



**AŞINMAYA DAYANIKLI ZIRH ÇELİKLERİ İLE
YAPI ÇELİKLERİNİN MAG KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Muhammed Taha ÇAKIR

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**AŞINMAYA DAYANIKLI ZIRH ÇELİKLERİ İLE YAPI ÇELİKLERİNİN
MAG KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Muhammed Taha ÇAKIR

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

T.C.

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Kasım 2023

Muhammed Taha ÇAKIR tarafından hazırlanan “AŞINMAYA DAYANIKLI ZIRH ÇELİKLERİ İLE YAPI ÇELİKLERİNİN MAG KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 30/11/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA (GÜ)

Üye : Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yusuf AYAN (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Muhammed Taha ÇAKIR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AŞINMAYA DAYANIKLI ZIRH ÇELİKLERİ İLE YAPI ÇELİKLERİNİN MAG KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammed Taha ÇAKIR

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Kasım 2023, 104 sayfa

Bu çalışmanın amacı, S355J2 yapı çeliği ile Hardox 450 zırh çeliğinin robotik gaz altı kaynak (MAG) metoduyla birleştirilebilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda bu iki farklı kimyasal ve mekanik özelliklere sahip malzemelerin birleştirilmesinde üç farklı tip ilave metal (SG3, 110SG ve 307LSi) kullanılmıştır. Çalışmalar sonucu üç farklı kimyasal bileşime sahip ilave teller ile birleştirilen kaynaklı numunelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Kaynaklı numunelere öncelikle tahribatsız testler (görsel muayene, sıvı penetrant, ultrasonik muayene ve radyografik muayene) devamında ise mekanik testler (çekme, eğme ve çentik darbe) uygulanmıştır. Ayrıca kaynaklı numunelerin kaynak bölgelerinde (ana malzeme, ITAB ve kaynak metali) mikroyapı ve sertlik çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklı numunelere yapılan gözle muayene sonucunda kaynaklı numunelerin yüzeye açık gözenek, çatlak, yanma oluşu, nüfuziyet eksikliği ve aşırı sarkma gibi kaynak hatalarına rastlanılmamıştır. Tahribatsız testlerde ise (sıvı penetrant, ultrasonik muayene ve radyografik muayene) gerek yüzeye açık gerekse yüzey altında belirgin bir kaynak hatası tespit edilmemiştir. Kaynak bölgelerine yapılan sertlik testleri sonucunda kaynak metali sertliklerinin S355J2 ana malzemesinden yüksek, Hardox 450 ana malzemesinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Kaynaklı bağlantıların statik yük altındaki dayanımlarının belirlenmesi için yapılan çekme testlerinde tüm numunelerde kopma kaynak bölgesi dışında ve birleştirmenin S355J2 ana malzemesinden gerçekleşmiştir. Benzer şekilde yapılan kaynak kep ve kök eğme testlerinde kaynak bölgesinde bir hata (çatlak, yırtılma vb) gözlemlenmemiştir. Çentik darbe testlerine göre kaynak bölgesindeki en yüksek darbe dayanımları S355J2 ITAB'dan, kaynak metalinde ise en yüksek darbe tokluğu 307LSi ilave tel kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıdan ölçülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Hardox450, S355J2, Robotik MAG kaynağı, mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 91511

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATING THE WELDABILITY OF WEAR-RESISTANT ARMOR STEELS AND STRUCTURAL STEELS BY MAG WELDING

Muhammed Taha ÇAKIR

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Manufacturing Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

November 2023, 104 pages

The aim of this study is to investigate the weldability of S355J2 structural steel and Hardox 450 armor steel using the robotic gas metal arc welding (GMAW) method. For this purpose, three different types of filler metals (SG3, 110SG, and 307LSi) were utilized for joining these two materials with distinct chemical and mechanical properties. The microstructure and mechanical properties of welded samples, joined using three different chemical compositions of filler wires, were examined. Initially, non-destructive tests (visual inspection, liquid penetrant test, ultrasonic examination, and radiographic examination) were performed on the welded samples, followed by mechanical tests (tensile, bend, and notch impact tests). Additionally, microstructure and hardness studies were conducted in the weld zones (base material, heat-affected zone (HAZ) and weld metal).

Visual inspection revealed no weld defects such as surface-open porosity, cracks, undercut, lack of penetration, or excess penetration on the welded samples. Non-destructive tests (liquid penetrant test, ultrasonic examination, and radiographic examination) did not detect any significant welding defects, either on the surface or below the surface. Hardness tests conducted on the weld zones revealed that the hardness of the weld metal was higher than that of the S355J2 material but lower than that of the Hardox 450 material. Tensile tests performed to determine the static strength of the welded connections indicated that all samples ruptured outside the weld zone and within the S355J2 base material. Similarly, bend tests on the weld face and root did not reveal any defects (such as cracks or tearing) in the weld zone. According to notch impact tests, the highest impact toughness in the weld zone was measured in the S355J2 HAZ, while the weld metal exhibited the highest impact toughness in the welded joint made using the 307LSi filler wire.

Key Word : Hardox450, S355J2, Robotic MAG welding, mechanical properties.

Science Code : 91511

TEŞEKKÜR

Bu tez alıŐmasının planlanmasında, araŐtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilk gününden itibaren her türlü konuda desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıŐmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a sonsuz teşekkürlerimi arz ederim.

Tez alıŐması süresince, her türlü yardımını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümündeki değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA ve Öğr. Gör. Ömer ŐAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Malzeme temini ve çalışmalar konusunda desteklerini esirgemeyen Birikim Mühendislik ve Endüstriyel Yüklenim Anonim Őirketi'ne ve yönlendirmeleriyle bana ilk günden bu güne, daima yol gösteren Kalite Müdürü Dr. Ali AKAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez alıŐması süresince, her türlü yardımını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan değerli arkadaşım Kaan ÖZDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca her zaman bana destek olan, hiç bir yardımı esirgmeden hep yanımda olan ve beni bu günlere getiren sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
ÇELİKLER	4
2.1. YAPISAL ÇELİKLER.....	4
2.1.1. Yapısal Çeliklerin Özellikleri	4
2.1.2. Yapısal Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti	5
2.2. S355J2 YAPI ÇELİĞİ.....	6
2.2.1. S355J2 Yapı Çeliğinin Mekanik ve Kimyasal Özellikleri	6
2.2.2. S355J2 Yapı Çeliğinin Kaynak Kabiliyeti	7
2.2.3. S355J2 Yapı Çeliğinin Uygulama Alanları.....	7
2.3. ZIRH ÇELİKLERİ	8
2.3.1. Zırh Çeliklerinin Üretimi	8
2.3.2. Zırh Çeliklerinin Üstünlükleri	9
2.3.3. Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti	9
2.4. HARDOX 450 ZIRH ÇELİĞİ	10
2.4.1. Hardox 450 Zırh Çeliği Mekanik ve Kimyasal Özellikleri	10
2.4.2. Hardox 450 Zırh Çeliği Kaynak Kabiliyeti	11
2.4.3. Hardox 450 Zırh Çeliği Uygulama Alanları	12

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3	13
MIG-MAG KAYNAK YÖNTEMİ	13
3.1. MIG-MAG KAYNAĞININ ÇALIŞMA PRENSİBİ	13
3.2. MIG-MAG KAYNAĞI PARAMETRELERİ	14
3.2.1. Tel İlerleme Hızı ve Kaynak Akımı	15
3.2.2. Gerilim (Voltaj)	15
3.2.3. Gaz Akış Hızı	15
3.2.4. Kaynak Telinin Çapı	16
3.2.5. Kaynak Hızı	16
3.2.6. Serbest Tel Uzunluğu	16
3.2.7. Damla İletim Mekanizmaları	17
3.3. KORUYUCU GAZLAR	17
3.3.1. Soygazlar	18
3.3.1.1. Argon (Ar)	18
3.3.1.2. Helyum (He)	19
3.3.2. Aktif Gazlar	19
3.3.2.1. Karbon Dioksit (CO ₂)	19
3.3.2.2. Oksijen (O ₂)	19
3.3.3. Karışım Gazlar	19
3.4. ROBOTİK GAZ ALTI KAYNAĞI	21
BÖLÜM 4	25
KAYNAKLI BAĞLANTILARIN MUAYENE YÖNTEMLERİ	25
4.1. TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ	26
4.1.1. Görsel Muayene	27
4.1.2. Radyografik Muayene	28
4.1.3. Ultrasonik Muayene	29
4.1.4. Sıvı Penetrant Metodu ile Muayene	31
4.1.5. Manyetik Parçacık Metodu ile Muayene	32
4.2. TAHRİBATLI MUAYENE YÖNTEMLERİ	33
4.2.1. Sertlik Deneyi	33
4.2.2. Çekme Deneyi	34
4.2.3. Çentik Darbe Deneyi	35

	<u>Sayfa</u>
4.2.4. Eğme Deneyi	36
4.2.5. Makroyapı İncelemesi	37
4.2.6. Mikroyapı İncelemesi	37
BÖLÜM 5	38
LİTERATÜR TARAMASI	38
BÖLÜM 6	48
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	48
6.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ	48
6.2. TEST NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI	50
6.3. KAYNAK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ.....	52
6.4. DENEYSEL METOD VE TESTLER.....	53
6.4.1. Tahribatsız Muayene.....	54
6.4.1.1. Görsel Muayene	54
6.4.1.2. Sıvı Penetrant Muayenesi	55
6.4.1.3. Radyografik Muayene.....	55
6.4.1.4. Ultrasonik Muayene.....	56
6.4.2. Tahribatlı Muayene	57
6.4.2.1. Kimyasal Analiz Testleri	57
6.4.2.2. Makro/Mikroyapı İncelemesi.....	58
6.4.2.3. Sertlik Testleri.....	58
6.4.2.4. Çekme Testi	59
6.4.2.5. Eğme Testi	60
6.4.2.6. Çentik Darbe Testi	61
BÖLÜM 7	63
DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	63
7.1. GÖRSEL MUAYENE	63
7.2. SIVI PENETRANT MUAYENESİ	64
7.3. RADYOGRAFİK MUAYENE	64
7.4. ULTRASONİK MUAYENE	66
7.5. KİMYASAL ANALİZ İNCELEMELERİ.....	66

	<u>Sayfa</u>
7.6. MAKROYAPI İNCELEMELERİ.....	68
7.7. MİKROYAPI İNCELEMELERİ	70
7.8. SERTLİK TESTİ.....	78
7.9. ÇEKME TESTİ	83
7.10. EĞME TESTİ.....	86
7.11. ÇENTİK DARBE TESTİ.....	89
BÖLÜM 8	93
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	93
8.1. SONUÇLAR	93
8.2. ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ	104

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Kaynak kabiliyetinin temel faktörler ve özelliklerle ilişkisi.....	6
Şekil 2.2.	Zırh çeliği üretimi genel proses	8
Şekil 2.3.	Hardox çeliğinden imal edilmiş ürünler (kırıcı & delici)	10
Şekil 2.4.	S355J2 yapı çeliği ile Hardox 450 zırh çeliği kullanımı.....	12
Şekil 3.1.	MIG-MAG Kaynağı çalışma prensibi.....	13
Şekil 3.2.	Gaz çeşitliliğinin nüfuziyete etkisi.....	20
Şekil 4.1.	Tahribatsız muayene yöntemleri	27
Şekil 4.2.	Radyografik test çalışma prensibi	29
Şekil 4.3.	Ultrasonik muayenede hata tespiti	30
Şekil 4.4.	Sıvı penetrant muayene aşamaları.....	32
Şekil 4.5.	Çentik darbe deneyi	35
Şekil 4.6.	Kaynak dikişleri eğme deneyi uygulama prensibi	36
Şekil 5.1.	Hardox çeliklerinin $C_{eş}$ değerlerine göre çatlama eğilimi.....	44
Şekil 6.1.	Kaynatılacak numunelerinin ölçüleri.	50
Şekil 6.2.	Kaynak öncesi test numune görüntüleri.....	51
Şekil 6.3.	Kaynak ağzı dizaynı.....	51
Şekil 6.4.	Seramik altlıklı test numunesi.....	51
Şekil 6.5.	Testte kullanılan kaynak robotu.....	52
Şekil 6.6.	Kaynak sonrası gözle kontrol (SG3 için).....	54
Şekil 6.7.	Sıvı penetrant muayenesi.....	55
Şekil 6.8.	Ultrasonik muayene görseli.....	56
Şekil 6.9.	Optik emisyon test cihazı.....	57
Şekil 6.10.	Makro ve mikroyapı incelemede kullanılan cihazlar.....	58
Şekil 6.11.	Sertlik test cihazı ve ekran görseli.....	59
Şekil 6.12.	Kaynaklı numunelerden hazırlanan çekme test numuneleri.....	60
Şekil 6.13.	Çekme testi esnası ve cihaz görseli.....	60
Şekil 6.14.	Eğme testi esnası ve eğme numunesi.....	61
Şekil 6.15.	Deneyisel çalışmalarda kullanılan çentik darbe test cihazı.....	62
Şekil 7.1.	SG3 test numunesi radyografi görüntüsü.....	65
Şekil 7.2.	110SG test numunesi radyografi görüntüsü.....	65

Sayfa

Şekil 7.3. 307LSi test numunesi radyografi görüntüsü.	65
Şekil 7.4. SG3 ile birleştirilen numunenin makro görüntüsü.	68
Şekil 7.5. 110SG ile birleştirilen numunenin makro görüntüsü.	69
Şekil 7.6. 307LSi ile birleştirilen numunenin makro görüntüsü.	69
Şekil 7.7. S355J2 Yapı çeliği ana malzeme mikroyapı fotoğrafı.	70
Şekil 7.8. Hardox 450 ana malzeme mikroyapı fotoğrafı.	71
Şekil 7.9. Üç ayrı telle birleştirilen numunelerin kaynak bölgesi görünüşleri.	72
Şekil 7.10. SG3 tel ile birleştirilen numuneye ait makro ve mikroyapı görüntüleri.	74
Şekil 7.11. 110SG tel ile birleştirilen numuneye ait makro ve mikroyapı görüntüleri.	75
Şekil 7.12. 307LSi tel ile birleştirilen numuneye ait makro ve mikroyapı görüntüleri.	76
Şekil 7.13. Mikrosertlik ölçümleri şematik gösterimi.	79
Şekil 7.14. SG3 ilave tel ile birleştirilmiş kaynaklı numunenin sertlik grafiği.	79
Şekil 7.15. 110SG ilave tel ile birleştirilmiş kaynaklı numunenin sertlik grafiği.	79
Şekil 7.16. 307LSi ilave tel ile birleştirilmiş kaynaklı numunenin sertlik grafiği. ...	80
Şekil 7.17. SG3, 110SG ve 307LSi ile birleştirilen numunelerin sertlik grafikleri. .	80
Şekil 7.18. Çekme test sonuçları grafiği.	84
Şekil 7.19. Çekme testi sonrası kopma görselleri.	85
Şekil 7.20. Eğme testi sonrası numune görselleri (a) kep eğme ve (b) kök eğme. ...	87
Şekil 7.21. Çentik darbe grafikleri.	90
Şekil 7.22. Çentik darbe testi sonrası kırılmış numune görselleri.	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. S355J2 malzemenin kimyasal kompozisyonu (Ağırlıkça %)	7
Çizelge 2.2. Hardox 450 malzemenin kimyasal kompozisyonu (Ağırlıkça %)	10
Çizelge 2.3. Hardox-Weldox sacların ön ısıtma değer tablosu	11
Çizelge 3.1. TS EN ISO 14175'e göre gazların özellikleri	18
Çizelge 6.1. Çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşenleri (Ağırlıkça %)	49
Çizelge 6.2. Malzemelerin mekanik özellikleri	49
Çizelge 6.3. Kaynak tellerinin kimyasal özellikleri (Ağırlıkça %)	49
Çizelge 6.4. Kaynak tellerinin mekanik özellikleri	49
Çizelge 6.5. Kaynak işlemlerinde kullanılan koruyucu gaz bileşenleri (Hacim %)	49
Çizelge 6.6. Çalışmalarda kullanılan kaynak robotu ve makina özellikleri	53
Çizelge 6.7. Kaynak parametreleri	53
Çizelge 7.1. Ana malzemelerin kimyasal analiz test sonuçları (Ağırlıkça %)	66
Çizelge 7.2. Kimyasal analiz test sonuçları kaynak metali (Ağırlıkça %)	67
Çizelge 7.3. Çekme test sonuçları	84
Çizelge 7.4. Çentik darbe sonuçları	89

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

C_{eş} : Carbon Eşdeğerliliği

Al : Alüminyum

Ar : Argon

He : Helyum

CO₂ : Karbondioksit

S : Kükürt

Si : Silisyum

C : Karbon

P : Fosfor

Fe : Demir

Mn : Manganez

Mo : Molibden

Cr : Krom

B : Bor

Cu : Bakır

Ni : Nikel

O₂ : Oksijen

H₂ : Hidrojen

Ti : Titanyum

KISALTMALAR

- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
- ISO : International Standard Organization (Uluslararası Standard Organizasyonu)
- ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Test ve Malzeme Topluluğu)
- AWS : American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu)
- DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
- EN : European Norm (Avrupa Normu)
- IIW : International Institute of Welding (Uluslararası Kaynak Enstitüsü)
- ITAB : Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
- TS : Türk Standardları
- MIG : Metal Inert Gas (Metal Asal Gaz Korumalı)
- MAG : Metal Active Gas (Metal Aktif Gaz Korumalı)
- TIG : Tungsten Inert Gas
- NDT : Non-Destructive Testing (Tahribatsız Muayene Testi)
- DT : Destructive Testing (Tahribatlı Muayene Testi)
- SSAB : Svenskt Stål AB (Swedish Steel Limited Company)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Çelikler günümüzde sahip oldukları üstün mekanik özellikleri ve üretim sonrası ikincil işlemlere uygunlukları sayesinde birçok alanda mühendislik malzemesi olarak tercih edilmektedirler. Çeliklerin en çok tercih edildiği kullanım alanları; otomotiv sanayi, makine imalatı, savunma sanayi ve enerji sektörleridir. Genel olarak karbon (C) miktarının %0.2 ile %2.1 arasında değiştiği ve demir ile bileşik meydana getirdiği bilinen çelikler, bir alaşım olup içerdiği C oranına göre sınıflandırılmaktadır. Demirin ana alaşım elementi C olsa bile bunun yanı sıra demiri alaşımlamak için Cr, Mg, V ve W gibi farklı elementler ilave edilmektedir [1]. Yapı çelikleri kompozit kiriş ve döşemelerinin imalatında etkili bir şekilde kullanımı ile birlikte Batı Avrupa ülkelerinde ve özellikle İngiltere’de daha çok kullanılan bir malzeme haline gelmiştir. Ülkemizde yapı çelikleri özellikle 1999 Marmara depremi sonrasında inşaat sektöründe sıkça kullanılan bir yapı malzemesi haline gelmiştir [2].

Alaşımsız çelik olarak tanımlanan yapı çeliklerinin mekanik dayanımları daha çok içerdikleri karbon miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu çeliklerin piyasasında en fazla kullanılan kaliteleri S235 ve S355 türleridir. S355 çelikleri, daha çok haddelenmiş durumda, kısmi normal tavlı olarak üretilirler ve kullanılırlar. Bu nedenle, haddeleme sıcaklığında yapılan ısıtılma işleminin S355 malzemede önemi göz ardı edilemez. Böylelikle kontrollü olarak haddeleme sıcaklığından yararlanılarak yapılan normal tavlama işleminde C içeriğince yüksek mekanik özellikler elde edilebilir. Sonuç olarak; kontrollü haddeleme ile uygulanacak termomekanik işlemler ile yüksek darbe tokluğu özelliklerine ulaşılabilir [3]. S355J2 olarak bilinen çelikte “S” çelik grubunu (Structural Steel – Yapı Çeliği), “355” MPa olarak en düşük akma dayanımını, “J2” ise bu çeliğin -20 °C’de en az 27J darbe tokluğuna sahip olduğunu göstermektedir [4].

Yapı çeliklerinin yanında günümüzde iyi aşınma direncine, düşük karbon eşdeğerine ve iyi derecede kaynak edilebilirliğe sahip zırh çelikleri savunma sanayinde sıklıkla kullanılmaktadır. Çelik malzemelerin zırh malzemesi olarak tercih edilmesinin en önemli nedenleri; üretim maliyetinin düşük, dayanımının yüksek, darbe dayanımı ve kaynaklanabilirliğinin iyi olmasıdır. İmalatta kullanılacak bir zırh çeliğinin kaliteli olabilmesi için delinmeye karşı dayanıklı ve yüksek bir sertliğe sahip olması arzu edilmektedir. Bu özelliklerdeki zırh çeliği genellikle orta karbonlu çelik grubundan tercih edilmektedir. Ancak bu seçimi yaparken çelikteki C miktarı arttıkça kaynaklanabilirlik azalacağı dikkate alınarak optimum bir karbon değeri seçilmelidir [5]. Bu çeliklerden bazıları Hardox firması tarafından aşınmaya maruz sistemler ve parçalar için geliştirilmiş bir martenzitik çeliklerdir.

Hardox çeliği yüksek aşınma dayanımı özelliğinin yanında iyi bir darbe tokluk özelliğine sahiptir. Bu çelikler yüksek tokluk özellikleri sayesinde düşük sıcaklıklarda oluşan aşırı zorlanmalardan etkilenmezler [6]. Endüstriyel uygulamalar zırh çeliklerinin kendi aralarında ve farklı cins çelik malzemeler ile kaynak edilebilirliklerine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir [7].

Günümüzde hızlı gelişmekte olan imalat sanayi, beraberinde farklı metal ve alaşımlarının farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilmesini gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Farklı metallerin; ergime derecelerinin birbirinden farklı olması, ilave metal kullanılması durumunda seçilecek ilave telin iki malzemeye de uygun olması ve kaynak parametreleri seçilirken her iki malzemenin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Fakat son zamanlardaki kaynak teknolojisindeki gelişmeler, farklı metal ve alaşımlarının ergitmeli kaynağında bazı önlemler alınarak bu malzemelerin çeşitli kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri mümkün olmaktadır [8]. Bu tür malzemelerin birleştirilmesinde en çok kullanılan kaynak yöntemlerinden biri de MIG-MAG (Metal inert gaz ve Metal aktif gaz) kaynak yöntemidir. Bu kaynak yöntemi demir esaslı malzemelerin kaynağının yanında demir dışı metallerin kaynağında da en çok tercih edilen kaynak yöntemidir [8,9].

Günümüzde çelik malzemelerin MIG-MAG kaynağında kullanılan ilave metal tüketimi son yıllarda hızla artmaktadır. Ergitmeli bir birleştirme yöntemi olan bu

kaynak yöntemi hem üretim işlerinde hem de tamir işlerinde endüstride yerini almıştır. Kaynak hızı ve metal biriktirme oranı yüksek olmasının yanında otomasyona uygunluğu bu kaynak yönteminin önemli özelliklerindedir. Bunun yanında kaynak dikiş yüzeyinde cüruf olmayışı, metal biriktirme veriminin iyi olması ve yöntemin bütün pozisyonlarda kolaylıkla uygulanabilmesi yöntemin önemli avantajlarından [10].

Bu çalışmada yukarıda özellikleri sayılan farklı mekanik ve kimyasal özelliklere sahip S355J2 yapı çeliği ile Hardox 450 zırh çeliği MAG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmiş ve birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Farklı özellikteki malzemelerin birleştirilmesinde mekanik özellikleri belirleyen temel parametrelerden birisinin ilave metal seçimi olduğu düşünülerek bu malzemelerin birleştirilmesi için SG3, 110SG ve 307LSi ilave teller tercih edilmiştir. Birleştirme işlemleri kaynak robotu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Esas birleştirme işlemleri öncesinde parametrik çalışmalar yapılmış ve en uygun görülen parametrelerde kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelere öncelikle tahribatsız muayene test (NDT) yöntemlerinden görsel muayene, sıvı penetrant testi, ultrasonik test ve radyografik test uygulanmıştır. NDT yöntemlerinden başarı ile geçen test parçalarına tahribatlı testler (DT) çekme, eğme ve çentik darbe testleri yapılmıştır. Ayrıca kaynaklı numunelerin kaynak bölgelerinde sertlik, element analizi ve makro/mikroyapı çalışmaları yapılmıştır.

Tez çalışması genel olarak iki ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki çalışmada kullanılan malzemeler, kaynak yöntemi ve uygulanan testler ile daha önce yapılan benzer çalışmaları da kapsayan bilgilerinin verildiği literatür kısmı, ikincisi ise uygulamalı deneysel çalışmalar ile sonuçların detaylı olarak verildiği kısımdır. Çalışmanın sonuçlar ve tartışma kısmında çalışma sonucu elde edilen veriler grafiklere dökülerek neden-sonuç ilişkisi içerisinde yorumlanmış ve elde edilen sonuçların benzer çalışmalardan farklılıkları ve benzerlikleri ortaya konulmuştur. Son olarak da çalışmadan elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve gelecekte benzer konuda çalışma yapacak araştırmacılara önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2

ÇELİKLER

Çelik malzemeler tanımlama ve kullanımında kolaylık sağlamak amacıyla farklı sınıflandırmalara tabi tutulmakla birlikte en yaygın olarak karbon oranına göre, alaşım elementi miktarına göre ve kullanım alanına göre sınıflandırılmaktadırlar. Endüstriyel olarak ise birçok çelik çeşidi bulunmasına rağmen burada sadece deneysel çalışmalarda kullanılan yapısal çelikler ile zırh çelikleri tanıtılmıştır.

2.1. YAPISAL ÇELİKLER

Yapısal çelikler, belirli çelik sınıflarından yapılan ve endüstri standardı çeşitli kesit şekillerinde oluşturulan standart yapı malzemeleridir. Bu çelik kaliteleri, belirli uygulamalar için formüle edilmiş belirli kimyasal içerikler ve mekanik özelliklerle tasarlanmıştır.

2.1.1. Yapısal Çeliklerin Özellikleri

Çelik, genellikle %2'den daha az karbon içeren ve demir oranı diğer elementlerden daha fazla olan alaşımlara verilen isimdir. Çeliğin iç yapısı ve içerdiği elementlerin kimyasal bileşimi, çeliğe farklı özellikler kazandırır ve bu elementlere alaşım elementleri denir. Farklı oranlarda alaşım elementleri eklenerek çeşitli özelliklere sahip çelikler elde edilebilir veya çeşitli işlemlerle (ısıtım işlemi, normalizasyon, vb.) iç yapısı kontrol edilerek kullanım amacına göre farklı özelliklere sahip çelikler üretilebilir [11].

Yapı çelikleri, çelik üretimi içinde en yüksek paya sahip olan çelik türleridir. Diğer çeliklere kıyasla daha avantajlı olan yapı çelikleri, fiyat ve bulunabilirlik açısından tercih edilen çeliklerin yaklaşık %80'ini oluşturur. Genellikle alaşımsız olarak kullanılan

yapı çelikleri, sıcak şekillendirme sonrasında normalize edilir veya bazen soğuk çekilir. Bu çelikler, özellikle çekme dayanımı ve akma sınırları dikkate alınarak endüstriyel ve yapısal uygulamalarda kullanılır. Yapı çelikleri, akma dayanımı değerlerine göre sınıflandırılır ve çelik konstrüksiyon, inşaat, köprü, stadyum, alışveriş merkezleri, basınçlı kaplar, taşıt imalatı ve makine konstrüksiyonları gibi çeşitli mühendislik alanlarında tercih edilir. Genellikle alaşımsız olarak tanımlanan yapı çeliklerinin mekanik dayanımları, karbon miktarına bağlıdır. Ancak azot, fosfor, mangan, silisyum, bakır ve kükürt gibi elementler, üretim hammaddeleri ve üretim yöntemlerinden kaynaklanan etkilerle mekanik özellikleri etkileyebilir [3].

2.1.2. Yapısal Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti

Kaynak, birleştirilecek malzemelerin türü dikkate alınarak metallerin ve plastiklerin birleştirilmesi işlemidir. Metalik malzemelerin ısı, basınç veya her ikisi ile, benzer nitelikte veya benzer erime noktalarına sahip malzemeler katılarak veya katılmadan birleştirilmesi olarak tanımlanabilir. İki parça birleştirilirken ek malzeme kullanılıyorsa bu malzemeye ilave metal denir [12].

Yapısal çeliklerin düşük ve orta karbon oranına sahip olan türleri iyi kaynaklanabilirleri ile bilinirler. En iyi kaynak kabiliyeti olarak düşük karbon çelik türleri olup bunun peşine orta karbon çelikleri gelmektedir. Yapısal çeliklerde karbon oranı arttıkça çeliğin kaynaklanabilirliği, ters orantılı bir şekilde azalmaktadır [13]. Şekil 2.1'de yapısal çeliklerin kaynak kabiliyetlerinin malzeme, imalat ve konstrüksiyon ile ilişkileri şematik olarak verilmiştir. Kaynak kabiliyeti ile bu faktörler arasında, malzemelerin kaynağa uygunluğu, konstrüksiyonun kaynak emniyeti ve imalatın kaynak yapılabilirliği özellikleri bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Kaynak kabiliyetinin temel faktörler ve özelliklerle ilişkisi [13].

2.2. S355J2 YAPI ÇELİĞİ

S355J2 çelik malzeme, çelik endüstrisindeki genel yapısal uygulamalar için uygun olan bir çelik türüdür. Bu çelik özel kimyasal içeriği sebebiyle yüksek bir dayanıma ve geniş bir kullanım alanına sahiptir.

2.2.1. S355J2 Yapı Çeliğinin Mekanik ve Kimyasal Özellikleri

S355J2 yapısal çeliği gösteriminde 355 kısmı malzemenin 355 MPa akmasını J2 kısmı ise -20 derecede minimum 27 J çentik darbe enerjisine sahip olduğunu göstermektedir. Çizelge 2.1’de S355J2 malzemelerin kimyasal kompozisyonu ve kaynaklanabilirliği tanımlayan $C_{eş}$ verilmiştir. S355J2 malzemenin çekme dayanımı minimum 510 MPa ile 680 MPa arasında değişmektedir. Bu malzemenin TS EN 10025-2:2019’a göre tanımlanmasında;

- J0: 0 C° sıcaklıkta darbe enerjisi, minimum 27 J olduğunu,
- JR: 20 C° (Oda sıcaklığı) sıcaklıkta darbe enerjisi minimum 27 J olduğunu,
- J2: -20 C° sıcaklıkta darbe enerjisi (KV) minimum 27 J olduğunu,
- K2: -20 C° sıcaklıkta kalınlık ≤ 150 mm için darbe enerjisi minimum 40 J olduğunu ifade eder [14].

Çizelge 2.1. S355J2 malzemenin kimyasal kompozisyonu (Ağırlıkça %) [14].

Alaşım Elementi	C	Si	Mn	P	S	N	Cu	Fe	C _{eş}
Miktarı	0,20	0,55	1,60	0,025	0,025	-	0,055	Kalan	0,45

2.2.2. S355J2 Yapı Çeliğinin Kaynak Kabiliyeti

Yapı çelikleri kaynak kabiliyetleri yüksek olarak bilinen çeliklerdir. Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere C_{eş} değeri 0,45 olup kaynaklanabilirliği iyi olarak değerlendirilmektedir. Bir başka ifade ile S355J2 malzeme düşük karbon oranına sahip ve içeriğindeki elementlerle birlikte kaynağa elverişli çeliklerdir [13].

Yapı çelikleri arasında yer alan S355J2 çeliği, kaynaklı birleştirmelerde kullanılan yöntemler arasında MIG-MAG kaynakları için uygunluklarıyla bilinirler. Bu sayede günümüzde çok kapsamlı olarak endüstriyel alanlarda kullanılmaktadırlar. S355J2 yapı çeliğinin düşük karbon ve düşük C_{eş} içeriğinden dolayı ön ısıtma ve kaynak sonrası tavlama işlemlerine gerek kalmaksızın doğrudan kaynaklanabilirler [15].

2.2.3. S355J2 Yapı Çeliğinin Uygulama Alanları

Kaynaklanabilirliklerinin iyi olması sayesinde S355J2 yapı çelikleri günümüz endüstrisinde birçok alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanları aşağıda olduğu gibi sıralanabilir.

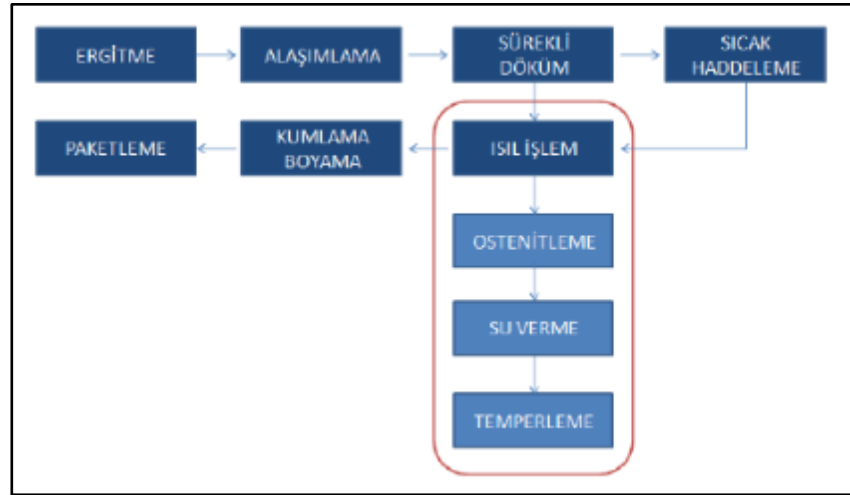
- Köprüler, demiryolları ve endüstriyel binalar,
- Gemi imalatı ve deniz dalgakıranları,
- Elektrik iletiminde kullanılan kablolarının taşıdığı direkler,
- Petrol ve deniz ile ilgili gaz platformları,
- Ticari yapılar ve binaya yük bindirmeyen çatı katları,
- Otomotiv sanayi, iş makinesi imalatı ve savunma sanayi [15].

2.3. ZIRH ÇELİKLERİ

Zırh çelikleri, kara muharebe araçları, deniz ve hava platformları ile savunma sistemlerinde yoğun bir şekilde kullanılan çelik türüdür. Bu çelikler homojen dağılımlı martenzit kristal yapıda düşük karbon alaşımlı, üretimi teknolojik bilgi birikimi gerektiren ve stratejik öneme sahip özel üretim çeliklerdir.

