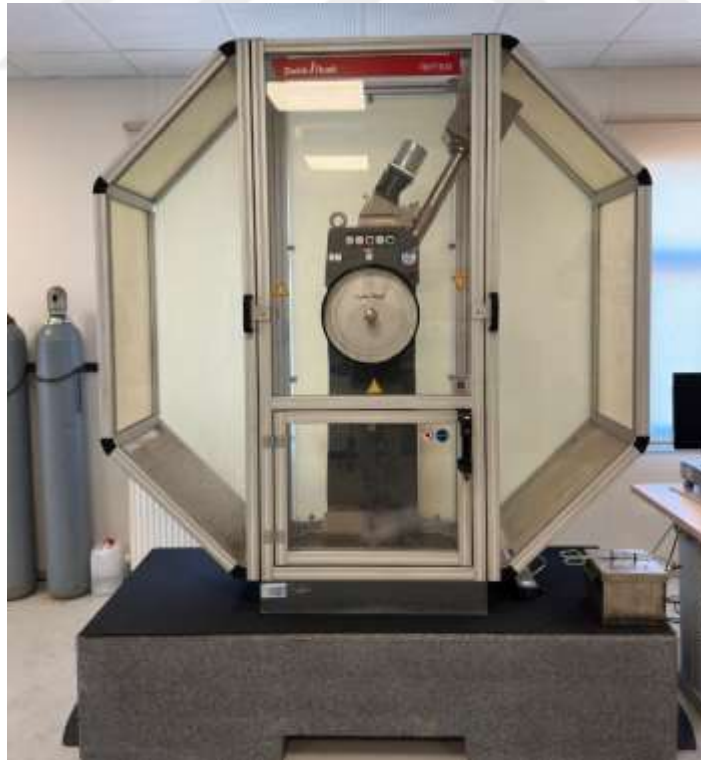
Şekil 6.7: Çekme Testi Numune Ölçüleri



Şekil 6.8: Çekme Testi Cihazı

6.4.3 Çentik darbe testi

Charpy çentik darbe testi, kaynaklı plakaların çentik etkisine maruz kaldığında darbe yüklerine karşı tokluklarını belirlemek amacıyla uygulanır. Bu test, özellikle kaynak dikişleri ve ısıdan etkilenen bölgelerde (IEB – Heat Affected Zone) oluşabilecek gevrek kırılma eğilimini tespit etmek açısından büyük öneme sahiptir. [60]. Bu testler, kaynaklı malzemelerde TS EN ISO 9016 standardına, kaynaksız malzemelerde ise TS EN ISO 148-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Standartlara uygun olarak 10×10×55 mm boyutlarında, 2 mm derinliğinde V-çentikli çentik darbe numuneleri hazırlanmış olup çentikler darbe yönüne dik gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Numuneler hem kaynak metalinden hem de IEB bölgesinden olmak üzere her biri 2'şer set şeklinde hazırlanmıştır. Çentik darbe testi Gedik Test Merkezi bünyesinde yer alan Şekil 6.9'da gösterilen Zwick/Roell RKP 300 model çentik darbe test cihazında yapılmıştır. Çentik darbe testi, numunelerin test öncesinde uygun soğutma ortamında -40 °C'ye kadar soğutulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, karbondioksit ve aseton karışımı kullanılarak yapılmış ve istenilen sıcaklığa ulaşıldığı dijital göstergeli sıcaklık ölçer yardımıyla doğrulanmıştır.



Şekil 6.9: Çentik Darbe Testi Cihazı

6.4.4 Sertlik testi

Sertlik testi, malzemelerin plastik (kalıcı) deformasyona karşı dayanımını ölçmek amacıyla yapılan bir tahribatlı test yöntemidir. [referans]. Bu çalışmada sertlik yöntemlerinden Vickers sertlik yöntemi kullanılarak ölçüm yapılmıştır. Kaynaklı plakadan alınan test numunesinin yüzeyi sertlik testi öncesi zımparalanarak teste hazır hale getirilmiştir. Ardından ana malzeme, ısı tesiri altında kalan bölge (IEB) ve kaynak metalinden x ekseni boyunca ve buna ek olarak kaynak metalinin tam orta noktasından başlanarak, kaynak üst yüzeyinden kök bölgesine doğru y ekseni boyunca da 0,5 mm aralıklarla ve HV5 kgf yük ile sertlik ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümler Gedik Test Merkezi bünyesinde bulunan Şekil 6.10'da gösterilen Emcotest DuraScan marka otomatik sertlik ölçer cihazında yapılmıştır.



Şekil 6.10: Sertlik Testi Cihazı

6.5 Metalografik Muayene

Bu çalışmada yapılan kaynaklı plakalardan metalografik muayene için numune alınarak makroyapı ve mikroyapı incelemesi yapılmıştır.

6.5.1 Test numunesi hazırlığı

Makroyapı, mikroyapı ve sertlik testlerine yönelik olarak, kaynaklı plakalardan alınan numunelere Gedik Test Merkezi bünyesinde yer alan Şekil

6.11’de gösterilen Metkon Forcipol 2V model zımparalama cihazı ile yüzey hazırlama işlemleri uygulanmıştır. Zımparalama işlemi, sırasıyla 80, 120, 220, 300, 600, 800, 1000, 1200 ve 2500 grit numaralı zımpara kâğıtları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerin ardından, numune yüzeylerinin mikroskopik incelemelere uygun hâle getirilmesi amacıyla, çuha bez üzerinde 3 µm tane boyutuna sahip alümina süspansiyon kullanılarak son aşama parlatma işlemi yapılmıştır.



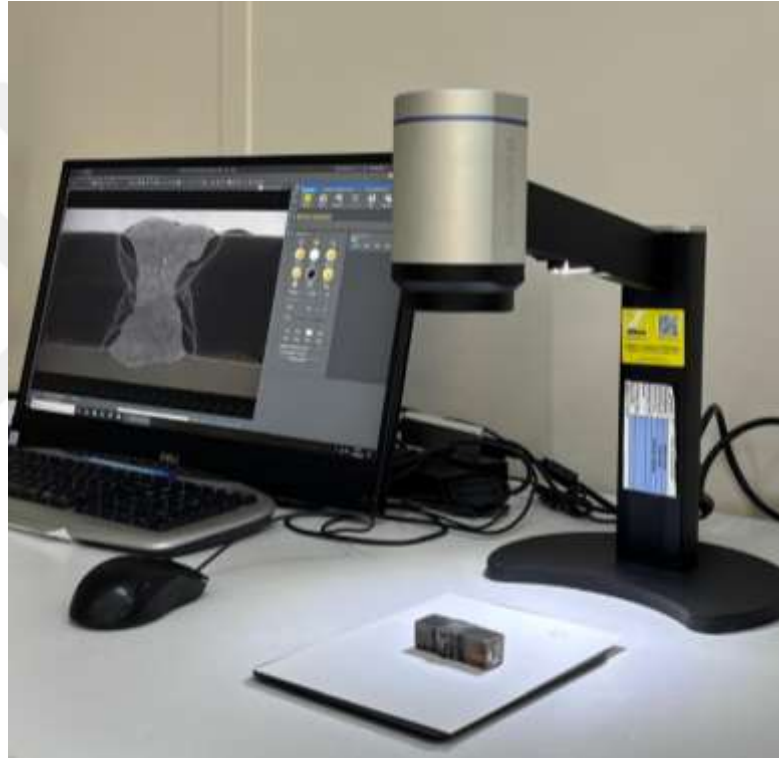
Şekil 6.11: Zımpara Cihazı

Çekme testi ve çentik darbe testi sonrasında meydana gelen kırılmaların yönünü ve kırılma karakteristiklerini belirleyebilmek amacıyla, test numuneleri makroyapı incelemesine uygun hâle getirilmiştir. Bu amaçla, numuneler soğuk bakalit kiti kullanılarak bakalite alınmıştır. Bakalite alma işlemi sırasında, bir ölçek toz bakalit ile bir ölçek bakalit reçinesi karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiş ve bu karışım numunenin yerleştirildiği kalıp içerisine dökülmüştür. Oda sıcaklığında kuruması beklenen bakalit numuneler, sertleşme tamamlandıktan sonra zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu işlemler, yüzeyin makroskopik incelemeye uygun hale getirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Zımparalama ve parlatma işlemlerinin ardından metalgrafik inceleme işlem adımlarından dağlama işlemine geçilmiştir. Hazırlanan numunelere makroyapı ve mikroyapı analizi uygulanmadan önce yüzeyler, %10'luk nital çözeltisi (HNO₃ ve etil alkol karışımı) ile kimyasal olarak dağlanmıştır.

6.5.2 Makroyapı inceleme

Yüzey hazırlama işlemleri tamamlanan numunelerin Gedik Test Merkezi bünyesinde yer alan Şekil 6.12’de gösterilen Nikon Inspectis makro inceleme cihazı ile görüntüleri alınmıştır. Makroyapı incelemesi, TS EN ISO 17639 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. İnceleme kapsamında hazırlanan numunelerde, kaynak dikişi, pasolar arası geçişler, ısıdan etkilenen bölge (IEB) ve kaynak dikiş genişliği detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, kaynaklı birleştirmelerdeki kalite düzeyinin belirlenmesi amacıyla TS EN ISO 5817 standardında belirtilen kriterlere göre sınıflandırılmış ve yorumlanmıştır.



Şekil 6.12: Makro Görüntüleme Cihazı

6.5.3 Mikroyapı inceleme

Mikroyapıda numunelerin ısıdan etkilenen bölgeleri, kaynak bölgeleri, füzyon bölgeleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu testler Gedik Test Merkezi bünyesinde bulunan Şekil 6.13’te gösterilen Leica DMI8 M mikro inceleme cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 6.13: Mikroyapı İnceleme Cihazı

6.5.4 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri

Detaylı mikroyapı incelemelerinin yapılabilmesi amacıyla, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, makroyapı ve optik mikroskop incelemeleri yapılan numuneler üzerinde daha yüksek büyütmelerdeki mikro yapısal özellikleri değerlendirilmiştir. SEM incelemeleri, Sakarya Üniversitesi SARGEM Laboratuvarı'nda bulunan FEI Quanta FEG 450 model Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

6.6 Balistik Test

Dört farklı kaynak geometrisi ile kaynaklanan parçalardan mekanik ve metalografik test numuneleri alındıktan sonra balistik teste tabi tutulmuştur. Balistik testler CES Balistik Test Laboratuvarında Test EN 1522 standardı FB7 balistik koruma seviyesine göre gerçekleştirilmiştir. Testte 7,62x51 mm M61 AP mühimmat kullanılmıştır. Kaynaklı plakaların birer adet ana malzemelerinden ikişer adet IEB ve kaynak bölgelerinden atış yapılmıştır. Balistik testlerin tamamlanmasının ardından, kaynaklı plakalardan belirlenen bölgelerden numuneler alınmış ve bu numuneler, makro incelemeleri amacıyla metalografik hazırlama işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.14: 7,62x51 mm M61 AP Mühimmat Görüntüsü

Kaynak: (mke.gov.tr)

