

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



**ZIRH ÇELİKLERİNİN ROBOTİK MIG/MAG KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİNDE İLAVE METALLERİN MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Recep Murat KURT**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

HAZİRAN 2022

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



**ZIRH ÇELİKLERİNİN ROBOTİK MIG/MAG KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİNDE İLAVE METALLERİN MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Recep Murat Kurt
(200022003)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Uğur GÜROL

HAZİRAN 2022



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı 200022003 numaralı öğrencisi Recep Murat KURT'un "Zırh Çeliklerinin Robotik MIG/MAG Kaynağı İle Birleştirilmesinde İlave Metallerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi" adlı tez çalışması, 28.06.2022 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

Tez Savunma Tarihi: 28/06/2022

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

2) Jüri Üyesi: Doç. Dr. Mustafa TÜMER

3) Jüri Üyesi: Doç. Dr. Savaş DİLİBAL

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “ZİRH ÇELİKLERİNİN ROBOTİK MIG/MAG KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE İLAVE METALLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” 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 (28/06/2022).

Recep Murat KURT

ÖNSÖZ

Bu çalışma 5210029 numaralı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1505 Üniversite-Sanayi iş birliği ile Savunma Sanayi İçin Yerli Zırh Çeliklerinin Robotik Kaynak Uygulamalarının Geliştirilmesi projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Projeye verdikleri desteklerden dolayı Gedik Kaynak'a, TÜBİTAK'a, Miilux Oy'a ve Mert Basmacı'ya teşekkür ederim. Tezimin hazırlanmasında bana verdiği tavsiye ve kıymetli fikirleriyle yol gösteren, hiçbir konuda desteklerini esirgemeyen proje yürütücüsü ve danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Uğur Gürol'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Bu proje süresi boyunca bilimsel ve deneysel konulardaki ekipman yardımlarından dolayı Gedik Kaynak Ar-Ge birimine, Gedik Kalite Kontrol birimine, Gedik Üniversitesi ailesine, Gedik Holding eski CEO'su Doç. Dr. Mustafa Koçak'a, Arş. Gör. Ozan Çoban'a ve çalışmalarında gösterdiği ilgi, alaka ve destekleri için Sayın Doç. Dr. Mustafa Tümer'e teşekkür ederim.

Aynı birimde çalışma fırsatı bulduğum ve uygulanan testlerde yardımlarını eksik etmeyen Gedik Kaynak Ar-Ge ekibinden Hakan Baykal'a, Ceren Çelik'e, Tülay Özgül'e, Tolgay Kalaycı'ya, Batuhan Turgut'a, Tolga Çanga'ya, Hülya Kumek'e, Ece Tezci'ye, Neslihan Sakallıoğlu'na, Selda Arslan'a, Yasin Abdioğlu'na, Gedik Test Merkezi birimi çalışanlarına teşekkür ederim.

Bugünlere kadar gelmemde desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen maddi ve manevi her konuda yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Haziran 2022

Recep Murat KURT

(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	xi
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ZIRH ÇELİKLERİ.....	3
2.1 Zırh Çeliklerinin Üretilmesi	4
2.1.1 Zırh çeliklerinin fiziksel metalurjisi ve zırh çeliklerinden beklenen özellikler	5
2.2 Türkiyede Zırh Teknolojisi Alanındaki Gelişmeler	8
2.2.1 Türkiye’de zırhlı araçların durumu.....	9
3. KAYNAK.....	11
3.1 MIG/MAG Kaynak Prosesi.....	11
3.2 Kaynak Kabiliyeti.....	12
3.2.1 Zırh çeliklerinin kaynak kabiliyeti.....	14
3.3 Robotik Kaynak.....	16
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	18
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
5.1 Kaynak Sarf Malzemelerin ve Ana Malzemenin Seçimi	29
5.2 Kaynak Düzeneginin Hazırlanması.....	31
5.3 Tahribatsız Muayene	34
5.3.1 Radyografik muayene	35
5.3.2 Penetrant muayene	35
5.4 Tahribatlı Muayene	36
5.4.1 Çekme testi	37
5.4.2 Çentik darbe testi	39
5.4.3 Eğme testi	40
5.4.4 Sertlik ölçümü.....	41
5.5 Metalografik İncelemeler	42
5.5.1 Numune hazırlama	42
5.5.2 Mikroyapı incelemeleri.....	46
5.5.3 Makroyapı incelemeleri	47
5.5.4 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri	48
5.5.5 Ferrit incelemeleri.....	49
5.5.6 Optik emisyon spektrometresi ile kimyasal analiz ölçümleri.....	49
5.5.7 XRF spektrometresi ile kimyasal analiz ölçümleri.....	50
5.5.8 N-O analiz cihazı	51
6. SONUÇLAR	52

6.1 Tahribatsız Muayene Sonuçları.....	52
6.1.1 Sıvı penetrant ve görsel muayene sonuçları	52
6.1.2 Radyografik muayene sonuçları	53
6.1.3 Makro görüntü inceleme.....	54
6.2 Tahribatlı Muayene Sonuçları	54
6.2.1 Çekme testi sonuçları.....	54
6.2.2 Çentik darbe testi sonuçları ve kırılma morfolojisi	56
6.2.3 Eğme testi sonuçları.....	61
6.2.4 Sertlik testi sonuçları	62
6.3 Metalografik İnceleme Sonuçları	65
6.3.1 XRF noktasal element analizi incelemeleri	65
6.3.2 Feritscope incelemeleri	68
6.3.3 Mikroyapı analizi.....	70
7. GENEL SONUÇLAR	78
8. ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

KISALTMALAR

AF	: Asiküler ferrit
B	: Beynitik ferrit yapı
BM	: Ana metal
CGHAZ	: Kaba taneli bölge
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektrometre Analizi
FS	: İkincil ferrit fazı oluşumu
GMAW	: Gaz Metal Ark Kaynağı
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
M/A	: Martenzit-östenit yapı
MAG	: Metal Aktif Gaz
N/O	: Azot Oksijen
OES	: Optik Emisyon Spektrometresi
OM	: Optik mikroskop
PAG	: Prior austenite grain (birincil östenitik tane)
PF	: Poligonal ferrit
SCHAZ	: Dönüşmemiş bölge
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TM	: Temperlenmiş martenzit
TSE	: Tane sınırı ferrit
XRF	: X-ışını Floresans

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1: Zırh çeliklerine uygulanan imalat işlemleri.....	6
Çizelge 2.2: Kullanılan bazı zırh çeliklerinin performans değerleri.....	7
Çizelge 2.3: Kullanılan bazı zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri	7
Çizelge 2.4: Kullanılan bazı zırh çeliklerinin mekanik değerleri	8
Çizelge 5.1: Kullanılan ilave metallerin kimyasal analizi (% ağırlıkça)	30
Çizelge 5.2: Kullanılan 309LSi ve 2209 ilave metallerinin ferrit ölçüm değerleri (FN).....	30
Çizelge 5.3: Kullanılan ilave metallerin tipik mekanik değerleri.....	30
Çizelge 5.4: Kullanılan kaynak plakalarının kimyasal analizi (% ağırlıkça)	31
Çizelge 5.5: Kullanılan kaynak plakalarının mekanik değerleri	31
Çizelge 5.6: Kaynak parametreleri	34
Çizelge 5.7: Dağlamalarda kullanılan çözeltilerin formülasyonu	46
Çizelge 6.1: Çekme testi sonuçları (Lo: 30 mm).....	55
Çizelge 6.2: Çentik darbe testi sonuçları	57
Çizelge 6.3: SG3 noktasal element analizi sonuçları (% ağırlıkça).....	66
Çizelge 6.4: ER110 noktasal element analizi sonuçları (% ağırlıkça).....	66
Çizelge 6.5: 309 LSi noktasal element analizi sonuçları (% ağırlıkça).....	67
Çizelge 6.6: 2209 noktasal element analizi sonuçları (% ağırlıkça).....	68

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Zırh çeliklerinden üretilmiş tank	3
Şekil 2.2: Zırh çeliklerinin üretim aşamaları	5
Şekil 3.1: Kaynak yöntemleri	11
Şekil 3.2: MIG-MAG kaynaklarında kullanılan temel makine ekipmanları	12
Şekil 3.3: Kaynak bölgesi görüntüsü	14
Şekil 3.4: Robotik kaynak ekipmanları	17
Şekil 5.1: Robotik kaynak sistemi	32
Şekil 5.2: Kaynak işlemi öncesi ana malzeme; a) üstten görünüş, b) yandan görünüş	32
Şekil 5.3: Seramik altlık yapıştırılmış ana malzeme a) alttan görünüş b) üstten görünüş	32
Şekil 5.4: Plakaların manyetiğini almak için kullanılan gaussmetre	33
Şekil 5.5: Plakaların kaynaklama şeması	34
Şekil 5.6: Radyografik muayenede kullanılan; a) X-Ray cihazı b) Çekim düzeni....	35
Şekil 5.7: Penetrant muayenede kullanılan sarf malzemelerin genel görünümü.....	36
Şekil 5.8: Kaynaklı plakaların kesim şeması	37
Şekil 5.9: Çekme testinde kullanılan kaynaklı numunelerin işleme ölçüleri.....	38
Şekil 5.10: Çekme testinde kullanılan cihazların genel görünümü	38
Şekil 5.11: Çentik numunesi ölçüleri	39
Şekil 5.12: Çentik deney makinesi	40
Şekil 5.13: Eğme numunesi ölçüleri.....	41
Şekil 5.14: Eğme deney makinesi a) eğme makinesi ekipmanları b) eğilmiş numune görüntüsü	41
Şekil 5.15: Mikrosertlik ölçüm şeması	42
Şekil 5.16: Otomatik sertlik ölçme makinesi.....	42
Şekil 5.17: Zımparalama ve parlatma cihazı	43
Şekil 5.18: Çeker ocak.....	44
Şekil 5.19: Elektroliz cihazı.....	44
Şekil 5.20: Bakalit hazırlama a) bakalit hazırlama ekipmanları b) bakalite alınmış numune	45
Şekil 5.21: Mikroyapı inceleme cihazı	47
Şekil 5.22: Makro inceleme cihazı	48
Şekil 5.23: a) Taramalı elektron mikroskobu genel görünümü, b) Numune yerleşimi	48
Şekil 5.24: Ferrit ölçme cihazı.....	49
Şekil 5.25: Kimyasal analiz ölçüm cihazı (ARL).....	50
Şekil 5.26: Kimyasal analiz ölçüm cihazı (XRF)	50
Şekil 5.27: N/O analiz cihazı	51
Şekil 6.1: Kaynak sonrası sıvı penetrant muayenesi yapılmış plakalar (a) 309LSi genel görüntü, (b) ER2209 genel görüntü, (c) 309LSi muayene sonucu, (d) ER2209 muayene sonucu	52

Şekil 6.2: Radyografik muayene görüntüleri.....	53
Şekil 6.3: Numune makro görüntüleri	54
Şekil 6.4: Çekme numunelerinin makro kopma görüntüleri	56
Şekil 6.5: Numunelerin çentik darbe sonuç grafiği	57
Şekil 6.6: Kaynak bölgesinin çentik kırılma yüzey görüntüleri	59
Şekil 6.7: Çentik darbe numunelerinin kırık yüzey % hesaplama standardı	59
Şekil 6.8: Çentik darbe yapılmış numunelerin hesaplanmış yüzey yüzdeleri	60
Şekil 6.9: SEM çentik darbe numunesi kırık yüzey incelemeleri.....	61
Şekil 6.10: Kaynaklı numunelerinin eğme sonuçları.....	62
Şekil 6.11: Sertlik test sonuçları	64
Şekil 6.12: SG3 noktasal element analizi makro görüntüsü.....	65
Şekil 6.13: ER110 noktasal element analizi makro görüntüsü.....	66
Şekil 6.14: 309 LSi noktasal element analizi makro görüntüsü	67
Şekil 6.15: 2209 noktasal element analizi makro görüntüsü	68
Şekil 6.16: 2209 numunesinin delta ferrit oranları (FN)	69
Şekil 6.17: 309LSi numunesinin delta ferrit oranları (FN)	70
Şekil 6.18: SG3 numunesinin mikroyapı görüntüleri	71
Şekil 6.19: ER110 numunesinin mikroyapı görüntüleri	73
Şekil 6.20: 309LSi numunesinin mikroyapı görüntüleri	75
Şekil 6.21: 2209 numunesinin mikroyapı görüntüleri a) Kep b) Kök c) Ergime sınırı	77

ZIRH ÇELİKLERİNİN ROBOTİK MİG/MAG KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE İLAVE METALLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında savunma sanayiinde yoğun miktarda kullanılmakta olan 15 mm kalınlığındaki MIL-A 46100 (Protection 500 serisi) sınıfı zırh çeliği plakaları Metal İnert Gaz (MIG) ve Metal Aktif Gaz (MAG) kaynağı ile ferritik, paslanmaz ve dubleks yapıya sahip kaynak telleri kullanılarak birleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar analiz edilerek birbirleri ile kıyaslanmıştır. Ana malzeme olarak ülkemizde Erdemir Miilux firmasından yerli olarak üretilen Protection 500 serisi zırh çeliği plakaları kullanılmıştır. Kaynak telleri olarak ise 1,2 mm çaplarında ticari isimleri GeKa SG3, ELOX 309LSi, ELOX SG2209 ve ER110S-G olan ilave metaller kullanılmıştır. Koruyucu gaz olarak da ferritik yapıdaki SG3 ve ER110S-G kaynak telleri için ArCo18, dubleks paslanmaz yapıdaki ELOX SG2209 ve östenitik paslanmaz yapıdaki ELOX 309LSi kaynak telleri için ise ArCO2,5 kullanılmıştır.

Zırh çeliklerinin kaynaklı birleştirmelerinde en önemli kriterlerden birisinin ısı tesiri altındaki bölgelerde oluşan mekanik zayıflamaların olabildiğince minimuma indirilmesi nedeniyle tüm kaynak işlemleri sabit bir ısı girdisi elde etmek amacıyla 6 eksenli kaynak robotu ile gerçekleştirilmiştir. Burada ayrıca operatör kaynaklı hataların önüne geçilmesi ve buna bağlı olarak da hatasız kaynakların eldesi hedeflenmiştir. Elde edilen kaynaklı birleştirmelere yüzeysel veya hacimsel kaynak hatalarının olup olmadığının tespiti için ilk olarak görsel muayene, sıvı penetrant muayene ve radyografik muayene işlemleri uygulanmıştır. Akabinde ise sıvı soğutmalı sanayi tipi şerit testere kullanılarak kimyasal analiz, metalografik incelemeler ve tahribatlı testler için numuneler çıkartılmıştır. Kullanılan ilave metallerin ve kaynaklı birleştirmelerin kimyasal analizlerini belirlemek amacıyla Optik Emisyon Spektrometresi (OES), Azot Oksijen (N/O) Cihazı ile kimyasal analiz testleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynak bölgesindeki element değişimlerini incelemek amacıyla da X-ışını Floresans (XRF) cihazı ile makro numuneleri üzerinden kaynak metalinin farklı bölgelerinde noktasal kimyasal analiz testleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak bölgesinde ve ısı tesiri altında kalan bölgede oluşan mikro yapısal değişimleri gözlemlemek amacıyla stereo mikroskop, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopu kullanılarak metalografik incelemeler yapılmıştır. Son olarak kaynaklı birleştirmelerin mekanik performanslarını karşılaştırmak amacıyla ulusal & uluslararası standartlara uygun olarak Vickers sertlik, çekme, darbe çentik ve eğme testleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Robotik MIG/MAG kaynağı ile minimum düzeyde hata içeren uygun kaynak dikişlerinin elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak; en yüksek akma dayanımı ve çekme dayanımı değerleri, ER110 ilave metali ile yapılan kaynaklarda, en düşük akma ve çekme dayanım değerleri ise SG3 ilave metali ile yapılan kaynaklarda elde edilmiştir. Çentik darbe test sonuçlarına göre ise çekme testinin tersine en düşük tokluk değerleri ER110 ilave metali ile yapılan kaynaklarda elde edilirken, en yüksek tokluk değerleri östenitik 309LSi ilave metali ile yapılan kaynaklarda elde edilmiştir. Ayrıca, bütün

kaynaklı birleştirmelerde ITAB bölgesinin tokluk değerlerinin kaynak metalinden çıkartılan numunelere kıyasla daha düşük olduğu görölmüştür. Fakat, tüm kaynaklı birleştirmelerde tokluk değerleri ana malzeme için -40°C’de belirtilen 20J değerinden daha yüksek çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Zırh Çeliği, Robotik MIG/MAG Kaynağı, Masif Kaynak Telleri, Mikroyapı Karakterizasyonu, Tahribatlı Muayene, Tahribatsız Muayene, ITAB zayıflama.*



INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FILLER METALS ON MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES IN JOINING ARMOR STEELS WITH ROBOTIC MIG/MAG WELDING

ABSTRACT

In this thesis, 15 mm thick MIL-A 46100 (Protection 500 series) class armor steel plates, which are used extensively in the defense industry, were joined with Metal Inert Gas (MIG) and Metal Active Gas (MAG) welding using ferritic, stainless and duplex welding wires, and the results were analyzed and compared with each other. Protection 500 series armor steel plates produced locally from Erdemir Miilux company were used as the base material. As welding wires, filler metals with the trade names GeKa SG3, ELOX 309LSi, ELOX SG2209 and ER110S-G with a diameter of 1.2 mm were used. Welding processes were performed in a shielding gas of ArCo18 for SG3 and ER110S-G, and ArCO₂,5 for ELOX SG2209 and ELOX 309LSi, respectively.

All welding operations were carried out with a 6-axis welding robot in order to obtain a constant heat input, since one of the most important criteria in the welding of armor steels is to minimize the mechanical weakening that occurs in heat-affected regions. Here, it is also aimed to prevent operator-related problems and, accordingly, to obtain defect-free welds. Visual inspection, liquid penetrant inspection and radiographic inspection processes were first applied to the obtained welded joints to determine whether there were surface or volumetric welding defects. Subsequently, samples were taken for chemical analysis, metallographic examinations and destructive tests using a liquid-cooled industrial band saw. In order to determine the chemical analysis of the weld metals and welded joints used, chemical analysis tests were carried out with Optical Emission Spectrometer (OES) and Nitrogen Oxygen (N/O) Device. In addition, in order to examine the element changes in the weld area, point chemical analysis tests were carried out on different parts of the weld metal on macro samples with X-ray Fluorescence (XRF) device. In order to observe the micro-structural changes in the weld zone and the heat-affected zone, metallographic examinations were carried out using a stereo microscope, optical microscope and scanning electron microscope. Finally, in order to compare the mechanical performances of the welded joints, Vickers hardness tests, tensile tests, Charpy impact tests and bending tests were applied in accordance with national & international standards. The obtained results revealed that suitable welding seams with minimum defects can be obtained with Robotic MIG/MAG welding. As a result; the highest yield and tensile values were obtained in the welds made with ER110 welding wire, and the lowest yield tensile values were obtained in the welds made with SG3 weld metal. According to the notch impact test results, on the contrary to the tensile test, the lowest toughness values were obtained in welds made

with ER110 welding wire, while the highest toughness values were obtained in welds made with austenitic 309LSi welding wire. In addition, it was observed that the toughness values of the ITAB region in all welded joints were lower than the samples extracted from the weld metal. However, in all welded joints, the toughness values were higher than the 20J value specified for the base material at -40°C.