2.3.1. Zırh Çeliklerinin Üretimi

Zırh çeliklerinin üretimi birbirlerinden farklı özellikteki mermilerin çoklu etkilerine karşı çatlama, parça kopmaları ve kırılmaya gösterdiği direnç amaçlarıyla üretimleri sağlanmaktadır [16]. Şekil 2.2’de zırh çeliği üretimi genel prosesi verilmiştir.



Şekil 2.2. Zırh çeliği üretimi genel proses [16].

Şekil 2.2’de gösterilen zırh çeliğinin genel prosesine göre çelik ergitmeden sonra önce alaşımlama ardından da sürekli döküm prosesinde döküm işlemi ile üretilir. Temel alaşım elementlerinin ilave edildiği ergitilmiş sıvı metal, sürekli döküm yöntemiyle plaka (slab) halinde katılaştırılıp, daha sonra sıcak olarak haddelenerek istenen boyutlara getirilir.

Haddelenerek şekillendirilen zırh çelikleri östenitleştirme, su verme ve temperleme ile istenilen mukavemet, sertlik ve tokluk değerlerine ulaştırılır. Uygulanan ısıl işlemlerle

mekanik özelliklerinin geliştirilebilmesi de çeliklerin zırh malzemesi olarak kullanılmasında tercih sebebi olmaktadır [17].

2.3.2. Zırh Çeliklerinin Üstünlükleri

Günümüzde kullanım alanlarına göre çelik malzeme seçiminde önemli noktalardan biri de aşınmaya karşı dayanımlarıdır. Bu seçimleri yaparken önem arz eden konulardan biri de malzemelerin sertlikleridir. Sertlikleri arttıkça malzemelerin dayanımları da artmaktadır. Zırh çelikleri diğer yüksek mukavemetli çeliklere kıyasla beş kat daha dayanıklıdır. Başka bir özellik olarak zırh çelikleri yüksek mukavemet değerlerine sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde boyutsal kararlılıkları iyi olup kalıcı deformasyona uğramaları daha azdır. Zırh çelikleri kullanımıyla plaka kalınlıkları azaltılıp yüksek mukavemet sağlanılabilmektedir.

Zırh çelikleri kullanım ömrü ve performansları ile uzun vadede gayet mantıklı bir seçenek olmuştur. Makine üreticileri, madencilik, balistik gibi bölümlerde aşınmaya karşı dayanıklılık gerektirecek yerlerde zırh çelikleri kalan yerlerde daha düşük maliyetli çelikler tercih edilerek maliyetin düşmesine sebep olmuştur [18].

2.3.3. Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti

Zırh çelikleri düşük alaşım elementleri içerdikleri için eşdeğer karbon değerleri çok yüksek değildir. Zırh çeliklerinin kaynak kabiliyetleri yüksek olduğu için alışıktığımız güncel kaynak yöntemleriyle kaynak edilebilme özelliğine sahiptirler. Zırh çelikleri kendi içerisinde ve kaynağa uygun konstrüksiyon için kullanılan diğer çeliklerle çok kolay kaynaklanabilirler.

Zırh çeliklerinin kaynaklanmasında dikkat edilmesi gerek belirli önemli noktalar bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir; kaynak yapılacak bölgeler ya aşınmaya maruz kalmayacak ya da en az olduğu yerlere gelecek şekilde temas yüzeyi oluşturulacak, yapılan kaynaklar aşındırıcı malzemede hareket yönüne dik bir şekilde gelecek şekilde düzenlenmesi gereklidir. Ayrıca kaynak dolgu metalinde hidrojen elementi en az olacak şekilde seçim yapılmalıdır [19].

2.4. HARDOX 450 ZIRH ÇELİĞİ

Hardox 450 zırh çelikleri bükülebilme, kaynaklanabilme, yüksek sertlik ve aşınma dayanımı değerlerine sahip olan zırh çeliklerindedir. Endüstride birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Özellikle aşınmaya maruz kalan, yüksek sertlik değerleri gerektiren uygulama alanlarında Hardox 450 zırh çelikleri tercih edilmektedir. HARDOX 450 serisi, 450 HB sertliğe sahip olan bu çeliğin karbon oranının az olması nedeniyle kaynak kabiliyeti iyidir. Aşınma, korozyona karşı dayanım, darbe dayanımları ve iç gerilemelerle birlikte yorulmaya karşı da dayanıklıdır. İş makineleri, maden araçları ve kırıcı-delici olarak endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir [20].



Şekil 2.3. Hardox çeliğinden imal edilmiş ürünler (kırıcı & delici) [20].

2.4.1. Hardox 450 Zırh Çeliği Mekanik ve Kimyasal Özellikleri

Hardox 450 zırh çeliklerin kimyasal analiz değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Çizelgede maksimum alaşım element değerleri paylaşılmıştır.

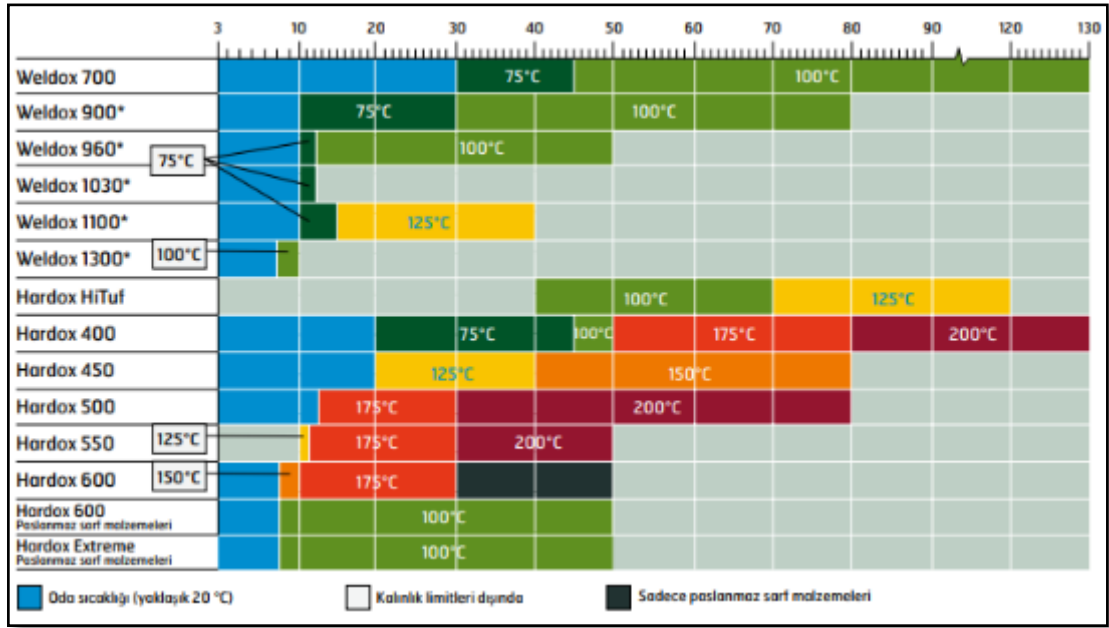
Çizelge 2.2. Hardox 450 malzemenin kimyasal kompozisyonu (Ağırlıkça %) [21].

Alaşım Elementi	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Fe
Miktarı	0,184	0,215	1,187	0,0018	0,011	0,037	0,035	0,0086	<0,001	Kalan

Hardox 450 çeliklerinin $C_{eş}$ değerleri kalınlıklarına göre farklılık göstermektedirler. Plakalar için kalınlığı 4 mm ile 13 mm arasında olanların Max. $C_{eş}$ değerleri 0.38'dir.

Hardox 450 zırh çelikleri ortalama 425 HBW ile 475 HBW Brinell sertlik değerlerini garanti etmektedir. Akma dayanımları ortalama 1250 MPa değerindedir. Çentik darbe dayanımları sac ve levhalar için 50 J / -20°C şeklindedir. SSAB'nin broşüründen alınan kaynak öncesi ve sonrası ön ısıtma, pasolararası sıcaklık gibi parametreler Çizelge 2.3'te verilmiştir [22].

Çizelge 2.3. Hardox-Weldox sacların ön ısıtma değer tablosu [22].



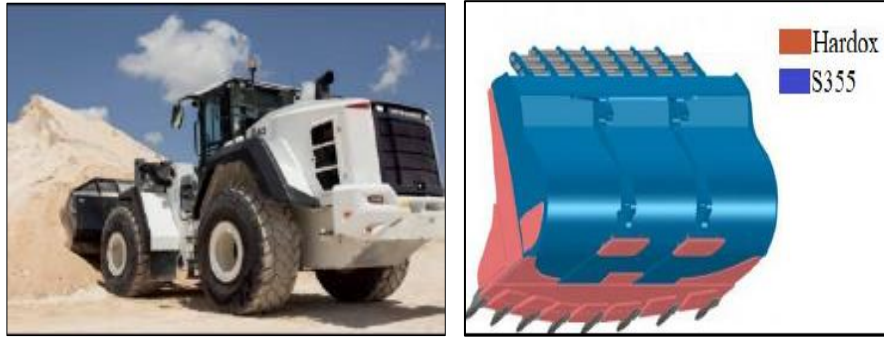
2.4.2. Hardox 450 Zırh Çeliği Kaynak Kabiliyeti

Hardox 450 çelikleri genel itibari ile kaynağa elverişli çelikler arasındadır. Bazı firmalar, aşınma sorununa karşı çözüm olarak yeni özelliklere sahip aşınmaya dirençli malzemeler geliştirmektedir. Hardox serisi çelikler, bu tür malzemeler arasında yer alarak özellikle yüksek derecede abrasiv aşınma direncine sahiptir. Bu çelikler, diğer yüksek dayanımlı çeliklere göre en az beş kat daha uzun ömürlüdür ve aynı zamanda yüksek tokluk, kolay bükülebilirlik ve etkili kaynak kabiliyeti sunarlar. Bu nedenle, bu çelikler özellikle kepçe ve damperli kamyonların kasa ve ataşman imalatında sıkça tercih edilmektedir [15].

2.4.3. Hardox 450 Zırh Çeliği Uygulama Alanları

Hardox 450 zırh çelikleri endüstride yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle maden sektörü, iş makineleri gibi kayma aşınmasına maruz kalan alanlarda tercih edilir. Bunun sebebi olarak bulundurduğu yüksek aşınma direncinden kaynaklanmaktadır. Hardox çelikleri yapı itibarıyla da diğer çeliklere göre yüksek dayanım kabiliyeti ve yüksek sertlikleri sayesinde uzun ömürlü olarak kullanılabilir.

Şekil 2.4'te gösterilen iş makinesi kovanında kırmızı renkli olan yerlerde Hardox aşınma plakası kullanılırken mavi olan yerlerde ise S355J2 çeliği kullanılmıştır. Burada kovanın en çok aşınmaya uğrayan yerleri Hardox seçilirken, aşınma ile ilgisi olmayan hatta hafriyat ile temas etmeyen yerlerde S355J2 çeliği kullanılmıştır [15].



Şekil 2.4. S355J2 yapı çeliği ile Hardox 450 zırh çeliği kullanımı [15].

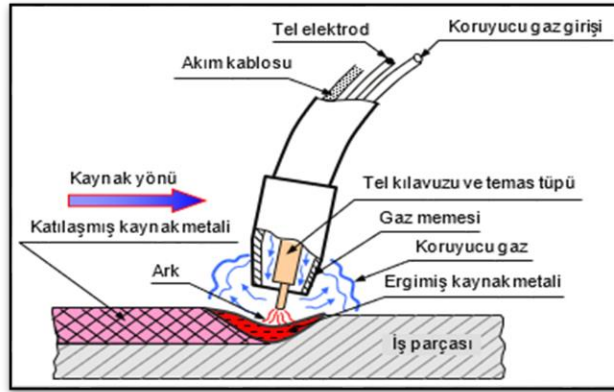
BÖLÜM 3

MIG-MAG KAYNAK YÖNTEMİ

MIG-MAG kaynak yöntemi genel olarak tüketilebilir bir tel elektrot ile karakterize edilen ve kaynak sırasında koruyucu gaz olarak argon veya helyum gibi bir inert gaz kullanıldığında MIG (metal asal gaz), CO₂ veya O₂ gibi bir aktif gaz veya karışımları kullanıldığında ise MAG (metal aktif gaz) olarak tanımlanan ergitmeli bir birleştirme yöntemidir [23].

3.1. MIG-MAG KAYNAĞININ ÇALIŞMA PRENSİBİ

MIG-MAG kaynağı esnasında elektrot olarak kullanılan kaynak teli, kaynak makinesinin tel besleyici mekanizmasıyla kontrol edilerek sürekli olarak ergitilir ve iş parçasına doğru ilerletilir. Şekil 3.1’de MIG-MAG kaynağının çalışma prensibi gösterilmiştir [24].



Şekil 3.1. MIG-MAG Kaynağı çalışma prensibi [25].

MIG-MAG kaynak teknikleri oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir ve farklı kalınlıklardaki demir esaslı veya demir dışı metal ve alaşımların kaynağı için kullanılabilir.

Bu yöntemin uygulanması genellikle kolaydır ve kaynakçılar genellikle büyük zorluklarla karşılaşmazlar. Toprak kablosunun kaynatılacak malzemeye bağlanması ve torcun ucundaki elektrodun iş parçasına temas ettirilmesi gibi basit adımlarla işlem gerçekleştirilir. İlk ayarlar yapıldıktan sonra, kaynakçının elle kontrol etmesi gereken unsurlar genellikle kaynak hızı, kaynak yönü ve torcun pozisyonu gibi faktörlerdir. Uygun ekipman seçimi ve doğru ayarlamalar yapıldığında, kaynak makinası ark boyunu ve akım şiddetini (elektrodun besleme hızını) otomatik olarak sabit tutabilir. Bu durumda, kaynakçının manuel olarak müdahale etmesi gereken unsurlar minimaldir ve otomatik ayarlamalar sayesinde kaynak işlemi daha stabil bir şekilde gerçekleştirilebilir [25].

Gaz metal ark kaynağı (GMAK), nispeten yüksek verimliliği ve düşük maliyeti nedeniyle en yaygın kullanılan kaynak yöntemlerinden biridir [26]. Ayrıca yöntem iyi görünümü, düşük kusur seviyesi, düşük maliyetinin [21], yanında mekanizasyon kolaylığı ve yüksek verimlilik avantajlarından dolayı farklı kalınlıktaki çelik alaşımlı levhaları birleştirmek için tercih edilen tekniktir [27].

MIG-MAG kaynağı, otomotiv, gemi yapımı, uçak imalatı, metal mobilya üretimi, boru hatları ve diğer birçok endüstride yaygın olarak kullanılır. Çünkü bu yöntem, diğer kaynak yöntemlerine göre daha hızlı, daha verimli ve daha az cüruf üretir. Ayrıca, kolay öğrenilebilir olması ve nispeten düşük maliyetli ekipman gerektirmesi de tercih edilme sebeplerindedir. Kaynak operatörleri, işlem sırasında uygun akım, gerilim ve gaz akışı gibi parametreleri ayarlayarak MIG-MAG kaynağının verimini ve kalitesini kontrol eder. Bu şekilde, farklı metallerin birbirine sağlam ve güvenilir şekilde kaynatılmasını sağlayarak çeşitli üretim ihtiyaçlarını karşılar [24].

3.2. MIG-MAG KAYNAĞI PARAMETRELERİ

MIG-MAG kaynağı çok yönlü bir kaynak tekniği olduğundan neredeyse tüm endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Proses parametreleri, ısıdan etkilenen bölge (ITAB) ve kaynak dikişi bölgesindeki mekanik özellikleri büyük ölçüde etkiler [28]. MIG-MAG kaynağının başarıyla uygulanması, uygun parametrelerin dikkatli bir şekilde ayarlanmasına bağlıdır.

3.2.1. Tel İlerleme Hızı ve Kaynak Akımı

MIG-MAG kaynak yönteminde doğrudan akım belirlemek yerine tel sürme hızı akım değerlerini belirlemektedir. Bir başka ifade ile sabit gerilimli bir akım üreticinde tel ilerleme hızı arttıkça kaynak akımı artmaktadır. Bu nedenle gerçek tel ilerleme hızı, beslenen tel malzeme miktarını ergiten kaynak akımını oluşturur. Daha yüksek akım, daha fazla ergime ve penetrasyon sağlar, ancak aynı zamanda kaynak dikişinin kalınlığını artırabilir ve malzemeyi daha fazla ısıtabilir. İnce malzemelerde düşük akım, daha ince ve kontrol edilebilir dikişler elde etmeye yardımcı olurken, kalın malzemelerde daha yüksek akım tercih edilebilir [29]. Tel hızı ergime hızıyla doğru orantılıdır ve kaynak akımıyla tel hızı arasında yaklaşık sabit bir oran vardır. Tel hızı arttıkça akım şiddeti ve nüfuziyet artar. Dikiş genişliği normal çalışma aralığında fazla etkilenmez [25].

3.2.2. Gerilim (Voltaj)

Gerilim, kaynak makinesinden çıkan elektrik geriliminin miktarını ifade eder. Gerilim seviyesi, arkın uzunluğunu ve kaynak teli ile iş parçası arasındaki mesafeyi belirler. Daha yüksek gerilim, daha uzun bir ark oluşturarak geniş kaynak dikişleri elde edilmesine olanak tanır, ancak aynı zamanda daha fazla sıçrama ve duman üretebilir. İnce malzemelerde düşük gerilim kullanılabilirken, kalın malzemelerde daha yüksek gerilim tercih edilebilir [24].

3.2.3. Gaz Akış Hızı

Kaynak işlemi sırasında bir dizi değişkeni etkileyen koruyucu gaz debisi birkaç faktöre bağlıdır. Bu faktörler arasında koruyucu gazın yoğunluğu, kullanılan ark türü, ergime gücü, kaynak malzemesi, gaz memesinin iş parçasına olan uzaklığı, gaz memesinin iç çapı, birleştirme şekli, kaynak ağzının boyutu ve şekli, kaynak pozisyonu ve çevredeki hava sirkülasyonu yer alır. Çok düşük bir gaz debisi yetersiz korumaya, yeterince iyonize olmamış bir ortama ve kararsız bir ark oluşumuna sebep olabilir, bu da daha fazla sıçramaya yol açabilir. Öte yandan çok yüksek bir gaz debisi, türbülans yaratarak ergimiş metal damlacıklarının kaynak banyosu dışına savrulmasına ve fazla miktarda

sıçramaya sebep olabilir. Ayrıca, büyük bir gaz debisi, girdap oluşturarak gözenek oluşumunu hızlandırabilir. Genellikle uygulamada, gaz debisi belirlenirken tel elektrodun çapının on katı olarak alınır. Yani, Gaz debisi = tel elektrod çapı x 10 (litre/dakika) şeklinde bir yaklaşım sıklıkla tercih edilir [25].

3.2.4. Kaynak Telinin Çapı

Genel olarak kaynak telinin belirlenmesinde malzemenin türü ve kalınlığının önemi çok büyüktür. İnce malzemeler için ince kaynak telleri, kalın malzemeler için ise kalın kaynak telleri tercih edilir. Doğru tel çapı seçimi, kaynak dikişinin kalitesini ve dayanımını etkileyen önemli bir faktördür [29].

3.2.5. Kaynak Hızı

Kaynak hızı, kaynak işlemi sırasında telin besleme hızıyla ve akım düzeyiyle dengelenmelidir. Uygun kaynak hızı, istenilen kaynak dikişi boyutu ve kalitesini sağlamaya yardımcı olur. Yavaş kaynak hızı, daha fazla erime ve penetrasyona yol açabilirken, hızlı kaynak hızı yetersiz bir kaynak dikişi oluşturabilir. Operatörün beceri düzeyi, uygun kaynak hızını belirlemeye yardımcı olur [24].

3.2.6. Serbest Tel Uzunluğu

MIG-MAG kaynak işleminde serbest tel uzunluğunun değişmesi, nüfuziyet derinliğinde farklılıklara sebep olabilir. Serbest tel uzunluğunun artması veya azalması, direncin değişmesine ve dolayısıyla akım şiddetinde bir artış veya azalmaya yol açabilir. Bu durum da nüfuziyet derinliğini etkileyebilir. Serbest tel uzunluğundaki değişiklikler, akım şiddetindeki artış veya azalma ile ilişkilidir. Bu durum, kaynak yaparken kaynakçının hareketleriyle birleştiğinde dikkate alınması gereken bir faktördür. Elle yapılan kaynak işlemi sırasında, kaynakçının hareketleri ve serbest tel uzunluğundaki değişimler nedeniyle tolerans aralığı daralabilir. Bu durum, kaynak işlemi sırasında nüfuziyet derinliğinin kontrol edilmesi ve istenen sonuçların elde edilmesi için önemli bir faktördür [25].

3.2.7. Damla İletim Mekanizmaları

MIG/MAG kaynak işlemleri için karakteristik malzeme transfer modları; -kısa devre iletim, damla iletimi, sprej iletim ve darbe iletimidir [30]. Kaynak iletim yöntemleri, farklı akım değerleri ve gaz türleri kullanılarak çeşitli kaynak gereksinimlerine uygun olarak gerçekleştirilir. İletim türleri, elektrod çapı, akım tipi ve akım şiddeti gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Kısa devre iletimi, en düşük kaynak akımı aralığında ve küçük elektrod çaplarında gerçekleştirilir. Bu iletim türü, ince kesitlerin birleştirilmesi, pozisyon kaynağı için ve büyük kök açıklıklarının birleştirmek için kullanılır. Küçük, hızlı katılaşılan bir kaynak banyosu oluşturur. İri damla iletimi (uzun ark), düşük kaynak akımında ve elektrod pozitif kutuplama durumunda, belirli bir akım şiddetinden bağımsız olarak gerçekleşir. CO₂ ve helyumla bu tip iletim farklı akım değerlerinde mümkündür. Bu iletim türünde damla çapı, elektrod çapından büyüktür.

Sprej iletimi, argon zengin gaz korumasında kullanılan bir iletim türüdür ve kararlı, sıçramasız bir iletim sağlar. Elektrod pozitif kutupta doğru akımda ve belirli bir akım şiddetinde kullanılır. Bu iletim türü, genellikle yüksek enerjili bir durumdur ve bütün kaynak pozisyonlarında kullanılabilir. Darbeli akım geçişi, kısa devre geçişe göre daha yüksek enerjili bir transfer modudur. Bu yöntemde güç ünitesi, belirlenen aralıkta iki ayrı kademedeki akım üretir. Bunlar; malzeme geçişi olmayacak kadar düşük bir temel akım ve bir tepe akımıdır. Bu farklı iletim türleri, belirli kaynak uygulamalarına ve malzemelere uygun olarak seçilir ve ayarlanır. Kaynakçı, işin gerekliliklerine göre uygun iletim yöntemini belirleyip uygulamalıdır [25].

3.3. KORUYUCU GAZLAR

MIG-MAG kaynak yönteminde ticari olarak kullanılan gazlar veya gaz karışımlarından asal olanlar argon ve helyum, aktif olanlar ise karbondioksit, azot, oksijen ve hidrojen gazlarıdır. Çizelge 2.3'de TS EN ISO 14175'e göre gazların özellikleri verilmiştir [31].

Çizelge 3.1. TS EN ISO 14175'e göre gazların özellikleri.

0° C ve 1,013 Bar'da					
Gaz Türü	Simgesi	Yoğunluk (kg/m ³)	Havaya göre izafi yoğunluk	0,101 MPa'da Buharlaşma Sıcaklığı (°C)	Kaynak sırasında gazın davranışı
Argon	Ar	1,784	1,38	-185,9	Soy
Helyum	He	0,178	0,138	-268,9	Soy
Karbondioksit	CO ₂	1,977	1,529	-78,5	Oksitleyici
Oksijen	O ₂	1,429	1,105	-183	Oksitleyici
Azot	N ₂	1,251	0,968	-195,8	Düşük Reaktif
Hidrojen	H ₂	0,09	0,07	-252,8	Redükleyici

MIG-MAG kaynağında koruyucu gaz kullanımı, kaynak işleminin temel bir parçasıdır ve ergitilen metallerin oksijenle temasını engellemeyi hedefler. Kaynak sırasında atmosferdeki oksijen ve diğer gazlar, ergimiş metalle reaksiyona girerek oksitlenmeye neden olur. Bu durum, kaynak dikişinin kalitesini düşürebilir, mekanik özelliklerini azaltabilir ve hatta bağlantının dayanıklılığını tehlikeye atabilir. Koruyucu gazlar, kaynak bölgesini oksijenden izole ederek, temiz ve düzgün bir kaynak dikişi elde etmeye yardımcı olur. Ayrıca, koruyucu gazlar kaynak sırasında alevin stabilizasyonuna yardımcı olarak daha kontrollü bir kaynak süreci sağlar [32].

3.3.1. Soygazlar

Soygazlar reaktif olmadıklarından ve diğer elementlerle reaksiyona girmediklerinden genellikle demir dışı metallerin (Al, Mg, Ti, Cu vb.) kaynağında tercih edilirler.

3.3.1.1. Argon (Ar)

MIG-MAG kaynağında en yaygın olarak kullanılan inert gazdır. İntert özelliği nedeniyle kimyasal olarak reaktif değildir ve genellikle alüminyum ve alaşımlarının kaynağında tercih edilir. Ergitilen alüminyum, Ar ile temas ettiğinde bir alüminyum oksit tabakası oluşturur, bu tabaka oksidasyonu önler ve dikişin kalitesini artırır.

3.3.1.2. Helyum (He)

Helyum, Ar ile karıştırılarak kullanılabilir ve kaynak sırasında gazın sıcaklık etkilerine dayanıklılığını artırabilir. Helyumun yüksek ısı iletkenliği, kaynak dikişinin daha hızlı soğumasını sağlayarak, daha kalın malzemelerin kaynağında tercih edilir. Düşük yoğunluğu, argonun aksine, daha iyi gaz akış kontrolü sağlar.

3.3.2. Aktif Gazlar

3.3.2.1. Karbon Dioksit (CO₂)

MIG-MAG kaynağında en yaygın olarak kullanılan aktif gazdır. CO₂, çelik ve paslanmaz çelik gibi malzemelerin kaynağında tercih edilir. CO₂, kaynak işlemi sırasında kimyasal reaksiyonlara girerek, daha yüksek penetrasyon sağlayan aktif bir gazdır.

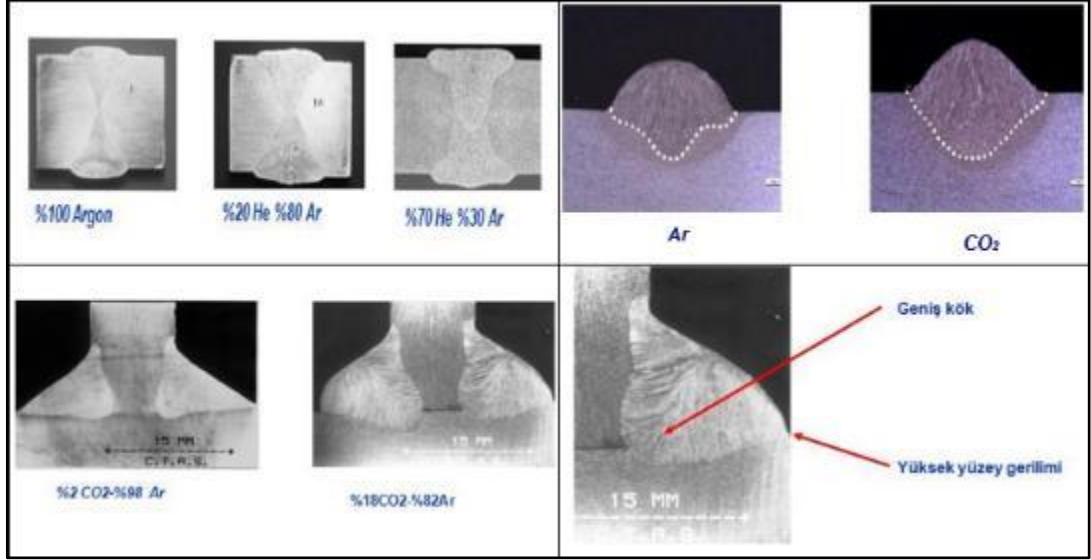
3.3.2.2. Oksijen (O₂)

Oksijen, diğer gazlarla karıştırılarak kullanılabilir ve CO₂ ile birleştirildiğinde kaynağa faydalıdır. Oksijen, kaynak dikişinin hızlı bir şekilde soğumasına neden olarak, dikişin mekanik özelliklerini artırmaya yardımcı olabilir. Ayrıca, CO₂ ile karıştırıldığında oksitlenmeyi önlemeye ve penetrasyonu artırmaya yardımcı olur [32].

3.3.3. Karışım Gazlar

Koruyucu gazın seçiminde kaynak ile birleştirilecek metalin özellikleriyle beraber koruyucu gazın maliyeti ve kaynak işlemi esnasındaki özellikleri de dikkate alınmaktadır. Gazların ayrışma enerjileri, iyonizasyon potansiyelleri, yoğunlukları, ısı ve elektrik iletim özellikleri, maliyetleri büyük farklılık göstermektedir. Bunun sonucunda ark oluşumu, kaynak işlemi sırasındaki özellikleri, ark atmosferinin karakteri, ark içinde malzemenin taşınımı vb. faktörler farklılıklar göstermektedir. Sadece tek bir gaz kullanıldığında bazı avantaj ve dezavantaj gösterdiklerinden dolayı günümüzde gazların iyi özelliklerini en verimli şekilde kullanabilmek ve sınırlamaları

da en aza indirebilmek için MIG–MAG kaynak yönteminde çeşitli karışım gazları (Argon-Oksijen-Karbondioksit gibi) kullanılır [31]. Şekil 3.2’de indirgeyici, aktif ve karışım gazların nüfuziyete etkilerinin makro görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.2. Gaz çeşitliliğinin nüfuziyete etkisi [31].

Koruyucu gaz seçiminde, kaynağın yapılacağı metalin özelliklerinin yanı sıra, gazın kaynak işlemi sırasındaki performansını, gazın maliyetini ve diğer özelliklerini de dikkate alır. Farklı gazların ayrışma enerjileri, iyonizasyon potansiyelleri, yoğunlukları, ısı ve elektrik iletkenlikleri gibi özellikleri büyük ölçüde farklılık gösterir. Bu farklı özellikler, kaynak sırasında ark oluşumu, ark atmosferinin karakteristiği, malzeme taşınımı gibi faktörlerde farklılıklara yol açar. Tek bir gazın kullanılması bazı durumlarda belirli avantajlara sahip olabilirken dezavantajlara da neden olabilir. Bu nedenle, günümüzde MIG-MAG kaynak yönteminde, çeşitli gaz karışımları tercih edilir. Örneğin, Ar, O, CO₂ gibi karışımlar bu yöntemde sıkça kullanılır. Bu karışımlar, her bir gazın avantajlarını en iyi şekilde kullanmayı ve aynı zamanda sınırlamalarını en aza indirmeyi sağlar. Örneğin, CO₂ kaynak işlemi sırasında daha derin bir nüfuziyet sağlayabilirken, oksijen metali daha hızlı oksitlendirme eğilimine sokabilir. Argon ise genellikle bir koruyucu atmosfer sağlamak ve sıçrama oluşumunu azaltmak için tercih edilir. Bu gazların farklı oranlardaki karışımları, istenilen kaynak özelliklerine ve metalin özelliklerine göre ayarlanabilir. Bu şekilde, farklı gazların kombinasyonları, kaynakçıya istediği performansı elde etme ve belirli gazların dezavantajlarını dengeleme imkânı sağlar. Bu da MIG-MAG kaynak

işleminin verimliliğini artırabilir ve daha iyi sonuçlar elde etmeye yardımcı olabilir [31].

Koruyucu gazların seçimi, kaynak işlemi için kullanılan metalin türü, kalınlığı, kaynak amacı ve diğer teknik gereklilikler göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Farklı gazların avantajları ve dezavantajları nedeniyle, doğru gaz karışımları belirlenerek başarılı bir kaynak dikişi elde edilmelidir. Ayrıca, gaz akış hızı, gaz dağılımı, kaynak dikişi boyutu ve penetrasyon gibi faktörleri dikkate alarak, koruyucu gazların etkin bir şekilde uygulanması sağlanmalıdır [32].

3.4. ROBOTİK GAZ ALTI KAYNAĞI

Endüstriyel robotlar günümüz sanayisinde çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Her alanda olduğu gibi endüstride de şartlar, ihtiyaçlar ve imkanlar sürekli olarak değişmektedir. Bu üç öge birbiri ile bağlantılı bir biçimde değişmekte ve gelişmektedir. Teknolojinin zamanla gelişmesi ile çok daha önemli bir hale gelmiştir. Endüstrinin gücünün artırılması ve üretim ihtiyaçlarının karşılanması için ihtiyaca uygun çeşitli robotlar tasarlanmaktadır. Aynı işin çok sayıda tekrarını gerektiren alanlarda da bu robotların çok başarılı olduğu gözlemlenmektedir. Bu endüstriyel robotlar sayesinde hatasız ve seri bir üretimde tekrarlanabilirliği yüksek imalatlar yapmak mümkün olmaktadır [31].

Endüstriyel robot uygulamalarının ilki 1960'lı yılların başında imalat işlerinde kullanılmaya başlanmış olmasına rağmen, günümüzde robotların kaynak işlemlerinde kullanımı her geçen gün artarak devam etmektedir. 1970'li yılların başında ilk olarak otomotiv endüstrisinde robotlu nokta kaynak uygulamaları kullanılmaya başlanmıştır. Robotların bu konudaki önemini anlayan birçok şirket uluslararası piyasalardaki rekabet gücünü arttırmak istediklerinden dolayı, robota dayalı esnek fabrika otomasyon sistemleri kullanmaktadır [33].

Günümüz teknolojisine uygun en kapsamlı ve gerçekçi robot tanımlaması ve robot tiplerinin sınıflandırılması ise Mayıs 1996 tarihinde yayımlanan EN ISO 8373 normunda belirlenmiştir. Bu standarda göre bir robot şöyle tanımlanmaktadır; "Robot,

Endüstriyel otomasyon uygulamalarında kullanılan, üç veya daha fazla programlanabilir eksenli olan, otomatik kontrollü, yeniden programlanabilir, çok amaçlı, bir yerde sabit duran veya hareket edebilen manipulatördür” [34,35].