7. SONUÇLAR

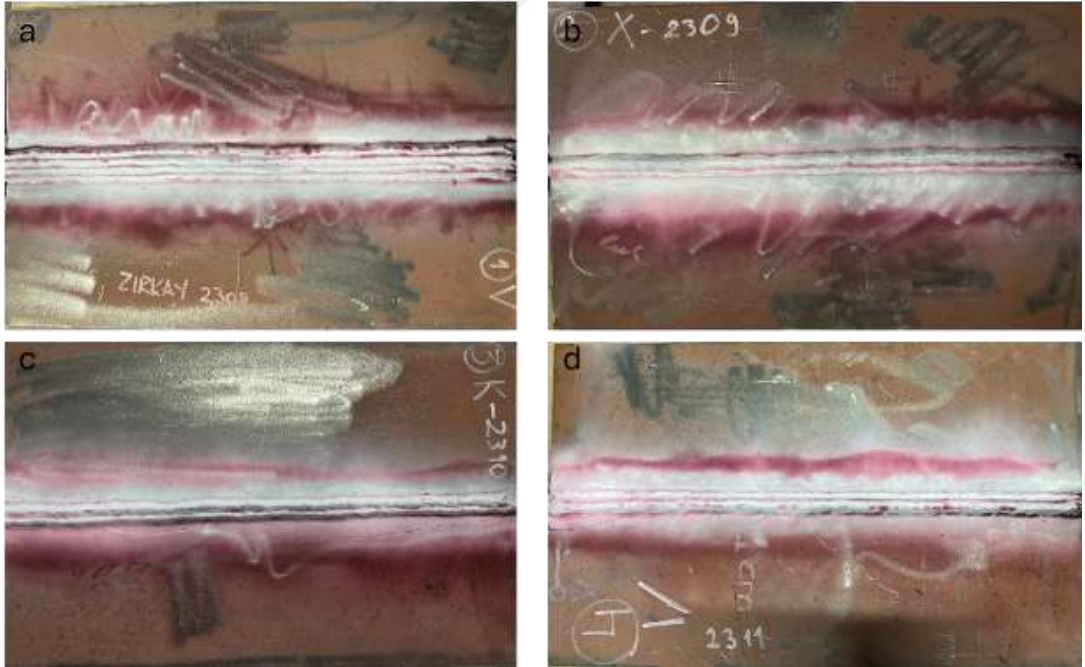
7.1 Tahribatsız Muayene Sonuçları

7.1.1 Görsel muayene sonuçları

Kaynak işlemleri tamamlanan test parçaları havada soğutulduktan 24 saat sonra görsel muayeneye tabi tutulmuştur. TS EN ISO standardına göre değerlendirilmiş olup, herhangi bir kusur tespit edilmemiştir.

7.1.2 Sıvı penetrant muayene sonuçları

Görsel muayene testleri tamamlanan kaynaklı plakalar TS EN ISO 3452-1 standardına uygun sıvı penetrant testine tabi tutulmuştur. Kaynaklı plakaların IEB ve kaynak bölgelerinde herhangi bir kusur tespit edilmemiştir. Test sonrası numune görselleri Şekil 7.1’de gösterilmektedir.



Şekil 7.1: Sıvı Penetrant Test Görüntüleri

7.1.3 Radyografik muayene sonuçları

Sıvı penetrant testi tamamlanan numunelerin yüzeyleri temizlendikten sonra ISO 17636-1 standartına göre radyografik muayene testine tabi tutulmuştur. Bu

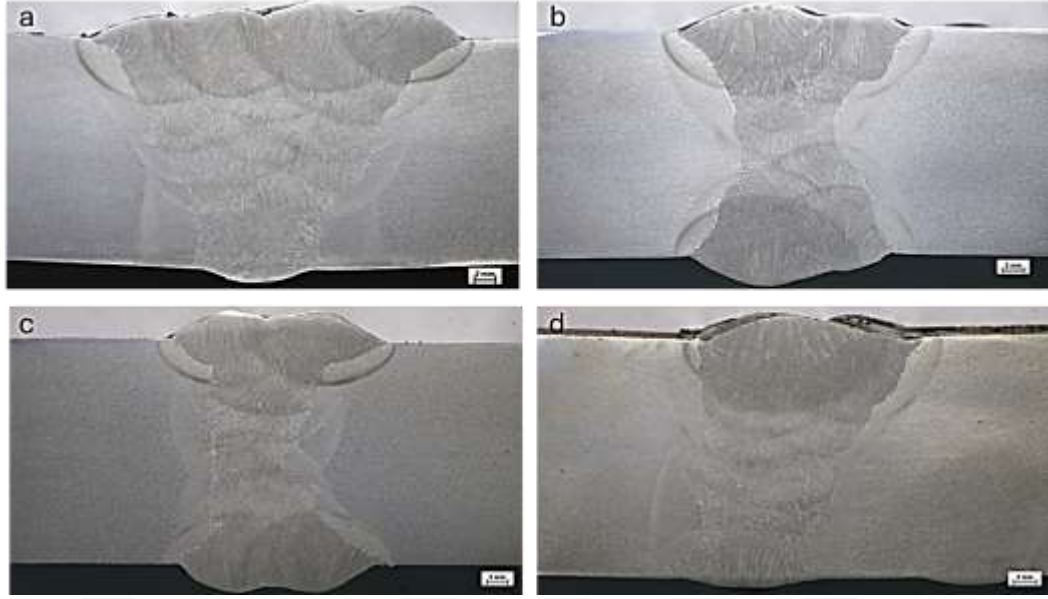
testlerin sonucunda TS EN ISO 5817-B standartına göre değerlendirme yapılmış olup, ilgili kalite seviyesini aşan hacimsel hatalar tespit edilmemiştir. Radyografik film görüntüleri Şekil 7.2’de gösterilmektedir.



Şekil 7.2: Radyografik Test Sonuçları

7.2 Makroyapı İnceleme

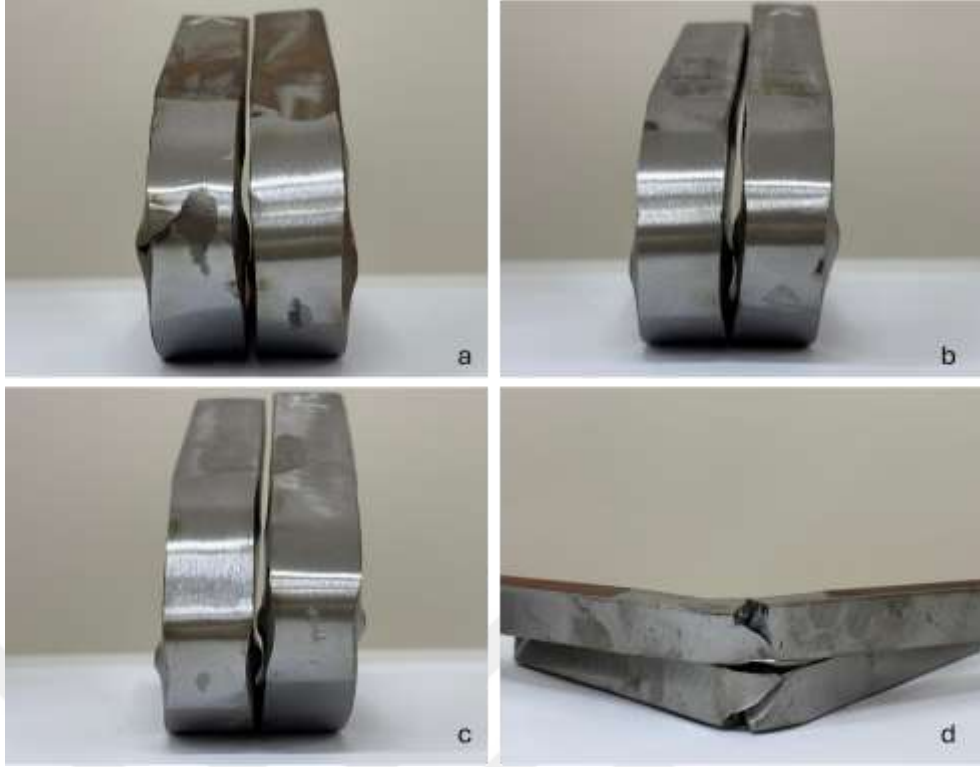
Metalografik hazırlama işlemlerine tabi tutulan makroyapı numunelerinin görüntüleri Gedik Test Merkezi Metalografi laboratuvarında yer alan Nikon Inspectis makro inceleme cihazı ile alınmıştır. Numunelerin makroyapı görüntüleri Şekil 7.3’teki gibidir. Numuneler TS EN ISO 5817 standardına göre değerlendirildiğinde penetrasyon eksiliği, pasolar arası ergime noksanlığı, çatlak ve gözenek gibi kusur tipleri gözlenmemiştir. Kaynak işlemleri; Tek V kaynak ağzı açılan numunede 6 sıra 14 paso, Çift V kaynak ağzı açılan numunede 6 sıra 9 paso, Tek eğimli (tek pah) kaynak ağzı açılan numunede 6 sıra 10 paso ve Çift eğimli (çift pah) kaynak ağzı açılan numunede 6 sıra 9 paso şeklinde gerçekleştirilmiştir. Dağlama sonrası ortaya çıkan makro görüntülerde IEB ve kaynak metali pasoları net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 7.3: Makroyapı Görüntüleri; a) Tek V b) Çift V c) Tek Pah d) Tek Pah Numuneleri

7.3 Eğme Testi Sonuçları

Şekil 7.4'te verilen eğme testi numuneleri, dört farklı kaynak ağzı geometrisine (a–Tek V, b–Çift V, c–Çift eğimli, d–Tek eğimli) uygulanmış 180° eğme sonrası deformasyon davranışını göstermektedir. Tüm numunelerde kaynaklı birleştirmenin eğme yönüne bağlı olarak plastik deformasyona uğradığı, ancak süreksizlik oluşumu ve çatlak davranışının geometriye bağlı olarak değiştiği görülmüştür. TS EN ISO 5173 standardına göre gerçekleştirilen 180° eğme testi sonuçlarına göre, kaynak ağzı geometrisinin eğilme davranışını doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Çift V geometrisi eğme sonrası süreksizlik oluşturmadan testten başarıyla geçmiştir. Tek V numunesi sünek deformasyon sergilemiş ancak yüzeyde lokal gerilme birikimi görülmüştür. Çift eğimli numune kök bölgesinde kısmi yığılma göstermiş, ancak çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Tek eğimli numunede ise kök bölgesinde belirgin çatlak oluşumu meydana gelmiş olup, eğilme altındaki en düşük süneklik davranışı bu numunede tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, çift V geometrisinin eğilme dayanımı bakımından en uygun konfigürasyon olduğunu göstermektedir.



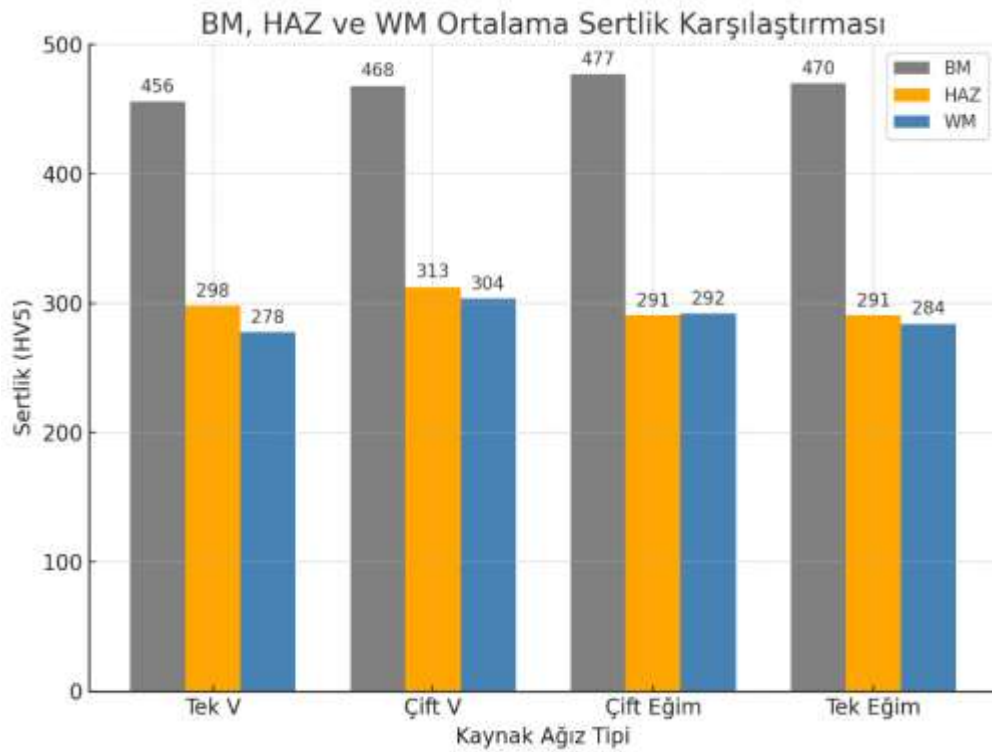
Şekil 7.4: Eğme Testi Sonrasında Farklı Kaynak Ağzı Geometrilerine Ait Numunelerin Görünümü; (a) Tek V, (b) Çift V, (c) Çift Eğimli (Çift Pah), (d) Tek Eğimli (Tek Pah)

7.4 Sertlik Testi Sonuçları

Tek V, Çift V, Tek eğimli (tek pah) ve Çift eğimli (çift pah) kaynak ağzı tiplerinde kaynakları yapılan numunelere ait sertlik test numunelerinden alınan mikrosertlik sonuçlarının ortalamaları Şekil 7.4'teki grafikte verilmiştir. Numunelerin kep bölgesinden kök bölgesine doğru sırasıyla 2 mm, 5,3 mm ve 10,6 mm uzaklıklarda olmak üzere, toplam üç farklı sırada X eksenini boyunca 0,5 mm aralıklarla mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, kaynak metalinde kep bölgesinden kök bölgesine doğru Y eksenini boyunca da sertlik ölçümleri yapılmıştır. Tüm sertlik ölçümleri, TS EN ISO 6507-1 standardına uygun olarak HV5 yükleme yöntemiyle ve Emcotest Durascan marka mikrosertlik test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu taramalar sayesinde ana malzeme, ısıdan etkilenen bölge (IEB) ve kaynak metali bölgeleri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir.