Keywords: *Armor Steel, Robotic MIG/MAG Welding, Solid Welding Wires, Microstructural Characterization, Destructive Testing, Non-Destructive Testing, HAZ Softening.*



1. GİRİŞ

İnsanlar varoluşlarından itibaren kendilerini korumak zorunda kalmışlardır. İlk önce taş ve sopalardan korunmak için tahtadan kalkanlar kullanılmıştır. Kullanılan silahlardaki gelişmeler ilerledikçe insanlar savunma alanında da gelişme göstermek zorunda kalmıştır. Böylece hayvan derileriyle yapılan ilk zırhlar daha sonralarda yerini metallerden yapılmış zırhlara bırakmıştır [1, 2]. Ateşli silahların bulunmasına paralel olarak zırhlarda da çok farklı boyutta gelişmeler gerçekleşmiştir. Artık çelik, zırhın temel bileşeni haline gelmeye başlamaktadır. Giyilebilir zırh, araç zırhı ve tank zırhı gibi yeni kavramlar ortaya çıkmaktadır [3].

Günümüzde sivil araçlarda veya savunma amacıyla askeri kara, hava, deniz ve uzay araçlarında dışarıdan gelecek tehditlerden korunmak için zırh çeliği kullanılmaktadır. Zırh malzemesi olarak çeliğin tercih edilmesinin en önemli nedenleri daha ekonomik üretim maliyeti, yüksek dayanım, iyi tokluk özelliği ve kaynaklanabilirliktir [4]. Kaliteli bir zırh çeliğinin delinmeye dayanıklı bir mukavemete ve yüksek sertliğe sahip olması gerekmektedir. Bu istenen özelliklerdeki zırh çeliği orta karbonlu çelik grubundan seçilmektedir. Fakat bu seçimi yaparken çelikteki karbon miktarı arttıkça kaynaklanabilirlik azalacağından dolayı optimum bir karbon değeri seçilmelidir. Böylelikle zırh çeliklerinde karbon oranı, tokluk ve kaynaklanabilirlik önemli etkenlerden olduğu görülmektedir [5]. Zırh çeliği plakaları yüksek mukavemet ve tokluğa sahip olabilmeleri için haddeleme esnasında sertleştirme ve temperleme işlemlerine maruz bırakılmaktadır. Bu işlemler sonucu üretilen zırh çeliğinin yüzeyde homojen mekanik değerleri vermesi yani tüm kalınlıkları boyunca aynı sertlik değerlerini vermesi gerekmektedir [6].

Zırh çeliklerinin kaynağında ısı girdisi çok önemli bir yere sahiptir. ITAB' daki mikro yapı malzemenin darbelere karşı gösterdiği tokluk direncini direkt etkilemektedir. Kaynak bölgesindeki yapıda herhangi bir yumuşaklık zırh çeliğinin tasarım gücünü ve balistik performansı düşürmektedir. Zırh çeliğinin sertliği ne kadar yüksek olursa balistik performansının da o kadar fazla olduğu görülmektedir

[7]. Isı girdisi, kullanılan kaynak yöntemine, kaynak hızına, voltaj ve amper parametrelerine göre değişiklik göstermektedir [8].

İncelenen literatür verileri sonucunda zırh çeliklerinin kaynağında ITAB'ın mekanik özelliklerini düşürmeden bir birleştirme yapmanın çok önemli olduğu görülmüştür. Bunun için de kaynakla zırh çeliği birleştirme uygulamalarında en uygun teli seçmek gerekmektedir. Bu çalışmada, Miilux Oy firmasından tedarik edilen 15 mm kalınlığındaki P500 (Protection 500) kalitedeki zırh çeliklerine düşük ısı girdilerinde alın kaynağı yapılmıştır. Kaynak sırasındaki ısı girdisinin de mümkün olduğunca kontrol altında tutulabilmesi ve homojen bir kaynak dikişi elde edebilmek için Robotik MIG/MAG kaynak yöntemiyle GeKa SG3, ELOX 309LSi, ELOX SG2209 ve ER110S-G olmak üzere 4 farklı ilave metal ile farklı plakalara kaynaklar yapılmıştır. Yapılan tüm kaynak çalışmaları çekme, çentik, eğme, makro, mikro, sertlik incelemelerine, görsel, sıvı penetrant, radyografik muayenelere, kimyasal analiz ve SEM analizlerine tabi tutularak incelemeleri yapıp çıkan veriler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Böylece bu tez çalışması ile savunma ve askeri alanda daha da millileşebilmek adına zırh kaynak çalışmalarına uygun kaynak tellerinin belirlenmesi amacıyla dizayn ofislere ve literatüre nümerik veriler kazandırılmış olacaktır.

2. ZIRH ÇELİKLERİ

Günümüzde hala teknoloji ile beraber silahların boyutu küçülüp, gücü ve etki alanı gelişirken bunlara karşı kullanılan zırh teknolojisi de ekonomiklik, hafiflik, yüksek sertlik ve yüksek mukavemet etkenlerinde gelişim göstermek zorunda kalmaktadır. Bu sebeple de özellikle askeri kara taşıtlarındaki zırh çeliklerinden yüksek kaliteli homojen mikroyapıda olması istenmektedir. Kullanılan bu çeliklerin balistik darbelere, delinmeye karşı dirençli fakat bir o kadar da imalat esnasında kesmeye, kaynatmaya karşı elverişli olması istenmektedir. Zırh çeliklerinin darbe ve delinmeye karşı dirençli olması için de yüksek sertlik ve mukavemette olması gerekir fakat 600 HV ve üzerindeki sertliklerde çelikler çok kırılgan bir yapıda olmaktadır. Bu yüzden de bu malzemelerin kimyasal kompozisyonu ve ısıtım işlem aşamaları önem arz etmektedir. Şekil 2.1’de zırh çeliklerinden üretilmiş bir tank görülmektedir [9].



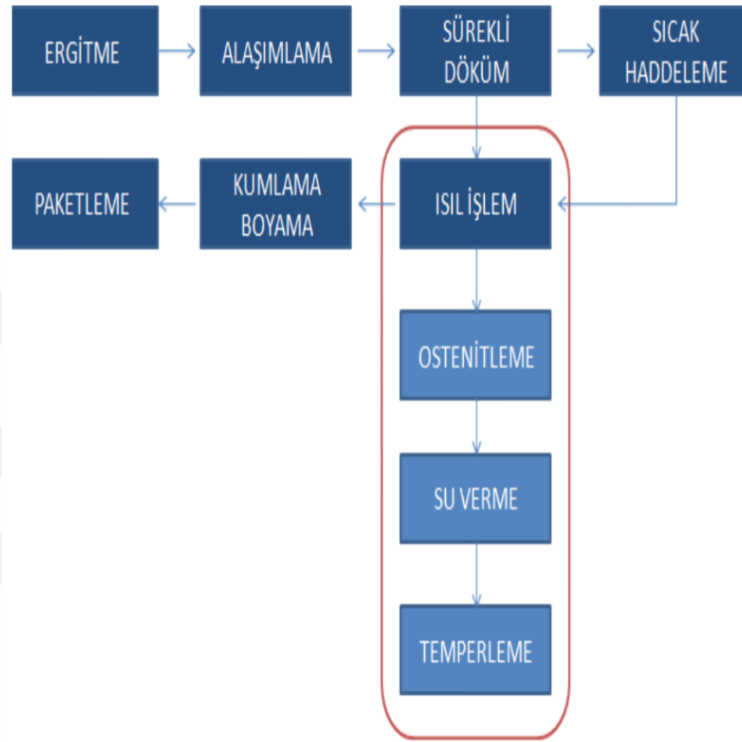
Şekil 2.1: Zırh çeliklerinden üretilmiş tank [9]

Zırh çelikleri, ıslah çeliklerinin kimyasal kompozisyonlarına benzer özellikler göstermektedirler. Alaşımli çelik grubundan olan zırh çelikleri uygulanan ısıl işlemlerden sonra östenitleme ve su verme aşamalarından geçirilmektedir. Ardından temperleme işlemine tabi tutulan zırh çeliklerinin mikro yapısı martenzitik bir hal almaktadır. Yapılan bu bütün işlemlerde sertleştirme ve temperleme işlemlerinden sonra zırh çeliğine tokluk ve mukavemet kazandırmak hedeflenmektedir. Zırh çeliği kaynaklarında önemli unsurlardan birisi olan tokluk değerinin düşmesini engellemek için malzemedeki kükürt ve fosfor oranlarını düşürmek gerekmektedir. Zırh çeliklerinin homojen olarak kabul edilebilmesi için sertliklerinin tüm kalınlık boyunca aynı değerde olması beklenmektedir. Zırh çeliklerinin sertlikleri son gelişmeler sonucunda içerdikleri alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak 500-600 HB sertliklere kadar çıkarıldığı bilinmektedir. Zırh çelikleri için başka bir önemli konu da kara taşıtlarının çetin arazi şartlarında ilerlerken veya balistik darbelere maruz kaldıktan sonra kaynak yerlerinde oluşan yorulmalara karşı dirençli oldukları bilinmektedir. Çünkü zırh çeliklerinin mukavemetini kimyasal özellikler ve yapılan ısıl işlemler kadar plakaların kaynaklı birleşim noktalarının kalitesi de etkilemektedir. Yapılan kaynak sonrasında kaynak bölgesine etki eden ısı ve basınç yüzünden ITAB'daki değişimler zırh çeliğinin mikro yapısını direkt değiştirdiği için kaynaklı birleşim noktalarının kalitesi mukavemet için çok önemli olduğu görülmektedir [10, 11].

2.1 Zırh Çeliklerinin Üretilmesi

Zırh çeliklerinin döküm işlemi ergitme potasındaki ergimiş metale belli oranlarda Cr, Ni ve Mo elementleri eklenerek yapılmaktadır. Dökülen çeliğe, zırh çeliği özelliğinin kazandırılması için haddeleme yapılmaktadır. Sıcak haddeleme işlemi yapılırsa homojen zırh çeliği (RHA), eğer sıcak haddeleme işlemi yapılmazsa yüksek sertlikteki (HHA) zırh çeliği özellikleri kazandırılmaktadır. Ardından bu çeliklere ısıl işlem uygulanır ve sonrasında da 900-950 °C sıcaklıklarda östenitleme işlemine tabi tutulmaktadırlar. Çeliğin bütün yapıları östenit fazına geçtikten sonra hızlı su verme işlemiyle beraber hızlı bir şekilde soğutma yapılmaktadır. Bu sayede martenzit hale dönüşen zırh çeliği çok yüksek bir sertliğe ulaşmaktadır. Martenzit yapıya ulaşan zırh çelikleri çok sert fakat mukavemetleri de bir o kadar düşük olduğu bilinmektedir. Zırh çeliklerinin en önemli özelliklerinden birisi olan yüksek tokluk

değerlerine yani yüksek mukavemete sahip olmaları için 600 °C’lerde temperleme işlemine alınır ve zırh çeliğinin karbon atomları kararlı hale gelene kadar yüksek sıcaklıkta bekletilmektedir. Tüm bu işlem basamakları Şekil 2.2’de gösterilmektedir [12, 13].



Şekil 2.2: Zırh çeliklerinin üretim aşamaları [12]

2.1.1 Zırh çeliklerinin fiziksel metalurjisi ve zırh çeliklerinden beklenen özellikler

Zırhlı ve askeri savunma araçları içindeki insanları her türlü ortam şartlarında, gelebilecek darbelerden koruyabilmek için tasarlanmaktadır. Bu tasarımlar yapılırken de kullanılan zırh çeliği üretimi esnasında östenitleştirme, temperleme, su verme gibi birçok sertleştirme işlemine tabi tutulmaktadır. Yüksek sertliklere ulaşan zırh çeliğinin talaşlı imalatının, kaynaklanabilirliğinin, balistik direncinin yüksek olması beklenmektedir. Çizelge 2.1’de zırh çeliği imalatından beklenen özellikler belirtilmektedir [14, 15].

Çizelge 2.1: Zırh çeliklerine uygulanan imalat işlemleri [14]

	İmalat İşlemleri			
	Isıl İşlem	Kaynak	Talaşlı İmalat	Şekillendirme
Gerekli Metalürjik Özellikler	-Karbon eşdeğerinin düşük olması -Homojen mikroyapı -Düşük hidrojen oranı	-Karbon eşdeğerinin düşük olması -Düşük hidrojen oranı -Kalıntı gerilmelerinin düşük olması	-İşlemeye uygun sertlik	-Yüksek süneklik

Çizelge 2.1’den de zırh çeliklerinde karbon oranının çok önemli olduğu görülmektedir. Karbon oranı arttıkça zırh çeliklerinde aşırı sertlik sonucu kırılganlık artmaktadır. Zırh çeliklerinde sertlik HV 600 değerini aşınca gevrek kırılma gözlenmekte ve malzemenin tokluğu düşük olduğu için de gelebilecek herhangi bir darbeye karşı mukavemeti zayıf olmaktadır. Ayrıca karbon oranı yükseldikçe zırh çeliklerinin kaynaklı imalatında kaynak bölgesinde çatlamalara neden olmaktadır. Oluşan bu çatlamalar da çentik etkisi yaratacağından dolayı mukavemeti düşürmekte ve mekanik özellikleri önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir. Bu sebeplerden dolayı zırh için kullanılan çeliklerde kaynaklanabilirlik açısından da bakıldığında genelde düşük karbonlu çelikler kullanmak daha avantajlı olmaktadır. Fakat bazen kullanılan taktik zırhlı araçlardan istenen özellikler farklı olabilmektedir. Zırhlı araçlarda kullanılan bazı zırh çeliği türlerinin sınıflandırması ve performans değerleri Çizelge 2.2’de gösterildiği gibidir. Kimi araçlardan engebeli arazi koşullarında hızlı hareket edebilmek için düşük tokluk, kaynak bölgesi dayanıklı ve ortalama bir balistik dayanım beklenirken sınıf-1 kalitede zırh çelikleri kullanılmaktadır. Ya da şok darbelere karşı daha fazla dayanım istendiği durumlarda sınıf-2 kalitede zırh çelikleri kullanılırken tanklardan istenen yüksek sertlik, yüksek mukavemet ve yüksek balistik dayanım değerlerini karşılamak için MIL-A-46100 kalitedeki yüksek sertlik zırh çeliği plakaları kullanılmaktadır [14].

Çizelge 2.2: Kullanılan bazı zırh çeliklerinin performans değerleri [14]

Zırh çeliği türleri	Sertlik (HRC)	Tokluk (J/-40°C)	Balistik Performans*	Alaşım Kimyası	Karbon Eşdeğeri
Sınıf-1 (MIL-A 12560)	34-40	21,6	1,00	Mn-Mo-B	0,64
Sınıf-2 (MIL-A 12560)	29-34	28	Şok direnç	Mn-Mo-B	0,64
Yüksek Sertlikte Plaka (MIL-A 46100)	50-53	13,5	1,20	Cr-Ni-Mo	0,85
Döküm (MIL-A 113596)	32-38	16,3	0,87	Cr-Ni-Mo	0,78

*: 14,5 mm mermi çapı (delici)

Çizelge 2.3: Kullanılan bazı zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri [15]

Kimyasal Bileşim (%)	MIL-A 12560	MIL-A 46100	MIL-A 46173
Karbon	<0,30	<0,30	<0,37
Mangan	1,20	0,95	0,90
Kükürt	0,005	0,005	0,005
Fosfor	0,012	0,012	0,012
Silisyum	0,2-0,4	0,2-0,4	0,2-0,4
Nikel	<1,80	<1,85	<3,00
Krom	1,00	1,6	<1,90
Molibden	0,3-0,5	0,5	0,3-0,5

Kullanım sırasında zırh çeliklerinden istenen ihtiyaçlar doğrultusunda haddeleme ve dövme işlemlerinde yukarıdaki Çizelge 2.3'te görüldüğü gibi farklı kalite ve farklı kimyasal bileşimlerin bulunduğu reçeteler uygulanarak üretim yapılmaktadır. Üretimde farklı kimyasal bileşimlerin kullanılmasının yanında uygulanan farklı ısıtım işlem teknikleri ile istenen özelliklerde aşağıdaki tabloda görüldüğü gibi çeşitli kalitelere zırh çelikleri imal edilebilmektedir. Aşağıdaki Çizelge 2.4'te görüldüğü üzere MIL-A 12560 kalite zırh çelikleri homojen haddelenmiş (RHA) standart

kalitede zırh çeliği olarak kullanılmaktadır. Sertliği daha yüksek olan MIL-A 46100 kalite zırh çelikleri ise yüksek sertlikli zırh çeliği (HHA) standart kalitesinde yer alır ve ayrıca balistik koruması standart kalitedeki MIL-A 12560 zırh çeliklerine göre %20 daha fazla olduğu görülmektedir [15].

Çizelge 2.4: Kullanılan bazı zırh çeliklerinin mekanik değerleri [15]

Özellik	MIL-A 12560	MIL-A 46100	MIL-A 46173
Sertlik (HB)	277-388	477-534	477-601
Akma Mukavemeti (MPa)	1150	1100	≥1100
Çekme Mukavemeti (MPa)	1250	1600	≥1700
Uzama (%)	≥10	≥9	≥8
Darbe Tokluk (J/cm²) (-40 °C)	20-30	30-40	30

Yukarıdaki Çizelge 2.4'te görüldüğü üzere farklı standartlardaki zırh çelikleri incelendiğinde de görüldüğü üzere zırh çeliklerine istenen sertlik, mukavemet ve balistik özelliklerin verilebilmesi için farklı ısı işlemler uygulanabilmektedir. Ayrıca zırh malzemesi olarak çeliklerin kullanılmasının en önemli avantajlarından birisi de dayanıklı ve sert olmalarının yanında sünek yapıda oldukları için herhangi bir balistik darbede dağılmadan kalabildikleri için çoklu darbelere karşı da dayanıklılık göstermektedirler [16].