Özellikle seri üretimde kalite, verimlilik ve maliyet açısından büyük avantaj sunan kaynak robotları sanılanın aksine, elle veya farklı mekanik sistemlerle gerçekleştirilen kaynaktan çoğu zaman daha yavaş kalmaktadır. Kaynak biliminin meydana getirdiği nüfuziyet, ısı yayılımı, çarpılma – distorsiyon gibi fiziksel etmenlerden dolayı robotlu kaynak hızı, farklı yöntemlerle yapılan kaynak prosesiyle benzer hızlardadır. Ancak robotlu kaynak üretiminde, kalifiye bir kaynak ustasının yerine sadece malzeme yükleme ve boşaltma yapabilen bir ara elemana ihtiyaç duyulur. Bu, genellikle taşıma robotları veya diğer otomasyon sistemleriyle gerçekleştirilen yükleme ve boşaltma işlemleri ile sağlanır. Bu şekilde, insan gücü ihtiyacı azalır ve üretim süreci daha otomatik hale gelir.

Robotlu kaynak sistemlerinde kullanılan kaynak telleri, torçlar ve diğer sarf malzemeler genellikle daha uzun ömürlüdür ve daha verimli kullanılır. Bu durum, işletmeler için tasarruf sağlar ve üretim sürecinde maliyetleri düşürebilir. Ayrıca, robotlu kaynak sistemlerinin hassasiyeti ve programlanabilirliği, tekrarlanabilirlik ve kalite açısından da avantajlar sunar. Sonuç olarak, robotlu kaynak sistemleri, belirli sınırlamalarına rağmen seri üretimde verimlilik, kalite ve maliyet avantajları sağlayarak endüstride önemli bir yer tutmaktadır [36].

Endüstriyel robotik kaynak, dünya çapında robotiğin açık ara en popüler uygulamasıdır. Aslında montaj süreçlerinde kaynak işlemi gerektiren çok sayıda ürün bulunmaktadır. Montaj hatlarının araba kaporta atölyelerinde punta ve MIG/MAG kaynak operasyonları ile otomobil endüstrisi muhtemelen bunun en önemli örneğidir. Bununla birlikte, müşteri odaklı, küçük seriler veya her müşteri için tasarlanmış benzersiz ürünler üreten, giderek artan sayıda küçük işletme vardır. Bu kullanıcılar, müşteri ihtiyaçlarına zamanında ve yüksek kalitede cevap verebilecek, iyi ve yüksek düzeyde otomasyona sahip bir kaynak prosesine ihtiyaç duymaktadır.

Gaz altı kaynağı, endüstriyel üretim süreçlerinde yaygın olarak tercih edilen ve çeşitli metal parçaların birleştirilmesinde kullanılan bir kaynak yöntemidir. Son yıllarda, teknolojiye gelişmeler ve endüstrinin ihtiyaçları doğrultusunda, robotik sistemlerin gaz altı kaynağı alanında kullanımını önemli bir artış göstermiştir. Robotik gaz altı kaynağı, otomasyonun artırılması ve verimliliğin sağlanması ile endüstriyel üretim süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır.

Endüstriyel robotlar, gaz altı kaynağı işlemlerinde insana göre birçok avantaj sağlamaktadır. Hassas hareket kontrolü ve programlanabilirlik özellikleri sayesinde robotlar, yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlikle kaynak işlemlerini gerçekleştirirler. Ayrıca, robotlar karmaşık geometrilerde ve zorlu çalışma koşullarında bile etkin bir şekilde çalışabilirler. Bu özellikleri sayesinde robotik sistemler, kaynak işlemlerinin daha verimli ve düzenli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar.

Robotik gaz altı kaynağı, sürekli ve yüksek hızda kaynak yapma kabiliyeti sayesinde verimliliği önemli ölçüde artırır. El gücü ile çalışan kaynakçılara kıyasla robotlar, kesintisiz ve düşük hata oranıyla çalışarak üretim süreçlerinde zaman ve maliyet tasarrufu sağlarlar. Aynı zamanda, robotların sürekli olarak yüksek kalitede kaynak dikişleri oluşturabilme özellikleri, kalite ve verimlilik açısından büyük bir avantaj sunar. Robotik gaz altı kaynağı, doğru bir şekilde programlanmayı ve kaynak parametrelerinin doğru bir şekilde ayarlamayı gerektirir. İlk kurulum ve optimizasyon süreci, uzmanlık ve dikkat gerektiren bir çalışma alanıdır. Ancak, teknolojinin ilerlemesi ve operatörlerin uygun eğitim alması ile bu zorlukların üstesinden gelmek mümkündür.

Robotik gaz altı kaynağı, hatasız çalışma için düzenli bakım ve kontrol gerektirir. Robotlar üzerindeki sensörlerin ve kontrol mekanizmalarının düzgün bir şekilde çalışmasının sağlanması, verimli ve güvenilir kaynak işlemleri için kritik bir öneme sahiptir. Bakım ve kontrol işlemleri düzenli olarak yapılırsa, robotik gaz altı kaynağı yöntemi daha da verimli ve güvenilir hale gelecektir.

Sonuç olarak, robotik gaz altı kaynağı, endüstriyel üretim süreçlerinde otomasyon ve verimliliğin artırılması açısından yenilikçi bir yöntemdir. Robotların hassas kontrol

yetenekleri, sürekli ve yüksek hızda çalışabilme kabiliyetleri, insana göre birçok avantaj sunmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, robotik gaz altı kaynağı yöntemi daha da geliştirilecek ve endüstriyel üretimde daha yaygın olarak kullanılacaktır. Bu sayede, verimlilik artacak, üretim süreçleri daha düzenli ve güvenilir hale gelecek ve insan sağlığı ve güvenliği önemli ölçüde korunmuş olacaktır [24].

Robotik kaynak makinesi kullanmanın birçok avantajı bulunmasına rağmen, aynı zamanda bazı endişeleri de beraberinde getirmektedir. Robotik kaynak ünitesinin satın alınması pahalıdır. Personel ve programlama için eğitimli personele ihtiyaç duyarlar ve sıklıkla bozulabilir veya tamire ihtiyaç duyabilirler. Diğer endişeler ise robot kolunun sınırlı hareketinin robotun gerekli tüm yerlere kaynak yapmasına izin vermeyebileceğidir. Bu, manuel kaynak yapan operatörlerin yine de robotun ulaşamadığı yerlere girip işi bitirmesi gerektiği anlamına gelir. Kaynak yapılması gereken nesne yanlış yerleştirilmişse, kaynak robotu yine tam olarak aynı programlanmış yerlerde kaynak yapacak, böylece kaynaklar "kapalı" olacak veya yanlış yere yerleştirilecektir. Kötü programlama da hatalı sonuçlar üretebilir. Robotlar ayrıca yalnızca birkaç kaynak türüyle sınırlıdır ve bunların birçoğunun soğuması daha uzun sürer ve hatta uygun şekilde kullanılmadığı takdirde metali zayıflatabilir [37].

BÖLÜM 4

KAYNAKLI BAĞLANTILARIN MUAYENE YÖNTEMLERİ

Kaynaklı bağlantıların muayenesi, kaynaklı parçalardaki olası hataları tespit etmek ve istenilen kaliteyi sağlamak amacıyla gerçekleştirilen bir dizi yöntemi içerir. Bu yöntemler, tahribatsız muayene ve tahribatlı muayene olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Hangi muayene yönteminin kullanılacağı, kaynak türüne, malzeme özelliklerine ve kaynaklı parçanın kullanım amacına göre belirlenir [38].

Tahribatsız muayene yöntemleri, kaynaklı parçaları muayene ederken malzemeye herhangi bir zarar vermeden yapılırlar. Bu yöntemler yüzeydeki ve yüzey altındaki kusurları tespit etmek için kullanılırlar. Tahribatsız muayene yöntemleri arasında görsel muayene, manyetik parçacık muayenesi, penetrant muayene, akustik emisyon muayenesi gibi yöntemler bulunur. Bu yöntemler, genellikle kaynaklı parçaların dış yüzeylerindeki çatlaklar, gözenekler gibi kusurları tespit etmek amacıyla yapılırlar.

Tahribatlı muayene yöntemleri ise kaynaklı parçaların yapısına zarar vererek muayene yaparlar. Bu yöntemler daha derinlemesine muayene yapma imkânı sağlarlar ve iç yapılarıdaki kusurları da tespit edebilirler. Tahribatlı muayene yöntemleri arasında kesit muayenesi (kesitli muayene), darbe deneyleri, basınç deneyleri, makro inceleme, mikro inceleme gibi yöntemler bulunur. Bu yöntemler, genellikle iç yapılarıdaki kusurları tespit etmek için kullanılır.

Hangi muayene yönteminin kullanılacağı, kaynağın türüne, malzeme özelliklerine ve kaynaklı parçanın kullanım amacına göre belirlenmelidir. Örneğin, bir uçak parçasının muayenesi farklı bir yaklaşım gerektirebilirken, bir inşaat demiri kaynağının muayenesi farklı bir yöntemle yapılabilir. Ayrıca, muayene sonuçlarının güvenilirliği ve yeterliliği de göz önünde bulundurulmalıdır [39].

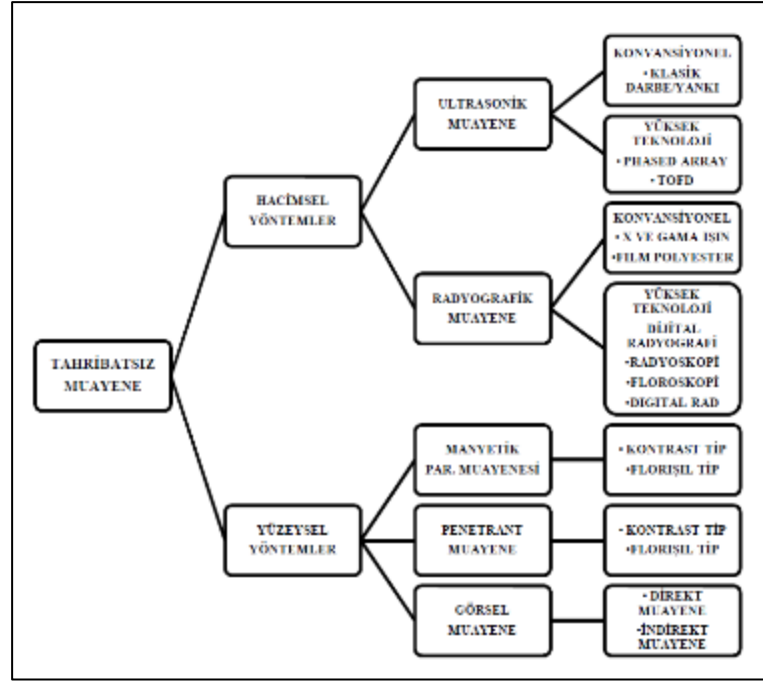
4.1. TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

Tahribatsız test yöntemleri; malzeme veya sistem bütünlüğüne zarar vermeden, söz konusu malzemenin kullanılabilirliğini etkileyebilecek herhangi bir anormalliği tespit etmek veya diğer malzeme özelliklerini değerlendirmek için kullanılan çeşitli test yöntemlerini içerir [40].

Tahribatsız muayene, kalite kontrolün kritik bir parçasıdır ve genellikle üretim sürecinin tamamlayıcı ve son aşamasını oluşturur. Bu yöntem, üretim öncesi araştırma ve geliştirme aşamalarında ve üretim sonrası işletme süreçlerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Tahribatsız muayene, incelenen parçaya zarar vermeden gerçekleştirilen, parçanın dinamik ve statik yapıları hakkında bilgi sağlayan muayene yöntemlerini içerir. Bu yöntemler, laboratuvara gitmeyi veya malzemedan numune almayı gerektirmez; testler, parçanın bulunduğu ortamda doğrudan parça üzerinde gerçekleştirilir. Bu özellik, üretim esnasında yeni parçalardan başlayarak periyodik bakımlara ve hatta işletme sırasında serviste bulunan parçalara kadar geniş bir kullanım alanı sağlar. Bu durumlarda, parçaları sökmeye gerek kalmadan ve bazen işletmeyi durdurmadan muayene yapılabilir. Özellikle yorulma belirtilerinin tespiti için tahribatsız muayene yöntemlerinden faydalanılabilir. Bu yöntemler, hızlı ve pratik olmalarının yanı sıra, özellikle çatlak gibi yorulma belirtilerinin ortaya çıkarılmasında büyük öneme sahiptir [41].

Yüzey hata yöntemleri; malzemelerin yüzeye açık, yüzey altından ve yüzeye yakın bulunan süreksizlik/hataların tespitinde kullanılır. Yüzey yöntemleri; görsel muayene, penetrant (sıvı girinim), manyetik parçacık, girdap akım kontrolleridir.

Hacimsel hata yöntemleri; ise malzemede test bölgesinin tamamına nüfuz etmek suretiyle hataların algılanmasını sağlar [40]. Şekil 4.1'de tahribatsız muayene yöntemleri; hacimsel yöntemler ve yüzey yöntemleri ile ilgili tabloya yer verilmiştir [42].



Şekil 4.1. Tahribatsız muayene yöntemleri [42].

4.1.1. Görsel Muayene

Optik destekli bir yöntem olan görsel muayene, bir kaynak ürününün yüzeyindeki süreksizlikler, yapısal bozukluklar, yüzey durumu gibi kaliteyi etkileyen özelliklerin, optik yardımcıları (örneğin büyüteç gibi) kullanılarak veya kullanılmaksızın incelenmesidir. Görsel muayene genellikle diğer muayene yöntemlerine geçilmeden önce uygulanır ve bu nedenle büyük öneme sahiptir. Kaynak ile ilgili ilk değerlendirme bu yöntemle yapılır ve yüzeysel kaynak kusurlarının tespitinde kullanılır [39].

Gözle yapılan muayene, belirli boyuttaki veya belirgin özellikteki hataları tespit etmede etkili olsa da daha detaylı veya mikroyapıdaki hataların tespiti için ek yöntemler gerekebilir. Bu durumda, daha hassas muayene teknikleri kullanılarak malzemenin daha detaylı incelenmesi sağlanabilir [41].

Bu yöntemde, muayene edilecek veya gözlemlenecek yüzey (kaynak metali ve ITAB) ile gözlem noktası arasındaki açı değeri en az 30° olmalıdır, aksi takdirde verimli bir muayene yapılamaz.

EN ISO 17637 standardına göre, kaynaklar için genel kuralları belirleyen bu standartta göre, muayene yüzeyindeki aydınlatma şiddeti en az 350 lux olmalıdır. Ancak bu değerin detaylı bir muayene için 500 lux olması gerekir. Ayrıca doğrudan muayene yapılırken, muayene yüzeyi ile göz arasındaki mesafenin 600 mm'yi aşmaması gerekmektedir. Bu kural, muayene sırasında yüzey detaylarını daha iyi görmek ve hassas sonuçlar elde etmek için belirlenmiştir. Kaynakların görsel muayenesini yapacak olan personelin ve kaynakların nihai kabulü için sonuçların değerlendirilmesi, ISO 9712'ye göre veya ilgili endüstriyel sektörde uygun bir seviyedeki eşdeğerine göre kalifiye edilmektedir [43].

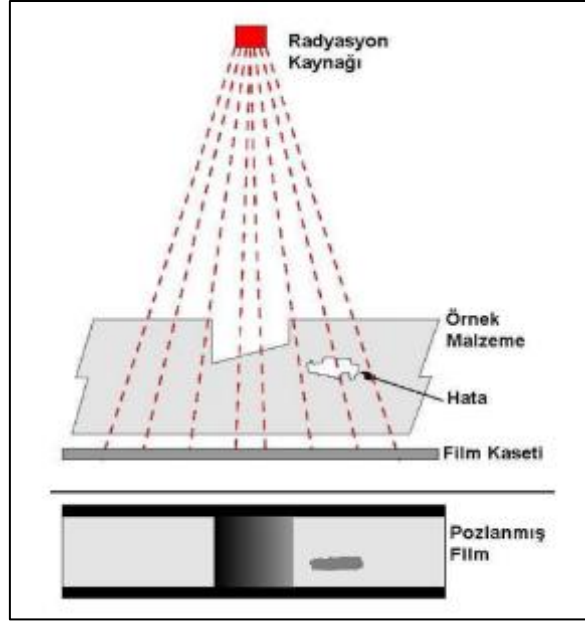
4.1.2. Radyografik Muayene

Radyografik Muayene; X-ışınları, gama ışınları ve radyo-izotop kaynaklarını içerir. Malzeme içerisindeki veya kaynak bölgesindeki iç çatlaklar ve hataların tespit edilmesinde kullanılır. Işınlar, malzemenin içinden geçerken malzemenin yoğunluğuna bağlı olarak emilirler ve sonrasında bir floresan ekran veya fotografik film tabakası üzerinde görüntüler oluşturulur. Malzeme içerisindeki çatlaklar, gözenekler, boşluklar gibi süreksizlikler, ana malzemenin görüntüsünden daha koyu olarak belirirken, yabancı maddeler (örneğin, cüruf kalıntıları) ana malzemeden daha yoğun olduğundan daha açık bir görüntü oluştururlar. Bu farklılık, muayene edilen malzemenin içindeki ve yapısındaki değişiklikleri tespit etmeye yardımcı olur [42].

Bu işlemde, elektronik cihazlar aracılığıyla X ışınları üretilirken, gama ışınları radyoaktif elementler kullanılarak üretilir. Bu ışınlar, malzeme ile etkileşime girer ve içinden geçerken, bir kısmı malzemenin et kalınlığı ve yoğunluğuna bağlı olarak absorbe edilir. Malzeme tarafından emilemeyen enerji ise filme nüfuz eder. Filmdeki koyu renkler, bu noktalara daha fazla enerjinin girdiğini gösterir.

Malzeme meydana gelen süreksizlikler, boşluklar, çatlaklar gibi durumlar, malzemenin kalınlığının azaldığı yerler olarak kabul edilir ve film üzerinde koyu şekiller olarak görünür. Öte yandan, malzeme içinde tungsten gibi ağır metal kalıntılarının bulunması, film üzerinde parlak beyaz bir renk oluşturur. Bu yöntem, malzeme iç yapısındaki detayları incelemek ve potansiyel kusurları tespit etmek için

kullanılan etkili bir radyografik muayene yöntemidir. Şekil 4.2’de gösterildiği gibi radyografik test çalışma prensibi gösterilmiştir [44].



Şekil 4.2. Radyografik test çalışma prensibi [44].

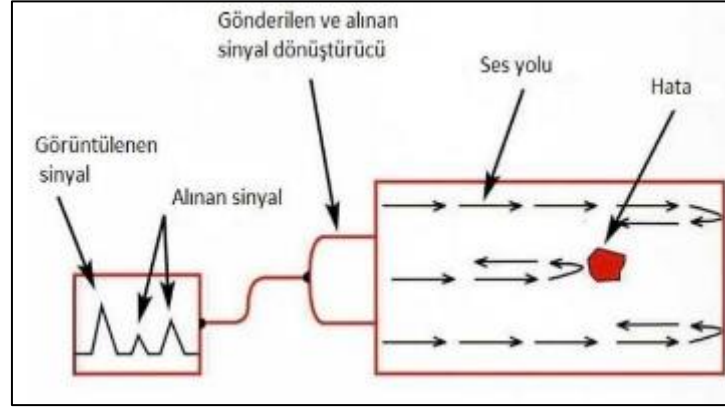
Radyografik muayene, tam nüfuziyetle ve T-birleşim kaynaklı imalat parçalarının veya numunelerinin kontrolü için kullanılan bir yöntemdir. Kaynaklı imalatta, kaynakların kabul edilen Avrupa standartlarına uygunluğu TS EN ISO 5817 (çelik) ve TS EN ISO 10042 (alüminyum) gibi standartlarla değerlendirilir.

Kaynak hatalarının kabul seviyeleri TS EN ISO 10675-1 ve TS EN ISO 10675-2 standartlarına göre belirlenir. Bu standartlar, hangi tür kaynak hatalarının kabul edilebilir olduğunu belirleyen kılavuzları içerir. TS EN ISO 17635 standardı altında bu tür standartlar ve yönergeler kullanılarak radyografik muayenelerin gerçekleştirilmesi ve sonuçların değerlendirilmesi sağlanır [39].

4.1.3. Ultrasonik Muayene

Ultrasonik muayene, teste tabi tutulacak test parçasındaki süreksizliklerin tespiti için 0.2-25 MHz aralığındaki frekansta kullanılan probler tarafından üretilen ses dalgasının malzeme içine gönderilerek malzemedeki kat ettiği mesafenin ölçümü yapılarak

kullanılan tahribatsız muayene yöntemidir [45]. Ultrasonik muayene, hacimsel muayene yöntemlerinden biridir ve test prensibi, bir prob tarafından üretilen yüksek frekanslı ses dalgalarının test malzemesinin hacminde yayılması ve darbe yankı tekniği bu hacim içindeki süreksizliğe çarptıktan sonra tekrar proba yansımaları temeline dayanır. Şekil 4.3'te ultrasonik muayene hata tespiti gösterilmiştir [46].



Şekil 4.3. Ultrasonik muayenede hata tespiti [47].

Ultrasonik muayene yöntemi ile tüm tam nüfuziyetle ve T-birleşim kaynaklı imalat parçalarının veya numunelerinin kontrolü mümkündür. Kaynaklı imalatta kaynakların Avrupa'da kabul görmüş standartları, TS Ultrasonik testler üç ayrı bölümde değerlendirilir. Ultrasonik muayenenin klasik yöntemi, test malzemesine klasik ultrasonik cihazlar kullanılarak yapılan bir yöntemdir. Bu metodun standartları, TS EN ISO 17640'ta bulunmaktadır.

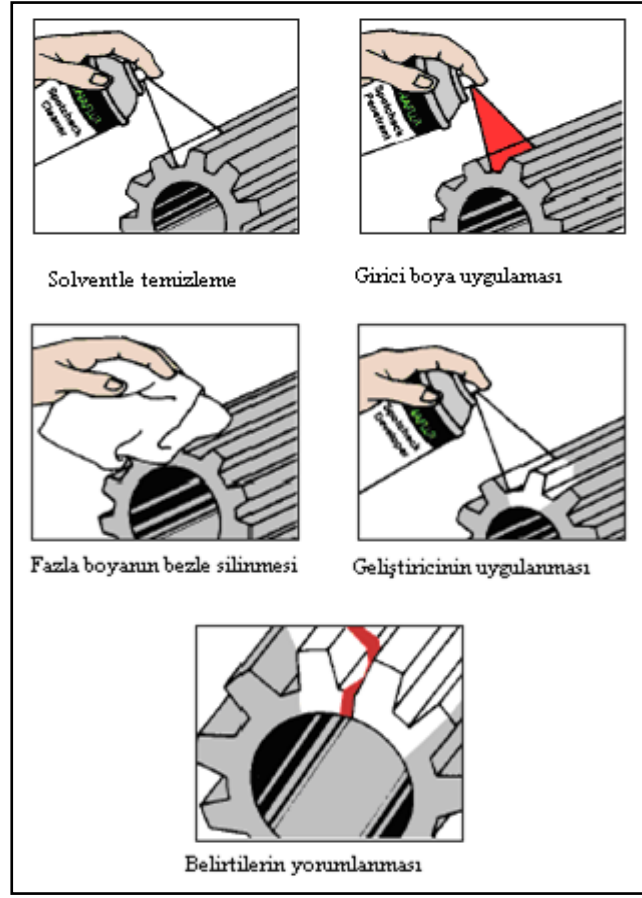
Günümüzde ise önemi ve kullanımı artan TOFD (Time-of-Flight Diffraction) metodu, EN ISO 10863 standardına göre ve Phased Array tekniği, EN ISO 13588 standardına göre gerçekleştirilir. Bu farklı tekniklerin kullanılması nedeniyle kabul seviyeleri de ayrı ayrı standartlarda tanımlanmıştır [39].

Klasik ultrasonik muayene tekniğinde, kayıt alınması imkânı olmadığı için muayene personelinin deneyim ve bilgisi büyük önem taşır. Bu nedenle güvenilirliği daha gelişmiş yöntemlere kıyasla daha düşüktür. TOFD ve Phased Array tekniklerinde ise muayene sırasında kayıt alınabilir, bu da daha güvenli ve tekrar incelenebilir sonuçlar sağlar. Bu avantajlar nedeniyle bu teknikler tercih edilir [48].

4.1.4. Sıvı Penetrant Metodu ile Muayene

Sıvı penetrant muayenesi, ilgili parçaların yüzeylerindeki kırılma veya çatlak gibi kusurları belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu teknik, kusur olan bölgelere renkli veya floresan özellikteki boyaların uygulanması ve ardından fazla boyanın temizlenmesi prensibine dayanır. Bu şekilde, boyanın yüzeyden çekilmesiyle kusurların açığa çıkması ve gözle görünür hale gelmesi sağlanır. Bu yöntem, yüzeydeki ufak çatlaklar veya kırılmalar gibi kusurların tespit edilmesine yardımcı olur ve bu sayede malzemenin güvenliği ve kalitesi hakkında bilgi sağlar.

Penetrant testi katı bir parçanın yüzeyine özel bir sıvının püskürtülmesi veya parçaların özel bir sıvıya daldırılması yoluyla başlar. Bu sıvı, genellikle yüzeyde açık çatlaklar gibi kusurların içine nüfuz edebilen özel bir penetrant maddedir. Parçanın yüzeyi bu sıvıyla kaplandıktan sonra belirli bir süre beklenir. Bu süre boyunca, sıvı çatlaklar boyunca kılcal bir şekilde hareket eder ve kusurların içine nüfuz eder. Daha sonra, belirli bir süre bekledikten sonra, fazla penetrant yüzeyden temizlenir. Ardından, bir geliştirici (developer) uygulanır. Geliştirici, penetrant maddenin emdiği ve içine nüfuz ettiği kusur bölgelerini ortaya çıkarmak için kullanılır. Bu aşamada, penetrant maddenin kusurlu bölgelerdeki kalıntıları geliştirici yardımıyla görsel olarak belirgin hale gelir ve çatlaklar gibi kusurlar açıkça görülebilir hale gelir. Bu yöntem, parçanın yüzeyindeki açık çatlaklar gibi belirgin kusurları tespit etmek için etkili bir yoldur [49]. Bu test için, parçanın sıcaklığı ortam sıcaklığına dikkate değer bir şekilde yakın olması önemlidir. Genellikle sıcaklığın 10 ila 50 derece arasında olması tavsiye edilir [48]. Şekil 4.4'te sıvı penetrant muayene aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Sıvı penetrant muayene aşamaları [50].

4.1.5. Manyetik Parçacık Metodu ile Muayene

Manyetik parçacık testi, malzemelerin tahribatsız olarak incelenmesinde kullanılan pratik test yöntemlerinden biridir. Bu test yöntemi, diğer yöntemlere göre daha hızlı ve derinlemesine yüzey hazırlığı gerektirmez. Bu özellikleri, manyetik parçacık testini en sık tercih edilen yöntemlerden biri haline getirir. Bu yöntemde, küçük manyetik partiküller ve manyetik alan hata tespiti için kullanılır. Test edilecek parçaların bu yöntemle incelenebilmesi için önemli bir kısıt, parçaların mutlaka ferromanyetik özellikte olması gerekliliğidir. Yani, demir (Fe), nikel (Ni), kobalt (Co) gibi ferromanyetik özellikte olan alaşımları içermesi gerekmektedir. Bu özellik, manyetik parçacık testinin uygulanabilir olduğu malzemeleri sınırlar; ancak uygun malzemelerde kullanıldığında, hızlı ve etkili bir şekilde kusurları tespit etme yeteneği sunar [49].

Manyetik parçacık muayenesi genellikle ferromanyetik özellikteki test yüzeyleri veya hemen altındaki çatlakların tespitinde kullanılır. Bu test sırasında, bir malzemenin yüzeyinde hata bulunan bölgelere manyetik bir alan uygulandığında, yüzeye ferromanyetik tozlar serpilir. Bu tozlar, hataların bulunduğu bölgelerde manyetik alanın etkisiyle çekilir ve bu bölgelerde toplanır. Böylece, mevcut süreksizliklerin yerleri belirlenmiş olur. Manyetik parçacık muayenesi, yüzeydeki ve yakınındaki çatlaklar gibi hataları tespit etmede etkili bir yöntemdir ve endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır [41].

4.2. TAHRİBATLI MUAYENE YÖNTEMLERİ

Kaynak yapılmış malzemenin ve kaynağın, muayene esnasında kalıcı olarak şekil değiştirip; hasar gördüğü muayene yöntemlerine tahribatlı muayene yöntemleri denir. Çekme testi, eğme testi, kırma testi, sertlik testi tahribatlı muayene yöntemlerden başlıcalarıdır [51]. Tahribatlı testlerin test edilen parça veya numuneleri değiştirip, zarar verdiğini unutmamak önemlidir. Bu nedenle genellikle üretim fazının bir alt kümesinde veya kalite kontrol prosedürleri sırasında kaynak bütünlüğünü ve güvenilirliğini sağlamak için tercih edilen yöntemler olarak kullanılır. Tahribatlı testler, kaynaklı birleşimlerin kalitesi hakkında değerli bilgiler sağlar ancak üretim aşamasında potansiyel kusurları tespit etmek için (radyografi, ultrasonik test, manyetik parçacık testi ve boya penetrant testi gibi) tahribatsız test yöntemlerinin kullanılması da önemlidir [39].

4.2.1. Sertlik Deneyi

Sertlik testi; bir malzemenin yüzey sertliğini değerlendirmek veya ölçmek amacıyla kullanılan bir test yöntemidir. Bu test, malzemenin direnç gösterdiği bir şekilde tanımlı bir yüke veya kuvvet uygulayarak, malzemenin yüzeyinde bir iz bırakma prensibine dayanır. Bu iz, özel bir şekilde tasarlanmış bir sertlik indenter (sıkıştırıcı) ile oluşturulur ve ardından izin boyutu veya derinliği ölçülerek malzemenin sertliği belirlenir. Sertlik testleri, malzemenin fiziksel özelliklerini, dayanıklılığını, mukavemetini ve mekanik davranışını anlamak için kullanılır. Ayrıca, malzemelerin işlenebilirliğini ve ısıl işlem sonuçlarını değerlendirmede de önemli bir rol oynarlar [52].

Sertlik testleri genellikle iki temel yöntemle gerçekleştirilir: Mikro sertlik testi, küçük ve ince numunelerin sertliğini ölçmek için kullanılır. Mikro sertlik testleri, yüksek büyütme mikroskopları ve özel mikro indenterler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu ölçümü yapabilmek için malzemenin yüzeyinin temiz ve pürüzsüz olması gerekir. Bu durum doğru ölçüm sonuçları elde etmek için önemlidir [53].

Makro sertlik testi ise daha büyük numunelerin sertliğini ölçmek için kullanılır. Bu yöntemde daha büyük bir yük ve daha büyük bir indenter kullanılır. Sertlik testi sonuçları, genellikle sertlik ölçeğine göre ifade edilir. Farklı sertlik ölçekleri farklı malzemeler ve uygulamalar için tasarlanmıştır. Sık kullanılan sertlik ölçekleri arasında Rockwell, Brinell ve Vickers yer alır.

Sertlik testi; malzeme seçimi, kalite kontrolü, üretim süreçleri ve mühendislik tasarımlarında önemli bir araçtır. Özellikle kaynaklı birleşimlerin dayanıklılığı ve kalitesini değerlendirmede sıkça kullanılır.

4.2.2. Çekme Deneyi

Çekme testi, malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik özelliklerini hakkında bilgi edinebilmek için yapılan bir deneydir. Çekme deneyi tahribatlı muayene yöntemlerinin içinde en fazla kullanılan yöntem denilebilir [53].

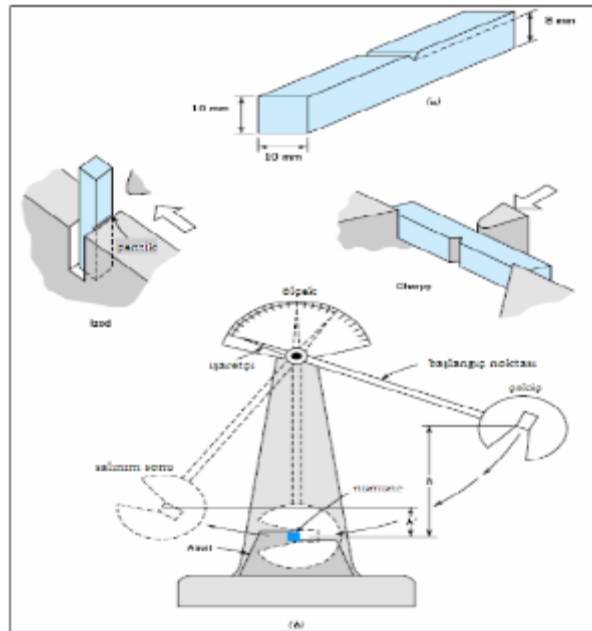
Çekme deneyinin amacı; bir malzemenin mekanik özelliklerini belirlemektir. Bu test, malzemenin dayanıklılığını, elastisite limitini, akma dayanımını, kopma dayanımını, uzama ve kırılma davranışını anlamak için kullanılır. Deney sırasında numunenin uygulanan yüküne ve gerilmesine dair veriler kaydedilir. Bu veriler daha sonra gerilme-değişim grafiği olarak çizilir [39].

Teknolojinin gelişmesi, çekme deneyi sonuçlarının elde edilmesini daha kolay hale getirmiştir. Günümüzde, deney cihazları ve yazılımları, otomatik olarak deney sonuçlarını analiz eder ve grafiksel olarak sunar. Bu sayede, bu önemli mekanik özelliklerin elde edilmesi ve analiz edilmesi daha hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu veriler, malzeme mühendisliği, üretim süreçleri ve ürün

geliştirme aşamalarında önemli kararlar alınmasına yardımcı olur. Çekme testi, malzeme seçimi, tasarım ve kalite kontrol süreçlerinde önemli bir rol oynar. Ürünlerin güvenilirliğini ve performansını değerlendirmede kullanılır. Farklı malzemelerin mukavemetini karşılaştırmak ve belirli bir uygulama için malzeme seçmek için kullanılan önemli bir test yöntemidir [54].

4.2.3. Çentik Darbe Deneyi

Çentik darbe deneyi, metalik malzemeler için özel olarak geliştirilmiş bir testtir. Bu test, bir malzemenin direncini ve darbelere karşı dayanıklılığını ölçmek amacıyla kullanılır. Bir malzemenin tokluğu, kırılmadan önce içine absorbe edebildiği enerji olarak bilinir ve bu enerji, birim alana düşen enerji olarak tanımlanır. Deneyde, belirli bir yükseklikten sabit ağırlıklı bir çekiç bırakılır ve salınmaya başlar. Çekiç, aşağı doğru hareket ederken numuneye çarparak onu kırar. Sonrasında, ilgili formüller kullanılarak numune tarafından absorbe edilen enerji hesaplanır. Bu hesaplanan enerji, genellikle sıcaklık değişimi veya deformasyon verileri ile ilişkilendirilerek çeliklerde süneklik ve kırılma davranışı arasındaki farklılıkların belirlenmesinde sıkça kullanılır [55]. Şekil 4.5’de çentik darbe deneyi test prensibinin olduğu görsel verilmiştir.