Kaynak metali (KM) ve ısıdan etkilenen bölge (IEB) sertlik dağılımları, dört farklı kaynak ağız geometrisi için ayrı ayrı incelenmiştir. Elde edilen ortalama değerler incelendiğinde, ana metal (BM) sertlikleri 456–477 HV aralığında olup, KM'de bu değerler 277,5–303,7 HV aralığına düşmüştür. BM'den KM'ye geçişte en

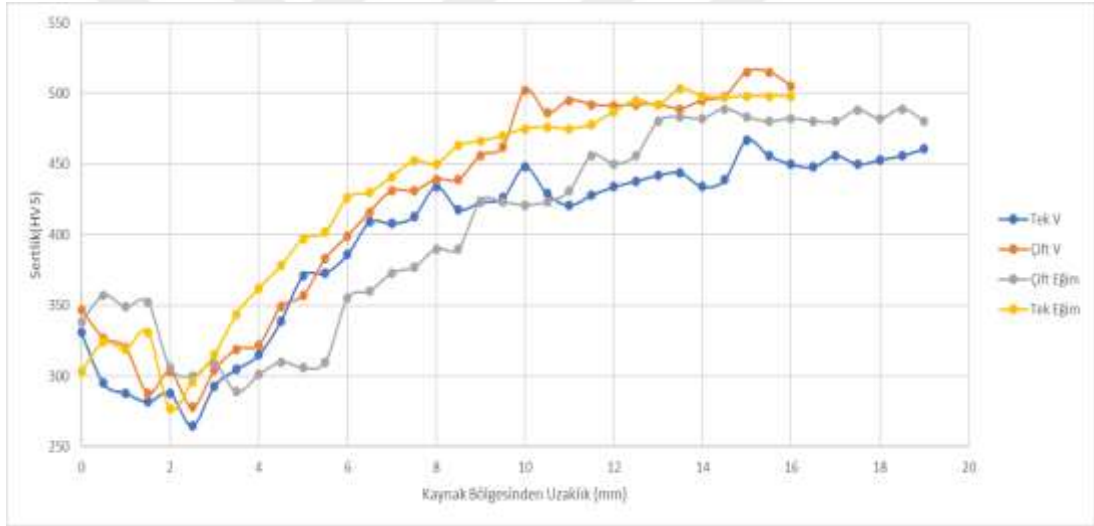
düşük sertlik kaybı Çift V ağız tipi ile elde edilmiş olup, %35,17 yumuşama oranı tespit edilmiştir. Diğer geometrilerde bu oran %38,17–%39,49 aralığında gerçekleşmiştir. IEB bölgesi sertlikleri incelendiğinde, ortalama değerler 290,6–312,8 HV arasında değişmiş, BM'den IEB'a geçişte yumuşama oranı %33,22 ile %39,08 arasında bulunmuştur. IEB yumuşamasında da en düşük oran Çift V ağız tipinde (%33,22) görülmüştür. Genel profil değerlendirmesinde Çift V ağız tipinin hem KM hem de IEB bölgelerinde daha dengeli ve yüksek sertlik seviyeleri sağladığı, Tek V ağız tipinde ise KM'de kök bölgesine doğru belirgin bir yumuşama eğilimi olduğu görülmüştür. Çift Eğim ve Tek Eğim ağız tipleri, sertlik değerleri açısından Çift V'ye kıyasla daha düşük olmakla birlikte, profillerinde aşırı dalgalanma göstermemiştir. Bu sonuçlar, Çift V ağız tipinin yüksek mukavemetli balistik zırh çeliklerinde, KM ve IEB bölgelerinde sertlik kaybını en aza indirdiğini ve dolayısıyla balistik dayanım açısından diğer geometrilere göre daha avantajlı olabileceğini göstermektedir.



Şekil 7.4: Ana Metal, IEB, Kaynak Metali Ortalama Sertlik Karşılaştırması

MIL-STD-1185 standardına göre, kaynaklı birleştirmelerde ergime sınırından itibaren 15,9 mm mesafe içerisinde sertlik değerlerinin ana malzeme sertliğinin altına düşmemesi gerektiğini belirtmektedir. Bu kapsamda kaynak metalinden ana metale doğru gerçekleştirilen sertlik ölçümleri sonucunda elde edilen sertlik dağılım grafiği

Şekil 7.5'te verilmiştir. Sertlik ölçümleri incelendiğinde, Tek Eğim ağız tipinde 450 HV değerine 7,5 mm, Çift V ağız tipinde 9 mm, Çift Eğim ağız tipinde 11,5 mm ve Tek V ağız tipinde 15 mm mesafede ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, tüm kaynak ağız tiplerinin standardın gerekliliklerini sağladığını göstermektedir. Sertlik toparlanma mesafesinin kısa olması, kaynak ısı girdisinin daha düşük olması ve ıstıdan etkilenen bölgenin (IEB) dar kalması ile doğrudan ilişkilidir. Nitekim en kısa toparlanma mesafelerine sahip Tek Eğim ve Çift V ağız tiplerinde, daha düşük ısı girdisi nedeniyle IEB genişliği sınırlı kalmış ve yumuşama bölgesinin etkisi minimize edilmiştir. Buna karşılık Çift Eğim ve Tek V geometrilerinde, nispeten daha yüksek ısı girdisi sonucu IEB genişliği artmış, bu da sertlik toparlanma mesafesinin uzamasına neden olmuştur. Dolayısıyla, balistik dayanımın korunması ve sertlik kaybının minimize edilmesi açısından, düşük ısı girdisi ve dar IEB sağlayan ağız tiplerinin tercih edilmesi önerilmektedir.



Şekil 7.5: Kaynak Bölgesinden Ana Metala Doğru Sertlik Test Sonuçları

7.5 Çekme Testi Sonuçları

Kaynaklı test plakalarından enine yönde ikişer adet çekme test numuneleri hazırlanarak çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testleri sonuçları ise Çizelge 7.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1: Çekme Testi Sonuçları

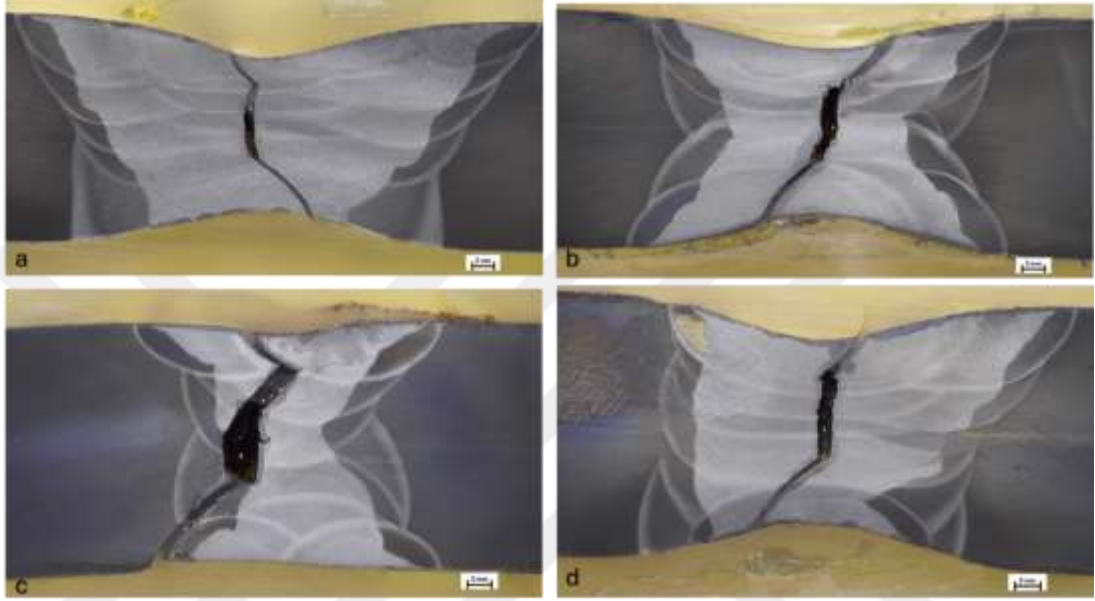
Numune Adı	Akma Dayanımı MPa	Çekme Dayanımı MPa	Uzama %($l_0=40\text{mm}$)
Tek V	746	861	23
	795	870	25
	Ort. 770	Ort. 865	Ort. 24
Çift V	793	933	20
	808	932	17
	Ort. 800	Ort. 932	Ort. 18
Çift eğimli (çift pah)	812	947	7
	800	971	12
	Ort. 806	Ort. 959	Ort. 9
Tek eğimli (tek pah)	772	930	18
	717	844	15
	Ort. 744	Ort. 887	Ort. 16

Kaynaklı test plakalarından alınan numunelere uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen değerler ana malzemenin çekme dayanımı ile karşılaştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, Tek V, Çift V, Çift eğimli ve tek eğimli kaynak geometrisine sahip kaynaklı birleştirmelerde, kaynak bölgesinin çekme dayanımının, ana malzemenin çekme dayanımına oranı sırasıyla %56, %60, %62 ve %57 olarak belirlenmiştir.