2.2 Türkiyede Zırh Teknolojisi Alanındaki Gelişmeler

Türk Silahlı Kuvvetleri tarafından 2000'li yıllara kadar envanterinde bulunan birçok tank, gemi, zırhlı araç vb. askeri savunma araçlarının tamamını yabancı ülkelere ithal edilmektedir. Fakat 2000'li yıllara gelindiğinde envanterde bulunan zırhlı araçların eskimesi ve teknolojinin de ilerlemesiyle savunma alanındaki gelişmelere ayak uydurmak gerekmektedir. Bu sebeple elimizde bulunan zırhlı araçları geliştirmek ve yenilemek için projeler oluşturulmuştur. Savunma sanayi alanında çalışmalar yapan yerli firmalarımız da bu projeleri tamamlayarak hem Türk Silahlı

Kuvvetleri'mizin envanterindeki askeri araçları son teknoloji ürünlerle yenileyip geliştirmiş hem de zırhlı araçların yapılarını öğrenerek yurt içinde yerli olarak birçok araç, İHA, SİHA ve helikopterin üretilmesine teşvik edilmektedir. Bu sayede hem Türk Silahlı Kuvvetleri zırhlılarının modernizasyon ihtiyaçları giderilmekte hem de savunma sanayi alanında üretim yapan yerli firmaların sayısı, bilgi ve becerisi arttırılmaktadır. Ülkemizde BMC, FNSS, OTOKAR, KATMERCİLER ve NUROL MAKİNA gibi firmaların savunma alanındaki girişimleri sayesinde pek çok zırhlı araç üretimi yapıp Türk Silahlı Kuvvetleri'ne veya farklı ülkelere ihracat yaptıkları bilinmektedir. Tüm bu gelişmelerin yanında komple milli üretim olan zırhlı araçlar ve tankların üretilmesi için en büyük ihtiyacımız olan yüksek mukavemetli zırh üretmek için yeterli teknolojik imkan olmadığı için yurt dışından ithal edildiği görülmektedir [17].

O zamanlarda yapılan tüm Ar-Ge çalışmalarına rağmen yeterli teknolojik altyapı olmadığı için ve zırh çeliklerinin üretim süreçlerinde farklı silah veya mühimmatların balistik darbelerinin de dikkate alınması gerektiğinden dolayı oldukça karmaşık bir süreç olduğu için zırh çeliği üretimi yapılamamaktadır. İhtiyaç olan tüm zırh çelikleri ve onların birleştirilmesinde kullanılan kaynaklı imalat ürünleri (tel, elektrot vs.) İsveç, Fransa ve Almanya gibi ülkelere ithal edilmektedir. Türkiye'nin coğrafi konumu ve sınırlarımızdaki birçok dış tehdidin bulunması nedeniyle savunma sistemlerimizin güçlü olması gerekmektedir. Bu sebeple de zırh çeliğinin üretilip kullanılması için önemli bir açık söz konusu olmaktadır. Türk Silahlı Kuvvetleri'nce yürütülmeye başlanan tamamen yerli ve milli olarak üretilecek olan hava savunma topu, yerli tank, yerli gemi ve yerli denizaltı projeleri ülkemizdeki zırh çeliği üretim açığını gittikçe arttırmaktadır [13]. 2019 yılında Oyak, Miilux firması ile anlaşarak Manisa'da Miilux Oy adında ısıtma işlem merkezi kurmuş ve 15.09.2019 yılında ilk yerli zırh çeliğini üreterek ticari zırh çeliği üretim faaliyetlerine başlamaktadır. Bu çalışmada kullanılan kaynak plakaları da yerli üretime başlamış olan Miilux Oy'un ürettiği P 500 kalite zırh çeliği plakalarıdır [18].

2.2.1 Türkiye'de zırhlı araçların durumu

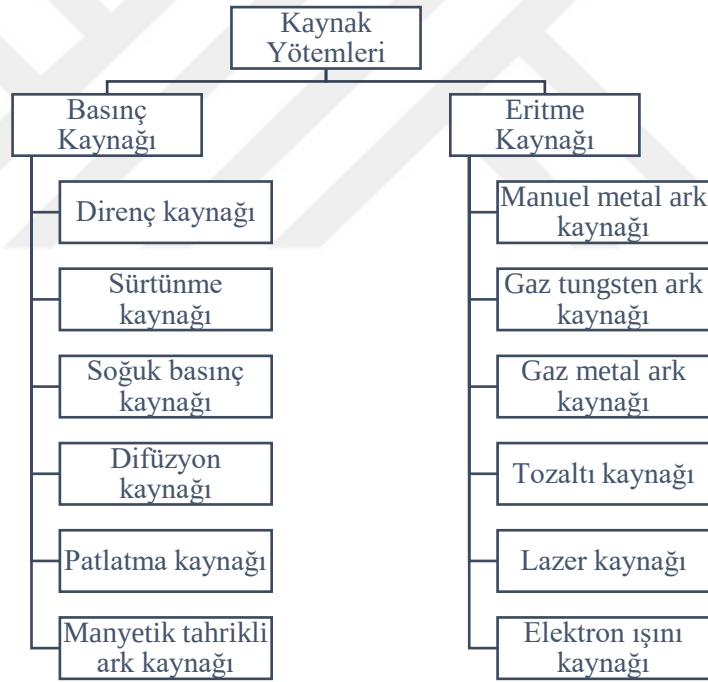
Birinci dünya savaşından sonra 1928 yılında Türkiye ilk tankını Fransa'dan almaktadır. Ağırlığı 6 ton olan Renault FT-17 Tankı savunma ve eğitim amaçlı olarak kullanılmaktadır [19]. 1943 yılında ilk milli tank üretimi için Ford marka

motor tedarik edilmekte ve Kırıkkale’de tank şasesi oluşturulmuş olmasına rağmen üretim altyapısının yeterli olmaması nedeniyle proje devam ettirilememektedir. 1982 yılında zamanın en iyi tankı olarak tanınan Leopard 1 A3T1 tankı Türk Silahlı Kuvvetleri envanterine alınmaktadır. 2009 yılında envanterimizde bulunan tankların modernizasyonu, test ve kalibrasyonu için ana üstlenici olarak yerli bir firma olan Otokar ile anlaşılmış ve tasarımlara başlanmaktadır. Bu proje kapsamında milli imkanlarla geliştirilen Altay tankı yüksek teknoloji ile donatılarak tüm prototip projeleri tamamlanmaktadır. Altay tanklarının seri üretimi için BMC ile 2018 yılında imzalanmaktadır. BMC aynı zamanda Türkiye’de üretilen ilk yerli taktik tekerlekli zırhlı aracıyla savunma konusunda önemli gelişmelere imza atmaktadır [20].



3. KAYNAK

Metal ya da plastikten üretilmiş parçaların birleştirme yapılacak ana malzemenin cinsi veya ergime sıcaklığı değerlerine yakın bir ilave metal kullanarak ya da kullanmadan ısı, basınç veya her ikisinin birlikte uygulanmasıyla yapılan birleştirme işlemine kaynak denmektedir. Malzemelerin; sadece sıcaklık etkisiyle ve ilave metal kullanarak yada kullanmadan birleştirilmesi eritme kaynağı, ilave metal kullanmadan sadece basınç altında bölgesel olarak ısı verip birleştirilmesine basınç kaynağı denmektedir [21]. Şekil 3.1’de kaynak yöntemlerine ait sınıflandırma gösterilmektedir.

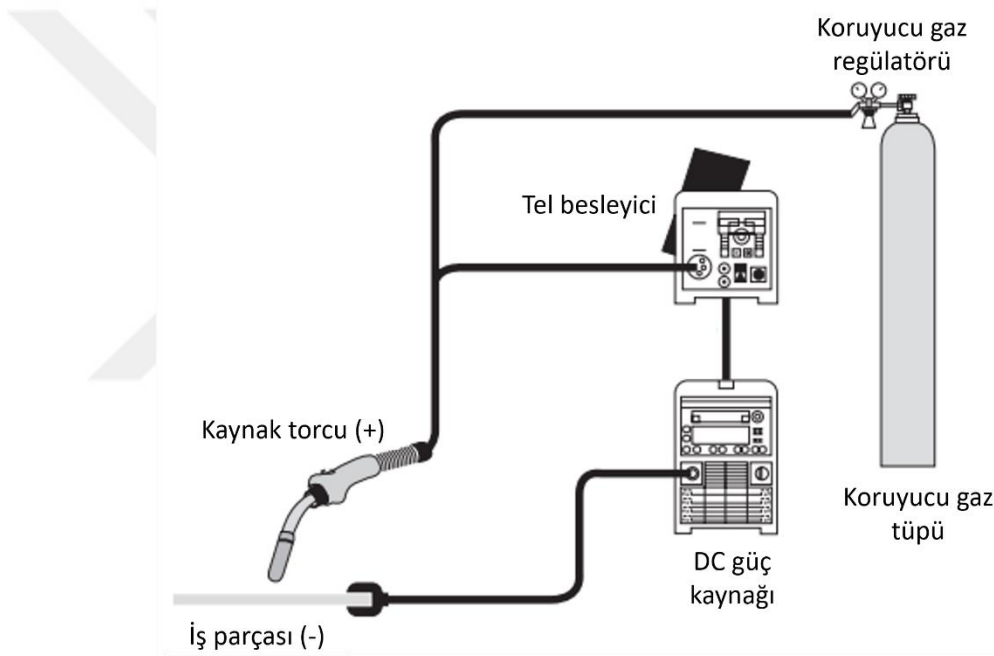


Şekil 3.1: Kaynak yöntemleri [22]

3.1 MIG/MAG Kaynak Prosesi

Gazaltı kaynak yöntemi, kaynak bölgesinin bir gaz tabakası ile sarılıp korumaya alındığı eritme kaynak yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Eğer koruyucu gaz olarak soy gaz (Helyum veya Argon) kullanılıyorsa MIG, CO₂ gibi aktif gazlar kullanılıyorsa MAG kaynağı olarak isimlendirilmektedirler. Genelde demir yapılı

metallerin kaynaklanmasında koruyucu olarak aktif gaz veya karışım gazları kullanılırken demir yapılı olmayan metallerde koruyucu olarak soy gazlar kullanılmaktadır. Kullanılan bu koruyucu gazlar kaynak sırasında ergimiş bölgedeki alaşım elementlerinin havadaki oksijen, azot ve hidrojen gibi gazlar ile etkileşime girmelerini engellemektedir. Ayrıca günümüzde çapak ve sıçrantıyı en aza indirerek daha homojen kaynak dikişleri oluşturabilmek için CO₂, Helyum ve Argon'un belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen karışım gazları da kullanılmaktadır. MIG-MAG kaynaklarında kullanılan temel makine ekipmanları Şekil 3.2'de gösterilmiştir [23].



Şekil 3.2: MIG-MAG kaynaklarında kullanılan temel makine ekipmanları [24]

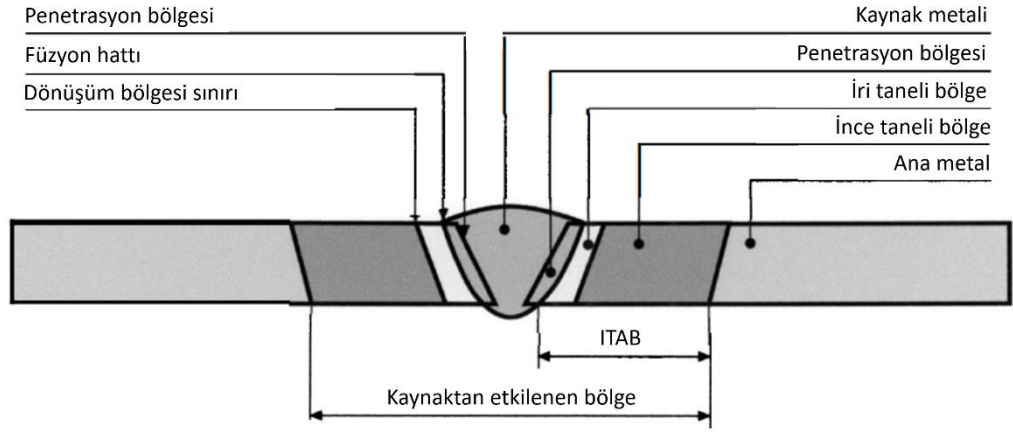
3.2 Kaynak Kabiliyeti

Malzemelerin belli bir kullanım amacı için uygun bir yöntem kullanılarak birleştirilebilmesi ve aynı zamanda malzemenin kullanım yerlerindeki ortam koşullarında yapısal ve mekanik bozulmalara uğramadan görevlerini yerine getirebilmeleri kaynak kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Tanımdan da anlaşılacağı üzere kaynak kabiliyeti, özellikle eritme kaynaklarında sadece kaynaklanacak malzemeye bağlı olmayıp aynı zamanda kullanılan kaynak yöntemine ve kaynak

tasarımına da bağılı olduğu ifade edilmektedir. Kaynak kabiliyetinin yüksek olması için kaynak şartlarının belirli bir aralıkta esnek olarak değışmesine rağmen kaynak uygulamasında ekstra herhangi bir önleme ihtiyaç duyulmadan uygun bir kaynak kalitesi elde edilmesi gerekir. Yüksek mukavemetli çeliklerin kaynak kabiliyetlerinin iyi olabilmesi için; kaynak öncesi ve sonrası süneklik değerlerinin iyi olması gerekmektedir. Ayrıca ana metal ve ilave metalinin karışım bölgesinde tokluğu yüksek olan bir kimyasal bileşim oluşturulmalıdır [25].

Bir kaynak işlemleri yaparken 3 temel şart bulunmaktadır. Bunlar; kaynaklama maliyetinin ekonomik olması, kaynaklama sonrası görevini tam olarak yerine getirebilmesi ve uzun süre kullanılabilir olması olarak tanımlanmaktadır. Bu şartların sağlanabilmesi malzeme, imalat ve konstrüksiyon faktörlerine bağılıdır. Bu faktörler bir malzemenin kaynak kabiliyetini direkt etkilemektedir. Kaynaklı birleştirme işlemlerinde, özellikle de ergitme kaynağında aslında birleştirme esnasında ana malzemenin yapısı bozulduğu için kaynak bölgesinden yeterli bir kalite almak zorlaşmaktadır. Bunun nedenleri; Kaynak sırasında, mekanik özellikleri en uygun seviyelere getirilerek ısıtıl işlem görüp haddelenmiş yapılar birleştirme için uygulanan ısı girdisi yüzünden tekrar ergitilince iç yapıları değışebilmektedir. Kaynak sırasında yeterli koruma yapılamazsa atmosferden istenmeyen gazların teması yüzünden çatlak riski oluşabilmekte ve birleşim bölgesindeki istenmeyen kalıntılar yüzünden mekanik özellikler değışebilmektedir. Kaynak teknolojileri gelişse de hala tamamen otomatik kaynaklama işlemleri yapılamadığı için insan el becerilerine bağılı olan kaynaklı birleştirmelerde farklı kalitelerde sonuçlar oluşabilmektedir. Kaynakla birleştirme işlemlerinin kalitesini değerlendirmek için kullanılan muayene yöntemleri sınırlı bilgiler vermektedir [26, 27].

Kaynak kabiliyetinin iyi olması için birleştirme sonrası Şekil 3.3'te gösterilen kaynak bölgesi yapısının en az ana malzemenin mukavemet, korozyon direnci vb. özelliklerinde olması gerekmektedir.



Şekil 3.3: Kaynak bölgesi görüntüsü [28]

3.2.1 Zırh çeliklerinin kaynak kabiliyeti

Zırh çeliklerinin kaynağından önce plakaların testerede kesilirken oluşabilecek stres artışlarını minimuma indirebilmek için yüzeyler taşlanmaktadır. Daha sonra da kaynak ağzında oluşabilecek çatlakların kontrolü için sıvı penetrant veya manyetik parçacık muayene işlemleri yapılmaktadır. Zırh çeliklerinin kaynağında çekme mukavemeti $551,6 \text{ N/mm}^2$ değerlerinde ve uygun özelliklerde östenitik veya ferritik paslanmaz çelik ilave metaller kullanılabilir. Plakaların kaynağında ana metal sertliğini en az oranda etkileyecek parametre değerleri kullanılmaktadır. İyi bir balistik mukavemet elde edebilmek için kaynak bölgesindeki ITAB'dan itibaren en fazla 15.9 mm mesafeye kadar sertlik değerlerinin ana metalin sertlik değerlerini yakalaması gerekmektedir [29].

Zırh çeliklerinin kaynaklanabilirliğinde karbon içeriği çok önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple de zırh çeliklerinin üretimi esnasında Amerikan MIL-A 46100 standardında karbon eşdeğeri aşağıda verilen formül 3.1'e göre hesaplanması gerektiği belirtilmektedir. Verilen bu karbon eşdeğeri formülü ile hesaplanan değerin %0,8'den küçük olması gerekmektedir [30].

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

Zırh çeliği kaynaklarında önemli hususlardan birisi de ısı girdisi olduğu görülmektedir. Zırh çeliğinin mikro yapısının ve mukavemet özelliklerinin bozulmaması için ısı girdisinin olabildiğince düşük tutulması istenmektedir. Kaynak makinesinden ayarlanan akım ve voltaj değerleri ile ısı girdisi değiştirildiği için akım ve voltaj değerlerini minimumda tutmak ısı girdisini de düşürmektedir. Aşağıda

formül 4.2’de verilen ısı girdisi formülündeki η (termal verimlilik faktörü) yapılan kaynak yöntemine göre farklılık göstermektedir [31].

$$Q = \frac{\eta \times U \times I \times 60}{v \times 1000} \quad (3.2)$$

η : Termal verimlilik faktörü (birimsiz)

U : Gerilim (V)

I : Amper (A)

V : Kaynak hızı (mm/dak)

Zırh çeliklerinden beklenen en önemli özellikler olan yüksek mukavemet ve tokluk yanında kaynak kabiliyetlerinin de iyi olması istenmektedir. Zırh çeliklerinin kaynağında dikkat edilecek başlıca hususlar;

- Hidrojen çatlaması (soğuk çatlama)
- Porozite
- Sıcak çatlak oluşumu
- Lameler yırtılma
- Sıvılaşma çatlaması şeklindedir.

Hidrojen çatlamasına neden olan etkenlerin başında; kaynak sırasında kullanılan parametrelere bağlı olan ısı girdisi, ergime bölgesinde veya ana metalde hidrojen bulunması, kaynak bölgesinin kirli, yağlı veya temiz olmaması, kaynak plakalarının kalınlığı ve kaynak bölgesine etkiyen çekme gerilmeleri olarak belirtilmektedir. Zırh çeliklerinde C_{eq} değeri arttıkça çeliğin sertleşmeye yatkınlığı ve buna bağlı olarak da hidrojen çatlaması riski o kadar fazla olmaktadır. Levha kalınlığı arttıkça ve kaynak yapılacak plaka kökleri arasındaki mesafe arttıkça hidrojen çatlağı riski artmaktadır.