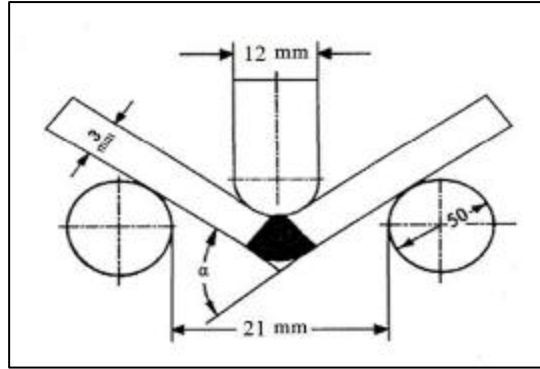


Şekil 4.5. Çentik darbe deneyi [53].

Çentik darbe deneyi, malzemelerin yapısal bütünlüğünü değerlendirmek ve özellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılan malzemelerin dayanımını belirlemek için önemlidir. Bu deney, malzemelerin beklenmedik yüklemeler altında nasıl davrandığını anlamak ve yapısal tasarımlarda güvenilirlik sağlamak için kullanılır [56].

4.2.4. Eğme Deneyi

Eğme testi, belirli standartlara uygun olarak hazırlanmış bir numuneye üç farklı noktadan yükün uygulandığı ve belirli bir hızda, sabit sıcaklık altında tek bir noktadan kuvvet uygulanması işlemidir. Şekil 4.6'da eğme testi prensibine ait göresel verilmiştir. Bu test, malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede sıkça kullanılan bir tahribatlı test yöntemidir. Bu deney, malzemenin eğilme karşısındaki direncini değerlendirerek, malzemenin bu tür bir yük altında nasıl davrandığı hakkında bilgi sağlar [57].



Şekil 4.6. Kaynak dikişleri eğme deneyi uygulama prensibi [57].

Test sonuçları, malzemelerin mekanik davranışını, dayanıklılığını ve yapısal performansını değerlendirmek amacıyla kullanılır. Eğme testi, malzemelerin gerçek dünya koşullarında nasıl tepki verdiğini anlamada önemli bir araçtır ve mühendislik tasarımında ve malzeme seçiminde geniş bir uygulama yelpazesi sunar [39].

4.2.5. Makroyapı İncelemesi

Makro inceleme, çıplak gözle ya da 10X büyütme bir büyüteç kullanılarak gerçekleştirilen bir inceleme işlemidir. Bu nedenle; geniş bir alanın kısa bir sürede incelenebilmesini sağlar. Makro yapı incelemesi, kalıntıların incelenmesinde genellikle ilk aşama olup, mutlaka yapılması gereken bir uygulamadır. Makro inceleme sürecinde, küçük kalıntılar değil, daha büyük boyuttaki kalıntılar tespit edilebilir. Bazı üretimlerde, makro inceleme yeterli görülebilir ve bu aşama, genellikle belirli bir seviyede kalıntı tespiti için yeterli olabilir. Ancak, daha detaylı analiz veya incelemeler için mikroskopik düzeyde incelemelere ihtiyaç duyulabilir [53].

4.2.6. Mikroyapı İncelemesi

Mikroyapı incelemesi; çatlaklar, mikroskobik boyuttaki kalıntılar, tane sınırları, kaynak metalinin yapısı, ısıdan etkilenen bölge ve kaynak metalindeki mikro bileşenlerin dağılımı gibi özellikleri incelemek için bir fırsat sunar. Bu yöntem, malzemenin iç yapısını incelemek için kullanılmaktadır. Yöntemin aşamaları şunlardır: numune alımı, metalografik hazırlık, zımparalama, parlatma, asitle dağlama ve mikroskobik inceleme. Numunenin alınacağı bölge belirlendikten sonra, kesici taş, testere gibi aletlerle numune kesimi gerçekleştirilir. Kesme işlemi sırasında, malzemede plastik deformasyona yol açmayacak ve ısı girdisini minimize edecek bir yöntem seçilmelidir, çünkü malzemenin asıl iç yapısı da bu sırada incelenmektedir. Zımparalama işlemi akabinde numuneler parlatma disklerinin üstüne alınır ve parlatma işlemi tamamlanır. Nihai parlatmadan geçirilen numunelerin yüzeyi ısıyı eşit bir şekilde dağıttığından, mikroskobik incelemelerde yapıdaki ayrıntılar ayırt edilemez. Bu sebeple yapıda kontrast oluşturmak amacıyla parlatılan numunelerde iç yapıların incelenmesi için dağlama gereklidir. Dağlama işlemi sırasında, numunenin dağlama çözeltisinde uzun süre bekletilmemesi gerekmektedir; aksi takdirde kararma oluşabilir [58].

BÖLÜM 5

LİTERATÜR TARAMASI

S355J2 yapı çeliği ile aşınmaya dayanıklı Hardox 450 zırh çeliğinin MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmesi için gerekli olan kritik bazı bilgiler araştırılarak çalışmayı kolaylaştırması için malzeme özelinde literatür taraması yapılmış ve aşağıda verilmiştir.

Krawczyk [59] çalışmasında; 300×430x50 mm ebatlarında S355J2+N malzemeleri 1.2 mm ilave tel ile (EN ISO 14341-A) M21 karışım gaz (%82 argon, CO₂ %18) kullanarak V kaynak ağzı açarak, farklı ısı girdilerinde 21 paso ile birleştirmiş ve kaynaklı bağlantılara tahribatsız olarak gözle muayene, manyetik parçacık testi, ultrasonik test ve radyografik testler uygulamışlardır. Ayrıca kaynaklı bağlantılara tahribatlı olarak çekme, eğme, çentik darbe ve sertlik testleri uygulanmıştır. Tahribatsız testler sonucunda kaynaklı numunelerde kaynak kusurlarının bulunmadığı rapor edilmiştir. Çekme testleri sonucunda kopmanın ana malzemedan meydana geldiği, eğme testleri sonucunda da kaynak bölgesinin 180° eğilebildiği dolayısıyla kaynak bölgesinin kusursuz olduğu sonucu belirtilmiştir. Çentik darbe testleri sonucunda standartlarda istenen 27 J değerinin üzerine çıkmış ve en düşük darbe dayanımı ITAB'dan 41.3 J olarak ölçülmüştür. Sertlik testleri sonucunda en yüksek sertliğin kaynak metalinde en düşük sertliğin ise ana malzemede olduğu belirtilmiştir. Uygun koşullarda doğru malzeme seçimi ve doğru kaynak pozisyonunun belirlenmesi ile yüksek kaynak verimliliği sağlanabileceği belirtilmiştir.

Ateş vd. [60] gerçekleştirdikleri çalışmada; 15 mm malzeme kalınlığında S355J2+N çeliğinin kaynağında koruyucu gaz karışımlarının kaynaklanabilirlikteki etkilerini incelemişlerdir. Kaynak esnasında 180 A akım ve 28 V gerilim ve koruyucu gaz olarak O₂ ve CO₂ karışım gazları kullanılmıştır.

Yapılan testler sonucunda, en yüksek akma dayanımı değeri 421 MPa olarak Ar %93 + CO₂ %7 gaz karışımı altında kaynaklanırken; diğer yandan, en düşük akma dayanımı değeri 339 MPa olarak Ar %85 + O₂ %15 gaz karışımı olduğu görülmüştür. % uzamalar incelendiğinde ısı girdi miktarı ve gaz karışım oranlarının numuneler üzerinde önemli bir etkisi olduğu daha yüksek ısı girdisinin numunelerin daha fazla uzamasına neden olduğu belirtilmiştir. -20°C’de gerçekleştirilen çentik darbe testleri sonucunda en yüksek darbe dayanımı sonuçları, 75 J ile Ar %85 + CO₂ %15 gaz karışımı altında birleştirilen numunelerden elde edilmiştir. En düşük darbe dayanımı sonuçları ise Ar %93 + O₂ %2 + CO₂ %5 gaz korumasında birleştirilen numuneden 40 J ile elde edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, gaz-metal ark kaynağı işleminden sonra malzeme özelliklerinin tahmin edilmesi için Yapay Sinir Ağı (YSA) tabanlı bir yöntem kullanılmıştır. Birçok mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan bir işlem olduğundan, bu yöntem teknisyenlere ve mühendislere, herhangi bir kaynak işlemi öncesinde kaynak parametreleri ile ilişkili ve numunelerin mekanik özellikleri hakkında fikir edinmeleri açısından fayda sağlamada yardımcı olduğu belirtilmiştir. Bazı tahmin edilen değerlerin deneysel verilerle uyumlu olduğu kanıtlanmışken, bazılarının ise daha yüksek hatalara sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle, özellikle kaynak öncesinde koruyucu gaz oranları belirlendiğinde akma dayanımı ve uzama değerlerini tahmin etmek için bu yöntemin kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. Yöntem; mühendisler için kaynak gazı seçimini çok kısa bir süre içinde belirlemekte yardımcı olurken aynı zamanda kaynak maliyetlerini azaltmaya da katkı sağlamaktadır.

Martinez vd. [61] yaptıkları çalışmada; 300 mm x150 mm x 6 mm boyutlarında Hardox 400 mikro alaşımlı çeliklerde ön ısıtma, kaynak sonrası ısı işlemlerin etkisi ve çoklu paso kaynağının MAG gaz altı yöntemindeki davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmalarında dolgu teli olarak AWS A5.18 kaynak teli kullanılmışlardır. Kaynaklı malzemelerin farklı ısılardan etkilenen bölgelerinin mikroyapısı değerlendirilmiş ve bu bölgelerin mekanik özellikleri farklı koşullar altında ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar; çeliği ön ısıtmayla beraber, sertliğin en düşük olduğu bölgeye kadar olan mesafenin artmasından oluşan faydalı bir etkiye işaret ettiği gözlemlenmiştir. Son ısıtma işleminin bağlantı dayanımını arttırdığı ve bu durumun; birleşim ön ısıtma ile yapıldığında daha da belirgin hale geldiği

belirtilmiştir. Çoklu paso kaynağın tek bir kaynak geçişi ile karşılaştırıldığında herhangi bir avantaj sağlamadığı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak Hardox 400 mikro alaşımlı çeliklerin kaynaklarında sertleştirilmiş bir durumda tedarik edilebilir olduğunu belirtmişlerdir.

Yılmaz [19] tarafından gerçekleştirilen çalışma kapsamında, Hardox 400 aşınmaya dayanıklı çelik levhaları, SG2 ve SG3 masif kaynak telleri ile E 71 T-1 adlı özlü kaynak teli kullanılarak V-kaynak ağızı formunda ve yatay pozisyonda birleştirilmiş ve farklı kaynak telleriyle birleştirilen levhaların mikroyapı ve mekanik özelliklerindeki benzerlikleri ve farklılıkları araştırılmıştır. Kaynak bölgelerinin mikroyapı analizi, optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiş ve mikrosertlik dağılımları belirlenmiştir. Çalışmalar sonucunda HARDOX 400 çeliğinin çekme mukavemeti değerleri, SG2, SG3 ve E 71 T-1 özlü kaynak telleri ile birleştirilen levhaların birleştirme mukavemet değerlerinden yüksek çıktığı, birleştirilen HARDOX 400 çelik levhalara uygulanan çekme testleri sonucunda bütün numuneler, mekanik özelliklerin zayıf olduğu düşünülen ITAB bölgesinden koptuğu görülmüştür. Ayrıca birleştirmelerde mekanik özellikleri en yüksek olan levhanın, SG3 masif kaynak teli ile birleştirilen numunelerden elde edildiği ve abrazif aşınmaya maruz kalan ekipmanların üretiminde yaygın olarak kullanılan HARDOX 400 çeliğinin; hem yüksek mekanik değerler sunan SG3 masif kaynak teli, hem de yüksek hız ve dolgu oranlarında kaynak yapabilen özlü kaynak telleri kullanılarak başarılı bir şekilde birleştirilebileceğini gösterilmiştir.

Savaş [62] yaptığı çalışmada; 4 mm kalınlığındaki Hardox çeliği ile paslanmaz çelik ve St52 malzemeleri MIG kaynağı ile birleştirilmesi sonucunda ortaya çıkan mekanik davranışları incelenmiştir. Çalışmasında endüstriyel bir ortamda Hardox çeliğin kendi arasında gerçekleştirilen kaynak işlemine odaklanılmıştır. Kaynak işlemleri 7,49 m/dk tel işleme hızı, 20,8 V ve 165 A akım değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Koruyucu gaz olarak ArCO₂ gazı tercih edilmiş, paslanmaz Si307 tipi kaynak teli, kaynak işlemi için tercih edilmiştir. Kaynaklı bölgelerin özellikleri çekme, darbe dayanımı ve sertlik testleri kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, mikroyapı analizi yapılarak kaynak bölgesinin yapısı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sertlik deneylerinin sonuçlarına göre, Hardox-Hardox birleştirmesinde ana metalde en yüksek

sertlik değeri ortalama 403 HV olarak tespit edilmiştir. Bunun ardından ITAB'da 365 HV ve ITAB sınırlarında 330 HV değerleri elde edilmiştir. Hardox-Paslanmaz çelik birleştirmesinde ise ana metalde 388 HV sertlik ölçülmüştür. Paslanmaz çelikte sertlik 200 HV olarak belirlenmişken, ITAB'da ortalama 230 HV olarak ölçülmüştür. Hardox-St52 çeliğinde ise ana metalde 368 HV, ITAB ortalama 270, ITAB sınırları sırasıyla 190 HV ve 310 HV olarak belirlenmiştir. Kaynak metalinde ise 200 HV sertlik ölçülmüştür. Çekme testi sonuçlarına göre, en yüksek dayanıklı bağlantı, 640 MPa ile Hardox-Paslanmaz çelik birleştirmesi arasında elde edilmiştir. Hardox-Hardox bağlantısında dayanım 400 MPa civarında ölçülürken, Hardox-St52 bağlantısında yaklaşık 350 MPa dayanım elde edilmiştir. Darbe tokluk testinde ise en yüksek sonuç, 68 J değeri ile paslanmaz çelik kaynağından elde edilmiştir. Bununla birlikte, Hardox çeliği ile yapılan numunede 44 J ve St52 çeliği ile yapılan numunede 38 J değerleri ölçülmüştür.

Özturan vd. [63] yaptıkları çalışmada, Hardox 450 ve S355J2C+N çeliklerinin gaz metal ark kaynağı (GMAK) yöntemiyle farklı birleştirmelerinde, mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında, Vickers mikrosertlik (HV 0.1), eğilme, Charpy V çentik darbe dayanımı, aşınma ve çekme gibi çeşitli mekanik testler kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, optik mikroskopi (OM), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopisi (FESEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX), X-ışını kırınımı (XRD), elektron geri saçılma kırınımı (EBSD) ve taramalı elektron mikroskopisi (TEM) gibi analiz yöntemleri uygulanmıştır. Bu analizler sayesinde; kaynak bölgesinin mikroyapısındaki değişiklikler detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu değişikliklerin mekanik özelliklere olan etkileri ayrıntılı bir şekilde belirlenmiştir. Özellikle EBSD haritaları kullanılarak, S355J2C+N çeliği, kaynak bölgesi ve ısıdan etkilenen bölge (ITAB) ile Hardox 450 çeliğinin tane boyutu dağılımları belirlenmiştir. Bu dağılımlar; farklı bölgelerdeki tane boyutlarının ve yapıların net bir şekilde nasıl değiştiğini göstermektedir. Sertlik değerleri de çeşitli bölgelerden ölçülmüştür. Hardox 450 taban malzemesinin sertlik değeri 311 ± 8 HV olarak ölçülmüştür. S355J2C+N taban malzemesinin sertliği yaklaşık olarak 187 ± 8 HV iken, kaynak merkezinin sertliği 249 ± 8 HV olarak belirlenmiştir. Bu veriler ile; farklı bölgelerdeki malzemelerin sertliklerindeki değişiklikleri ve kaynaklanmanın mikroyapısal etkileri açıkça gösterilmektedir. Mekanik dayanım analiziyle, bu iki

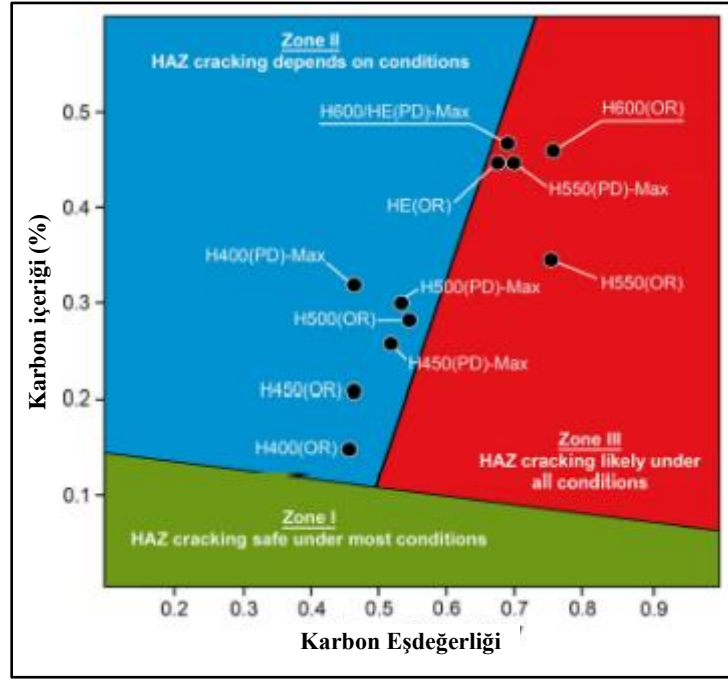
farklı çelik türünün akma dayanımlarının ne kadar farklı olduğunu ortaya konulmuştur. S355J2C+N çeliği için 513 ± 8 MPa ve Hardox 450 için 1464 ± 8 MPa değerleri ölçülmüştür. Kaynak bölgesinden çekilen numunenin en yüksek çekme dayanımı 899 ± 8 MPa olarak tespit edilmiştir. Kaynak verimliliği yaklaşık olarak $\sim\%133$ olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, kaynak bölgesinin mikroyapısı, mekanik özellikleri ve farklı bölgelerdeki tane boyutları ve yapılar üzerine yapılan bu ayrıntılı inceleme sayesinde, Hardox 450 ve S355J2C+N çeliklerinin farklı özelliklerine sahip olmalarına rağmen başarılı bir şekilde birleştirilebileceği ve elde edilen kaynak birleşiminin hem bilimsel hem de endüstriyel açıdan uygulanabilir olduğu kanıtlanmıştır.

Gupta vd. [64] yaptıkları çalışmalarında, üç farklı ferritik dolgu elektrodu (E8018, E9018 ve E11018) kullanılarak Hardox 400 çelik levhaların örtülü elektrod ark kaynağı ile birleştirilebilirliklerini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, kaynakların mukavemet açısından farklı performanslar sergilediği belirlenmiştir. Araştırmanın sonuçları, en yüksek kaynak verimliliğinin ve darbe dayanıklılığının E11018 elektrodu kullanılarak elde edildiğini, bunu E9018 ve E8018 elektrodlarının takip ettiğini belirtmişlerdir. Bu sonuç farklı elektrod seçeneklerinin kullanımının kaynak işleminin etkinliği ve dayanıklılığı üzerindeki etkisi olduğunu göstermiştir. Çalışmada, Hardox 400 gibi yüksek mukavemet ve sertlik özelliklerine sahip malzemelerin daha etkili bir şekilde kaynaklanabilirliğini artırmak için farklı elektrod seçeneklerinin incelenmesi açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, endüstriyel uygulamalarda bu tür malzemelerin daha güvenilir ve etkili bir şekilde kaynaklanabilmesi için stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamıştır. Bu sayede, aşınma direnci yüksek malzemelerin kaynak işlemlerinde daha başarılı sonuçlar elde etmenin mümkün olduğu gözlemlenmiştir.

Ramirez vd. [21] çalışmalarında yüksek mukavemetli Hardox 450 çeliğinin, gaz metal ark kaynağı (GMAK) ile tek pasolu alın kaynağında kaynaklı levhalar üzerinde meydana gelen açısız deformasyonları incelemişlerdir. Araştırmada, geri yayımlı yapay sinir ağı (BPN: backpropagation neural network) yöntemi kullanılarak deformasyon tahminleri gerçekleştirilmiştir. Bu ağı eğitimi ve giriş verileri için sonlu eleman simülasyonları ile analitik formülasyonlar kullanılmıştır. Çeşitli plaka

boyutları ve ısı giriş seviyeleri göz önünde bulundurularak yapılan bu simülasyonlar, açısız deformasyonların nasıl olduğunu ve hangi faktörlerin etkili olduğunun anlaşılmasına yardımcı olunmuştur. Elde edilen sonuçlar, sayısal ve analitik yöntemlerin gerçek deneylerle uyumlu olduğunu doğrulamıştır. Bu sonuçlarla, kaynakların iç yapılarında kesit geometrisi, ısıl döngüler ve yapısal deformasyonların nasıl değiştiği konusunda önemli bilgiler sunulmuştur. Özellikle, araştırmada ısıl döngü süreçleri, dolgu metalin seyreltilme yüzdesi ve kaynaklanan malzemenin boyutu arasındaki karmaşık ilişkileri aydınlatma hedeflenmiştir. Bu faktörlerin açısız deformasyon üzerindeki etkileri incelenerek, daha hassas kaynak parametreleri ve işlem koşulları belirlenebildiği görölmüştür. Bu çalışmanın sonuçları, yüksek mukavemetli çelikler gibi özel malzemelerin kaynak işlemi sırasında oluşan deformasyonların daha iyi anlaşılmasına ve kontrol edilmesine yardımcı olduğu görölmüştür. Bu da endüstriyel uygulamalarda daha güvenilir ve optimize edilmiş üretim süreçlerinin tasarlanmasına katkı sağlayabildiğini göstermiştir. Bu tür çeliklerin kaynaklı imalatta ortaya çıkan deformasyonların önceden tahmin edilebilmesi, tasarım ve üretim süreçlerinin daha verimli hale getirilmesini sağlayabildiği kanısına varılmıştır.

Konat, [65] yapmış olduğu çalışmada; 160 mm × 120 mm x 10 mm ebatlarında aşınmaya dirençli martenzitik, Hardox 600 çeliğin tozaltı ark kaynak sonrası ısıl işleminin mikroyapısal ve mukavemet özelliklerini incelemiştir. Kaynak işlemleri iki paso olarak gerçekteşirilmif ve kaynak esnasında her iki pasoda da 35 V gerilim kullanırken kaynak akımı birinci pasoda 520 A, ikinci pasoda ise 640 A seçilmiştir. Çalışmada kullanılan Hardox 600 çeliği ve diğer Hardox çeliklerinin C_{es} ve karbon (%) değerlerine) göre kaynaklanabilirlikleri ve çatlama eğilimi gösterdiği değer aralıkları ve bölgeler tanımlanmıştır. Yapılmış olan analizler sonrasında çıkan değerlere göre ITAB'daki çatlama eğilimleri üç ayrı bölgede gösterilmiştir. Ayrıca Hardox 400 ve 450 çeliklerinin iyi kaynaklanabilirliği üzerinde durulurken, Hardox 500 orta derecede tatmin edici kaynaklanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Düşük karbonlu ve düşük alaşımlı yapı çeliklerine nispeten yüksek mukavemetli ve yüksek dayanıma sahip Hardox çeliğinin kaynaklanabilirliğinin de aynı zamanda ısıl işlem faktöründen; kaynak esnası ve kaynak sonrası ısıl işleminin çatlama eğilimine sebep olması üzerinde de durmuştur. İlgili diyagram şekil 5.1'de yer almaktadır.



Şekil 5.1. Hardox çeliklerinin $C_{eş}$ değerlerine göre çatlama eğilimi [65].

Gerçekleştirilmiş olan deney sonuçlarına göre; Hardox 600 çeliği için kaynak sonrası kapsamlı uygulanan ısıtma işlemlerinin; mikroyapı incelemesinde olumlu sonuçlar ile karşılaşılmıştır. Çalışmanın sonuçları dikkate alındığında; uygun teknoloji seçimiyle, bu teknolojinin ek malzemeler ve kaynak parametrelerinin yanı sıra kapsamlı ısıtma işlem prosedürleri ile karakterize edilen doğru (uyumsuzluk içermeyen) bir kaynaklı bağlantı elde etmenin ana malzemeye karşılık gelen çok yüksek mekanik indeksler ile mümkün olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda varsayılan hedefe ulaşılması için teknolojik önlemlerin yanı sıra başka önlemlerin de alınması gerektiğine dikkat çekilmiştir. Darbe testlerine tabi tutulan numunelerin ayrı ayrı bölgelerinde fraktografik inceleme (kırılma mekaniğinde makroskobik ve mikroskobik inceleme) yapılması ve bu nedenle, önerilen kapsamlı ısıtma işleminin, Hardox 600 çeliğin kaynaklı bağlantıdan çok uygun plastik özellikler elde edilmesine olanak sağladığı belirlenmiştir.

Konovalov vd. [66] gerçekleştirmiş oldukları çalışmada; aşınmaya dayanıklı Martenzit Hardox 450 çelik malzemeler üzerine Ar – 98 %, CO₂ – 2 %; koruyucu gaz ortamında 250–300 A kaynak akımı ve 30-35 V kaynak geriliminde MAG kaynak yöntemi ile aşınmaya dirençli kaplamalar oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda yüzey kaplamanın yüksek dayanımlı yüzey tabakası oluşumuyla sonuçlandığı gösterilmiştir. Yüksek

sürtünme faktörü nedeniyle; yüzey tabakasında lokalize olup bunun sonucunda çizikler oluştuğu gözlemlenmiştir. X-ışını yapısal analiz yöntemleriyle yapılan araştırmalara dayanarak ve transmisyon kırınımlı elektron mikroskopunda (TEM) mukavemeti arttırdığı ve yüzey kaplama metalinin tribolojik özelliklerine faz bileşimi ve durumu neden olduğu gözlemlenmiştir. Malzemelere yapılmış olan testlerde ve muayene deney sonuçlarında (makro, mikro ve nano) ölçek seviyesinde biriktirilen katmanın mikro sertliğinin ve aşınma direncinin iki kat ve 140 kat olduğu tespit edilmiştir. Malzemenin sürtünme faktörü malzeme tabanından dört kat daha düşük olduğu görülmüştür. Sürtünme koşulları, plastik kayma deformasyonlarının yüzey katmanında lokalize olduğunu göstermiştir. Yüzey kabartması (çizik oluşumu) değiştirilerek vurgulanmıştır. Çok fazlı mikro altı oluşumu nedeniyle biriktirilen katmanın mekanik özellikleri iyileştirilir ve nanoyapılar; güçlenmeleri α -matrisin martenzit yapısına bağlıdır ve yüksek (%36'dan fazla) oksit ve karbür fazlarının dahil edilme hacim oranının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

Turichin vd. [67] yapmış oldukları çalışmada; yüksek mukavemetli çeliklerden Hardox 400, Hardox 450, Armax 600T malzemeleri üç farklı tel kullanarak farklı pozisyonlarda (PA, PG) hibrit lazer ark kaynak yöntemi ile alın altına birleştirmişlerdir. Kaynak banyosunun dikişin üst ve kök kısımlarının atmosfer gazlarından korunması için %80 Ar-%20 CO₂ ve yüksek saflıkta Ar koruyucu gaz kullanılmış ve gaz debisi 25 L/dk oranında seçilmiştir. Kaynaklı numunelere Tixomet yazılımı ile DMI 5000 (Leica) mikroskobu üzerinde metalografik çalışmalar ve Buehler Micromet 5103 kullanarak kaynak bölgesinin mikrosertlikleri (HV₁) belirlenmiştir. Kaynakların ve enine makro kesitlerin görsel muayenesinde iç ve dış kusurlar görülmemiştir. Sertlik testleri sonucunda Hardox 450 malzemenin kaynağında (lazer kaynağı) kaynak bölgesi sertliğinin birbirlerine çok yakın (ana malzeme 367 HV, kaynak metali 365 HV ve ITAB 377 HV) ölçülmüştür. İlave metal kullanılarak yapılan kaynaklı malzemeler uygulanan sertlik testleri sonucunda ana malzeme 558-601 HV. kaynak metali 542-571 HV ve ITAB ise 617-645 HV olarak ölçülmüştür. Sv-0H19N11M4F elektrotu kullanılarak hibrit lazer ark kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelere statik gerilim testi uygulanmış ve kopmanın kaynak metallere olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çekme testlerinde ana malzemelerden %15 daha düşük değerlerde koptuğu rapor edilmiştir. Mikroyapı çalışmalarında ise kaynak yapısının bazı alanlarında martenzit

görülürken bazı kısımlarında karbürler görülmüştür. ITAB'ın orta bölgesinde martenzitin %5'ten az olduğu ITAB'dan ana metale geçiş bölgesinde ağırlıklı olarak bey nit ve granüler morfolojiye sahip ince yapı tanımlanmıştır.

Ayyıldız [15] çalışmasında, özellikle iş makineleri sektöründe yaygın olarak kullanılan 8 mm kalınlığında S355J2C yapı çeliği ile aşınmaya karşı dirençli olan Hardox (HBW450) malzemeleri MAG kaynak yöntemi ile SG2 teli kullanarak metalurjik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla V ve X kaynak ağzına sahip S355J2C ve Hardox levhalar üç farklı kaynak hızı ile birleştirilmişlerdir. Birleştirilen malzemelere eğme, sertlik ve çekme testi uygulanmış, ayrıca mikroyapıları incelenmiştir. Gerçekleştirilen birleştirmelerden elde edilen sonuçlara göre kaynak hızı ile ısı girdisinin doğrudan bir ilişkisinin olduğu ve kaynaklı bölgenin bu durumdan oldukça belirgin olarak etkilendiği görülmüştür. Genel olarak kaynak hızı artışı ile beraber sertlikte de bir miktar artış olduğu görülmüş ve bu durum az da olsa çekme testi sonuçlarını etkilemiştir. Kaynak ağzının birleştirme kalitesini etkin bir rol oynamadığı görülmüştür. Isı girdisinin çok yüksek olduğu durumlarda kaynaklı bölgenin tane yapısında irileşmelerin meydana geldiği ve soğuma hızından dolayı sertlik değerlerinde artışların oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca X kaynak ağzı açılarak birleştirilen malzemelerin kaynak bölgesinin makroyapı görüntüleri incelendiğinde nüfuziyet derinliğinin V kaynak ağzı açılarak birleştirilen numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Kaçar vd. [68] çalışmalarında, aşınmaya dayanıklı Hardox 400 çeliğin östenitik paslanmaz çeliğe (AISI 304) örtülü elektrodla ark kaynağı ve gaz metal ark kaynağı (GMAK) yöntemleriyle kaynaklanabilirliği araştırılmış ve kaynak yönteminin kaynağın mekanik özelliklerine ve mikro yapısına etkisi incelenmiştir. Çalışmalarında elektrik ark kaynağında E310-16 (çap 3.25 mm) elektrot ve MAG kaynağında ER310 ilave tel (çap 1.2 mm) kullanmışlardır. Kaynak bağlantılarının mekanik özellikleri çekme, üç nokta eğme ve V çentik darbe testleri ile belirlenmiştir. Ayrıca kaynak kesitinde sertlik ölçümü ve mikroyapı değerlendirmesi yapılmıştır. Bulgulara göre; MAG yöntemiyle birleştirilen numunelerin çekme mukavemeti, kaynak metali çentik darbe tokluğu ve sünekliği elektrik ark kaynak yöntemiyle birleştirilen numunelere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Elektrik ark kaynaklı birleştirmelere kıyasla,

MAG birleştirmelerin kaynak metali tokluğu tüm test sıcaklıkları için daha yüksek bulunmuştur. Kırılma yüzeylerinin MAG yöntemi ile birleştirilen numunelerde daha çok gözenekli ve sünek bir yapıda olduğu grlmştur. Sertlik testlerinde ise Hardox 400 malzemedен AISI 304 malzemeye gidildikçe sertlik değerlerinin azaldığı ve elektrik ark kaynağı ile birleştirilen numunelerdeki sertlik değerlerinin MAG kaynağı ile birleştirilenlere göre daha düşük olduğu rapor edilmiştir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ

Bu çalışma, TSE CEN ISO/TR 15608 [69] standardının 1.2 grubuna dahil olan TS EN 10025-2:2019 [14] teknik teslim şartlarına uygun olarak üretilmiş S355J2 malzemesi ile standarda göre gruplandırılmamış ve özel olarak üretilmiş yüzey aşınma direnci yüksek olan Hardox 450 malzemesinin robotik MAG kaynak yöntemiyle birleştirilmesini temel almıştır. Hardox 450 malzeme seçilmesinin sebebi olarak; Bölüm 5, Şekil 5.1’de gösterilmiş olan Hardox çeliklerinin $C_{e\sigma}$ değerleri ve karbon oranlarına göre ITAB’daki çatlama riski daha düşük seviyelerde olmasıdır. Konat [65] yapmış olduğu çalışmada; Hardox 450 çeliklerinin iyi kaynaklanabilir olduğunu ifade etmiştir. Bu çalışmada, bu iki farklı malzemenin tam mekanize kaynak sistemi altında farklı dolgu telleri kullanılarak gerçekleştirilen kaynak işlemi incelenmiştir. Bu kaynak işleminin temelini ise metal aktif gaz kaynak (MAG) yöntemi oluşturmuş ve bu yöntem TS EN ISO 4063 [70] standardına göre 135 numarasıyla kodlanmıştır.

Deneyleerde kullanılan dolgu telleri sırasıyla; EN ISO 14341 G4Si1 (SG3) ve EN ISO 16834: 110 SG ve EN ISO 14343: 307LSi’dir. Aynı şekilde, kaynak işlemlerinde farklı koruma gazları da kullanılmış olup, bu gazlar sırasıyla TS EN ISO 14175 [71] standardına göre M13 ve M24 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada, farklı kimyasal ve mekanik özelliklere sahip S355J2 yapı çeliği ile aşınmaya dayanıklı Hardox 450 zırh çeliğinin MAG kaynağı ile farklı ilave teller kullanarak birleştirilebilirliği araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda kaynak için seçilen malzemelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 6.1’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşenleri (Ağırlıkça %).