Analizler sonucunda elde edilen mekanik özellikler değerlendirildiğinde, çift eğimli (çift pah) kaynak ağzına sahip numunelerin en yüksek çekme dayanımı değerine (959 MPa) ulaştığı görülmüştür. Ancak aynı numunelerde elde edilen uzama oranı diğer geometrilere kıyasla oldukça düşüktür (%9). Bu durum, artan sertlik ve mukavemetin süneklik pahasına elde edildiğini ortaya koymaktadır. Çift V ağız geometrisi, hem yüksek çekme dayanımı (932 MPa) hem de görece daha dengeli bir uzama (%18) sunması nedeniyle mekanik denge açısından uygun bir profil sergilemiştir. Bu kaynak ağzı tipinde, kaynak metalinin dağılımı ve ısı girdisinin homojenliği sayesinde birleşim bölgesinde çatlak başlatıcı bölgelerin minimize edildiği düşünülmektedir. Tek V ağız geometrisinde ise çekme dayanımı 865 MPa ve uzama %24 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler hem mukavemet hem de süneklik açısından optimal dengeyi sunduğundan, özellikle darbe emilimi gibi plastisite gerektiren uygulamalarda tercih edilebilir. Diğer yandan, tek eğimli (tek pah) kaynak ağzına sahip numunelerde çekme dayanımı 887 MPa olup, uzama oranı %16 seviyesinde kalmıştır. Bu değerler, çift eğimli geometriye kıyasla daha sünek bir yapı

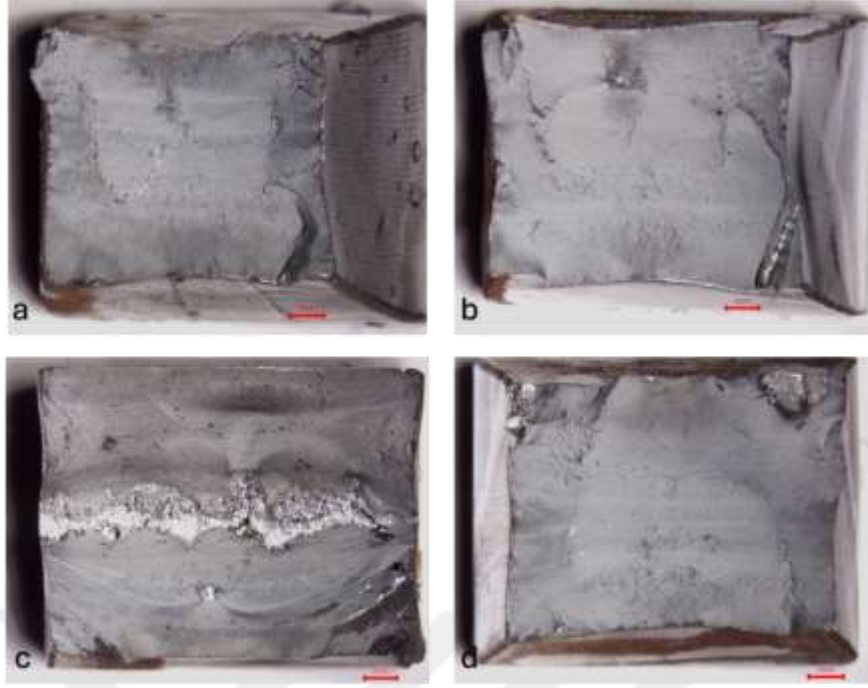
sunmakla birlikte, tam penetrasyonun zor sağlanması sebebiyle bazı noktalarda mekanik süreksizlik riski taşıyabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, kaynak ağzı tipi yalnızca mekanik dayanımı değil, aynı zamanda süneklik ve kaynak bölgesi homojenliğini de doğrudan etkilemektedir. Uygulama amacına göre uygun kaynak ağzı seçimi yapılması, zırh çeliklerinin kaynaklı birleştirmelerinde kritik önem taşımaktadır.



Şekil 7.6: Çekme Testi Sonrası Kırılma Yönü İncelemesi Makro Görüntüleri; a) Tek V b) Çift V c) Tek Pah d) Tek Pah

Çekme testi sonrasında numunelerden alınan kesitler üzerinden kırılma yönleri incelenmiştir. Şekil 7.6 (a–d)'de test sonrası numunelerin makroskobik inceleme görüntüleri sunulmaktadır. Kesit görüntülerinin kaynak bölgeleri incelendiğinde, en homojen uzamanın ve tamamen kaynak hattından kopmanın gözlemlendiği numunenin Tek V kaynak olduğu (%24 uzama) belirlenmiştir. Tek V kaynağını takip eden numune ise %18 uzama ile Çift V kaynak ağzı olup, burada da kopmanın kaynak bölgesinden gerçekleştiği tespit edilmiştir. Tek eğimli kaynakta (%16 uzama) ise homojen bir uzama görülmemekle birlikte kopmanın yine kaynak bölgesinden gerçekleştiği gözlemlenmiştir. En düşük uzama değerine sahip olan çift eğimli kaynakta (%9 uzama) ise kopma, kaynak metalinden başlayarak ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) boyunca ilerlemiş ve burada tamamlanmıştır. Elde edilen bu kırılma ve uzama sonuçlarının birbirleriyle doğru orantılı olduğu görülmüştür.



Şekil 7.7: Çekme Testi Kırık Yüzey İncelemeleri; a) Tek V b) Çift V c) Tek Pah d) Tek Pah

Şekil 7.7’de çekme testi numunelerinin kırık yüzeylerine ait makroskobik görüntüler sunulmuştur. Yapılan değerlendirmede, her bir numunenin hem sünek hem de gevrek kırılma yüzeyi özelliklerini belirgin bir şekilde ortaya koyduğu görülmüştür.

7.6 Çentik Darbe Testi Sonuçları

Çentik darbe testleri için kaynaklı plakalarının ana malzeme, kaynak bölgesi ve IEB bölgelerinden birer set (3’er numune) çentik darbe numuneleri çıkartılmıştır. Çentik darbe testleri -40 °C’de gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları Çizelge ..’da gösterilmiştir.

Çizelge 7.2: Çentik Darbe Test Sonuçları

Çentik Darbe Test Sonuçları (ISO-V / -40°C (J)) Ort.		
Numune Adı	Kaynak Bölgesi	IEB
Tek V	69	136
Çift V	53	46
Çift eğimli (çift pah)	61	126
Tek eğimli (tek pah)	52	145

ISO-V çentik darbe testleri -40 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiş ve kaynak bölgesi ile ısıdan etkilenen bölge (IEB) için ortalama tokluk değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler incelendiğinde;

Kaynak bölgesi açısından en yüksek tokluk değeri Tek V kaynak ağız geometrisinde 69 J olarak ölçülmüştür. Bunu Çift eğimli (çift pah) numune 61 J ile takip etmektedir. Çift V (53 J) ve Tek eğimli (tek pah) (52 J) numuneler ise benzer düzeyde ve nispeten daha düşük tokluk sergilemiştir.

IEB bölgesinde ise en yüksek tokluk değeri Tek eğimli (tek pah) numunede 145 J, en düşük değer ise Çift V numunede 46 J olarak tespit edilmiştir. Tek V ve Çift eğimli (çift pah) numunelerde sırasıyla 136 J ve 126 J değerleri elde edilmiştir.

Genel olarak IEB bölgesindeki tokluk değerlerinin, kaynak bölgesine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, kaynak bölgesinde ergime ve katılaşma sırasında oluşan mikroyapısal dönüşümlerin tokluğu düşürmesiyle açıklanabilir.

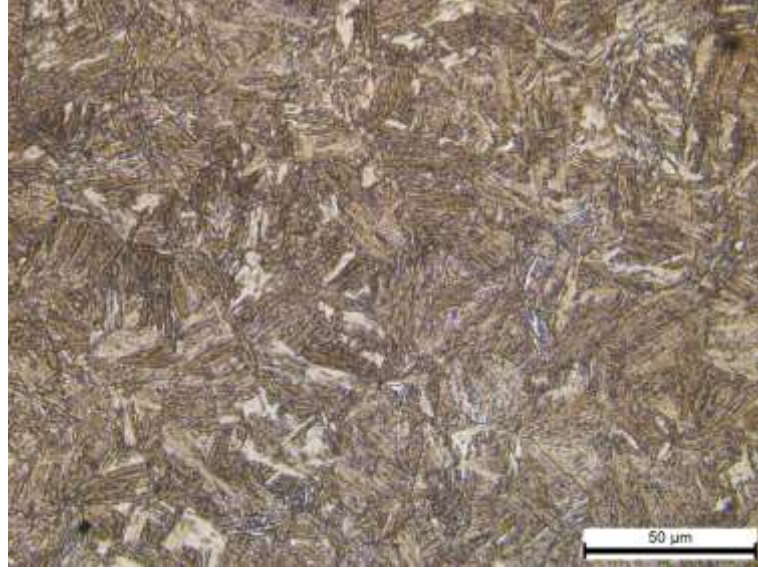
Özellikle Çift V geometrisinde IEB tokluğunun belirgin biçimde düşük olması (46 J), bu bölgede oluşan olası tane büyümesi, gevrek faz oluşumu veya kaynak parametrelerine bağlı olarak ortaya çıkan olumsuz ısıl çevrim etkilerini işaret etmektedir.

Buna karşılık, Tek eğimli (tek pah) geometrisinde IEB tokluğunun oldukça yüksek olması (145 J), bu tasarımın daha homojen ısıl dağılım sağlaması ve IEB'da daha tok bir yapı oluşmasına katkıda bulunmuş olabileceğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak, tokluk açısından optimum denge sağlayan tasarımın kaynak bölgesinde Tek V, IEB bölgesinde ise Tek eğimli (tek pah) olduğu söylenebilir. Ancak nihai seçim, mukavemet, sertlik ve balistik performans gibi diğer mekanik gereksinimlerin de birlikte değerlendirilmesiyle yapılmalıdır.

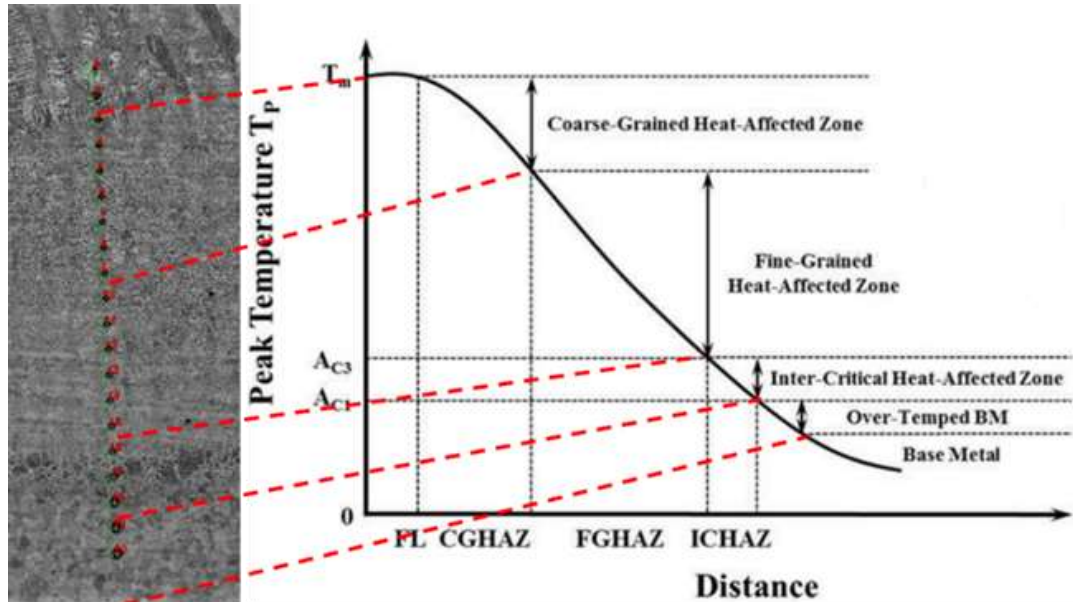
7.7 Mikroyapı İnceleme

Miilux tarafından üretilen M450 serisi zırh çeliğinin 50X büyütmede görüntülenen mikroyapısı Şekil 7.8'de gösterilmektedir. Yapı ağırlıklı olarak martenzitten oluşmakta olup, bu faz çeliğe yüksek mukavemet kazandırmaktadır [61].



