

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**SANDVIÇ KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN ZİRH
ÇELİKLERİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ceren ÇELİK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

TEMMUZ 2023

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**SANDVIÇ KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN ZİRH
ÇELİKLERİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ceren ÇELİK
(210022006)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Uğur GÜROL

TEMMUZ 2023



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz, Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı (210022006) numaralı öğrencisi Ceren ÇELİK'in "Sandviç Kaynak Yöntemi İle Birleştirilen Zırh Çeliklerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun 05/07/2023 tarihinde oluşturulan jüri tarafından **oy birliği** ile Yüksek Lisans Tezi olarak **kabul** edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

1. Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Uğur GÜROL

2. Jüri Üyesi: Prof. Dr. Mustafa KOÇAK

3. Jüri Üyesi: Prof. Dr. Gürel ÇAM

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Sandviç Kaynak Yöntemi İle Birleştirilen Zırh Çeliklerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (05/07/2023)

Ceren ÇELİK



ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1505 Üniversite Sanayi İşbirliği Destek Programı kapsamında 5210029 numaralı Savunma Sanayi İçin Yerli Zırh Çeliklerinin Robotik Kaynak Uygulamalarının Geliştirilmesi projesi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Projeye Müşteri kuruluş olarak katkılarından dolayı Gedik Kaynak'a, destek kurumu olarak TÜBİTAK'a ve proje ekibine teşekkür ederim. Proje ve tez çalışmamdaki ana malzeme temini ve balistik testlerdeki katkılarından dolayı Miilux Oy'a ve Mert Basmacı'ya teşekkürü borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi birikimlerini sürekli paylaşan, bana her konuda destek veren, sürekli araştırma yapmaya teşvik eden, değerli danışman hocam Dr. Uğur Gürol'a verdiği kıymetli bilgilerden ötürü sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Yüksek lisans tez çalışmama yapmış oldukları yardımlardan ve katkılarından dolayı Prof. Dr. Gürel Çam'a ve Prof. Dr. Mustafa Koçak'a teşekkür ederim.

Proje ve tez çalışmam kapsamında yardımlarını esirgemeyen Hakan Baykal'a, Müesser Göçmen'e, Recep Murat Kurt'a, Tolgay Kalaycı'ya, Tülay Özgül'e, Batuhan Turgut'a, Hülya Kumek'e ve tüm Gedik Holding çalışanlarına teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, bana sürekli destek veren annem Songül Çelik'e, babam Mazlum Çelik'e ve canım kardeşim Beril Yaren Çelik'e teşekkür ederim.

Temmuz 2023

Ceren ÇELİK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ZIRH ÇELİKLERİ	3
2.1 Zırh Çeliklerinin Üretim Prosesleri.....	4
2.2 Zırh Çeliklerinin Kimyasal ve Mekanik Özellikleri	5
3. BALİSTİK BİLİMİ	8
3.1 Hasar Mekanizmaları	8
3.2 Balistik Test Standartları	9
3.3 Zırh Çeliklerinin Balistik Performansları	10
4. KAYNAK TEKNOLOJİSİ	13
4.1 Gaz Metal Ark Kaynağı Yöntemi	14
4.2 Robotik Kaynak Yöntemi.....	15
4.3 Kaynak Bağlantı Tipleri	16
4.4 Kaynak Bölgesi	17
4.4.1 Ergime bölgesi.....	17
4.4.2 Isıdan etkilenmiş bölge.....	18
4.5 Kaynaklanabilirlik	20
4.5.1 Karbon eşdeğeri.....	21
4.6 Zırh Çeliklerinin Kaynaklanabilirliği.....	22
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	24
5.1 Geleneksel Kaynak Yöntemleri Literatür Araştırması	24
5.2 Sandviç Kaynak Yöntemi Literatür Araştırması	27
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	32
6.1 Ana Malzeme ve Kaynak Sarf Malzemelerinin Seçimi	32
6.2 Kaynak Düzeneginin Hazırlanması.....	34
6.3 Tahribatsız Muayene	37
6.3.1. Sıvı penetrant muayene	38
6.3.2 Radyografik muayene yöntemi.....	38
6.4 Tahribatlı Muayene	39
6.4.1 Sertlik testi.....	39
6.4.2 Çekme testi	40
6.4.3 Çentik darbe testi	41
6.5 Metalografik Muayene	42
6.5.1 Numune hazırlama.....	42
6.5.2 Makroyapı inceleme	44

6.5.3 Mikroyapı inceleme	45
6.5.4 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri	45
6.6 Kimyasal Analiz Testi	46
6.7 Ferrit Ölçümü	46
6.8 Balistik Test.....	46
7. SONUÇLAR	48
7.1 Tahribatsız Muayene Sonuçları.....	48
7.1.1 Sıvı penetrant ve görsel muayene sonuçları	48
7.1.2 Radyografik muayene sonuçları	48
7.2 Makroyapı İnceleme.....	49
7.3 Sertlik Test Sonuçları	50
7.4 Çekme Testi Sonuçları ve Kırılma Yüzeyi İncelemeleri.....	53
7.4.1 Mikro çekme testi	57
7.5 Çentik Darbe Testi Sonuçları ve Kırılma Yüzeyi İncelemeleri	58
7.6 Kimyasal Analiz Test Sonuçları.....	63
7.7 Ferrit Ölçüm Sonuçları.....	65
7.8 Mikroyapı İncelemeleri	67
7.9 Balistik Test Sonuçları	69
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	74
8.1 Sonuçlar.....	74
8.2 Öneriler.....	76
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ.....	85

KISALTMALAR

C_{eş}	: Karbon eşdeğeri
CGHAZ	: Kaba taneli bölge
CP	: Komple deformasyon
FGHAZ	: İnce taneli bölge
FN	: Ferrit numarası
IEB	: Isıdan etkilenmiş bölge
MIG	: Metal soy gaz
MAG	: Metal aktif gaz
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Amerikan Ordu Standartlarına Uygun Olarak Üretilen Zırh Çeliklerinin Kimyasal Bileşimleri	6
Çizelge 2.2: Zırh Çeliklerinin Mekanik Özellikleri.....	7
Çizelge 2.3: Zırh Çeliklerinin Balistik Performans Değerleri	7
Çizelge 3.1: EN 1522 Standardına Göre Balistik Soruma Seviyeleri	10
Çizelge 4.1: Karbon Eşdeğerine Göre Kaynaklanabilirlik ve Ön Isıtma Gerekliği	22
Çizelge 4.2: Karbon Eşdeğerine Bağlı Ön Tavlama Sıcaklık Değerleri	22
Çizelge 6.1: Kullanılan Kaynak Plakalarının Kimyasal Analizi (% Ağırlıkça)	33
Çizelge 6.2: Kullanılan Kaynak Plakalarının Mekanik Değerleri	33
Çizelge 6.3: Kullanılan Kaynak Dolgu Metallerinin Kimyasal Analizi (% Ağırlıkça)	33
Çizelge 6.4: Kullanılan Kaynak Dolgu Metallerinin Mekanik Değerleri.....	34
Çizelge 6.5: Kaynak Parametre Değerleri	37
Çizelge 6.6: Dağlayıcılar ve Kimyasal Karışım Oranları	44
Çizelge 7.1: Sertlik Test Sonuçları	51
Çizelge 7.2: Çekme Test Sonuçları	54
Çizelge 7.3: Mikro Çekme Test Sonuçları	57
Çizelge 7.4: Çentik Darbe Test Sonuçları	59
Çizelge 7.5: Östenitik Kaynak Noktasal Kimyasal Analiz Test Sonuçları	64
Çizelge 7.6: Östenitik Kaynak Noktasal Kimyasal Analiz Test Sonuçları	64
Çizelge 7.7: Balistik Test Atış Hızları ve Delinme Değerlendirmeleri	70

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Zırh Çelikleri Kullanılarak Üretilen Zırhlı Araç	3
Şekil 2.2: Zırh Çeliklerinin Üretim Süreçleri	5
Şekil 3.1: Zırh Çeliklerinin Delinme Modları (a) Gevrek Kırılma, (b) Sünek Delik Büyümesi, (c) Radyal Kırılma, (d) Tıkanma, (e) Parçalanma ve (f) Yaprak Oluşumu	9
Şekil 3.2: Zırh Çeliklerinin Sertlik Değerleri İle Balistik Performansları Arasındaki İlişki ve Delinme Modları	11
Şekil 4.1: Gaz Metal Ark Kaynak Yöntemi Donanımı.....	15
Şekil 4.2: Kaynak Robotunun Genel Yapısı.....	16
Şekil 4.3: Kaynak Bağlantı Tiplerinin Şematik Olarak Gösterimi: (a) Alın Bağlantı, (b) Köşe Bağlantı, (c) Bindirme Bağlantı, (d) T Bağlantı, (e) Kenar Bağlantı.....	16
Şekil 4.4: Kaynak Terminolojisi, (a) Alın Kaynağı, (b) Köşe Kaynağı	17
Şekil 4.5: Karbonlu Çeliklerin IEB'nin Demir Karbon Faz Diyagramı ve Mikroyapı Arasındaki İlişki	19
Şekil 4.6: Isıdan Etkilenmiş Bölgenin Mikroyapısı.....	20
Şekil 4.7: Metallerin Kaynak Kabiliyetinin Temel Faktörler İle İlişkisi.....	21
Şekil 5.1: Kullanılan Kaynak Kombinasyonlarının Şematik Görüntüsü; a) Östenitik, h) Sert Dolgu	28
Şekil 5.2: Kaynak Kombinasyonlarının Şematik Görüntüsü; a) Östenitik, h) Sert Dolgu	29
Şekil 5.3: Yapılan Kombinasyonlarının Kaynağın Şematik Gösterimi (Şekilde b(Yağlama Yapılmış Bölgeyi), a(Östenitik Paslanmaz Elektrot), h(Sert Dolgu Alaşımli Elektrod), f (Düşük Hidrojenli Elektrod) Göstermektedir.)	29
Şekil 5.4: Kaynakların Şematik Gösterimi (Şekilde a (Östenitik Tel), h (Sert Dolgu Teli) b(Yağlama Bölgesi) Göstermektedir.).....	30
Şekil 5.5: Kaynağın Şematik Gösterimi (Şekilde b Yağlama Bölgesini, 1, 2, 4, 5, 6, 7 Numaralı Pasolar Östenitik Dolgu Metalini 3 Numaralı Paso İse Sert Dolgu Metalini Göstermektedir)	31
Şekil 5.6: Kaynak Şematik Gösterimi (Şekilde 1,3,5,6 Numaralı Pasolarda Östenitik Paslanmaz Dolgu Malzemesi, 2 ve 4 Numaralı Pasolarda İse Tungsten Karbür ve Krom Karbür İçerikli Sert Dolgu Malzemesi Kullanılmıştır) ..	31
Şekil 6.1: Yapılan Çalışmanın Şematik Gösterimi	32
Şekil 6.2: Kaynak Ekipmanları.....	35
Şekil 6.3: Kaynak Plakası; a) Plakanın Alttan Görünüşü, b) Plakanın Üstten Görünüşü, c) Plakanın Yandan Görünüşü	35
Şekil 6.4: Plakalara Yapılan Demanyetizasyon İşlemi; a) El Yöke İle Demanyetizasyon İşlemi, b) Demanyetizasyon İşlemi Öncesi Gaussmetre	

İle Yapılan Ölçüm, c) Demanyetizasyon İşlemi Sonrası Gaussmetre İle Yapılan Ölçüm.....	36
Şekil 6.5: Plakaların Ölçüleri ve Kaynak Pasolarının Şematik Gösterimi	36
Şekil 6.6: Sandviç Kaynağın Şematik Görüntüsü; Ö: Östenitik Dolgu Metali, S: Sert Dolgu Metali.....	37
Şekil 6.7: Sıvı Penetrant Muayenene Yönteminde Kullanılan Sarf Malzemeleri	38
Şekil 6.8: Radyografik Muayenede Kullanılan Cihaz	39
Şekil 6.9: Sertlik Ölçümünün Şematik Gösterimi	40
Şekil 6.10: Mikro Sertlik Ölçüm Cihazı	40
Şekil 6.11: Çekme Testi Numune Ölçüleri.....	40
Şekil 6.12: Çekme Testi Cihazı	41
Şekil 6.13: Mikro Çekme Testi; a) Mikro Çekme Numunesi, b) Test Cihazı	41
Şekil 6.14: Çentik Darbe Testi; a) Çentik Darbe Testi Numune Ölçüleri, b) Çentik Darbe Test Cihazı	42
Şekil 6.15: Zımparalama, Parlatma Cihazı	43
Şekil 6.16: Soğuk Bakalit Kiti	43
Şekil 6.17: Elektroliz Cihazı.....	44
Şekil 6.18: Makro İnceleme Cihazı	44
Şekil 6.19: Mikroyapı İnceleme Cihazı	45
Şekil 6.20: SEM Cihazı	45
Şekil 6.21: Ferrit Ölçüm Cihazı.....	46
Şekil 6.22: 7.62x51mm P80 NATO AP Mühimmat Görüntüsü.....	47
Şekil 7.1: Kaynaklı Plakaların Genel Görüntüsü ve Sıvı Penetrant Test Görüntüleri; a) Östenitik Kaynak Dikiş Görüntüsü, b) Sandviç Kaynak Dikiş Görüntüsü, c) Sandviç Kaynak Sıvı Penetrant Test Görüntüsü.....	48
Şekil 7.2: Radyografik Test Sonuçları.....	49
Şekil 7.3: Makroyapı İnceleme Görüntüleri	49
Şekil 7.4: Östenitik Kaynak Sertlik Test Sonuçları	50
Şekil 7.5: Sandviç Kaynak Sertlik Test Sonuçları.....	50
Şekil 7.6: Sandviç Kaynak 4. Sıra Sertlik Testi Sertlik İzleri	52
Şekil 7.7: Kaynak Üst Yüzey Merkezi Boyunca Yapılan Sertlik Test Sonuçları	52
Şekil 7.8: Kaynak Bölgesinden Ana Metala Doğru Sertlik Test Sonuçları	53
Şekil 7.9: Gerilme Şekil Değiştirme Eğrileri.....	53
Şekil 7.10: Çekme Testi Kırık Yüzey İncelemeleri; a) Östenitik Kaynak Kırık Yüzey Makro Görüntüsü, d) Sandviç Kaynak Kırık Yüzey Makro Görüntüsü, b, c,f) Östenitik Dolgu Metali Bölgesi, e) Sert Dolgu Metali Bölgesi	55
Şekil 7.11: Östenitik Kaynak Çekme Testi Sonrası Kırılma Yönü İncelemesi.....	56
Şekil 7.12: Sandviç Kaynak Çekme Testi Sonrası Kırılma Yönü İncelemesi; a,b,c) Çatlaklar	56
Şekil 7.13: Mikro Çekme Testi Sonrası Kırılma Yönü İncelenmemesi	58
Şekil 7.14: Çentik Darbe Test Sonuç Grafiği	58
Şekil 7.15: IEB Çentik Darbe Test Numuneleri Kesit Görüntüsü.....	60
Şekil 7.16: Kaynak Bölgesi Çentik Darbe Testi Kırılma Yüzeyleri; a) Östenitik Kaynak, b) Sandviç Kaynak	60
Şekil 7.17: Çentik Darbe Kırılma Yüzeyinde Yanal Genleşme Ölçümünün Gösterimi	61
Şekil 7.18: Çentik Darbe Numunelerinde Yanal Genleşme Ölçümü	62
Şekil 7.19: Kaynak Bölgesine Ait Çentik Darbe Numunelerinin Kırık Yüzey İncelemeleri; a) Östenitik Kaynak Çentik Darbe Numunesi, b-c-f)	

Östenitik İlave Tel, D) Sandviç Kaynak Çentik Darbe Numunesi, e) Sert Dolgu İlave Tel.....	62
Şekil 7.20: IEB'ye Ait Çentik Darbe Numunelerinin Kırık Yüzey İncelemeleri; a)Östenitik Kaynak Çentik Darbe Numunesi, d) Sandviç Kaynak Çentik Darbe Numunesi	63
Şekil 7.21: Östenitik Kaynak Noktasal Kimyasal Analiz Bölgeleri.....	63
Şekil 7.22: Sandviç Kaynak Noktasal Kimyasal Analiz Bölgeleri.....	64
Şekil 7.23: Sandviç Kaynak Kimyasal Analiz Test Sonuç Grafiği	65
Şekil 7.24: Schaeffler Diyagramı	66
Şekil 7.25: Östenitik Kaynak %FN Test Sonuçları	66
Şekil 7.26: Sandviç Kaynak %FN Test Sonuçları	67
Şekil 7.27: Zırh Çeliği Mikroyapısı.....	67
Şekil 7.28: Östenitik Kaynağın Mikroyapı Görüntüleri; a) 2. Paso Mikroyapısı, b)4. Paso Mikroyapısı, c) Ergime Sınırı Mikroyapısı.....	68
Şekil 7.29: Sandviç Kaynağın Mikroyapı Görüntüleri; a) 2. Paso Mikroyapısı (Östenitik Kaynak Metali), b) 4. Paso Mikroyapısı (Sert Dolgu Kaynak Metali), c)Ergime Sınırı Mikroyapısı	69
Şekil 7.30: Balistik Test Öncesi Kaynak Plakalarının Genel Görüntüsü; a) Östenitik Kaynak, b) Sandviç Kaynak	69
Şekil 7.31: Balistik Test Sonrası Östenitik Kaynak Plakasını Ön Ve Arka Yüzeylerinin Görüntüsü; a) Kaynak Bölgesi Ön Yüzey Görüntüsü, b) IEB'nin Ön Yüzey Görüntüsü, c) Kaynak Bölgesi Arka Yüzey Görüntüsü, d) IEB'nin Arka Yüzey Görüntüsü.....	70
Şekil 7.32: Balistik Test Sonrası Sandviç Kaynak Plakasını Ön ve Arka Yüzeylerinin Görüntüsü; a) Kaynak Bölgesi Ön Yüzey Görüntüsü, b) IEB'in Ön Yüzey Görüntüsü, c) Kaynak Bölgesi Arka Yüzey Görüntüsü, d) IEB'nin Arka Yüzey Görüntüsü	71
Şekil 7.33: Balistik Test Sonrası Kaynak Bölgeleri Makro Kesit Görüntüsü; a)Östenitik Kaynak, b) Sandviç Kaynak	72
Şekil 7.34: Balistik Test Sonrası IEB'lerin Makro Kesit Görüntüsü; a) Östenitik Kaynak, b) Sandviç Kaynak	72
Şekil 7.35: Balistik Test Sonrası Zırh Çeliği Ana Malzeme Bölgeleri Makro Kesit Görüntüsü; a) Östenitik Kaynak, b) Sandviç Kaynak	73

SANDVIÇ KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN ZIRH ÇELİKLERİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada sandviç kaynak tasarımının zırh çeliklerinin kaynaklı bağlantılarının mikroyapı, mekanik ve balistik özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Ana metal olarak ülkemizde ilk defa Miilux Oy firması tarafından yerli olarak üretilen 15 mm kalınlığa sahip Protection 500 kalite zırh çeliği, kaynak dolgu metali olarak ise Gedik Kaynak tarafından üretilen östenitik paslanmaz yapıya sahip GEKA ELOX SG 307 ve sert dolgu metali olan GEKATEC HARDCOR 600 G kullanılmıştır. Kaynak işlemleri sırasında ısı girdisini sabit tutabilmek ve kişiye bağlı hataları ortadan kaldırmak amacıyla robotik gazaltı kaynak yöntemi kullanılmıştır. Kaynak işlemleri toplamda 4 sıra 7 paso olacak şekilde iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Birinci çalışmada kaynak dolgu metali olarak sadece östenitik paslanmaz kaynak dolgu metali kullanılmıştır. İkinci çalışmada ise kaynaklı bağlantının orta bölgesine sert dolgu kaynak teli diğer bölgelerine ise yine östenitik kaynak dolgu metali kullanılarak sandviç kaynak yöntemi uygulanmıştır. Kaynak işlemi sonrası yüzeysel kusurların tayini için görsel muayene ile sıvı penetrant muayene; hacimsel kusurların tayini için ise radyografik muayene gerçekleştirilmiştir. Akabinde, metalografik inceleme işlemleri için optik mikroskop, stereo mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak kaynak bölgesi, ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) ve kırık yüzeyleri detaylı olarak incelenmiştir. Kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini tayin etmek amacıyla vickers sertlik, çekme, mikro çekme, çentik darbe ve balistik testler gerçekleştirilmiştir. Mekanik testler sonucunda en yüksek akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama değeri ve çentik darbe enerjisi %100 östenitik dolgu metali kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantıda elde edilmiştir. Fakat her iki kaynak tasarımında da kaynak metali ve IEB bölgesi çentik darbe enerjisi değerleri ana malzeme için uluslararası standartlarda belirtilen minimum değerleri sağlayarak bu anlamda başarılı bir kaynak ortaya koymuştur. Yine her iki tasarımda da kaynak ergime sınırından ana malzemeye doğru sertlik değerinin 12-13 mm uzaklıkta ana malzemenin sertlik değerine ulaştığı ve buna bağlı olarak da IEB genişliğinin standart değerleri sağladığı görülmüştür. Balistik testler sonucunda ise her iki kaynak tasarımının IEB'lerine yapılan atışlarda test mühimmatının bölgede kısmi deformasyon meydana getirdiği ve tam delinmenin olmadığı görülmüştür. Fakat %100 östenitik kaynak dolgu metali ile birleştirilen kaynaklı bağlantıda test mühimmatı kaynak bölgesini delip geçerken, sandviç tasarım ile gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıda ise kısmi deformasyon meydana getirmiş ve kaynak bölgesinin içerisinde kalmıştır. Sonuç olarak düşük ısı girdisi kullanılarak robotik gaz altı yöntemi ile gerçekleştirilen sandviç kaynak tasarımının zırh çeliklerinin kaynaklı bölgelerinde çentik darbe enerjilerinde ciddi bir düşüşe sebebiyet vermeden balistik özelliklerini geliştirdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Zırh Çeliği, MIG/MAG Kaynak Yöntemi, Sert Dolgu Kaynak Metali, Östenitik Paslanmaz Kaynak Metali, Tahribatsız Muayene, Tahribatlı Muayene, Balistik Test.

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ARMOR STEELS JOINED BY SANDWICH WELDING METHOD

ABSTRACT

In this study, the effects of sandwich welding design on the microstructure, mechanical and ballistic properties of welded joints of armor steels were investigated. For the first time in our country, Protection 500 quality armor steel with a thickness of 15 mm, produced locally by Miilux Oy, was used as the base metal. Filler wires namely GEKA ELOX SG 307 (austenitic stainless structure) and GEKATEC HARDCOR 600 G (Hard filler metal) produced by Gedik Welding were used. Robotic gas metal arc welding method is used to keep the heat input constant and to eliminate personal errors during welding processes. Welding processes were carried out in two different ways with a total of 4 rows and 7 passes. In the first study, only austenitic stainless weld filler metal was used as the weld filler metal. In the second study, the sandwich welding method was applied to the middle part of the welded joint by using hard filler metal, and to the other parts of the welded joint by using austenitic weld filler metal. Liquid penetrant inspection by visual inspection to identify surface defects after welding; Radiographic examination was performed to detect volumetric defects. Then, weld zone, heat affected zone (HAZ) and fracture surfaces were examined in detail by using optical microscope, stereo microscope and scanning electron microscope for metallographic examination processes. Vickers hardness, tensile, micro-tensile, notch impact and ballistic tests were performed to determine the mechanical properties of the welded joints. As a result of the mechanical tests, the highest yield strength, tensile strength, % elongation value and notch impact energy were obtained in the welded joint using 100% austenitic filler metal. In both weld designs, the notch impact energy values of the weld metal and HAZ region provided the minimum values specified in international standards for the base material, ensuring a successful weld in this sense. Again, in both designs, it was observed that the hardness value from the welding melting point to the base material reached the hardness value of the base material at a distance of 12-13 mm, and accordingly the HAZ width provided the standard values. As a result of the ballistic tests, it was observed that the test ammunition caused partial deformation in the region and there was no full penetration in the shots fired at the HAZs of both welded designs. However, in the welded joint joined with 100% austenitic weld filler metal, the test ammunition pierced the weld zone, and in the welded joint made with the sandwich design, partial deformation occurred and remained in the weld zone. As a result, it has been observed that the sandwich weld design realized with the robotic gas metal arc method using low heat input improves the ballistic properties of armor steels without causing a serious reduction in notch impact energies in the welded areas.

Keywords: *Armor Steel, Welding, MIG/MAG Welding Method, Hard Weld Metal, Austenitic Stainless Weld Metal, Non-Destructive Testing, Destructive Testing, Ballistic Test.*

1. GİRİŞ

İnsanlar yaşamları boyunca dışarıdan gelebilecek tehlikelere karşı korunma ihtiyacı duymuşlar ve zamanla korunma amaçlı silahlar geliştirmiştir. Silahların yaygınlaşmasıyla beraber silah tehditlerine karşı ise korunma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Korunma amacıyla insanlar, kalkanlar ve zırhlar kullanmıştır. Tarih boyunca birçok savaş gerçekleşmiş ve zamanla gelişen teknoloji ile birlikte yeni silahlar, zırh donanımları geliştirilmiştir [1, 2]. Zırh malzemeleri kara, hava, deniz, uzay uygulamalarında, sivil ve askeri amaçlı birçok alanda kullanılmaktadır [3].

Gelişen ateşli silahlara ve patlayıcılara karşı zırh koruması olarak çelik, alüminyum alaşımları, elyaf takviyeli kompozit malzemeler ve seramikler kullanılmaktadır. Ancak zırh koruması olarak en yaygın zırh çelikleri kullanılmaktadır [4]. Zırh çelikleri savunma amaçlı kullanılan araçlarda ve tanklarda yaygın olarak bulunmaktadır. Çünkü zırh çelikleri balistik özellik göstermekte olup yüksek sertlik (sertlik > 400 BHN), yüksek dayanım (akma dayanımı > 1100 MPa), düşük üretim maliyeti ve kaynaklanabilirlik özelliklerine sahiptir [5 – 7].

Zırhlı araçlarda, tankların üretiminde, askeri ve askeri olmayan yapılarda, kaynaklı imalat işlemleri kullanılır [8]. Kaynaklı imalat sırasında uygulanan ısı çevrimlerin farklılığı sonucu ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) oluşmaktadır. Isıdan etkilenen bölgenin mekanik özellikleri ana malzemeden farklılık gösterir. Bu durumdan dolayı zırh çeliklerinin kaynak işlemlerinde düşük ısı girdisi kullanılmalıdır. Çünkü yüksek ısı girdisi daha geniş IEB'ye neden olacağından kaynaklı bağlantının balistik direncinin azalmasına neden olacaktır [9, 10].

Zırh çeliklerinin kaynak işlemlerinde genellikle östenitik paslanmaz ve ferritik kaynak dolgu metalleri kullanılmaktadır. Östenitik paslanmaz dolgu metali kullanımı kaynak bölgesinin darbe tokluğunu artırır ve aynı zamanda kaynak bölgesinde meydana gelebilecek hidrojenden kaynaklı çatlakların giderilmesine yardımcı olur. Ferritik dolgu metali kullanımı ise kaynaklı bağlantıda yüksek mukavemet ve yüksek sertlik sağlamaktadır [11].

Dünyada zırh çeliklerinin balistik performanslarını geliştirmek amacıyla kaynak pasolarında farklı dolgu malzemeleri kullanılarak çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda kök ve kapak pasolarda östenitik paslanmaz kaynak dolgu metali ara pasolarda ise sert dolgu kaynak metali, düşük hidrojenli ferritik dolgu metali ile sandviç kaynak yöntemi kullanılarak araştırmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda sandviç kaynak yöntemi sonucunda balistik performanslarda gelişme meydana geldiği belirtilmiştir. Ancak yapılan çalışmalarda pasolar arasında farklı kaynak dolgu metali kullanımının mekanik özelliklere (akma dayanımı, çekme dayanımı, % uzama, çentik darbe dayanımı) etkisinin araştırılmadığı görülmüştür. Türkiye’de ise TÜBİTAK tarafından desteklenen 1505 Üniversite-Sanayi İşbirliği Destek Programı kapsamında 5210029 numaralı Savunma Sanayi İçin Yerli Zırh Çeliklerinin Robotik Kaynak Uygulamalarının Geliştirilmesi projesi ile zırh çeliklerinin balistik performanslarını geliştirmeye yönelik sandviç kaynak çalışmalarına başlanmıştır.

Bu çalışmada Miillux Oy firması tarafından üretilmekte olan 15 mm kalınlığa sahip Protection 500 kalite zırh çeliği robotik gazaltı kaynak yöntemi kullanılarak alın kaynak işlemleri yapılmıştır. Çalışmada zırh çeliklerinin kaynaklı bağlantılarını balistik performanslarının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Alın kaynak işlemleri sırasında ara pasoda sert dolgu metali kullanılarak sandviç kaynak işlemi yapılmıştır. Kaynak işlemi tamamlanan plakalara öncelikle tahribatsız muayene yöntemleri (görsel muayene, sıvı penetrant muayenesi ve radyografik muayene) daha sonra ise tahribatlı test (çekme testi, çentik darbe testi) işlemleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tahribatlı testler sonucunda meydana gelen kırık yüzeylerin incelenmesi SEM analizi görüntüleri ile yapılmıştır. Yapılan bu testlere ek olarak kimyasal analiz yapılmıştır. Tez çalışmasının amacı olan balistik performansı geliştirme kapsamında kaynaklar aynı koşullar altında tekrarlanarak balistik testler gerçekleştirilmiştir. Savunma sanayisine de katkıda bulunulabilecek bu tez çalışmasında zırh çeliklerinin kaynaklı bağlantılarının balistik performanslarının geliştirilmesi hedeflenmiştir.

2. ZIRH ÇELİKLERİ

Silah teknolojisinin hızlı gelişmesiyle savaşlarda kullanılan zırh koruma sistemlerinin önemi daha da artmıştır ve bu durum kullanılan zırh malzemelerinin gelişmesi sağlamıştır. Zırh koruma malzemesi olarak çeşitli ülkelerde temel olarak zırh çeliği, alüminyum alaşımları ve seramik kullanılmaktadır [12].

Zırh çelikleri mermilere karşı göstermiş oldukları direnç kabiliyetinden dolayı genellikle askeri yapılar, ana muharebe tankları, zırhlı araçlar için üretilir ve zırhlı araçlarda yaygın olarak kullanılır. Zırhlı araçlarda koruma amacıyla sadece kullanılan malzemenin kalınlığını arttırmak yeterli değildir, çünkü malzemenin kalınlığının artmasıyla beraber araç ağırlığı da artmaktadır. Artan araç ağırlığı aracın hareket kabiliyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, zırhlı araçlarda kullanılan zırh koruma malzemelerinden yüksek mukavemet ve hafiflik özellikleri beklenir. Zırhlı araçların korumalarını arttırmak ve ağırlığını azaltmak için birçok yatırım yapılmaktadır [12–15]. Şekil 2.1’de zırh çelikleri kullanılarak üretilmiş olan zırhlı araç görülmektedir [16].



Şekil 2.1: Zırh Çelikleri Kullanılarak Üretilen Zırhlı Araç

Kaynak: (www.ssb.gov.tr)

Zırh koruması olarak kullanılan zırh çeliklerinden aşağıda belirtilen özelliklere sahip olması beklenmektedir:

- Delinmeye ve balistik darbelere karşı direnç
- Üretim ve şekillendirme işlemlerinde kolaylık
- İyi bir bakım davranışı, uzun ömürlü kullanım [17].

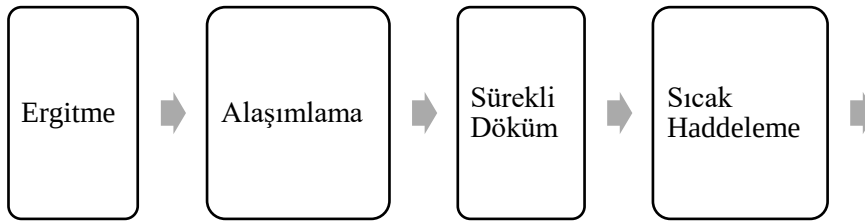
Zırh çelikleri tokluk, yüksek dayanım ve iyi kaynak edilebilir özelliklerine sahiptir. Belirtilen özelliklerin yanı sıra zırh çelikleri yüksek sertlik ve yüksek mukavemet özelliklerine de sahip olmalıdır. Bu özelliklere sahip zırh çelikleri üretilebilmesi için belirli ısıtım işlemi prosesleri kullanılarak istenilen özellikler elde edilir. Uygulanan ısıtım işlemi prosesleri zırh çeliklerinin sertlik değeri için önemlidir. İlgili standartlara göre üretilen bazı kalite zırh çelikleri 600 HV üzerinde yüksek sertlik değerlerine sahiptir, fakat yüksek sertliklerin çeliği kırılgan yaptığı bilinmektedir. Oluşabilecek darbelere karşı bu çelikler gevrek kırılma davranış gösterir. Artan sertlik ve mukavemete bağlı olarak azalan tokluk davranışının iyileştirilmesi için zırh çeliklerinin üretim proseslerinde fosfor ve kükürtün düşük seviyelerde olması gerekmektedir [15, 18]

2.1 Zırh Çeliklerinin Üretim Prosesleri

Zırh çelikleri üretimi Amerikan ordu standartlarına uygun olacak şekilde yapılmaktadır. Üretim yapılırken genel olarak MIL-A-46100, MIL-A-12560 ve MIL-A-46177 standartlarına göre üretim yapılır. Amerikan ordu standartlarına göre zırh çelikleri; MIL-A-46100 standardı “yüksek sertlikteki zırh çeliği”, MIL-A-12560 standardı “haddelenmiş homojen zırh çeliği”, (RHA) ve MIL-A-46177 standardı “çok yüksek sertlikteki zırh çeliği” olarak tanımlanır. Zırh çeliklerine uygulanan ısıtım işlemi sıcaklıklarının değiştirilmesiyle Class 1 ve Class 2 olmak üzere iki farklı sınıf zırh çelikleri üretilir. Genel olarak zırhlı araçlarda Class 1 olarak üretilen zırh çelikleri kullanılır. Class 2 olarak üretilen zırh çelikleri ise benzer kimyasal bileşenlerine sahiptir, fakat üretilen bu çeliklerde mekanik şok ve parçalanmaya karşı dayanımının artırılması için daha yüksek sıcaklıklarda temperleme işlemi yapılır [6, 19].