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	B	Fe
S355J2	0,170	0,39	1,42	0,012	0,009	0,048	0,069	0,031	0,022	<0,001	Kalan
Hardox450	0,182	0,225	1,109	0,007	0,005	0,039	0,078	0,036	0,011	<0,001	Kalan

Çizelge 6.2. Malzemelerin mekanik özellikleri.

Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
S355J2	532	408	23.6	176-195
Hardox 450	1455	1146	9.2	420-444

Kaynak işlemleri çalışmalarda kullanılan malzemelere uygun olacak şekilde literatür bilgileri de dikkate alınarak seçilmiş ve kimyasal bileşimleri Çizelge 6.3'te, mekanik özellikleri Çizelge 6.4'de ve bu malzemelerin birleştirilmesinde ana malzemeler ile kullanılan ilave metallere göre tercih edilen koruyucu gazların kimyasal içerikleri ise Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Kaynak tellerinin kimyasal özellikleri (Ağırlıkça %).

İlave Tel	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
SG3	0,07	1,0	1,70	0,03	0,03	Kalan
110SG	0,09	0,75	1,70	0,30	2,0	Kalan
307LSi	0,08	0,80	7	18	9	Kalan

Çizelge 6.4. Kaynak tellerinin mekanik özellikleri.

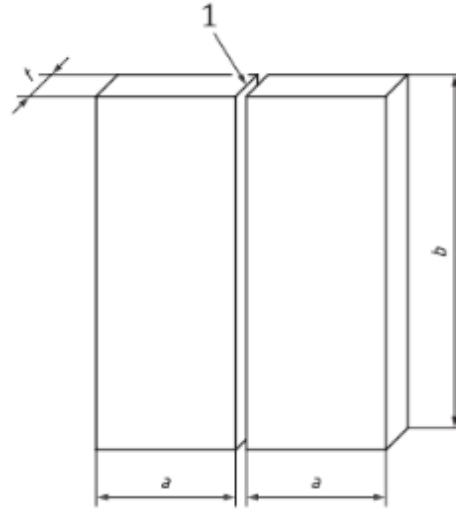
İlave metallere	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çentik Dayanımı, (ISO-V/-40°) (J)	Uzama (%)
SG3	min.460	540-680	min.47	min.22
110SG	min.690	760	min.47	min.19
307LSi	min.420	620	min.47	min.30

Çizelge 6.5. Kaynak işlemlerinde kullanılan koruyucu gaz bileşenleri (Hacim %).

Koruyucu gaz	Argon (Ar)	Karbondioksit (CO ₂)	Oksijen (O ₂)
M24	Kalan	12	2
M13	98	-	2

6.2. TEST NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Birleştirilecek test numunelerinin boyutları, TS EN ISO 15614-1 [72] standardına uygun olarak belirlenmiştir. Seçilen birleştirme yöntemi, kaynaklı birleştirmenin tüm mekanik özelliklerini test edebilmek amacıyla alın kaynağı olarak tercih edilmiştir. Kaynatılacak parça boyutları Şekil 6.1’de verildiği gibidir. Burada; a: 150 mm, b: 350 mm ve t: 10 mm’dir.



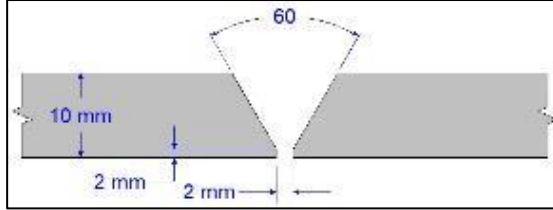
Şekil 6.1. Kaynatılacak numunelerinin ölçüleri.

Bu seçimler; test numunelerinin standartlara uygunluğunu ve kaynak işleminin genel performansını değerlendirmek amacıyla önemlidir. Bu standart, kaynaklı birleştirmelerin belirli koşullarda nasıl test edilmesi gerektiğini ayrıntılı bir şekilde açıklar ve bu sayede malzemelerin ve kaynak işleminin kalitesini sağlamak için güvenilir bir yol sunmaktadır. Şekil 6.2’de bu standarda uygun hazırlanan test plakalarını göstermektedir. Kaynak işlemleri öncesinde kaynak başlangıç ve bitiş yerlerine hurda parça puntalanarak kaynağın başlangıç ve bitişinin bu hurda malzemeler üzerinde olması sağlanmıştır.



Şekil 6.2. Kaynak öncesi test numune görüntüleri.

Şekil 6.1 ve 6.2'ye göre 10 mm x150 mm x 350 mm boyutlarında hazırlanan parçalar Şekil 6.3'te gösterilen kaynak ağızı dizaynı ile kaynağa hazır hale getirilmiştir. İlk başlarda seramik altlıksız denemelerle kaynakta tek taraftan kök çıkartılmaya çalışılmış ancak uygun bir dikiş formu elde edememiş ya da kaynak test numunesini alttan deldiği için seramik altlık kullanma yöntemine gidilmiştir. Bu nedenle tüm kaynakların ilk pasolarında seramik altlık kullanılmıştır. Şekil 6.4'de seramik altlıklı hazırlanan test numuneleri gösterilmektedir.



Şekil 6.3. Kaynak ağızı dizaynı.



Şekil 6.4. Seramik altlıklı test numunesi.

6.3. KAYNAK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

S355J2 yapı çeliği ile aşınmaya dayanıklı Hardox 450 zırh çeliğinin birleştirilmesinde MAG kaynak yöntemi kullanılmış ve kaynak işlemleri robotik olarak yapılmıştır. Şekil 6.5'te kaynak sırasında kullanılan MAG kaynak robotunun görseli bulunmaktadır.

Kaynak başlangıcında, test numunelerinde arkı başlatmak için robotun torcu ilk başta operatörle birlikte lazerli işaretlemeler yapılarak hangi hizada gideceği konusunda kaynaksız denemeler yapılmıştır. Kaynak öncesi numuneler X ve V kaynak ağızı açılmış ancak denemeler sonucunda kaynak ağızı dizaynı V olanın daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Uygun parametrelerle birlikte seramik altlık ile birlikte iki pasolu numuneler düzgün dikiş formları elde edilerek birleştirilmişlerdir.



Şekil 6.5. Testte kullanılan kaynak robotu.

Çizelge 6.6'da kaynak işlemlerinin yapıldığı robotun özellikleri ile robota entegre MAG kaynak makinasının özellikleri verilmiştir. Kaynak sırasında uygun parametreleri bulmak için birçok pilot çalışma yapılmış ve en uygun parametreler Çizelge 6.7'de verildiği haliyle belirlenmiştir. S355J2 ve Hardox 450 malzemelerin birleştirilmesinde $\text{Ø}1,2$ mm çapında üç farklı kaynak teli kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda robotun ilerleme hızı (kaynak hızı) sabit tutulup; kaynak işlemleri iki pasoda gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemleri esnasında koruyucu gaz debisi tüm birleştirmelerde 15 L/dk olarak seçilmiştir. Bölüm 2 Çizelge 2.3'te verilen SSAB'nin

kendi kataloğundan alınan plakaların ön ısıtma ve pasolar arası sıcaklık değerlerine göre testte kullanılan sacın kalınlığı 10 mm olduğu için ön ısıtmaya gerek duyulmamıştır. Ancak 50 °C'ye kadar nem alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaynak esnasında 1. paso bitirildikten sonra sıcaklığının kaynak metali merkezinde 100-120°C olana kadar beklenilmiş ardından 2. paso yapılmıştır. Kaynak sonrası malzemeler açık havada soğumaya bırakılmıştır.

Çizelge 6.6. Çalışmalarda kullanılan kaynak robotu ve makina özellikleri.

Kaynak Robotu	FANUC 100iC/8L
Kontrollor & El terminali	Mate CABINET
Kaynak Makinesi	LINCOLN DIGI WAVE III 520
Su Soğutma Ünitesi	SAF FRO
Tel sürme Ünitesi	SAF FRO
Kaynak Torç	TBI Robot Torch

Çizelge 6.7. Kaynak parametreleri.

İlave tel	Paso Sayısı	Akım (A)	Gerilim (V)	Tel Sürme Hızı (m/dk)	İlerleme Hızı (cm/dk)	Koruyucu gaz cinsi	Isı girdisi (kJ/mm)
SG3	1	224	24,9	6,2	22	M24	1,220
	2	265	26,2	9,0	18		1,850
110SG	1	215	22,5	6,0	22	M24	1,055
	2	250	26,2	7,5	18		1,746
307LSi	1	215	19,8	6,1	22	M13	0,928
	2	240	25,5	8,0	18		1,632

6.4. DENEYSEL METOD VE TESTLER

Robotik MAG kaynak yöntemi ile S355J2 yapı çeliği ile aşınmaya dayanıklı Hardox 450 zırh çeliğinin üç farklı ilave tel kullanılarak birleştirildiği çalışmalar öncesinde; ilgili bileşenlere ait değerlerin doğrulanması amacıyla ana malzemelere; çantık darbe testi, kimyasal analiz testi ve çekme testleri yapılmıştır. Yapılan kaynak işlemi sonucunda; üretilen kaynaklı numunelere tahribatsız muayene (görsel muayene, sıvı penetrant muayenesi, radyografik muayene, ultrasonik muayene) ve tahribatlı

muayene (kimyasal analiz, çekme testi, eğme testi, çentik darbe, sertlik testi) testleri uygulanmıştır.

Ayrıca kaynaklı numunelerin kaynak bölgeleri (kaynak metali, ITAB ve ana malzemeler) makro/mikroyapı çalışmaları ile karakterize edilmiştir.

6.4.1. Tahribatsız Muayene

Test parçalarının kaynak işleri bittikten sonra sırasıyla gözle muayene, sıvı penetrant muayenesi, radyografik muayene ve ultrasonik muayene testleri uygulanmıştır.

6.4.1.1. Görsel Muayene

Test parçaları gözle muayene öncesi yağ, kir, sıçrantı gibi yabancı maddelerden arındırılmıştır. Gözle muayenenin uygulama standardı olarak TS EN ISO 17637:2017 (“Ergitme kaynaklarının tahribatsız muayenesi” -Ergitme kaynaklı birleştirmelerin gözle muayenesi) [43], değerlendirme standardı olarak TS EN ISO 5817 [73] seviye B olacak şekilde kontrol edilmiştir. Örnek görsel olarak Şekil 6.6’da kaynak sonrası numunelerden SG3 teli ile kaynatılmış parça görseli verilmiştir. Bu test ile kaynak yüzeyi ve malzemede görsel olarak herhangi bir kusur olup olmadığı kontrol edilmiştir.



Şekil 6.6. Kaynak sonrası gözle kontrol (SG3 için).

6.4.1.2. Sıvı Penetrant Muayenesi

Gözle muayene testinin akabinde; ikinci test yöntemi olarak test plakaları tahribatsız muayene yöntemi olan sıvı penetrant muayenesine tabi tutulmuşlardır. Bu yöntem için ilk olarak numuneler mekanik ve kimyasal olarak temizlenmiştir. Yöntem olarak yüzey kırmızı penetrant sıvısı püskürtme yöntemiyle sıkılıp kaynak ve kaynağın ITAB'ına sıvıyı emmesi için 15 dakika beklenmiştir. Daha sonra yüzeydeki fazla penetrant sıvısı uygun bir şekilde yüzeyden silinmiştir. Sonrasında temizleyici (cleaner) denilen çözelti (solvent) bazlı kimyasal temiz bir beze sıkılıp yüzey kırmızı penetrant boyasından arındırılmıştır. Bundan sonra ise geliştirici püskürtme yöntemi ile yüzeye sıkılmış ve 15 dakika beklenmiştir. Burada uygulama standardı olarak TS EN ISO 3452-1 [74] değerlendirme standardı olarak da TS EN ISO 23277 [75] Seviye 2 olarak kontrolleri sağlanmıştır. Bu testin amacı yüzeye açık herhangi bir süreksizlik (çatlak, gözenek vb.) olup olmadığını kontrol etmektir. Şekil 6.7'de test numunelerine uygulanan penetrant muayenesine örnek olarak 307LSi ile birleştirilen test numunesi gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Sıvı penetrant muayenesi.

6.4.1.3. Radyografik Muayene

Radyografik muayene metal ve metal olmayan tüm malzemelerin yüzeyinde veya iç bölgelerindeki her türlü süreksizliklerin tespitinde yaygın olarak kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Bu yöntemle malzemenin iç bölgelerinde ve yüzeyinde bulunan her türden çatlak, gaz boşluklarının, çekinti boşluklarının, yapısal kusurların, inklüzyonların, hatta malzemelerdeki yoğunluk farklılıklarının belirlenmesi mümkündür. Malzemelerin radyografik muayenesi GEMIX G-200 model

dijital radyografi muayene sisteminde ve TS EN ISO 10675-1 (Kaynakların tahribatsız muayenesi-Radyografik muayene için kabul seviyeleri-Bölüm 1: Çelik, nikel, titanyum ve bunların alaşımları) [76] standartları göz önünde bulundurularak seviye 2 uzman personel tarafından yapılmıştır. Radyografik muayene verileri; çekim kaynağı Ir-192 izotop, odak boyut: 2*3 mm, enerjisi: 50 ci, FFD (film fokus mesafesi): 700mm, pozlama süresi: 2 dak., kullanılan film: Kodak T200 (C4), film boyu: 10*48 cm, film optik yoğunluğu: 2,6, kullanılan penetremetre: 10 FE EN, görülen IQI: 16, çekim tekniği: Single Wall-Single Image ve markalama sistemi: kurşun harf/rakamdır.

6.4.1.4. Ultrasonik Muayene

Sıvı penetrant muayenesi sonrasında yüzey altı herhangi bir süreksizlik olup olmadığını kontrol etmek için hacimsel kontrol yöntemi olan ultrasonik test muayenesi yapılmıştır. SG3 ve 110SG telleriyle kaynatılan numunelerin uygulama standardı olarak TS EN ISO 17640 [77] seviye B, 307LSi kaynak teli ile kaynatılan numunede ise TS EN ISO 22825 [78] uygulama standardı kullanılmıştır. Değerlendirme standardı olarak TS EN ISO 11666 [79] Seviye 2 kabul seviyesine göre test parçasının kontrolleri yapılmıştır. Şekil 6.8'de 307LSi test numunesinin ultrasonik muayene testi esnasından bir görsel verilmiştir.



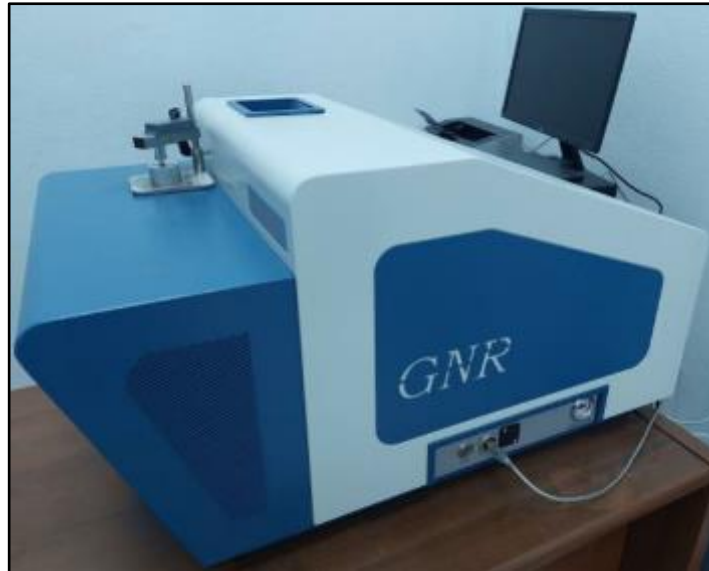
Şekil 6.8. Ultrasonik muayene görseli.

6.4.2. Tahribatlı Muayene

Test numuneleri kaynak sonrasında numune alınması için ilk olarak su jeti ile kesime gönderilmiştir. İleri teknolojinin bir ürünü olan su jeti kesim yöntemi ile yapısal bozulma, kararma, ergime ve yanma sorunları söz konusu olmamaktadır. Yüksek hassasiyet ve temiz kesim kenarları elde edilmektedir. Su jeti seçilmesinin sebebi; kaynaklı parçalardan Hardox 450 çeliğinin çok sert olması ve test numunelerine fazla ısı girdisini engellemektir. Bu sayede kesim sonrasında gerçekleştirilecek olan testlerde hatalı sonuçlara mahal verilmemesi amaçlanmıştır.

6.4.2.1. Kimyasal Analiz Testleri

Deneyde kullanılan malzemelerden; S355J2 ve Hardox 450 çelikleri kaynak işlemi öncesinde optik emisyon (OE) testine tabi tutulmuşlardır. Kaynak işlemi sonrasında ise; her üç kaynak metalinden OE testi yapılmış ve kaynak esnasında kullanılmış olan tel kompozisyonlarının kaynak metaline olan etkileri belirlenmiştir. OE test çalışmalarında kullanılan cihaz Şekil 6.9’da gösterilmektedir.



Şekil 6.9. Optik emisyon test cihazı.

6.4.2.2. Makro/Mikroyapı İncelemesi

Üç ayrı kaynak teli ile birleştirilen parçalardan makro ve mikroyapı analizleri için numuneler hazırlanmıştır. Kaynaklı birleştirmelerden alınan numuneler sırasıyla 380, 400, 800, 1200, 1500 ve 2000 numaralı zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır. Zımparaları tamamlanmış numuneler 1 µm'lik elmas pasta kullanılarak parlatma yapılmıştır. Daha sonra numuneler %2 Nitrik asit ve %98 etanol çözeltisiyle dağlanmış ve makro görüntüleri elde edilmiştir. Sadece 307LSi test numune kral suyu (3 ml HCL+1 ml HNO₃) olarak tabir edilen dağlama çözeltisi kullanılarak dağlanmıştır. Şekil 6.10'da makro ve mikroyapı incelemelerinde kullanılan mikroskoplar gösterilmektedir. Makro yapı incelemelerinde; Zeiss Stemi 305 model, mikro yapı incelemelerinde ise Leika DMI 5000M model cihazlar kullanılmıştır.

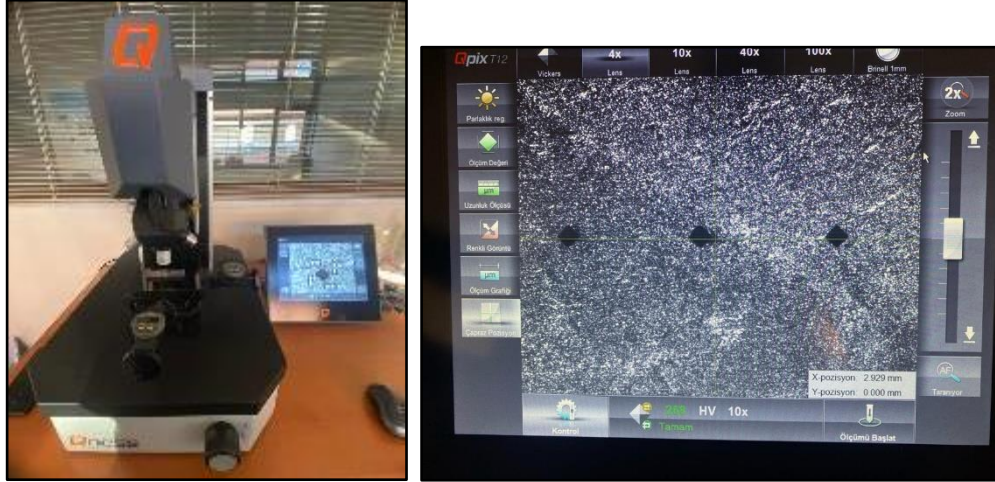


Şekil 6.10. Makro ve mikroyapı incelemede kullanılan cihazlar.

6.4.2.3. Sertlik Testleri

Sertlik testleri MAG kaynak yöntemi sonrası kaynatılan numunelerin ısıdan etkilenmiş bölge, kaynak metali ve ana mazlemelerdeki sertlik değerlerini inceleyerek kaynaklı numunelerin diğer mekanik testlerle karşılaştırılmasını araştırmak ve aralarında bir ilişki kurabilmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sertlik testinde kullanılmış olan sertlik test cihazı görseli ve sertlik testi esnasında alınan ekran görüntüsü Şekil 6.11'de gösterilmektedir. Sertlik test cihazı olarak; Qness marka ve Q30 M model cihaz kullanılmıştır. Sertlik ölçme esnasında Vickers sertlik ölçme

yöntemi kullanılmış olup ölçme esnasında 1 kg (HV_1) yük 15 saniye süresince uygulanmıştır.



Şekil 6.11. Sertlik test cihazı ve ekran görüntüsü.

6.4.2.4. Çekme Testi

Robotik MAG kaynak yöntemi ile malzemeler birleştirilmeden önce; S355J2 yapısal çeliği ve Hardox 450 zırh çeliği ana malzemelerin doğrulanması amacıyla çekme testi uygulanmıştır. Bununla beraber kaynaklı birleştirilme sonrasında statik yüklere karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla kaynaklı numunelere çekme testine tabi tutulmuştur. Böylelikle kaynak işlemlerinde kullanılan üç farklı ilave telin bağlantının dayanımındaki etkisi belirlenmiştir. Çekme testi ile malzemelerin akma, çekme ve uzama değerleri ölçülmüş olup; kaynaklı numuneler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Test numuneleri su jeti sonrası ince işlemlerini tamamlanmak üzere CNC tezgahlarında TS EN ISO 4136 [80] standardına uygun olacak şekilde hazırlanmıştır. Şekil 6.12’de çekme test numuneleri görselleri ve Şekil 6.13’te çekme testi esnası ve cihazı görseli yer almaktadır.

Çekme testi Jinan Testing (TE) marka ve WAW-500E model cihazda yapılmış ve çekme esnasında çekme hızı 5 mm/dk olarak belirlenmiştir. Çekme testlerinde her bir seriden 3 adet numune teste tabi tutulmuş ve sonuçlarda bu üç test sonucunun ortalaması değerlendirilmiştir.



Şekil 6.12. Kaynaklı numunelerden hazırlanan çekme test numuneleri.



Şekil 6.13. Çekme testi esnası ve cihaz görseli

6.4.2.5. Eğme Testi

Eğme testleri için her bir test numunesinden ikişer adet örnek alınmıştır. Eğme testi numunelerden birinin kaynak köküne diğer numunenin kaynak kepine uygulanmıştır. Eğme testi ile çalışmadaki alın kaynaklarının eğme karşısında sünekliliği, kaynak ve ana malzeme ile aralarındaki herhangi bir süreksizliğin olup olmadığının anlaşılması

amaçlanmıştır. Eğme testi TS EN ISO 5173 [81] standardında belirtilmiş olduğu şekilde gerçekleştirilmiştir. Eğme testleri de çekme testinin yapıldığı cihazda ve 10 mm/dk basma hızı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.14'te eğme testi için hazırlanmış eğme numunesi ve eğme testi esnasında çekilmiş olan görsel yer almaktadır.



Şekil 6.14. Eğme testi esnası ve eğme numunesi.

6.4.2.6. Çentik Darbe Testi

Çentik darbe testi; robotik MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin süneklik veya gevrekliklerinin tespiti için yapılmıştır. Kaynaklı numunelere testler -20°C 'da uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerin -20°C 'ye soğutma işlemi etil alkol banyosuyla, testi ise Jinan Testing (TE) Marka TE JBW-300 Model cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Çentik darbe test numuneleri 10 mm x 10 mm x 55 mm boyutlarında olacak şekilde TS EN ISO 9016 [82] standardına göre hazırlanmıştır. Şekil 6.15'te numunelerin testlerinin gerçekleştirildiği çentik darbe test cihazı görseli verilmiştir.



Şekil 6.15. Deneysel çalışmalarda kullanılan çentik darbe test cihazı.

Çentik darbe testleri her bir kaynaklı bağlantının kaynak metali ve ITAB'ından yapılmıştır. Birleştirmelerin farklı malzemeler (Hardox 450 ve S355J2) olması nedeniyle her bir birleştirmede iki adet ITAB bulunmaktadır. Bir başka ifade ile her bir seriden 3 adet bir ITAB'dan, 3 adet kaynak metalinden ve 3 adet diğer ITAB'dan olmak üzere toplam 9 adet darbe testi yapılmıştır. Böylelikle üç farklı ilave tel ile birleştirilmiş (SG3, 110SG ve 307LSi) serilerden toplamda 27 adet çentik darbe testi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar üç ölçümün ortlaması alınarak değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 7

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada; robotik MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen S355J2 yapısal çeliği ve Hardox 450 zırh çeliği malzemelerinin, kaynak sonrasındaki mekanik özelliklerinde ve mikroyapılarında meydana gelen değişiklikleri neden sonuç ilişkisinde tartışılmıştır. Çalışmada öncelikle görsel muayene sonuçları verilmiş olup devamında diğer tahribatsız muayene yöntemlerine ait sonuçlar verilmiş, son olarak tahribatlı muayene testlerine ait sonuçlar ile çalışmanın bu kısmı sonuçlandırılmıştır.

7.1. GÖRSEL MUAYENE

Gözle muayene kontrol işlemi, uygulanacak standartlar için gerekli koşulları yerine getiren ortamda ve konusunda uzmanlaşmış bir kontrolör tarafından yapılmıştır. TS EN ISO 5817 Seviye B [73] standardına göre yapılan gözle muayene sonucunda, MAG kaynak yöntemi ile kaynatılan numunelerde, kaynak yüzeylerinde yetersiz nüfuziyet, yanma olukları, sıçrantı, kökte çökme ve çatlak gibi kaynak kusurlarının olmadığı tespit edilmiştir. Tüm kaynak yöntemlerinde kaynak parametrelerinin uygun seçilmemesi, uygun olmayan ilave metal ve kötü bir kaynak yönteminin uygulanması kaynak hatalarına sebebiyet vermektedir. Kaynaklı bağlantılarda meydana gelen kaynak hataları kaynak dikişlerinde bir zayıflama ve süreksizlik oluşturduklarından bağlantının servis esnasında kırılmasına bazen de telafisi imkansız kazalara neden olmaktadır. Bu nedenle kaynaklı bağlantıların hatasız olması arzu edilmektedir. Yapılan kaynaklarda bu tür hataların oluşmamış olması metalurjik açıdan kaynak parametrelerinin doğru seçildiğinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Akay [12] çalışmasında; S235JR malzemeleri robotik MAG ve tozaltı ark kaynağı yöntemiyle birleştirmiş ve çalışma sonucunda kısmi yanma oluklarının oluştuğunu ancak bu kusurların kabul edilebilir standart sınırları içinde kaldığını ve gözenek,

kaynak yüzeylerinde yetersiz nüfuziyet, sıçrıntı, kökte çatlak ve çökme gibi hataların oluşmadığını belirtmiştir.

7.2. SIVI PENETRANT MUAYENESİ

Gözle muayene tahribatsız muayene yönteminden sonra test parçalarına yüzeyde veya yüzeye açık olan hataların tespiti için sıvı penetrant muayenesi uygulanmıştır. Sıvı penetrant muayenesi TS EN ISO 23277 [75], Seviye 2x' e göre değerlendirilmiştir. Yapılan test sonrası çatlak, gözenek gibi yüzeye açık veya yakın herhangi bir süreksizliğe rastlanmamıştır. Bu sonucun görsel muayene sonuçlarıyla uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir. Atılğan [44], yaptığı çalışmada depolama tankı imalatında tozaltı ark kaynağı uygulaması ve kaynak bölgesinin incelenmesi konusunda çalışmıştır. Deneysel çalışmalarında test numuneleri için tahribatsız muayene yöntemi olan sıvı penetrant muayenesini gerçekleştirdiğini belirtmiştir. Yapılan testler sonrasında yüzey kusurlarına rastlanmadığını ve kaynakların uygun olduğunu belirtirken; kalifiye personel tarafından hazırlanmış olan rapora göre; EN ISO 23277 standardına göre değerlendirilmiş olduğu belirtilmiş olup; parçaların standartta belirtilmiş olan kabul kriterleri içerisinde olduğuyla ilgili rapor kayıtlarını çalışmasında sunmuştur.

7.3. RADYOGRAFİK MUAYENE

Radyografik muayene yüzey altı kusurları görebilmek amacıyla kullanılan tahribatsız bir muayene metodudur. Bu muayene yöntemi kaynaklı numunelerde hacimsel hataları (gözenek, çatlak vb.) bulabilmek amacıyla uygulanmıştır. Şekil 7.1-7.3'te radyografik muayene testlerinin dijitalleştirilmiş film görsellerine yer verilmiştir. Şekil 7.1'de ve Şekil 7.3'te herhangi bir hataya rastlanmazken Şekil 7.2'de 110SG numunesinde işaretli alanda gözenek tespit edilmiştir. Bu gözeneğin büyüklüğü 1 mm'nin altında ölçülmüştür. TS EN ISO 10675-1 seviye 1'e göre red olması için gözenek çapının kaynak kalınlığının 0.2 katı olması gerekmektedir. Bu durumda kaynak kalınlığı 13 mm alınırsa bu değer 2,6 mm üzerinde bir gözenek olması durumunda red olacaktır. Dolayısıyla TS EN ISO 10675-1 standardına göre bu kaynak hatasının kabul kriteri içerisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 7.1. SG3 test numunesi radyografi görüntüsü.



Şekil 7.2. 110SG test numunesi radyografi görüntüsü.



Şekil 7.3. 307LSi test numunesi radyografi görüntüsü.

Örenler [53], Armox 500T zırh çeliğinin MIG kaynak yöntemiyle kaynaklanabilirliğini araştırdığı çalışmada radyografik muayene sonucuna göre herhangi bir hacimsel hataya rastlamamıştır. Garip [3], tarafından gerçekleştirilen çalışmada, zırh çeliklerinin yapı ve ıslah çelikleri ile kaynaklanabilirliği incelenmiştir. Çalışmada, MIG/MAG kaynak yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve olası kaynak hataları ile kaynak bölgesindeki mekanik özellikler üzerinde durulmuştur. Ayrıca ıslah ve yapı çeliklerinin zırh çeliğine kaynaklanabilirliği açısından karşılaştırmalar yapılmıştır. Test parçaları, TS EN ISO17636-1 standardına uygun olarak radyografik muayeneye tabi tutulmuştur. Yapılan testler sonucunda, herhangi bir hata veya süreksizliğe rastlanmadığı ve birleştirilen malzemelerde tam bir nüfuziyet sağlandığı belirtilmiştir.

7.4. ULTRASONİK MUAYENE

Ultrasonik muayene tahribatlı testlerden önce kaynak bölgesinde oluşabilecek hataların (gözenek, yetersiz ergime vb.) son kontrolünü yapmak üzere uygulanmıştır. Muayene kaynaklı numunelerin kaynak metali ve her iki ITAB'a uygulanmıştır. TS EN ISO 11666 [79] standardı Seviye 2 kabul seviyesine göre kontrol edilmiş ve herhangi bir yüzey altı kusura rastlanmamıştır. Akay [39] tozaltı ark kaynak yöntemi ile farklı çeliklerin birleştirilmesi ve tahribatlı/tahribatsız muayenesi konulu çalışmasında ultrasonik test ile incelenen kaynak dikiş bölgesinde çatlaklar, gözenekler, gaz boşlukları vb. kaynak hatasına rastlanmadığını bildirmiştir.

7.5. KİMYASAL ANALİZ İNCELEMELERİ

Çizelge 7.1'de literatür ve ölçülen değerlere göre ana malzemeyi gösteren kimyasal analiz değerleri, Çizelge 7.2'de kaynak dikişlerinin kimyasal analiz değerleri ve tellerin literatüre göre kaynak öncesi kimyasal analiz sonuçlarını içeren element oranları gösterilmiştir. Burada amaç kaynaklı numune testleri esnasında kullanılan tellerin etkilerini belirlemektir.

Çizelge 7.1. Ana malzemelerin kimyasal analiz test sonuçları (Ağırlıkça %).

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	B	Fe
S355J2											
Literatür [14]	0,20	0,55	1,60	0,025	0,025	-	-	-	0,055	-	Kalan
Ölçülen	0,170	0,39	1,42	0,012	0,009	0,048	0,069	0,031	0,022	<0,001	Kalan
Hardox450											
Literatür [21]	0,184	0,215	1,187	0,0018	0,011	0,037	0,035	0,0086	-	<0,001	Kalan
Ölçülen	0,182	0,225	1,109	0,007	0,005	0,039	0,078	0,036	0,011	<0,001	Kalan

Kimyasal analiz sonuçlarına göre S355J2 yapısal çeliğinin üretim teslim standardına göre Çizelge 7.1'de maksimum alaşım elementlerini içeren tablo ve test numunesinin kimyasal analiz ölçüm sonuçlarına göre ağırlıkça element analizleri gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre S355J2 ana malzemenin ölçülen % C oranı 0,170 olarak bulunmuştur. Ana malzemenin standardına göre maksimum olması gereken değer biraz altında olduğu görülmüştür. Hardox türü zırh çeliği malzemelerin net bir üretim standardı olmayıp özel üretim oldukları için içerisindeki elementler ağırlıkça

biribirinden farklılık gösterebilir. Ramirez [21], yaptığı çalışmada Hardox 450 malzemenin ağırlıkça % C değerini 0,184 olarak bulmuştur. Bu tez çalışmasında ise yapılan analiz sonuçlarına göre Hardox 450 ana malzemesinin % C oranı 0,182 olarak ölçülmüştür. Bu da çalışmanın başında malzemelerin doğrulanması açısından literatürle uyduğunu göstermektedir.

Çizelge 7.2. Kimyasal analiz test sonuçları kaynak metali (Ağırlıkça %).