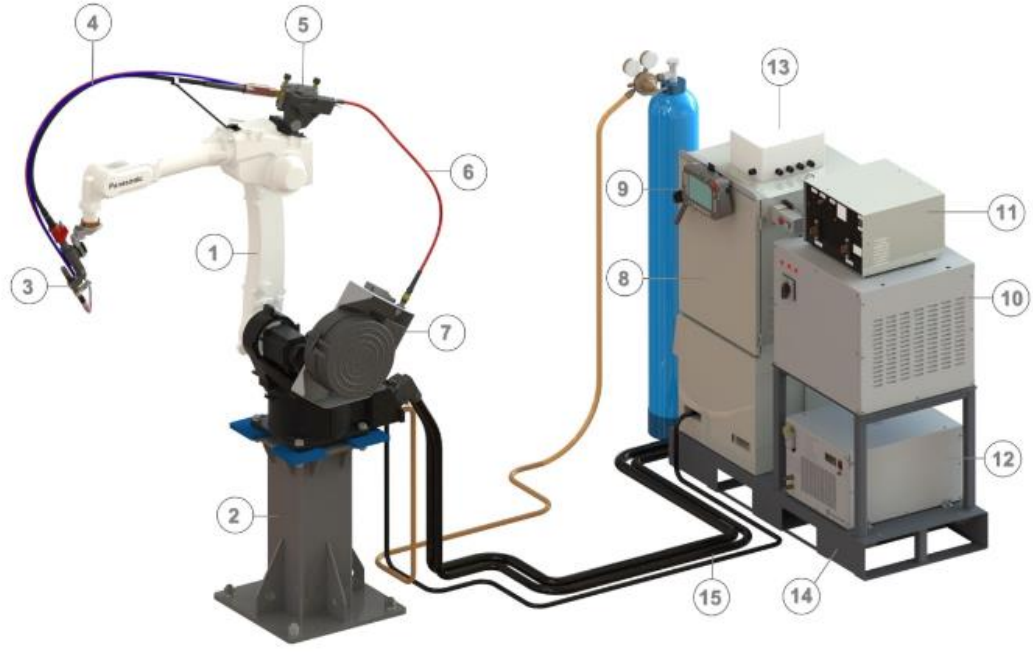
- Porozite; kaynak sırasında ergimiş bölgeyi kaplayan koruyucu gazların (nitrojen, hidrojen) kaynak dikişine sızması ve hızlı soğuma nedeniyle oluşan yüksek katılaşma sonucunda gazların kaynak dikişinde hapsolmesi sonucu oluşmaktadır.

- Sıcak çatlama; yüksek karbonlu çeliklerde görülen bu çatlama kaynak sırasında ergimiş bölgedeki gerilmelerin fazla olması sonucu oluşmaktadır.
- Lameler yırtılma; kaynaklanan plakalar kalınlıkları boyunca gerilmelere uğradığında ana metalde oluşan yırtılmalarlardır.
- Sıvılaşma çatlama; kaynak sırasında ITAB bölgesinde (kısmi erimiş bölge) gerçekleşen çatlamalardır [32].

3.3 Robotik Kaynak

Günümüzde artan nüfus artışı ve gelişen teknoloji ile birlikte artan gereksinimlere karşılık verebilme ve üretimde verimi arttırmak amacıyla otomasyon sistemleri kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Artan bu gereksinim Kaynak teknolojisi ile paralellik göstermektedir. Kaynak işlemleri sırasında robot kullanımı yaygınlaşmaktadır. Sanayide kaynak robotlarının kullanılmasının amaçları, üretim maliyetini düşürmek ve üretimin kalitesini yükseltmektir. Yapılması zor olan kaynaklar ya da kaynak operatörüne ergonomik açıdan uygun olmayan kaynak işlemlerinde operatöre kolaylık sağlanması açısından robot teknolojileri kullanılmaktadır. Robotik kaynak yöntemi kullanılarak normal bir kaynakçıdan dört kata kadar daha hızlı bir şekilde kaynaklama yapılabilmekte ve yapılan kaynakların birbirinden farkı yok denecek kadar az olmaktadır [33].

Robot kullanılarak nokta kaynağı, MIG/MAG kaynağı, TIG ve plazma kaynakları yapılabilir. Robotik sistemlerde üç veya daha fazla komutlandırılabilir eksen sayesinde hızlı, tekrarlanabilir ve kaliteli bir şekilde MIG/MAG kaynakları uygulanabilmektedir. Ayrıca kaynak yaparken rahatlıkla ısı girdisi, akım, gerilim, kaynak hızı, kaynak genişliği vb. birçok parametre kolaylıkla takip edilebilir hale gelmektedir. Bir kaynakçının 70 cm/dak hız ile kaynaklayabildiği bir parça robotik kaynak yöntemi kullanılarak yüksek kalitede ve 270 cm/dak hızlara çıkılarak kaynaklanabilmektedir. Bu sayede üretim kalitesi ve hızı artarken üretim maliyeti de azalmaktadır [34]. Şekil 3.4'te bir robotik kaynak ünitesinin görünümü ve ekipmanları gösterilmektedir.



1-Robot Kol
2-Robot Montaj Sehpası
3-Kaynak Torcu ve Şok Sensor
4-Torç Kablosu
5-ServoTel Sürme Ünitesi

6-Tel Taşıyıcı Kılavuz Hortum
7-Tel Sepet Taşıma Aparatı
8-Kontrolör ve Kaynak Mak.(Bütünleşik)
9-LCD Kumanda Ünitesi
10-Trafo

11-Yüksek Frekans Ünitesi
12-Su Soğutma Ünitesi
13-Kumanda Kutusu
14-Metal Taşıyıcı Palet
15-Kablo Grubu

Şekil 3.4: Robotik kaynak ekipmanları [35]

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Zırh çeliklerinin kaynaklanmasında ısı girdisinin önemi çok büyüktür. Isı girdisinin artmasıyla, zırh çeliği plakasının iç yapısı bozulduğu için kaynaktaki ITAB bölgesinin sertliği düşer ve zırhın balistik performansı azalır. B. Savic ve arkadaşları [36] 2021 yılında yaptığı çalışmada, zırh çeliklerinin kaynağında uygun ısı girdisini bulabilmek için 1,29 kJ/mm ve 1,55 kJ/mm değerlerinde GMAW yöntemi kullanılarak ER307 ilave metal ile kaynak yapmıştır. Kaynak plakaları kök aralıkları 4 mm ve 55° V kaynak ağzı açılarak hazırlanmıştır. Isı girdisinin 1,55 kJ/mm alınmasıyla ITAB bölgesindeki sertlik düşmüştür. 1,29 kJ/mm ısı girdisinde hazdaki maksimum sertlik 523 HV iken, 1,55 kJ/mm ısı girdisinde yapılan kaynakta hazdaki maksimum sertlik 490 HV olarak ölçülmüştür. Sünek bir bölge oluştuğu için bu bölgenin kaynağının balistik performansı da azalmıştır.

K. Geric ve arkadaşları [37] yaptıkları çalışmada, askeri araçların yapımında kullanılan yüksek sertlikteki HHA zırh çelikleri içeriklerindeki yüksek karbon oranlarına sahip oldukları için kaynak kabiliyetlerini iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Yapılan bu çalışmada ısı girdisinin yapılan kaynağın sertliğine ve kalitesine etkileri incelenmiştir. Yüksek sertlikteki çelik, 1 mm tel çapında östenitik ER307 ilave metal ve robotik GMAW kaynak yöntemi kullanılarak ortalama 1,4 kJ/mm ısı girdisi parametreleri ile iyi derecede kaynaklanmıştır. Makro yapının sertlik değerlerine bakıldığında ITAB bölgesindeki sertlik 378 HV'den başlayıp ana metale doğru yaklaştıkça 521 HV'lere kadar çıkmıştır. MIL-STAN-1185 standardına göre sertlik değerleri ITAB'dan sonraki kabul edilebilir maksimum aralık olan 15,9 mm mesafede ana metalin sertlik değerlerini yakalayarak kendini toplayabilmiştir.

E. R. S. Souza ve arkadaşları [38] 2021 yılında yaptıkları çalışmalarda, MIL-DTL-46100 E standartlarına göre üretilmiş 8 mm kalınlığındaki zırh çeliklerine 1,2 ve 0,8 kJ/mg'lık iki farklı ısı girdisinde kaynaklar yapılmış ve testlere tabi tutulmuştur. Yapılan incelemelere göre düşük ısı girdisiyle yapılan kaynakta darbe dayanımının daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Yapılan kaynakta ITAB'ın iyi derecede balistik

performansa sahip olmasına rağmen ana metalin sertliği 503 HV iken ITAB'ın sertlik değeri 445 HV'de kalmıştır.

Zırh çelikleri kaynağında ısı girdisinin, ITAB için önemli bir etken olduğu görülmüştür. Fakat ısı girdisinin de optimum bir değeri vardır. Bu optimum değer altına düşüldüğünde kaynak sırasında plakalarda ergime noksanlığı hataları ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden farklı düşük ısı girdili kaynak yöntemleri kullanılarak ITAB'ın daraltılıp mukavemetin artırılması için çalışmalar yapılmıştır.

D. Pacek ve arkadaşları [39] 2020 yılında yaptıkları çalışmada, iki farklı marka olan Armox500 T ve Armstal 500 zırh çeliklerinin lazer kaynağıyla kaynaklanması için uygun parametreler ile kaynak işlemlerinin yapılması ve makro, mikro incelemeleri yapılmıştır. Lazer kaynağında ısı girdisinin düşük olması nedeniyle ITAB'ın genişliği daha dardır. Yapılan bu kaynaklarda kaynak bölgesine en fazla 8 mm mesafede ITAB genişliği oluşmuştur. Bu bölgenin balistik testlerde daha hassas olduğu görülmüştür. Elde edilen ITAB'ın normalde yapılan farklı türde kaynak yöntemlerine göre daha dar olduğu gözlenmiştir.

P. Kah ve arkadaşları [40] 2014 yılında yaptıkları bu çalışmada ultra yüksek mukavemetli çeliklerin kaynaklanmasını incelemişlerdir. Lazer kaynağı, elektron ışını kaynağı, direnç kaynağı ve geleneksel ark kaynağı ile kaynak denemeleri yapılarak en iyi kaynak yöntem ve parametreleri incelenmiştir. Yüksek mukavemetli zırh çeliklerinin başarılı bir şekilde kaynak edilebilmesi için çatlama, ITAB'da yumuşama ve kırılmalık gibi kusurlardan kaçınmak gerektiği anlaşılmıştır. Yapılan kaynaklarda gözden geçirilmesi gereken en önemli parametreler ısı girdisi ve soğuma hızı olduğu görülmüştür. Isı girdisi yükseldikçe soğuma hızının da o kadar yavaşladığı belirlenmiştir. Ultra yüksek mukavemetli çeliklerin lazer kaynağı, elektron ışını kaynağı, direnç kaynağı ve geleneksel ark kaynağı gibi yöntemlerle farklı parametreler kullanılarak kaynaklanabileceği gözlenmiştir.

B. Mvola ve arkadaşları [41] 2016 yılında yaptıkları çalışmada, S335K2+N ve S1100QL olmak üzere iki yüksek mukavemetli çeliğin kaynaklanabilirliği ve kaynak kalitesi incelenmiştir. Bu iki farklı zırh çeliğinin kaynaklanması için uygun kaynak teli seçimi, uygun kaynak yöntemi ve gerekli ısı işlemler üzerine çalışmalar yapılmıştır. ITAB bölgesinin ve kaynağın korozyon direncinin alaşım elementlerine

ve yüksek mukavemetli ana metalin cinsine bağılı olduğu görülmüştür. Karbon eşdeğerinin kaynağın sertliğini, kırılma tokluğunu değerlendirmek için önemli bir kriter olduğu görülmüştür. Ön ısıtma ve ara ısıtma sıcaklık ve süreleri çok fazla olduğu zaman mikro yapıya zarar verecek kadar ısı enerjisi girdileri üretebilmektedirler. İlave metal olmadan yapılan kaynaklarda çatlak oluşması ve sert bir mikro yapı oluşumu alaşım elementlerinin eksik olmasından ileri geldiği görülmüştür.

A. Saxena ve arkadaşları [42] 2021’de yaptıkları çalışmada yaptıkları literatür araştırmaları sonuçlarına göre SMAW, GTAW ve FCAW ile kaynaklanan zırh çeliklerinden en iyi balistik sonuçları SMAW ile yapılan kaynak türünün ve en kötü balistik sonucu da FCAW kaynak türünün verdiğini gözlemlemişlerdir. Bu sebeple de bu çalışmada SMAW yöntemiyle kaynaklı birleştirmeyi tercih etmişlerdir. SMAW yöntemiyle 25 mm kalınlıktaki ArmoX 500T zırh çeliğinin düşük hidrojenli ferritik ilave metal ve östenitik paslanmaz çelik kaynak metalleri ile kaynağını incelemişlerdir. Darbelere karşı dayanım açısından düşük hidrojenli ferrit ilave metalinin kaynağı daha uygun değerler vermiştir. Düşük hidrojenli ferritik ilave metalinin kaynağında, östenitik paslanmaz çelik ilave metal kaynağına göre daha tok bir yapıda değerler olduğu görülmüştür.

W. C. Evans [43] 2019 yılında yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında, sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) ile zırh çeliği kaynağı yapmıştır. Bu çalışma 125 RPM devir, 4 inç/ dak ve z yönünde 29.000 lbf kuvvet değerlerinde yapılmış ve yeterli bir yüzey kalitesi elde ederek hatasız bir kaynak yapılmıştır. FSW yöntemi orta sertlikteki çeliklerin birleştirilmesinde rahatlıkla kullanılabilir. FSW yönteminin bir diğer avantajı da kaynak bölgesinin sertlik değerlerinin de ana metalinkine yakın çıkmasıdır.

G. Magudeeswaran [44] 2010 yılında yaptığı çalışmada, LHF (düşük hidrojenli ferritik) kaynak telleri kullanılarak SMAW (manuel) ve FCAW (yarı otomatik) yöntemlerle kaynatılmış zırh çeliklerinin dinamik kırılma tokluğunu incelemiştir. Bu çalışmada 14 mm kalınlıkta AISI 4340 çeliği kullanılmıştır. SMAW yöntemiyle yapılan kaynağın dinamik kırılma tokluğu, FCAW yöntemiyle yapılan kaynaktan daha yüksektir. Bunun nedeni ilave metaldeki iğnemi ferrit yapıların oluşumudur.

G. Turichin ve arkadaşları [45] 2018 yılında yaptığı çalışmada, LAWH (lazer hibritli ark kaynağı) ile Hardox, Weldom ve ArmoX 600T yüksek mukavemetli çeliklerinin kaynaklanabilirliğini incelemişlerdir. Bu incelemede kullanılan dolgu metallerinin kimyasal bileşimlerinin kaynak bağlantısına mikro ve mekanik özellikler olarak etkileri araştırılmıştır. Yapılan kaynaklarda Weldom ve Hardox cinsi çeliklerinin numuneleri incelendiğinde ana metale daha yakın mukavemet sonuçları verdiği gözlenmiştir. ArmoX 600T cinsi numunede ise BM'ye (ana metal) göre %14 oranında daha az dayanım olduğu görülmüştür. İki ısı kaynağı arası mesafenin artması ilave metalin bileşim elementlerinin ana metalinkiyle karışmasını azaltmıştır. Böylece ark ve lazer bölge yapısı ile ilave metal bölgesi oluşur.

Kaynak plakası tasarımına göre kaynak ağız açıları ve plaka kalınlıklarına göre de zırh çeliklerinin kaynak kaliteleri oldukça değişiklik gösterebilmektedir. Bu kapsamda Kurt [46] 2016, MIL A 46100 zırh çeliğinin V kaynak ağız tasarımıyla 30°, 36°, 42° ve 48° olmak üzere 6 farklı kaynak ağız açısında MIG kaynak yöntemiyle 307Si östenitik paslanmaz çelik ilave metal ile kaynaklanması incelenmiş ve kaynak yapılan numunelerin sertlik taraması yapılarak zırh çelikleri kaynağı için en uygun kaynak ağız açısının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda en yüksek çekme dayanımı 773,8 MPa değeri ve en yüksek sertlik değerleri 48°'lik ağız açısında hazırlanan numunelerden elde edildiği gözlenmiştir.

Kara 2012 [47] Ramor 500 zırh çeliklerinin 307Si ilave metal kullanılarak MIG kaynak yöntemiyle kaynağı yapılmıştır. Bu çalışmada Y, X, y olarak üç farklı kaynak ağız çeşidiyle kaynaklar yapıp kaynak ağız çeşidinin mukavemete etkisi incelenmiştir. Yapılan kaynaklar sonucunda en iyi mukavemet değerlerini X kaynak ağız tasarımıyla yapılan numunenin verdiği görülmüştür.

D. Arsic ve arkadaşları [48] 2018 yılında yaptığı çalışmada, ArmoX 500T zırh çeliğinin alın kaynağı, köşe kaynağı ve eklemeli köşe kaynağı olmak üzere 3 farklı bağlantı konfigürasyonu ile kaynakları yapıp balistik test sonuçları incelenmiştir. Zırhlı araç tasarımında ilave metalin mümkün olduğunca balistik darbelerden gizlenmesi ve mutlaka alın bağlantılarından kaçınılması gerektiği anlaşılmıştır.

M. Tümer ve arkadaşları [49] 2022 yılında yaptığı çalışmada, farklı pozisyonlarda alın kaynağı uygulamalarıyla UHSS (ultra yüksek mukavemetli çelik) çeliklerin

kaynaklarını mekanik ve mikro olarak incelemişlerdir. Robotik MAG yöntemiyle X kaynak ağızlı ve 60 derecelik açıyla işlenen parçalar Voelstalpine alform 1100 xtreme ve Bohler alform 960-IG ilave metalleriyle kaynaklanıp incelenmiştir. PF (dikey yukarı kaynaklarda) kısa ark kullanımından kaynaklanan hızlı soğuma ve sabit ısı dağılımı sayesinde kaynak bölgesinin her yerinde benzer sertlik değerlerinin görülmesini sağlamıştır.

T. Borvik ve arkadaşları [50] 2008 yılında yaptıkları çalışmada, 6 ve 12 mm sac kalınlıklarında Weldox 500E, Weldox 700E, Hardox 400, Domex Protect 500 ve Armox 560 T olmak üzere 5 farklı yüksek mukavemetli çeliğin balistik testleri yapılarak dayanımları incelenmiştir. Yapılan incelemelere göre gereksinimleri karşılayacak çeliklerin Domex Protection 500 ve Armox 560T zırh çelikleri olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada balistik testlerde kullanılan küçük silahlar için zırh çeliğinin mukavemetinin süneklikten daha önemli olduğu görülmüştür.