Zırh çeliklerinin üretim süreçleri Şekil 2.2’de verilmiştir. Öncelikle zırh çelikleri üretimi için ergitme, alaşımlama, sürekli döküm ve sıcak haddeleme işlemleri yapılır. Ergitme işlemi sonucu krom, molibden ve nikel elementleri ilave edilerek alaşımlama işlemi tamamlanır. Alaşımlama işleminden sonra istenilen boyutlarda

ürün üretilebilmesi için sürekli döküm, takiben de sıcak haddeleme yöntemleri uygulanır [19, 20].



Şekil 2.2: Zırh Çeliklerinin Üretim Süreçleri

Kaynak: (Şahintürk ve diğ., 2005; Soykan ve diğ., 2005)

Zırh çeliklerinin delinmeye karşı mukavemetli olması istenir. Yüksek mukavemet ve yüksek sertlik özelliklerinin elde edilebilmesi için zırh çeliklerine haddeleme sonrasında ısıtım prosesleri uygulanır. Levha şeklinde üretilen bu çeliklere öncelikle östenitleme işlemi uygulanır. Östenitleme işleminde ise üretilen levhalar 900-950 °C 'ye kadar ısıtılması sağlanır. Östenitleme işlemi ile tüm karbon katı eriyiğe alınır. Isıtılan levhalar su ile aniden soğutulur, bu işleme su verme adı verilir. Su verme işlemi sonucunda mikroyapı martenzit hale gelmektedir. Su verme işlemi sonrasında üretilen levhaların tokluk özelliklerinin kazanılması, aynı zamanda oluşan yüksek sertliğin giderilmesi için temperleme işlemi yapılarak içyapısı temperlenmiş martenzite dönüştürülür. Temperleme işleminde levhalar 160 – 180 °C arasında ısıtılır. Temperleme işlemi sonrasında elde edilen levhalara kumlama işlemi yapılır. [19, 20].

Su verme ve temperleme işlemleri zırh çeliklerinin arzu edilen mekanik özelliklerini elde edebilmek için gerekli olan ısıtım işlemlerdir. Isıtım işlemi ile birlikte zırh çeliklerinde martenzitik yapı meydana gelmektedir. Martenzitik yapı genel olarak çeliklerde en yüksek mukavemet seviyesini oluşturmaktadır. Martenzitik yapısı genellikle temperlenmiş durumlarda kullanılır, çünkü martenzit dönüşümü ile ilgili büyük iç gerilimler oluşur, temperleme darbe enerjisini arttırmak için gerekli olan tokluğu ve sünekliği artırır [21].

2.2 Zırh Çeliklerinin Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Çeliklerin içerisinde bulunan alaşım elementleri, çeliğin içyapısında farklılıklar meydana getirerek mekanik özelliklerin (çekme mukavemeti, akma mukavemeti, çentik darbe dayanımı, süneklik vb.) değişiminde önemli bir rol oynar [22].

Amerikan ordu standartlarına göre üretilen zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1: Amerikan Ordu Standartlarına Uygun Olarak Üretilen Zırh Çeliklerinin Kimyasal Bileşimleri

Element	Kimyasal Bileşim (%)	
	MIL-A-12560	MILA-46100
Karbon	0,18-0,28	0,22-0,32
Mangan	1,10-1,60	0,70-1,00
Fosfor	0,015	0,01
Kükürt	0,015	0,01
Silisyum	0,20-0,40	0,35-0,50
Krom	1,20-1,60	0,40-0,70
Nikel	2,00-3,40	0,80-1,30
Molibden	0,40-0,55	0,50-0,65

Kaynak: Soykan ve diğ. (2005)

Zırh çelikleri genel olarak düşük miktarda karbon içermektedir. Düşük karbon miktarı kaynaklanabilirlik, üretim kolaylığı, iyi tokluk ve darbe dayanımı gibi özelliklerin elde edilmesini sağlar [20]. Zırh çeliklerinin ana alaşım elementleri krom (Cr), nikel (Ni) ve molibdenden (Mo) oluşur [23].

Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimde bulunan elementlerin etkileri aşağıdaki gibidir:

- Mangan sertleşebilirlik üzerinde etkiye sahiptir ayrıca mukavemet artırıcı etki sağlamaktadır.
- Silisyum temperlenmiş martenzit gevrekliğinin giderilmesi için kullanılır. Çeliğin akma dayanımını, çekme dayanımını ve sünekliğini artırır.
- Nikel kırılma tokluğunun gelişmesinde katkı sağlar.
- Molibden malzemenin içyapısındaki tane büyümesini engeller [22, 24].

Dünyada en çok kullanılan zırh çeliklerinin mekanik özellikleri kalitelerine, üretim sınıflarına ve kalınlıklarına göre Çizelge 2.2’de, balistik performans değerleri ise Çizelge 2.3’te verilmiştir.

Çizelge 2.2: Zırh Çeliklerinin Mekanik Özellikleri

Zırh Çeliği		Kalınlık (mm)	Sertlik (HB)	Darbe Enerjisi Min. (-40°C) (J)	Akma Dayanımı Min. (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama Min. (%)
Kalite	Sınıf						
MIL-A-12560	Class 1	3 < 20	380-430	18	950	1100-1400	9
		40-80	300-350	30	850	900-1200	11
	Class 2	3-150	280-330	40	800	850-1150	12
MIL-A-46100	Class 1	3-150	480-540	16	1200	1400-1800	8
	Class 2	3-50	420-480	27	1100	1200-1600	9

Kaynak: Soykan ve diğ. (2005)**Çizelge 2.3: Zırh Çeliklerinin Balistik Performans Değerleri**

Zırh Çeliği Türü	Balistik Performans (14.5 mm delici)
Sınıf 1 - MIL A 12560	1.00
Sınıf 2 - MIL A 12560	Şok direnci
MIL A 46100	1.20

Kaynak: (Karagöz ve Atapek, 2007)

Çizelge 2.2 ve 2.3'te görüldüğü gibi farklı kalitede üretilen zırh çeliklerinin mekanik ve balistik özellikleri farklıdır. MIL A 46100 kalite yüksek sertlik değerlerine sahip zırh çeliklerinde balistik koruma, MIL A 12560 kalite haddelenmiş homojen zırh çeliğine göre % 20 daha etkilidir.

Zırh çelikleri kullanılan araçlar genellikle farklı engebeli arazilerde harekete eder ve bu çeliklerin ağır silahlardan gelebilecek darbelere karşı yorulma dirençlerinin yüksek olması gerekmektedir [6].

3. BALİSTİK BİLİMİ

Balistik, Fransızca “balistique” sözcüğünden gelmektedir. Balistik bilimi silahtan çıkan merminin iç hareketlerini, dış hareketlerini ve hedefe çarptıktan sonra meydana gelen hasarı inceleyen bilim dalıdır [25].

Balistik bilimi;

- İç balistik,
- Dış balistik,
- Terminal balistik olmak üzere ayrılır [26].

İç balistik; merminin silah namlusunu terk edene kadar meydana gelen olayların tümüne denir. Dış balistik; merminin silah namlusunu terk ettikten sonra hedefe çarpıncaya kadar geçen süre içinde hareket doğrultusu üzerindeki hareketini inceler. Terminal balistikte ise, merminin hedefe ulaştığında meydana gelen olayların tümünü inceler. Bu bilim dalı hedef arkasına nüfuz etme, aşırı patlama basıncını, canlı doku üzerindeki etkileri ve saçılan parça şekillerini incelemektedir. Son yıllarda bu konu daha önemli hale gelmiştir [26, 27].

3.1 Hasar Mekanizmaları

Balistik çarpma, hedefe itilen bir merminin meydana getirdiği düşük kütleli, yüksek hızlı çarpma olarak adlandırılır. Balistik çarpma, yüksek hızlı olay olarak gerçekleşir, fakat hedef üzerindeki çarpmanın etkisiyle çarpmanın meydana geldiği noktaya yakın çevrede gerçekleşir. Çarpma sırasında enerji transferi mermiden hedefe doğru gerçekleşir. Çarpışmanın özelliklerine ve hedef malzemesinin özelliklerine bağlı olarak;

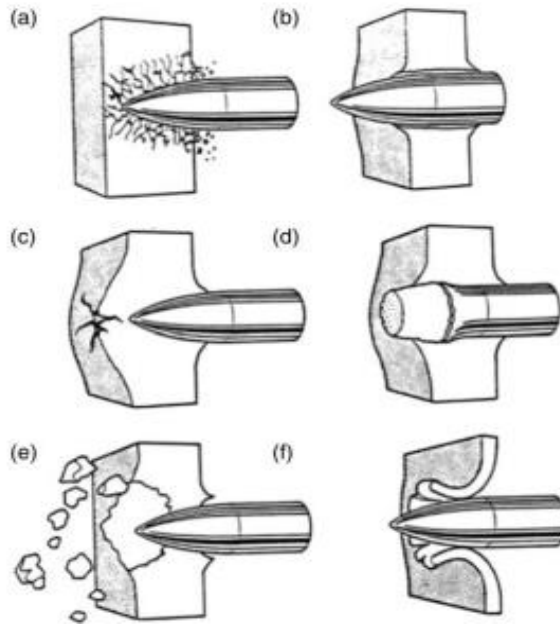
- Mermi hedefi deler ve hedefin arka yüzeyinden belirli hızla çıkar. Bu durum merminin enerjisinin, hedefin absorbe edebileceği enerjiden fazla olduğu anlamına gelmektedir.
- Mermi hedefe kısmen deler. Hedef malzemesinin özelliklerine göre mermi hedefin içinde kalabilir veya geri tepebilir. Bu durum merminin enerjisinin,

hedefin absorbe edebileceği enerjiden daha düşük olduğu anlamına gelmektedir.

- Mermi, hedefi sıfır çıkış hızı ile tamamen deler. Böyle durumlarda hedef tarafından merminin tüm enerjisi absorbe edilmiş olur. Bu durumda ise merminin ilk hızı balistik limit olarak adlandırılır [28].

Merminin balistik çarpma sonucu hedef üzerinde meydana getirdiği hasar, hedef zırhın absorbe edebileceği enerji ve mermi enerji dağılımının incelenmesi önemlidir. Hedef zırh üzerinde meydana gelen hasar (penetrasyon) kavramı balistik biliminde sıkça kullanılır. Penetrasyon kavramı, merminin zırh üzerinde meydana getirdiği hasar merminin herhangi bir bölgesine girme durumunun gelişimi olarak tanımlanır [29, 30].

Çarpışma sonucu meydana gelen hasar; çarpışma hızı, mermi yörüngesi, hedef malzemesi özellikleri gibi değişkenlere bağlı olarak değişir. Şekil 3.1’de zırh çeliklerinin delinme modları verilmiştir [31].



Şekil 3.1: Zırh Çeliklerinin Delinme Modları (a) Gevrek Kırılma, (b) Sünek Delik Büyümesi, (c) Radyal Kırılma, (d) Tıkanma, (e) Parçalanma ve (f) Yaprak Oluşumu

Kaynak: (Lenihan ve diğ., 2019)

3.2 Balistik Test Standartları

Balistik bilimi mermi ve füzelerin itme kuvvetlerini, uçuşunu ve çarpma etkilerinin inceleyen bir bilimdir. Balistik bilimi için standartlar geliştirilmiştir. Dünyada en

yaygın olarak kullanılan standartlar; Amerika Birleşik Devletleri tarafından geliştirilen NIJ standardı, Avrupa Birliği tarafından üretilen CEN standardı ve NATO tarafından üretilen STANAG standardıdır. Kullanılan standartlarda mermilerin kütlesi, kalibresi, hızı, malzemesi, ateşleme yapılan silah tipleri ve hedefe göre yapılması gereken şartlar belirtilmiştir [32].

Avrupa Birliği tarafından üretilen EN 1522 standardı, pencerelerin, kapıların, panjurların ve panjurların karşılanması gereken gereklilikleri ve sınıflandırmayı tanımlamaktadır. Bu standarda göre delinmeye karşı artan direnç için FB1 ile FB7 arasında koruma seviyeleri seviyeler bulunur. FB1 koruma seviyesi en düşük mermi direncini temsil ederken FB7 en yüksek koruma seviyesini temsil etmektedir. Standartta belirtilen koruma seviyelerine göre kullanılan tabanca ve tüfekler için belirtilen özellikler Çizelge 3.1’de belirtilmiştir [33].

Çizelge 3.1: EN 1522 Standardına Göre Balistik Soruma Seviyeleri

Balistik Koruma Seviyesi	Silah Tipi	Kalibre	Mermi Kütlesi (g)	Test Mesafesi (m)	Mermi Hızı (m/s)
FB1	Tüfek	22 LR	2,6±0,1	10±0,5	360±10
FB2	El tabancası	9 mm Luger	8±0,1	5±0,5	400±10
FB3	El tabancası	357 Magnum	10,2±0,1	5±0,5	430±10
FB4	El tabancası	357 Magnum	10,2±0,1	5±0,5	430±10
		44 Uzak Magnum	15,6±0,1	5±0,5	440±10
FB5	Tüfek	5,56×45mm	4±01	10±0,5	950±10
FB6	Tüfek	5,56×45mm	4±01	10±0,5	950±10
		7,62×51mm	9,5±0,1	10±0,5	830±10
FB7	Tüfek	7,62×51mm	9,8±0,1	10±0,5	820±10

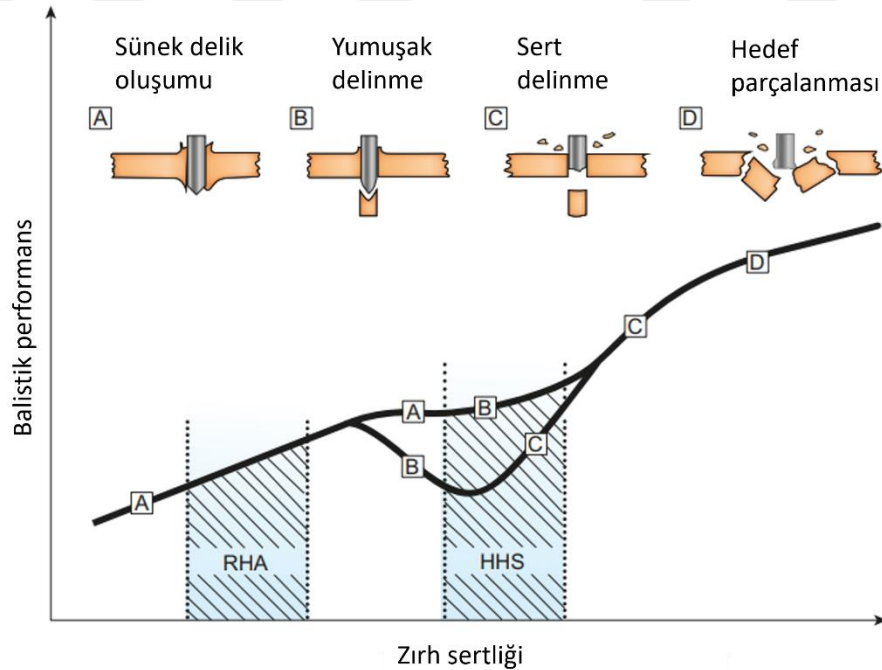
Kaynak: (EN 1522:1998)

3.3 Zırh Çeliklerinin Balistik Performansları

Yapısal malzemenin balistik performansı birçok karmaşık mekanik özelliklerin (akma dayanımı, çekme dayanımı, sertlik, tokluk, çentik darbe dayanımı vb.) fonksiyonudur. Mekanik özelliklerin hiçbiri tek başına uygun balistik davranış oluşturmak için kendi kendine yeterli değildir. İyi bir balistik performans için mekanik dayanım faktörlerinin optimum kombinasyonu esastır. Genel olarak zırh ne kadar sertse, mermi aşınması ve deformasyonu o kadar fazla, zırhın balistik performansının o kadar iyi bilinmektedir. Öte yandan merminin delinmesinde en

fazla enerjinin soğurulmasını sağlayan mekanizmanın plastik deformasyon olduğunu birçok çalışma tarafından belirtilmiştir [34].

Zırh üzerindeki balistik darbeden sonra mermi davranışını etkileyen birçok faktör vardır. Ana faktörler, zırh malzemesi sertliği ve mermi çarpma hızıdır [35]. Zırh çeliklerinin sertlik değerlerinin değiştirilmesi balistik darbe sonucu kırılma mekanizmalarının değişmesine yol açmaktadır. MIL (MIL-A-46100, MIL-A-12560, MIL-A-46177) standartlarına göre üretilen zırh çelikleri için balistik performanslara göre kırılma modları farklıdır. Şekil 3.2 'de zırh çeliklerinin sertlik değerleri ile balistik performansları arasındaki ilişki ve hata modları şematik olarak gösterilmektedir. Haddelenmiş homojen zırh çeliklerinde Şekil 3.2'de görüldüğü gibi Mod A ile sünek delik oluşumu meydana gelmektedir. Zırh çeliklerinin sertlik değerlerinin artması ile birlikte Şekil 3.2'de Mod B yumuşak delinme meydana gelmekte ve test sonucunda zırh çelikleri başarısız balistik performans sergilemektedir. Yüksek sertlikli zırh çeliklerinde (HHS) Şekil 3.2'de Mod C sert delinme olarak adlandırılan mod meydana gelmektedir, hedefte az derecede plastik deformasyon meydana gelerek balistik darbe enerjisinin çoğunluğunun mermi aşıldıkça dağıldığı belirtilmektedir [36, 37].



Şekil 3.2: Zırh Çeliklerinin Sertlik Değerleri İle Balistik Performansları Arasındaki İlişki ve Delinme Modları

Kaynak: (Crouch ve diğ., 2017)

Zırh eliklerinde artan sertliğin bir fonksiyonu olarak iyileştirilmiş balistik direnç meydana gelmektedir. Bu nedende zırh çeliklerinin kullanılarak yapılan tasarımlarda tasarımcılar aplike ve yapısal zırh çözümlerinde genellikle daha yüksek sertlik değeri bulunan zırh çelikleri kullanmaktadır [38].



4. KAYNAK TEKNOLOJİSİ

Kaynak, iki veya daha fazla parçanın birleştirilecek yüzeyleri arasında ısı veya basınç uygulanarak birleştirilmesi olarak tanımlanır [39]. Kaynak yöntemlerinde genellikle ısı kullanılarak birleştirme yapılır. Bazı kaynak yöntemlerinde ısı ve basınç bir arada kullanılırken bazı kaynak işlemlerinde ise sadece basınç kullanılarak kaynak yapılır. Kaynak yöntemi kullanılarak elde edilen birleştirmeye kaynaklı birleştirme denir [39].

Amerikan Kaynak Derneği (AWS) tarafından yayınlanan katalogda birçok kaynak yöntemi bulunmaktadır. Kaynak yöntemleri yaygın olarak ergitme kaynağı, katı hal kaynağı olarak iki gruba ayrılır [39].

Ergitme kaynak işlemlerinde, kaynak yapılırken ısı kullanılarak kaynak yapılan bölgenin lokal olarak ertilmesi sağlanır. Yapılan kaynak işlemlerinde kaynak dikişi oluşturmak, kaynaklı birleştirmeye mukavemet kazandırmak amacıyla dolgu metali (ilave metal, dolgu teli), ergimiş bölgeye ekletilir. Yaygın olarak ergitme kaynak yöntemleri olarak dört gruba ayrılır:

- Gaz kaynağı: Kaynak yönteminde, en yaygın yanıcı gaz olarak asetilen kullanılır. Oksi-asetilen kaynağı olarak da bilinir. Kaynak dolgu metalini ve kaynak yapılacak ana metali ertitebilmek için gerekli olan ısı asetilen ve oksijen karışımı kullanılarak ya da yanıcı bir gazın oksijen ile yakılmasıyla elde edilir.
- Ark kaynağı: Kaynak yönteminde, elektrik arkı yardımıyla ortaya çıkan ısı kullanılarak kaynak yapılacak malzemelerin ertitildiği kaynak işlemidir. Aynı zamanda, ark yöntemi metal kesme işlemlerinde de kullanılmaktadır.
- Direnç kaynağı: Direnç kaynak yönteminde, basınç altında kaynak yapılacak parçaların temas yüzeylerinden geçen elektrik akımına karşı gösterdikleri direnç sonucunda ortaya çıkan ısı kullanılarak kaynak yapılır. En yaygın kullanılan direnç kaynak yöntemi punta kaynak yöntemidir.

Diğer ergitme kaynak yöntemleri: Bu kaynak yöntemlerinde birleştirilecek parçaların ergitilmesi için kullanılan ısı gaz, ark ve direnç kaynaklarından farklıdır. Lazer kaynağı, elektron kaynağı gibi yöntemler bulunmaktadır [39].

Basınç kaynağı olarak bilinen katı hal kaynak yönteminde, basınç ve ısı bir arada uygulanmasıyla yapılan kaynak işlemidir. Katı hal kaynak yöntemlerinde ilave dolgu kaynak teli kullanılmamaktadır. Katı hal kaynakları başlıca:

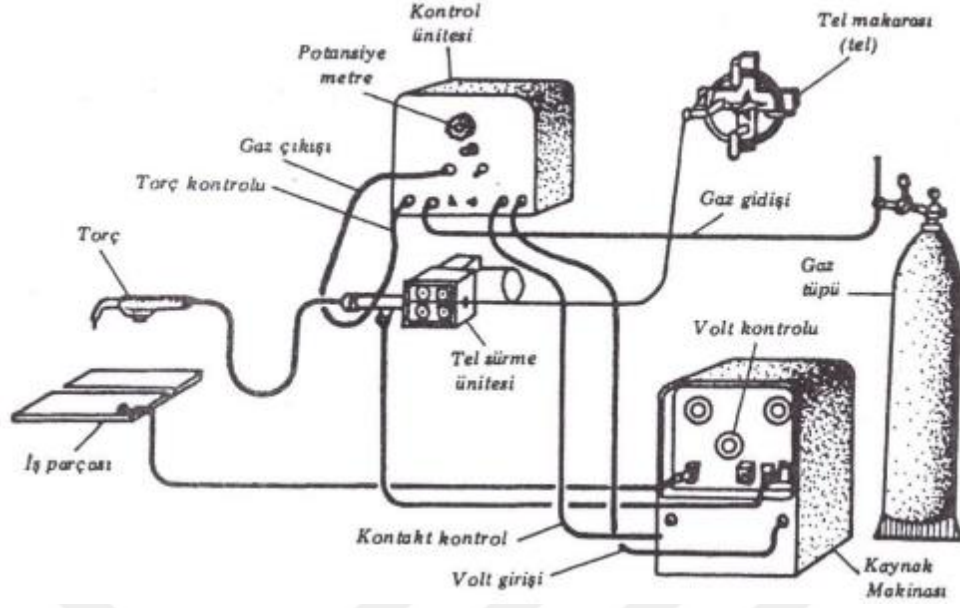
- Difüzyon kaynağı: Bu kaynak işleminde, kaynak yapılacak parçalar yüksek bir sıcaklıkta ve basınç ile birbirlerine bastırılır ve katı hal difüzyonu ile birleştirilir.
- Sürtünme kaynağı: birleştirme yapılması istenilen parçalar arasında sürtünmeden kaynaklanan ısı kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilir [39].

Açıklanan kaynak yöntemleri dışında ultrasonik kaynağı, dövme (demirci) kaynağı, soğuk kaynak, hadde kaynağı, patlamalı kaynak gibi birçok katı hal kaynak yöntemi de bulunmaktadır [39].

4.1 Gaz Metal Ark Kaynağı Yöntemi

Gaz metal ark kaynağı (GMAK) yönteminde kaynak yapılan bölge bir koruyucu gaz ile konur ve kaynak dolgu metali olarak otomatik olarak dışarıdan sürekli beslenen çıplak tel kullanılır. Uygulanan bu kaynak yönteminde uygun olan kaynak parametreleri kaynak makinesinden ayarlanır ve bu değerlerin makine yardımı ile sabit değerlerde tutulması sağlanır. Kaynak makinesi üzerinden akım şiddeti, ark boyu ve tel besleme hızı ayarlanır. Kullanılan gaz türüne göre bu yöntem yaygın olarak metal soy gaz (MIG) kaynağı veya metal aktif gaz (MAG) kaynağı olarak da isimlendirilir [40]. Yöntem çeliklerin ve paslanmaz çeliklerin kaynağında tungsten inert gaz (TIG) kaynağı olarak da bilinen gaz tungsten ark kaynağı (GTAK) yöntemi ile birlikte yaygın olarak birçok endüstri kolunda kullanılmaktadır [41-50].

Kaynak donanımı olarak gaz metal ark kaynağı yöntemi dört gruptan oluşur. Bu gruplar; tel besleme ünitesi, koruyucu gaz ünitesi, kaynak torcu ve kablo grubu ile güç ünitesidir. Sistemde kullanılan kaynak torcu ve kablo grubu kaynak sırasında kullanılan koruyucu gazı taşıyarak ark bölgesini oluşturmak ve ilave teli kaynak bölgesine taşımak, güç ünitesinden gelen akımı da ark bölgesine taşınmasını sağlamaktır [40]. Kaynak donanımları şematik olarak Şekil 4.1’de gösterilmiştir [51].



Şekil 4.1: Gaz Metal Ark Kaynak Yöntemi Donanımı

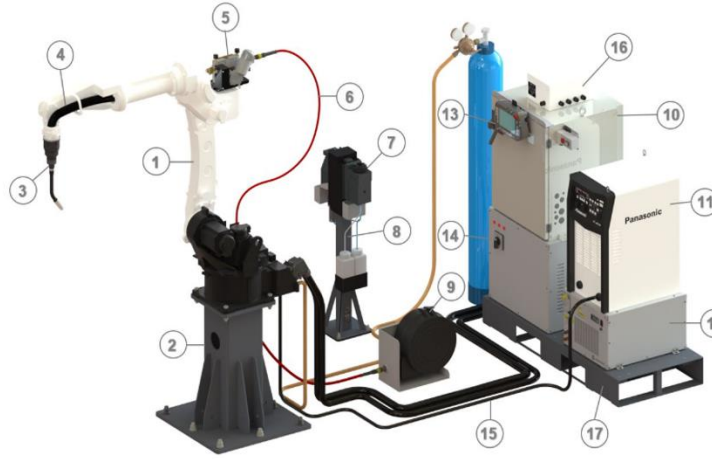
Kaynak: (Ertürk ve Selamoğlu, 2017)

4.2 Robotik Kaynak Yöntemi

Gelişen teknoloji ile beraber robotların kaynak teknolojisinde kullanılması düşünülmüş ve robotlara uygun ekipmanların geliştirilmesiyle robotlar da kaynak işlemlerinde kullanılmaya başlamıştır. Robotik kaynak yöntemi ağırlıklı olarak MAG, MIG ve TIG kaynak yöntemlerinde kullanılmaktadır [52].

Manuel kaynak yönteminde insan faktöründen dolayı meydana gelen hatalar robotik kaynak yöntemi kullanılarak hataların önüne geçilmiştir ve robotik kaynak kaynakların güvenilirliğini, kullanılabilirliğini arttırmıştır. Robotik kaynak yönteminin temel faydaları, daha ucuz ve daha kaliteli üretilen ürünler ve artan kaynak kalitesi ve üretkenliği ve daha düşük maliyetli üretimdir [52,53].

Kaynak sırasında robot kullanımı çeşitli pozisyonlarda kaynak yapılmasını kolaylaştırır çünkü robot ile kaynak çeşitli pozisyonlarda kaynak imkânı sağlar. Aynı zamanda yüksek sertlik kalitesine sahip çeliklerin kaynak işlemleri beceri gerektirir ve kaynak operatörlerinin eğitimi zaman ve ek maliyet gerektirir. Manuel yapılan kaynaklarda çalışan eğitimli kaynak operatörünün çalışma fiyatı yüksektir [54].



Sistemi Oluşturan Ekipmanların Listesi

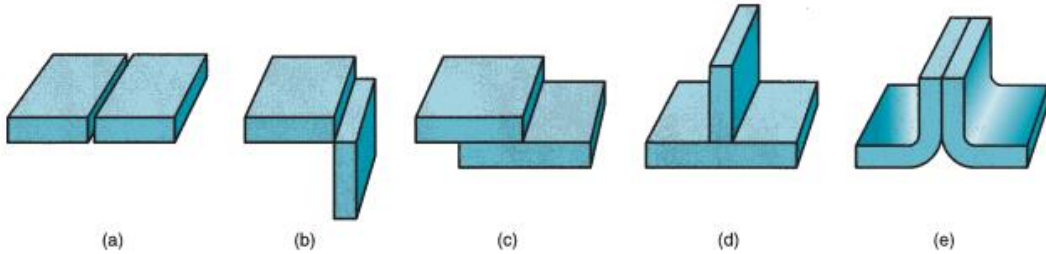
- 1-Robot Kol
- 2-Robot Montaj Sehpa
- 3-Kaynak Torcu ve Şok Sensor
- 4-Torç Kablosu
- 5-Tel Sürme Ünitesi
- 6-Tel Taşıyıcı Kılavuz Hortum
- 7-Otomatik Torç Temizleme Ünitesi
- 8-Torç Tem. Ünitesi Montaj Sehpa
- 9-Tel Sepet Taşıma Aparatı
- 10-Kontrolör
- 11-Kaynak Makinesi
- 12-Su Soğutma Ünitesi
- 13-LCD Kumanda Ünitesi
- 14-Trafo
- 15-Kablo Grubu
- 16-Kumanda Kutusu
- 17-Metal Taşıyıcı Palet

Şekil 4.2: Kaynak Robotunun Genel Yapısı

Kaynak: (www.magmaweld.com.tr)

4.3 Kaynak Bağlantı Tipleri

İki ana metali birleştirmek için 5 temel kaynak birleştirme türü bulunmaktadır. Birleştirme türleri; alın bağlantı, köşe bağlantı, bindirme bağlantı, T bağlantı, kenar bağlantıdır. Şematik olarak kaynak bağlantı tipleri Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Alın bağlantı türünde, plakalar aynı düzlem üzerinde olup kaynak plakaları uçlarından alın altına birleştirilmesini sağlar. Köşe bağlantı birleştirme türünde plakalar birbirlerine dik olarak kaynak işlemi yapılır. T bağlantı birleştirme türünde plakalardan biri diğer plakaya yaklaşık olarak T harfi olacak şekilde kaynak işlemi yapılır ve plakalar birbirine diktir. Bindirme birleştirme türünde üst üste bindirilmiş iki plakanın kaynak işlemi yapılır. Kenar birleştirme türünde kaynak yapılacak düzlemlerde ortak kenarlardan en az biri ile parça paraleledir ve kaynak işlemi ortak kenar kısmından yapılır [56].