İlave Tel	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
SG3 tel	0,07	1,0	1,70	0,03	0,03	Kalan
SG3 kaynak metali	0,103	0,687	1,360	0,087	0,055	Kalan
110SG tel	0,09	0,75	1,70	0,30	2,0	Kalan
110SG kaynak metali	0,124	0,465	1,512	0,246	1,012	Kalan
307LSi tel	0,08	0,80	7	19	9	Kalan
307LSi kaynak metali	0,084	0,715	5,314	15,449	6,474	Kalan

Tellerin kimyasal analiz sonuçlarına göre ana malzemelerle karşılaştırılması yapıldığında kaynak sonrası C, Si, Mn, Cr elementlerinin % oranlarının kaynak metallere göre daha düşük olduğu, ilave kaynak tellerine göre ise arttığı görülmüştür. İlave kaynak tellerinin % C, Si, Mn, Cr oranları ana malzemelere göre ağırlıkça daha düşüktür. Kaynak metali ana malzemeyle ilave kaynak telinin karışımıyla oluşmuştur. Bunun sonucunda kaynak metalinde bulunan sonuç ile beklenen sonuç birbirini destekler niteliktedir. Akay [39], yaptığı çalışmada, düşük alaşımlı, ince taneli, yüksek mukavemetli X60, X65 ve X70 çelikleri, tozaltı ark kaynak yöntemi ile farklı tel ve tozlar kullanılarak birleştirilebilirliklerini incelemiştir. Yaptığı kimyasal analiz testleri sonucunda kaynak metali kimyasal bileşimi içerisindeki C oranının, ana malzemedeki yüksek, ilave metalden daha düşük olduğu sonucuna ulaşmıştır. Konat [65], yapmış olduğu çalışmada; 160 mm × 120 mm x 10 mm ebatlarında aşınmaya dirençli martenzitik, Hardox 600 çeliğin tozaltı ark kaynak sonrası ısıtılmasının teknolojik, mikroyapısal ve mukavemet özelliklerini incelemiştir. Test sonrası kaynak metali bölgesinden üç farklı kimyasal analiz ölçümü almıştır. Bu ölçüm sonuçlarına göre element analizleri incelendiğinde ilave kaynak telindeki % C, Si, Mn, Cr oranı ilave kaynak teli ve tozuna göre daha yüksek, ana malzeme olan Hardox 600 çeliğine göre daha düşük olduğu sonucuna ulaşmıştır. Literatürle tez

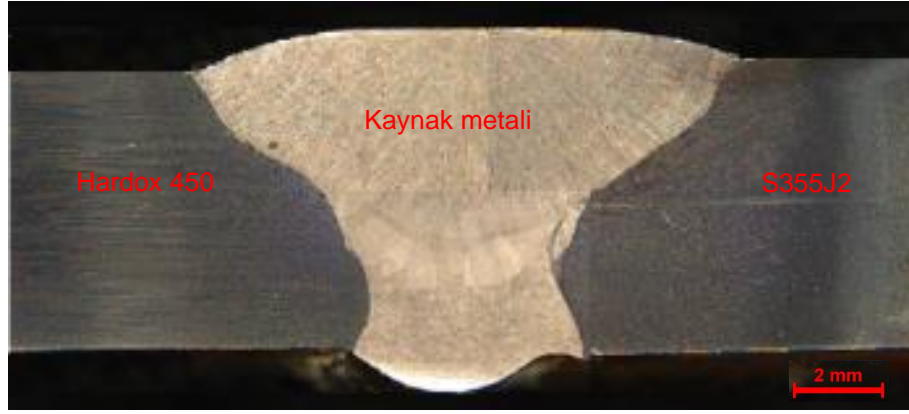
çalışmasının sonuçları karşılaştırıldığında, çalışmanın birbirini destekler nitelikte olduğu sonucuna varılmıştır.

7.6. MAKROYAPI İNCELEMELERİ

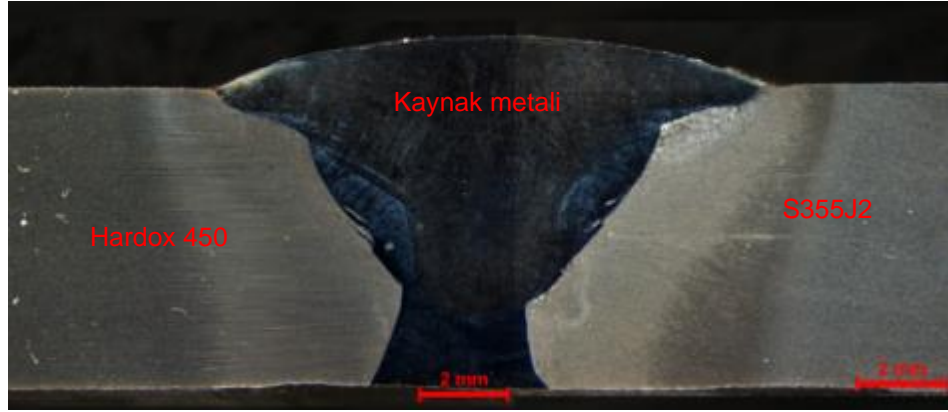
Makroyapı incelemeleri, asitle dağlanmış kaynak yüzeylerinin doğrudan göz ile veya belirli bir büyütme yardımıyla incelenmesini kapsamaktadır. Bir kaynaklı numune üç ayrı bölümden oluşmakta olup bunlar ITAB, ana malzeme ve kaynak metalidir. Makroyapı incelemelerinde amaç test numuneleri üzerindeki oluşma ihtimali olan ergime hatası, nüfuziyet eksikliği, gözenek, çatlak, kalıntı gibi hataların belirlenmesidir. Şekil 7.4'te SG3 numunesi, Şekil 7.5'de 110SG numunesi, Şekil 7.6'da 307LSi numunesi makro görüntülerine yer verilmiştir. Makroyapı görüntülerinde kaynak bölgesinde kaynak metali, ana malzeme ve ITAB belirgin bir şekilde görülmektedir. Numunelerin makroyapı görüntülerine göre nüfuziyetsizlik, yan duvarda ergime eksikliği, gözenek, çatlak veya kalıntı gibi kaynak kusurlarına rastlanmamıştır. Kaynak yükseklikleri ve genişlikleri uygundur. Sadece SG3 teli ile yapılan test numunesinde kök genişliği diğer iki numuneye göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin diğer iki test numunesine göre daha yüksek ısı girdisinde çalışma yapıldığından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7.4. SG3 ile birleştirilen numunenin makro görüntüsü.



Şekil 7.5. 110SG ile birleştirilen numunenin makro görüntüsü.

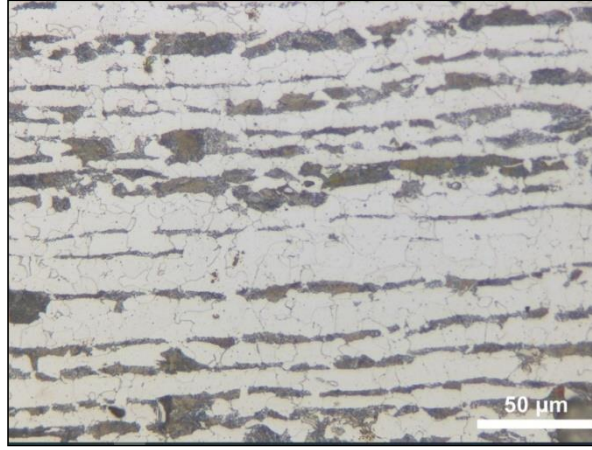


Şekil 7.6. 307LSi ile birleştirilen numunenin makro görüntüsü.

Yılmaz [19], masif ve özlü kaynak telleri ile birleştirilen Hardox 400 çeliklerinin mekanik ve mikroyapı özellikleri ile ilgili yaptığı çalışmada; kaynak dikişlerinin makro görüntülerinde herhangi bir kaynak kusurunun olmadığını belirtmiştir. Ancak kaynak keplerinde kaynak yüksekliklerinin fazla olduğunu ifade etmiştir. Gupta ve diğerleri [64], yaptıkları çalışmalarında, üç farklı ferritik dolgu elektrodu (E8018, E9018 ve E11018) kullanılarak Hardox 400 çelik levhaların örtülü elektrod ark kaynağı ile birleştirilebilirliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda test numunelerinin makroyapı görselleri incelendiğinde; herhangi bir kaynak kusuruna rastlanmadığını belirtmişlerdir.

7.7. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

Kaynaklı numunelerin kaynak bölgelerinin mikroyapısal farklılık göstermekte ve bir kaynaklı bağlantıda mikroyapı sonucunda kaynaklı bağlantıların bazı metalurjik özellikleri hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. Mikroyapı inceleme yöntemi ile tane yapısı, kaynakta ısı girdileri ve soğuma sonucu oluşan faz dönüşümleri belirlenebilir. Şekil 7.7'de deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerden biri olan S355J2 ana malzemesinin mikroyapı fotoğrafı verilmiştir.

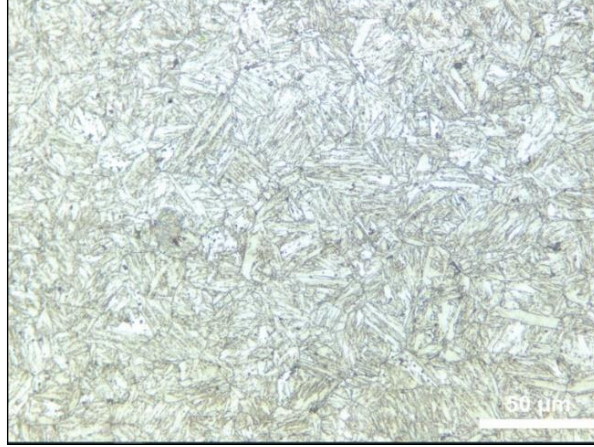


Şekil 7.7. S355J2 Yapı çeliği ana malzeme mikroyapı fotoğrafı.

Şekil 7.7'deki S355J2 yapı çeliğinin ana malzeme mikroyapı görüntüsü incelendiğinde, ana malzemenin içinde ferrit ve perlit fazlarının mevcut olduğu gözlemlenmiştir. Mikroyapıda siyah renkte belirtilen alanlar perlit'i, açık renkte olanlar ise ferriti temsil eder. Karbon oranının düşük olması nedeniyle perlit fazının miktarının az olduğu, ferrit fazının ise daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca malzeme mikroyapısında haddeleme yönüne paralel ferrit perlit bantlaşmalarının olduğu görülmektedir. Akkaş ve arkadaşları [83], yaptıkları çalışmada raylı sistem araçlarında kullanılan S235JR çelik saclarının direnç nokta kaynağında mikro yapı analizlerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada ana malzeme olan S235JR çeliğinin kimyasal analiz sonucuna göre içerdiği karbon miktarına (%0,0902) bağlı olarak yapının ferrit ve perlitten oluştuğunu belirtmişlerdir. Kantur ve arkadaşları [84], 304L ve S355J2C+N malzemelerinin TIG kaynağı ile birleştirilmesini, mikroyapı ve mekanik özellikleri açısından incelemişlerdir. Çalışmalarında S355J2C+N malzemesinin mikro

görüntüsünde alfa ferrit fazı ve dağınık koyu renkli perlit tanecikleri gözlemlenmiştir. Bu görüntü 10x ve 50x büyütme oranlarında elde edilmiştir. S355J2C+N çeliğinin, ferrit (α) (%91) ve az miktarda perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) (%9) içeren bir mikroyapıya sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Şekil 7.8’de ise deneysel çalışmalarda kullanılan Hardox 450 ana malzemesine ait mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Mikroyapı, homojen bir şekilde oluşmuş iğnemsî bir görüntü sunmaktadır. Bu malzemeye üretim süreçlerinde çeşitli ısıl işlemler uygulanmaktadır. Malzemelerin sertlik kazanması için hızlı soğutma işlemlerine tabi tutulduğu ve bu sonucun martenzitik bir yapıya yol açtığı bilinmektedir. Ticari kullanımlarında, mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla tokluk özelliklerinin artırılması ve yine ısıl işlemlerin uygulandığı bilinmektedir. Mikroyapı görüntüsünden de anlaşılacağı gibi, ana malzemenin mikroyapısı martenzitik bir görünüm sergilemektedir. Bu özelliklerinden dolayı, aşınmaya bağlı çalışma ortamlarında bu malzemeler sıkça tercih edilmektedir.

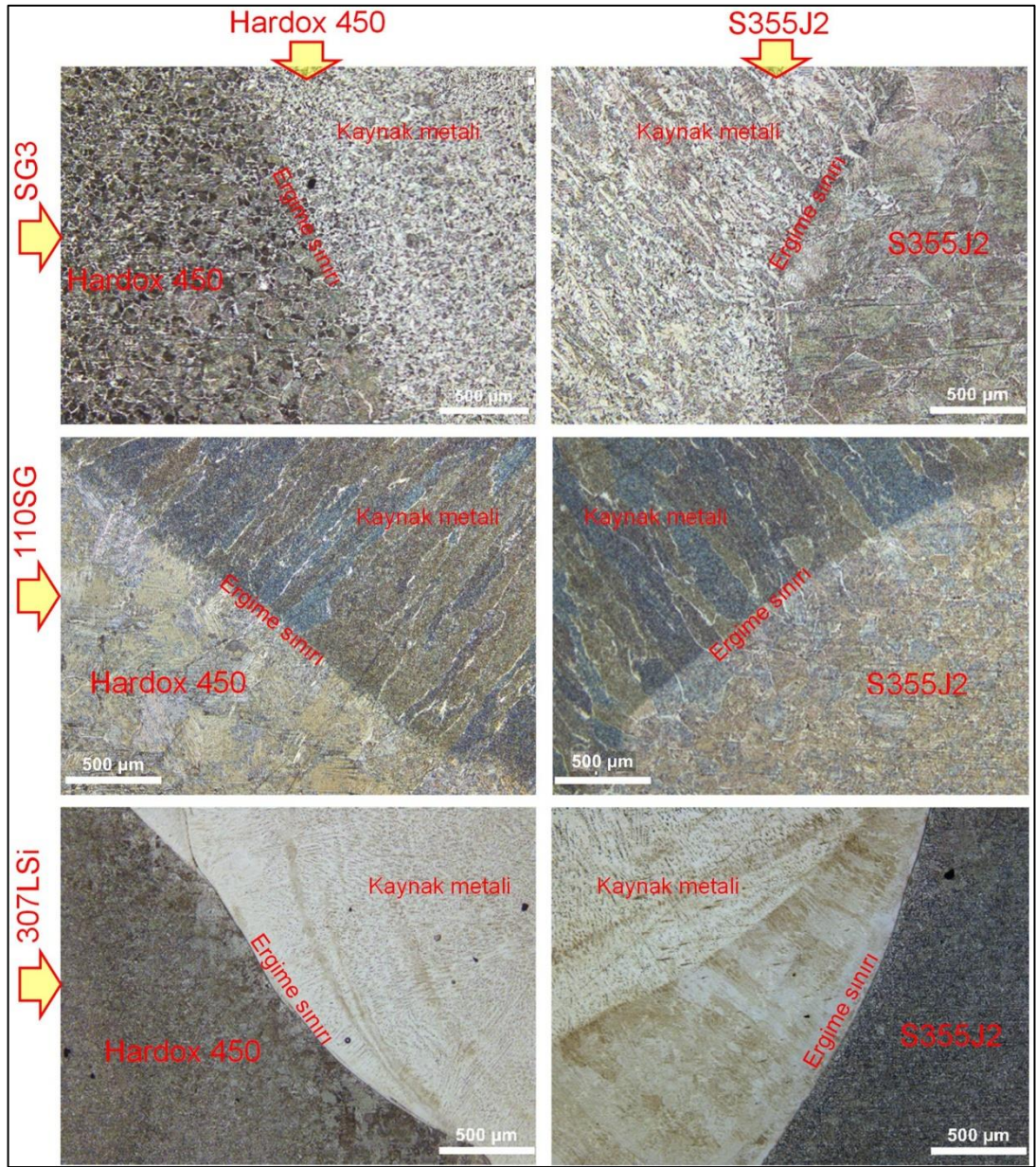


Şekil 7.8. Hardox 450 ana malzeme mikroyapı fotoğrafı.

Sonuç olarak Şekil 7.8’de resmi verilen Hardox 450 çeliğinin mikroyapısının ağırlıklı olarak ferrit ve martenzit fazı içerdiği tespit edilmiştir. Kaçar ve Ertek [7], yaptıkları çalışmada gaz metal ark kaynaklı zırh çeliklerinin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında benzer özelliklere sahip ArmoX 500T çeliğinin su verilmiş ve ardından temperleme ısıl işlemi görmüş ana malzemede, temperlenmiş martenzit ve asiküler martenzit fazlarından oluştuğu sonucuna ulaşmışlardır. Özturan

ve diğeri [63], yaptıkları çalışmada, Hardox 450 ve S355J2C+N çeliklerinin gaz metal ark kaynağı (GMAW) yöntemiyle farklı birleştirmelerinde, mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Hardox 450 ana malzemesinin mikroyapısını incelediklerinde çeliğin tamamının ferrit ve martenzit fazı içerdiğini ifade etmişlerdir.

Şekil 7.9’da üç farklı ilave tel ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin sadece kaynak bölgesi görüntüleri verilmiştir.



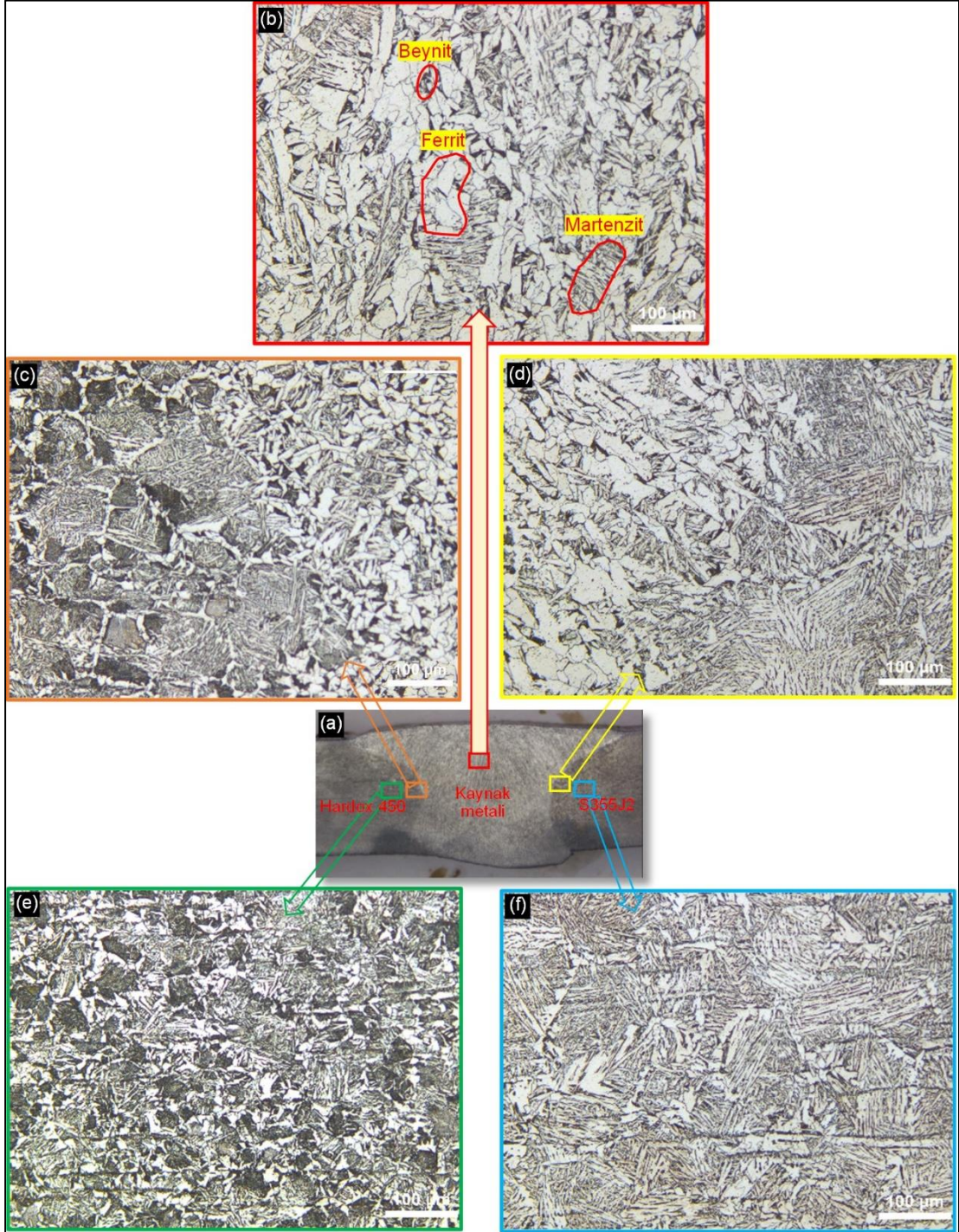
Şekil 7.9. Üç ayrı telle birleştirilen numunelerin kaynak bölgesi görünümüleri.

Şekil 7.9’da verilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde üç farklı birleşimin kaynak metalinin birbirlerinden oldukça farklı oldukları görülmektedir. Özellikle östenitik ilave metalin kullanıldığı 307LSi birleştirmesinin diğer birleştirmelere göre mikro yapının oldukça farklı olduğu görülmektedir. Burada ana malzeme ile kaynak metali arasında tam bir karışımın olmadığı görülmektedir. İlave tel ile ana malzemelerin kimyasal bileşimin farklı olması bu sonucu ortaya çıkarmaktadır. Maurya vd. [85], benzer malzemelerin ER307 ile birleştirilmesinde kaynak metali ve ana malzeme arasındaki arayüzde karışmamış bölge (unmixed zone) olduğunu ve bu bölgenin ergimiş ana metallerin ve dolgu malzemesinin hidrodinamik karışımından (hydrodynamic mixing) dolayı kompozit bölgedeki kimyasal bileşimin farklı olduğunu, kısmen ergimiş bölgenin, kaynak arayüzünü karışmamış bölgenin dış kenarı ile ayırdığını rapor etmişlerdir. Ferritik ilave tellerin kullanıldığı birleştirmelerde ise tam bir karışım elde edilmiş kaynak ergime sınırında bu tür bir yapı elde edilmemiştir.

Kaynak metalinin ana malzeme(ler) ve ilave metalin karışımından olduğu bilinmektedir. Bu durumda çalışmada kullanılan üç farklı ilave metalin kimyasal bileşimlerinin farklı olmasından dolayı meydana gelen kaynak metali yapılarının da farklı olması beklenmektedir. Bir kaynaklı bağlantının mukavemetini belirleyen en önemli kısımlardan birisi de ergime sınırı ve çevresidir. Bu bölgede hatasız bir geçişin sağlanması ancak ana malzeme ile uyumlu ilave metal seçimiyle gerçekleşebilir. Ayrıca burada kaynak paramaterelerinin önemi çok büyüktür. Çalışma kapsamında gerek seçilen ilave metallerin uygun olması gerekse kaynak parametrelerinin doğru seçilmesi bu bölgenin uyumlu olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

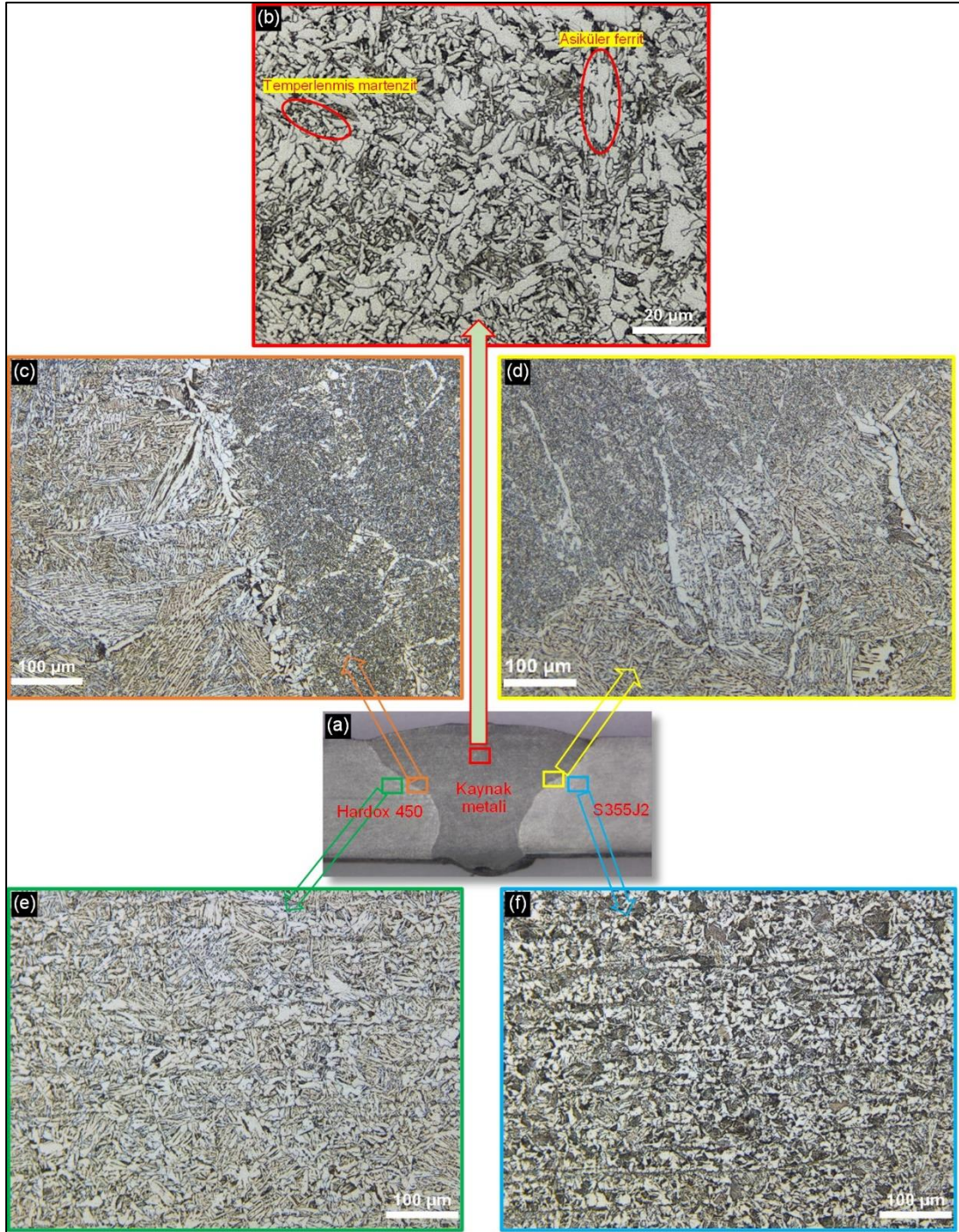
Üç farklı kimyasal ve mekanik özelliklere sahip kaynak teli kullanılarak S355J2 ve Hardox 450 malzemelerin robotik MAG kaynağı ile birleştirildiği çalışmalardan elde edilen mikroyapılar Şekil 7.10-7.12 arasında verilmiştir. Burada amaç kaynak esnasında meydana gelen ısı çevrim ile ana malzemeler üzerindeki ITAB’da ne tür bir morfolojik değişimin olduğunun belirlenmesinin yanında, farklı kimyasal bileşime sahip ilave metallerin kaynak metali mikroyapı oluşumuna etkilerini de görebilmektir. Bu amaç doğrultusunda her üç ilave metal kullanılarak birleştirilen kaynaklı malzemelere mikroyapı çalışmaları uygulanmıştır. Şekil 7.10-7.12’de her üç şekilde de (a) test numunelerinin kaynak bölgelerinin makro görüntülerini, (b) kaynak esnasında ergiyip

devamında hemen katılaşan kaynak metalini, (c) Hardox 450 ana malzemesinin ergime sınırını da içine alan kaynak geçiş bölgesini ve ITAB'ını, (d) S355J2 malzemenin kaynak geçiş bölgesi ve ITAB'ını (e) Hardox 450 ana malzemenin ITAB'ını ve son olarak da (f) S355J2 ana malzemenin ITAB'ını göstermektedir.



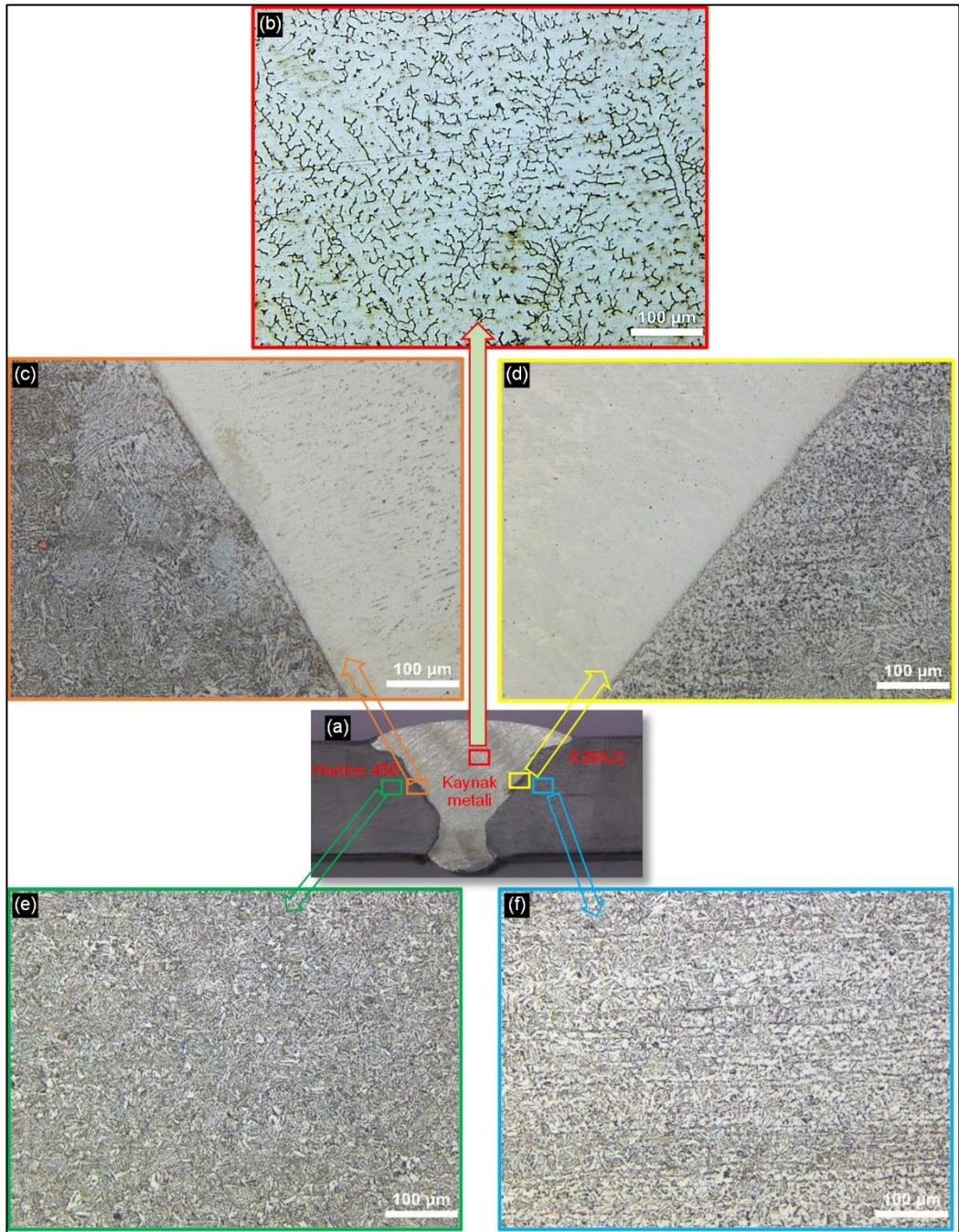
Şekil 7.10. SG3 tel ile birleştirilen numuneyle ait makro ve mikroyapı görüntüleri.

Şekil 7.10 b’de verilen kaynak metali mikroyapısı incelendiğinde yapının ferritik ve martenzitik olduğu ayrıca bazı kısımlarda az miktarda beynitik yapının oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.11. 110SG tel ile birleştirilen numuneye ait makro ve mikroyapı görüntüleri.

Şekil 7.11 b’de verilen kaynak metali mikroyapısı incelendiğinde asiküler ferrit ve temperlenmiş martenzit yapılardan meydana geldiği görülmektedir. Görüntü alınan kısım ilk paso olduğu için 2. paso esnasında 1. pasoda oluşan martenzit bir miktar temperlenmiş olarak bulunmaktadır. Gürol vd. [86], Millux Protection 500 malzemeleri 110SG ilave tel ile birleştirmişler ve yapının temperlenmiş martenzit ve kalıntı östenit içerdiğini rapor etmişlerdir.



Şekil 7.12. 307LSi tel ile birleştirilen numuneye ait makro ve mikroyapı görüntüleri.

Şekil 7.12 b’de verilen kaynak metali mikroyapısı incelendiğinde östenitik matriste homojen dağılmış delta ferrit yapısı görülmektedir. Genel olarak delta ferrit fazları kaynak merkezinden yüzeye doğru yönelmiş görülmektedir. Sonuç itibariyle yapı genel olarak eş eksenli ve bal peteği yapısını andıran delta ferritlerden oluşmaktadır.

Şekil 7.10-7.12 (b)’de sırasıyla SG3, 110-SG, 307LSi ilave metalleriyle kaynatılmış test numunelerinin kaynak metalinin mikroyapıları gösterilmiştir. SG3 ilave tel kullanılarak gerçekleştirilen (Şekil 7.10 b) numunelerin kaynak metali mikroyapılarında ferrit ve martenzit yapıları belirlenmiştir. 110SG ilave tel kullanılarak birleştirilen numunelerin (Şekil 7.11 b) kaynak metali mikroyapılarında asiküler ferrit ve temperlenmiş martenzit yapıları mevcuttur. Östenitik ilave telin kullanıldığı birleştirmede ise (Şekil 7.12 b) östenit matrise dağılmış delta ferritlerden oluştuğu belirlenmiştir.

Şekil 7.10-7.12 c ve d’de SG3, 110SG, 307LSi ilave metalleriyle birleştirilmiş test numunesinde kaynak geçiş bölgesi (ergime sınırı ve çevresi) kaynak metali ve ITAB mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Üç farklı ilave tel ile birleştirilen kaynaklı numunelerin gerek Hardox 450 gerekse S355J2 ergime sınırı ana malzeme tarafındaki ITAB incelendiğinde ana malzemelere göre belirgin bir tane irileşmesinin olduğu görülmektedir. Bu bölge kaynak esnasında ergimemekte ancak en yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadır. Dolayısıyla bu bölgede yüksek sıcaklıktan dolayı tane irileşmesi beklenmektedir. Bu bölgenin devamında ise (Şekil 7.10-7.12’de e ve f) sıcaklık iri taneli bölgeye göre daha düşük olduğundan bu bölgede tane irileşmesi gerçekleşmemekte olup dolayısıyla ince taneli normalize olmuş bir tane yapısı görülmektedir. Bu bölgeye bitişik olan kısmın ise düşük sıcaklıklarda ısıya maruz kalması sonucunda temperlendiği görülmüştür. Çoban vd. [87], Protection 600 zırh çeliklerini ER307 ilave tel kullanarak birleştirmişler ve kaynak bölgesini iri taneli ısıdan etkilenen bölge, ince taneli ısıdan etkilenen bölge, kritikler arası ısıdan etkilenen bölge ve temperlenmiş bölge olduğunu ve bölgelerin oluşumunda da ısı girdisinin etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Özturan [6], yaptığı çalışmada Hardox 450 ve S355J2C+N çeliklerini gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve kaynak metali bölgesine geçiş ve kaynak bölgesinde

tane boyutunda artış olduğunu ifade etmiştir. Kaçar ve Ertek [7], ArmoX 500 T ve AISI 304 östenitik pasnammaz çelik malzemeleri benzer ve benzer olmayacak şekilde ER307 ilate metal kullanarak birleştirmişler ve çalışma sonucunda ArmoX 500 T çeliğinin ITAB’da tane irileşmesi ve kaba taneli martenzitik yapı ile karşılaştıklarını belirtmişlerdir.