O. Çoban ve arkadaşları [51] 2021 yılında yaptıkları çalışmada, zırh çeliklerinde sac kalınlıklarının, köşe kaynaklarının sertlik ve mikroyapı değerlerine etkisini incelemişlerdir. Protection 500 zırh çeliklerinin 6 mm, 10 mm ve 15 mm plakaları hazırlanmış ve bu plakalar GMAW yöntemiyle ferritik ER110 S-G ilave metali kullanılarak kaynatılmıştır. Kaynak plakalarının kalınlığı arttıkça soğuma hızının arttığını ve buna bağlı olarak da sertlik değerlerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, sac kalınlığı arttıkça HAZ genişliğinin azaldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak yapılan 3 kaynaklı birleştirmenin hepsinde düşük ısı girdisi ile yumuşama bölgesi genişliğinin askeri standartlarda belirtilen 15,9 mm'nin altında olduğu yani bu mesafeden önce ana metalin sertlik değerlerine ulaşıldığı görülmüştür.

M. Bednarek ve arkadaşları [52] 2016 yılında yaptıkları çalışmada farklı marka zırh çeliklerinin sahip oldukları farklı karbon eşdeğerlik oranlarının kaynaklanabilirliğe etkilerini incelemişlerdir. Buna göre Armstal 500, Armox 500 T ve S960QL zırh çeliklerinin kaynağında, karbon eşdeğerinin ve kimyasal bileşiminin kaynaklanabilirliğe etkilerini incelenmektedir. İncelenen verilere göre sertleştirilmiş çeliklerin iyi derecede kaynaklanabilirliği için Ceş değerinin en fazla %0,72 olması gerektiği görülmüştür. İncelenen veriler sonucunda 100 gr kaynak dolgusu için 5 cm³'ün altında bir hidrojen içeriği elde edilmesi kaynak kalitesi için uygunluk sınırı olduğu görülmüştür. Ayrıca kalınlığı 30 mm ve üzerinde olan plakalara ön ısıtma

yapılması, kaynak yaparken de pasolar arasında 200 °C'ye kadar ısıtma yapılması gerektiği görülmüştür. İyi bir kaynak kalitesi için hidrojen değerlerinin düşük olması gerektiği belirtilmiştir.

Zengin [53] 2010 Armour 500 zırh çeliklerini oda sıcaklığı, 150 °C, 250 °C ve 400 °C olmak üzere dört farklı ön ısıtma sıcaklığı ile kaynaklayarak zırh çelikleri için optimum ön ısıtma sıcaklığını bulmayı hedeflemiştir. Yapılan kaynak denemeleri incelendikten sonra ön ısıtma sıcaklığı arttıkça malzemenin akma ve çekme gibi mekanik özelliklerinin zayıfladığı fakat sünekliğinin arttığı görülmüştür.

Merzalı [54] 2013 zırh çeliklerinde kaynak sonrasında ITAB'ın mekanik özelliklerinin ısıtma işlemi uygulanarak optimizasyonu üstünde çalışmalar yapmıştır. Kaynaklı numunenin ısıtma işlemi sonrasında sertlik ve tokluk değerleri yükselmiştir. Isıtma işlemi yapılmış numunenin çekme testinde kaynak bölgesinin ortasından koptuğu, ısıtma işlemi yapılmayan numunenin de ITAB' dan koptuğu gözlenmiştir. Yani kaynaktan sonra ısıtma işlemi uygulanan parçalarda düzensiz sertlik geçişleri giderilmiş, fazlarda homojenlik sağlanmış ve tokluk değerleri iyileştirilmiştir.

Taşkaya [55] 2018 Ramor 500 zırh çeliklerine tozaltı kaynağı ile 307Si ilave metali kullanarak tel ilerlemesinin 20, 25 ve 30 cm/dk hızlarındaki değişiminin nüfuziyete etkisi incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda tel ilerleme hızı arttıkça kaynak dikişinin genişlik ve yüksekliği azalırken çekme mukavemeti değerleri artmaktadır. Fakat tel ilerleme hızının değişmesiyle sertlik değerlerinde herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir.

G. Magudeeswaran ve arkadaşları [56] 2013 yılında yaptıkları çalışmada, yüksek mukavemetli çeliklerde hidrojen nedeniyle çatlama riskini engellemek için genelde hidrojenden daha yüksek çözünme sıcaklığında çözünen östenitik paslanmaz çelik ilave metal kullanılırken maliyeti düşürmek için uygun parametrelerde düşük hidrojenli ferritik ilave metallerin kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Bunun için 14 mm kalınlıktaki Q&T yüksek sertlik ve mukavemetteki AISI 4340 çeliğini düşük hidrojenli ferritik ilave metalleri kullanılarak ITAB bölgesindeki zayıf balistik özellikleri arttırmayı amaçlamışlardır. Bu çalışmada AWS E11018-M (SF) ve AWS E110T5-K4 (FF) ferritik ilave metalleri kullanılmıştır. Ferritik ilave metallerini kıyaslamak için kullanılan östenitik ilave metalleri de AWS E307 (SA) ve AWS

E307 T1-1 (FA) olarak belirlenmiştir. Ferritik ilave metallerinin kullanımıyla beraber çekme mukavemeti, ilave metal sertliği ve kaynak çatlağı büyüme direnci artmıştır. Elde edilen en yüksek çekme mukavemetini 860 MPa ile AWS E11018-M (SF) ferritik ilave metali vermiştir. ITAB'da elde edilen en yüksek sertlik değerini de 443 HV ile AWS E11018-M (SF) ilave metali vermiştir. Bu nedenle zırh çeliği kaynaklarında düşük hidrojenli ferritik ilave metallerinin kullanımı uygun bulunmuştur.

C. Mandolino ve arkadaşları [57] 2013 yılında yaptıkları çalışmada, yüksek mukavemetli Toolox 33 çeliğinin gaz metal ark kaynağıyla (GMA) uygun bir ilave metal kullanarak en iyi kaynak profili, mikrosertlik ve mikroyapıları oluşturabilmeyi hedeflemiştir. Bu çalışmada metal özlü, rutil özlü ve standart olmak üzere 3 farklı ilave metal kullanılarak 1 kJ/mm ve 2.05 kJ/mm ısı girdilerinde kaynaklar yapılmıştır. Yapılan tüm çalışmaların sonucunda mekanik özellikler bakımından en iyi sonucu rutil özlü ilave metal vermiştir.

P. Sivakumar ve arkadaşları [58] 2020 yılında yaptıkları çalışmada, 15 mm et kalınlığında ultra yüksek mukavemetli çelik levhaların Östenitik fazda daha fazla miktarda hidrojen çözünmesi sorununa yönelik tek çözüm olan Östenitik paslanmaz çelik ilave metallerinin Cr/Ni eşdeğer oranına etkisini araştırmışlardır. Kaynaklı malzemelerde Cr/Ni eşdeğerlerindeki oranın artışıyla beraber ferrit miktarının da artması kaynak bölgesindeki mikroyapıyı değiştirmektedir. İlave metaldeki ferrit miktarı arttıkça malzemenin darbe tokluğu azalmaktadır. Bu çalışmada 5 farklı Östenitik paslanmaz çelik ilave metal kullanılmış ve en yüksek darbe tokluğu değerleri 98 J değeri ile E310-16 (ASS1) ilave metal kullanılan kaynak numunesinden elde edilmiştir. 66 J değerindeki en düşük darbe tokluğu da E307-26 ilave metal kullanılan kaynak numunesinden elde edilmiştir.

I. Garasic ve arkadaşları [59] 2018 yılında yaptığı çalışmada 45° kaynak ağızlı 8 mm tabaka kalınlığındaki Armox 500 T plakaların 3 farklı ilave metal kullanılarak kaynatılmasını incelemiştir. Çalışmada kullanılan ilave metaller genel özellikleri bakımından östenitik paslanmaz çelik (ASS) ve sert dolgu (HF) olarak seçilmiştir. Östenitik paslanmaz çelik (ASS) ilave metal MIG yöntemiyle 1,2 mm tel çapında 309 LSi. Sert ilave metal (HF) olarak 1,6 mm tel çapında FD 739 ve diğer sert ilave metal (HF) olarak da 1,2 mm tel çapında DOx30 kullanılmıştır. Sert dolgu kaynak

pasosu atıldıktan sonra üst üste sert dolgu pasoları atıldığında sertlik düşüşü ortaya çıkmıştır. Yapılan bütün kaynak parçalarında ITAB bölgesinde çok düşük darbe direnci oluşmuştur. En iyi darbe dayanımının sağlanabilmesi için darbe enerjisinin geniş bir alana dağıtılması gerektiği yani sert dolgu kaynağının üstüne daha düşük sertlikte darbe absorbe etme yeteneği olan koruma katmanını da yapılması gerektiği görülmüştür.

G. Magudeeswaran ve arkadaşları [60] 2018 yılında yaptıkları çalışmada, ASS (östenitik paslanmaz çelik), LHF (düşük hidrojenli ferritik çelik) ve HNS ilave metalleri kullanılarak SMAW (korumalı metal ark kaynağı) ve FCAW (özlü ark kaynağı) kaynak yöntemleri ile 14 mm sac kalınlığında AISI 4340 serisi zırh çeliklerinin farklı konfigürasyonlarla kaynağını yaparak incelemelerini yapmışlardır. LHF (düşük hidrojenli ferritik çelik) ilave metal kullanılarak yapılan kaynaklarda diğerlerinden daha düşük ısı girdileri kullanıldığı için ITAB' da daha az yumuşama gözlenmiştir.

D. M. Robledo ve arkadaşları [61] 2010 yılında yaptığı çalışmada, daha önceden SMAW yöntemiyle kaynaklanan plakaların mekanik özelliklerini kıyaslamak için GMAW yöntemiyle 4,5- 5 mm kalınlığındaki MIL-A-46100 zırh çeliği plakaları ER100S-1, ER1108M ve E312-16 ilave metalleri ile kaynatılmasını incelemiştir. Yapılan kaynaklardan en iyi sonucu veren ilave metal ER100S-1 olduğu gözlenmiştir. Kullanılmış olan bu kaynak yöntem ve parametreleri sayesinde HAZ'ın genişliği azaltılmıştır. Ayrıca kullanılan bu yöntem ile SMAW yöntemiyle yapılan kaynaktan elde edilen çentik değerlerinden daha yüksek bir tokluk değeri elde edilmiştir. ER100S-1 ilave metali ile kaynatılan numunenin çentik darbe test sonucu 1,57 j/mm (-20 °C) olarak gözlemlenmiştir.

A. Saxena ve arkadaşları [62] 2018 yılında yaptığı çalışmada, ASS (östenitik paslanmaz çelik) ve LHF (düşük hidrojenli ferritik çelik) ilave metalleri ile üretilen çok geçişli SMAW Armox 500T çelik bağlantılarının çekme ve darbe değerlerinin BM' ye göre karşılaştırılması incelenmiştir. ASS (östenitik paslanmaz çelik) ilave metalleri ile kaynaklanan parçalarda darbe tokluğu ana metalden %20 daha fazla ve LHF (düşük hidrojenli ferritik çelik) ilave metalleri ile kaynatılmış parçalarda darbe tokluğu ana metalden %12 daha az olduğu gözlenmiştir. GMAW, GTAW ve SMAW kaynak yöntemleri ile dubleks paslanmaz çelik ilave metalleri kullanılarak kaynatılan

AISI 409M kalitedeki çeliğin tahribatlı incelemesi yapıldığında GTAW kaynak yöntemiyle yapılan parçaların çekme ve çentik özelliklerinin sonuçlarının daha iyi çıktığı görülmüştür. ASS (östenitik paslanmaz çelik) ilave metalleri ile kaynaklanan parçalarda çekme değeri ana malzemenin %41,7'si, LHF (düşük hidrojenli ferritik çelik) ilave metalleri ile kaynatılmış parçalarda çekme değeri ana malzemenin %30,6'sı olarak ölçülmüştür.

U. Gürol ve arkadaşları [63] 2021 yılında yaptıkları çalışmada P500 zırh çeliği kullanarak östenitik ER307 ve ferritik ER110S-G ilave metalleri ile GMAW yöntemi kullanarak köşe plakalarının kaynak ile birleştirme işlemini incelemiştir. Kullanılan her iki ilave metal ile de ergime duvarından itibaren 6 mm mesafede sertlik değerleri toparlanarak ana metalin sertlik değerlerini yakalamıştır. Böylece MIL STD-1185 askeri standartları için gerekli olan minimum değerler karşılanmıştır.

M. Karhu ve arkadaşları [64] 2012 yılında yaptığı çalışmada, 6,5 mm sac kalınlığında Ramor 500 zırh çeliği ile 2 mm kalınlıkta Optim 500 MC çeliği bindirmeli olarak lazer-GMA yöntemiyle hibrit olarak kaynaklanmasını incelemiştir. Bu kaynakta ilave metal olarak yüksek dayanımlı çelik kaynağı için tasarlanmış Union Thermanit X96 ve östenitik olan Esab OK Autrod AISI 316 LSi ilave metalleri kullanılmıştır. Bindirmeli bağlantı kaynağında çentik ara yüzey sorunundan korunmak için levhalar arası hava boşluğu en aza indirilmelidir. Ana malzemeden kaynak köküne doğru gidildikçe yüzey sertliği 50-100 HV5 düştüğü görülmektedir.

T. Özdemir [65] 2018 yılında yaptığı çalışmada, MIL-A 46100 çeliğinin MIG kaynaklı numunelerinin FCH330 ve MI307 Si ilave metalleri ile birleştirilerek mikro ve kırılma sonuçları arasındaki ilişkilerini incelemiştir. İçeriğindeki karbon oranı daha fazla olduğu için MI307 Si ilave metal ile kaynaklanan parçanın yapılan testler sonucunda daha iyi mekanik özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Kaynak ağzı tasarımı olarak V tasarımının X tasarımına göre daha iyi darbe dayanımına sahip olduğu görülmektedir. M1l-A-46100 zırh çeliği için MIG kaynağında kullanılabilecek en uygun kaynak ağzı açısının da 60° olduğu belirlenmiştir. FCH 330 ilave metal ile kaynatılmış zırh çeliklerinin kırılma dayanımının daha az olduğu görülmüştür.

Farklı ilave metal kullanımı yönteminden sonra da sandviç kaynak metodları kullanılarak yapılan kaynak çalışmaları incelenmeye başlanmıştır. M. Balakrishnan

[66] 2010 yılında yaptığı çalışmada, SMAW yöntemiyle 18 mm kalınlıkta (su verilmiş ve temperlenmiş) Q&T AISI 4340 çeliğini birinci plaka kaynağı olarak (östenitik paslanmaz çelik) ASS ilave metal, sert ilave metal ve tekrar (östenitik paslanmaz çelik) ASS ilave metal ile birleştirme yapmıştır. İkinci plaka kaynağı olarak da (östenitik paslanmaz çelik) ASS ilave metal, sert ilave metal ve LHF ilave metal ile hazırlanan sandviç kaynak yöntemlerini incelemiştir. Bu yöntemlerle hidrojenin neden olduğu çatlama problemleri ortadan kaldırılmak istenmiştir. ASS kep pasosu ile kapatılan kaynağın LHF kep pasosu ile kapatılan kaynaktan daha mukavemetli olduğu görülmüştür. Çünkü LHF kep pasosunun sertliği 262-344 HRC iken, ASS kep pasosunun sertliği 350-431 HRC değerlerinde ölçülmüştür. Bu çalışma sonucunda darbeye karşı direnç sağlanamamıştır. WCL’de farklı katman kalınlıkları ve farklı dolgu katmanları olduğu için kaynak ağzı tasarımına yönelik daha fazla araştırma yapılması kararı alınmıştır.

M. Balakrishnan ve arkadaşları [67] 2013 yılında yaptığı çalışmada, bir sandviç kaynak yöntemi çalışılmıştır. 18 mm kalınlıkta Q&T çeliklerinin ortasına 4 mm kalınlığında (tungsten karbür) WC pasosu atıldıktan sonra bu katmanın alt ve üstüne (östenitik paslanmaz çelik) SS her iki tarafa da dolduruldu. Her iki tarafa da atılan SS katmanları (korumalı metal ark kaynağı yöntemiyle) SMAW yöntemiyle kaplanmıştır. SMA sert dolgu ile yapılan katmanlar ITAB bölgelerinden daha fazla dayanıma sahiptir.

S. Babu ve arkadaşları [68] 2009 yılında yaptığı çalışmada, yumuşak östenitik ilave metal arasında PTA sert ara pasoların sandviç yöntemiyle üretilen zırh çeliği kaynaklarının balistik özelliklerinin iyileştirilmesini incelemiştir. Bu çalışma ile ilk defa zırh çeliğinin tungsten karbür tozu ile plazma transferli ark (PTA) işlemiyle sertleştirilebileceği görülmüştür. Bu çalışmada ana metal olarak 14 mm kalınlıkta AISI 4340 çeliği kullanılmıştır. SMAW ve FCAW yöntemleriyle her bir yöntemden birer adet olmak üzere sandviç tabakalı ve sandviç tabakasız olmak üzere kaynaklar yapılmıştır. Östenitik ilave metal olarak E307 ilave metal kullanılırken sert dolgu alaşımı olarak da tungsten karbür (WC) kullanılmıştır. Sandviç kaynak yöntemiyle yapılan kaynaklar balistik testlerden başarıyla geçerken sandviç tekniği uygulanmayan kaynaklar balistik testlerden geçememişlerdir.