Şekil 7.8: M450 Ana Metal Mikroyapı Görüntüleri

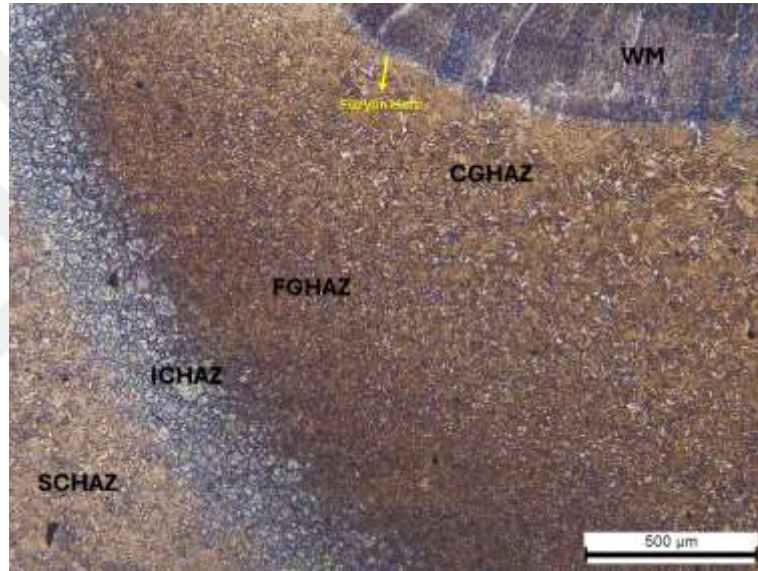
Kaynaklı plakalarda kaynak metali, iri taneli bölge, ince taneli bölge gibi her bölgeye karşılık gelen pik sıcaklıklar ve soğuma hızları, ısı girdisi ve plaka kalınlığı ile doğrudan bağlantılıdır. Isı girdisi farklılaştıkça birim zamanda soğuma hızı ve ısı da değişmektedir. Bu kapsamda mikrosertlik değerleri de mikroyapısal değişikliklere bağlı olarak değişmektedir. IEB boyunca mesafe üzerinden pik sıcaklık değişiminin mikrosertlik noktaları ve şematik gösterimi Şekil 7.9'da verilmiştir.



Şekil 7.9: IEB Boyunca Mesafe Üzerinden Pik Sıcaklık Değişiminin Mikrosertlik Noktaları ve Şematik Gösterimi

Kaynak: (Çoban ve diğ., 2021)

Isıl çevrimlerin farklılığı sonucunda oluşan tüm bölgelerin mikroyapısı Şekil 7.10'da verilmiştir. Farklı ısıl çevrimler sonucunda kaynak metalinden ya da bir diğer tabirle füzyon hattından itibaren sırasıyla CGHAZ, FGHAZ, ICHAZ ve SCHAZ bölgeleri oluşmuştur. Füzyon hattı sınırında yüksek sıcaklıklardan soğuma sonucunda iri taneli bölge (CGHAZ) oluşmuştur. A3 hattının biraz üstüne denk gelen sıcaklıklardan hızlı soğuma sonucunda ince taneli bölge (FGHAZ) oluşmuştur. A3 ile A1 hattı arasına denk gelen sıcaklıklarda ise kısmi dönüşümlerin gerçekleştiği ve en düşük sertlik değerlerinin olduğu ICHAZ bölgesi oluşmuştur. A1 hattının altına denk gelen bölgelerde ise faz dönüşümü gerçekleşmezken temperleme etkisi gerçekleşmektedir ve SCHAZ olarak isimlendirilmektedir [48].

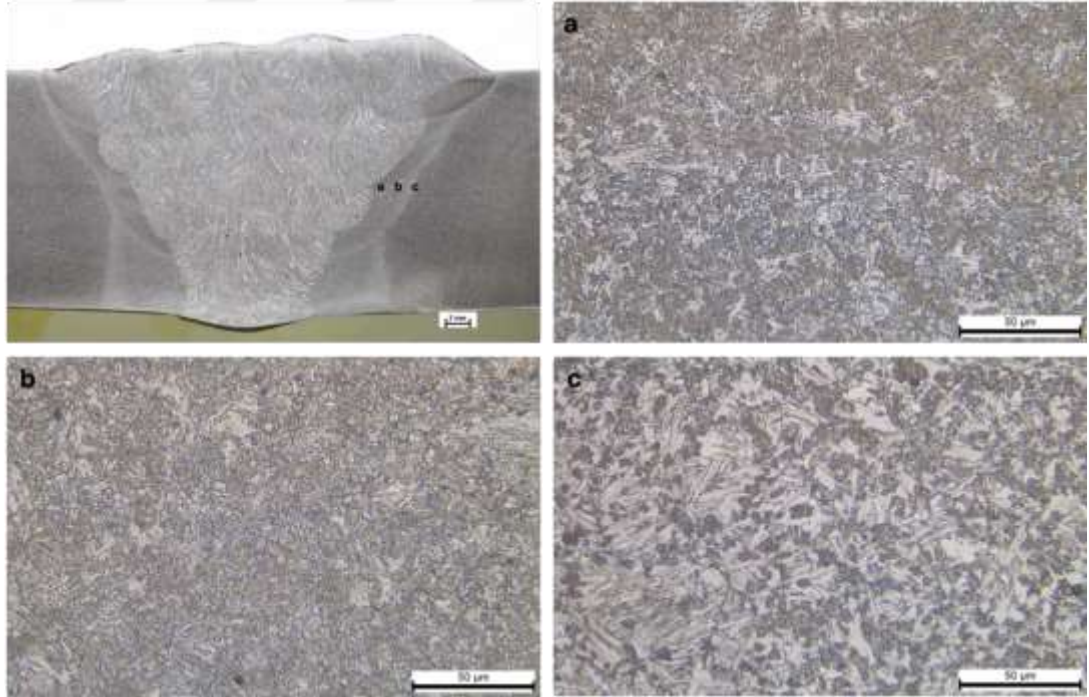


Şekil 7.10: IEB Mikroyapı Görüntüsü

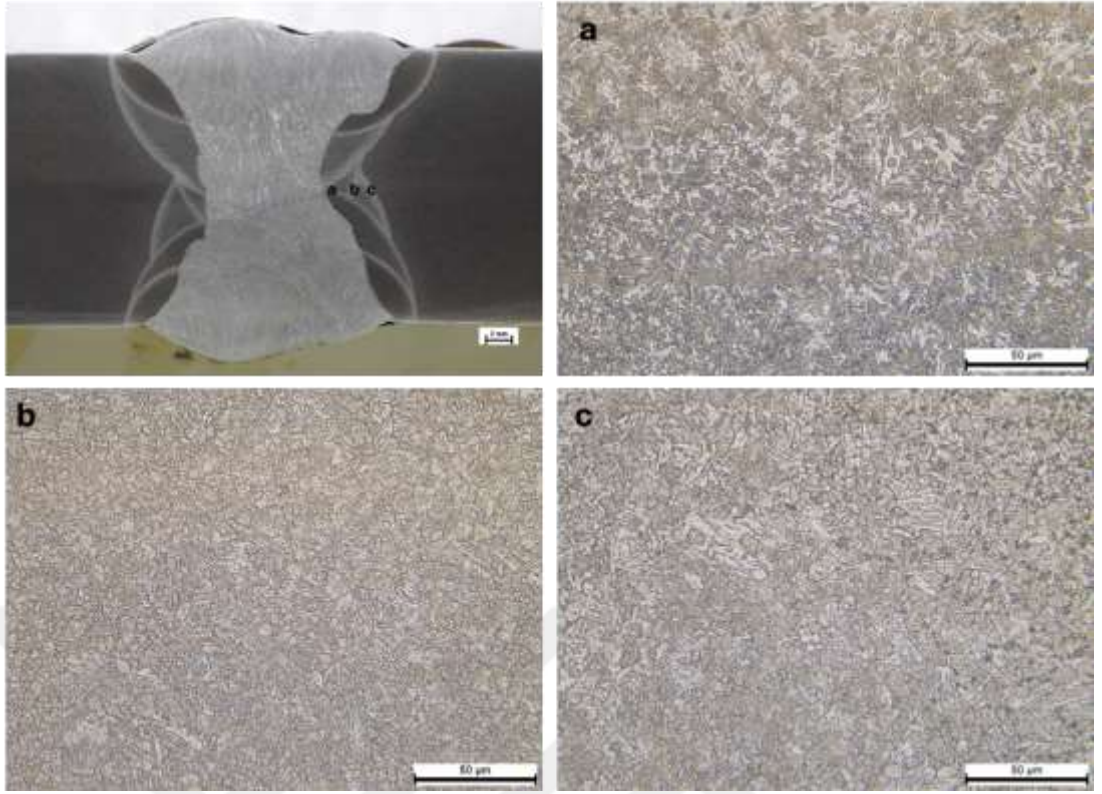
Kaynaklı plakaların IEB bölgelerinin mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Şekil 7.11-Şekil 7.14 arasında her bir bölgenin detaylı mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Kaynak ağzı tasarımının etkileri genel anlamda kaynak plakasının ortası üzerinden değerlendirilmiştir.

Şekil 7.11'de tek taraflı V kaynak ağzı tasarımı ile gerçekleştirilen kaynaklı yapı orta bölge IEB mikroyapıları verilmiştir. İri taneli bölgede iğnesel martenzit yapısı tespit edilmemiştir. Bu yapı özellikle aşırı sertlik artışı ve gevrekleşmeye sebep olabilmektedir. Çok pasolu işlemlerde termal çevrim etkisiyle oldukça ince taneli temperlenmiş martenzit ve beynit fazları görülebilmektedir. Şekil 7.11a'da CGHAZ'da temperlenmiş martenzit ve artık östenit (beyaz) görülürken FGHAZ'da temperlenmiş martenzit, artık östenit ve beynit fazları tespit edilmiştir. Uygun ısı

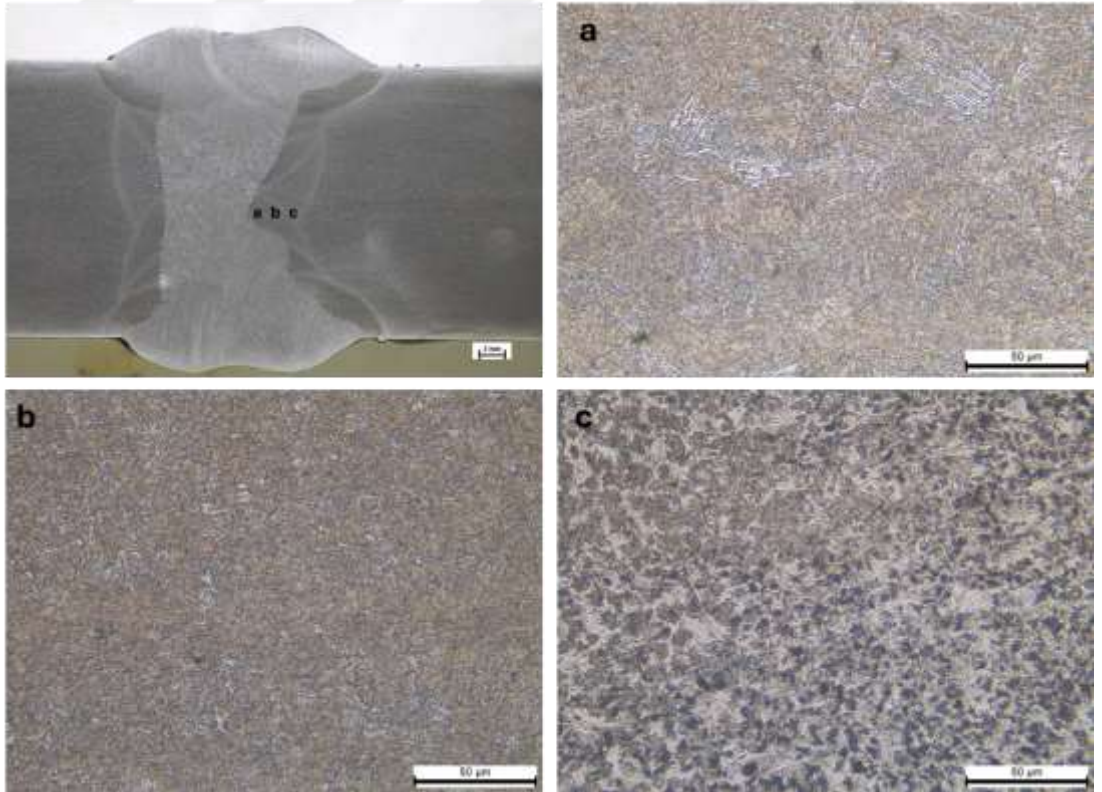
girdisiyle kaynak işlemlerinin gerçekleştirildiği değerlendirilmiştir. Burada kritik bölge sertliklerin düştüğü ICHAZ'dır. Martenzitik matriste koyu renkte görülen Martenzit-Östenit yapısı (Martensite-Austenite Constituents, M-A) tespit edilmiştir. Kısmi dönüşüm gerçekleşmesi nedeniyle martenzitik yapının belli ölçüde östenite dönüşümü sonucu oluşur ve matristen karbon difüzyonu nedeniyle matris sertliğinin önemli ölçüde düşüşüne sebep olur [44]. Bu fazların yüksek ısı girdisinde irileştiği ve bu durumda sertliklerin daha fazla düştüğü Gürol ve diğ. Tarafından raporlanmıştır [44]. Tek taraflı V kaynak ağzı tasarımında orta hat ICHAZ bölgesinde en iri morfolojiye sahip M-A fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 7.4'te verilen sertlik testi sonuçlarına göre minimum sertliğin oluştuğu bu bölgede en düşük sertlik değerleri de aynı kaynak ağzı tasarımında elde edilmiştir. En ince morfolojiye sahip M-A fazının ise çift V kaynak ağzı tasarımında (Şekil 7.12c) elde edildiği ve sertliğin de en yüksek bu kaynak ağzı tasarımında elde edildiği de görülmüştür. Diğer bölgeler yaklaşık olarak benzer mikroyapılara sahip olup füzyon hattına oldukça yakın olması sebebiyle çok çevrimli ısıya maruz kalmasından dolayı mikroyapı görüntülerinin alındığı bölgeye göre değişkenlik göstermekte olup kıyaslanmanın çok doğru olmayacağı değerlendirilmiştir.