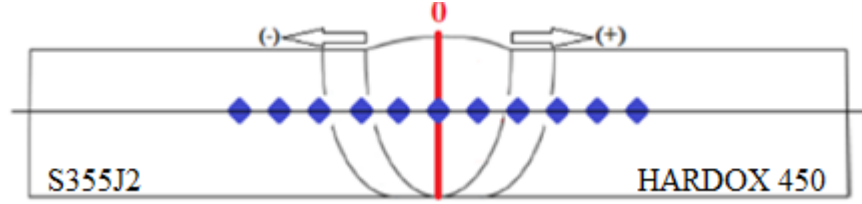
7.8. SERTLİK TESTİ

Kaynaklı birleştirmelerin sertlik özelliklerini belirlemek amacıyla, kaynaklı numunelere sertlik testleri uygulanmıştır. Sertlik, malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnci ölçen göreceli bir kavramdır. Aynı zamanda malzemenin mukavemetini ifade edebilir. Sertlik ölçümü, mühendislik alanında birçok malzeme üzerinde uygulanan bir testtir.

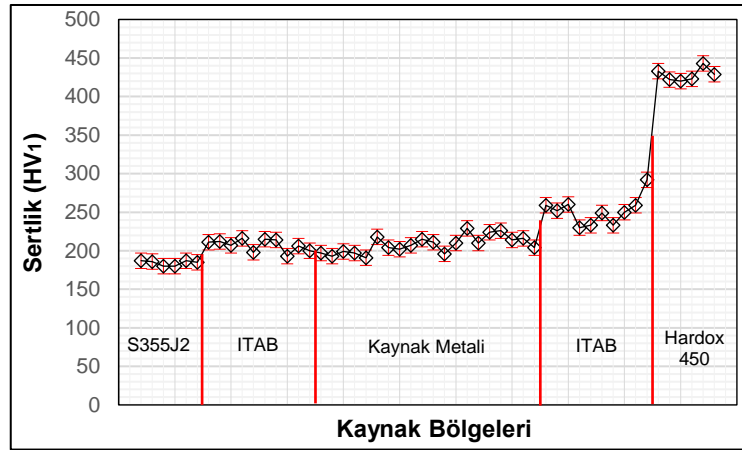
Malzemenin sertliği ile mekanik özellikleri arasında genellikle bir bağlantı bulunabilir. Örneğin, çeliklerde çekme mukavemeti genellikle sertlikle doğru orantılıdır. Bu nedenle sertlik ölçümleri bir malzemenin dayanıklılığı, işlenebilirliği ve genel performansı hakkında önemli bilgiler sağlar. Bu bilgiler, malzemelerin tasarım sürecinde, üretimde ve kalite kontrolünde kullanılarak istenmeyen kusurları önceden tespit etmeye yardımcı olabilir.

Yapılan test çalışmaları sonrasında kaynak işlemi görmüş plakalardan alınan mikrosertlik test numuneleri için doğru sonuçlara ulaşmak amacıyla mikrosertlik testinden önce numunelerin yüzeyini en iyi şekilde hazırlamak için zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler, numunelerin doğru sonuçları daha etkili bir şekilde yansıtmasını sağlamak üzere uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan 3 ayrı test parçasından minimum 45’er adet sertlik ölçümü alınmıştır. Şekil 7.13’te mikrosertlik alınan noktaların doğrultusu şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 7.13’e göre “0” noktası kaynak metalinin merkezini, (+) yön doğrultusu Hardox 450 çeliğinin kaynak bölgesinden başlayıp ergime çizgisi ITAB ve ana malzemesinin doğrultusunda devam etmekte olup (-) yön doğrultusu S355J2 çeliğinin kaynak bölgesinden başlayıp ergime çizgisi ITAB ve ana malzemesinin doğrultusunda devam ederek sonlanmasından oluşmaktadır. Mikrosertlik ölçümleri kaynak hattı boyunca S355J2

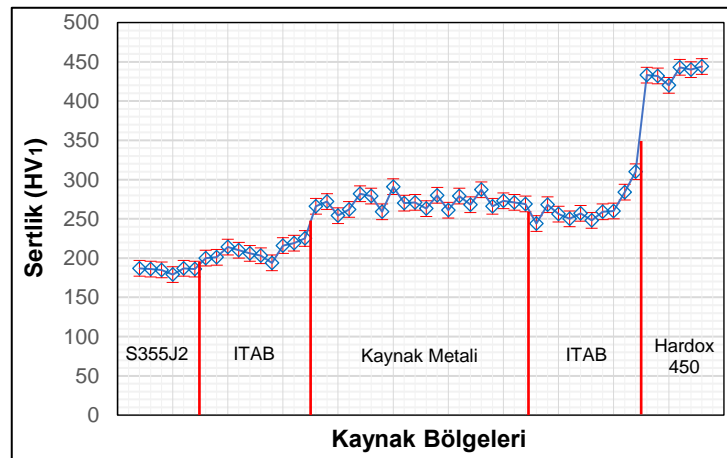
malzemeden başlayıp Hardox 450 malzemeye doğru alınmıştır. Sertlik sonuçları grafiksel olarak Şekil 7.14'te SG3 tel ile birleştirilen numune için, Şekil 7.15'te 110SG tel ile birleştirilen numune için ve Şekil 7.16'da ise 307LSi tel ile birleştirilen numune için gösterilmiştir. Şekil 7.17'de ise daha kolay anlaşılması açısından SG3, 110SG ve 307LSi numunelerinin sertlik grafikleri tek bir grafikte beraber olarak gösterilmiştir.



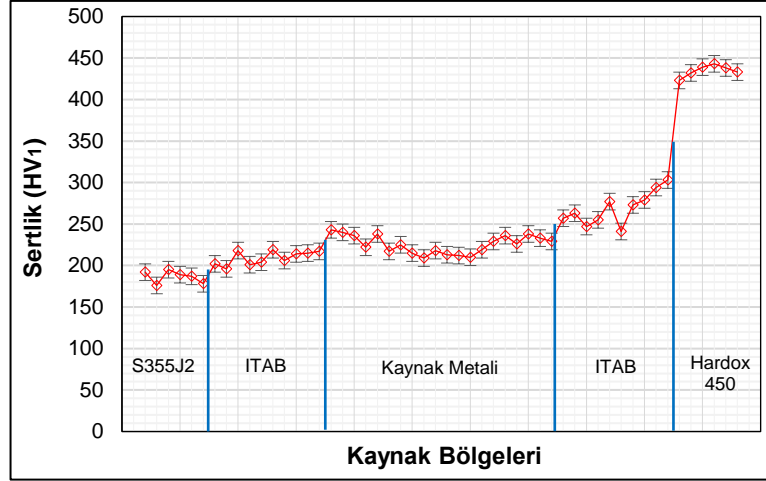
Şekil 7.13. Mikrosertlik ölçümleri şematik gösterimi.



Şekil 7.14. SG3 ilave tel ile birleştirilmiş kaynaklı numunenin sertlik grafiği.

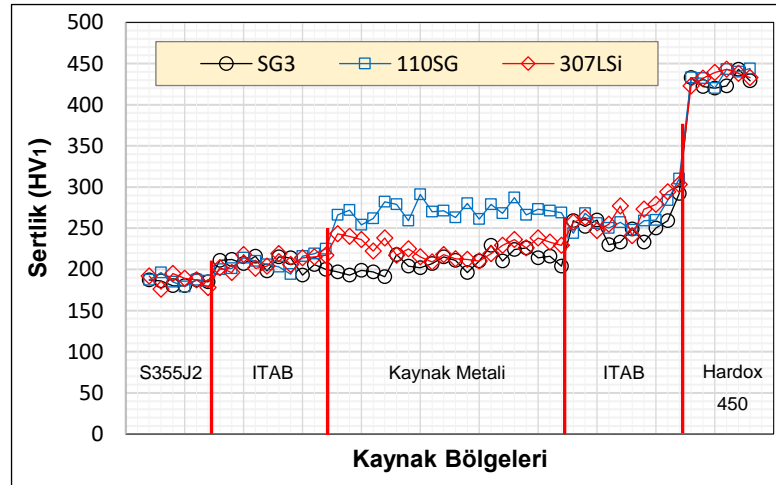


Şekil 7.15. 110SG ilave tel ile birleştirilmiş kaynaklı numunenin sertlik grafiği.



Şekil 7.16. 307LSi ilave tel ile birleştirilmiş kaynaklı numunenin sertlik grafiği.

Gerçekleştirilen sertlik testleri sonucunda Şekil 7.14-7.16'da S355J2 ve Hardox 450 ana malzemelerinin sertlik değerleri incelendiğinde her üç kaynaklı test numunesinde de benzer sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. S355J2 ana malzemesinde en düşük değer 176 HV, en yüksek değer olarak 195 HV ölçülmüştür. Hardox 450 ana malzemesinin sertlik değerleri incelendiğinde ise en düşük 420 HV, en yüksek 444 HV arasında olduğu bulunmuştur. Dolayısıyla çalışmada kullanılan malzemelerden Hardox 450 çeliğinin sertliği S355J2 yapı çeliğine göre daha yüksek sertlik değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7.17. SG3, 110SG ve 307LSi ile birleştirilen numunelerin sertlik grafikleri.

Şekil 7.17'deki sertlik grafiği incelendiğinde her üç numunede S355J2 malzemesinin ITAB'ında ana malzemeye göre sertlik değerlerinde bir artış olduğu dikkat

çekmektedir. Bunun sebebi olarak kaynak esnasında kaynak metaline bitişik olan ITAB'ın hızlı bir şekilde ısınması ve akabinde de hızla soğuması sonucunda bu bölgede meydana gelen mikroyapı değişikliği gösterilebilir. Ayyıldız [15], yaptığı çalışmada S355J2 yapı çeliği ile aşınmaya karşı dayanıklı Hardox 450 çeliğini robotik gazaltı kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğini incelemiş ve metalurjik özelliklerini değerlendirmiştir. Çalışmasında S355J2 ana malzemeden kaynak metaline doğru sertlik ölçümlerinde artış olduğunu ifade etmiştir.

Literatürde [88] metalurjik açıdan düşük alaşımlı çelikler ergitmeli kaynak yöntemlerinde çatlama riski en fazla olan ITAB'da sertliğin 350 HV değerini aşmaması istenmektedir. Aksi halde kaynak öncesi kaynak yapılacak numunelere kimyasal bileşimine bağlı olarak farklı sıcaklıklarda ön tavlama yapılması gerekmektedir. Çalışma kapsamında farklı kimyasal ve mekanik özelliklere sahip üç farklı ilave tel kullanılarak robotik MAG kaynağı ile birleştirilen kaynaklı numunelerin kaynak metali ve ITAB'ında yapılan sertlik testlerinde bu değeri geçen herhangi bir değere rastlanmamıştır. Kaynaklı malzemelere uygulanan tahribatsız muayenelerde kaynak yüzeyine açık ve yüzey altında herhangi bir çatlak görülmemesi bu sonucu doğrulamaktadır.

Şekil 7.17'de Hardox 450 malzemesinin ITAB'ında sertlik değerleri incelendiğinde ise S355J2 ITAB'ının tersine her üç numunede ana malzemeye göre bir düşüş olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak martenzit yapıdaki Hardox 450 çeliğinin morfolojik yapıdaki değişimleridir. Burada sertliğin düşmesindeki sebep olarak kaynak esnasında yüksek ısıdan dolayı Hardox 450 malzemenin yapısında var olan martenzit fazı temperlenerek bir miktar süneklik kazanmasından kaynaklanmaktadır. Bir başka ifade ile kaynak öncesinde martenzit olan Hardox 450 ITAB'ı kaynaktan sonra temperlenmiş martenzite dönüşmekte dolayısıyla da sertlik bu bölgede düşmektedir. Yılmaz [19], yaptığı çalışmada masif ve özlü kaynak telleri ile birleştirilen Hardox 400 çeliklerinin mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemiştir. Yaptığı çalışmada sertlik testlerinde ölçümlerin Hardox 400 ana malzemeden ITAB'a doğru gidildikçe azaldığını ifade etmiştir. Konat vd. [89] Hardox 450 malzemeleri tozaltı ark kaynak yöntemi ile yatay pozisyonda 3 mm ilave tel kullanarak iki paso ile birleştirmişler ve kaynaklı numunelere sertlik testi uygulamışlardır. Sertlik ölçümleri

sonucunda kaynak metali sertliklerinin (ortalama 225 HV) ana malzemedan (ortalama 375 HV) yaklaşık %60 düşük olduğunu, ITAB'ın ise ana malzemedan başlayarak kaynak metaline doğru giderek azaldığını rapor etmişlerdir.

Şekil 7.17'de SG3, 110SG ve 307LSi ile birleştirilen test numunelerinin kaynak bölgelerindeki sertlik değerleri genel olarak incelendiğinde, kaynak metali sertliklerinin S355J2 ana malzemenin sertlik değerlerinden daha yüksek, Hardox 450 malzemenin sertlik değerinden daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun sebebi olarak kaynak metallere iki ayrı ana malzemenin ve kaynak telinin kimyasal ve mekanik kompozisyonunu içerdiği ve bundan dolayı böyle bir sonucun ortaya çıktığı görülmüştür. Kaynaklı numunelerin kendi aralarındaki karşılaştırılması yapıldığında ise kaynak metallere en yüksek sertlik değerinde 110SG ilave tel kullanılarak yapılan birleştirmeden elde edilmiştir. SG3 teliyle birleştirilen test numunesinde kaynak metalinde en düşük sertlik 191 HV, en yüksek sertlik ise 229 HV ölçülmüştür. 110SG teliyle birleştirilen test numunesinde kaynak metalinde en düşük sertlik 254 HV, en yüksek sertlik ise 291 HV ölçülmüştür. En düşük ve en yüksek sertlik değerleri 307LSi teliyle birleştirilen numune için sırasıyla 209 HV ve 243 HV'dir. Her üç kaynak metali birbiri ile karşılaştırıldığında 110SG'nin sertlik değerinin daha yüksek ölçülmesi sebebinin % C oranının diğer numunelere göre fazla olmasından kaynaklandığına varılmıştır. % C oranı arttıkça sertlik değerinde bir artış söz konusudur. Ayrıca kaynak işlemlerinde değişen bir kimyasal kompozisyon ve mikroyapısal değişikliklerin sertlikteki değişime sebep olduğu düşünülebilir. 307LSi ve SG3 tel ile birleştirilen numunelerin kaynak bölgesindeki % C oranları birbirine yakın değerlerdedir. 307LSi'deki sertlik değerinin daha yüksek olmasının nedeni olarak % Cr oranının 307LSi'de fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kurt [5], yaptığı çalışmada zırh çeliklerinin robotik MIG/MAG kaynağı ile birleştirilmesinde ilave metallere mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Yaptığı çalışmada SG3 ve 110SG ilave metalleriyle kaynatılmış test numunelerindeki kaynak bölgesinin sertlik değerlerinin karşılaştırılmasında 110SG telinin sertlik değerlerinin SG3 ilave metaline göre daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmıştır. Bunun sebebi olarak ilave tellerdeki ve ana malzemedeki kaynaklı birleştirme sonucunda değişen kimyasal kompozisyon olduğunu sebep göstermiştir.

Bu durumda çalışmalar sonucu elde edilen sertlik değerlerinin daha önce yapılan çalışmalar ile uyum içinde olduğu söylenebilir.

Ana malzemeler hariç kaynak bölgesine ait sertlik dağılımları birlikte incelendiğinde; kaynak metali ve ITAB sertlik değerlerinde değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesindeki sertlik değişiminin, kaynak esnasındaki ısı çevrime bağlı olarak kaynak metali ve ITAB'da meydana gelen mikroyapı değişikliklerine göre farklılık gösterdiği düşünülmektedir. Oluşan mikroyapılar, kaynaklanan parçanın kalınlığı, kimyasal bileşimi ve uygulanan enerji miktarına bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Bu bağlamda birbirinden farklı üç ayrı telle yapılan kaynak birleştirmelerinde, kimyasal bileşim farklarından kaynaklanan mikroyapı ve mikrosertlik değişimleri gözlemlenmiştir.

7.9. ÇEKME TESTİ

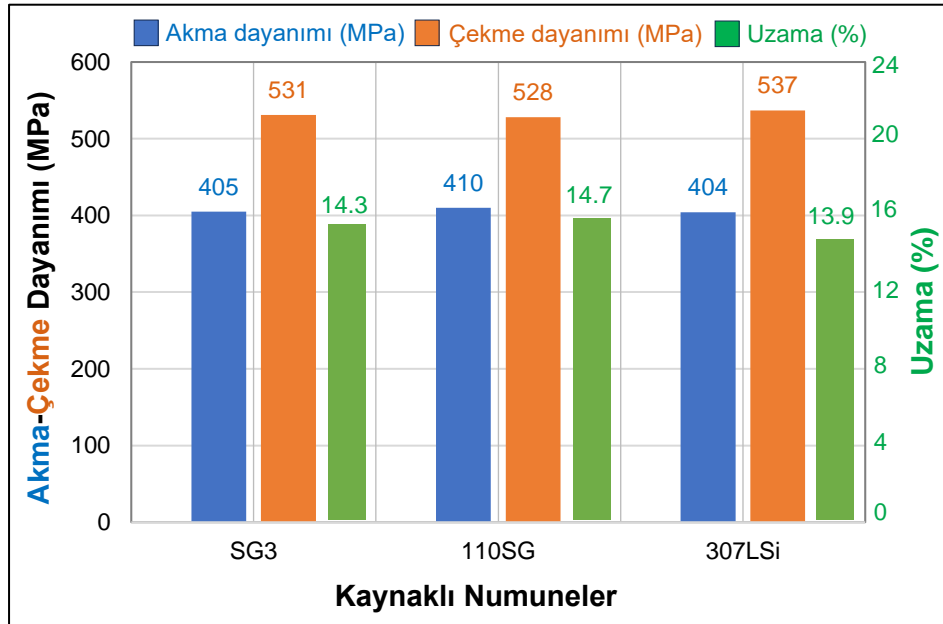
Çekme testleri, kaynaklı bağlantının mukavemeti ile esas malzeme mukavemeti arasındaki durumun değerlendirilmesi için uygulanmıştır. Çekme testi sonucu verileri ile incelemesi yapılan kaynaklı numuneye ait akma, çekme dayanımı ve yüzde uzama nitelikleri tespit edilmektedir. Çekme testi ile elde edilecek sonuç yani kullanılan kaynak yönteminin uygunluğu açısından kaynaklı numune mekanik özelliklerinin esas malzeme mekanik özelliklerine yakın olması beklenmektedir. Bu amaçla tüm numunelerin çekme testleri yapılmıştır. Ana malzemeleri doğrulamak amacıyla kaynak testleri öncesinde bu malzemelere çekme testleri yapılmıştır. S355J2 ve Hardox 450 malzemelerine kaynak işlemi öncesinde 3'er adet numune alınarak çekme testi yapılmıştır. Çizelge 7.3'te üç ayrı test numunesinin ve ana malzemelerin çekme değerleri, akma ve uzama değerleri verilmiştir. Şekil 7.18'de test numunelerinin çekme testi grafiği ortalamaları, akma ve çekme değerleri gösterilmiştir. Yapılan testlerle ilgili aşağıda Şekil 7.19'da çekme testi sonrası numune görseli verilmiştir.

Çizelge 7.3. Çekme test sonuçları.

Numune	Akma Dayanımı (MPa)	Ortalaması (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalaması (MPa)	Uzama (%)	Ortalama (%)	Kopma Bölgesi
SG3 teli ile birleştirilen numune	395	405	527	531	13,8	14,3	S355J2 Ana Malzeme
	399		533		14,2		
	421		533		14,8		
110SG ile birleştirilen numune	400	410	525	528	14,2	14,7	S355J2 Ana Malzeme
	410		529		14,6		
	420		531		15,2		
307LSi ile birleştirilen numune	408	404	538	537	14,4	13,9	S355J2 Ana Malzeme
	405		533		13,9		
	399		540		13,4		
S355J2 Ana malzeme	408	408	531	532	23,1	23,6	-
	406		536		24,2		
	411		530		23,6		
Hardox 450 Ana malzeme	1148	1146	1454	1455	9,2	9,2	-
	1140		1451		9		
	1150		1460		9,5		

S355J2 ana malzeme ve Hardox 450 ana malzemelerinin minimum çekme değerleri sırasıyla 532 MPa ve 1455 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan ana malzeme çekme test sonuçlarına göre malzemeler literatür sonuçlarına göre uygun bulunmuştur.

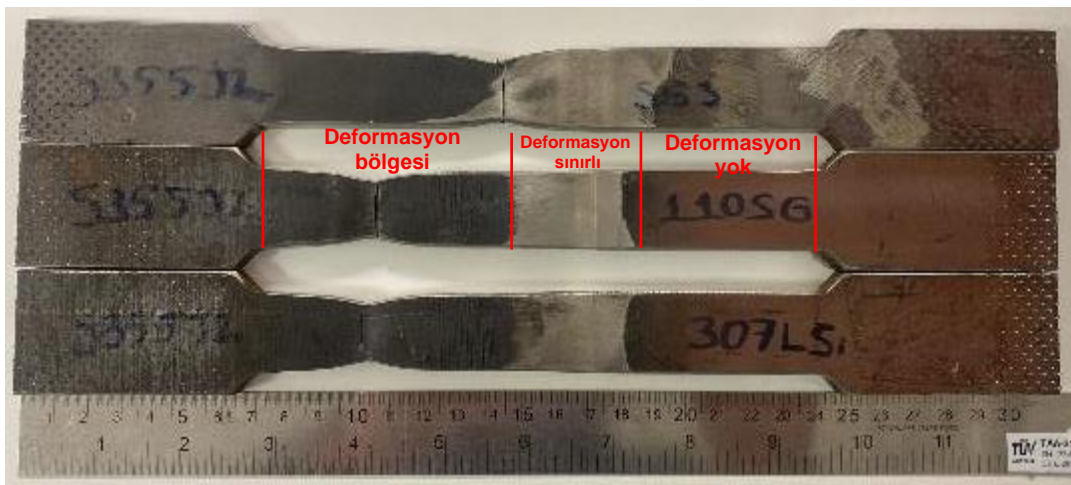
Şekil 7.18’de kaynaklı numunelerden ölçülen çekme test sonuçlarına göre oluşturulan çekme-akma ve % uzama grafikleri verilmiştir.



Şekil 7.18. Çekme test sonuçları grafiği.

Şekil 7.18’de verilen çekme ve akma test sonuçları grafiğine göre en düşük ortalama çekme değeri 110SG teli ile kaynatılmış olan test numunesinde olup 528 MPa değerindedir. En yüksek çekme değeri ise 307LSi teli ile kaynatılmış test numunesinde olup 537 MPa değerindedir. Çizelge 6.4’de verilen ilave kaynak tellerinin mekanik özellikleri incelendiğinde SG3 telinin çekme mukavemeti minimum 540 MPa, 110SG telinin 760 MPa, 307LSi telinin ise 620 MPa’dır. Kaynaklı malzemeler ile ana malzemelerden elde edilen değerler karşılaştırıldığında en düşük çekme dayanımının S355J2 ana malzemede olduğu görülmektedir. Bu nedenle doğal olarak çekme testleri sonucunda kaynaklı numunelerin tümünde kopma birleştirmenin ana malzeme tarafında gerçekleşmiştir. Kantur vd. [84], TIG kaynağı ile birleştirilen 304L ve S355J2C+N malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında S355J2C+N malzeme ile 304L malzemenin kaynaklı birleştirilmesi ER309L tel ile gerçekleştirilmiştir. Ana malzemelerin ve kaynak dolgu telinin mekanik özellikleri karşılaştırıldığında S355J2C+N malzemesinin daha düşük çekme dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca çekme testi sonucunda kopma noktalarının S355J2C+N ana malzemeden ve ITAB’dan olduğunu ifade etmişlerdir.

Şekil 7.19’de her bir kaynak teli ile birleştirilmiş kaynaklı numuneden birer adedinin kopma görselleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde S355J2 ana malzemeden meydana gelen kopmaların sünek tipte olduğu ve boyun vererek gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 7.19. Çekme testi sonrası kopma görselleri.

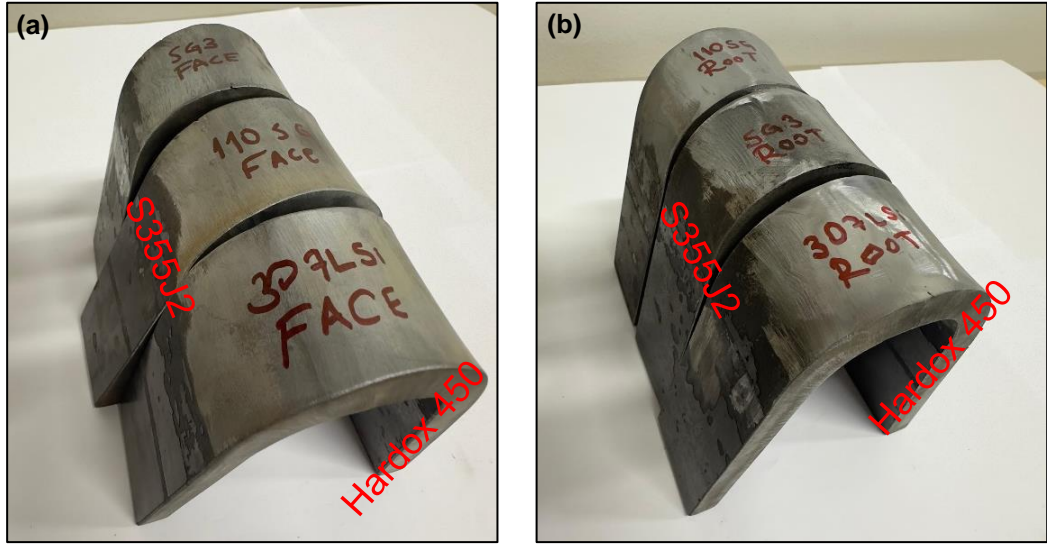
Çizelge 7.3'te verilen % uzama sonuçları incelendiğinde kopmanın ana malzemeden olmasına rağmen değerlerin yaklaşık %70'e yakın düştüğü tespit edilmiştir. Şekil 7.19 dikkatli bir şekilde incelendiğinde uzamaların sadece S355J2 malzemeden olması, kaynak metali ve Hardox 450 malzemeden uzamanın sınırlı veya hiç olmaması ölçülen sonuçlarının doğruluğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Çekme testi sonrası kopma numuneleri çekme testi esnasında oluşan deformasyon açısından üç bölgeye ayrılabilir. Bu bölgeler şekil üzerinde deformasyonsuz bölge, sınırlı deformasyon bölgesi ve deformasyon bölgesi olarak adlandırılmıştır. Şekil 7.17'de verilen sertlik grafikleri incelendiğinde Hardox 450 ana malzemenin sertliğinin kaynaklı bağlantının diğer bölgelerine (kaynak metalleri ve ITAB'lar) göre çok yüksek olması bu bölgede çekme testi esnasında deformasyon olmasının güç olduğunu göstermektedir. Hardox 450 ITAB ve kaynak metali sertlik değerlerinin S355J2 ana malzeme sertlik değerlerine göreceli olarak yakın olması ölçülen sertlik değerlerinin tutarlı olduğunu göstermektedir. Özturan [6] ve Özturan vd. [63] yaptığı çalışmada Hardox 450 ve S355J2C+N çeliklerinin gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesini mikroyapı ve mekanik özellikler bakımından incelenmişlerdir. Çalışmada Hardox450 ve S355J2C+N çeliklerinin kaynağında, çekme testlerinde kopma noktası olarak S355J2C+N malzeme olduğunu ifade etmiştir. Kaya [2], yaptığı çalışmada, S235JR ve S355JR yapı çeliklerinin özlü tel elektrotla MAG kaynak yöntemiyle kaynaklanabilirliğini incelemiştir. Yapılan çalışmada, S235JR-S355JR kaynaklı bağlantının kopma noktası S235JR ana malzemesi olduğunu ifade etmiştir. Bir başka ifade ile kopmanın mukavemeti düşük olan S235JR malzemeden koptuğunu belirtmiştir. Verilen literatür bilgileri ile bu çalışma sonucu elde edilen sonuçların birbirlerini doğruladığı tespit edilmiştir.

7.10. EĞME TESTİ

Eğme testi, kaynaklı birleştirme yüzeyindeki veya yakınındaki sünekliliği, birleştirme bölgesinde veya bölgeye yakın hasarları değerlendirmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Numunelerin alın kaynaklarına, enine kök, yüzey ve kenar bölgelerine eğme testleri uygulanabilir. Bu yöntem aynı zamanda ana metal ve kullanılan ilave malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde de kullanılır. Bu

nedenle test parçalarının kaynak bölgesi sünekliliğini tespit etmek amacıyla eğme testi gerçekleştirilmiştir.

Test numuneleri 10 mm kalınlıkta olup her bir ilave tel ile birleştirilmiş kaynaklı numuneye 1 kep ve 1 kök olmak üzere iki adet eğme testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.20'de test sonrası eğilmiş numunelerin görselleri verilmiştir. Burada (a) kep eğme numunelerini (b) ise kök eğme numunelerini göstermektedir.



Şekil 7.20. Eğme testi sonrası numune görselleri (a) kep eğme ve (b) kök eğme.

Eğme deneyinin amacı, kaynak bölgesinin eğme gerilmesine maruz kalan bölgelerinin öngörülen değerlere ve ana malzemenin özelliklerine uygunluğunu belirlemektir. Deneysel sonuçlarına göre, kaynaklı numunelerin üzerindeki kaynak dikişleri üzerine 180° eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Test sonucu kaynak dikişlerinde herhangi bir hasar veya çatlak oluşmadığı gözlemlenmiştir. Üç farklı ilave metal kullanılarak robotik MAG kaynağı ile birleştirilen kaynaklı numunelerin gerek kaynak kepinde gerekse kaynak kökünde 180° eğme testi sonucunda hasar oluşmaması kaynaklı numunelerin metalurjik olarak ana malzemeler ile uyum sağladığının bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Elde edilen sonuçlar bu çalışma dahilinde kullanılan ilave metaller ve kaynak parametreleri dahilinde S355J2 ve Hardox 450 malzemelerin MAG kaynağı ile birleştirildikten sonra güvenle şekillendirilebileceğini göstermektedir. Bir başka ifade ile belirtilen şartlarda birleştirilmiş kaynaklı numuneler, kaynak

bölgelerinde sünekliliklerini korumakta ve ve başarılı şekilde sonradan eğme yöntemiyle şekillendirilebilirler.

Özturan [6], yaptığı çalışmada Hardox 450 ve S355J2C+N çeliklerinin gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesini mikroyapı ve mekanik özellikler bakımından incelenmişlerdir. Çalışmada farklı malzemelerden olan Hardox 450 ve S355J2C+N malzemeleri arasında kaynaklı numuneler üzerinde 180° eğme deneyleri gerçekleştirmiştir. Kaynaklı numunelerin enine eğme deneylerinde kaynak birleşiminde herhangi bir görünür kusur gözlemlenmemiştir.

Kaçar vd. [68], farklı çelik çiftinin (hardoks-östenitik paslanmaz çelik) birleştirilmesinde kaynak yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisini araştırmış ve elektrik ark kaynağı ile birleştirilmiş numunede kaynak kökünde 180° eğmeye bağlı olarak bir çatlak meydana geldiğini, ancak MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş numunenin eğme deneyi sonrasında birleşme bölgesinde herhangi bir çatlak oluşmadığını, sonuç itibarıyla MAG kaynak yöntemi ile birleştirmelerin şekillendirilebilirliğinin daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Yılmaz [19] çalışmasında, MAG yöntemi ile HARDOX 400 aşınmaya dayanıklı çelik levhaları, SG2 ve SG3 masif kaynak telleri ve E 71 T-1 adlı özlü kaynak teli kullanılarak V-kaynak ağzı formunda ve yatay pozisyonda MAG kaynak yöntemi ile birleştirmiştir. Eğme testleri sonucunda yeterli nüfuziyet ve birleştirme kalitesinin elde edildiği ve kullanılan ilave malzemelerin ana yapıyla uygun sünekliliğe sahip olduğu durumlarda olumlu sonuçlar alındığını rapor etmiştir.

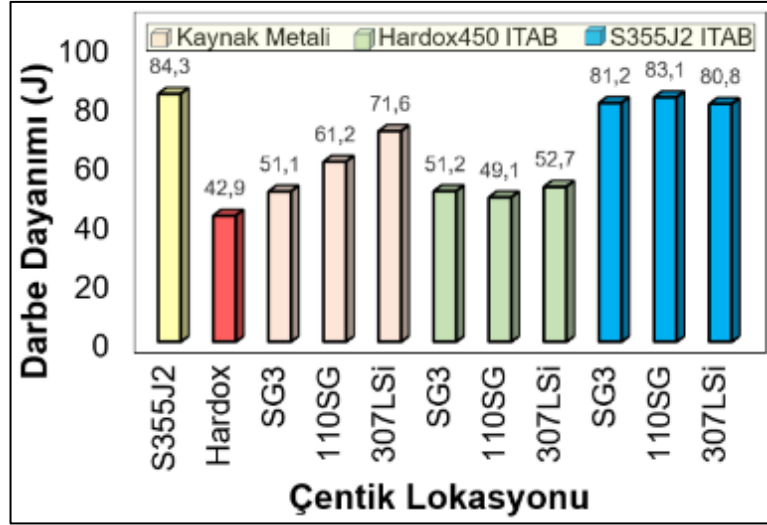
Eğme testleri esnasında kep eğme testinde kaynak kepi çekme gerilmelerine maruz bırakılırken kaynak kökleri ise basma gerilmesine maruz kalmaktadır. Bir kaynaklı bağlantıda kaynak keplerinin kaynak köklerine göre daha kritik oldukları düşünüldüklerinde konstrüksiyonlarda kaynak keplerinin çekme yüküne maruz bırakılması tercih edilmelidir. Bu tercih kaynak tasarımcıları için, zorlanmaya uygun konstrüksiyon önerileri açısından son derece önemlidir. Literatürde [90] kaynak dikişi köklerininin çekme yükü tarafına getirilmemesi, kaynak dikiş köklerininin mümkünse basma yükü tarafına getirilmesi tavsiye edilmektedir.