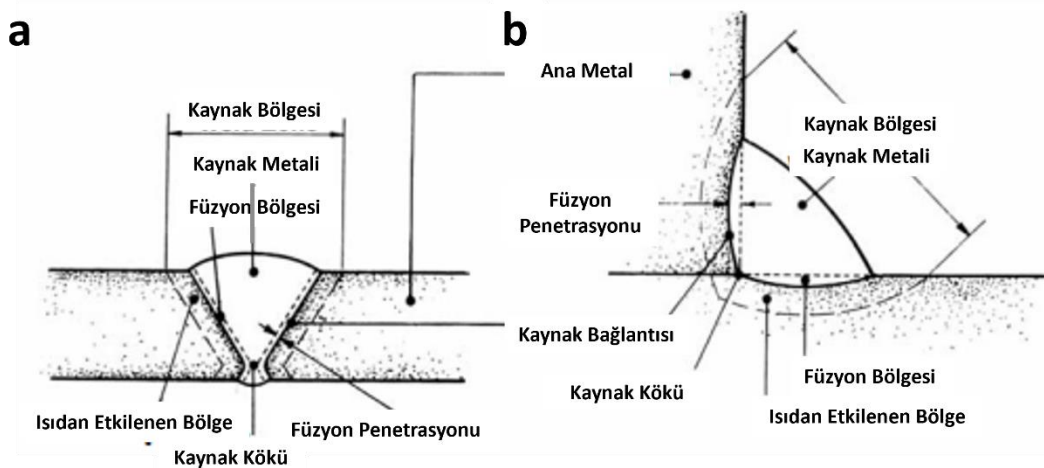
Şekil 4.3: Kaynak Bağlantı Tiplerinin Şematik Olarak Gösterimi: (a) Alın Bağlantı, (b) Köşe Bağlantı, (c) Bindirme Bağlantı, (d) T Bağlantı, (e) Kenar Bağlantı

Kaynak: (Groover, 2012)

4.4 Kaynak Bölgesi

Kaynak yöntemlerinde birkaç istisna dışında genellikle birleştirme sırasında ısı kullanılmaktadır. Ancak kullanılan ısıyı üretme yöntemleri uygulanacak kaynak yöntemlerine göre değişiklik göstermektedir. Kaynak işlemlerinde kullanılan yüksek ısı ile birlikte kaynak metalinin ergitilmesi ve önceden hazırlanmış kaynak ağzı içerisine dökülmesi sağlanır. Uygulanan yüksek ısı ile birlikte kaynak ağzının kenar yüzeyleri de bir miktar erir ve ergimiş halde bulunan kaynak dolgu metalini ile kaynak yapılan ana metal karışarak kaynak ağzı bölgesinde katılaşır. Uygulanan bu işlem neticesinde kaynak işlemi uygulanmış parçada, malzemenin kaynak bitişiği kısımlarında, kaynak metalin ve ana metalin ergime sıcaklığından ortam sıcaklığına kadar, farklı sıcaklık derecelerinde bulunan bölgeler meydana gelmektedir. Böylece malzemeye farklı sıcaklık derecelerinden dolayı bir ısı çevrim uygulanmış olur. Sıcaklık derecelerinin farklı olmasından dolayı kaynak bölgesinin mekanik özellikleri ve içyapısı esas metalden ve kaynak metalinden farklı olan bölgeler oluşmaktadır [57,58].

Kaynaklı bağlantıda genellikle kaynak bölgesi, ergime bölgesi ve ısıdan etkilenen bölge olmak üzere iki bölümde incelenebilir [59]. Şekil 4.4'te alın kaynağı ve köşe kaynağında kullanılan terimler gösterilmektedir [60].



Şekil 4.4: Kaynak Terminolojisi, (a) Alın Kaynağı, (b) Köşe Kaynağı

Kaynak: (Vander Voort, 2021)

4.4.1 Ergime bölgesi

Ergime bölgesi, metalin katılaşma eğrisinden (solidüs) daha yüksek sıcaklık derecesine kadar ısınmış bölgedir ve kimyasal bileşim olarak ana metal, kaynak

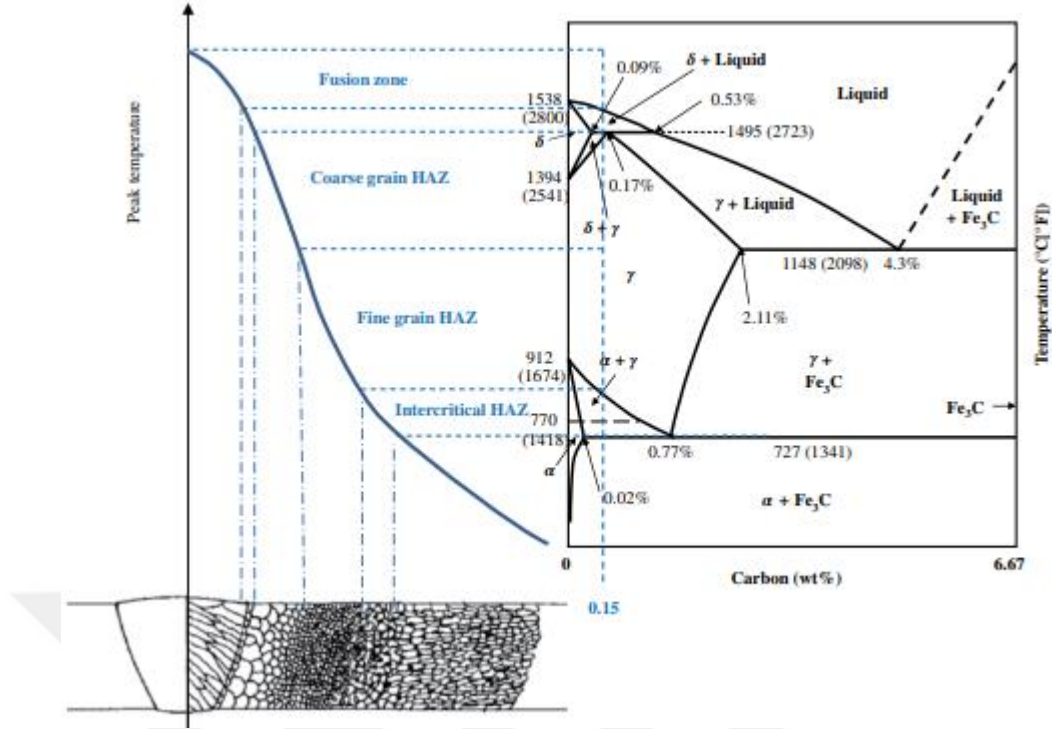
dolgu metali karışımından oluşur. Ergime bölgesinde meydana gelen karışım ana metalin kaynak dolgu metaline oranı, kullanılan kaynak yöntemi ve kaynak ağız biçimine göre değişiklik gösterir. Karışım oranı her pasoda farklılık gösterir ve her pasoda meydana gelen kimyasal bileşim diğer pasolardan farklıdır. Tek paso ile yapılan kaynak işlemlerinde ergime bölgesinde ana metal ve kaynak dolgu metali, kaynak banyosunda meydana gelen şiddetli türbülans dolayısıyla iyi karışmıştır. Ancak çok paso ile yapılan kaynak işlemlerinde her pasonun ana metalle karışma oranı diğer pasolara göre farklıdır [57,58].

4.4.2 Isıdan etkilenmiş bölge

Kaynak işlemi sırasında açığa çıkan ısı ile birlikte kaynak bölgesinin bitişiğindeki bölge ısı çevrim etkisi altında kalır. Isıl çevrim çeliklerin üretimi sırasında uygulanan ısı çevriminden farklıdır buna bağlı olarak ortaya çıkan içyapı ve mekanik özellikler ana malzemeye göre farklıdır. Bu bölgeye ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) denilmektedir [40].

Çeliklerin kaynağında ısıdan etkilenen bölgenin sıcaklığı 1450 – 700 °C arasında değişmektedir [58]. Bu bölge kaynak sırasında hızlı bir şekilde ısınmaktadır ve ana malzeme kalınlığı, kaynak sırasında uygulanan enerji, ön tav sıcaklığının fonksiyonu olarak ise hızlı bir şekilde soğumaktadır. Çeliğin bileşimine göre soğuma hızı kritik soğuma hızını aştığı zaman, genellikle 900 C'nin üzerindeki bir sıcaklığa kadar maruz kalan bölgelerde sert kırılma yapıları meydana gelir. Dolayısıyla, ısı tesiri altında kalan bölge kaynaklı bağlantı bölgesinin en kritik bölgesi olarak nitelendirilir. Kaynak bölgesi incelendiğinde meydana gelen birçok kırılma ve çatlaklar bu bölgede oluşur [58-60].

IEB bölgesi kaynaktan uzaklığına bağlı olarak sırasıyla; kaba taneli bölge, ince taneli bölge, kısmen dönüştürülmüş bölge, tavlınmış bölge olarak ayrılır [61]. Şekil 4.5'te ısıdan etkilenmiş bölgenin mikroyapısı Fe-C denge diyagramına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir [62].

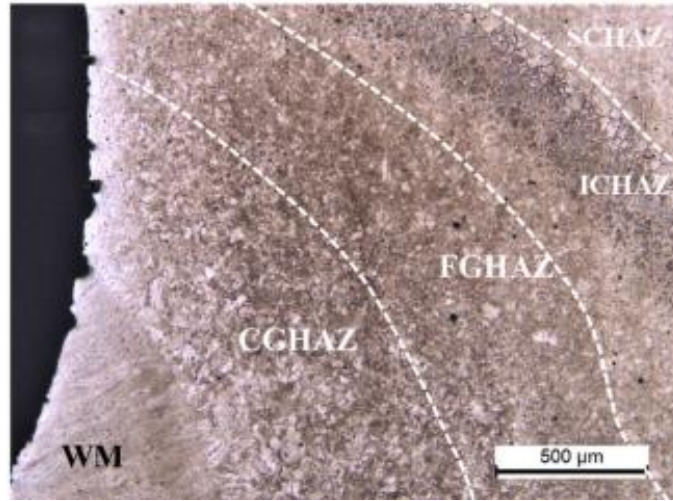


Şekil 4.5: Karbonlu Çeliklerin IEB'nin Demir Karbon Faz Diyagramı ve Mikroyapı Arasındaki İlişki

Kaynak: (Lippold, 2014)

Kaynak bölgesinin hemen bitişiğinde kaynak metali ile ana malzeme arasında 1400 °C'nin üzerinde düşük sertlikte füzyon bölgesi oluşur. Mikroyapı incelemesi yapıldığında füzyon bölgesinin hemen bitişiğinde öncelikle kaba taneli ısıdan etkilenmiş bölge (Coarse-grained HAZ - CGHAZ) ve ince taneli ısıdan etkilenmiş bölge (Fine-grained HAZ - FGHAZ) oluşmaktadır. Kaba taneli bölge 1000 – 1000 °C 'de oluşurken ince taneli bölge ise A₃ çizgisinin üzerinde 825 – 1000 °C arasında meydana gelmektedir. İnce taneli bölgenin bitişiğinde A₃ - A₁ çizgisi arasında 713 – 825°C arasında kısmen dönüşüme uğramış bölge oluşmaktadır [63].

Şekil 4.6'da Gürol ve arkadaşları tarafından 2021 yılında yapılan çalışmaya ait ısıdan etkilenmiş bölgenin mikroyapısı gösterilmektedir [64].



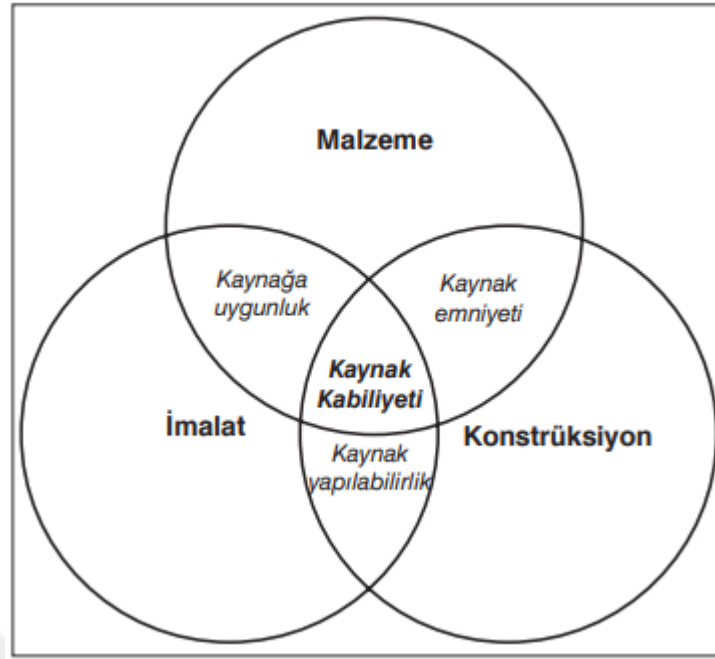
Şekil 4.6: Isıdan Etkilenmiş Bölgenin Mikroyapısı

Kaynak: (Gürol ve diğ., 2022)

Kaynak işlemi sonrasında soğuma hızına bağlı olarak ısıdan etkilenmiş bölgede mikroyapı incelemesi yapıldığında martenzit adı verilen faz ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkabilecek martenzitler sert ve kırılgan bir yapı oluşmasına ve soğuk çatlakların ortaya çıkmasına neden olur. Aynı zamanda kaynak sonrasında meydana gelen iç gerilmeler, çalışma koşullarına bağlı olarak oluşan zorlamalar ve kaynak banyosunda bulunan hidrojenin etkileri ile kılcal çatlaklar oluşmaktadır. Dolayısıyla kaynak yapılırken malzemenin özelliklerinin korunması için özel önlemler, yöntemler kullanılması ve malzemenin kaynak kabiliyetinin incelenmesi gerekmektedir [58].

4.5 Kaynaklanabilirlik

Kaynaklı birleştirmenin amacı, düşük maliyet ile üretim yaparak tasarlanan ürünün fonksiyonun yerine getirmesi ve uzun süreli kullanım sağlamasıdır. Kaynak kabiliyeti Şekil 4.7 ile belirtilen üç temel faktöre bağlıdır. Bu faktörler; malzeme, konstrüksiyon ve imalattır. Kaynak kabiliyeti için malzemelerin kaynağa uygunluğunun, imalatın kaynağa uygunluğunun ve konstrüksiyonun kaynak edilebilirliği özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Kaynaklı bağlantıda kullanılan ana malzemenin kaynak kabiliyeti, tasarlanan imalat ve konstrüksiyon özelliklerini karşılıyorsa ve istenilen kaynak kalitesine ulaşabiliyorsa o malzeme kaynağa demektir [65].



Şekil 4.7: Metallerin Kaynak Kabiliyetinin Temel Faktörler İle İlişkisi

Kaynak: (Vural ve diğ., 2003)

Kaynak kabiliyetini etkileyen faktörler; kimyasal bileşim ve buna bağlı olarak karbon eşdeğeri, metalurjik özellikler, fiziksel özellikler, kaynağa hazırlık aşamaları, kaynağın uygulanması sırasında oluşan ısı girdisi ve ısıнын uygulanışı ve kaynak sonrasında uygulanan ısıl işlemlerdir [65].

4.5.1 Karbon eşdeğeri

Karbon eşdeğeri, çeliğin sertleşebilirliğinin, kaynaklanabilirliğinin ve hidrojen kaynaklı çatlakların önemli bir belirleyicisidir. Aynı zamanda karbon eşdeğeri kaynağın soğuma sırasında martenzit oluşturma ve gevrek kırılmaya uğrama eğiliminin bir ölçüsü olarak da tanımlanır. Karbon eşdeğeri eşitlik 1' de IIW standardına göre verilmiştir [66].

$$Ceş = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (4.1)$$

Karbon eşdeğerine bağlı olarak kaynaklanabilirlik ve ön ısıtma gerekliliği Çizelge 4.1'de verilmiştir [66].

Çizelge 4.1: Karbon Eşdeğerine Göre Kaynaklanabilirlik ve Ön Isıtma Gerekliliği

Karbon Eşdeğeri (%)	Kaynaklanabilirlik	Ön Isıtma
0,35'e kadar	Mükemmel	Gerekli değil
0.36- 0.40	Çok iyi	Önerilir
0,41- 0,45	İyi	Gerekli
0,46- 0,50	Orta	Gerekli
0,51 ve üzeri	Zayıf	Gerekli

Kaynak: (Alhassan ve Bashiru, 2021)

Kaynak sonrası meydana gelen hidrojen kaynaklı soğuk çatlakları ve kaynak sırasında hızlı soğumayı önlemek için karbon eşdeğerine bağlı olarak ön ısıtma yapmak gereklidir. Ön ısıtma sıcaklıkları karbon eşdeğerine göre Tablo 4.2'de verilmiştir [65, 66].

Çizelge 4.2: Karbon Eşdeğerine Bağlı Ön Tavlama Sıcaklık Değerleri

Karbon Eşdeğeri (%)	Ön Tavlama Sıcaklığı (°C)
0,45<Ceş	Ön tavlamaya gerek yoktur.
0,45≤Ceş<0,60	100- 200
Ceş>0,60	200- 300

Kaynak: (Alhassan ve Bashiru, 2021)

4.6 Zırh Çeliklerinin Kaynaklanabilirliği

Kaynak yöntemi kullanılarak yapılan birleştirmelerde, yapılacak kaynak birleşimi, IEB'nin genişliği, kaynak bölgesinde ve IEB'deki sertlik, mikroyapı değişimi mekanik ve balistik özellikleri değiştiren önemli etkenlerdir. Kaynak sırasında kullanılacak parametrelerin uygun şekilde seçilmesi balistik ve mekanik özelliklerde belirleyicidir [67].

Zırh çelikleri yüksek mukavemetli çeliklerdir. Bu çeliklerin kaynak işlemi sırasında ısıdan etkilenen bölgede meydana gelen yumuşama nedeniyle kaynak bölgesinde (ergime bölgesinde ve IEB'de), sertlik değeri ana malzemeye göre düşüktür ve zırh çeliklerinin kaynağı metalurjik açıdan zorluk çıkarır. Isıdan etkilenen bölgenin mikroyapısı, kaynak bağlantılarının sertlik seviyesini ve balistik performansını etkiler. IEB'de meydana gelen sertlik düşümünü engellemek için ısı girdisinin azaltılması gerekmektedir. MIL-STAN-1185 standardına göre ısıdan etkilenen bölgenin genişliğinin 15,9 mm içinde kalmasına izin vermelidir [54, 68].

Zırh eliklerinin kaynaklarında en önemli sorun kaynaktan sonra ısıdan etkilenmiş bölgede (IEB) hidrojen kaynaklı çatlakların ortaya çıkmasıdır. Bu eliklerin kaynak işlemi öncesinde karbon eşdeğerinin hesaplanıp uygun ön ısıtma yapılarak hidrojen kaynaklı çatlaklar nlenebilir [69]. Zırh eliklerinin kaynağı sırasında meydana gelen hidrojen çatlaklarını önlemek için östenitik paslanmaz dolgu malzemesi kullanılması önerilir. Çünkü stenitik paslanmaz kaynak dolgu metalinin hidrojen çözünürlüğü yüksektir. Aynı zamanda düşük hidrojenli ferritik kaynak dolgu metali de zırh çeliklerinin kaynaklı bağlantılarda kullanılır. Ancak, ferritik yapıda kaynak dolgu metali kullanılması için karbon eşdeğerine göre ön tavlama yapılması gereklidir. Östenitik yapıda bulunan kaynak dolgu malzemesi kullanımında malzeme en düşük oda sıcaklığında kaynak edilmelidir [18, 70].

Kaynak işlemi yapılırken uygun dolgu metali kullanılmalıdır. Tasarlanan kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri ile uyumlu olmayan dolgu metali kullanımı özellikle kaynak metali bölgesindeki sertlik değerinin, ana metal sertliğine kıyasla önemli ölçüde düşük olması düşük balistik performansa neden olur [71].

5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

5.1 Geleneksel Kaynak Yöntemleri Literatür Araştırması

Kurt [72] 2022 yılında yapmış olduğu çalışmada, 15mm kalınlığında V kaynak ağız geometrisine sahip Protection 500 kalite zırh çeliğini farklı kaynak dolgu metali kullanarak robotik gazaltı kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirlik özelliklerinin incelemiştir. Kaynak dolgu metali olarak ferritik (ER110 SG ve SG3), paslanmaz (ELOX SG 2209), östenitik paslanmaz (ELOX 309LSi), yapısındaki kaynak metali kullanılmıştır. Ferritik (ER110 SG) kaynak dolgu metali kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantının çekme mukavemetinin ana malzemesin mukavemetine oranının %62 olduğu raporlanmıştır. Bu durumun mikroyapıda meydana gelen asiküler ferrit ve kısmen beynit fazının çekme mukavemetine doğrudan etkisi olduğunu belirtilmiştir. Kaynak bölgesinden alınan çentik darbe numunelerinin test sonuçları incelendiğinde ise en yüksek tokluk değerinin ortalama 97J ile östenitik paslanmaz (ELOX 309 LSi) kaynak dolgu metali kullanılarak yapılan kaynaklarda, en düşük tokluk değerinin ise ortalama 37J ile ferritik (ER110 SG) kaynak dolgu metali kullanılarak yapılan kaynaklarda elde edildiği raporlanmıştır.

Naveen Kumar ve arkadaşları [9] 2021 yılında yapmış olduğu çalışmada, farklı kaynak dolgu metallerinin mekanik özelliklere ve balistik performansa etkisini araştırmıştır. Çalışmada korumalı metal ark kaynağı (SMAW) yöntemi ile östenitik paslanmaz çelik (ASS), düşük hidrojenli ferritik (LHF) ve dubleks paslanmaz (DSS) kaynak dolgu metalleri kullanılmıştır. ASS kaynak dolgu metali kullanımının kaynak metalinde birincil östenitik faza bağlı olarak yüksek enerji emme kabiliyeti ile diğer sarf malzemelerine göre yüksek tokluk, yüksek uzama ve üstün balistik performans sergilediği belirtilmiştir. LHF kaynak dolgu metali kullanımının kaynak metalinde iğnemsiz ferrit bulunması nedeniyle diğer kaynak dolgu metali göre daha yüksek kaynak metali sertliği ve yüksek çekme mukavemeti sergilediği belirtilmiştir.

Savic ve arkadaşları [73] 2021 yılında yapmış olduğu çalışmada, zırh çeliklerinin kaynak işlemlerinde ısı girdisinin mekanik ve balistik özelliklere etkisini

araştırmıştır. Çalışmada kaynak dolgu metali olarak östenitik paslanmaz yapıya sahip ER307 tel ve kaynak işlemleri yapılırken 1.29 kJ/mm, 1.55 kJ/mm ısı girdisi kullanılmıştır. Düşük ısı girdisinin kaynak metalinin sertliğini arttırdığı, yüksek ısı girdisiyle birlikte IEB’de sertlik değerlerinin düştüğü ve balistik performansı azaldığı belirtilmiştir.

Saxena ve arkadaşları [74] 2018 yılında yapmış olduğu çalışmada, ARMOX500T kalite zırh çeliği östenitik paslanmaz ve düşük hidrojenli ferritik kaynak dolgu metali kullanılarak dolgu malzemesinin çekme dayanımı ve çentik dayanımına etkisi araştırılmıştır. Çekme testi sonuçlarına göre çekme dayanımının ana malzemeye oranı ferritik dolgu malzemesi kullanımında %41.7 iken östenitik dolgu malzemesi kullanımında %30,6 olduğu belirtilmiştir. Çentik darbe tokluğunun ana malzemeye oranı karşılaştırıldığında ise ferritik kaynak dolgu metali (0,03%Ni) kullanımda bu oranın %12 daha düşükken, östenitik kaynak dolgu metali (9,45%Ni) kullanımı ile bu değerin %20 arttığı belirtilmiştir. Dolgu metalinde bulunan Ni oranının çentik darbe tokluğunu etkilediği belirtilmiştir.

Kaynaklı bağlantılarda kaynak sonrası uygulanan ısıl işlem mikroyapı ve mekanik özellikler açısından önemlidir. Kara ve arkadaşları [75] 2012 yılında yaptığı çalışmada, Armox 500 T kalite zırh çeliği ve östenitik yapıya sahip 307Si kaynak dolgu metali kullanarak kaynak işlemi sonrası uygulanan ısıl işlemin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çalışmada kaynak yapılan parçalardan birine 650 °C’de 4 saat gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem uygulanan numunede kaynak sonrası düzensiz soğumadan dolayı meydana gelen düzensiz tane yapılarının kısmen giderildiği ve kaba taneli ısıdan etkilenmiş bölgede homojen bir yapı meydana geldiği belirtilmiştir. Aynı zamanda uygulanan ısıl işlem ile kaynaklı bağlantı sertliğinin azaldığına ve buna bağlı olarak azalan sertlikle beraber sünekliğin ve darbe dayanımının arttığı belirtilmiştir. Uygulanan ısıl işlem ile darbe dayanımının 38,5 J’den 43 J’e yükseldiği raporlanmıştır.

Çoban ve arkadaşları [76] 2021 yılında yapmış olduğu çalışmada, farklı kalınlıklara sahip MIL-A-46100 standardına uygun Protection 500 kalite zırh çeliği ve ferritik yapıya sahip olan ER110 SG kaynak dolgu metali kullanılmıştır. Çalışmada robotik gaz altı kaynak yöntemi ve 6, 10, 15 mm kalınlığı ait zırh çelikleri kullanılmıştır ve 0,7 kJ.mm⁻¹ düşük ısı girdisi ile hatasız kaynak yapıldığı vurgulanmıştır. Yapılan

kaynaklarda plaka kalınlığının artmasıyla ısıdan etkilenmiş bölgenin sertliğinin arttığı belirtilmiştir.

Özdemir [77] 2020 yılında yapmış olduğu çalışmada, MIL 46100 standardına göre üretilmiş zırh çeliği kullanmıştır. Yapılan çalışmada kaynak işlemleri, östenitik paslanmaz dolgu metali olan 307 Si ve gaz korumalı özlü dolgu metali olan FCH 330 metali, gaz altı kaynak yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada X ve V kaynak ağız geometrisi kullanılmıştır. Yapılan çentik darbe deneği sonuçlarında V kaynak ağızına sahip numunelerin çentik darbe dayanımlarının X kaynak ağız geometrisine göre daha iyi çentik darbe dayanımı sergilediği belirtilmiştir.

İpek ve Elaldi [78] tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada, MIL-A 46100 standardına uygun üretilmiş 12 mm kalınlıktaki zırh çeliğine, gazaltı kaynak yöntemi (MIG) ve östenitik dolgu metali kullanılarak uygulanmıştır. Çalışmada, kaynak ağız açısı ve geometrisinin çekme, mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. “X” ve “V” kaynak ağız geometrisi, 48-54-60° kaynak ağız açıları kullanılarak yapılan kaynaklarda çekme ve basma testleri gerçekleştirilmiştir, aynı zamanda sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara “V” kaynak ağız geometrili ve 54° kaynak ağız açısına sahip zırh çeliği kaynağı ile “X” kaynak ağız geometrili ve 45° kaynak ağız açısına sahip zırh çeliği kaynağının çekme ve basma dayanımında en yüksek mukavemete sahip olduğu raporlanmıştır. Aynı zamanda “V” kaynak ağız geometrili kaynakların çekme gerilmeleri altında “X” kaynak ağız geometrisine göre daha yüksek mukavemete sahip olduğu belirtilmiştir.

Kim ve arkadaşları [79] tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada, MIL-STD-12560 standardına göre üretilen zırh çeliklerine “X” kaynak ağız geometrisi ve dar aralıklı kaynak ağızı (NGW) geometrisinin mekanik ve balistik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Çekme testi sonrası NGW kaynak ağız geometrisi kullanılarak yapılan kaynağın “X” kaynak ağız geometrisine göre akma mukavemetini 12,8 MPa, çekme mukavemetinin 52,9 MPa, uzamanın ise %2,8 daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Nedeni olarak ise NGW’de toplam kaynak ısı girdi enerjisinin, “X” kaynak ağız geometrisine göre daha düşük olmasından dolayı olduğu belirtilmiştir. Çentik darbe testinde ise NGW kaynak ağız geometrisinin “X” kaynak ağız geometrisine göre düşük sıcaklıkta daha iyi darbe tokluğu sergilediği belirtilmiştir.

Gürol ve arkadaşları [64] tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada, 10 mm kalınlığına sahip Protection 500 kalite zırh çeliği robotik gazaltı kaynak yöntemi kullanılarak köşe kaynak işlemi yapılmıştır. Çalışmada kaynak ilave teli olarak östenitik paslanmaz yapıya sahip ER307 ve ferritik yapıya sahip ER100 S-G kaynak dolgu metalleri kullanılmıştır. Kaynak işlemleri 0,70 kJ/mm ısı girdisi kullanılarak hatasız kaynak yapıldığı belirtilmiştir. Yapılan kaynaklarda IEB'lerinde gerçekleştirilen mikro sertlik testi sonucuna göre ince taneli ısıdan etkilenmiş bölgede (FGHAZ) sertlik değerinin en yüksek olduğu, mikro sertlik değerinin en düşük olduğu kısmın ise kısmen dönüşüme uğramış bölge de (ICHAZ) meydana geldiği belirtilmiştir. MIL STD-1185 standardına göre kaynak bitişinden sonra ana malzemeye doğru 6 mm'de ana malzemenin sertlik değerine ulaşıldığı belirtilmiştir.

5.2 Sandviç Kaynak Yöntemi Literatür Araştırması

Literatür araştırması yapılırken Dünyada zırh çeliklerinin kaynak işlemleri sırasında ara pasoda farklı kaynak dolgu metalleri kullanımı sonucu sandviç kaynak yöntemi uygulanarak balistik performanslarının geliştiği görülmüştür. Yapılan bu çalışmaların özeti bu kısımda anlatılmıştır.

Madhusudhan Reddy ve arkadaşları [80] tarafından 1999 yılında yapılan çalışmada su verilmiş temperlenmiş 6 mm kalınlığında çelik plakalara östenitik, sert dolgu kaynak metali kullanılarak dört farklı kombinasyonda kaynak yapılmıştır ve balistik özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu kombinasyonlardan birincisinde kaynak östenitik dolgu metali kullanılarak tek pasoda gerçekleştirilmiştir. İkinci kombinasyonda ise kaynakta kök ve kapak pasoda östenitik dolgu metali kullanırken ara pasoda sert dolgu metali kullanılarak sandviç kaynak yöntemi uygulanmıştır. Üçüncü kaynak kombinasyonunda ise östenitik dolgu metali kullanılarak yapılan kaynağın üzerine sert dolgu metali kullanılarak kaynak yapılmıştır. Dördüncü kaynakta ise sadece sert dolgu malzemesi kullanılarak kaynak yapılmıştır. Bu kaynakların şematik gösterimi Şekil 5.1'de verilmiştir. Balistik test sonucunda östenitik dolgu metalinin kaynak düşük sertliği ve düşük akma mukavemeti sonucu zayıf balistik performans sergilediği belirtilmiştir. Sert dolgu metali ile yapılan kaynakta balistik test sonucunda kaynak metalinin yüksek mukavemeti ve düşük tokluğuna bağlı olarak parçalanma meydana geldiği raporlanmıştır. Östenitik ve sert dolgu metali kullanılarak yapılan kaynakta östenitik telin yüksek sünekliğe sahip olmasına bağlı

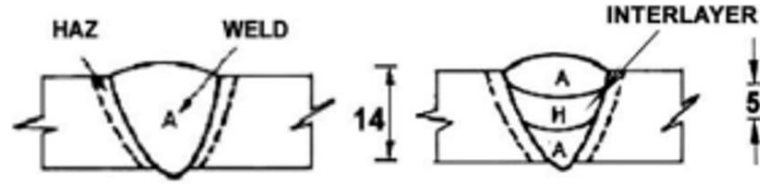
olarak merminin kinetik enerjisini emme yeteneği sayesinde kaynağa bütünlük sağladığı belirtilmiştir. Yapılan sandviç kaynağında, sert dolgu malzemenin östenitik dolgu malzemesinin arasında olmasıyla östenitik dolgu malzemesinin enerji absorbe edebilme özelliği ile birlikte kaynaklı bölgenin parçalanmadan kaldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak östenitik dolgu metalinin balistik performansını iyileştirmek sert dolgu metalinin paso arasında kullanılmasının balistik teste mermi hızında azalma meydana getirmesiyle balistik direnci arttırdığı belirtilmiştir. Kullanılan östenitik dolgu metalinin, merminin kinetik enerjisini kısmen emerek sert dolgu malzemesinin yerinde tutulmasına ve sandviç kaynakta sert dolgu malzemesinde oluşan çatlakların gerilim yoğunluğunun azalmasına yardımcı olduğu belirtilmiştir.



Şekil 5.1: Kullanılan Kaynak Kombinasyonlarının Şematik Görüntüsü; a) Östenitik, h) Sert Dolgu

Kaynak: (Madhusudhan ve dig., 1999)

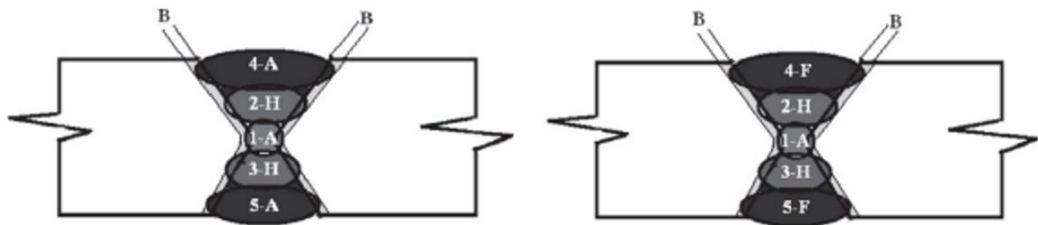
Babu ve arkadaşları [81] tarafından 2009 yılında yapılan çalışmada zırh çeliklerinin kaynaklı bağlantılarının balistik performanslarını geliştirmek amacıyla sandviç kaynak yöntemi uygulanmıştır. 14 mm kalınlığında su verilmiş temperlenmiş AISI 4340 kalite çelik plakalara SMAW ve FCAW kaynak yöntemleri kullanılarak östenitik paslanmaz dolgu metali ile ayrı ayrı kaynaklar yapılmıştır. Sandviç kaynak işlemi için östenitik dolgu metaliyle yapılmış olan kök ve kapak kaynak pasoları arasına 4 mm kalınlığında tungsten karbür alaşımlı sert dolgu metali PTA kaynak yöntemi kullanılarak kaynak yapılmıştır. Kaynak kombinasyonlarının şematik görüntüsü Şekil 5.2’de verilmiştir. Sonuç olarak ara pasoda sert dolgu metali kullanılan ve kullanılmayan dört farklı kaynak yapılmıştır. Balistik test sonucunda sandviç kaynak yöntemi kullanılmayan deney numunelerinin balistik darbe altında başarısız olduğu belirtilmiştir.