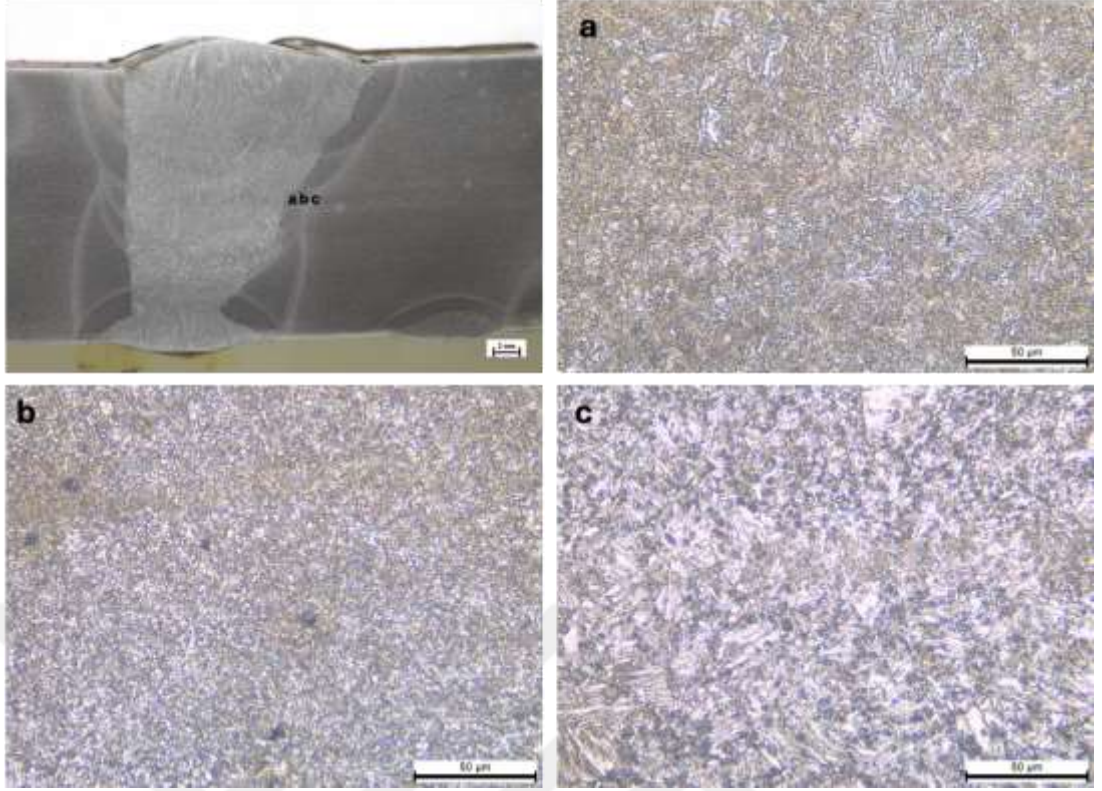
Şekil 7.11: Tek V IEB Mikroyapı Görüntüsü; a) CGHAZ, b) FGHAZ, c) ICHAZ



Şekil 7.12: Çift V IEB Mikroyapı Görüntüsü; a) CGHAZ, b) FGHAZ, c) ICHAZ

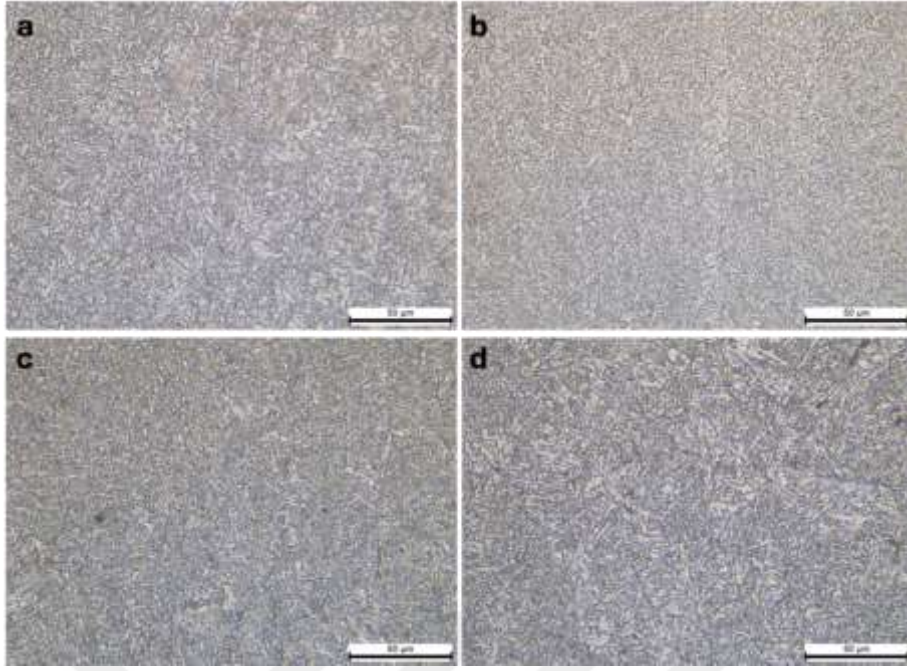


Şekil 7.13: Çift Pah IEB Mikroyapı Görüntüsü; a) CGHAZ, b) FGHAZ, c) ICHAZ



Şekil 7.14: Tek Pah IEB Mikroyapı Görüntüsü; a) CGHAZ, b) FGHAZ, c) ICHAZ

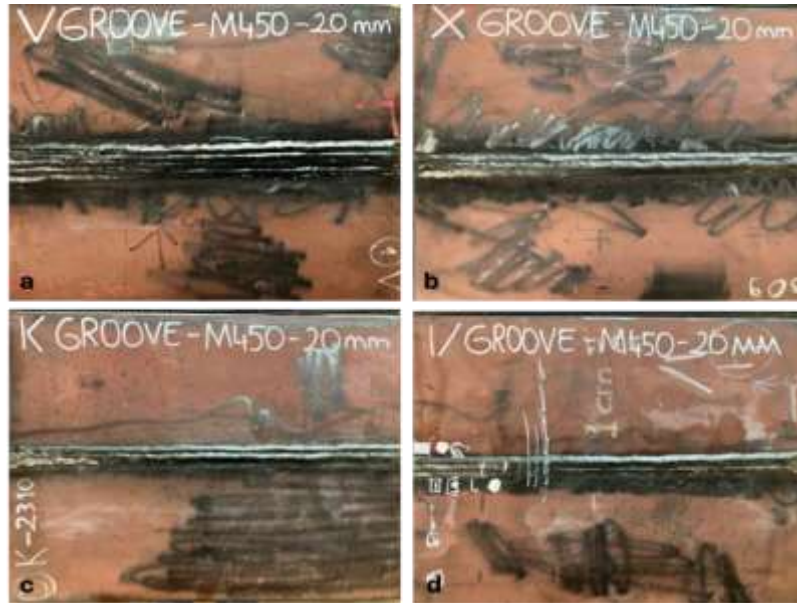
Tüm plakaların kaynak metallerinin mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Mikroyapı görüntüleri Şekil 7.15'te sunulmuştur. Tüm kaynak ağzı tasarımları için yapı genel anlamda oldukça ince taneli asiküler ferrit (AF) ve poligon ferrit (PF)'ten oluşmaktadır. AF'in PF'ye göre daha yüksek sertlik sağladığı iyi bilinen bir fenomendir [48]. Şekil 7.15b, c'den görüleceği üzere çift V ve çift pah kaynak ağzı tasarımında en ince taneli AF ve en düşük miktarda PF elde edildiği görülmüştür. Şekil 7.4'te verilen ortalama sertlik sonuçlarında kaynak metali sertliklerinde yine bu iki kaynak ağzı tasarımında en yüksek sertliklerin elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tüm kaynak ağzı tasarımları için kaynak metali bölgesinde tokluğu çok fazla düşürücü etki yapan Witmanstataen ferrit (WF) tespit edilmemiştir. Özellikle yüksek ısı girdisi ve aşırı hızlı soğuma sonucu bu faz oluşmaktadır. Kaynakların uygun ısı girdisi ile gerçekleştirildiği değerlendirilmiştir.



Şekil 7.15: Kaynak Metali Mikroyapı Görüntüsü; a) Tek V, b) Çift V, c) Çift Pah, d) Tek Pah

7.8 Balistik Test Sonuçları

Mekanik ve metalografik test numunelerinin çıkarılmasının ardından, kalan parçalar balistik test uygulamaları için hazırlanmıştır. Balistik test öncesi kaynak plakalarının genel görüntüsü Şekil 7.16’da verilmiştir.