7.11. ÇENTİK DARBE TESTİ

Çentik darbe testi, malzemelerin dinamik kuvvetlere karşı kırılma mukavemetini ve enerjisini tespit etmek amacıyla uygulanan bir testtir. Çentik darbe testinde, yüksek hızda uygulanan ani bir darbenin malzeme üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılır. Bu test, malzemenin sönümlendiği enerji miktarını ölçer ve malzemenin gevrekliği veya sünekliği hakkında bilgi sağlar. Ayrıca, bu test, kaynaklı malzemelerin belirlenmiş bir sıcaklıkta darbe dayanımını ölçmek için de kullanılır. Bu amaç doğrultusunda, numuneler özel olarak hazırlanmış ve her biri kaynak metalini, ITAB ve ana malzemeleri içerecek şekilde oluşturulmuştur. Çentik darbe numuneleri -20°C’de her bir seriden 9 adet ve ana malzemelere 3’er adet olacak şekilde hazırlanmıştır. Test numuneleri üç farklı ilave tel ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak metalleri ile hem S355J2 yapı çeliği hem de Hardox 450 ITAB’ından alınmıştır. Çizelge 7.4’te kaynaklı numunelerin kaynak bölgelerinden ölçülen çentik darbe sonuçları ve ortalama değerleri gösterilmiştir. Şekil 7.21’de ise Çizelge 7.4’de verilen sonuçların kolaylıkla görülüp değerlendirilebilmesi için grafiksel olarak verilmiştir.

Çizelge 7.4. Çentik darbe sonuçları.

Çentik Darbe Sonuçları (-20 C°)					
Tel	Çentik Lokasyonu	Darbe Enerjisi (J)			Ortalama
		1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	
SG3 tel ile birleştirilen numune	Hardox 450-ITAB	52,9	49,7	51,1	51,23
	Kaynak Metali	49,5	51,8	52,2	51,17
	S355J2-ITAB	79,9	83,1	80,7	81,23
110SG tel ile birleştirilen numune	Hardox 450-ITAB	50,6	48	48,7	49,1
	Kaynak Metali	61,7	58,8	63,3	61,26
	S355J2-ITAB	81,3	85,1	82,9	83,10
307LSi tel ile birleştirilen numune	Hardox 450-ITAB	50,8	53,3	54,2	52,77
	Kaynak Metali	68,6	75,6	70,8	71,68
	S355J2-ITAB	80,4	77,9	84,3	80,87
S355 Ana malzeme		85,20	83,30	84,50	84,33
Hardox 450 Ana malzeme		41,10	44,50	43,30	42,96



Şekil 7.21. Çentik darbe grafikleri.

Çizelge 7.4'te kaynak işlemlerinde kullanılan ana malzemelerin çentik darbe tokluk değerlerine bakıldığında S355J2 ana malzemenin Hardox 450 ana malzemeye göre yaklaşık %50 daha fazla tokluğa sahip olduğu görülmektedir. Çizelge 7.4'e göre çentik darbe testi sonrası elde edilen veriler incelendiğinde kaynak metalinden en yüksek ortalama çentik darbe dayanımı sonucu 307LSi kaynak teliyle yapılan test numunesinde olup değeri 71,68 J olarak ölçülmüştür. Sonrasında 110SG teli ile birleştirilen test numunesi ile kaynak metalinin çentik darbe sonucu 61,26 J ve son olarak SG3 teli ile birleştirilen numunede kaynak metali çentik darbe testi sonucu 51,17 J olarak ölçülmüştür. Kaynaklı imalatlarda kaynak metali ana malzeme(ler) ile ilave metalin karışımından meydana gelmektedir. Dolayısıyla her üç birleştirmede de elde edilen kaynak metali tokluk değerlerinin darbe dayanımı düşük olan Hardox 450 ana malzemedeki yüksek, darbe dayanımı yüksek olan S355J2 ana malzemedeki düşük olması beklenmektedir. Kaynak metallere ölçülen tokluk değerlerinin belirlenen değerler arasında ölçülmesi olumlu bulunmuştur. Kaynak metallere ölçülen tokluk değerleri başka bir açıdan kıyaslandığında en yüksek tokluğun östenitik ilave metal ile birleştirilmiş kaynaklı numuneden ölçüldüğü belirlenmiştir. Bu sonuç östenitik malzemelerin tokluğunu ferritik malzemelerin tokluğundan yüksek olduğu sonucunu doğrulamaktadır.

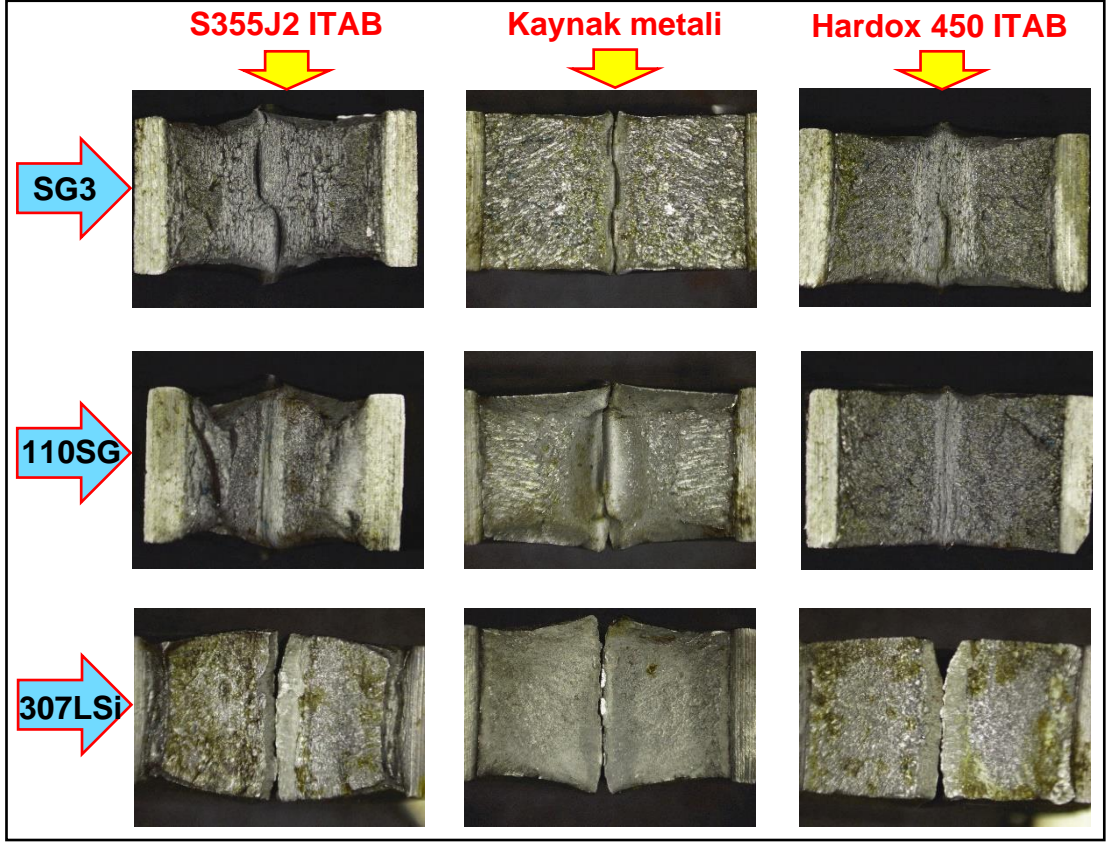
Kurt [5], yaptığı çalışmada zırh çeliklerinin robotik MIG/MAG kaynağı ile birleştirilmesinde ilave metallere (SG3, ER110S-G, 309LSi ve SG2209) mikroyapı

ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmada çentik darbe testleri sonuçlarında en yüksek darbe tokluğuna östenitik 309LSi kaynak teliyle ulaşılmıştır. Çalışmada SG3 ve ER110S-G ilave metalleri ferritik yapıda oldukları için tokluk değerlerinin en düşük seviyede olduğu rapor edilmiştir.

Üç farklı kimyasal bileşime sahip ilave tel kullanılarak yapılan kaynak işlemleri sonucunda elde edilen numunelerin ITAB'ları incelendiğinde birleştirmenin Hardox 450 ana malzeme tarafında yaklaşık %10 bir tokluk artışı (ana malzeme 42.9J, Hardox 450 ITAB'ı yaklaşık 50J) görülmüştür. Bu olumlu gelişmenin aksine birleştirmenin S355J2 ana malzeme ITAB'ında yaklaşık %3'lük bir tokluk düşüşü (S355 ana malzeme 84,33J, S355 ana malzeme ITAB'ı yaklaşık 81J) tespit edilmiştir. Burada her iki malzemenin de ITAB'ından ölçülen darbe tokluk değerlerinin kaynaklı numunelerin o bölgelerinden ölçülen sertlik değerleri ile doğrudan ilişkili olduğu sonucu çıkmaktadır. Bir başka ifade ile ITAB'ı ana malzemedan yüksek olduğu durumda darbe dayanımı azalırken, ITAB'ı ana malzemedan düşük olduğu durumda darbe dayanımı artmaktadır. Son olarak her iki ana malzemenin ITAB'ından ölçülen darbe dayanımlarının gerekli şartları sağladığı söylenebilir.

Özturan vd. [63] S355J2C+N ve Hardox 450 malzemeleri gaz metal ark kaynak yöntemi ile ER70S-6 ilave metal kullanarak birleştirmişler ve kaynaklı bağlantılara -40, -20 ve oda sıcaklığında çentik darbe testi uygulamışlardır. Darbe testleri sonucunda S355J2C+N malzeme ITAB tokluk dayanımının Hardox 450 malzeme ITAB'ından daha yüksek darbe tokluğu sağladığını ayrıca kaynak metali tokluk değerlerinin S355J2C+N malzeme ITAB'ından düşük, Hardox 450 ITAB'ından ise daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak Charpy darbe testi sonuçlarının her iki malzemenin de katalog değerlerini karşıladığı ve tokluk açısından uygun bir kaynak kombinasyonunun elde edildiği belirtmişlerdir. Bu çalışma dahilinde bulunan darbe sonuçlarının literatür sonuçları ile benzerlik gösterdiği görülmüştür.

Kaynaklı numunelerin darbe testinden sonra kaynak metallere malzemelerin ITAB'larından elde edilen kırık yüzey görüntüleri Şekil 7.22'de verilmiştir.



Şekil 7.22. Çentik darbe testi sonrası kırılmış numune görselleri.

Kırık yüzeyler makro olarak incelendiğinde östenitik ilave metalin kullanıldığı birleştirmelerin kaynak metallere elde edilen kırık yüzeylerin diğer iki ilave tel ile yapılan birleştirmeden elde edilen kırık yüzeylere göre daha sünek karakterde oldukları görülmektedir. Dolayısıyla elde edilen bu kırık yüzey sonuçları kaynaklı numunelerden elde edilen tokluk değerlerini destekler niteliktedir. Ayrıca SG3 ilave tel ile birleştirilen kaynaklı numune kırık yüzeyinin 110SG teli ile birleştirilmiş kaynaklı numuneye göre daha gevrek karakterli olduğu belirlenmiştir.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında savunma sanayii ve madencilik sektöründe kullanılmakta olan 10 mm et kalınlığına sahip Hardox 450 çelik ile yapısal çelik işlerinde yaygın olarak kullanılan S355J2 çeliğın farklı ilave teller kullanılarak MAG kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliği araştırılmıştır. Çalışmada ilave metal olarak ferritik (SG3 ve 110SG) ve östenitik (307LSi) ilave teller kullanılmış ve kaynak işlemleri robotik olarak gerçekleştirilmiştir. Farklı ilave kaynak telleriyle S355J2 yapısal çeliğı ve Hardox 450 zırh çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkilerinin incelenmesi amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Kaynaklı birleştirmelerin kalitesel açıdan uygunluğunu belirlemek amacıyla yapılan görsel muayene, sıvı penetrant muayenesi, ultrasonik muayene ve radyografik muayene sonucunda; kaynak metali ve ITAB'da herhangi bir mikro veya makro boyutta çatlak, gözenek veya bir süreksizliğe rastlanmamıştır. Bu durumda 10 mm et kalınlığındaki S355J2 yapı çeliğı ile Hardox 450 çeliğinin ön ısıtma ihtiyacı olmadan sadece plakalardaki nemi almak suretiyle ön tav işlemiyle 2 pasolu seramik altlıkla kaynaklanabileceğı görülmüştür.
- Farklı kimyasal içeriğe sahip ilave kaynak tellerinin kullanılmasıyla elde edilen kaynak metalinin kimyasal element analizlerinde belirgin farklılıklar görülmüştür. Tellerin kimyasal analiz sonuçlarına göre ana malzemelerle karşılaştırılması yapıldığında kaynak sonrası C, Si, Mn, Cr elementlerinin % oranlarının kaynak metallere göre daha düşük olduğu, ilave kaynak tellerine göre ise arttığı tespit edilmiştir. İlave kaynak tellerinin % C, Si, Mn, Cr oranları ana malzemelere göre ağırlıkça daha düşük olduğu

görülmüştür. Her üç ilave tel ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin makroyapı testlerinde çalışmada kullanılan kaynak parametreleri dahilinde uygun dikiş formlarının oluştuğu ve kaynak ergime çizgisinin her iki malzemeye de simetrik olduğu tespit edilmiştir.

- Kaynaklı numunelere yapılan mikroyapı çalışmaları sonucunda üç farklı ilave tel ile yapılan birleştirmelerde kaynak metali mikroyapılarının birbirlerinden farklı olduğu belirlenmiştir. Ferritik ilave tellerden SG3'ün kullanıldığı birleştirmelerde ferritik ve martenzitik fazlar meydana gelirken, 110SG'de asüküler ferrit ve temperlenmiş martenzit fazlar meydana gelmiştir. Östenitik ilave telin (307LSi) kullanıldığı birleştirmede mikroyapının delta ferrit fazı içerdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca mikroyapı çalışmaları sonucunda her iki malzemenin ITAB'ında ve özellikle de ergime sınırına bitişik yüksek sıcaklık bölgesinde tane irileşmesinin varlığı görülmüştür.
- Kaynaklı birleştirmelerde yapılan mikrosertlik testlerinde en yüksek sertlik değeri Hardox 450 ana malzemedan ölçülürken onu sırasıyla bu malzemenin ITAB'ları, kaynak metalleri, S355J2 malzeme ITAB'ları ve S355J2 ana malzeme takip etmektedir. Bir başka ifade ile Hardox 450 ana malzemedan S355J2 ana malzemeye gidildikçe kaynak bölgesinde sertlik azalmaktadır. Ayrıca kaynak metallere en yüksek sertlik 110SG ilave tel ile birleştirilmiş kaynaklı numuneden ölçülürken diğer iki tel ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerden ölçülen sertlik değerleri birbirlerine yakın bulunmuştur.
- Kaynaklı birleştirmelerin yapılan enine çekme testleri sonucunda her üç birleştirmede de maksimum çekme dayanımları 528-537 MPa aralığında bulunmuştur. Kaynaklı bağlantılarda kopma ise kaynak bölgesi dışından (kaynak metali ve ITAB) ve mukavemeti düşük olan S355J2 ana malzemesinden gerçekleşmiştir. % uzama değerleri ise Hardox 450 ana malzemedan yüksek, S355J2 ana malzemedan daha düşük bulunmuştur.
- Yapılan çentik darbe testlerinde kaynak metali darbe dayanımlarının, darbe dayanımı düşük olan Hardox 450 ana malzemedan yüksek, S355J2 ana malzemedan ise daha düşük olduğu görülmüştür. Kaynak metallere en düşük darbe dayanımı, standartlarda -20 °C'de istenen 27 J tokluk değerini %50'ye yakın aşmış bulunmaktır.

8.2. ÖNERİLER

- Üç farklı tel ile birleştirilmiş yapı çeliği ile aşınmaya dayanıklı Hardox çeliğinin kaynak bölgesinin balistik özellikleri araştırılabilir.
- Kaynaklı numunelere yorulma testleri yapılarak çalışma kapsamında kullanılan en uygun ilave metal belirlenebilir.
- Kaynaklı numunelerin kaynak metalleri ile ITAB'ları farklı sıcaklıklarda darbe testine tabi tutularak darbe geçiş sıcaklıkları belirlenebilir.

KAYNAKLAR

1. Özdemir, M. M., “Sürekli Döküm Yöntemi ile Çelik Üretimine Ait Proses Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 1-5, (2020).
2. Kaya, Y., “S235JR ile S355JR Yapı Çeliklerinin Özlü Tel Elektrotla MAG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 21(3): 597-602, (2018).
3. Garip, O., “Zırh Çeliklerinin Yapı ve Islah Çelikleri ile Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 30-33, (2002).
4. Eleman, B., “Yeni Nesil (İnvertör) ve Geleneksel MIG/MAG Kaynak Makinaları ile Kaynaklanan S355 Kalite Çeliğin Kaynak Dikişlerinin Makro Yapı ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 40-43 (2022).
5. Kurt, R. M., “Zırh Çeliklerinin Robotik MIG/MAG Kaynağı ile Birleştirilmesinde İlave Metallerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Gedik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul, 2022.
6. Özturan, B. A., “Hardox 450 ve S355J2C+N Çeliklerinin Gazaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Bakımından İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, 1-3, (2022).
7. Kaçar, R., Emre, E. H., “Gaz Metal Ark Kaynaklı Zırh Çeliklerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 1, 15-23, (2018).
8. Küçüköner, H., “Dubleks paslanmaz çelik ve basınçlı kap çeliğinin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin mekanik/mikroyapı özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2019).
9. Yürük, A., Bozkurt, B., Kahraman, N., “S235JR karbon çeliği ile AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin MIG kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi”, *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (2017), 21(2), 90-97.
10. Gülenç, B. Candan, İ., Kahraman, N., “MIG-MAG Kaynağı ile Birleştirilen Boruların Tahribatlı ve Tahribatsız Muayenesi”, *Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(4), 631-637 (2006).

11. Tufanoğlu, E., “P460-St52 Malzeme Çiftinin Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 13 (2017).
12. Akay, A., “Astar Kaplama Uygulamalarının S235 JR Malzemelerin Kaynak Kabiliyeti Üzerine Etkilerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 5-8 (2021).
13. Piroğlu, F., Uzgider, E., Vural, M., ve Çağlayan, Ö. B., “Geçmişten Bugüne Yapı Çeliği ve Önemli Yapısal Özellikleri”, **Türkiye Mühendislik Haberleri**, 26(4): 43-36 (2003).
14. **TS EN 10025-2:2019**, “Sıcak haddelenmiş yapı çelikleri” - Bölüm 2: Alaşım-sız yapı çeliklerinin teknik teslim şartları (2019).
15. Ayyıldız E. A., “Aşınmaya Dirençli HBW450 Hardox Çeliği ve S355J2 Yapı Çeliğinin Robotik Gazaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi Ve Metalurjik Özelliklerinin Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2022).
16. Merzalı C. E., “Zirh Çeliklerinde Kaynak Sonrası Isı Tesiri Altında Kalan Bölgenin Özelliklerinin Isıl İşlem ile İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2013).
17. Kara, S., Korkut, M.H., “Zırhlı Muharebe Araçlarında Kullanılan Zırh Plakalarında Kaynak Sonrası Isıl İşlemin Birleşim Mukavemetine Etkisinin Araştırılması”, **Savunma Bilimleri Dergisi**, 11(2) 159-171 (2012).
18. Okay T., Najafigharehtapeh A., Ertek E. H., Kaçar R., “S235JR–Hardox 400 Çelik Çiftinin Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması” 2. **Uluslar arası Demir Çelik Sempozyumu (IISS’15)**, Karabük, (1-3 Nisan 2015).
19. Yılmaz, T. “Masif ve Özlü Kaynak Telleri ile Birleştirilen HARDOX 400 Çeliklerinin Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, (2010).
20. Gençdoğan D., “AISI 430/HARDOX 450 Çeliğinin Nikel Ara Tabaka Kullanılarak TIG Çift Taraflı Ark Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adıyaman, (2020).
21. Ramirez, C.R., Giarollo, D.F., Mazzaferro, J.E., Mazzaferro, C.P., “Prediction of angular distortion due GMAW process of thin-sheets Hardox 450® steel by numerical model and artificial neural network”, **Journal of Manufacturing Processes**, 68: 1202-1213, (2021).
22. https://www.ssab.com/api/sitecore/Datasheet/Get?key=e95fe73946d64960a9c462504235f6bd_tr-tr

23. Guen, RE.L., Carin, M., Fabbro, R., Coste, F., Le Masson, P., “3D heat transfer model of hybrid laser Nd:YAG-MAG welding of S355 steel and experimental validation”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(7–8) 1313-1322 (2011).
24. Tlbenti, K., “MIG-MAG Eriyen Elektrod ile Gazaltı Kaynağı”, *Gedik Eğitim Vakfı, Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü*, İstanbul, 70-89, (1990).
25. Kahraman, N., Glen, B., “Modern Kaynak Teknolojisi” Kitabı, 4. Baskı, *Epa-Mat Basın Yayın Ltd. şti*, Ankara, 101-142 (2020).
26. Meng, X., Qin, G., Zhang, G., Fu, B., Zou, Z., “High speed TIG–MAG hybrid arc welding of mild steel plate”, *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2417-2424, (2014).
27. Gao, X., Liang, Z., Zhang, X., Wang, L., Yang, X., “Penetration state recognition based on stereo vision in GMAW process by deep learning”, *Journal of Manufacturing Processes*, 89(3) 349-361, (2023).
28. Kumar, H., Prasad, R., Kumar, P., Deo, M., “Microstructural and mechanical properties of GMAW welded 572 GR 50 steel”, *Materials Today: Proceedings*, (Available online 30 June 2023).
29. Vural, M., Anık, S., Gazaltı Ark Kaynağı (TIG, MIG-MAG), *Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü*, Yayın No: 3, İstanbul, 161-179, (1989).
30. Suban, M., “Determination of Stability of MIG/MAG Welding processes”, *Quality and Reliability Engineering International*, 17: 345–353 (2001).
31. Çayırhan, G., “Dubleks paslanmaz elik (2205) ve basınçlı kap (P355GH) eliğinin robotik MAG kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 36-42, (2019).
32. Sevim, B. “Endüstriyel Gazların Kaynak ve Kesim Uygulamalarındaki Kullanım Alanları”, *X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, 1-17, (17-18 Kasım 2017).
33. Gök, G. V., Afyon ., “Kaynak Uygulamalarında Robot Teknolojisi”, *Kaynak Teknolojisi 2. Ulusal Kongresi*, Ankara (12-12 Kasım 1999).
34. Akgün, F., “Sacların Kaynakla Birleştirilmesinde Robotik Sistemin Kaynak Kalitesine ve Hassasiyetine Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *G.Y.T.E., Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli (2005).
35. Anık, S., Vural, M. “1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 45-48 (1993).

36. Türker, K.S., “Endüstride Kaynak Robotları (Proseslerin İncelenmesi ve Geliştirilmesi)”, Yüksek Lisans Tezi, **Gedik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul 10-16, (2015).
37. Hong, T.S., Ghobakhloo, M., Khaksar, W., “Robotic Welding Technology”, **Comprehensive Materials Processing**, 6; 77-99 (2014).
38. Ayan, İ.B., “Kaynaklı İmalat Yapan İşletmelerde Uluslararası Sertifikasyon Sistemleri”, Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü**, İzmir, (2010)
39. Akay, A.A., “Farklı Özellikteki Malzemelerin Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Birleştirmelerin Tahribatlı ve Tahribatsız Muayenesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, (2012)
40. Korkmaz, Ö.E., “Uçaklarda Kullanılan Alüminyum Malzemelerdeki Korozyonun İncelenmesi, Önlenmesi ve Tahribatsız Muayene ile Tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2012)
41. Gönül, E., Bayraktaroğlu, B., “Tahribatsız Muayenenin İşletme Aşamasında Kullanılmasının Önemi”, **12. Kaynak Teknoloji Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı**, Ankara, 19-20 Kasım 2021.
42. Çelik, M., “Kaynak Bağlantılarında Konvansiyonel ve Gelişmiş Ultrasonik Muayene Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2013)
43. **TS EN ISO 17637** “Ergitme kaynaklarının tahribatsız muayenesi” -Ergitme kaynaklı birleştirmelerin gözle muayenesi (2017).
44. Atılğan, Y., “Depolama Tankı İmalatında Tozaltı Ark Kaynağı Uygulaması ve Kaynak Bölgesinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, (2022).
45. Oflaz, İ., Karadeniz, E., “Tahribatsız muayene yöntemleri ile çelik boru kaynak hatlarının incelenmesi”, **SAU Fen bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 5(2) 82-92, (2001).
46. Bilen, F.A., “Hardox 400-Aisi 304 Çelik Çiftlerinin Plazma Transferli Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, (2016)
47. Özbek, Y.Y., Emre, S., “Demiryolu Akslarının Ultrasonik Muayene Yöntemi ve Phased Array Yöntemi ile Tahribatsız Muayenesi”, **Academic Platform Journal of Engineering and Science**, 7-3, 489-495, (2019)
48. ASM Handbook Committee, Nondestructive Evaluation and Quality Control, **ASM Handbook**, Volume 17, ASM International, Fifth printing, Materials Park, Ohio, USA, (1997).

49. Yağcı, T., Çidem, A., Durmuş, H., “Geçmişten Günümüze Tahribatsız Muayene Yöntemleri” *MCBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimleri Dergisi*, 27(III), 49-61, (2018).
50. Kahraman, N., “Kaynak Hataları ve Muayenesi” Yüksek Lisans Ders Notları, *Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, 64-95, (2022).
51. Vural, M., “EÜT 231 Üretim Yöntemleri”, Ders Notları, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 19-21, (2011).
52. Herrmann, K. (Editör), “Hardness Testing: Principles and Applications”, *ASM International*, ASM International Materials Park, OH, USA, (2011).
53. Örenler, A., “Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2018).
54. Biner, İ., “Kaynaklı Numunelerin Tahribatlı Testlerinin Güvenilirliği ve Cihaz Kalibrasyonu”, *Kaynak Kongresi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, 125-129, (2015).
55. Çiftçi, M., “Kayalarda Çentik-Darbe Deneyinin Uygulanabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, (2009).
56. ASM Handbook Committee, Mechanical Testing and Evaluation, *ASM Handbook*, Volume 8, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 92-96 (2000).
57. Karadağ A., “Alüminyum Alaşımlarının TIG kaynağında Kaynak Parametrelerinin Dikiş Geometrisine ve Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2011).
58. Uluocak, M. E., “HARDOX 450 Çeliklerinin MAG Kaynak Bölgesi Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2008).
59. Krawczyk, R., “An Analysis of the Quality of the Thick-Walled S355j2+N Steel Joint Welded By The MAG Method”, *Arch. Metall. Mater.* 62(2), 833-839 (2017).
60. Ates, A. Dursun, B., Kurt, E., “Estimation of mechanical properties of welded S355J2+N steel via the artificial neural network”, *Scientia Iranica, Transactions B: Mechanical Engineering*, 23, 609-617 (2016).
61. Martínez, A., Miguel, V., Coello, J., Navarro, A., Calatayud, A., Manjabacas, M.C., “Analisis of the influence of the multipass welding, welding preheat and welding post heat treatments on the behaviour of GMAW joints of HARDOX 400 microalloyed steel” *Revista De Metalurgia*, 47 (1) 61-75 (2011).

62. Savaş, A., “MIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Hardox 400, AISI 304 ve St52 Kalite Çeliklerin Miktoyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, (2021).
63. Özturan, A.B., İrsel, G., Güzey, B.N., “Study of the microstructure and mechanical property relationships of gas metal arc welded dissimilar Hardox 450 and S355J2C+N steel joints”, *Materials Science and Engineering: A*, 856; 143486, (2022).
64. Gupta, A., Sharma, V., Kumar, P., Thakur, A., “Investigating the effect of ferritic filler materials on the mechanical and metallurgical properties of Hardox 400 steel welded joints”, *Materials Today: Proceedings*, 39; 1640–1646 (2021).
65. Konat, L., “Technological, Microstructural and Strength Aspects of Welding and Post-Weld Heat Treatment of Martensitic, Wear-Resistant Hardox 600 Steel”, *Materials* 14; 4541 (2021).
66. Konovalov, S.V., Kormyshev, V.E., Nevskii, S.A., Ivanov, Y.F., Gromov, V.E., “Formation Wear Resistant Coatings on Martensite Steel Hardox 450 by Welding Methods”, *Materials Science and Engineering* 142; 012079 (2016).
67. Turichin, G., Tsibulskiy, I., Kuznetsov, M., Akhmetov, A., Korsmik, K.O., “Hybrid Laser-Arc Welding Tanks Steels”, *Materials Science and Engineering* 125; 012002 (2016).
68. Kaçar, R., Emre, H.E., İşineri, A.İ., Najafiharehtapeh, A., “Farklı çelik çiftinin birleştirilmesinde kaynak yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisi”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33:1, 255-265, (2018).
69. *TSE CEN ISO/TR 15608* “Kaynak-Metalik malzeme gruplandırma sistemi için klavuz”, (2017).
70. *TS EN ISO 4063* “Kaynaklama, sert lehimleme, lehimleme ve kesme - İşlemlerin adlandırılması ve referans numaraları”, (2023).
71. *TS EN ISO 14175* “Kaynak sarf malzemeleri - Ergitme kaynağı ve benzeri işlemler için gazlar ve gaz karışımları”, (2010).
72. *TS EN ISO 15614-1* “Metalik malzemeler için kaynak prosedürlerinin şartnamesi ve vasıflandırılması - Kaynak prosedürü deneyi - Bölüm 1: Çeliklerin gaz ve ark kaynağı, nikel ve nikel alaşımlarının ark kaynağı”, (2017).
73. *TS EN ISO 5817* “Kaynak - Çelik, nikel, titanyum ve bunların alaşımlarında ergitme kaynaklı (demet kaynağı hariç) birleştirmeler - Kusurlar için kalite seviyeleri”, (2023).

74. **TS EN ISO 3452-1** “ Tahribatsız muayene - Penetrant muayenesi - Bölüm 1: Genel kurallar”, (2021).
75. **TS EN ISO 23277** “Kaynakların tahribatsız muayenesi - Kaynakların penetrant muayenesi - Kabul seviyeleri”, (2015).
76. **TS EN ISO 17640** “Kaynakların tahribatsız muayenesi - Ultrasonik muayenesi- Teknikler, deney sınırları ve değerlendirme”, (2020).
77. **TS EN ISO 22825**, “Kaynakların tahribatsız muayenesi - Ultrasonik muayene - Östenitik çelikler ve nikel tabanlı alaşımlarda kaynakların muayenesi”, (2017).
78. **TS EN ISO 11666**, “Kaynakların tahribatsız muayenesi - Ultrasonik muayene- Kabul seviyeleri”, (2018).
79. **TS EN ISO 9712**, “Tahribatsız muayene - Tahribatsız muayene personelinin vasıflandırılması ve belgelendirilmesi”, (2022).
80. **TS EN ISO 4136**, “Metalik malzemelerin kaynakları üzerinde tahribatlı deneyler - Enine çekme deneyi”, (2022).
81. **TS EN ISO 5173**, “Metalik malzemelerde kaynak dikişleri üzerinde tahribatlı muayeneler - Eğme deneyleri”, (2023).
82. **TS EN ISO 9016**, “Metalik malzemelerde kaynaklar üzerinde tahribatlı deneyler - Vurma deneyleri - Deney numunesi yeri, çentik yönü ve muayene”, (2022).
83. Akkaş, N., Onar, V. ve Varol, F., “Raylı Sistem Araçlarında Kullanılan S235JR(Cu) Çelik Sacların Direnç Nokta Kaynağında Mikro Yapı Analizi”, **III. Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresi**, Gaziantep, 1591-1599 (2018).
84. Kantur, S., İrsel, G., Güzey, B. N., “Investigation of combining the 304L and S355J2C+N materials with TIG welding in terms of microstructure and mechanical properties”, **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 206; 104999 (2023).
85. Maurya, A.K., Pandey, C., Chhibber, R., “Dissimilar welding of duplex stainless steel with Ni alloys: A review” **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 192, 104439 (2021).
86. Gürol, U., Karahan, T., Erdöl, S., Çoban, O., Baykal, H., Koçak, M., Characterization of Armour Steel Welds Using Austenitic and Ferritic Filler Metals”, **Trans Indian Inst Met**, 75(3): 757–770 (2022).
87. Çoban, O., Kaymak, F., Gürol, U., Koçak, M., “Characterization of Fillet Welded Armor Steel Performed by Robotic Gas Metal Arc Welding: Effect of Heat Input on Microstructure and Microhardness”, **Journal of Materials Engineering and**

Performance, Published online 26 December 2023, doi.org/10.1007/s11665-023-09058-y, (Article in press).

88. Celesun, E., “S355J2 Çeliğinin Isil İşlem ve Farkli Tozaltı Kaynak Tellerinin Kaynak Kabiliyetine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 78-80, 2012.
89. Konat, L., Zemlik, M., Jasinski, R., Grygier, D., “Austenite Grain Growth Analysis in a Welded Joint of High-Strength Martensitic Abrasion-Resistant Steel Hardox 450”, **MDPI Material**, 14, 2850 (2021).
90. Kutay, M. G., “Kaynak Bağlantıları”, 21-33, **İnternet ulaşımı**, https://www.guven-kutay.ch/ozet-konular/07_kaynak.pdf, (2010).

ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Taha ÇAKIR, İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2013 yılında Etimesgut Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2014 yılında Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde öğrenime başlayıp, 2020 yılında mezun oldu. Aynı yıl GSI SLV-TR Kaynak Teknolojisi Eğitim kurumundan Uluslararası Kaynak Mühendisliği programını tamamlamıştır. 2020 yılında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans programına başladı. 2019 yılından beri Ankara'da bulunan TÜV Austria Türk Bel. Eğitim ve Gözetim Hizmetleri şirketinde Endüstriyel Enspektör olarak görev yapmaktadır.

TS EN ISO 9712 standardı Tahribatsız Muayene kapsamında VT- Görsel Muayene, PT- Sıvı Penetrant Test, UT- Ultrasonik muayene test, MT- Manyetik Parçaçık Testi Seviye I-II eğitimlerini tamamlamış ve belgelendirilmiştir.