Şekil 5.2: Kaynak Kombinasyonlarının Şematik Görüntüsü; a) Östenitik, h) Sert Dolgu

Kaynak: (Babu ve diğ., 2010)

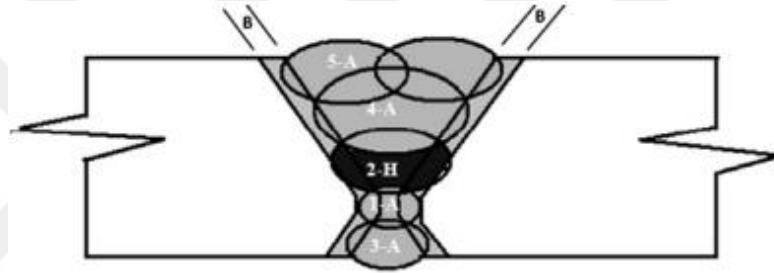
Balakrishnan ve arkadaşları [82] tarafından 2010 yılında yapılan çalışmada, 18 mm kalınlığında X kaynak ağız geometrisine sahip AISI 4340 çelik plakalar elektrik ark kaynağı yöntemi kullanılarak sandviç kaynak metodu uygulanmıştır. Çalışmada düşük hidrojenli ferritik, östenitik paslanmaz ve sert dolgu alaşımlı kaynak dolgu metalleri kullanılmıştır. Kaynak ağız bölgesine östenitik paslanmaz dolgu metali ile yağlama işlemi uygulanmıştır. Yapılan kaynak kombinasyonlarının şematik gösterimi Şekil 5.3'te verilmiştir. Kaynak işlemleri 5 pasoda gerçekleştirilmiştir. Yapılan kaynaklarda 1. pasoda östenitik paslanmaz dolgu metali, 2. ve 3. pasoda düşük hidrojenli sert dolgu dolgu metali kullanılmıştır. Yapılan kaynakların kapak pasolarına (4. ve 5. Pasolar) östenitik paslanmaz dolgu metali ve düşük hidrojenli ferritik dolgu metali kullanılarak iki ayrı kaynak işlemi yapılmıştır. Kep pasoda düşük hidrojenli ferritik dolgu metali kullanılarak yapılan kaynağın mikroyapı incelenmesinde iğnemsî ferritik yapının varlığını sertliği ve tokluğu arttırdığı belirtilmiştir. Sonuç olarak keppasolarında düşük hidrojenli ferritik dolgu metali kullanılarak yapılan kaynağın balistik performansının östenitik paslanmaz dolgu metali kullanılarak yapılan kaynağın balistik performansına kıyasla daha üstün olduğu belirtilmiştir. Ancak kaynaklarda ara pasalarda kalınlığı yaklaşık 4 mm olan sert dolgu alaşımlı dolgu metali kullanımının mermi penetrasyonuna karşı direnci desteklemediği pasokalınlığının ve kaynak konfigürasyonu hakkında daha fazla çalışma yapılması gerektiği belirtilmiştir.



Şekil 5.3: Yapılan Kombinasyonlarının Kaynağın Şematik Gösterimi (Şekilde b(Yağlama Yapılmış Bölgeyi), a(Östenitik Paslanmaz Elektrot), h(Sert Dolgu Alaşımlı Elektrod), f(Düşük Hidrojenli Elektrod) Göstermektedir.)

Kaynak: (Balakrishnan ve diğ., 2011)

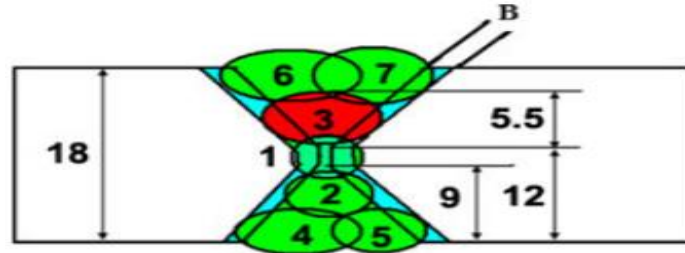
Balakrishnan ve arkadaşları [83] tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada, 8 mm kalınlığa sahip AISI 4340 kalite çeliklere östenitik paslanmaz dolgu metali ve sert dolgu alaşımlı dolgu metali kullanılarak sandviç kaynak yöntemi uygulanmıştır. Kaynaklarda sert dolgu paso kalınlığı 4, 5,5, 7 mm olacak şekilde sandviç kaynaklar yapıp sert dolgu paso kalınlığının balistik performansa etkisi araştırılmıştır. Yapılan kaynakların şematik gösterimi Şekil 5.4'te verilmiştir. Sert dolgu paso kalınlığının östenitik dolgu metali kullanılarak yapılan kapak paso (kep paso) yüksekliğini belirlediği belirtilmiştir. Mikrosertlik testi sonucunda, kaynak merkez hattın boyunca (kepten köke doğru) sert dolgu paso kalınlığının artmasıyla birlikte meydana gelen seyrelmenin arttığı belirtilmiştir. Balistik test sonucunda yapılan tüm sandviç kaynakların mermiyi durduğu, sert dolgu paso kalınlığı 5,5 mm olan kaynakta ise balistik direncin en yüksek olduğu belirtilmiştir.



Şekil 5.4: Kaynakların Şematik Gösterimi (Şekilde a (Östenitik Tel), h (Sert Dolgu Teli) b(Yağlama Bölgesi) Göstermektedir.)

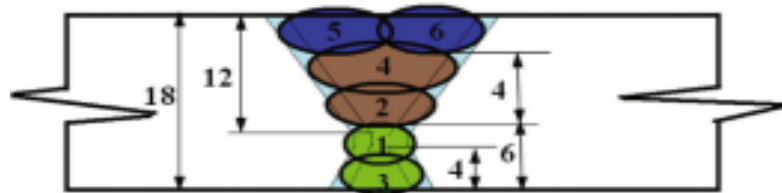
Kaynak: (Balakrishnan ve dig., 2013)

Balakrishnan ve arkadaşları [84] tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada X kaynak ağız geometrisine sahip 18 mm kalınlığında su verilmiş temperlenmiş AISI 4340 çelik kullanılmıştır. Kaynak yöntemi olarak plazma tungsten ark, kaynak metali olarak ise östenitik paslanmaz dolgu metali ve sert dolgu alaşımlı dolgu metali kullanılarak sandviç kaynak yöntemi uygulanmıştır. Kaynak ağız bölgesinde östenitik paslanmaz dolgu metali kullanılarak yağlama yapılmıştır. Yapılan kaynakta sert dolgu metali paso kalınlığı 4, 5,5, 7 mm olacak şekilde değiştirilerek üç farklı kaynak gerçekleştirilmiştir. Sert dolgu metali kalınlığı 5,5 mm olan kaynağın şematik gösterimi Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Yapılan kaynaklarda sert dolgu metalinin paso kalınlığının östenitik dolgu metalinin paso kalınlığını etkilediğini ve östenitik dolgu metalinin kep kalınlığının sırasıyla 8, 6,5, 5 mm olduğu belirtilmiştir. Kaynak işlemi sonrasında balistik testler yapılmıştır. Sonuç olarak kaynak ağız bölgesinde yapılan yağlama işleminin balistik performansı arttırdığı belirtilmiştir. Ara pasoda 4 mm



Kaynak: (Balakrishnan ve diğ., 2013)

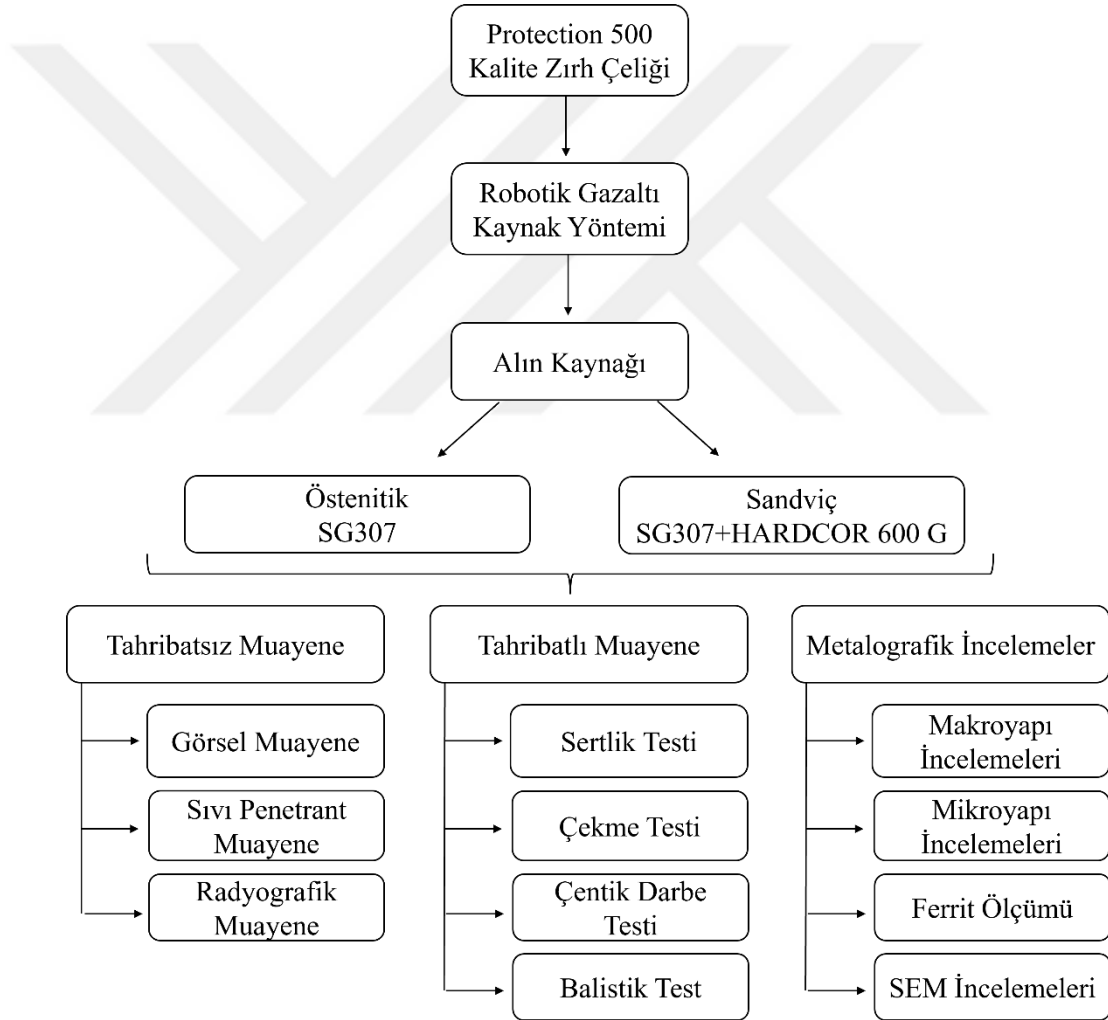
1. [95] 4. 6. 1. 2013. 1.



Kaynak: (Balakrishnan ve dig., 2013)

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında zırh çeliklerinin kaynaklı bağlantılarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin geliştirmek amacıyla robotik gaz metal ark kaynağı (GMAK) yöntemi kullanılmıştır. Kaynak pasoları arasında sert dolgu metali kullanılarak sandviç kaynak yönteminin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmanın şematik gösterimi Şekil 6.1’de gösterilmektedir.



Şekil 6.1: Yapılan Çalışmanın Şematik Gösterimi

6.1 Ana Malzeme ve Kaynak Sarf Malzemelerinin Seçimi

Kaynak sırasında ana malzeme olarak Miilux Oy firmasından temin edilen 15 mm kalınlığındaki yerli PROTECTION 500 serisi zırh çeliği plakaları kullanılmıştır.

Gedik Kaynak A.Ş. bünyesinde bulunan mekanik test atölyesinde kaynak ağız açısı 30° derece olacak şekilde plakalar hazırlanmıştır. Plakalara ait % ağırlıkça kimyasal analiz sonuçları Çizelge 6.1’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 6.2’de sunulmuştur. Belirtilen bu test değerleri kaynak öncesinde ana malzemeden alınan numunelerden elde edilen değerlerdir. Testler Gedik Test Merkezi’nde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.1: Kullanılan Kaynak Plakalarının Kimyasal Analizi (% Ağırlıkça)

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	C eş
Protection 500	0,210	0,490	1,018	0,616	0,420	0,290	0,018	0,002	0,59

Çizelge 6.2: Kullanılan Kaynak Plakalarının Mekanik Değerleri

	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama ($L_0=5d_0$) %	Çentik Darbe Dayanımı (ISO-V/-40°C) (J)
Protection 500	1278	1746	9	20

Bu çalışmada Çizelge 6.3’te kimyasal analiz değerleri, Çizelge 6.4’te ise mekanik değerleri verilen, Gedik Kaynak A.Ş. tarafından üretilmekte olan 1.2 mm çapındaki östenitik paslanmaz ve sert dolgu kaynak metalleri kullanılmıştır. Tellerin ticari isimleri GeKa ELOX SG 307 ve GeKaTec HARDCOR 600 G’dir. SG 307 kaynak dolgu metali üretici beyanına göre yüksek dayanımlı alaşımsız ve alaşımlı ıslah çeliklerinde ve zırh çeliklerinin kaynak işlemlerinde kullanılmaktadır. HARDCOR 600 G kaynak dolgu metali üretici beyanına göre kesme takımlarının kesici kenarlarında, tamir işlemlerinde kullanılmaktadır. Üretici beyanında kaynak sonrası sadece sertlik beyanı verilmiştir. Kaynak sonrası sertlik değerinin 600 HB olduğu belirtilmiştir [86].

Çalışmada kullanılan kaynak dolgu metallerinin kimyasal analizlerinin tespiti için her bir kaynak teli ile saf kaynak metali kimyasal analiz numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere yüzey hazırlama işlemleri yapıldıktan sonra X Işını Floresans Spektrometresi (XRF) cihazı ile kimyasal analiz testi yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 6.3’te verilmiştir. Tellerin mekanik test değerleri olarak ise ürünlerin üzerinde belirtilen sertifika değerleri baz alınmıştır ve değerler Çizelge 6.4’te verilmiştir.

Çizelge 6.3: Kullanılan Kaynak Dolgu Metallerinin Kimyasal Analizi (% Ağırlıkça)

Tel adı	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Fe
Östenitik Paslanmaz	17,82	7,92	0,02	5,54	0,61	66,82
Sert Dolgu	8,53	0,18	0,00	0,60	0,54	88,93

Çizelge 6.4: Kullanılan Kaynak Dolgu Metallerinin Mekanik Değerleri

Kaynak Teli	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama ($L_0=5d_0$) %	Çentik Darbe Dayanımı (J)
ELOX SG307	min. 370	580-750	min. 30	min. 63 (ISO-V/+20°C)

Kaynak: (file.gedik.com.tr)

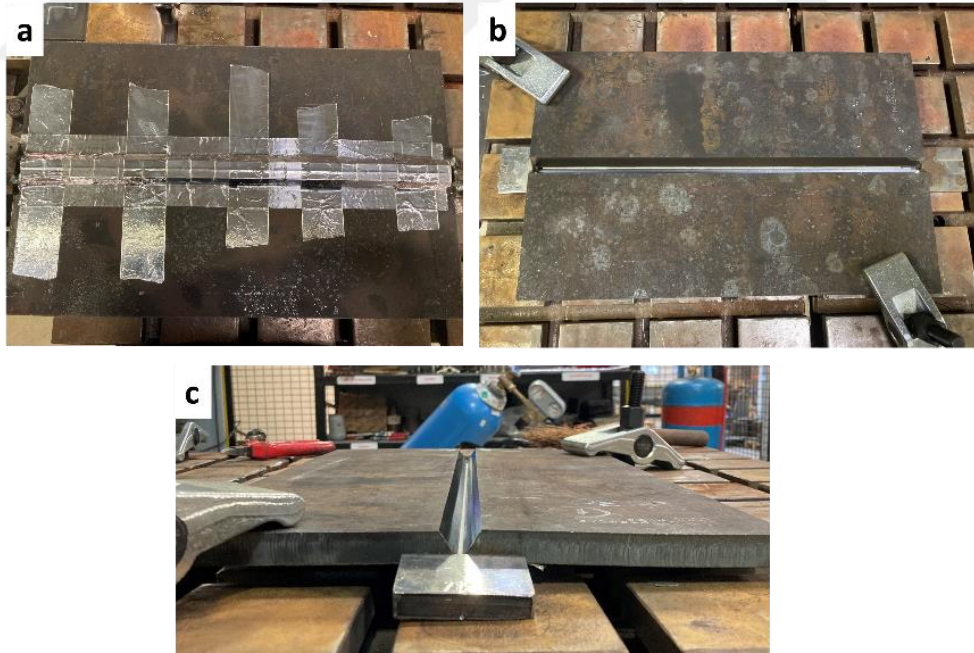
6.2 Kaynak Düzenekinin Hazırlanması

Çalışmada yapılan tüm kaynaklar Gedik Kaynak A.Ş. bünyesinde bulunan OTC marka 6 eksenli VDL8 model kaynak robotu ile Gekamac marka Power MIG GPS WB P500L kaynak makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kaynak ekipmanları Şekil 6.2’de gösterilmektedir.

TS EN ISO 9692-1 Kaynak ve benzer işlemler – kaynak ağız hazırlığı için tavsiyeler standardına göre kaynak ağız açısı 30° olacak şekilde plakalar hazırlanmıştır. Kaynak işlemi öncesi kaynak plakalarının kaynak ağız bölgesi yağdan, kirden arındırılarak temizlenmiştir. Kaynak plakalarına 2 mm pah kırılarak kök aralığı 2 mm olacak şekilde plakaların kaynak başlangıç ve bitiş noktalarına ek çelik parçalar puntalanmıştır. Tam nüfuziyetli tek taraftan kaynak yapılabilmek amacıyla seramik altlık, folyo bant yardımıyla kaynak plakasına yapıştırılmıştır. Kaynak plakaları çift işkence kullanılarak kaynak tablasına sabitlendirilmiştir. Şekil 6.3-a’da seramik altlık bulunan plakanın alttan görünüşü, Şekil 6.3-b’de plakanın üstten görünüşü, Şekil 6.3-c’de ise plakanın yandan görünüşü gösterilmektedir.



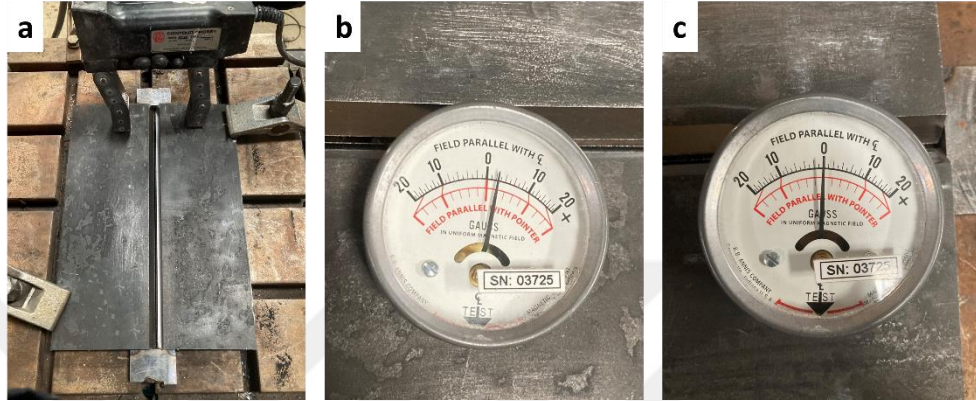
Şekil 6.2: Kaynak Ekipmanları



Şekil 6.3: Kaynak Plakası; a) Plakanın Alttan Görünüşü, b) Plakanın Üstten Görünüşü, c) Plakanın Yandan Görünüşü

Zırh çelikleri üretimi sırasında manyetik özelliğe sahip taşıyıcılar ile taşınması sonucu parçalarda manyetik alan meydana gelmektedir. Parçada oluşan manyetik alan, kaynak robotu aracılığıyla programlanan ark yörüngesinin sapmasına

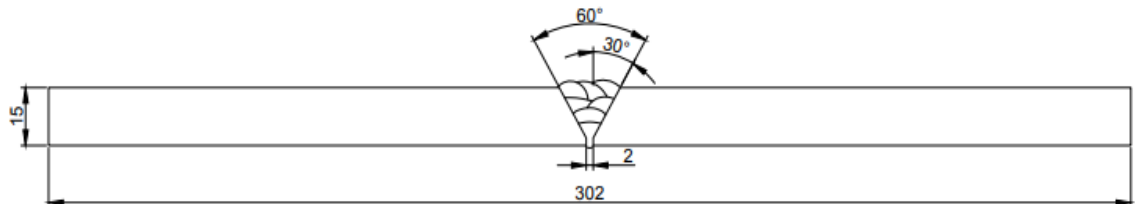
dolayısıyla ark üflemesine neden olmaktadır. Kaynak işlemi öncesi plakalara gaussmetre kullanılarak manyetik alanın güç ölçümleri yapıp daha sonrasında demanyetizasyon işlemi için el yökese kullanılarak manyetik alanın giderilmesi sağlanır. Şekil 6.4-b’de demanyetizasyon işlemi öncesi gaussmetre ile ölçüm yapılışı, Şekil 6.4-a’da el yökese ile demanyetizasyon işlemi, Şekil 6.4-c’de ise demanyetizasyon işlemi sonrası gaussmetre ile yapılan ölçüm gösterilmektedir.



Şekil 6.4: Plakalara Yapılan Demanyetizasyon İşlemi; a) El Yöke İle Demanyetizasyon İşlemi, b) Demanyetizasyon İşlemi Öncesi Gaussmetre İle Yapılan Ölçüm, c) Demanyetizasyon İşlemi Sonrası Gaussmetre İle Yapılan Ölçüm

Kaynak işlemi öncesi kullanılan zırh çelik plakalarının karbon eşdeğerine bakılarak ön ısıtma sıcaklığı belirlenmiştir. Propan tüp ve şaloma yardımıyla plakalara 120 ± 10 °C olacak şekilde ön ısıtma uygulanmıştır. Kaynak işlemi çok pasolu olacak şekilde yapılmıştır, işlem sırasında pasolar arasında sıcaklığın en fazla 150 °C olmasına dikkat edilmiştir. Sıcaklık ölçümü ISO 13916:2017 standardına göre kaynak ağız bölgesinden 60 mm uzaklıktan Fluke marka 62 Mini İnfrared termometre ile ölçülmüştür.

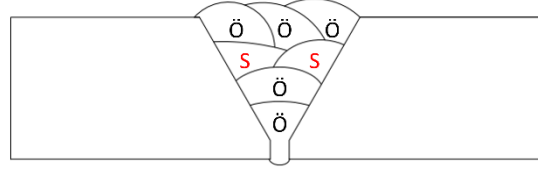
Çalışmada kullanılan plakaların ölçüleri ve kaynak pasolarının şematik gösterimi Şekil 6.5’te gösterilmektedir.



Şekil 6.5: Plakaların Ölçüleri ve Kaynak Pasolarının Şematik Gösterimi

Çalışmada sadece östenitik paslanmaz SG307 kaynak dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak Östenitik olarak adlandırılırken, östenitik paslanmaz SG307 ve sert

dolgu HARDCOR 600 G kaynak dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak ise Sandviç olarak adlandırılmıştır. Sandviç kaynağın şematik görüntüsü Şekil 6.6’da gösterilmiştir. Sandviç kaynakta 3. ve 4. Pasoda sert dolgu teli kullanılmıştır.



Şekil 6.6: Sandviç Kaynağın Şematik Görüntüsü; Ö: Östenitik Dolgu Metali, S: Sert Dolgu Metali

Kaynak işlemi sırasında kaynak makinesinden okunulan değerler not edilerek ısı girdisi hesaplanmıştır. Elde edilen parametre değerleri östenitik (SG307) ve sert dolgu (HARDCOR600 G) dolgu metalleri için Çizelge 6.5’te verilmiştir.

Isı girdisi eşitlik 5.1’ye göre hesaplanmıştır. Formülde; kaynak gerilimi V , kaynak akımı I , kaynak hızı ise v olarak gösterilmiştir.

$$Q = \frac{V \times I \times 60}{1000 \times v} \quad (5.1)$$

Çizelge 6.5: Kaynak Parametre Değerleri

	Gaz Debisi (l/dk)	Koruyucu Gaz	Akım (A)	Gerilim (V)	Kaynak Hızı (cm/dk)	Isı Girdisi (kJ/mm)
Östenitik	15	ArCO ₂ ,5	195-205	17-20	25-29	0,80-0,87
Sert Dolgu		%100CO ₂	185-210	21-22	26	0,90-1,10

Kaynak işlemleri sırasında kullanılan gazlar TS EN ISO 14175 - Kaynak sarf malzemeleri - Ergitme kaynağı ve benzeri işlemler için gazlar ve gaz karışımları standardına göre Östentik pasolar için M12 grubu %97,5 Ar ve %2,5 CO₂ karışım gazı, Sert dolgu pasosu için ise C1 grubu %100 CO₂ gazı kullanılmıştır.

6.3 Tahribatsız Muayene

Kaynak işlemi sonrası kaynak plakaları havada soğutularak kaynak yüzeyinde, kaynak bölgesindeki yüzeysel ve hacimsel süreksizlikleri tespit edebilmek amacıyla tahribatsız muayene yöntemleri uygulanmıştır. Kaynaklı plakalar öncelikle TS EN ISO 17637 standardına göre görsel muayene tabi tutulmuştur, değerlendirmeler ise TS EN ISO 5817 standardına göre yapılmıştır. Görsel muayeneden kabul olan parçalara radyografik muayene ve sıvı penetrant yöntemi uygulanmıştır.

6.3.1. Sıvı penetrant muayene

Kaynaklı plaklarda yüzeye yakın ve yüzeyde bulunan süreksizlikleri tespit edebilmek amacıyla TS EN ISO 3452-1 standardına göre sıvı penetrant muayene yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde kullanılan sarf malzemeler Şekil 6.7’de verilmiştir. Öncelikle kaynaklı plakalar yağdan, kirden arındırılarak temizlenmiştir. Temizleme işleminden sonra parçaya penetrant sıvısı püskürtülerek, sıvının süreksizliklere nüfuz etmesi için yaklaşık 30 dakika beklenilmiştir. Süreksizliklerin tespiti amacıyla parçada bulunan fazla penetrant sıvısının temizlenmesi sağlanmıştır. Parçalara uygulanan temizlik işleminin ardından geliştirici püskürtülerek yaklaşık 30 dakika beklenilmesinin ardından TS EN ISO 23277 standardına göre değerlendirilmiştir.



Şekil 6.7: Sıvı Penetrant Muayene Yönteminde Kullanılan Sarf Malzemeleri

6.3.2 Radyografik muayene yöntemi

Kaynaklı plakalarda, kaynak bölgesinde meydana gelen iç süreksizlikleri (Çatlak, gözenek vb.) tespit edebilmek amacıyla TS EN ISO 17636-1 standardına göre radyografik muayene yöntemi uygulanmıştır. Radyografik muayene yönteminde malzemeye X- ışınları gönderilerek radyografik film görüntüsünde malzeme içindeki hataların hatasız bölgelere göre ortaya çıkan kontrast farklılığından yola çıkılarak hataların türleri ve konumları belirlenir [87]. Yapılan çalışmada radyografik muayene yöntemi için Gedik Test Merkezi bünyesinde bulunan Şekil 6.8’de gösterilen Eresco MF4 – 300 KW radyografik muayene cihazı kullanılmıştır. Radyografik film değerlendirmesi EN ISO 10671-1 standardına göre yapılmıştır.



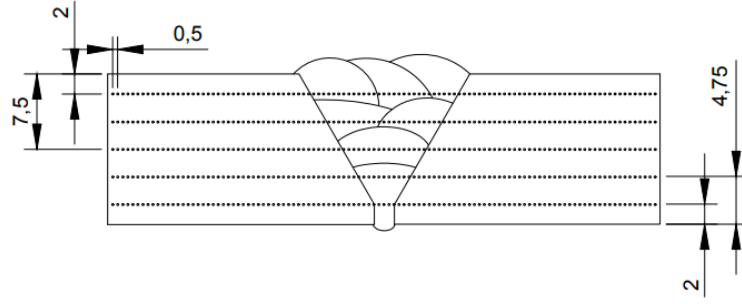
Şekil 6.8: Radyografik Muayenede Kullanılan Cihaz

6.4 Tahribatlı Muayene

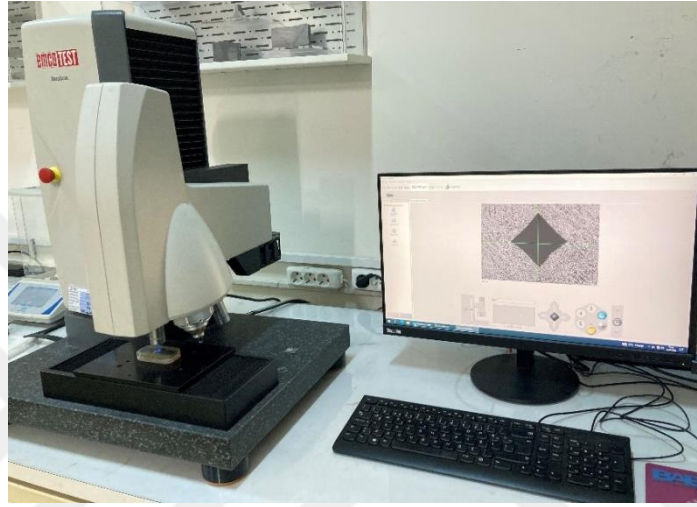
Tahribatsız muayene yöntemlerinden kabul gören kaynaklı plakalara tahribatlı testler uygulanmıştır. Kaynaklı plakalın kalıcı şekil değişimlerine karşı gösterecekleri direnç ve dayanımı belirlemek için çekme testi ve çentik darbe testi, sertlik testi uygulanmıştır. Tahribatlı muayene yöntemlerini uygulayabilmek amacıyla bir adet makro numunesi, iki adet çekme testi numunesi, 3 adet kaynaklı bölgeden alınan çentik darbe numunesi, 3 adet IEB'den alınan çentik darbe numunesi ilgili deneylerin standart numune hazırlama ölçüleri dikkate alınarak Gedik Kaynak A.Ş. bünyesinde bulunan mekanik atölyede hazırlanmıştır.

6.4.1 Sertlik testi

Malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdikleri direnç sertlik olarak tanımlanır [88]. Sertlik ölçümü için Vickers sertlik yöntemi uygulanmıştır. Kaynak plakasından alınan numune yüzeyi Vickers sertlik yöntemi için zımparalanarak hazırlanmıştır. Sertlik testi Şekil 6.9'da gösterilen şemadaki gibi yapılmıştır. Ana malzemenin, IEB ve kaynak metalinin mikrosertlik ölçümleri her kaynak sırası için sertlik taraması 0,5 mm aralıklarla HV 5'lik yük ile x eksenı boyunca yapılmıştır. Aynı zamanda kaynak metalinin tam ortasından, kaynak üst yüzeyinden köke doğru y eksenı boyunca mikro sertlik testi yapılmıştır. Şekil 6.10'da gösterilen Gedik Test Merkezi bünyesinde bulunan Emcotest Durascan mikro sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır.



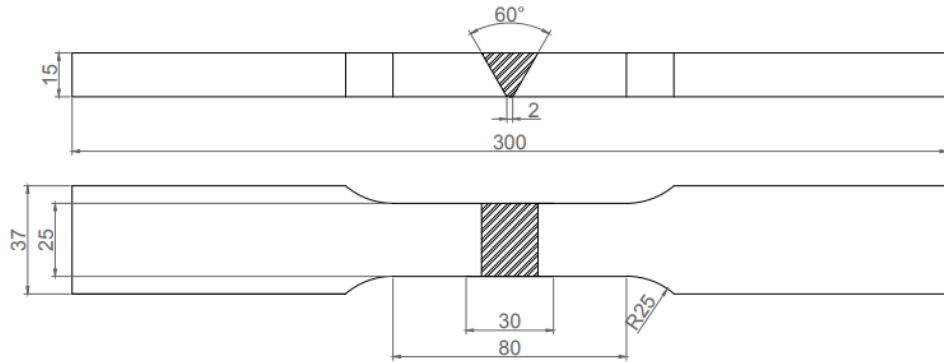
Şekil 6.9: Sertlik Ölçümünün Şematik Gösterimi



Şekil 6.10: Mikro Sertlik Ölçüm Cihazı

6.4.2 Çekme testi

Kaynaklı plakadan alınan numunelere enine çekme testi uygulanabilmesi için EN ISO 4136 ve EN ISO 6892-1 standartlarına göre numuneler hazırlanmıştır. Çekme testi numune ölçüleri Şekil 6.11’de gösterilmiştir. Test sırasında Gedik Test Merkezi bünyesinde bulunan Şekil 6.12’de gösterilen Zwick / Roell Z 600E marka çekme cihazı kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre cihazdan elde edilen akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve yüzde uzama verileri alınarak veriler karşılaştırılmıştır.