G. M. Reddy ve arkadaşları [69] 2013 yılında yaptığı çalışmada, zırh çeliği kaynaklarında uygun olmayan ısıt işlemler ve yanlış ilave metallerinin kullanımı yüzünden ortaya çıkan ana metale kıyasla daha düşük sertlik değerlerinin elde edilmesi problemini gidermek için incelemeler yapmışlardır. 18 mm et kalınlığında yüksek mukavemetli ve düşük alaşımlı değerlerine sahip AISI 4340 çeliğine AWS E 307-16 sert ilave metal ve yumuşak östenitik paslanmaz çelik olan AWS E FeCr-A7 ilave metal ile sandviç kaynak yöntemi uygulanmış ve mikro incelemeler yapılmıştır. Sandviç kaynak yönteminde kullanılan sert ve yumuşak tabakalar merminin şiddetini azaltmıştır. Sert tabaka da kaynak bölgesine gelen ani balistik darbeler karşısında hasar görmesini önlemiştir. Sandviç tabaka ile ana metal arasında 255-455 HV aralığında bir sertlik geçişi bulunmaktadır bu geçiş sayesinde de balistik darbede kaynak bölgesinin parçalanması engellenmiştir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Kaynak Sarf Malzemelerin ve Ana Malzemenin Seçimi

Bu çalışmada Gedik Kaynak A.Ş. tarafından üretilmekte olan ferritik (SG3 ve ER110S-G), paslanmaz (309LSi) ve dubleks (SG2209) yapıya sahip 1.2 mm çapındaki ilave metalleri kullanılmıştır. Ana malzeme olarak Erdemir Miilux firmasından kaynak ağızları V tasarımıyla 22,5° açılmış şekilde hazır olarak temin edilen 15 mm kalınlığındaki P 500 serisi zırh çeliği plakaları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ilave metallerin AWS standartlarında belirtilen saf ilave metal kimyasal analiz test sonuçları Çizelge 5.1’de, mekanik değerleri ise Çizelge 5.3’te verilmiştir. Aynı şekilde kullanılan ana malzemelerin (P 500) kimyasal analizleri Çizelge 5.4’te, mekanik özellikleri ise Çizelge 5.5’te gösterilmektedir. Kullanılan ilave metallerin mekanik test değerleri için ise Gedik Kaynak A.Ş tarafından ürünlerin üzerinde belirtilen sertifika değerleri baz alınmıştır. Ana malzemenin kimyasal analiz ve mekanik test sonuçları ise sertifika değerleri olmayıp, bizzat kaynak öncesi plakaların kendisinden gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen değerlerdir. İlave metallerin ve ana malzemelerin kimyasal analizi ASTM E 415 standardına göre Thermo Fisher marka ARL Ispark 8860 model Optik Emisyon Spektrometresi ile gerçekleştirilmiştir. İlâveten yüksek mukavemetli ilave metallerde oldukça önem arz eden Azot (N) ve Oksijen (O) ölçümleri ise ASTM E1019 standardına uygun olarak Leco marka ON736 model N/O cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca östenitik (309LSi) ve dubleks (2209) ilave metalleri ile kaynaklı plakaların ferrit miktarları Fisher MP30 marka ferritscope cihazı ile ölçülmüştür. Çalışma boyunca kullanılan 309LSi ilave metalinin ve SG2209 ilave metalinin ferrit değerleri (FN) çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Kullanılan ilave metallerin kimyasal analizi (% ağırlıkça)

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	N (ppm)	O (ppm)
SG3	0.08	0.86	1.63	0.04	0.04	-	0.011	0.012	58.5	58
ER110S-G	0.09	0.54	1.75	0.26	1.45	0.25	-	0.005	65	167
309LSi	0.02	0.75	1.79	23	12.85	-	0.019	0.007	66.5	1460
SG2209	0.03	0.39	1.60	21.86	8.55	3.16	0.019	0.008	107	1430

Çizelge 5.2: Kullanılan 309LSi ve 2209 ilave metallerinin ferrit ölçüm değerleri
(FN)

	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	4. Ölçüm	5. Ölçüm	Standart Sapma	Ortalama
309LSi	4.2	4.5	4.4	4.8	5.5	0.5	4.7
2209	46.5	46.2	45.8	44.8	44.2	0.1	45.5

Çizelge 5.3: Kullanılan ilave metallerin tipik mekanik değerleri

	AWS Normu	Min. Akma Muk. (MPa)	Min. Çekme Muk. (MPa)	Min. % Uzama	Min. Çentik Darbe Enerjisi (J)		
					+20°C	-30°C	-40°C
SG3	AWS A5.18 ER 70 S-6	515	623	24	-	116	99
ER 110SG	AWS A5.28 ER 110S-G	779	854	17	-	93	76
309LSi	AWS A5.9 ER 309 L Si	434	619	40	110	-	-
SG2209	AWS A5.9 ER 2209	550	700	28	-	-	100

Çizelge 5.4: Kullanılan kaynak plakalarının kimyasal analizi (% ağırlıkça)

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Ceş
Protection 500	0.26	0.45	0.94	0.53	0.44	0.3	0.007	0.002	0,6

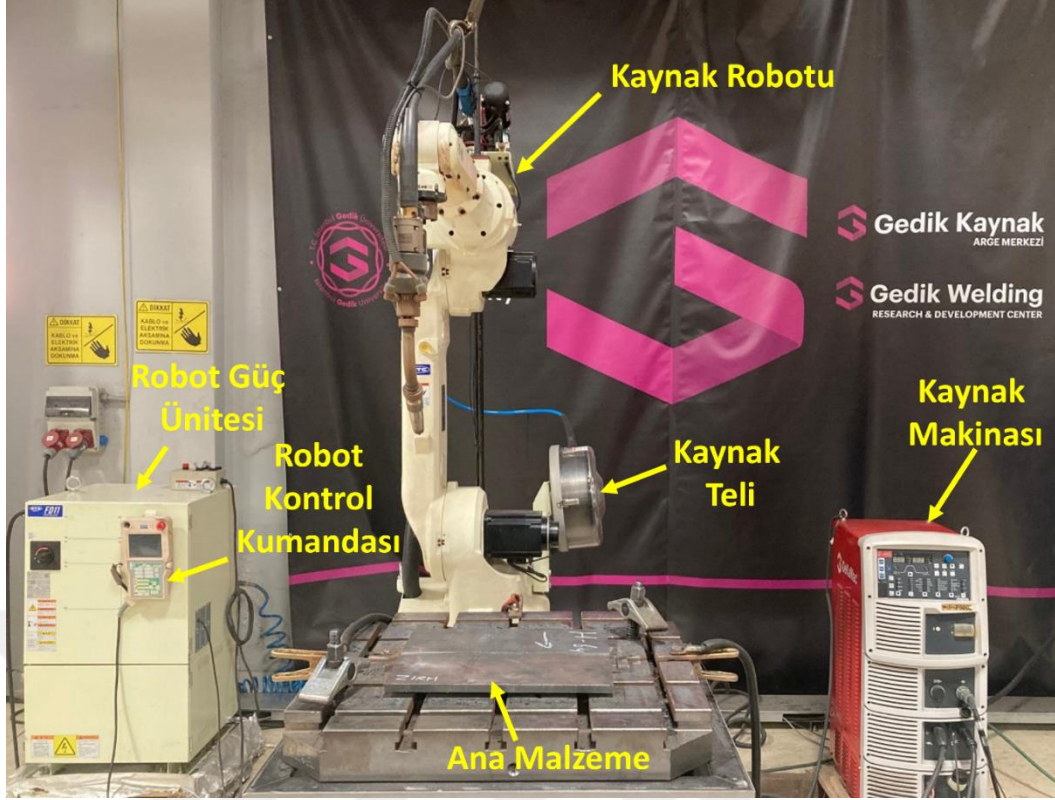
Çizelge 5.5: Kullanılan kaynak plakalarının mekanik değerleri

	Akma Muk. Rp (MPa)	Çekme Muk. Rm (MPa)	% Uzama	Çentik Darbe Enerjisi (-40°C/J)
Protection 500	Ort. 1324	Ort. 1686	Ort. 7,71	Ort. 40,17

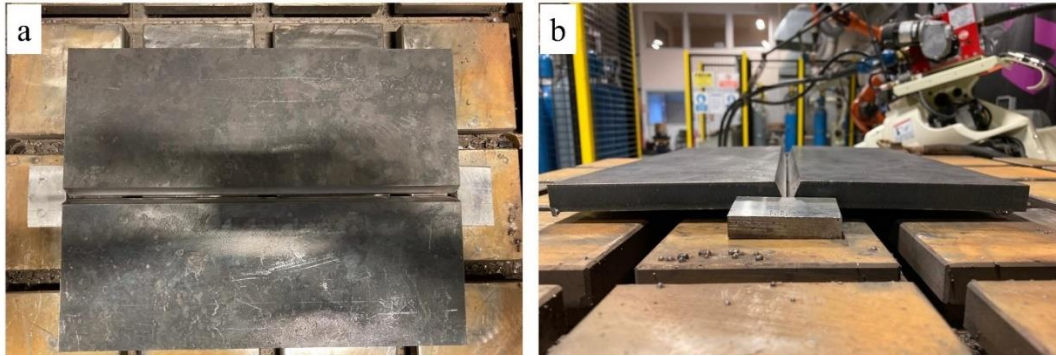
5.2 Kaynak Düzeneginin Hazırlanması

Çalışma boyunca gerçekleştirilen tüm kaynaklar Gedik Kaynak A.Ş. bünyesinde bulunan Şekil 5.1’de gösterilen OTC marka 6 eksenli VDL8 model kaynak robotu ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak makinası olarak Gekamac marka Power MIG GPS WB P500L model kaynak makinesi kullanılmıştır. Kullanılan kaynak düzeneği ve ekipmanları Şekil 5.1’deki robotik kaynak sisteminde gösterilmiştir.

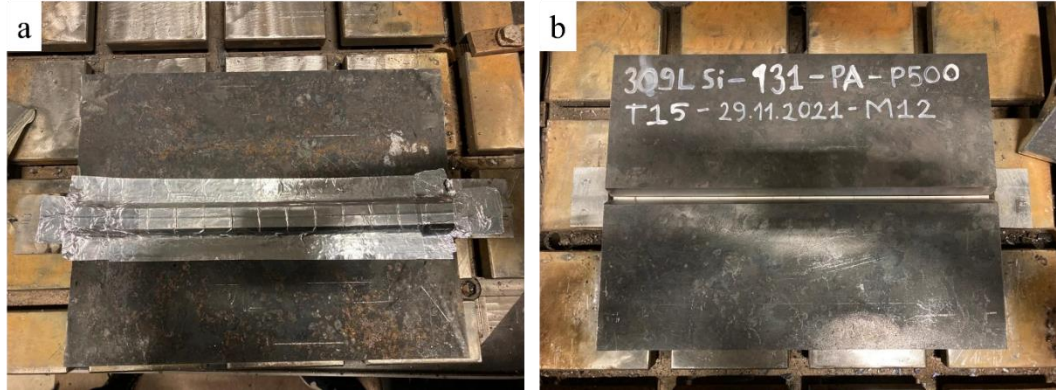
Kaynak yapılacak olan plakalar uygulama öncesinde Şekil 5.2-b’deki gibi kaynak ağızları 22,5° olarak açılmış ve sivri kısımları taşlanıp plaka yüzeyleri temizlendikten sonra Şekil 5.2-a’daki gibi kaynak ağızlarının arası 2 mm mesafede kalacak şekilde iki adet bayrak ile puntalanmıştır. Ardından kaynak sırasında kaynak kökünün akması ve düzenli bir şekil alarak soğuması için Şekil 5.3-a’da gösterildiği gibi seramik altlık alüminyum bantlar ile kaynak ağzının altına yapıştırılmıştır. Seramik altlıkların üstten görünümü de Şekil 5.3-b’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1: Robotik kaynak sistemi



Şekil 5.2: Kaynak işlemi öncesi ana malzeme; a) üstten görünüş, b) yandan görünüş



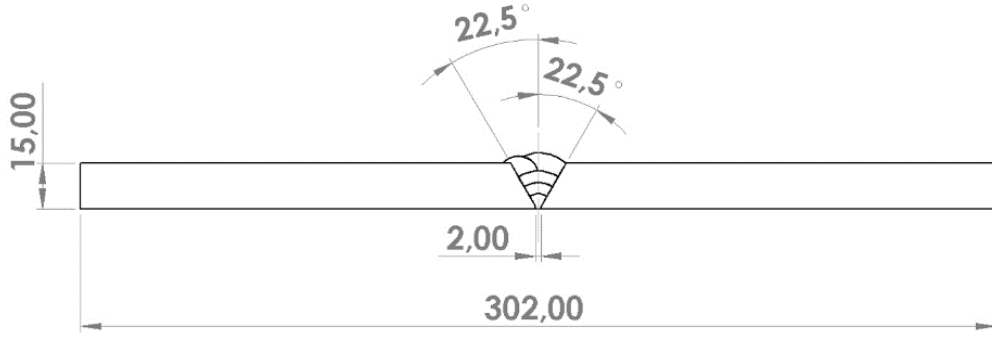
Şekil 5.3: Seramik altlık yapılandırılmış ana malzeme a) alttan görünüş b) üstten görünüş

Zırh çeliği plakaları üretim süreçlerinde manyetik mıknatıslı taşıyıcılarla taşınması nedeniyle kalıntı manyetik alana maruz kalmış ve bu durum da kaynak işlemi esnasında kaynak havuzunda ark üflemesine sebep olmuştur. Bu nedenle kaynak işlemi öncesinde manyetik el yokesi kullanılarak tersine manyetizasyon (de-manyetizasyon) işlemi yapılmıştır böylece kalıntı manyetik alan giderilmiştir. Ölçümler Şekil 5.4'te gösterildiği üzere Gaussmetre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Nihai olarak tüm parçalardaki kalıntı manyetik alan değeri 0-0.5 gauss arasında olduğu anda kaynak işlemine başlanmıştır.



Şekil 5.4: Plakaların manyetiğini almak için kullanılan gaussmetre

Kaynak işlemine başlamadan önce kaynak plakaları birleştirme esnasında hareket etmemesi için işkenceler ile kaynak tezgahına monte edilmiştir. Daha sonra koruyucu gaz bağlantısı gerçekleştirilmiş ve flowmetre ile gazın basıncının yeterli olup olmadığı ölçülmüştür. Kaynağa hazır hale getirilen plakalar Şekil 5.5'teki kaynaklama şemasına göre önceden belirlenmiş Çizelge 5.6'daki kaynak parametreleri ile robota kaynak programı tanımlanarak kaynağa başlanmıştır. Plakalar kaynaklanırken her pasodan sonra sıcaklıkları 135-165 °C aralığına düşene kadar beklenmiş ve sonrasında bir sonraki pasoya başlanmıştır. Sıcaklık ölçümleri Fluke marka 62 Mini infrared termometre kullanılarak ergime çizgisinin 25-30 mm uzaklığından ölçülmüştür.



Şekil 5.5: Plakaların kaynaklama şeması

Çizelge 5.6: Kaynak parametreleri

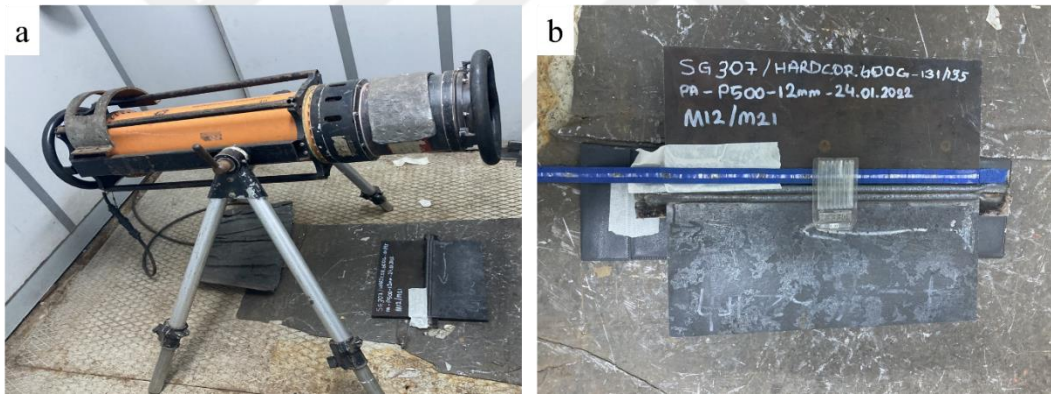
	Paso Sayısı	Amper (A)	Voltaj (V)	Kaynak Hızı (cm/dak)	Isı Girdisi (kJ/mm)	Koruyucu Gaz	Kaynak Yöntemi
SG3	1	145	37	30	0,91	ArCO18	MAG 135
	2	185	27	30	0,84		
	3	180	27	28	0,89		
	4	190	27	28	0,92		
	5	190	26	28	0,91		
ER110	1	138	42	28	1,06	ArCO18	MAG 135
	2	175	28	30	0,82		
	3	167	28	27	0,88		
	4	205	26	27	1,00		
	5	205	25	27	0,97		
309LSi	1	203	22	26	0,84	ArCO2,5	MIG 135
	2	214	23	27	0,88		
	3	225	20	20	1,08		
	4	227	21	33	0,69		
	5	227	21	33	0,69		
2209	1	207	23	25	0,90	ArCO2,5	MIG 135
	2	220	22	26	0,89		
	3	231	21	27	0,86		
	4	230	21	26	0,89		
	5	230	21	26	0,89		

5.3 Tahribatsız Muayene

Kaynak işlemi sonrasında tüm kaynaklı plakalar yüzeylerinde gözenek, çatlak vb. hataların olup olmadığını tespit etmek amacıyla EN ISO 17637 standardına göre görsel muayeneye tabi tutulmuş olup, değerlendirmeleri EN ISO 5817 standardı B sınıfına göre gerçekleştirilmiştir.

5.3.1 Radyografik muayene

Görsel muayeneden uygunluk alan plakalar daha sonra kaynaklı plakaların içinde çatlak, gözenek, ergime noksanlığı vb. kaynak hatalarının olup olmadığını incelemek amacıyla EN ISO 17636-1 standardına göre Radyografik muayene yöntemiyle incelenmiştir. Radyografik muayenede kaynaklı plakaya radyografi makinesinden çıkan radyasyon demeti gönderilir. Gönderilen radyasyon kaynaklı plakanın içinden geçer ve plakanın altına yerleştirilen film tabakasında iz oluşturur. Plakanın kaynak bölgesindeki gözenek ve çatlaklar radyasyonun yansıma şiddetini değiştirmektedir. Böylece kaynak hatalarının film tabakasındaki izleri rahatlıkla ayırt edilebilir [70]. Bu çalışmada Gedik Kaynak A.Ş. firma bünyesinde bulunan Şekil 5.6-a’da gösterilen Ge Eresco MF4 – 300 KW radyografik muayene cihazı (X-Ray) kullanılmıştır. Şekil 5.6-b’de radyografik çekime hazır olan bir plaka gösterilmektedir. Elde edilen radyografik filmlerin değerlendirmeleri ise EN ISO 10671-1 standardına göre yapılmıştır.



Şekil 5.6: Radyografik muayenede kullanılan; a) X-Ray cihazı b) Çekim düzeni

5.3.2 Penetrant muayene

Sıvı penetrant muayenesi malzeme yüzeyindeki hataların ortaya çıkarılması için kullanılan bir yöntemdir. Yapılan muayene sonucunda çatlak vb. hatalar varsa çizgisel bir görüntü, gözenek vb. hatalar varsa yuvarlak görüntüler gözlemlenir [71]. Bu çalışmada radyografik muayeneden geçip onay alan plakalar daha sonra EN ISO 3452-1 standardına göre sıvı penetrant muayenesine tabi tutulmuştur. Muayene esnasında kullanılan çözücünün (solvent), geliştiricinin (developer) ve penetrant sıvısının görüntüleri Şekil 5.7’de verilmiştir. Bu muayene yönteminde kullanılan sarf malzemelerinin aynı ürün ailesinden olup olmadığı muayenenin test kalitesini

etkilediği için tüm muayene işlemlerinde MR marka aynı ürün ailesinden spreyle kullanılmıştır.