Şekil 7.16: Balistik Test Öncesi Plakalar

Balistik testler, Avrupa Birliği tarafından yayımlanan EN 1522 standardı kapsamında, FB7 koruma seviyesi kriterlerine göre gerçekleştirilmiştir. Her bir

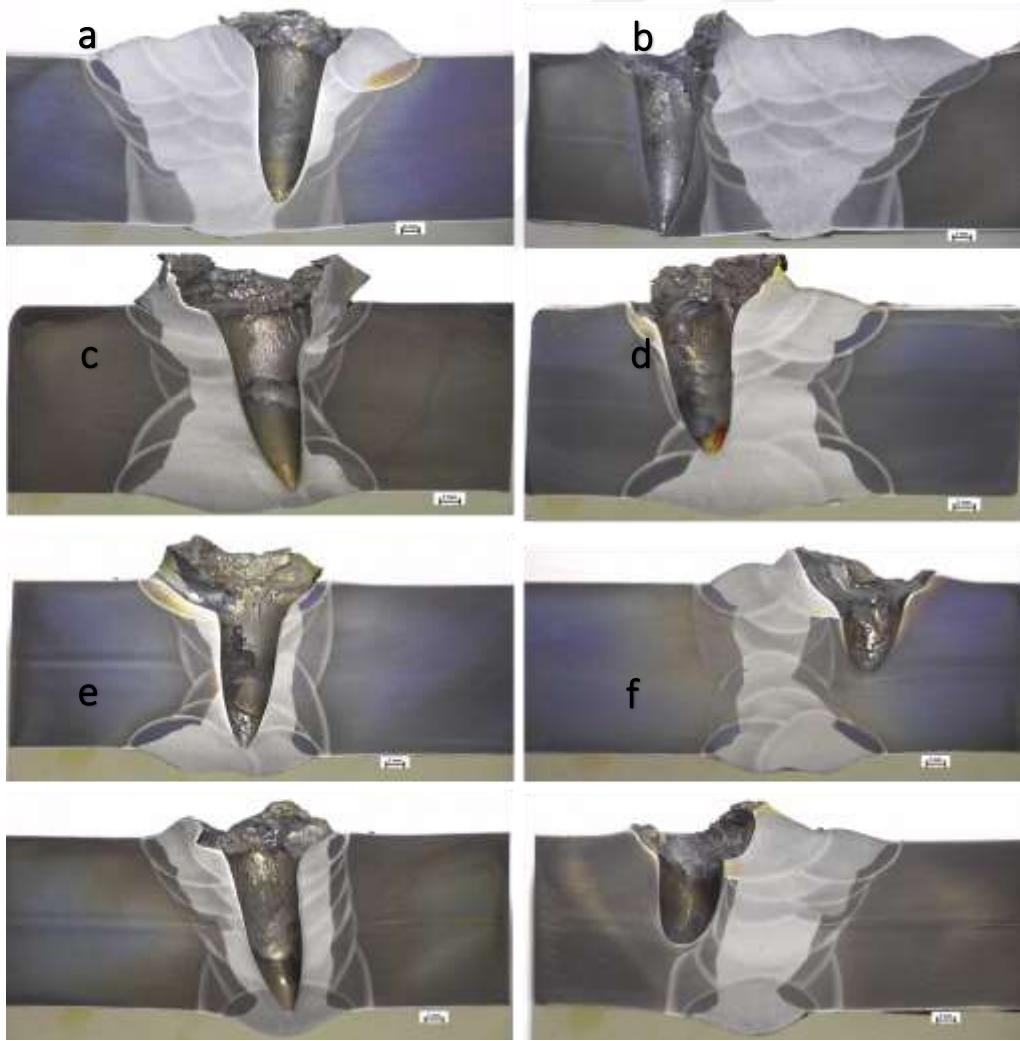
kaynaklı plakaya, ikisi IEB, ikisi de kaynak metali bölgesi olmak üzere toplam dört balistik atış yapılmıştır. Testlerde 7.62x51 mm M61 AP tipi mühimmat kullanılmıştır ve atışlar hedef yüzeyine 0° çarpma açısıyla gerçekleştirilmiştir. Balistik test uygulanan bölgelerdeki delinme durumu, meydana gelen bölgesel deformasyon (PP) ve tam(komple) deformasyon (CP) oluşumuna bağlı olarak değerlendirilmiştir. Tüm atışlar sonucunda, kaynaklı plakalarda hem kaynak hem de IEB bölgelerinde sadece bölgesel deformasyon (PP) olduğu ve herhangi bir tam deformasyonun gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Bu da seçilen kaynak telinin ve uygulanan kaynak parametrelerinin zırh çeliklerinin kaynak işlemlerinde optimişze edilmiş değerler olduğunu doğrulamaktadır. Fakat, IEB bölgelerindeki farklı penetrasyon derinliklerinin sertlik sonuçlarıyla doğru orantılı olarak yumuşama bölgesinin genişliğini ile ilişkili olduğunu vurgulamakta önem arz etmektedir. Sonuçlardan görüleceği üzere en fazla IEB penetrasyonu yine en fazla yumuşama bölgesi olan V kaynaklı plakada gözlemlenmiştir. Balistik test sonrası plakaların görüntüleri Şekil 7.17’de, mermilerin giriş bölgelerinin görüntüsü Şekil 7.18’de gösterilmiştir.



Şekil 7.17: Balistik Test Sonrası Plakalar

Balistik testler sonrasında oluşan hasarların detaylı şekilde incelenebilmesi amacıyla, kaynak dikişi ve IEB bölgelerinden kesitler alınarak metalografik hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu bölgelere ait makro görüntüler sırasıyla Şekil 18 (a-h)’de sunulmaktadır. Makro görüntüler üzerinden yapılan incelemelerde,

mermi giriş krateri ve nüfuziyet derinliğinin kaynak ağız geometrisine bağlı olarak farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Tek Eğim ve Çift V ağız tiplerinde mermi giriş derinliği diğer geometrilere kıyasla daha sınırlı kalmış, bu durum sertlik profilinde gözlemlenen daha dar yumuşama bölgesi ve kısa sertlik toparlanma mesafesi ile uyumlu bulunmuştur. Buna karşılık Çift Eğim ve özellikle Tek V geometrilerinde, ısı girdisinin daha yüksek olması sonucu IEB bölgesinde geniş bir yumuşama alanı oluşmuş, bu da mermi nüfuziyetinin daha derin olmasına neden olmuştur. Hasar konturlarının incelenmesi, dar yumuşama bölgesine sahip kaynaklarda çatlak ilerlemesinin daha sınırlı olduğunu, buna karşılık geniş IEB bölgelerinde malzeme direncinin düştüğünü ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, düşük ısı girdisi ile dar IEB sağlayan ağız tipleri, balistik dayanım açısından daha avantajlı performans sergilemektedir.



Şekil 7.18: Balistik Test Sonrası Kaynak ve IEB Bölgeleri Makro Kesit Görüntüsü; a) Tek V Kaynak, b) Tek V IEB, c) Çift V Kaynak, d) Çift V IEB, e) Çift Pah Kaynak, f) Çift Pah IEB, g) Tek Pah Kaynak, h) Tek Pah IEB

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Tahribatsız muayene sonuçlarına göre, ulusal ve uluslararası standartlarda belirtilen limit değerleri aşan herhangi bir süreksizlik tespit edilmemiş, dolayısıyla kaynaklı plakanın yapısal bütünlüğünün korunduğu belirlenmiştir.

Makro testler TS EN ISO 17639 standardına göre gerçekleştirilen makro incelemede ise herhangi bir süreksizlik tespit edilmemiş, kaynaklı birleştirmelerin yapısal bütünlüğünün korunduğu belirlenmiştir.

Çekme testi sonuçları, dört farklı kaynak ağız geometrisi arasında en yüksek çekme dayanımının çift eğimli (959 MPa) numunelerde elde edildiğini, ancak bu geometrinin düşük süneklik (%9) gösterdiğini ortaya koymuştur. Mekanik denge açısından ise çift V ağız geometrisi, yüksek çekme dayanımı (932 MPa) ve görece dengeli uzama oranı (%18) ile en uygun profil olarak belirlenmiştir.

"-40 °C'de yapılan ISO-V çentik darbe testleri, tüm kaynak geometrilerinde IEB bölgesinin, kaynak bölgesine kıyasla daha yüksek tokluk değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Kaynak bölgesinde en yüksek tokluk Tek V geometrisinde (69 J), IEB'da ise Tek eğimli (tek pah) geometrisinde (145 J) elde edilmiştir. Çift V geometrisinde IEB tokluğunun belirgin biçimde düşük olması, ısıl çevrimden kaynaklı olumsuz mikroyapısal dönüşümlere işaret etmektedir.

Sertlik ölçümleri, MIL-STD-1185 standardı gereği ergime sınırından itibaren 15,9 mm mesafeye kadar olan bölgede sertlik değerlerinin ana malzeme sertliği olan 450 HV'nin altına düşmemesi gerektiğini ortaya koymuştur. Çift V ve tek eğimli geometrilerde bu eşik değere sırasıyla 9 mm ve 8 mm mesafede ulaşılmış, böylece IEB yumuşama genişlikleri dar kalmıştır. Tek V geometrisinde 450 HV değerine 11,5 mm'de, çift eğimli geometrilerde ise 13 mm'de ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, düşük ısı girdisi ve dar IEB sağlayan geometrilerin sertlik toparlanmasını hızlandırarak balistik performansa doğrudan katkı sunduğunu göstermektedir.

Balistik testler sonrasında yapılan makro kesit incelemeleri, mermi giriş mesafesi ve nüfuziyet derinliğinin kaynak ağız geometrisine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Çift V ve tek eğimli (tek pah) geometriler, daha kısa mermi giriş mesafesi ve dar nüfuziyet profili ile yüksek balistik dayanım göstermiştir. Bu performans, hem kaynak bölgesinde homojen mikroyapı oluşumu hem de daha kontrollü ısı girdisi sayesinde IEB bölgesinde çatlak ilerlemesini sınırlandırmasıyla ilişkilendirilmektedir. Tek V ve çift eğimli (çift pah) geometrilerde ise daha geniş nüfuziyet alanı ve çatlak ilerleme eğilimi gözlenmiş, bu durumun kaynak bölgesinde lokal zayıflıklar ve düzensiz sertlik dağılımı ile ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.

8.2 Öneriler

Bu çalışmada kullanılan kaynak ağız geometrileri belirli bir ısı girdisi aralığında değerlendirilmiştir. Farklı ısı girdisi seviyeleri, özellikle yüksek ısı girdisi altında ITAB'da ortaya çıkacak mikroyapısal değişimlerin davranışını incelemek amacıyla araştırılabilir.

Çift eğimli geometri en yüksek çekme dayanımını göstermesine rağmen süneklik açısından sınırlayıcı bulunmuştur. Bu geometrinin sünekliğinin iyileştirilmesi amacıyla farklı ön ısıtma ve çok geçişli kaynak teknikleriyle ilave çalışmalar yapılabilir.

IEB bölgesinde en yüksek tokluğun tek eğimli geometride elde edilmesi, bu tasarımın balistik açıdan avantajlı olduğunu göstermiştir. İlerleyen çalışmalarda, tek eğimli yapıların balistik performansı farklı mühimmat tipleri (ör. zırh delici, kinetik darbe) ile detaylandırılarak genişletilebilir.

Sertlik ölçümlerinde kritik eşik değerlere ulaşma mesafesinin dar olması, balistik dayanım açısından avantaj yaratmıştır. Bu nedenle, dar ITAB sağlayan parametre kombinasyonları (ör. farklı kaynak hızları, kontrollü soğutma rejimleri) optimizasyon çalışmalarıyla ele alınabilir.

Balistik testlerde penetrasyon davranışının kaynak geometrisiyle ilişkili olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak mermi-hedef etkileşimini sayısal modellemeye dayalı olarak doğrulayan simülasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir.

Farklı dolgu metalleri (ör. östenitik veya martenzitik alaşımlar) ile aynı kaynak geometrilerinin tekrarlanarak, kaynak metali kimyasının mekanik ve balistik davranış üzerindeki etkisi araştırılabilir.

Bu çalışma tek taraflı balistik darbeler altında gerçekleştirilmiştir. Çoklu darbe veya farklı açılardan gelen tehditler altında kaynak bölgelerinin davranışını değerlendirmek için çoklu balistik test protokolleri uygulanabilir.