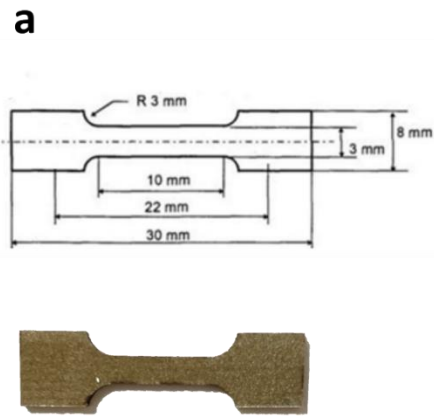


Şekil 6.11: Çekme Testi Numune Ölçüleri



Şekil 6.12: Çekme Testi Cihazı

Kaynaklı plakalardan, makro numune üzerinde kaynak bölgesinden östenitik, sert dolgu pasolarına denk gelecek şekilde tel erezyon yöntemi ile Şekil 6.13-a'da teknik resmi bulunan mikro çekme numuneleri çıkartılmıştır. Gedik Test merkezi bünyesi bulunan Şekil 6.13-b'de gösterilen Time- WDW- 10M model mikro çekme cihazı ile mikro çekme testi yapılmıştır.

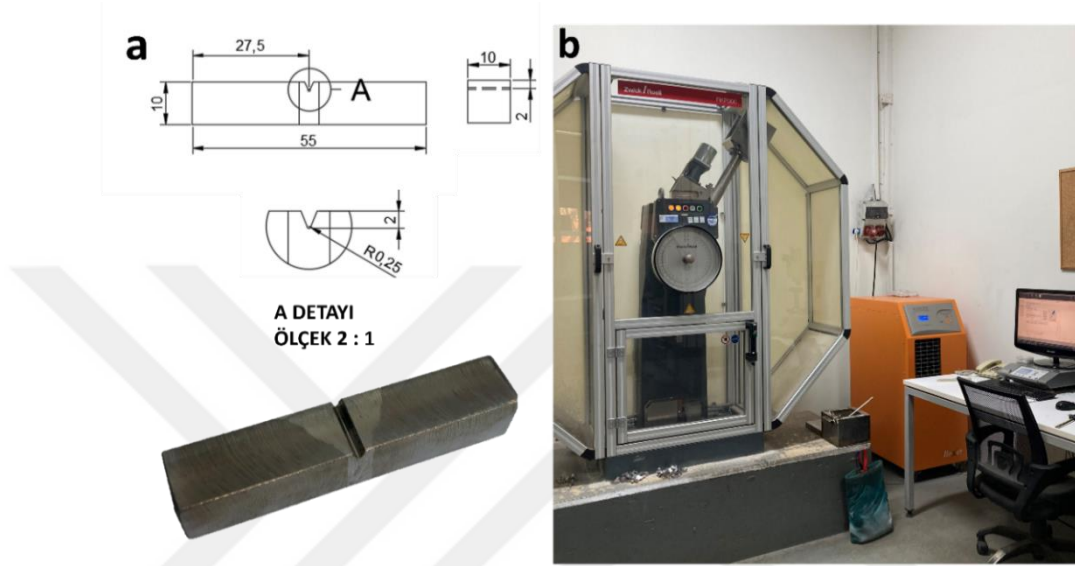


Şekil 6.13: Mikro Çekme Testi; a) Mikro Çekme Numunesi, b) Test Cihazı

6.4.3 Çentik darbe testi

Kaynaklı plakadan alınan numunelerin dinamik zorlanmalar altında kırılma sırasında harcanılan enerji miktarını tespit edebilmek amacıyla Charpy çentik darbe testi

yapılmıştır. EN ISO 148-1 ve EN ISO 9016 standartlarına göre kaynak bölgesinden ve ITAB bölgesinden olmak üzere numuneler hazırlanmıştır. Numune boyutları Şekil 6.14-a’da verilmiştir. Çentik darbe testi için Gedik Test Merkezi bünyesinde bulunan Şekil 6.14-b’de gösterilen Zwick/Roell RKP 300 model çentik darbe test cihazı kullanılmıştır. Karbondioksit ve aseton yardımıyla numuneler -40 °C’ye soğutularak çentik darbe testi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.14: Çentik Darbe Testi; a) Çentik Darbe Testi Numune Ölçüleri, b) Çentik Darbe Test Cihazı

6.5 Metalografik Muayene

Kaynaklı plakadan metalografik muayene için alınan numuneden makroyapı ve mikroyapı incelemesi yapılmıştır.

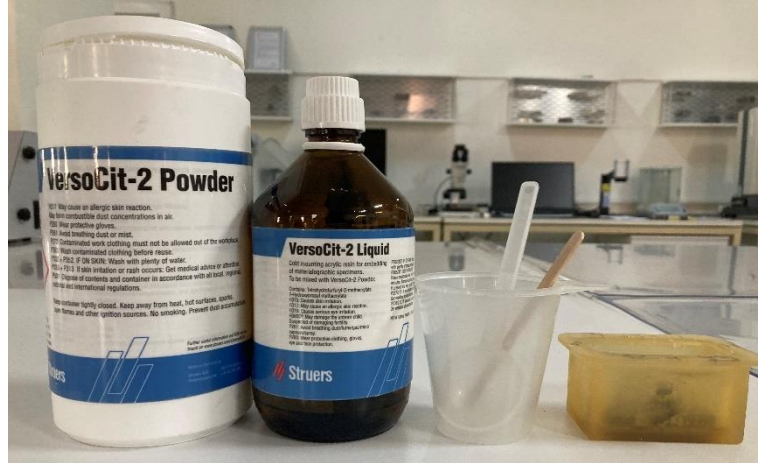
6.5.1 Numune hazırlama

Kaynaklı plakadan alınan numuneden makroyapı, mikroyapı ve sertlik testi için Gedik Test Merkezi bünyesinde bulunan Şekil 6.15’te gösterilen Metkon Forcipol 2V cihazı kullanılmıştır. Zımparalama işlemleri için 120, 220, 300, 600, 800, 1000, 1200 ve 2500 numaralı kâğıt zımparalar, parlatma işlemi için ise çuha ve 3 µm’lik alümina süspansiyon kullanılmıştır. Parlatılan numuneler su ile yıkanılıp hazırlanılan yüzeye alkol püskürtülerek hava ile kurutulması sağlanmıştır.



Şekil 6.15: Zımparalama, Parlatma Cihazı

Çekme testi ve çentik darbe testi sonrasında kırılmanın yönünü tahin edebilmek amacıyla numuneler makroyapı incelemesi için Şekil 6.16’da gösterilen soğuk bakalit kiti kullanılarak bakalite alınmıştır. Bakalite alma işlemi sırasında bir ölçek toz bakalit karışımı ve bir ölçek bakalit sıvısı karıştırılarak kullanılmıştır. Bakalit kabına yerleştirilen numunenin üzerine hazırlanan bakalit karışımı dökülerek kuruması beklenmiştir. Bakalit sıvısının kuruması beklendikten sonra zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır.



Şekil 6.16: Soğuk Bakalit Kiti

Dağlama işlemleri için Çizelge 6.6’da verilen dağlayıcılar kullanılmıştır. Östenitik paslanmaz pasoların dağlanması için %3 NaOH dağlayıcısı Şekil 6.17’de verilen elektroliz cihazı kullanılmıştır. Sert dolgu pasolarının, kaynak metalinin ve IEB’nin dağlanması için %3 nital ve marshall dağlayıcıları daldırma yöntemi kullanılarak dağlanmıştır.

Çizelge 6.6: Dağlayıcılar ve Kimyasal Karışım Oranları

Dağlayıcı	İçerik
Marshall Çözeltisi	50 ml saf su+ 2,5 ml H ₂ SO ₄ + 55 ml 30% H ₂ O ₂ + 4 g oxalic asit
Nital 3	3 ml HNO ₃ + 97 ml ethanol
NaOH	25 g NaOH + 75 g saf su



Şekil 6.17: Elektroliz Cihazı

6.5.2 Makroyapı inceleme

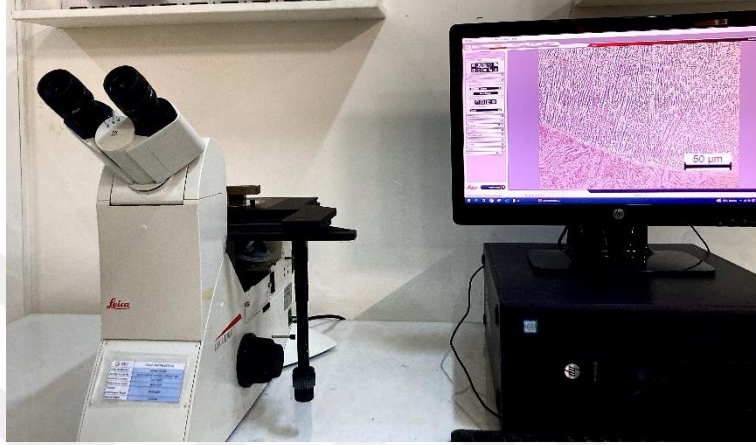
Hazırlanan makro numuneleri Çizelge 6.6’da gösterilen dağlayıcılarla dağlandıktan sonra Gedik Test Merkezi bünyesinde bulunan Şekil 6.18’de gösterilen Nikon SMZ745T makro inceleme cihazı ile TS EN ISO 17639 standardına göre makroyapı incelemesi yapılmıştır. Makroyapı incelemede hazırlanan numunede kaynak bölgesine, pasolar arasına, haz bölgesine, kaynak genişliğine bakılmıştır. TS EN ISO 5817 standardına göre değerlendirme yapılmıştır.



Şekil 6.18: Makro İnceleme Cihazı

6.5.3 Mikroyapı inceleme

Makroyapı incelemesi yapıldıktan sonra numuneye mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Mikroyapıda kaynak pasoları, paso birleşim bölgeleri, IEB'leri ve ergime bölgeleri detaylı olarak incelenmiştir. Test sırasında Gedik Test Merkezi bünyesinde bulunan Şekil 6.19'de gösterilen Leica DMİ8 M model mikroyapı inceleme cihazı kullanılmıştır.



Şekil 6.19: Mikroyapı İnceleme Cihazı

6.5.4 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri

Çentik darbe numunelerinin ve çekme testi numunelerinin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu cihazı ile detaylı olarak incelenmiştir. Test işlemleri için Şekil 6.20'de gösterilen Sakarya Üniversitesi bünyesindeki SARGEM Laboratuvarı'nda bulunan FEI Quanta FEG 450 model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak analizler yapılmıştır.



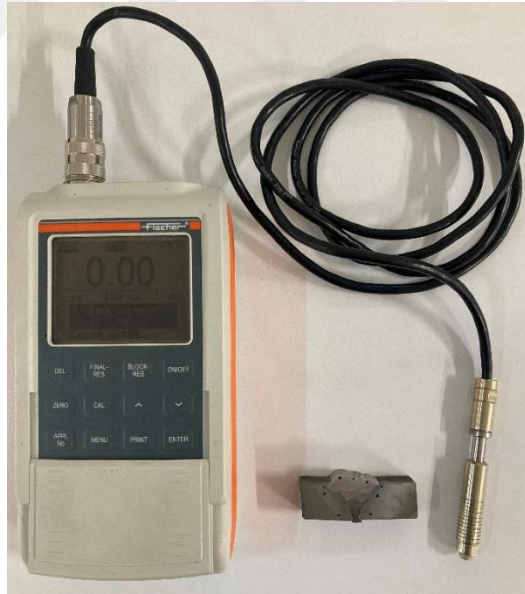
Şekil 6.20: SEM Cihazı

6.6 Kimyasal Analiz Testi

Tez çalışması kapsamında kimyasal analiz testi için Gedik Kaynak bünyesinde bulunan XRF spektrometresi cihazı kullanılarak kimyasal analiz kullanılmıştır. XRF cihazı ile kaynak işlemi öncesi kullanılan dolgu metallerinin kimyasal analiz değerlerine ve kaynak bölgesinde noktasal kimyasal analiz işlemleri için kullanılmıştır.

6.7 Ferrit Ölçümü

Östenitik paslanmaz çeliklerde, yapıda bulunan δ -ferrit miktarı önemlidir. Yapıda bulunan ferrit miktarı, Ferrit Numarası (FN) ölçeği kullanılarak ölçülebilir. FN miktarı δ -ferrit fazının östenitik faza göre manyetik olması avantajı yardımıyla ölçülür [89]. Makro numuneleri üzerinden Şekil 6.21’de gösterilen Gedik Kaynak bünyesinde bulunan Fischer marka Feritscope FMP30 ferrit miktarı ölçme cihazı kullanılarak ferrit miktarı ölçülmüştür. Ölçümler kök pasodan, 3. Sıradaki pasolardan ve kapak pasolarından yapılmıştır.



Şekil 6.21: Ferrit Ölçüm Cihazı

6.8 Balistik Test

Östenitik ve Sandviç kaynakların test işlemlerinin tamamlanmasının ardından balistik test için aynı koşullar altında tekrardan kaynak işlemleri yapılmıştır. Balistik test EN 1522 standardı FB7 balistik koruma seviyesine göre gerçekleştirilmiştir. Test

sırasında 7.62x51mm P80 Nato AP mühimmat kullanılmıştır, mühimmat görüntüsü Şekil 6.22’de gösterilmektedir. Plakaların kaynak, ITAB ve ana malzeme bölgelerine olmak üzere toplamda 3 atış yapılmıştır. Test sonrası plakalardan numune alınarak numuneler metalografik hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur.



Şekil 6.22: 7.62x51mm P80 NATO AP Mühimmat Görüntüsü

Kaynak: (en.wikipedia.org)

7. SONUÇLAR

7.1 Tahribatsız Muayene Sonuçları

7.1.1 Sıvı penetrant ve görsel muayene sonuçları

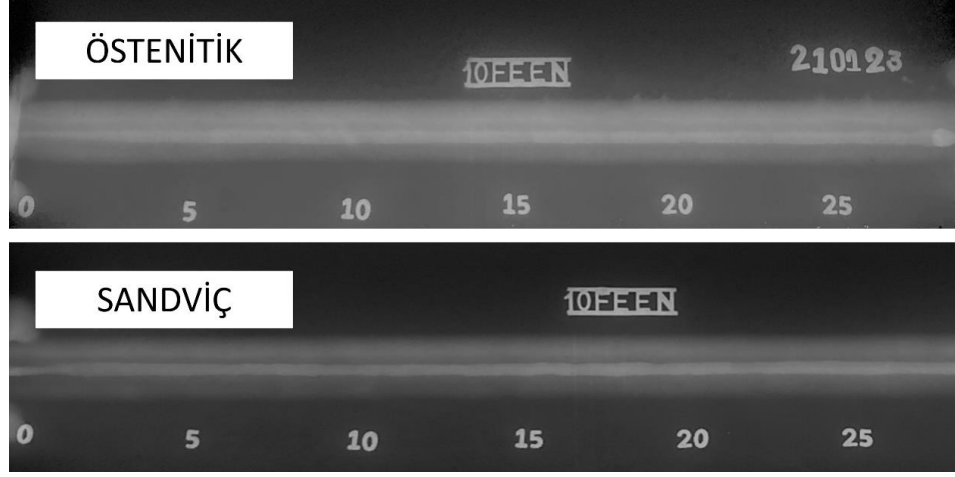
Kaynak yapılmış plakalar havada soğutulduktan sonra sıvı penetrant ve görsel muayene testlerine tabi tutulmuştur. Şekil 7.1-a'da östenitik kaynağa ait kaynaklı plakanın genel görüntüsü, Şekil 7.1-b,c'de ise sandviç kaynağa ait plakaların genel görüntüsü ve sıvı penetrant testi sonrası görüntüleri verilmiştir. Her iki kaynaklı plakada sıvı penetrant testi sonrası kaynak ve IEB'de herhangi bir yüzeysel kaynak hatası gözlemlenmemiştir.



Şekil 7.1: Kaynaklı Plakaların Genel Görüntüsü ve Sıvı Penetrant Test Görüntüleri;
a) Östenitik Kaynak Dikiş Görüntüsü, b) Sandviç Kaynak Dikiş Görüntüsü, c)
Sandviç Kaynak Sıvı Penetrant Test Görüntüsü

7.1.2 Radyografik muayene sonuçları

Şekil 7.2'de kaynaklı plakaların radyografik muayene film görüntüleri gösterilmektedir. Radyografik muayene sonrası numunelerde EN ISO 5817 standardı B kalite seviyesini aşan herhangi bir gözenek, çatlak, cüruf gibi hacimsel hatalara rastlanmamıştır.

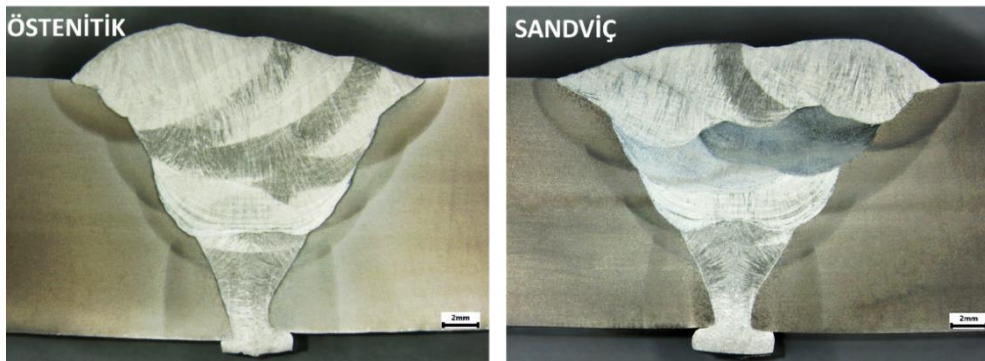


Şekil 7.2: Radyografik Test Sonuçları

Tüm tahribatsız muayene sonuçları değerlendirildiğinde her iki kaynağında robotik gaz metal ark kaynağı ile başarılı bir şekilde birleştirildiği görülmüştür.

7.2 Makroyapı İnceleme

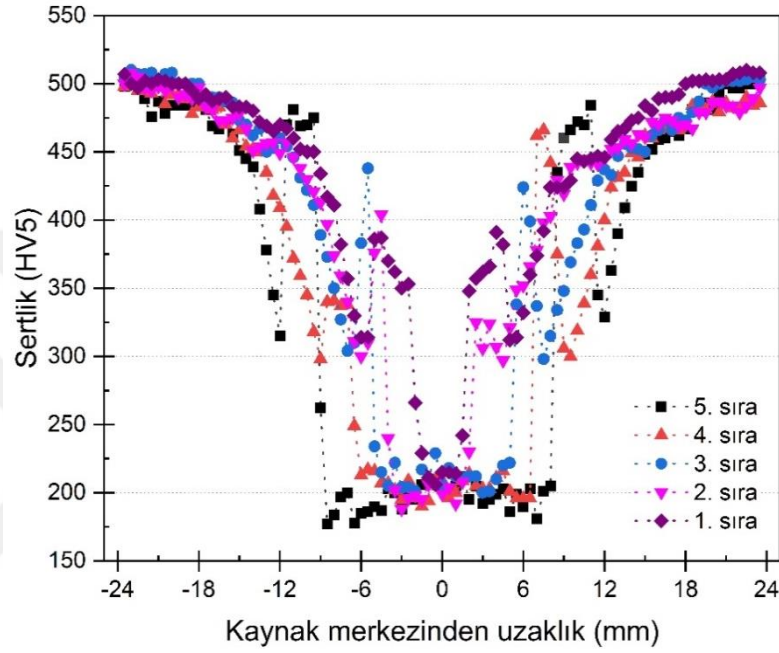
Makro numune görüntüleri standart (zımparalama, parlatma ve dağlama) metalografi hazırlama işlemlerine tabi tutularak elde edilmiştir. Numunelerin makro görüntüleri Şekil 7.3'te gösterilmektedir. EN ISO 5817 standardına göre değerlendirilen makro numunelerinde çatlak, gözenek, ergime noksanlığı hatalarına rastlanmamıştır. Kaynak işlemleri 4 sıra 7 paso olacak şekilde yapılmıştır. Kök pasodan kep pasoya doğru pasoların sıralanışı 1-1-2-3 şeklindedir. Makro görüntü üzerinden kaynak yükseltisinin genişliği Östenitik kaynak için 21,95 mm ölçülürken, Sandviç kaynak için 23,80 mm ölçülmüştür.



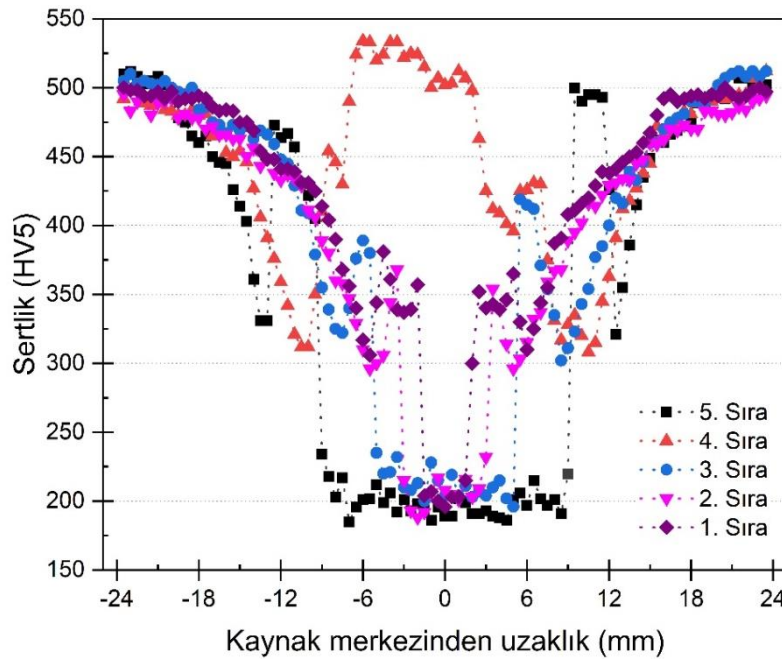
Şekil 7.3: Makroyapı İnceleme Görüntüleri

7.3 Sertlik Test Sonuçları

Östenitik ve Sandviç kaynaklarına ait sertlik test numuneleri üzerinden alınan mikrosertlik test sonuçları sırasıyla Şekil 7.4'te ve Şekil 7.5'te verilmektedir. Numuneni alt kısmından sırasıyla 2, 4,75, 7,5, 10,25, 13 mm ötelenerek toplamda 5 sıra 0,5 mm araklarla X eksenini doğrultusunda sertlik testi yapılarak ana metal, IEB ve kaynak metali detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 7.4: Östenitik Kaynak Sertlik Test Sonuçları



Şekil 7.5: Sandviç Kaynak Sertlik Test Sonuçları

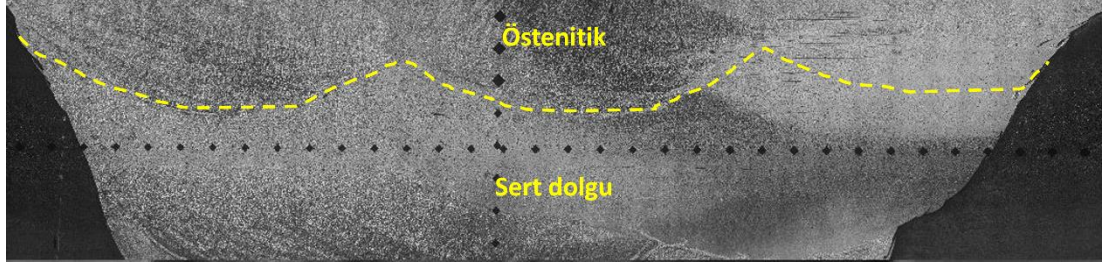
Yapılan kaynakların alt kısmından sırayla alınan sertliklerin ortalama değerleri Çizelge 7.1’de verilmiştir. Kök ve orta pasoların IEB’lerinde meydana gelen sertlik düşüşünün kaynak sırasında birden fazla termal çevrime maruz kalmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.

Her iki kaynakta Çizelge 7.1’de belirtildiği gibi 1.sırada kaynak bölgelerinin sertliğinin yüksek çıktığı görülmektedir. Kaynak ağız geometrinin ‘V’ olmasına bağlı olarak kaynak dolgu metali ile ana metalin kaynak havuzunda karışması sonucu kaynak metali sertlik değerlerinin yükseldiği düşünülmektedir.

Çizelge 7.1: Sertlik Test Sonuçları

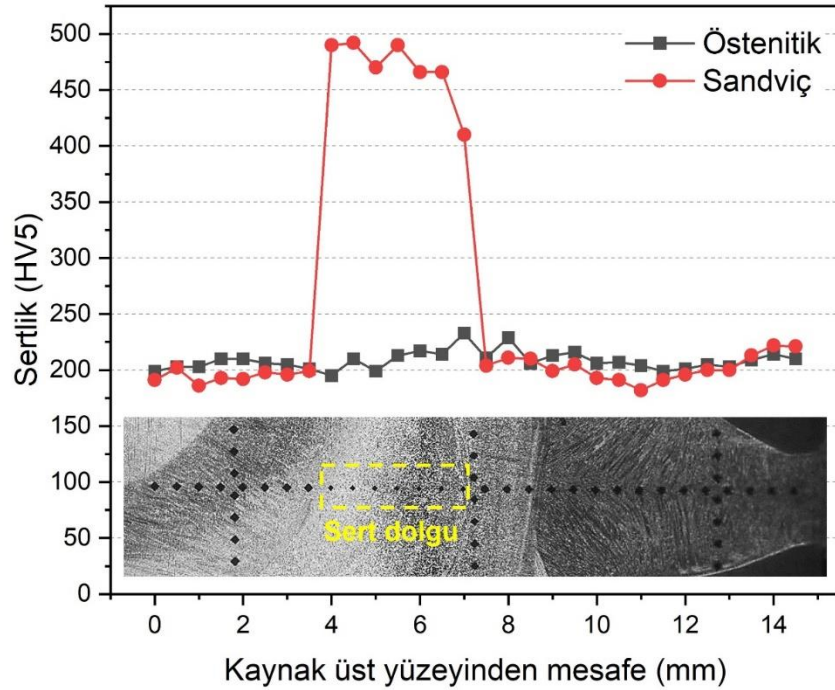
Sertlik Ort. (HV5)			
Kaynak Adı	Sertlik Sırası	Kaynak Bölgesi	IEB (CGHAZ – FGHAZ)
Östenitik	1. sıra	218	354
	2. sıra	202	329
	3. sıra	211	419
	4. sıra	205	409
	5. sıra	197	451
Sandviç	1. sıra	216	346
	2. sıra	206	351
	3. sıra	212	398
	4. sıra	483	423
	5. sıra	200	462

Sandviç kaynakta sert dolgu pasosunun sertlik değerleri şekil 7.5’te 4.sırada gösterilmektedir. şekil 7.6’da ise 4. Sıranın sertlik iz görüntüleri verilmiştir. Üretici beyanında sert dolgu telinin kaynak sonrası sertlik değerinin 600 HB olduğu belirtilmiştir. Ancak sertlik ölçümlerinde üretici sertlik beyanına ulaşılamamıştır. Bu durumun kaynak sırasında meydana gelen termal çevrimler ile birlikte östenitik kaynak metaliyle seyrelmesi sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Aynı tel ile Gürol ve arkadaşları [91] tarafından 2022 yılında yapılan tel ark eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen bimetal kesici ekipmanda sert dolgu bölgesinde sertlik değerini 600 ± 20 HV olarak raporlanmış olup üretici beyanına daha yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür.



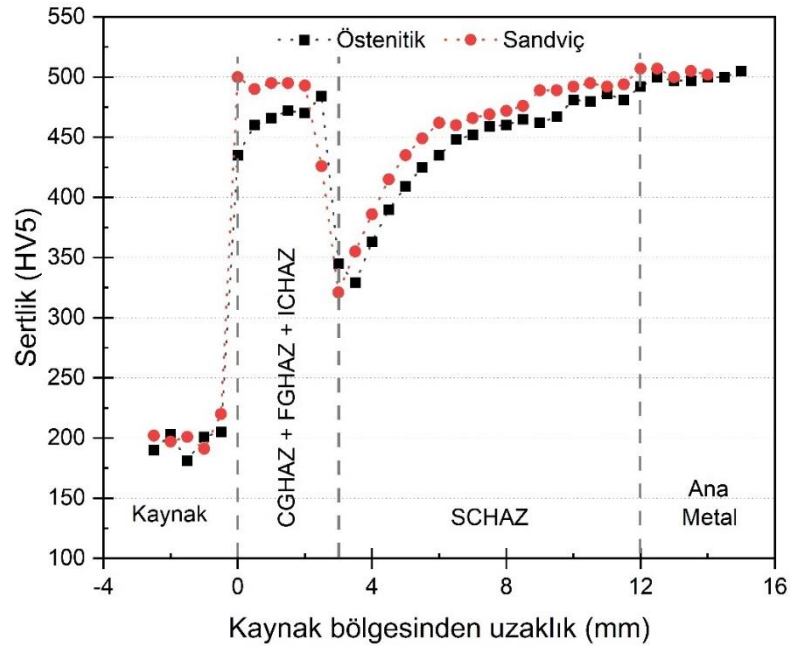
Şekil 7.6: Sandviç Kaynak 4. Sıra Sertlik Testi Sertlik İzleri

Östenitik ve Sandviç kaynakların, kaynak üst yüzey merkezi boyunca yapılan sertlik test sonuçları Şekil 7.7’de gösterilmektedir. Sandviç kaynakta sert dolgu pasosunda meydana gelen sertlik değişiminin östenitik pasolarla seyrelmesi sonucu olduğu düşünülmektedir. Her iki kaynata kök pasoda kaynak metali sertliğinin diğer pasoların sertlik değerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sertlik değişiminin kaynak ağız açısına bağlı olarak ana metalle karışıma uğraması sonucu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.7: Kaynak Üst Yüzey Merkezi Boyunca Yapılan Sertlik Test Sonuçları

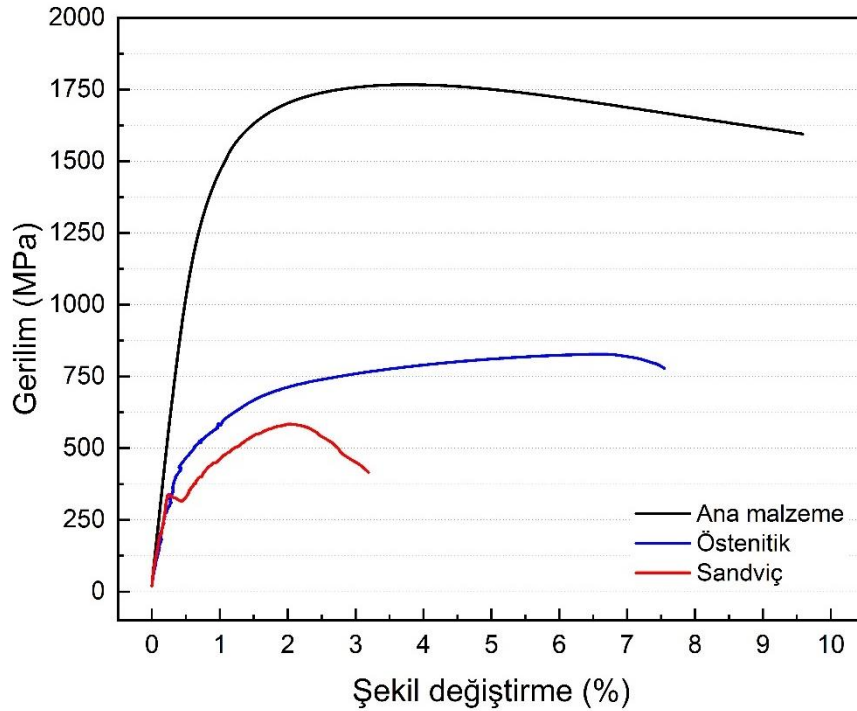
MIL-STD-1185 standardına göre kaynak ergime sınırından 15,9 mm uzaklığa kadar sertliğin ana malzeme sertliğinden düşük olmaması gerektiğini belirtmektedir. Kaynak bölgesinden ana metale doğru yapılan sertlik testi sonucu sertlik toparlanma grafiği Şekil 7.8’de gösterilmektedir. Sertlik değerinin 12 – 13 mm civarında ana malzemenin sertlik değerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 7.8: Kaynak Bölgesinden Ana Metala Doğru Sertlik Test Sonuçları

7.4 Çekme Testi Sonuçları ve Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

Kaynaklı plakalardan enine çekme test numuneleri çıkartılarak çekme test gerçekleştirilmiştir, gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 7.9'da test sonuçları ise Çizelge 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.9: Gerilme Şekil Değiştirme Eğrileri

Çizelge 7.2: Çekme Test Sonuçları

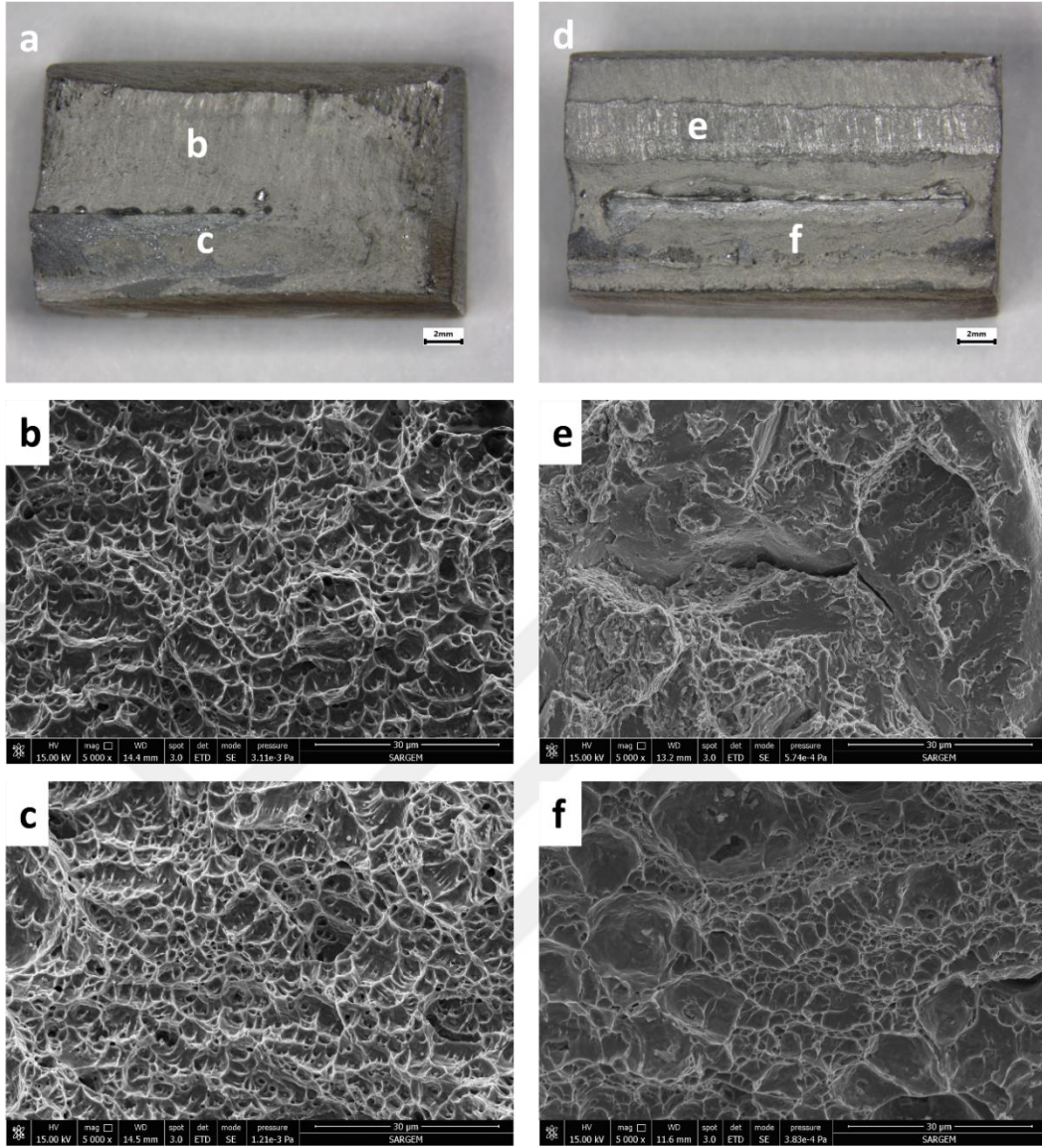
Çekme Test Numunesi	Akma Dayanımı MPa	Çekme Dayanımı MPa	Uzama $\%(l_0=30\text{mm})$
Östenitik	493	789	7,2
	502	828	6,9
	Ort. 497	Ort. 808	7,1
Sandviç	267	599	2,3
	323	584	3,0
	Ort. 295	Ort. 592	2,7

Kaynaklı plakalardan çıkartılan numunelere yapılan çekme testinden elde edilen sonuçlar ile ana malzemenin çekme dayanımı karşılaştırılmıştır. Östenitik ve sandviç kaynağa sırasıyla kaynağın çekme mukavemetinin ana malzemenin çekme mukavemetine oranının %46, %33 olduğu hesaplanmıştır.