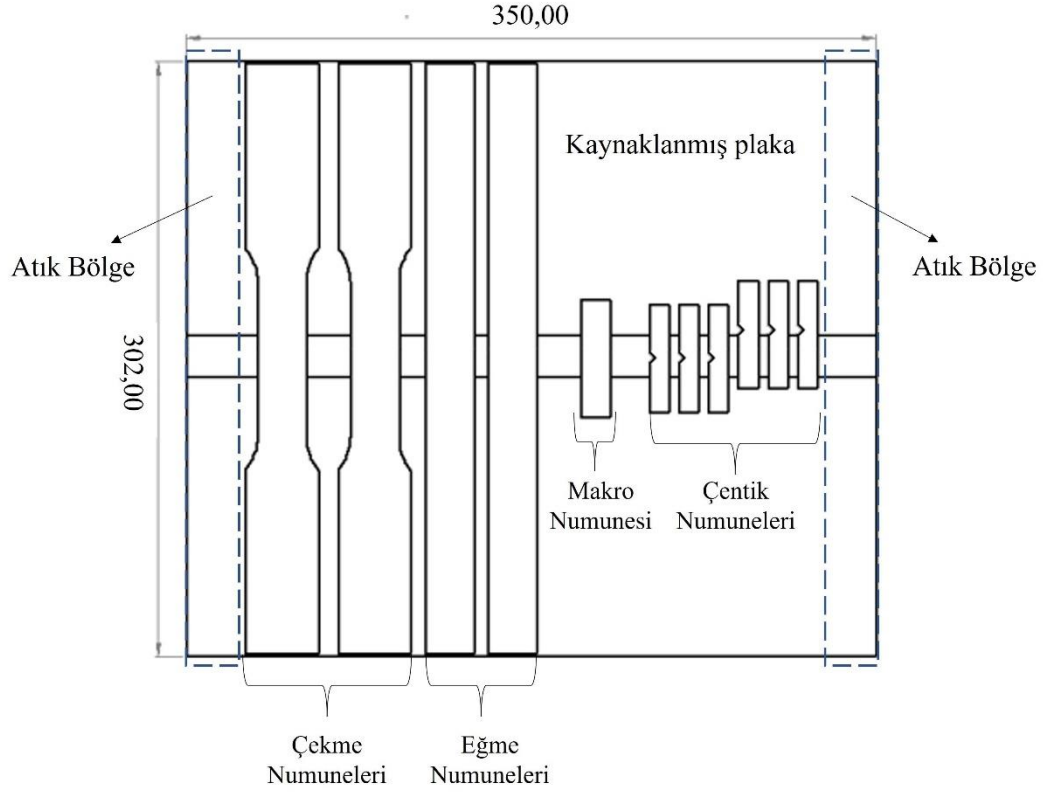


Şekil 5.7: Penetrant muayenede kullanılan sarf malzemelerin genel görünümü

Muayene işlemleri esnasında öncelikle plakadaki kaynak bölgesi, temizleme spreyi ile temizlenip ardından penetrant spreyi yüzeye sıkılarak yaklaşık 30 dk kadar beklenerek penetrant sıvısının tüm gözeneklere nüfuz etmesi sağlanmıştır. Daha sonra ara yıkama yapılmış ve ardından geliştirme spreyi sıkılarak kaynak bölgesindeki çatlak ve gözeneklerin belirginleşmesi sağlanmıştır. Belirginleşen gözenekler incelenerek ne tür kaynak hatalarının olduğu tespit edilmiştir. Muayene sonrası tüm belirtiler EN ISO 23277 standardına göre değerlendirilmiştir.

5.4 Tahribatlı Muayene

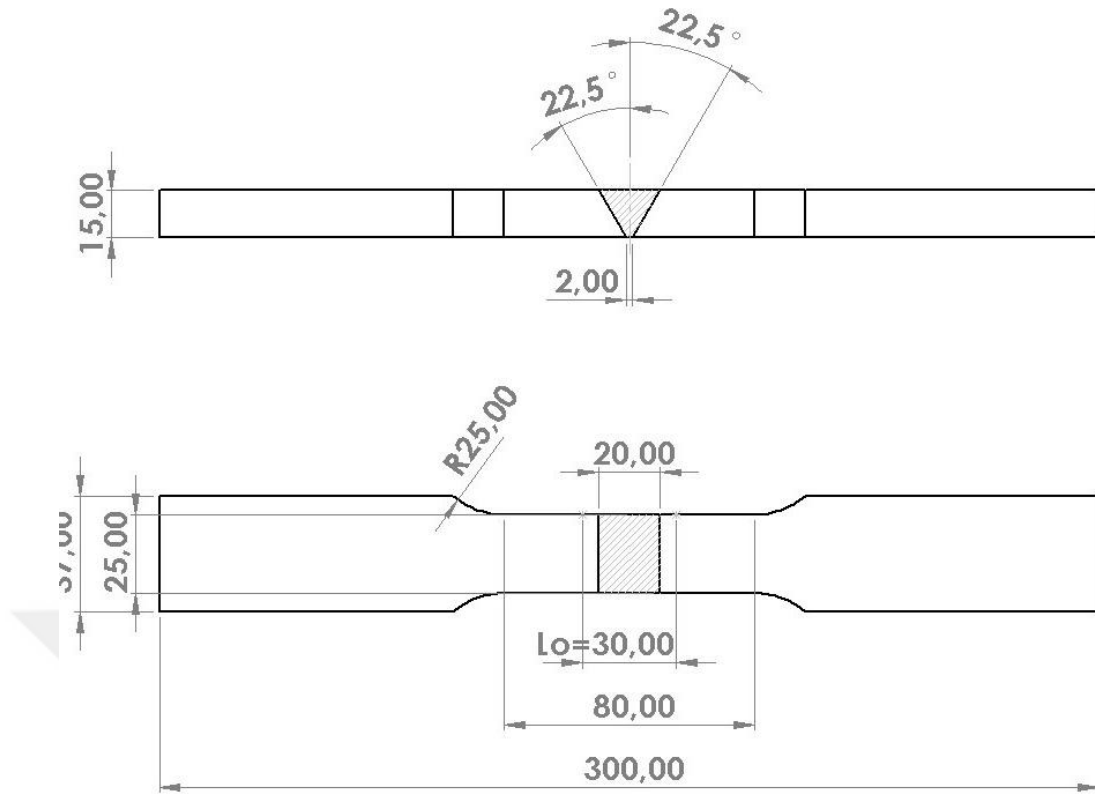
Sıvı penetrant muayenesinden de onay alan plakalar Şekil 5.8’de gösterilen plaka kesim şemasına göre kesime gönderilerek iki adet çekme numunesi, üç adet ITAB’dan ve üç adet de kaynak bölgesinden olmak üzere toplam altı adet çentik numunesi, bir adet makro numunesi ve iki adet de eğme numuneleri standart ölçülere göre kesilerek tahribatlı muayene testleri için hazırlanmıştır. Kesim işlemlerinde sanayi tipi sıvı soğutmalı şerit testere kullanılmıştır.



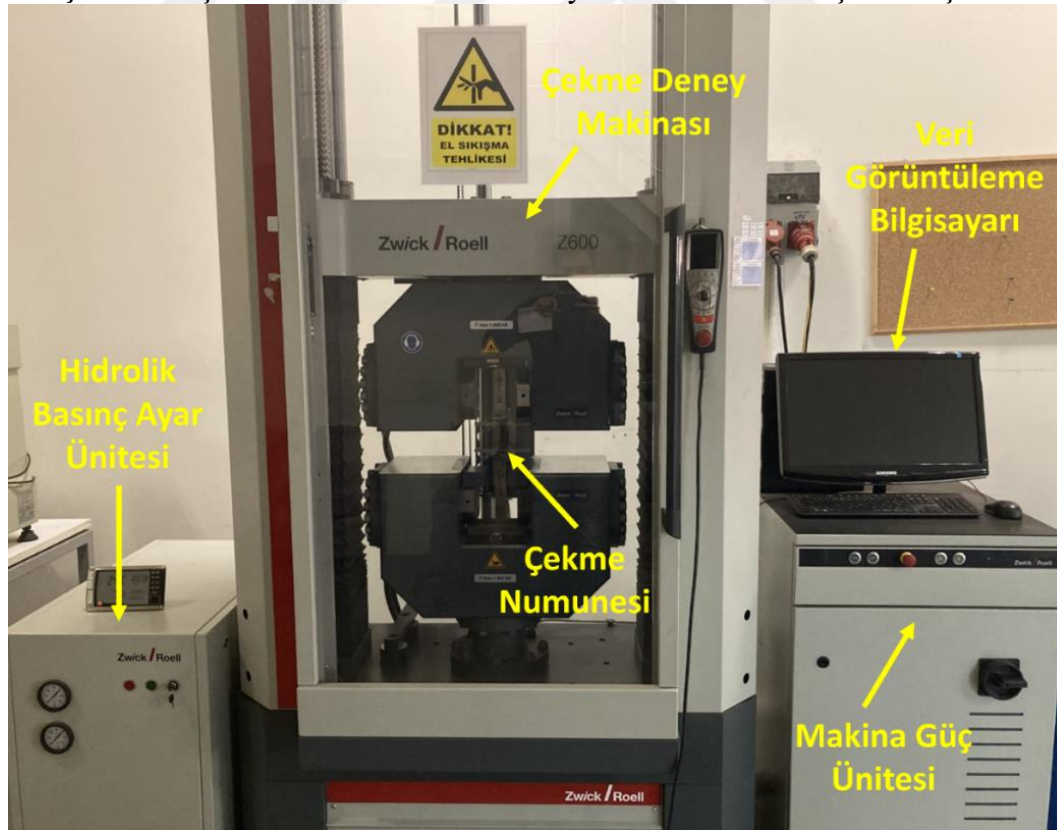
Şekil 5.8: Kaynaklı plakaların kesim şeması

5.4.1 Çekme testi

Çekme testi ile farklı ilave metaller kullanılarak hazırlanan çekme numunelerinin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri birbirlerine göre kıyaslanmıştır. Hazırlanan çekme testi numuneleri EN ISO 4136 ve EN ISO 6892-1 standartlarında Şekil 5.9'daki çekme numunesi ölçülerine göre hazırlanmıştır. Çekme testi için Gedik Kaynak A.Ş. bünyesinde bulunan aşağıdaki Şekil 5.10'da gösterilen Zwick/Roell Z 600E marka çekme deney cihazı kullanılmıştır. Test sırasında çekme makinesi ile entegre olarak çalışan MakroXtens marka ekstansometre cihazı sayesinde numunenin % uzama değerleri de ölçülmüştür.



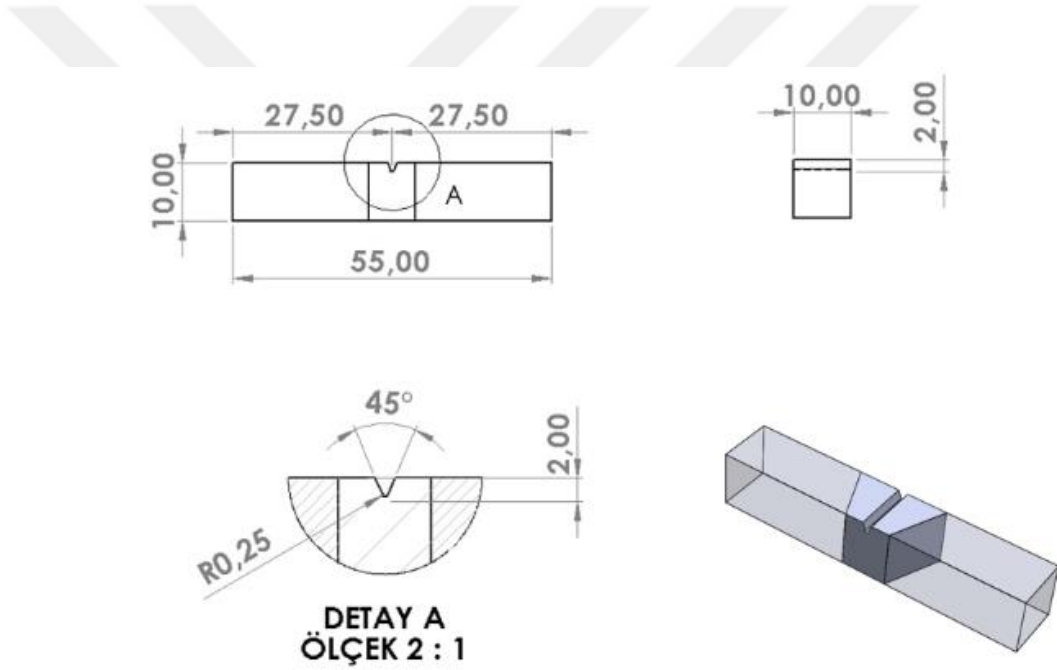
Şekil 5.9: Çekme testinde kullanılan kaynaklı numunelerin işleme ölçüleri



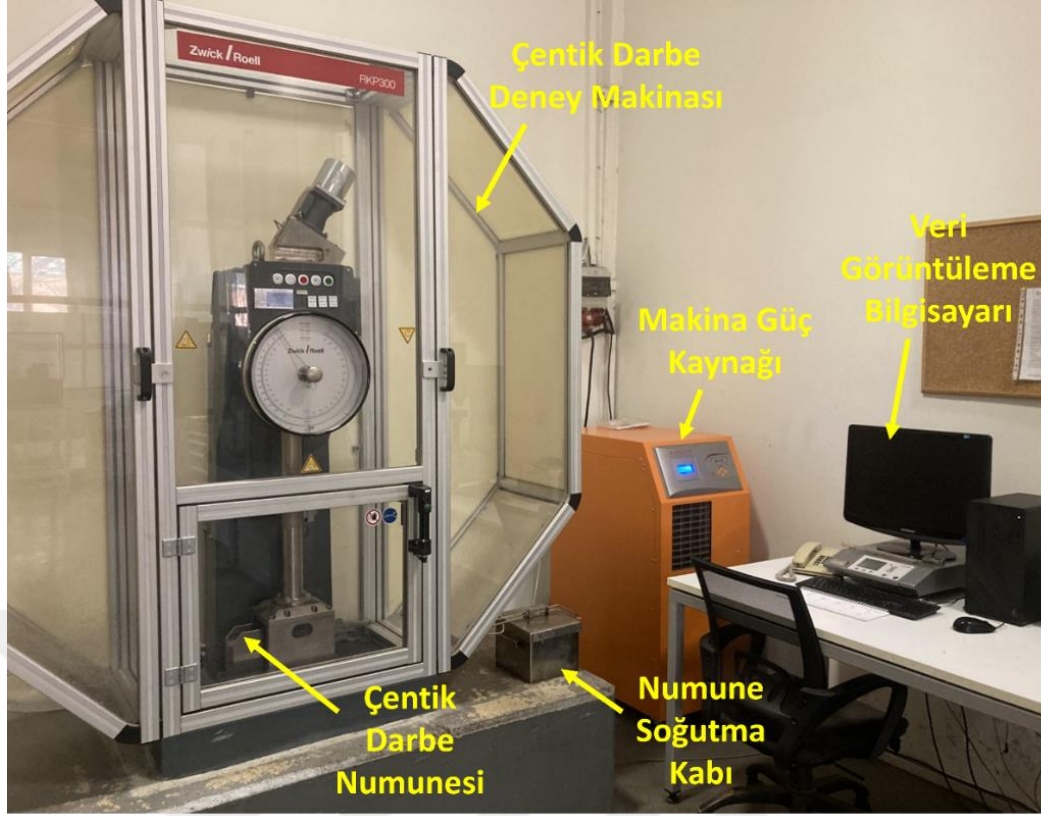
Şekil 5.10: Çekme testinde kullanılan cihazların genel görünümü

5.4.2 Çentik darbe testi

Çentik darbe testi ile hazırlanan numunelerin dinamik yüklere karşı göstereceği gevrek kırılma direncini görebilmek için numuneye yapay bir darbe uygulanmaktadır [72]. Çentik darbe testi için hazırlanan numunelere EN ISO 148-1 ve EN ISO 9016 standartlarında kaynak ve haz bölgelerinden Şekil 5.11’de gösterilen ölçülerde kalınlık boyunca V tipi çentikler açılmıştır. Bu çalışmada Gedik Kaynak A.Ş. bünyesindeki aşağıdaki Şekil 5.12’de gösterilen Zwick/Roell RKP 300 marka çentik darbe deney makinesi kullanılmıştır. Çentik darbe deney sonuçları veri görüntüleme bilgisayarında kayıtlı olan testXpert3 programı ile görüntülenip kayıt altına alınmıştır.



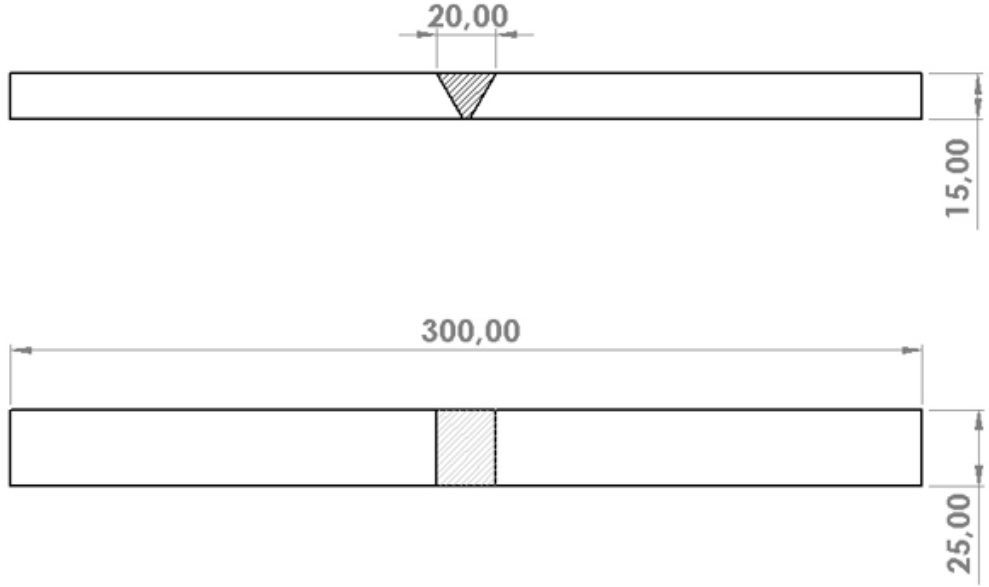
Şekil 5.11: Çentik numunesi ölçüleri



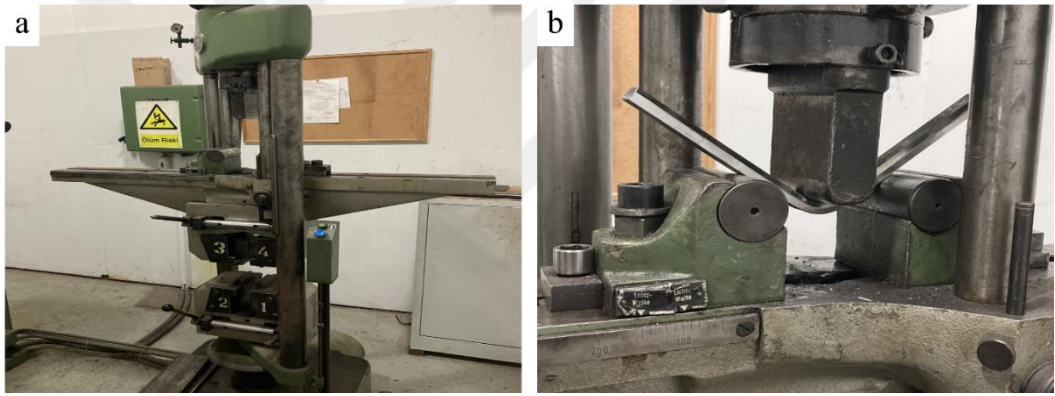
Şekil 5.12: Çentik deney makinesi

5.4.3 Eğme testi

Eğme makinesinde 180° 'ye kadar eğilen parçaların kaynak noktalarında herhangi bir çatlak veya kırılma oluşup oluşmayacağı kontrol edilmektedir. Eğme testlerinde numuneler EN ISO 7438 ve EN ISO 5173 standartlarına göre kontrol edilmektedir. Eğme numuneleri aşağıdaki Şekil 5.13'teki gösterilen ölçülere göre testlere hazır hale getirilmiştir. Bu çalışmada Gedik Kaynak A.Ş. bünyesinde bulunan Şekil 5.14-a'da gösterilen Mohr Federhaff AG markalı hidrolik eğme makinesi kullanılmıştır. Kaynaklı numunelere Şekil 5.14-b'deki gibi eğme testi uygulanmıştır.