Ayrıca, farklı kaynak ağzı geometrilerinde sandviç kaynak yönteminin uygulanmasıyla zırh çeliği birleştirmelerinde balistik dayanımın artırılıp artırılamayacağı araştırılabilir. Bu yöntemin, kaynak bölgesinde gerilme dağılımını iyileştirme ve mikroyapısal süreksizlikleri azaltma potansiyeli, ileri çalışmalar kapsamında detaylı olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKÇA

- [1] 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, Art. no. 104305, doi:10.1016/j.euromechsol.2021.104305.
- [2] Y. A. Fageehi, R. Saminathan, G. Venugopal, J. Valder, H. Kumar, and K. S. Ravishankar, Effect of thermal and surface chemical treatment on the cyclic oxidation behavior of 7039 aluminum alloy used in aerospace armor applications, *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, pt. 2, 2021, pp. 343–349, doi:10.1016/j.matpr.2020.09.547.
- [3] M. Mehara, C. Goswami, S. R. Kumar, G. Singh, and M. K. Wagdre, Performance evaluation of advanced armor materials, *Materials Today: Proceedings*, 2021, doi:10.1016/j.matpr.2021.04.611.
- [4] S. Nagireddi, B. Majumdar, S. Bonta, et al., High-density bulk metallic glasses and their composites for kinetic energy penetrator applications: Process, structure and properties, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2021, doi:10.1007/s12666-021-02309-3.
- [5] M. Übeyli, R. O. Yildirim, and B. Ögel, On the comparison of the ballistic performance of steel and laminated composite armors, *Materials and Design*, vol. 28, no. 4, 2007, doi:10.1016/j.matdes.2005.12.005.
- [6] L. Kuzmikova, An investigation of the weldability of high hardness armor steel, Ph.D. dissertation, University of Wollongong, Wollongong, Australia, 2013.
- [7] 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.
- [8] A. Cabrilo, K. Geric, O. Klisuric, and M. Cvetinov, Toughness behaviour in armour steel welds, *Tehnički vjesnik*, vol. 25, no. 6, 2018, pp. 1699–1707, doi:10.17559/TV-20170722201539.
- [9] A. Saxena, A. Kumaraswamy, G. M. Reddy, and V. Madhu, Influence of welding consumables on tensile and impact properties of multi-pass SMAW Armox 500T steel joints vis-a-vis base metal, *Defence Technology*, vol. 14, no. 3, 2018, doi:10.1016/j.dt.2018.01.005.
- [10] D. Akbari, M. Farahani, and N. Soltani, Effects of the weld groove shape and geometry on residual stresses in dissimilar butt-welded pipes, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 47, 2012, pp. 73–82.
- [11] G. Haragopal, P. V. R. Ravindra Reddy, G. C. M. Reddy, and J. V. Subrahmanyam, Parameter design for MIG welding of Al-65032 alloy using

- Taguchi technique, *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 70, no. 10, 2011, pp. 844–850.
- [12] P. K. Jena, S. K. Kumar, R. V. Krishna, A. K. Singh, and B. T. Bhat, Studies on the role of microstructure on performance of a high strength armour steel, *Engineering Failure Analysis*, vol. 15, 2008, pp. 1088–1096.
- [13] N. E. İpek and F. Elaldı, Analysis of welding groove angle and geometry on strength of armor steel, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 12, 2012, pp. 1437–1441, doi:10.1080/10426914.2012.709343.
- [14] N. Sankar, S. Malarvizhi, V. Balasubramanian, A. H. Rahman, and V. Balaguru, Effect of rotating arc (spin arc) on mechanical properties and microstructural characteristics of gas metal arc welded armour steel joints, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 75, no. 12, 2022, pp. 3047–3059, doi:10.1007/s12666-022-02679-2.
- [15] E. Camcı, Metal esaslı sandviç kompozitlerin balistik performansının incelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 8, no. 2, 2020, pp. 1454–1469, doi:10.29130/dubited.619423.
- [17] S. Kara and M. H. Korkut, Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan zırh plakalarında kaynak sonrası ısıl işlemin birleşim mukavemetine etkisinin araştırılması, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 2012, doi:10.17134/sbd.44699.
- [18] H. Ş. Soykan, Z. Aslanoğlu, and Y. Karakaş, Zırh çeliklerinin metalurjisi, *Makina Mühendisleri Odası*, no. 427, 2005, pp. 838–869.
- [19] 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.
- [20] H. H. Kolla, B. Mishra, P. K. Jena, K. S. Kumar, T. B. Bhat, M. Srinivas, and A. V. Reddy, Development of an ultrahigh strength low alloy steel for armour applications, *Materials Science and Technology*, vol. 27, no. 2, 2011, doi:10.1179/026708309X12560332736476.
- [21] İ. S. Gülgen, İş makineleri tırnakları üretiminde kullanılan az alaşımlı çeliklerin ısıl işlemi, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2008.
- [22] S. Pashangeh, H. Zarchi, S. S. Banadkouki, and M. Somani, Detection and estimation of retained austenite in a high strength Si-bearing bainite-martensite-retained austenite micro-composite steel after quenching and bainitic holding (Q&B), *Metals*, vol. 9, 2019, Art. no. 492, doi:10.3390/met9050492.
- [23] S. J. Cimpoeu, The mechanical metallurgy of armour steels, Land Division Defence Science and Technology Group, Australia, 2016.
- [24] MIL-DTL-46100E, Detail specification: Armor plate, steel, wrought, high-hardness, 2019.
- [25] Ş. Karagöz and H. Atapek, Bor katkılı zırh çeliklerinin kırılma davranışı, *Uluslararası Kırılma Konferansı*, 2007, pp. 186–196.

- [26] 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.
- [27] G. Çam, Kaynak bilimi ve teknolojisi, Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 2020.
- [28] Y. S. Tama, Çelik yapı uygulamalarında kullanılan kaynak yöntemleri, üstünlükleri ve sakıncalı yönleri, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2009, pp. 1–3.
- [29] N. Kaya, AISI 304 paslanmaz çelik ile genel yapı çeliğinin sürtünme kaynak kabiliyetinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [30] S. S. Yılmaz, B. S. Ünlü, M. Uzkut, and D. Ertürk, Alüminyum alaşımlarında sürtünme karıştırma kaynağı ve uygulamaları, Mühendis ve Makina, vol. 57, no. 676, 2016, pp. 56–63.
- [31] M. Vural, F. Piroğlu, Ö. B. Çağlayan, and E. Uzgider, Yapı çeliklerinin kaynaklanabilirliği, TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri, no. 426, 2003/4.
- [32] D. Janicki, Disk laser welding of armor steel / Spawanie laserem dyskowym stali pancernej, Archives of Metallurgy and Materials, vol. 59, no. 4, 2014, pp. 1641–1646, doi:10.2478/amm-2014-0279.
- [33] 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.
- [34] O. Slyvinsky, Y. Chvertko, and S. Bisyyk, 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.
- [35] S. J. Alkemade, The weld cracking susceptibility of high hardness armour steel, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Australia, 1996.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] M. Alhassan and Y. Bashiru, Carbon equivalent fundamentals in evaluating the weldability of microalloy and low alloy steels, World Journal of Engineering and Technology, vol. 9, no. 4, 2021, pp. 782–792.
- [39] E. Sozen, G. Gunduz, and E. Imren, Balistik panel ve koruyucu zırh üretiminde kullanılan lif ve kompozit malzemeler, Bartın Orman Fakültesi Dergisi, vol. 18, no. 2, 2016, doi:10.24011/barofd.267304.

- [40] O. Özgüder, M. Özbay, and H. Adin, Namlu içi balistik davranışın sonlu elemanlar yöntemiyle analizi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, vol. 8, no. 3, 2017, pp. 609–620.
- [41] D. E. Carlucci and S. S. Jacobson, Ballistics: theory and design of guns and ammunition, CRC Press, 2018.
- [42] İ. Özer, M. G. Atahan, and A. Yapıcı, Balistik çarpma etkisinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi, Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 1, no. 3, 2013, pp. 21–30.
- [43] EN 1522:1998, Windows, doors, shutters and blinds — Bullet resistance — Requirements and classification, European Committee for Standardization, 1998.
- [44] 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, pp. 757–770.
- [45] Sabramani, S. Naveen Kumar, V. Balasubramanian, S. Malarvizhi, et al., Influence of welding consumables on ballistic performance of gas metal arc welded ultra-high hard armor steel joints, 2021, vol. 10, no. 1, pp. 443–462, doi:10.1520/MPC20200150.
- [46] A. Saxena, A. Kumaraswamy, G. M. Reddy, and V. Madhu, Influence of welding consumables on tensile and impact properties of multi-pass SMAW Armox 500T steel joints vis-a-vis base metal, Defence Technology, vol. 14, 2018, pp. 188–195.
- [47] E. Souza, R. Weber, S. Monteiro, and S. Oliveira, Microstructure effect of heat input on ballistic performance of welded high strength armor steel, Materials, vol. 14, 2021, doi:10.3390/ma14195789.
- [48] 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.
- [49] A. Günen, S. Bayar, and M. S. Karakaş, Effect of different arc welding processes on the metallurgical and mechanical properties of Ramor 500 armor steel, Journal of Engineering Materials and Technology, vol. 142, 2020, pp. 1–23, doi:10.1115/1.4045569.
- [50] E. Kostak, MIL DTL 46100 sınıfı zırh çeliklerinin farklı dolgu malzemeleri kullanılarak yapılan kaynak işleminde ön ısıtma gerekliliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2021.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] S. Sankar, G. M. Reddy, and K. P. Rao, Effect of multipass welding on ballistic performance of armor grade steel welds, Defence Technology, vol. 18, no. 1, 2022, pp. 80–89, doi:10.1016/j.dt.2021.03.008.

- [54] E. Kurt, Farklı kaynak ağız açılarına sahip zırh çeliğinin MIG kaynak performansının değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2015.
- [55] A. Özdemir, Zırh çeliklerinde dolgu metali ve kaynak geometrisinin balistik performansa etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2020.
- [56] M. İpek and H. Elaldı, Zırh çeliğinde kaynak dikiş geometrisinin çekme ve basma dayanımına etkisi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, vol. 27, no. 2, 2012, pp. 231–239.
- [57] J. Kim and D. Yi, A study on the mechanical properties and ballistic performance of narrow gap welded armor steel, Journal of Welding and Joining, vol. 35, no. 4, 2017, pp. 36–42.
- [58] E. Göde, A. Teoman, B. Çetin, K. Tonbul, K. Davut, and M. C. Kuşhan, An experimental study on the ballistic performance of ultra-high hardness armor steel (Armox 600T) against 7.62 mm × 51 M61 AP projectile in the multi-hit condition, Engineering Science and Technology, an International Journal, vol. 38, 2023, doi:10.1016/j.jestch.2023.101337.
- [59] B. Savic and A. Cabrilo, Effect of heat input on the ballistic performance of armor steel weldments, Materials, vol. 14, no. 13, 2021, Art. no. 3617.
- [60] Z. Yang, H. Kang, and Y. Lee, Experimental study on variations in Charpy impact energies of low carbon steel, depending on welding and specimen cutting method, Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 30, 2016, pp. 2019–2028, doi:10.1007/s12206-016-0408-y.
- [61] 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.

ÖZGEÇMİŞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **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:

- **2022-2023** : Gedik Kaynak Ar-Ge - TÜBİTAK 1505 Üniversite Sanayi İş birliği destek programı kapsamında Savunma Sanayi İçin Yerli Zırh Çeliklerinin Robotik Kaynak Uygulamalarının Geliştirilmesi projesinde TÜBİTAK bursiyeri.
- **2023-Halen** : Gedik Test Merkezi- Tahribatlı Birim Laboratuvar Sorumlusu

SERTİFİKALAR:

- TS EN ISO/IEC 17025:2017 Standartı Eğitimi – TÜRKAK,2023
- ISO 9712 Görsel Muayene Seviye – Gedik Test Merkezi, 2023
- Uluslararası Kaynak Mühendisliği-IWE – Gedik Eğitim Vakfı, 2025

YAYINLAR ve KATILIMLAR

- 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.
- Gürol, U., Çelik, C., Çoban, O., Göçmen, M., & Koçak, M. (2024). *Mechanical and Ballistic Performance of High-Hardness Armor Steels Welded with ASS-LHF Sandwich Joint Design*. *Materials Today Communications*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111209>

- M.Göçmen, “Effect of Heat Input on Microstructure and Microhardness of Robotic MIG Fillet Welded Armour Steel for Ferritic Filler Usage,” in *Proc. Int. Hybrid Conf. Advances in Welding and Metal Additive Manufacturing Technologies (WAM2023)*, İstanbul, Turkey, Nov. 2023.