Çekme test sonuçları karşılaştırıldığında sandviç kaynağa ara pasoda sert dolgu kaynak metali kullanımının, östenitik kaynağındaki çekme testi sonuçlarına göre akma dayanımının % 41, çekme dayanımını %27, uzamayı ise %62 düşürdüğü görülmüştür.

Çekme testi sonrası Şekil 7.10- a, b, c’de östenitik kaynağa ait çekme testinin kırık yüzey incelenmesi, Şekil 7.10- d, e, f’de ise sandviç kaynağa ait çekme testinin kırık yüzey incelenmeleri makro ve sem görüntüleri ile birlikte gösterilmektedir. Östenitik kaynağa ait çekme testi kırık yüzey incelemelerinde Şekil 7.10-a’da kırılma yüzeyinin mat oluşu ve Şekil 7.10-b, c’de sem görüntülerinde girintili çıkıntılı çukurcukların bulunduğu sünek tipte kırılma gerçekleştiği görülmektedir. Sandviç kaynağa ait çekme testi kırık yüzey incelemelerinde sert dolgu pasosunun kırılma yüzeyinin parlak oluşundan ve Şekil 7.10-e’de kırık yüzey sem görüntüsünde gevrek tipte kırılma gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 7.10-f’de karışık sünek ve gevrek tipte kırılma görülmektedir.

Sandviç kaynağa sert dolgu pasosunda meydana gelen gevrek tipte kırılmanın kaynak mukavemetinin östenitik kaynağın mukavemetine göre daha düşük çıkmasına yol açtığı düşünülmektedir.



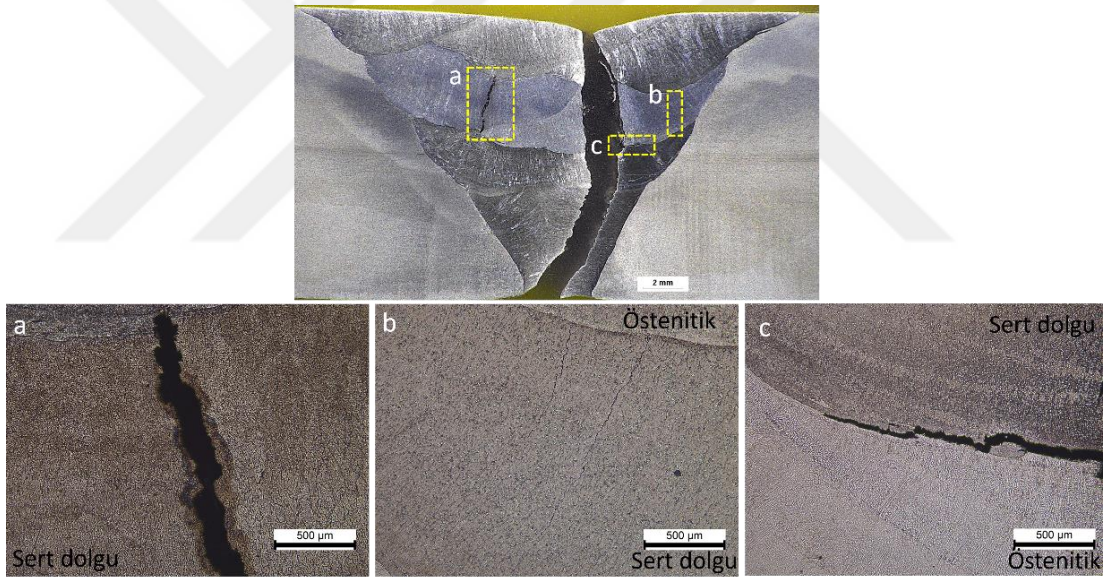
Şekil 7.10: Çekme Testi Kırık Yüzey İncelemeleri; a) Östenitik Kaynak Kırık Yüzey Makro Görüntüsü, d) Sandviç Kaynak Kırık Yüzey Makro Görüntüsü, b, c,f) Östenitik Dolgu Metali Bölgesi, e) Sert Dolgu Metali Bölgesi

Çekme test sonrası numunelerden kesit alınarak kırılma yönü incelemesi yapılmıştır. Şekil 7.11’de östenitik dolgu metali kullanılarak yapılan kaynağın çekme testi sonrası makroskobik inceleme ile görüntüsü verilmiştir. Kırılmanın birinci paso (kök) tarafından başladığı ve ergime çizgisine paralel olarak devam ettiği, kırılmanın daha sonrasında ise kaynak metaline göre ilerlediği görülmektedir.



Şekil 7.11: Östenitik Kaynak Çekme Testi Sonrası Kırılma Yönü İncelemesi

Şekil 7.12’de Sandviç yöntemi kullanılarak yapılan kaynağın çekme testi sonrası makroskobik inceleme ile görüntüsü verilmiştir. Kırılmanın birinci paso (kök) tarafından başladığı görülmektedir. Makroskobik inceleme sonrası sert dolgu ilave teli kullanılarak yapılan pasolarda çekme yükü altında çatlaklar meydana geldiği tespit edilmiştir. Meydana gelen bu çatlakların akma ve çekme dayanımının düşüşüne sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.12: Sandviç Kaynak Çekme Testi Sonrası Kırılma Yönü İncelemesi; a,b,c) Çatlaklar

Sert dolgu ilave telinin östenitik kaynak metalinin arasında kalması, östenitik ilave telinin yüksek enerji absorbe edebilme özelliği ile sert dolgu kaynak dolgu metali kullanılarak yapılan pasolardaki çatlağın ilerlememesine parçalanmadan kalmasına neden olmuştur.

7.4.1 Mikro çekme testi

Östenitik ve Sandviç kaynakların kaynak bölgesinden mikro çekme numuneleri çıkartılarak mikro çekme testi gerçekleştirilmiştir, test sonuçları Çizelge 7.3'te verilmiştir. Sandviç kaynaktan alınan mikro çekme numuneleri büyük oradan sert dolgu pasosunu kapsayacak şekilde çıkartılmıştır.

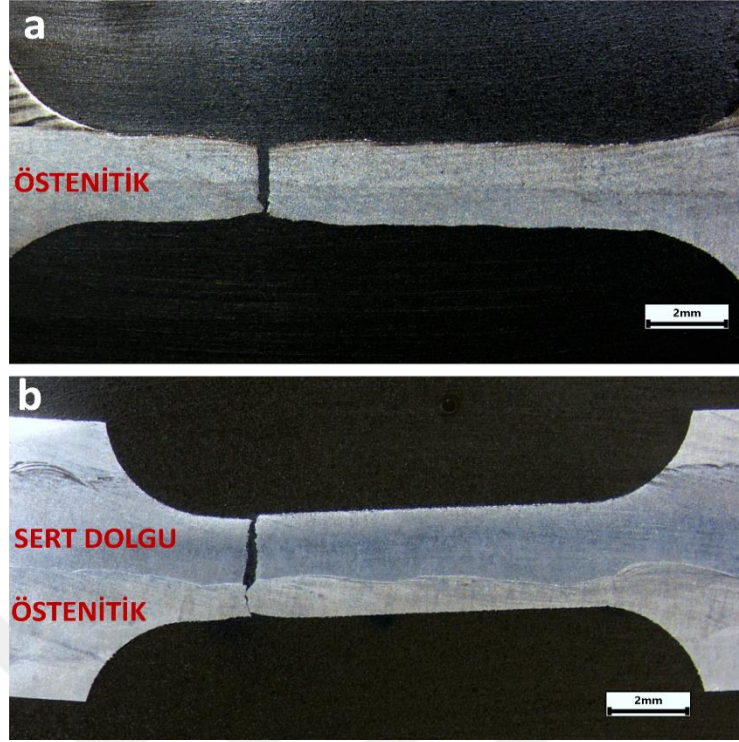
Östenitik ve sert dolgu metali kullanılarak yapılan kaynakların orta pasolarından çıkartılarak elde edilen numunelerin mikro çekme test sonuçları karşılaştırıldığında sert dolgu ilave teli kullanımının ortalama akma dayanımını %11,3 çekme dayanımını ise %23 yükselttiği görülmüştür.

Çizelge 7.3: Mikro Çekme Test Sonuçları

Numune	Akma Dayanımı MPa	Çekme Dayanımı MPa
Östenitik	420	622
	407	630
	Ort. 413,5	Ort. 626
Sandviç	463	754
	458	792
	Ort. 460,5	Ort. 773

Kaynak bölgelerinden elde edilen mikro çekme test sonuçları karşılaştırıldığında östenitik numunenin mikro çekme test sonuçlarının Gedik Kaynak katalog sonuçlarını doğruladığı görülmüştür.

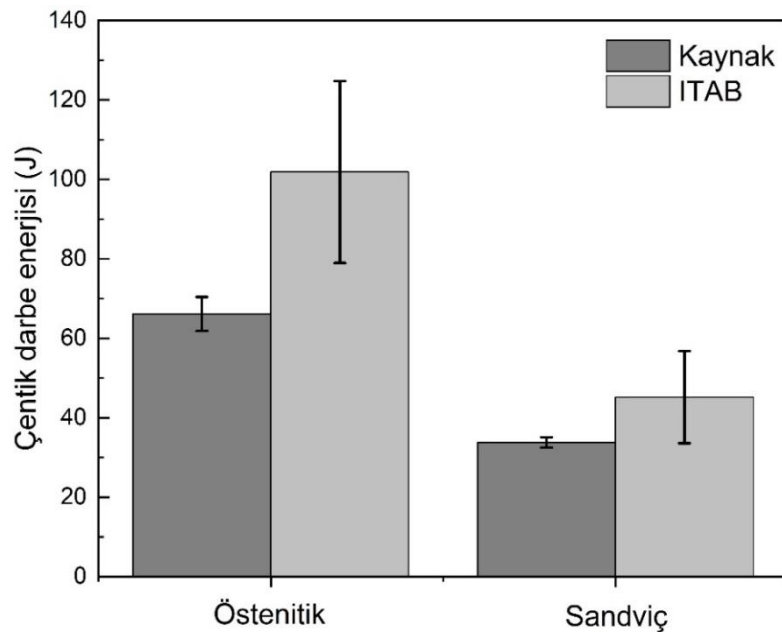
Mikro çekme testi sonrası numuneler bakalite alınarak makro inceleme yapılmıştır. Görüntüler Şekil 7.13'te verilmiştir. Şekil 7.13-a'da östenitik bölgeden elde edilen mikro çekme numunesi incelendiğinde numunenin büzülerek sünek kırıldığı görülmektedir. Şekil 7.13-b'de sandviç kaynaktan elde edilen mikro çekme numunesi makro görüntüsü incelendiğinde, mikro çekme numunesi gövdesinde östenitik ve sert dolgu pasosunun birlikte olduğu görülmektedir. Östenitik pasonun olduğu alt kısımda büzülerek kırıldığı sert dolgu pasosunun ise büzülmeden gevrek kırıldığı görülmektedir.



Şekil 7.13: Mikro Çekme Testi Sonrası Kırılma Yönü İncelenmemesi

7.5 Çentik Darbe Testi Sonuçları ve Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

Çentik darbe testi için kaynak edilmiş plakadan, kaynak bölgesinden ve IEB bölgesinden olmak üzere üç adet çentik darbe numuneleri çıkartılarak -40 °C’de çentik darbe testi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak üç testin ortalaması baz alınmıştır. Test sonuçları Şekil 7.14’te ve Çizelge 7.4’de gösterilmektedir.



Şekil 7.14: Çentik Darbe Test Sonuç Grafiği

Çizelge 7.4: Çentik Darbe Test Sonuçları

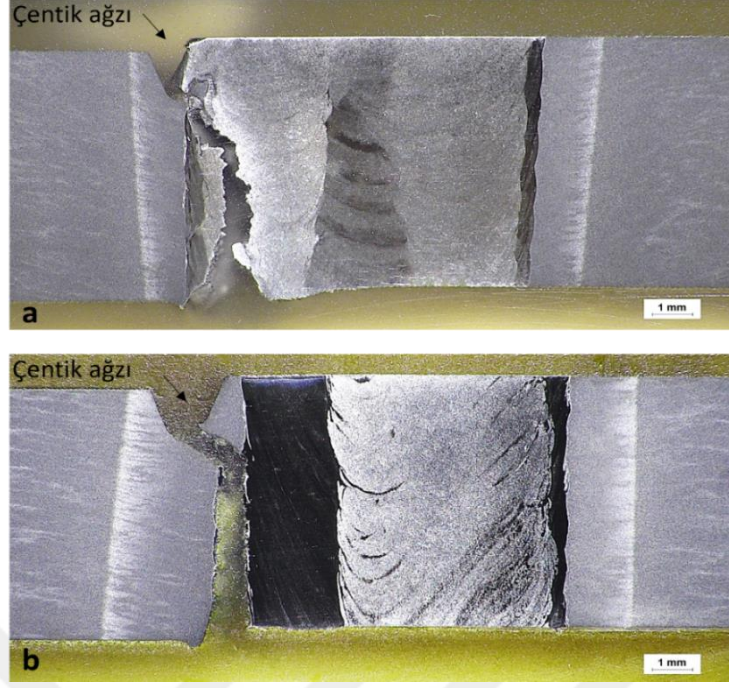
Çentik Darbe Test Sonuçları (ISO-V / -40°C (J)) Ort.		
Çentik Darbe Numunesi	Kaynak Bölgesi	IEB
Östenitik	66	102
Sandviç	34	53

Östenitik kaynağa ait çentik darbe enerji değeri kaynak bölgesinde 66 J, IEB’de ise 102 J elde edilmiştir. Sandviç kaynağa ait çentik darbe enerji değeri ise kaynak bölgesinde 34 J, IEB’de 53 J elde edilmiştir. Sandviç kaynak yönteminde kullanılan sert dolgu metalinin yüksek sertlik değerine sahip olmasıyla beraber çentik darbe enerji değerinde düşüş meydana getirdiği görülmüştür.

Çentik darbe testi sonrası IEB’lerine ait çentik darbe test numunelerinde meydana gelen darbe enerjisindeki artışın sebebini anlamak amacıyla numuneler çentik yönüne dik bakalite alınarak ve frezelenerek metalografik hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Makro görüntüleri Şekil 7.15’te gösterilmektedir.

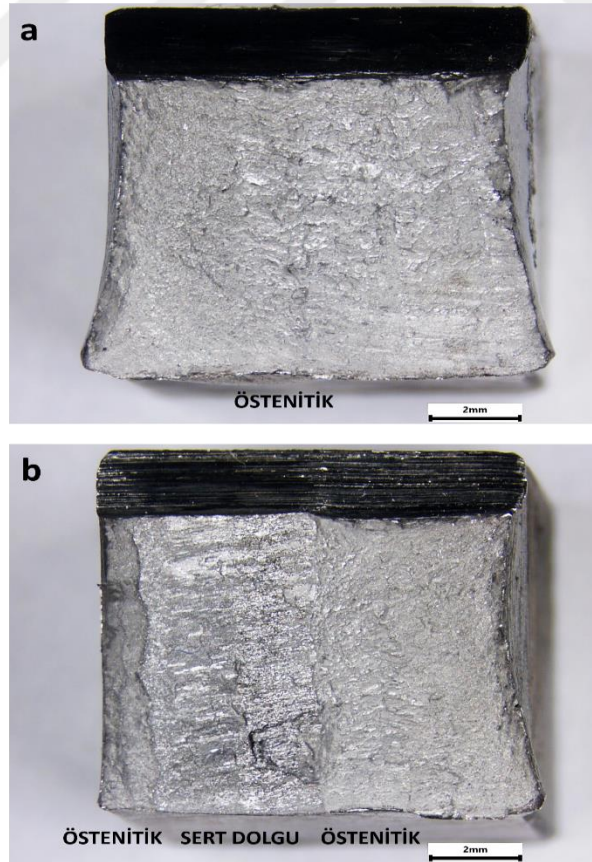
Çentik darbe testi sonrası östenitik kaynakta IEB’nin çentik darbe enerjisinin ortalama 102 J olduğu görülmüştür. Şekil 7.15-a’da çentik darbe yükü altında meydana gelen çatlakın çentik ağzından kaynağa doğru ilerlediği görülmektedir bu ilerlemenin çentik darbe enerjisinde artışına sebep olduğu düşünülmektedir.

Çentik darbe testi sonrası sandviç kaynakta IEB’nin çentik darbe enerjisinin ortalama 53 J olduğu görülmüştür. Şekil 7.15-b’de çentik darbe yükü altında meydana gelen çatlakın çentik ağzından ergime sınırı boyunca ilerlediği görülmektedir. Bu durumun IEB’nin çentik darbe enerjisinin, östenitik kaynağın IEB’si çentik darbe enerjisine göre 49 J daha düşük olmasına sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.15: IEB Çentik Darbe Test Numuneleri Kesit Görüntüsü

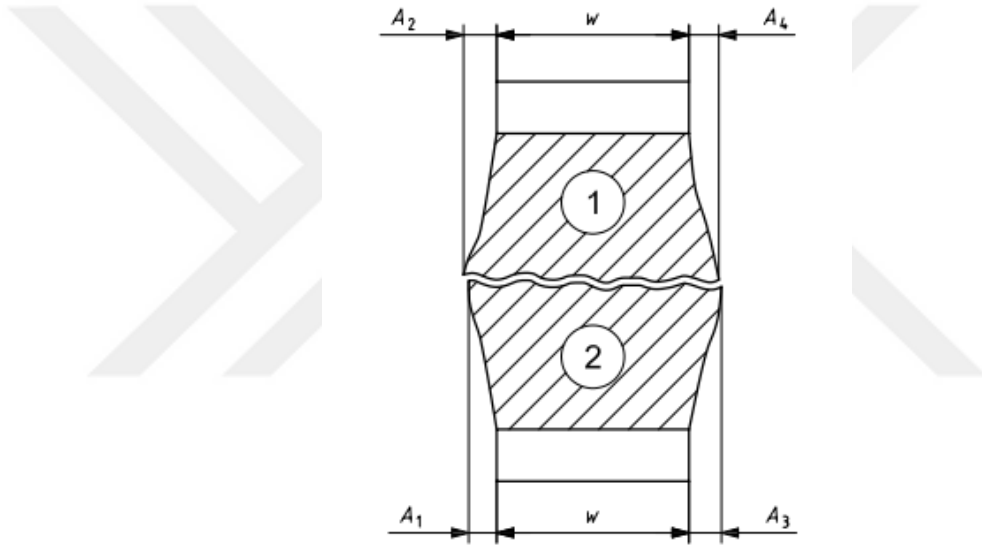
Östenitik ve sandviç kaynakların kaynak bölgelerine ait çentik darbe testi sonucu oluşan kırılma yüzeyleri Şekil 7.16’da gösterilmektedir.



Şekil 7.16: Kaynak Bölgesi Çentik Darbe Testi Kırılma Yüzeyleri; a) Östenitik Kaynak, b) Sandviç Kaynak

Şekil 7.16-a’da Östenitik kaynağın kaynak bölgesine ait çentik darbe numunesi kırık yüzey incelemesi yapıldığında sünek tipte kırılma gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 7.16-b’de Sandviç kaynağın kaynak bölgesine ait çentik darbe numunesi kırık yüzey incelemesi yapıldığında Sandviç kaynakta östenitik dolgu metali bulunan bölgelerin sünek kırılma gösterdiği sert dolgu metali bulunan bölgenin ise gevrek kırılma gösterdiği görülmüştür. Çalışmada elde edilen çentik darbe değerleri ile kırılma yüzey görüntüleri uyduğu görülmektedir.

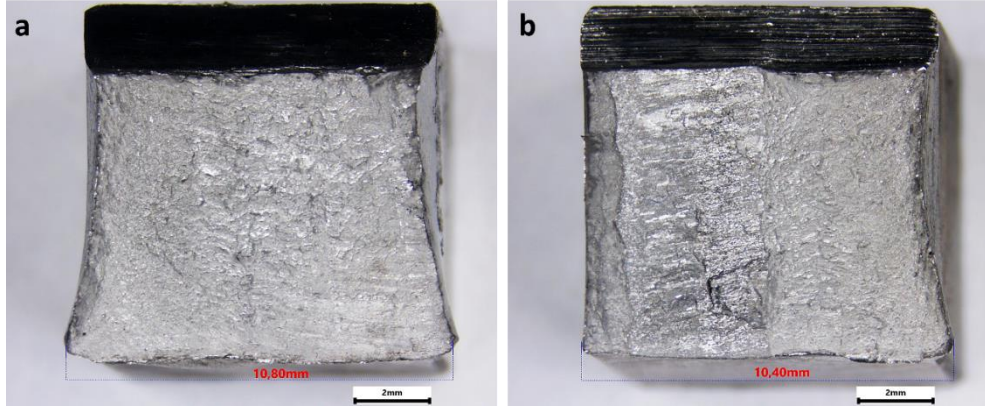
Çentik darbe test numunelerinde plastik deformasyona bağlı olarak numunelerde yanal genişleme meydana geldiği görülmüştür. Yanal genişleme Şekil 7.17’de gösterildiği gibi ölçülmüştür.



Şekil 7.17: Çentik Darbe Kırılma Yüzeyinde Yanal Genleşme Ölçümünün Gösterimi

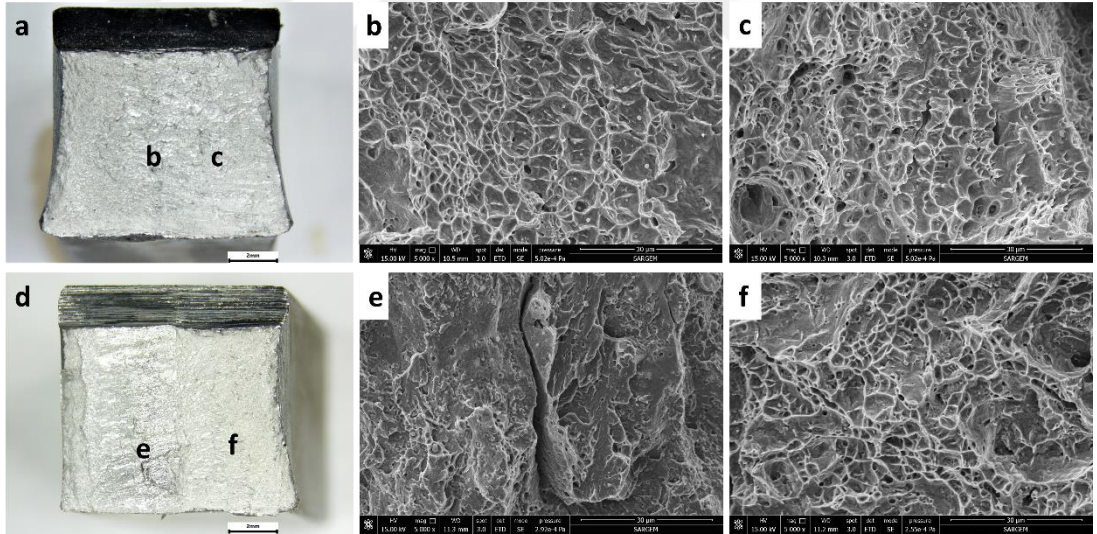
Kaynak: (ISO 148-1:2009)

Standartlara göre çentik darbe numunesinin genişliği 10 mm olarak hazırlanmıştır. Şekil 7.18-a’da Östenitik kaynak çentik darbe testi sonrası kırılma yüzeyi incelemesinde yanal genişleme 0,80 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 7.18-b’de sandviç kaynağa ait kaynak çentik darbe testi sonrası kırılma yüzeyi incelemesinde yanal genişleme 0,40 mm olarak ölçülmüştür. Sandviç kaynak yönteminde sert dolgu ilave telinin kullanımının yanal genişlemeyi azalttığı gözlemlenmiştir.



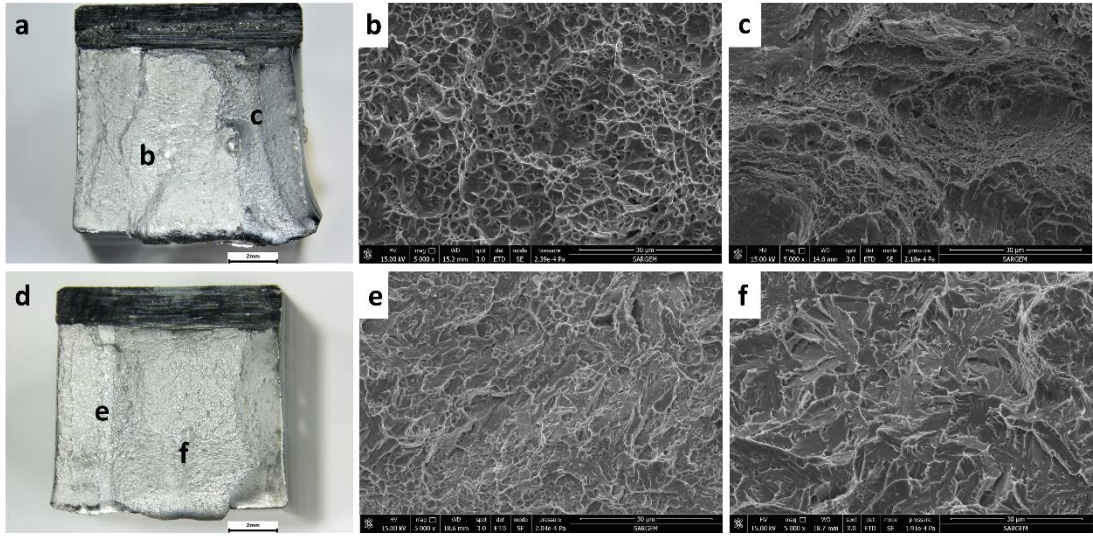
Şekil 7.18: Çentik Darbe Numunelerinde Yanal Genleşme Ölçümü

Kaynaklı bağlantıların çentik darbe testi sonrası kırılma yüzey incelemeleri taramalı elektron mikroskopu (SEM) yardımıyla yapılmıştır. Şekil 7.19’de kaynak bölgesi, Şekil 7.20’de ise IEB’ye ait çentik darbe numunelerinin kırık yüzey incelemeleri gösterilmektedir. Şekil 7.19 – b, c, f’de östenitik dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak bölgelerinin kırık yüzeylerin sünek tipte kırılma gerçekleştirerek kırıldığı görülmektedir. Şekil 7.19-e’de ise sert dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak bölgesinin kırık yüzeyinin daha gevrek tipte kırılma gerçekleştirdiği görülmektedir.



Şekil 7.19: Kaynak Bölgesine Ait Çentik Darbe Numunelerinin Kırık Yüzey İncelemeleri; a) Östenitik Kaynak Çentik Darbe Numunesi, b-c-f) Östenitik İlave Tel, D) Sandviç Kaynak Çentik Darbe Numunesi, e) Sert Dolgu İlave Tel

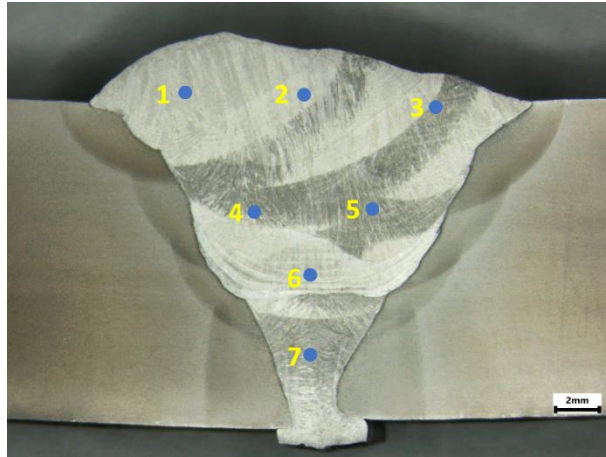
IEB’lere ait çentik darbe test numuneleri incelemelerinde Şekil 7.20– b, c’de kırık yüzeylerin sünek tipte kırılma gerçekleştirdiği görülmektedir. Şekil 7.20-e, f’de kırık yüzeyinin gevrek tipte kırılma gerçekleştirdiği görülmektedir.



Şekil 7.20: IEB'ye Ait Çentik Darbe Numunelerinin Kırık Yüzey İncelemeleri;
a)Östenitik Kaynak Çentik Darbe Numunesi, d) Sandviç Kaynak Çentik Darbe Numunesi

7.6 Kimyasal Analiz Test Sonuçları

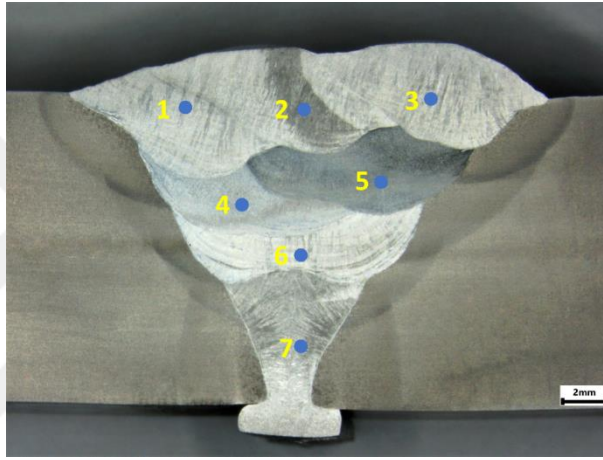
Makro numunesi üzerinde kaynak pasoları arasındaki kimyasal analiz değişimlerinin incelenmesi için XRF cihazı yardımı ile Şekil 7.21'de ve Şekil 7.22'de gösterilen bölgelerden noktasal kimyasal analiz test yapılmıştır. Test sonuçları Östenitik kaynak için Çizelge 7.5'te, Sandviç kaynak için ise Çizelge 7.6'da gösterilmektedir. Tablolarda noktasal analiz sonuçlarına ilaveten kaynak dolgu metallerinin kimyasal analiz test sonuçları da gösterilmektedir.



Şekil 7.21: Östenitik Kaynak Noktasal Kimyasal Analiz Bölgeleri

Çizelge 7.5: Östenitik Kaynak Noktasal Kimyasal Analiz Test Sonuçları

Bölge adı	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Fe
Östenitik Paslanmaz	17,82	7,92	0,02	5,54	0,61	66,82
1	15,45	7,57	0,06	4,79	0,57	71,57
2	16,07	8,11	0,05	5,00	0,60	70,17
3	15,00	7,58	0,06	4,70	0,56	72,10
4	15,90	7,87	0,05	4,94	0,56	70,68
5	15,28	7,69	0,06	4,77	0,55	71,66
6	13,75	6,89	0,09	4,29	0,54	74,44
7	15,18	7,67	0,06	4,73	0,57	71,79



Şekil 7.22: Sandviç Kaynak Noktasal Kimyasal Analiz Bölgeleri

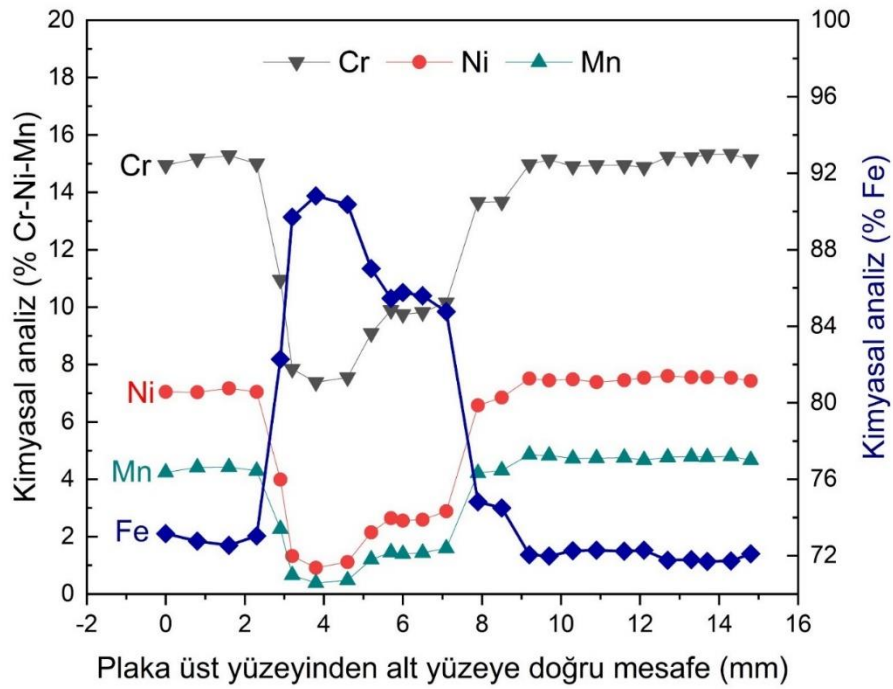
Çizelge 7.6: Östenitik Kaynak Noktasal Kimyasal Analiz Test Sonuçları

Bölge adı	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Fe
Östenitik Paslanmaz	17,82	7,92	0,02	5,54	0,61	66,82
Sert Dolgu	8,53	0,18	0,00	0,60	0,54	88,93
1	12,75	5,79	0,09	3,59	0,55	77,24
2	14,91	6,94	0,05	4,30	0,56	73,26
3	14,48	6,54	0,06	4,07	0,57	74,28
4	9,68	2,48	0,05	1,29	0,51	86,00
5	6,43	0,78	0,08	0,33	0,43	91,9
6	13,66	6,79	0,08	4,31	0,56	74,59
7	14,91	7,40	0,07	4,79	0,56	72,28

Şekil 7.21 ve Şekil 7.22’de belirtilen farklı bölgelere yapılan noktasal kimyasal analiz test sonuçlarının farklı olduğu görülmektedir. Bu durumun kaynak işlemi

sırasında kaynak havuzunda ana metalle kaynak metallerinin karışması sonucu meydana geldiği düşünülmektedir.

Sandviç kaynak makro numunesi üzerinden kaynak üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru XRF cihazı ile kimyasala analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 7.23'te gösterilmektedir. Ara pasoda sert dolgu kullanımı sonucu östenitik ve sert dolgu pasolarında meydana gelen seyrelme ile kimyasal analiz test sonuçlarında meydana gelen değişim şekilde görülmektedir.

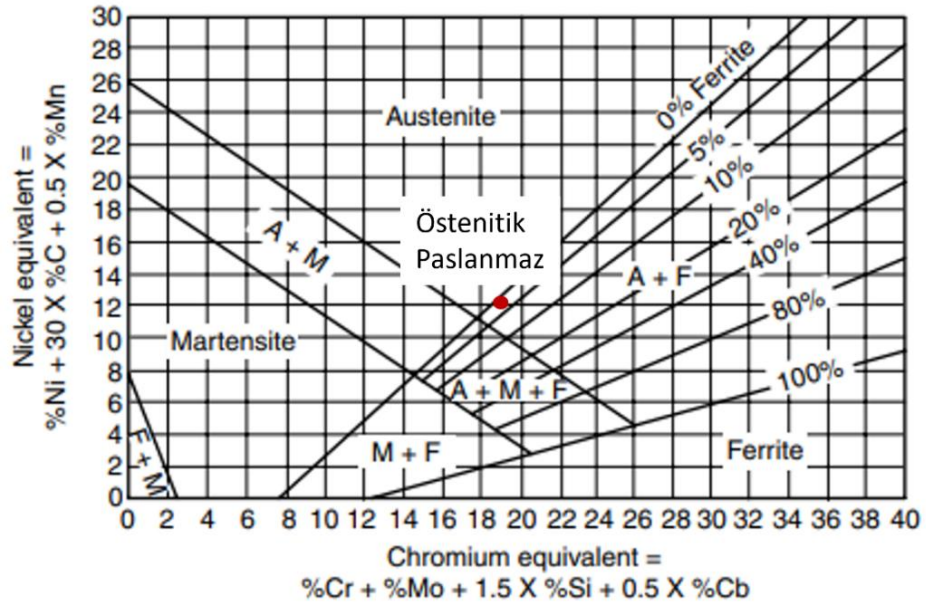


Şekil 7.23: Sandviç Kaynak Kimyasal Analiz Test Sonuç Grafiği

7.7 Ferrit Ölçüm Sonuçları

Paslanmaz çeliklerin mikroyapısında östenitik ve ferritik yapı bir arada bulunabilmektedir. Yapıda bulunan ferrit miktarı kaynaklı bağlantı için önemlidir çünkü ferrit miktarı kaynağın mukavemet, tokluk ve korozyon direnci gibi özelliklere etki etmektedir [93].

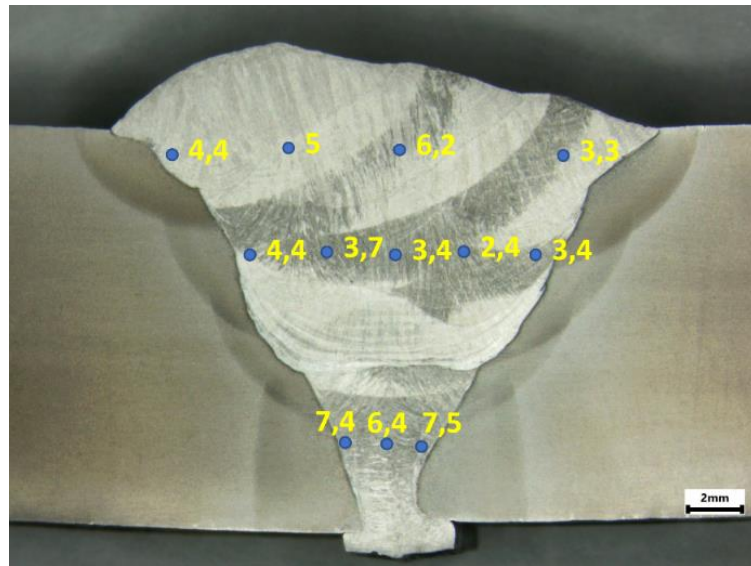
Östenitik paslanmaz çeliklerin Ni eşdeğeri (Ni_{eq}) ve Cr eşdeğerine (Cr_{eq}) bakılarak mikroyapısını tahmin etmek mümkündür [94]. Kaynak öncesi östenitik paslanmaz kaynak dolgu metaline yapılan kimyasal analiz sonuçlarına göre Ni_{eq} ve Cr_{eq} değerleri Şekil 7.24'te belirtilen Schaeffler diyagramına göre hesaplanmıştır. Diyagram üzerinden işaretlenmiştir. Ni_{es} değeri 19,2, Cr_{es} değeri 12,3 hesaplanmıştır.



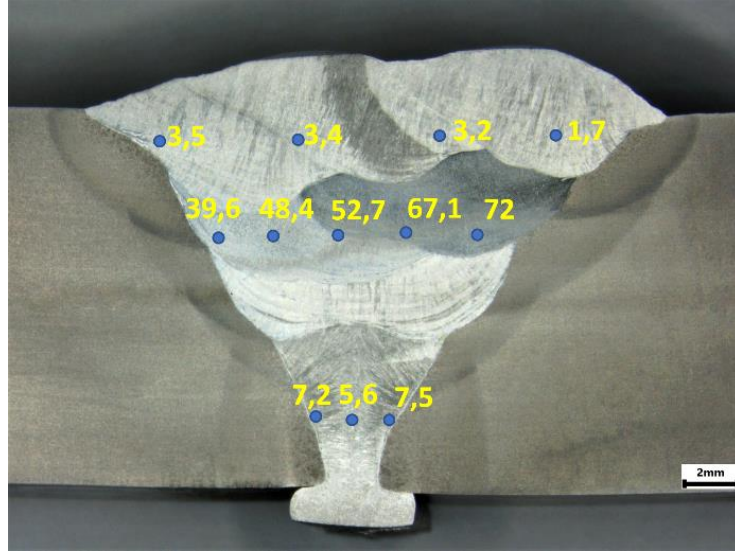
Şekil 7.24: Schaeffler Diyagramı

Kaynak: (Kou, 2003)

Makro numuneleri üzerinden ferrit ölçüm cihazı ile % ferrit değerleri ölçülerek kaynak bölgesinde oluşan ferrit miktarındaki değişim incelenmiştir. Şekil 7.25'te östenitik kaynağa ait % FN, Şekil 7.26'da ise Sandviç kaynağa ait % FN değerleri gösterilmektedir.



Şekil 7.25: Östenitik Kaynak %FN Test Sonuçları



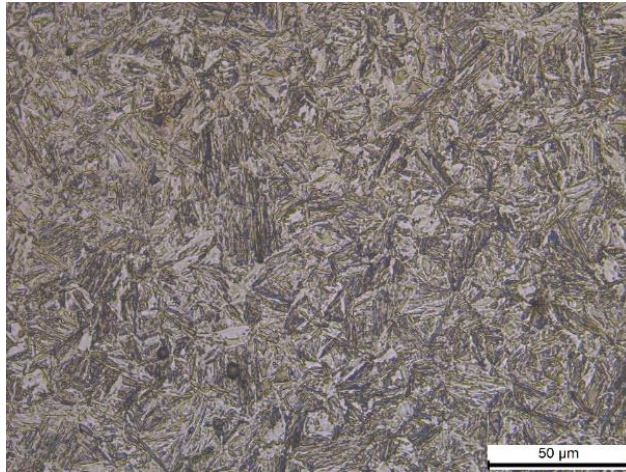
Şekil 7.26: Sandviç Kaynak %FN Test Sonuçları

Kaynak sırasında uygulanan çoklu paso işlemleri, her bir pasonun diğer kaynak pasosuna yapmış olduğu ısıl işlemler ile kaynağın soğuma süresini yavaşlatması sonucu ferrit miktarını etkilemektedir [96].

Numunelerin kök kısımlarında % ferrit miktarlarında V kaynak ağız geometrisine bağlı olarak kaynak havuzunda ana metal ve dolgu metalinin karışması ve seyrelmesi sonucu diğer bölgelere göre yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

7.8 Mikroyapı İncelemeleri

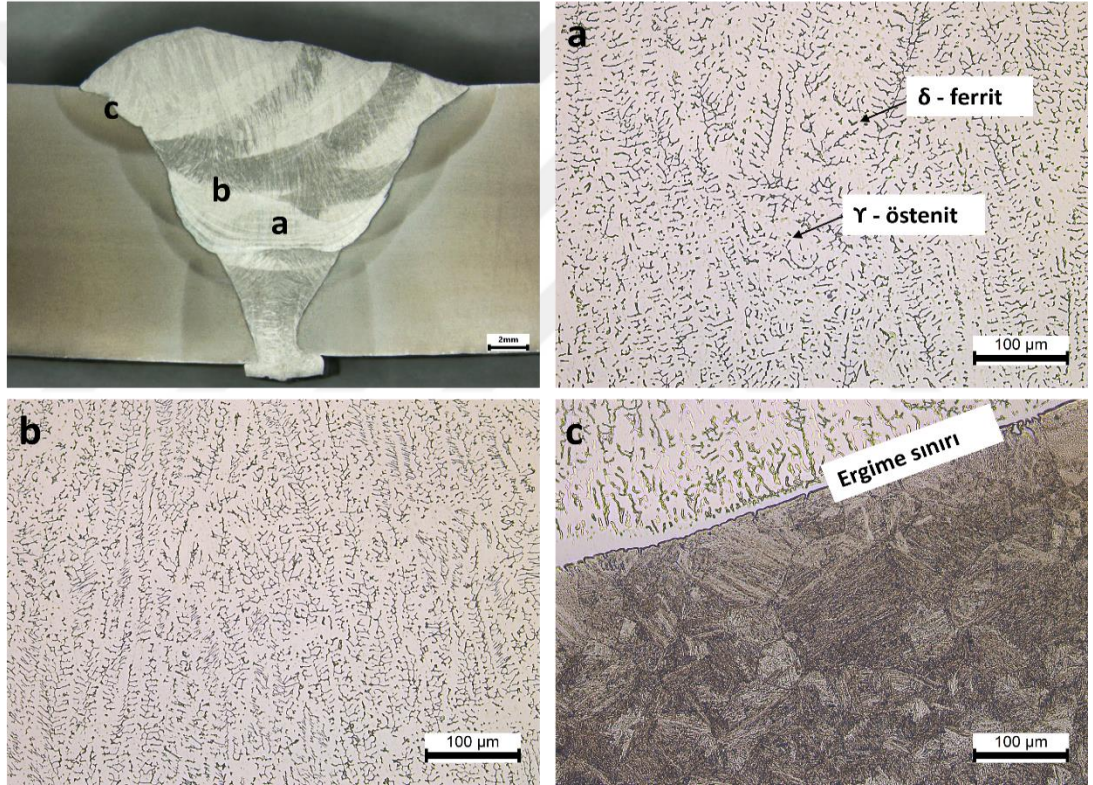
Çalışmada kullanılan Protection 500 kalite zırh çeliğinin Şekil 7.27’de 500x büyütme ile mikroyapısı gösterilmektedir. Mikroyapı genel itibariyle martenzitik yapıdan oluşmaktadır. Yapının martenzit olması bu tür çeliklere yüksek mukavemet özellikleri sağlamaktadır [97].



Şekil 7.27: Zırh Çeliği Mikroyapısı

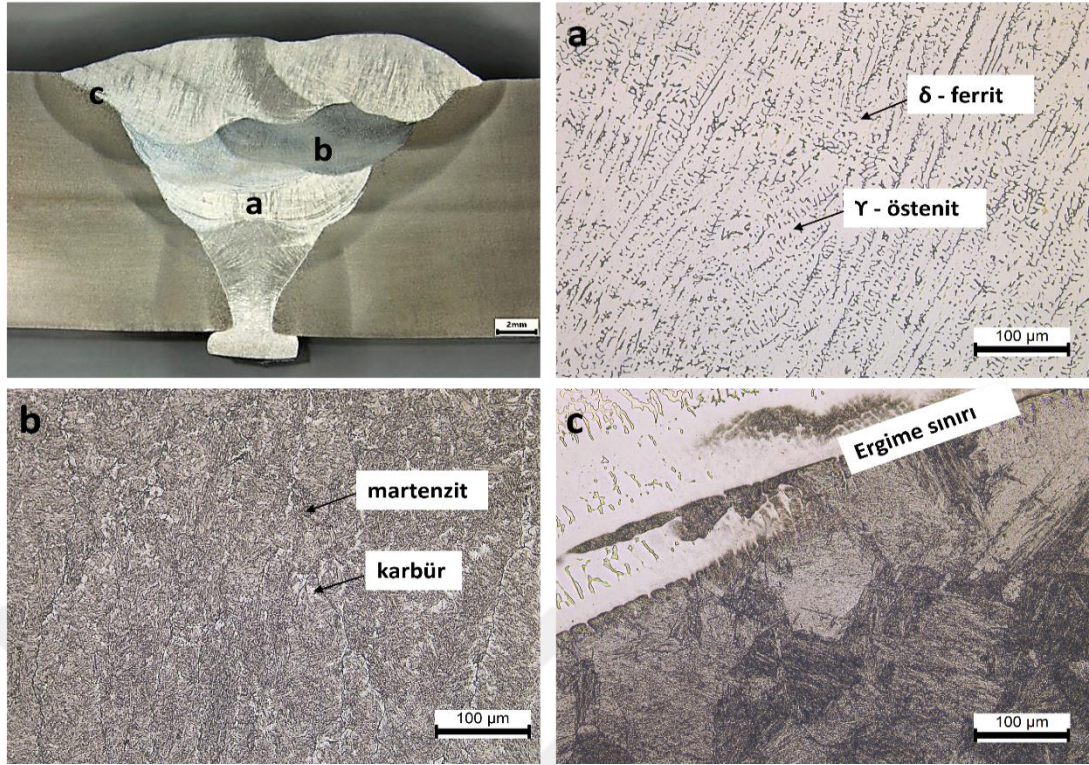
Östenitik paslanmaz çeliklerde farklı kimyasal bileşime ve soğuma hızlarına bağlı olarak farklı oran ve yapılarda δ ferrit fazının oluştuğu bilinmektedir. Bu bağlamda östenitik kaynak teli ile gerçekleştirilen kaynak işlemi sonrası mikroyapıda östenitik yapı içerisinde (açık renkli alanlar) δ ferrit yapı (koyu renkli alanlar) tespit edilmiştir [98].

Şekil 7.28’de Östenitik kaynağa ait mikroyapılar 20x büyütme ile gösterilmektedir. Şekil 7.28-a,b’de sırasıyla östenitik dolgu metali kullanılarak yapılan 2. paso ve 4. pasonun mikroyapı görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 7.28-c’de ise kaynak metali ve IEB geçişi gösterilmektedir. IEB’nin ergime sınırına yakın bölgesinde kaba taneli martenzitik yapının olduğu görülmektedir.



Şekil 7.28: Östenitik Kaynağın Mikroyapı Görüntüleri; a) 2. Paso Mikroyapısı, b) 4. Paso Mikroyapısı, c) Ergime Sınırı Mikroyapısı

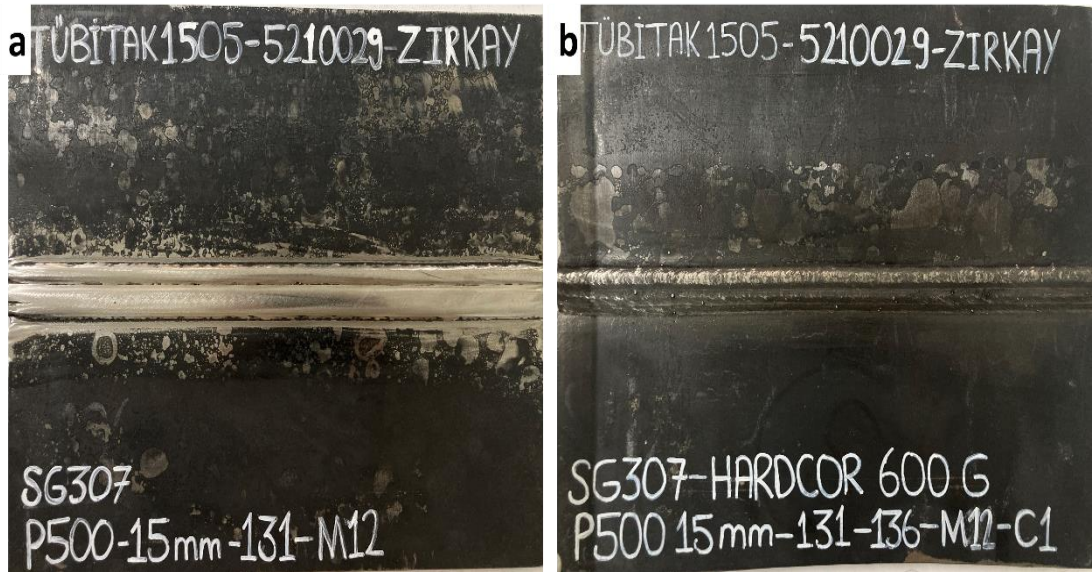
Şekil 7.29’da Sandviç kaynağa ait mikroyapılar 20x büyütme ile gösterilmektedir. Şekil 7.29-a’da östenitik dolgu metali ile yapılan kaynak pasosunun mikroyapısı gösterilmektedir. Şekil 7.29-b’de sert dolgu metali ile yapılan kaynak pasosunun mikroyapı incelemelerinde tane sınırları boyunca krom karbürler bulunan martenzitik yapı tespit edilmiştir. Şekil 7.29-c’de ise kaynak metali ve ITAB geçişi gösterilmektedir. IEB’nin ergime sınırına yakın bölgesinde kaba taneli martenzitik yapının olduğu görülmektedir.



Şekil 7.29: Sandviç Kaynağın Mikroyapı Görüntüleri; a) 2. Paso Mikroyapısı (Östenitik Kaynak Metali), b) 4. Paso Mikroyapısı (Sert Dolgu Kaynak Metali), c)Ergime Sınırı Mikroyapısı

7.9 Balistik Test Sonuçları

Balistik test işlemleri için kaynak işlemleri aynı koşullarda tekrar yapılmıştır. Kaynaklı plakaların görüntüleri Şekil 7.30’da gösterilmektedir.



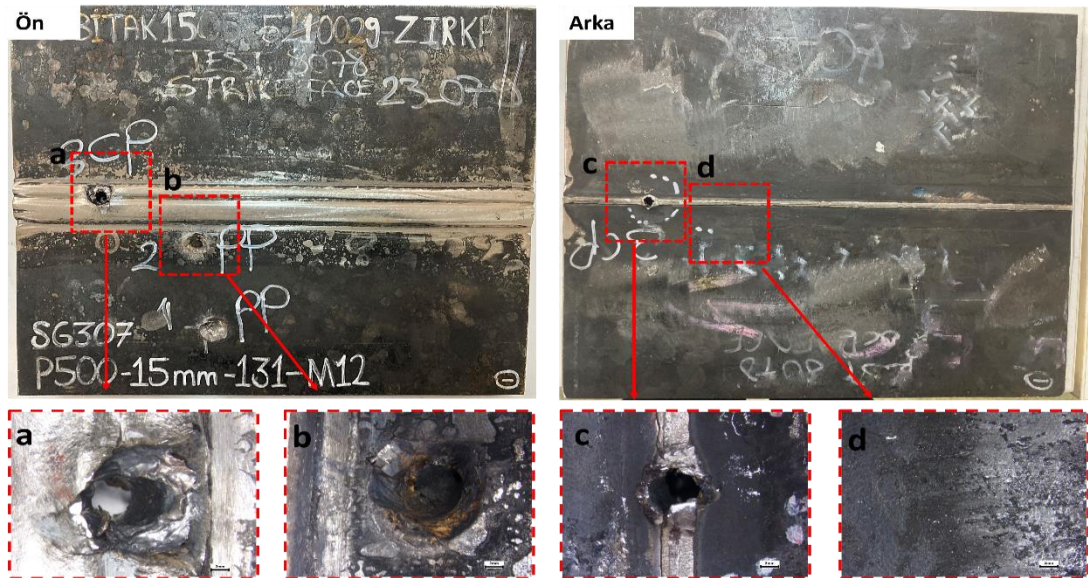
Şekil 7.30: Balistik Test Öncesi Kaynak Plakalarının Genel Görüntüsü; a) Östenitik Kaynak, b) Sandviç Kaynak

Balistik test EN 1522 standardı FB7 koruma seviyesine göre yapılmıştır. Her bir plaka için 3 atış (kaynak bölgesi, ITAB ve ana malzeme) yapılmıştır. Test sırasında mühimmat olarak 7.62x51mm P80 Nato AP mermi, çapma açısı 0° olacak şekilde ayarlanmıştır. Test yapılan bölgelerdeki delinme değerlendirmeleri bölgesel deformasyon (PP) ve komple deformasyon (CP) oluşumuna bağlı olarak yorumlanmıştır. Test sırasındaki atış hızları ve delinme değerlendirmeleri Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.7: Balistik Test Atış Hızları ve Delinme Değerlendirmeleri

	Atış Hızı (m/s)		
	Kaynak Bölgesi	IEB	Zırh Çeliği
Östenitik	824,8 (CP)	834,1 (PP)	829,9 (PP)
Sandviç	816,7 (PP)	822,6 (PP)	836,6 (PP)

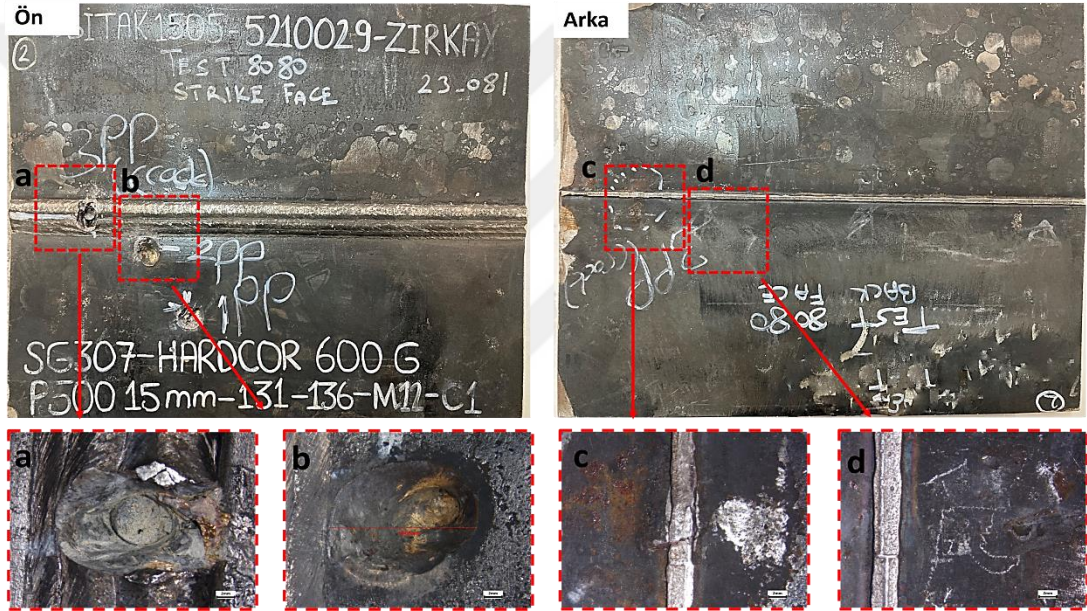
Balistik test sonrası östenik kaynağın ön ve arka yüzeylerinin görüntüsü Şekil 7.31’de gösterilmektedir. Kaynak bölgesine yapılan atış sonrası merminin kaynak gölgesinde komple deformasyon oluşturarak yaprak oluşumu tipi hasar meydana getirdiği görülmektedir. Oluşan hasar kaynaklı plakanın ön ve arka yüzeyinde sırasıyla Şekil 7.31-a,c’de gösterilmektedir. IEB’ye yapılan atış sonrası merminin IEB’de bölgesel deformasyon meydana getirmiştir, oluşan hasar kaynaklı plakanın ön ve arka yüzeyinde sırasıyla Şekil 7.31-b,d’de gösterilmektedir.



Şekil 7.31: Balistik Test Sonrası Östenitik Kaynak Plakasını Ön Ve Arka Yüzeylerinin Görüntüsü; a) Kaynak Bölgesi Ön Yüzey Görüntüsü, b) IEB’nin Ön Yüzey Görüntüsü, c) Kaynak Bölgesi Arka Yüzey Görüntüsü, d) IEB’nin Arka Yüzey Görüntüsü

Balistik test sonrası Sandviç kaynağın ön ve arka yüzeylerinin görüntüsü Şekil 7.32’de gösterilmektedir. Kaynak bölgesine yapılan atış sonrası merminin bölgesel deformasyon meydana getirdiği ve merminin ise kaynak bölgesinde kaldığı görülmüştür. Oluşan hasar kaynaklı plakanın ön ve arka yüzeyinde sırasıyla Şekil 7.32-a,c’de gösterilmektedir. IEB’ye yapılan atış sonrası merminin IEB’de bölgesel deformasyon meydana getirmiştir, oluşan hasar kaynaklı plakanın ön ve arka yüzeyinde sırasıyla Şekil 7.32-b,d’de gösterilmektedir.

Çalışmada kullanılan Protection 500 kalite zırh çeliklerine yapılan balistik test sonucunda merminin zırh çeliklerinde bölgesel deformasyon meydana getirdiği görülmüştür.

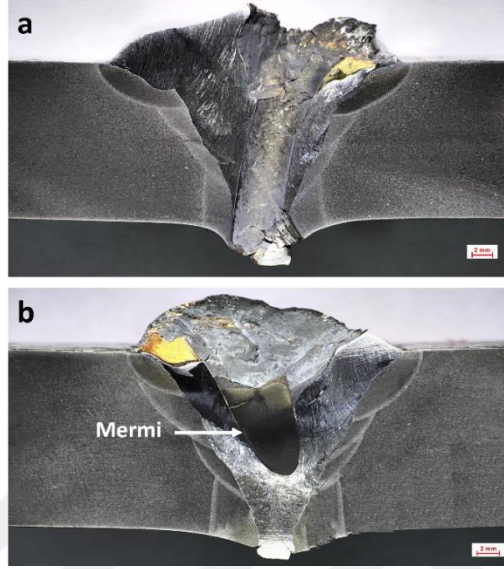


Şekil 7.32: Balistik Test Sonrası Sandviç Kaynak Plakasını Ön ve Arka Yüzeylerinin Görüntüsü; a) Kaynak Bölgesi Ön Yüzey Görüntüsü, b) IEB’in Ön Yüzey Görüntüsü, c) Kaynak Bölgesi Arka Yüzey Görüntüsü, d) IEB’nin Arka Yüzey Görüntüsü

Balistik test sonrası oluşan hasarların incelenebilmesi için kaynak dikişi, IEB ve ana malzeme bölgelerinden kesit çıkartılarak metalografik hazırlama işlemlerine tabii tutulmuştur. Şekil 7.33, Şekil 7.34 ve Şekil 7.35’te makro görüntüleri gösterilmektedir. Makro görüntüler üzerinden merminin bölge üzerinde meydana getirdiği hasar ölçülmüştür. Makro görüntü incelemelerde deformasyon meydana gelen kısımlarda merminin bakır gömlek kısımlarına ait parçalar görülmüştür.

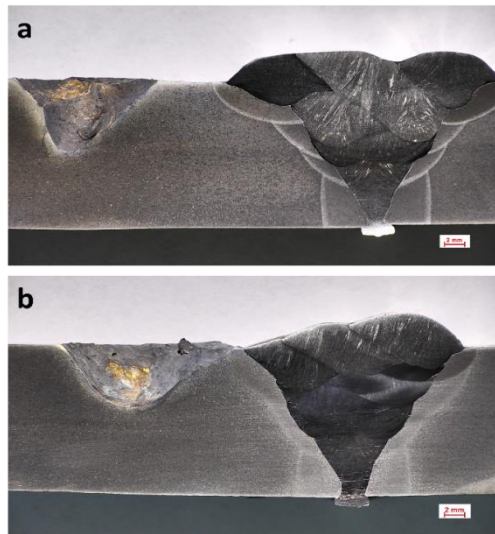
Östenitik kaynağın kaynak bölgesinde Şekil 7.33-a’da mermi, kaynak bölgesini tamamen delerek çıkmıştır. Sandviç kaynağın kaynak bölgesinde Şekil 7.33-b’de

mermi, kaynak bölgesini tam olarak delmediği görülmüştür. Sandviç kaynakta Merminin meydana getirdiği hasarın derinliği ~11 mm ölçülmüştür. Sandviç kaynakta ara pasoda sert dolgu kaynak metali kullanımı sayesinde mermi kaynak bölgesini tam delip geçememiştir.



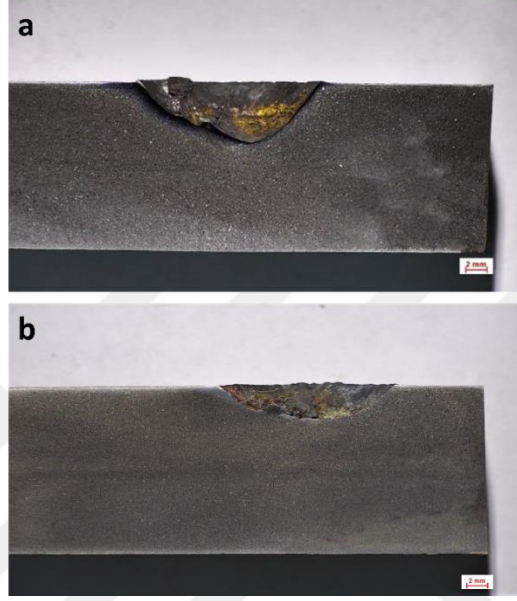
Şekil 7.33: Balistik Test Sonrası Kaynak Bölgeleri Makro Kesit Görüntüsü; a)Östenitik Kaynak, b) Sandviç Kaynak

Şekil 7.34-a’da görüleceği üzere, östenitik kaynağın IEB bölgesine atılan merminin, IEB’yi tam olarak delmediği görülmüştür. Merminin meydana getirdiği hasarın derinliği ~8 mm ölçülmüştür. Benzer şekilde, sandviç kaynağın IEB bölgesine atılan merminin de IEB’yi tam olarak delmediği görülmüştür (Şekil 7.34-b). Merminin meydana getirdiği hasarın derinliği ~ 6,8 mm ölçülmüştür.



Şekil 7.34: Balistik Test Sonrası IEB’lerin Makro Kesit Görüntüsü; a) Östenitik Kaynak, b) Sandviç Kaynak

Şekil 7.35'te kaynak ana malzemesi olarak kullanılan Protection 500 kalite zırh çeliklerine yapılan balistik test sonrası makro kesit görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 7.35-a'da östenitik kaynağın, Şekil 7.35-b'da sandviç kaynağın ana malzeme bölgelerinde merminin ana malzemeyi tam olarak delmediği görülmüştür. Merminin meydana getirdiği hasarın derinliği Şekil 7.35-a'da ~ 5,8 mm, Şekil 7.35-b'da ise ~3,3 mm ölçülmüştür.



Şekil 7.35: Balistik Test Sonrası Zırh Çeliği Ana Malzeme Bölgeleri Makro Kesit Görüntüsü; a) Östenitik Kaynak, b) Sandviç Kaynak

Makro görüntüleri üzerinde yapılan ölçümler sonucu IEB'lerin ana malzemeye kıyasla balistik darbe altında daha az direnç gösterdiği görülmüştür. Bu durumun kaynak işlemleri sırasında IEB'de meydana gelen sertlik yumuşamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak kaynak sırasında düşük ısı girdisi ile IEB'nin dar tutulması sağlanılmıştır. Yapılan balistik test sonuçlarında da IEB'de bölgesel deformasyon meydana gelmesi kaynak sırasında kullanılan parametrelerin uygun olduğunu göstermektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, 15 mm kalınlığındaki Protection 500 kalite zırh çeliklerinin kaynaklı bağlantılarının mekanik ve mikroyapı özelliklerini geliştirmek amacıyla sandviç kaynak yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada robotik gazaltı kaynak yöntemi kullanılarak kaynak işlemleri yapılmıştır. Östenitik (SG307) dolgu metali kullanılarak östenitik kaynak, östenitik dolgu metali pasoları arasına sert dolgu (HARDCOR 600 G) metali kullanılarak ise Sandviç kaynak işlemleri yapılmıştır. Zırh çeliklerinin kaynak işlemleri sırasında karşılaşılan en önemli sorunlardan bir tanesi olan IEB'de meydana gelen yumuşama sorununu en aza indirmek için düşük ısı girdisi (0,8-1,10 kJ/mm) kullanılarak kaynak işlemleri tamamlanmıştır. Kaynaklar 4 sıra 7 paso olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Sandviç kaynak yönteminin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Kaynak işlemlerinden sonra havada soğutulan plakalar tahribatsız muayene yöntemlerine tabi tutulmuştur. Sıvı penetrant, görsel muayene, radyografik muayene testleri sonucunda kaynaklı plakalarda ilgili test kriterlerini aşan herhangi bir süreksizliğe rastlanılmamıştır. Kaynak işlemleri östenitik ilave tel için maksimum 0,87 kJ/mm ısı girdisi ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- X eksenini boyunca 0,5 mm aralıklarla 5 sıra şeklinde gerçekleştirilen sertlik test sonuçlarına göre kaynak ağız geometrisine bağlı olarak ana malzemeyle seyrelme sonucu numunelerin kök kısmında sertlik test sonucu daha yüksek çıkmıştır. Test sonuçlarına göre son pasolara ait IEB'lerin sertlik sonuçları diğer pasolara göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum çoklu paso işlemlerine bağlı olarak son pasonun önceki pasoyu tavlama sonucu sertlik değerinin düşmesi ile yorumlanmaktadır.
- MIL-STD-1185 standardına göre kaynak ergime sınırından 15,9 mm uzaklığa kadar sertliğin ana malzeme sertliğinden düşük olmaması gerektiğini belirtmektedir.

Yapılan kaynaklarda uygulanan düşük ısı girdisi ile kaynak ergime sınırından ana malzemeye doğru sertlik değerin 12-13 mm uzaklıkta ana malzemenin sertlik değerine ulaştığı görülmüştür.

-Enine Çekme testi sonuçlarına göre yapılan kaynakların çekme mukavemetinin ana malzemenin çekme mukavemetine oranının Östenitik kaynak için %46, Sandviç kaynak için ise %33 olduğu hesaplanmıştır. Sandviç kaynakta ara pasoda sert dolgu metali kullanımı sonucu akma dayanımının Östenitik kaynağa göre %41 düşürdüğü görülmüştür. Sandviç kaynağa ait çekme numunelerinin incelenmesi sonucu sert dolgu pasolarında çekme yükü altında çatlaklar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar akma ve çekme mukavemetinde düşüş meydana getirmiştir. Östenitik kaynağın akma ve çekme dayanımının tel üretici beyanını karşıladığı görülmüştür.

- Östenitik kaynağın kaynak bölgesinden çıkartılan mikro çekme numunelerinin test sonuçlarının tel üretici beyanını karşıladığı görülmüştür. Sandviç kaynakta sert dolgu pasosundan çıkartılan mikro çekme numunelerinin akma mukavemetinin Östenitik kaynağın akma mukavemetine göre 147 MPa arttırdığı görülmüştür.

- Kaynak dikişi ve IEB'lerden elde edilen çentik darbe numunelerine -40°C'de çentik darbe testi yapılmıştır. Kaynak bölgesinden elde edilen sonuçlara göre Östenitik kaynakta çentik darbe enerjisi ortalama 66 J elde edilmiştir. Östenitik kaynağa göre Sandviç kaynakta sert dolgu metali kullanımı sonucu darbe enerjisi 32 J daha düşük çıkmıştır. Sonuç olarak çalışmada kullanılan zırh çeliğinin çentik darbe enerjisinden (20 J) daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. IEB'lere ait numunelerin çentik darbe testi sonucu östenitik kaynakta 102 J elde edilirken sandviç kaynakta 53 J elde edilmiştir. Östenitik kaynakta IEB'de kırılmanın kaynak metaline doğru gerçekleşmesi sonucu çentik darbe enerjisinde artış meydana geldiği görülmüştür.

-Kaynaklı plakalar üzerinden 3 farklı bölgeye (ergime bölgesi, IEB ve ana metal) yapılan balistik test sonucunda; östenitik kaynağın kaynak bölgesinde merminin bölgeyi tamamen delerek çıktığı görülmüştür. Sandviç kaynakta ise ara pasoda sert dolgu malzemesi kullanımı sonucu mermi, bölgede kısmen deformasyon bırakarak kaynak bölgesinin içinde kalmıştır. Sandviç kaynak yöntemi ile zırh çeliklerinin balistik performanslarının geliştiği görülmüştür.

-Makro görüntü incelemelerinde IEB’lerde yapılan balistik test sonucunda mermilerin, ana malzemeye göre daha fazla penetrasyon sağladığı görülmüştür. Zırh çeliklerinin kaynak işlemleri sırasında IEB’de meydana gelen yumuşamaya bağlı olarak düşük balistik performans sergilediği bilinmektedir. Çalışmada uygulanan düşük ısı girdisi ile haz bölgesinde meydana gelen sertlik yumuşaması en aza indirilerek balistik darbe altında IEB’lerin korunduğu görülmüştür.

8.2 Öneriler

-Zırh çeliklerinin kaynaklı bağlantılarının balistik performanslarını geliştirmek amacıyla yapılacak sandviç kaynak işlemlerinde sert dolgu kaynak pasosunun sırası değiştirilerek elde edilen sonuçlar bu tezin sonuçları ile kıyaslanabilir.

-Çekme yükü altında sert dolgu pasosunda meydana gelen gerilimlerin azaltılması amacıyla kaynak ağız bölgesinde östenitik kaynak metali kullanılarak yağlama işlemi yapılarak çalışma yapılabilir.

-Çalışmada kullanılan östenitik paslanmaz masif tel yerine yüksek mukavemetli düşük hidrojenli özlü teller ile kullanılarak aynı şartlar altında kaynak işlemi yapılabilir ve elde edilen sonuçlar ile bu tezin sonuçları ile kıyaslanabilir.

-Çentik darbe test sıcaklıkları değiştirilerek kaynak ve IEB’nin sünek-gevrek geçiş sıcaklıkları tespit edilerek çalışma yapılabilir.

-Balistik test atış sayısı artırılarak sonuçların doğrulanması çalışması yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Camcı, E.** (2020). Metal esaslı sandviç kompozitlerin balistik performansının incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. <https://doi.org/10.29130/dubited.619423>
- [2] **Yanen, C., Solmaz, M. Y.** (2016). Tabakalı hibrit kompozitlerin bireysel zırh malzemesi olarak üretimi ve balistik performanslarının incelenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(2). <https://doi.org/10.31202/ecjse.264200>
- [3] **Karagöz, S., Atapek, H., Yılmaz, A.** (2008). Microstructural characterization and effects on mechanical properties of boron added armour steel. *In 13th International Conference On Applied mechanics And Mechanical Engineering, cairo*.
- [4] **Aksöz, S., Özer, A., Barlay Ergü, Ö., Ada, H.,** (2017). A study on weldability of armor steel produced according to mil-a-12560 (class 1) specification by gas metal arc welding method . 8th International Advanced Technologies Symposium(IATS) 2017 (pp.2285-2292). Elazığ, Turkey
- [5] **Konca, E.** (2020). A comparison of the ballistic performances of various microstructures in MIL-A-12560 armor steel. *Metals*, 10(4), 446., doi: 10.3390/met10040446.
- [6] **Karagöz, Ş., Atapek, H.** (2007). Bor katkılı zırh çeliklerinin kırılma davranışı. *Uluslararası Kırılma Konferansı*, 186-196.
- [7] **Balaguru, V., Balasubramanian, V., Shivkumar, P.** (2020). Tensile properties of shielded metal arc welded ultrahigh hard armour steel joints. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 1(2), 071-084.
- [8] **Saxena, A., Kumaraswamy, A., Madhu, V., Madhusudhan Reddy, G.** (2018). Study of tribological characteristics of multi-pass SMAW armox 500T steel joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 4300-4307. doi: 10.1007/s11665-018-3488-2.
- [9] **Naveen Kumar, S., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Hafeezur Rahman, A., Balaguru, V.** (2021). Influence of microstructural characteristics on ballistic performance and its mode of failure in shielded metal arc welded ultra-high hard armor steel joints. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74, 909-921. doi: 10.1007/s12666-021-02197-7.
- [10] **Neuvonen, R., Skriko, T., Björk, T.** (2021). Discretization and material parameter characterization for a HAZ in direct-quenched armor steel. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 89, 104305.

- [11] **Çelik C., Kurt R. K., Çoban O., Baykal H., Akben H.K., Gürol U.** (2022). The effect of process parameters on bead geometry, hardness and microstructural properties armour steel welds performed by robotic gas metal arc welding, 21th International Metallurgy and Materials Congress-IMMC2022.
- [12] **Bao, Y., Gao, X., Wu, Y., Sun, M., & Li, G.** (2021). Research progress of armor protection materials. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1855, No. 1, p. 012035). IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/1855/1/012035.
- [13] **Saxena, A., Dwivedi, S. P., Sharma, S., Srivastava, V. S., Singh, G., Singh, J.,I. Pruncu, C.** (2021). A comparative numerical analysis on the effect of welding consumables on the ballistic resistance of SMAW joints of armor steel. *Applied Sciences*, 11(8), 3629. doi: 10.3390/app11083629.
- [14] **Nas, E.** (2022). Ramor 550 çeliğinin elektro erozyon işleme metodu ile işlenmesinde proses parametrelerinin delik çapına etkisi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(3), 1514-1526. doi: 10.47495/okufbed.1074857.
- [15] **Gür, A.K., Çalgülü, U., Yiğittürk N.** (2016). The investigation of welding capability of aısı 304/ramor 500 steels welded with method welding pta. e-Journal of New World Sciences Academy, vol. 1, no. 1, pp. 248–258, Sep. 2016, doi: 10.12739/NWSA.2016.2A11PB.
- [16] <<https://www.ssb.gov.tr/urunkatalog/tr/54/#zoom=z>. > Erişim tarihi: 06.02.2023.
- [17] **Yorgun, E., Denктаş. M.** (2020). Zırh çeliklerinden ARMOX 500T gazaltı kaynak yöntemi (MİG) ile özlü tel ve masif tel kullanılarak alın bağlantı bölgelerindeki mekanik özelliklerin incelenmesi,” In International Symposium Of Education And Values-4 (P. 230),.
- [18] **Kara, S., Korkut, H. M.** (2012). Zırh çeliklerinde kaynak ağzı tasarımının metalurjik ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi (elektronik)*, 9(1), 35-45.
- [19] **Şahintürk C., Tozlu İ., Utku Ş., Pamuk U.** (2005). Erdemir levha haddehanesi ve zırh çeliği üretim çalışmaları.
- [20] **Soykan, H. Ş., Aslanoğlu, Z., Karakaş, Y.** (2005). Zırh çeliklerinin metalurjisi. 427(838), 869.
- [21] **Jena, P. K., Singh, B. B., Kumar, K. S., & Gogia, A. K.** (2016). Development of Medium Hardness Steel for Armour Application.
- [22] **Aytaç, A., Işık, M. S., Çanakçı, B., Özdemir, T., Aztekin, K., İpek, H.** (2018). AISI 1008 1040 ve 4140 çeliklerinde ısıtıl işlem, karbon oranı ve alaşım elementlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 17(2), 139-165.
- [23] **Souza, E. R. S., Weber, R. P., Monteiro, S. N., Oliveira, S. D. S. A.** (2021). Microstructure effect of heat input on ballistic performance of welded high strength armor steel. *Materials*, 14(19), 5789. doi: 10.3390/ma14195789.

- [24] **Kolla, H. H., Mishra, B., Jena, P. K., Siva Kumar, K., Bhat, T. B., Srinivas, M., & Reddy, A. V.** (2011). Development of an ultrahigh strength low alloy steel for armour applications. *Materials Science and Technology*, 27(2), 551-555. doi: 10.1179/026708309X12560332736476.
- [25] **Sozen E., Gunduz G., Imren E.** (2016). Balistik panel ve koruyucu zırh üretiminde kullanılan lif ve kompozit malzemeler,” *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, vol. 18, no. 2, , doi: 10.24011/barofd.267304.
- [26] **Özgüder, O., Özbay, M., Adin, H.** (2017). Namlu içi balistik davranışın sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(3), 609-620.
- [27] **Carlucci, D. E., Jacobson, S. S.** (2018). *Ballistics: theory and design of guns and ammunition*. CRC Press.
- [28] **Naik N. K., Shrirao P., Reddy B. C. K.** (2016). Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation, *Int J Impact Eng*, vol. 32, no. 9, pp. 1521–1552, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2005.01.004.
- [29] **Kalaycıoğlu B., Ongun A.** (2021). Seramik ön yüzü çelik zırhlarda balistik hasar sonrası çelik kısmında oluşan deformasyonun incelenmesi, *Savunma Bilimleri Dergisi*, doi: 10.17134/khosbd.913681.
- [30] **Özgültekin, S.E.** (2012). Balistik zırhlarda kullanılan kompozit malzeme kombinasyonlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- [31] **Lenihan, D., Ronan, W., O'Donoghue, P. E., Leen, S. B.** (2019). A review of the integrity of metallic vehicle armour to projectile attack. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233(1), 73-94. doi: 10.1177/1464420718759704.
- [32] **Özer, İ., Atahan, M. G., Yapıcı, A.** (2013). Balistik çarpma etkisinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1(3), 21-30.
- [33] **EN 1522:1998**, Windows, doors, shutters and blinds - Bullet resistance - Requirements and classification, European Committee for Standardization
- [34] **Marcisz, J., Burian, W., Stępień, J., Starczewski, L., Wnuk, M., Janiszewski, J.** (2014). Static, dynamic and ballistic properties of bainite-austenite steel for armours. In *28th International Symposium on Ballistics* (pp. 1348-1361).
- [35] **Mikulikova, R., Ridky, R., Rolc, S., & Krestan, J.** (2018). Influence of Impact Velocity and Steel Armour Hardness on Breakage of Projectile 14.5' 114 API/B32. *Advances in Military Technology*, 13(1), 59-69.
- [36] **Göde E., Teoman A., Çetin B., Tonbul K., Davut K., Kuşhan M. C.** (2023). An experimental study on the ballistic performance of ultra-high hardness armor steel (Armox 600T) against 7.62 mm × 51 M61 AP projectile in the multi-hit condition, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 38, doi: 10.1016/j.jestch.2023.101337.
- [37] **Crouch I. G., Cimpoeru S. J., Li H., Shanmugam D.** (2017) “Armour steels,” in *The Science of Armour Materials*, Elsevier, pp. 55–115. doi: 10.1016/B978-0-08-100704-4.00002-5.

- [38] **Cimpoeru, S. J.** (2016). The mechanical metallurgy of armour steels. Defence Science and Technology Group Fishermans Bend VIC Australia.
- [39] **Çam G.** (2020). *Kaynak bilimi ve teknolojisi*, Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık.
- [40] **Tama, Y.S.** (2009). Çelik yapı uygulamalarında kullanılan kaynak yöntemleri, üstünlükleri ve sakıncalı yönleri. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 1-3.
- [41] **Ezer M., Çam G.** (2022). A Study on microstructure and mechanical performance of gas metal arc welded AISI 304L joints, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 53(9): 1043-1052. doi: 10.1002/mawe.202200050.
- [42] **Şenol M., Çam G.** (2023). Investigation into microstructures and properties of AISI 430 ferritic steel butt joints fabricated by GMAW, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 202, 104926. doi: 10.1016/j.ijpvp.2023.104926.
- [43] **Serindağ H.T., Çam G.** (2023). Characterizations of microstructure and properties of dissimilar AISI 316L/9Ni low alloy cryogenic steel joints fabricated by GTAW, *Journal of Materials Engineering and Performance*, doi: 10.1007/s11665-022-07601-x.
- [44] **Serindağ H.T., Çam G.** (2022). Multi-pass butt welding of thick AISI 316L plates by gas tungsten arc welding: Microstructural and mechanical characterization, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 200, 104842. doi: 10.1016/j.ijpvp.2022.104842.
- [45] **Serindağ H.T., Tardu C., Kircicek I.O., Çam G.** (2022). A study on microstructural and mechanical properties of gas tungsten arc welded thick cryogenic 9% Ni alloy steel butt joint, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 37, 1-10. doi: 10.1016/j.cirpj.2021.12.006.
- [46] **Serindağ H.T., Çam G.** (2021) Microstructure and mechanical properties of gas metal arc welded AISI 430/AISI 304 dissimilar stainless steels butt joints, *Journal of Physics: Conference Series*, 1777, 012047. doi: 10.1088/1742-6596/1777/1/012047.
- [47] **Serindağ H.T., Kırçiçek İ.Ö., Tardu C., Çam G.** (2022). Determination of microstructural and mechanical properties of gas tungsten arc welded 9Ni cryogenic steel joint, *Mühendis ve Makine*, 63(706), 117-137. doi: 10.46399/muhendismakina.1085742.
- [48] **Şenol M., Cam G.** (2020). Microstructural and mechanical characterization of gas metal arc welded AISI 430 ferritic stainless steel joints, *European Journal of Engineering and Natural Sciences (EJENS)*, 5(1), 52-60.
- [49] **Ezer M.A., Cam G.** (2020). Investigation of the microstructure and mechanical properties of gas metal arc welded AISI 304 austenitic stainless steel butt joints, *European Journal of Engineering and Natural Sciences (EJENS)*, 5(1), 43-51.
- [50] **Serindağ H.T., Çam G.** (2022). Microstructural and mechanical characterization of gas tungsten arc welded 10 mm thick AISI 316L joints, *Düzce University Journal of Science & Technology*, 10(4), 1873-1889. doi: 10.29130/dubited.1015580.

- [51] **Ertürk İ., Selamoğlu A.** (2017). Çelik boruların çevresel kaynağı, in X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre Ve Sergisi Bildiriler Kitabı,
- [52] **Köse C., Tatlı Z.** (2015). Robotik MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen 5754 alüminyum alaşımının mekanik ve mikroyapı özelliklerine kaynak hızının etkisi, *NWSA Academic Journals*, vol. 10, no.1, doi: 10.12739/nwsa.2015.10.1.2a0089.
- [53] **Lin, W., Luo, H.** (2015). Robotic Welding. In: Nee, A. (eds) *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4_106
- [54] **Cabrilo, A., Geric, K., Jovanovic, M., Vukic, L.** (2018). Weldability and impact energy properties of high-hardness armor steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 1281-1295. doi: 10.1007/s11665-018-3211-3.
- [55] <<https://www.magmaweld.com.tr/panasonic-g3-kaynak-robotlari-r-66>>, Erişim tarihi: 06.02.2023.
- [56] **Groover M. P.** (2012). *Fundamentals of Modern Manufacturing 4th Edition, Metallurgy of Welding*,
- [57] **Tama, Y. S.** (2009). Çelik yapı uygulamalarında kullanılan kaynak yöntemleri, üstünlükleri ve sakıncalı yönleri. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 1-3.
- [58] **Anık, S., Tülbentçi, K., Kaluç, E.** (1991). Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağı. Gedik Holding.
- [59] **Ertürk, İ., Durukan, M. M. T.** (2017). Çeliklerin kaynağında ısıdan etkilenen bölgenin mikro yapı ve özelliklerinin tahmini. X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre Ve Sergisi Bildiriler Kitabı”.
- [60] **Vander Voort G. F.** (2021). *Metallography of welds, Advanced Materials and Processes*, vol. 169, no. 6.
- [61] **Boumerzoug Z.** (2020). Heat affected zone in welded metallic materials, *Modern Concepts in Material Science*, vol. 3, no 4, doi: 10.33552/mcms.2020.03.000566.
- [62] **Lippold J. C.** (2014). *Welding Metallurgy and Weldability*, vol. 9781118230701. doi: 10.1002/9781118960332.
- [63] **Vasconcelos, C. H., Loayza, C. R. L., Assunção, P. D., Junior, F. F., Baia, P. E., Borges, D. J., & Braga, E. M.** (2019). High-hardness armor welded by CW-GMAW: Economic, geometric and CGHAZ analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41, 1-11.
- [64] **Gürol U., Karahan T., Erdöl S., Çoban O., Baykal H., Koçak M.** (2022) Characterization of armour steel welds using austenitic and ferritic filler metals, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 75, no. 3, doi: 10.1007/s12666-021-02464-7.
- [65] **Vural, M., Piroğlu, F., Çağlayan, Ö. B., Uzgider, E.** (2003). Yapı çeliklerinin kaynaklanabilirliği. *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 426 - 2003/4.

- [66] **Alhassan, M., Bashiru, Y.** (2021). Carbon Equivalent Fundamentals in Evaluating the Weldability of Microalloy and Low Alloy Steels. *World Journal of Engineering and Technology*, 9(4), 782-792.
- [67] **Erdem, M., Türker, M.** (2011). 7039 Alüminyum alaşıminın kaynak öncesi ve sonrası mekanik ve balistik özelliklerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(1).
- [68] **Serrano, R., Ambriz, R. R., Ayoub, G., Jaramillo, D.** (2022). Mechanical Behavior of Armor Steel Gas Metal Arc Welding Joints Performed by Nickel-Chromium and Low-Alloy Steel Filler Metals. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(5), 3930-3942. doi: 10.1007/s11665-021-06517-2.
- [69] **Park S. C., Lee Y. J., Yi H. J., G. Bin Yu, Kang S. S.** (2013). Effect of nonmetallic inclusions on cold crack susceptibility of armor casting steel weld metal, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 14, no. 12, doi: 10.1007/s12541-013-0289-2.
- [70] **Magudeeswaran G., Balasubramania V., Sathyanarayanan S., Reddy G.M., Moitra A., Venugopal S., Sasikala G.** (2009). A“Dynamic fracture toughness (JId) behavior of armor-grade Q & T steel weldments: Effect of weld metal composition and microstructure,” *Metals and Materials International*, vol. 15, no. 6, doi: 10.1007/s12540-009-1017-4.
- [71] **Fei, Z., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Wu, B., & Su, L.** (2019). Improving the weld microstructure and material properties of K-TIG welded armour steel joint using filler material. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 1931-1944. doi: 10.1007/s00170-018-2787-y.
- [72] **Kurt, R. M.,** (2022). Zırh çeliklerinin robotik MIG/MAG kaynağı ile birleştirilmesinde ilave metallerin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans, İstanbul Gedik Üniversitesi,
- [73] **Savic, B., Cabrilo, A.** (2021). Effect of heat Input on the ballistic performance of armor steel weldments. *Materials*, 14(13), 3617.
- [74] **Saxena A., Kumaraswamy A., Madhusudhan Reddy G., Madhu V.**(2018). Influence of welding consumables on tensile and impact properties of multi-pass SMAW Armox 500T steel joints vis-a-vis base metal,” *Defence Technology*, vol. 14, no. 3, 2018, doi: 10.1016/j.dt.2018.01.005.
- [75] **Kara S., Korkut M. H.** (2012). Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan zırh plakalarında kaynak sonrası ısıl işlemin birleşim mukavemetine etkisinin araştırılması, *Savunma Bilimleri Dergisi The Journal of Defense Sciences*, Kasım, vol. 11, no. 2, 2012.
- [76] **Çoban, O., Gürol, U., Erdöl, S., Koçak, M.** (2021) Effect Of Plate Thickness On The Microstructure And Hardness Of Robotic Fillet Welded Armour Steels.
- [77] **Özdemir T.** (2020), Mechanical & microstructural analysys of armor steel welded joints, *Uluslararası Mühendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, doi: 10.29137/umagd.488104.

- [78] **İpek N. E., Elaldi F.** (2012). Analysis of welding groove angle and geometry on strength of armor steel, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 12, pp. 1437–1441, doi: 10.1080/10426914.2012.709343.
- [79] **Kim J. S., Yi H. J.** (2017). Characteristics of GMAW narrow gap welding on the armor steel of combat vehicles, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 7, no. 7, doi: 10.3390/app7070658.
- [80] **Madhusudhan Reddy G., Mohandas T. Papukutty K.** (1999). Enhancement of ballistic capabilities of soft welds through hardfacing, *Int J Impact Eng*, vol. 22, no. 8, 1999, doi: 10.1016/S0734-743X(99)00020-2.
- [81] **Babu S., Balasubramanian V., Madhusudhan Reddy G., Balasubramanian T. S.** (2010). Improving the ballistic immunity of armour steel weldments by plasma transferred arc (PTA) hardfacing,” *Mater Des*, vol. 31, no. 5, doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.060.
- [82] **Balakrishnan M., Balasubramanian V., Madhusudhan Reddy G., Sivakumar K.** (2011). Effect of buttering and hardfacing on ballistic performance of shielded metal arc welded armour steel joints, *Mater Des*, vol. 32, no. 2, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.08.037.
- [83] **Balakrishnan M., Balasubramanian V., Madhusudhan Reddy G.** (2013). Effect of hardfaced interlayer thickness on ballistic performance of armour steel welds, *Mater Des*, vol. 44, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.06.010.
- [84] **Balakrishnan M., Balasubramanian V., Madhusudhan Reddy G.** (2013). Effect of PTA hardfaced interlayer thickness on ballistic performance of shielded metal arc welded armor steel welds, *J Mater Eng Perform*, vol. 22, no. 3, doi: 10.1007/s11665-012-0338-5.
- [85] **Balakrishnan M., Balasubramanian V., Madhusudhan Reddy G.** (2013). Effect of Hardfacing Consumables on Ballistic Performance of Q&T Steel Joints, *Defence Technology*, vol. 9, no. 4, 2013, doi: 10.1016/j.dt.2013.12.007.
- [86] <https://file.gedik.com.tr/portal/catalog/genel_urun_katalogu_2020.pdf>, Erişim tarihi: 06.05.2023.
- [87] **Başığit A. B., Çalın R., Pehlivanlı O.** (2018). Dupleks ve östenitik paslanmaz çeliklerin tıg kaynağı sonrasında oluşabilecek kaynak hatalarının ultrasonik ve radyografik muayene yöntemleri ile incelenmesi, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, vol. 10, no. 2.
- [88] **Dikeç, G.**(2013). *Malzeme bilgisi ve imal usulleri*. Gedik Üniversitesi Yayınları.
- [89] **Kshirsagar, R., Jones, S., Lawrence, J., Tabor, J.** (2019). Measurement of ferrite content of stainless steel sheet welds using a new Ferrite Density Number scale. *Journal of Materials Processing Technology*, 274, 116278.
- [90] <https://en.wikipedia.org/wiki/7.62%C3%9751mm_NATO >, Erişim tarihi: 01.06.2023.
- [91] **Gürol U., Dilibal S., Turgut B., Baykal H., Kümek H., Koçak M.** (2022), Manufacturing and characterization of waam-based bimetallic cutting tool, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, doi: 10.46519/ij3dptdi.1210836.

- [92] **ISO 148-1:2009 Metallic materials** — Charpy pendulum impact test — Part 1: Test method.
- [93] **Sudhakaran R., Vel Murugan V., Sivasakthivel P. S., Balaji M.** (2013). Modeling and analysis of ferrite number of stainless steel gas tungsten arc welded plates using response surface methodology, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 64, no. 9–12, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4117-0.
- [94] **Gürol U.** (2022). Welding of high manganese austenitic cast steels using stainless steel covered electrode, *International Journal of Metalcasting*, doi: 10.1007/s40962-022-00834-5.
- [95] **Kou, S.** (2003). *Welding metallurgy*. New Jersey, USA, 431(446), 223-225.
- [96] **Tümer M.** (2012) Koruyucu gaz kompozisyonunun özlü tel ark kaynak yöntemi ile birleştirilen paslanmaz çeliklerin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi, T.C. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2012.
- [97] **Slyvinsky, O., Chvertko, Y., Bisyk, S.** (2019). Effect of welding heat input on heat-affected zone softening in quenched and tempered armor steels. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 23(3).
- [98] **Gürol U., Turgut B., Güleçyüz N., Dilibal, S. Koçak M.** (2021). Development of multi-material components via robotic wire arc additive manufacturing, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, doi: 10.46519/ij3dptdi.1033374.

ÖZGEÇMİŞ

Ceren Çelik, ilkokul, ortaokul, lise ve üniversite eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2016 yılında başladığı İstanbul Gedik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü 2020 yılında bitirdi. 2023 yılında İstanbul Gedik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde tezli yüksek lisans eğitimini tamamladı. Yüksek lisans eğitimi boyunca TÜBİTAK 1505 Üniversite Sanayi İşbirliği destek programı kapsamında Savunma Sanayi İçin Yerli Zırh Çeliklerinin Robotik Kaynak Uygulamalarının Geliştirilmesi projesinde TÜBİTAK bursiyeri olarak görev aldı. 2023 yılında başladığı Uluslararası Kaynak Mühendisliği eğitimine devam etmektedir.