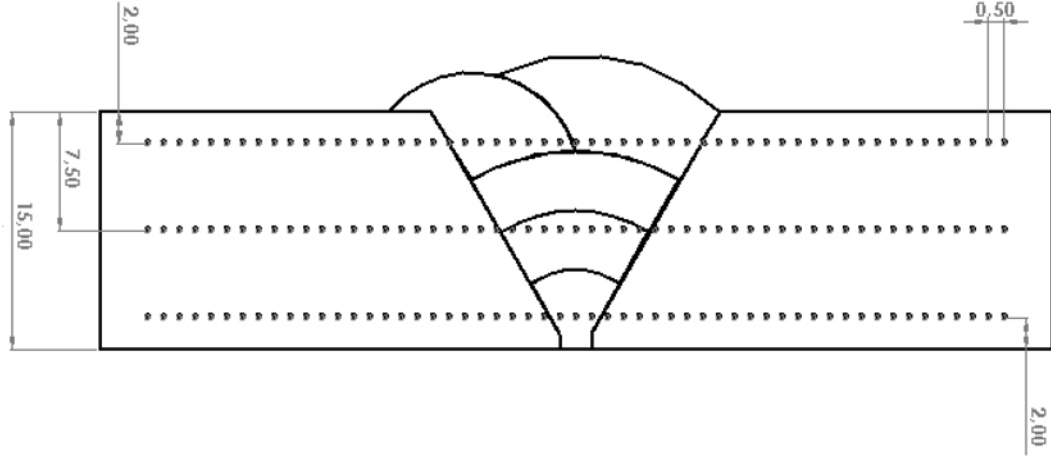
Şekil 5.13: Eğme numunesi ölçüleri



Şekil 5.14: Eğme deney makinesi a) eğme makinesi ekipmanları b) eğilmiş numune görüntüsü

5.4.4 Sertlik ölçümü

Sertlik ölçümleri numune yüzeyinin üst yüzeye 2 mm mesafeden, ortadan ve alt yüzeye 2 mm mesafeden sertlik geçişlerini daha detaylı bir şekilde görebilmek için Şekil 5.15'teki sertlik ölçüm şemasında gösterildiği gibi üç farklı bölgeden Vickers cinsinde 0,5 mm aralıklarla HV 5'lik mikrosertlik örnekleri alınıp grafikleri çizilmiştir. Sertlik numunelerin ölçümleri Gedik Kaynak A.Ş. bünyesinde bulunan aşağıdaki Şekil 5.16'da gösterilen Emcotest Durascan marka otomatik sertlik ölçme makinesi ile EN ISO 9015 standardına göre yapılmıştır.



Şekil 5.15: Mikrosertlik ölçüm şeması



Şekil 5.16: Otomatik sertlik ölçme makinesi

5.5 Metalografik İncelemeler

Bu tez çalışmasında kaynak yapılan numunelerin metalografik olarak yorumlanabilmesi ve test sonrasında kırık yüzeylerinin incelenebilmesi için mikroyapı ve makro yapı analizleri gerçekleştirilmiştir.

5.5.1 Numune hazırlama

Makro, mikro ve sertlik numunelerini öncelikle Gedik Kaynak A.Ş. bünyesinde bulunan Şekil 5.17’de gösterilen Metkon Forcipol 2V zımparalama ve parlatma cihazı ile 60, 120, 180, 240, 320, 600, 800, 1000, 1200, 2000 ve 2500 numaralı

zımparalardan geçirilerek yüzey hazırlama işlemi tamamlanmıştır. Ardından numuneler 3 µm'lik alümina süspansiyonu ve keçeyle parlatılıp alkol ile temizlenmiş ve dağlama işlemine hazırlanmıştır. Numunelerin dağlanması sırasında kullanılan kimyasal asitlerden çıkan zararlı gazların solunmaması, dağlama çözeltileri, alkol ve kurutma makinelerinin toplu bir yerde bulunması için Şekil 5.18' de gösterildiği gibi çeker ocak kullanılmaktadır. Paslanmaz malzemeleri dağlamak için Şekil 5.19'da gösterilen elektroliz cihazı kullanılmıştır. Numuneleri elektroliz ile dağlarken + kutuplu çubuk kaynak bölgesine temas ederken – kutuplu çubuğun da numunedeki dağlanacak olan bölge üstünde temas ettirmeden gezdirilmesi gerekmektedir. Paslanmaz 309LSi ve dubleks paslanmaz 2209 numuneler %25 NaOH çözeltisi veya %10 Oksalik Asit çözeltisi ile dağlanmıştır.



Şekil 5.17: Zımparalama ve parlatma cihazı



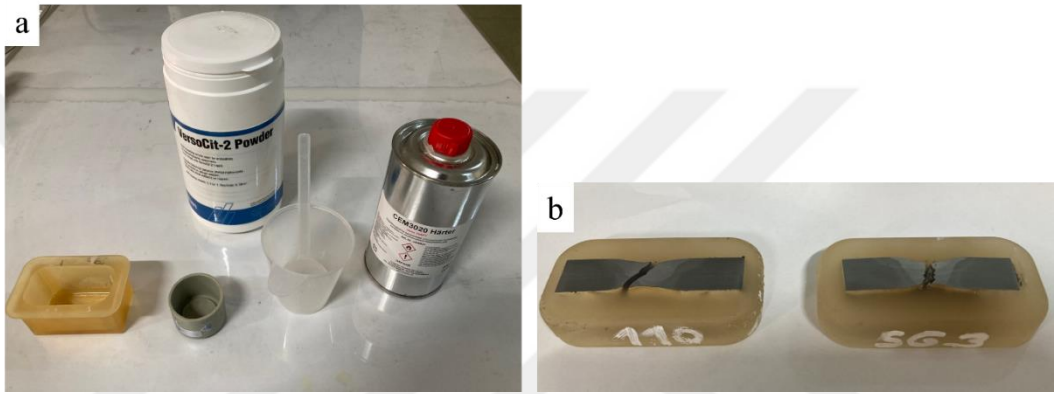
Şekil 5.18: Çeker ocak



Şekil 5.19: Elektroliz cihazı

Çentik darbe testi sonrası çatlak ilerlemesinin hangi bölgeden gerçekleştiğinin tespiti ve çekme testi sonrasında kopmaların ilerleme yönlerinin makro olarak incelenebilmesi için test numunelerinde düz bir yüzey elde etmek amacıyla Şekil

5.20-a'da gösterilen bakalit hazırlama ekipmanları kullanılmış ve numuneler Şekil 5.20-b'de gösterildiği gibi bakalite alınmıştır. Bu işlemde öncelikle numune bakalit kabına yerleştirilir soğuk bakalit hazırlama kabına bir ölçek bakalit tozu ve bir ölçek de bakalit sıvısı oranında olacak şekilde bakalit kabındaki numunenin yüzeyini geçecek kadar soğuk bakalit karışımı hazırlanır. Hazırlanan bakalit karışımı homojen bir karışım haline gelene kadar çubuk ile karıştırıldıktan sonra bakalit kabına dökülür ve karışımın soğuyup katılaşması için yaklaşık 15 dk bekletilir. Karışımın katılaştığından emin olduktan sonra bakalit kaptan çıkartılır ve hazırlanan bakalit zımpara, parlatma işlemlerine uygun hale gelir.



Şekil 5.20: Bakalit hazırlama a) bakalit hazırlama ekipmanları b) bakalite alınmış numune

SG3 ilave metal kullanılan kaynaklı numunede Marshall çözeltisini pamuk yardımıyla sürüp alkolle durulama yapıp ve fön makinesiyle kurutulmuştur. Bu işlem mikro yapıda kaynağın ITAB'daki tane sınırları belirginleşene kadar tekrar edilmiştir. Daha sonra pasoların ortaya çıkması için %3 Nital çözeltisinde 5 saniye beklenerek mikro yapı görüntüsü almak için dağlama yapılmıştır.

ER110 ilave metal kullanılan numunemize Marshall çözeltisini pamuk yardımıyla sürüp alkolle durulama yapıp ve fön makinesiyle kurutulmuştur. Bu işlem mikro yapıda kaynağın ITAB'daki tane sınırları belirginleşene kadar tekrar edilmiştir. Daha sonra pasoların ortaya çıkması için %3 Nital çözeltisinde 5 saniye beklenerek mikro yapı görüntüsü almak için dağlama yapılmıştır.

Paslanmaz yapıdaki 309 LSi ilave metal kullanılarak yapılan kaynakta pasoları ortaya çıkarabilmek için 15 saniye %10 Oksalik asit kullanarak elektrolitik dağlama

yapılmıştır. Daha sonra da numunedeki paso geçişlerini ortaya çıkarmak için %3 Nital çözeltisinde 5 saniye beklenerek mikro yapı görüntüsü almak için dağlanmıştır. Daha sonra da mikro yapıda kaynağın ITAB'daki tane sınırları belirginleşene kadar numune üzerine pamuk yardımıyla Marshall çözeltisi sürülmüştür.

Dublex paslanmaz yapıdaki 2209 ilave metal ile yapılan kaynakta da yine pasoları ortaya çıkarabilmek için 15 saniye %10 Oksalik asit kullanarak elektrolitik dağlama yapılmıştır. Daha sonra da numunedeki HAZ geçişlerini ortaya çıkarmak için %3 Nital çözeltisinde 5 saniye beklenerek mikro yapı görüntüsü almak için dağlanmıştır. Daha sonra da mikro yapıda kaynağın ITAB'daki tane sınırları belirginleşene kadar numune üzerine pamuk yardımıyla Marshall çözeltisi sürülmüştür. Dağlamalarda kullanılan çözeltilerin formülasyonları Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7: Dağlamalarda kullanılan çözeltilerin formülasyonu

Çözelti Adı	Karışım İçeriği	Miktar
Nital Çözeltisi %3	%3 Nitrik Asit + Etanol	1000 ml balon joje
Oksalik Asit Çözeltisi %10	100 gr Oksalik Asit + 900 ml saf su	1000 ml balon joje
NaOH Çözeltisi %10	100 gr katı NaOH + 900 ml saf su	1000 ml balon joje
Pikral Çözeltisi	Pikrik Asit + Etanol	1000 ml balon joje
Marshall Çözeltisi	8 gr Oksalik Asit + 5 ml H ₂ SO ₄ + 100 ml saf su + 110 ml H ₂ O ₂ (%30)	500 ml balon joje

5.5.2 Mikroyapı incelemeleri

Numunelerin tanecik yapılarını görebilmek için mikro incelemeleri Gedik Kaynak A.Ş bünyesinde bulunan Şekil 5.21'de gösterilen Leica DMİ8 M marka mikro inceleme cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 5.21: Mikroyapı inceleme cihazı

5.5.3 Makroyapı incelemeleri

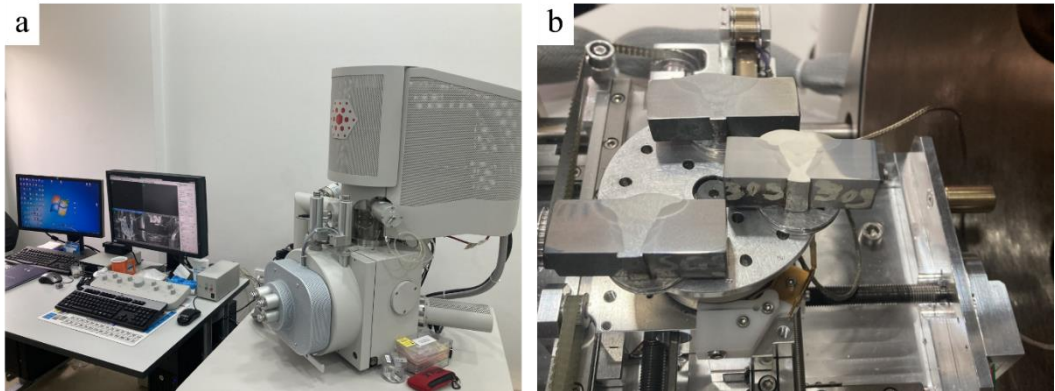
Mikro yapı görüntüleri alınan numunelerin her birine makro yapı görüntülerinin alınabilmesi için tekrardan ilave olarak dağlama yapılmıştır. Ferritik ilave metal kullanılan SG3 ve ER110 numunelerine tekrar %3 Nital çözeltisinde 10 saniye kadar dağlama yapılmıştır. Paslanmaz ilave metal kullanılan 2209 ve 309 LSi numunelerine de 15 saniye daha %10 Oksalik asit kullanarak elektrolitik dağlama yapılmıştır. Böylece numuneler makro görüntü almak için hazır hale gelmiştir. Numunelerin makro incelemeleri Gedik Kaynak A.Ş. bünyesindeki Şekil 5.22’de gösterilen Nikon SMZ745T marka makro inceleme mikroskobu ile yapılmıştır.



Şekil 5.22: Makro inceleme cihazı

5.5.4 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri

SEM incelemeleri ile makro ve çentik darbe testi sonrası elde edilen kırık yüzey yüzeylerinin daha yüksek büyütmelerdeki mikro görüntüleri alınarak analizleri yapılmıştır. SEM analizleri için Sakarya Üniversitesi SARGEM Laboratuvarı'ndaki Şekil 5.23-a'da gösterilen FEI Quanta FEG 450 model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. Şekil 5.23-b'de cihaza analiz yapılmak üzere yerleştirilen numune görüntüleri verilmektedir.



Şekil 5.23: a) Taramalı elektron mikroskobu genel görünümü, b) Numune yerleşimi



Şekil 5.25: Kimyasal analiz ölçüm cihazı (ARL)

5.5.7 XRF spektrometresi ile kimyasal analiz ölçümleri

Kaynaklı parçaların kök bölgesinden üst kep bölgesine doğru kimyasal analizlerinde gerçekleşen seyrelme ve değişim miktarlarının tespiti için makro numunelerinin üzerinden Gedik Kaynak A.Ş. bünyesinde bulunan ve Şekil 5.26’da gösterilen XRF spektrometresi ile alansal ve noktasal kimyasal analiz ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.26: Kimyasal analiz ölçüm cihazı (XRF)

5.5.8 N-O analiz cihazı

Kaynak işlemi esnasında kullanılan ilave metallerin içeriğinde bulunan Azot (N) ve Oksijen (O) gibi elementlerin varlığı kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerini oldukça fazla etkilemektedir. Bu sebeple kaynak işlemlerinde kullanılan kaynak metallerinin Azot ve Oksijen miktarları Gedik Kaynak A.Ş. bünyesinde bulunan ve Şekil 5.27’de gösterilen Leco ON736 marka Azot – Oksijen analiz cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 5.27: N/O analiz cihazı

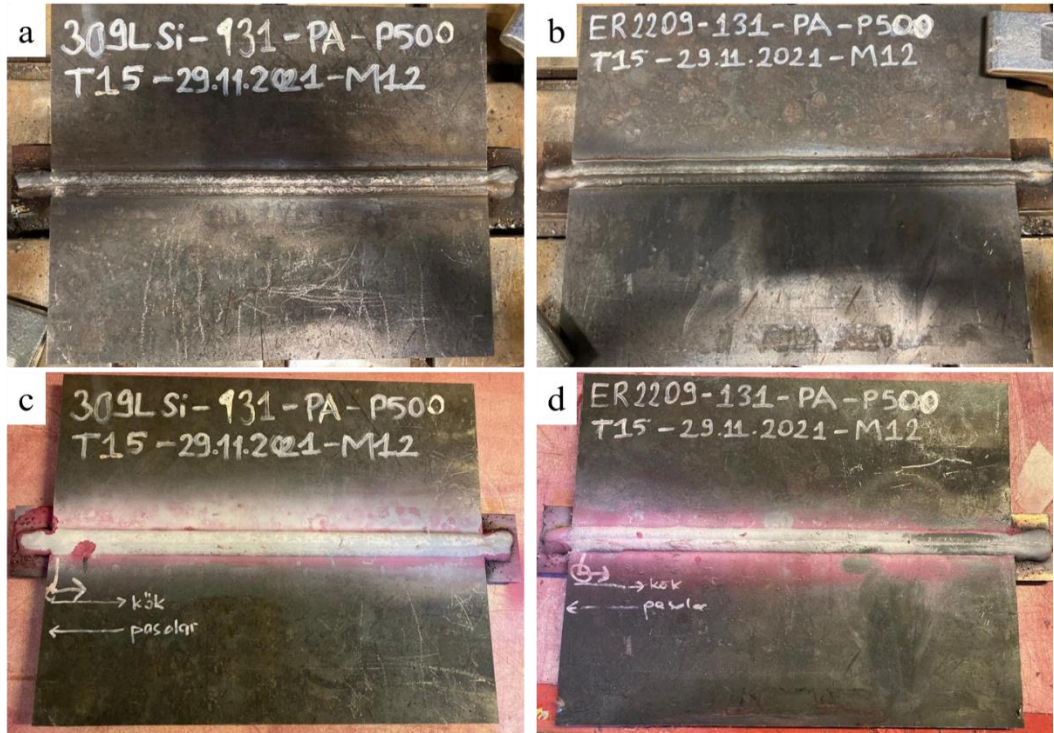
6. SONUÇLAR

Tahribatsız, tahribatlı analiz ve metalografik testler sonucunda elde edilen sonuçlar ayrı ayrı yorumlanarak maddeler halinde değerlendirilmiştir.

6.1 Tahribatsız Muayene Sonuçları

6.1.1 Sıvı penetrant ve görsel muayene sonuçları

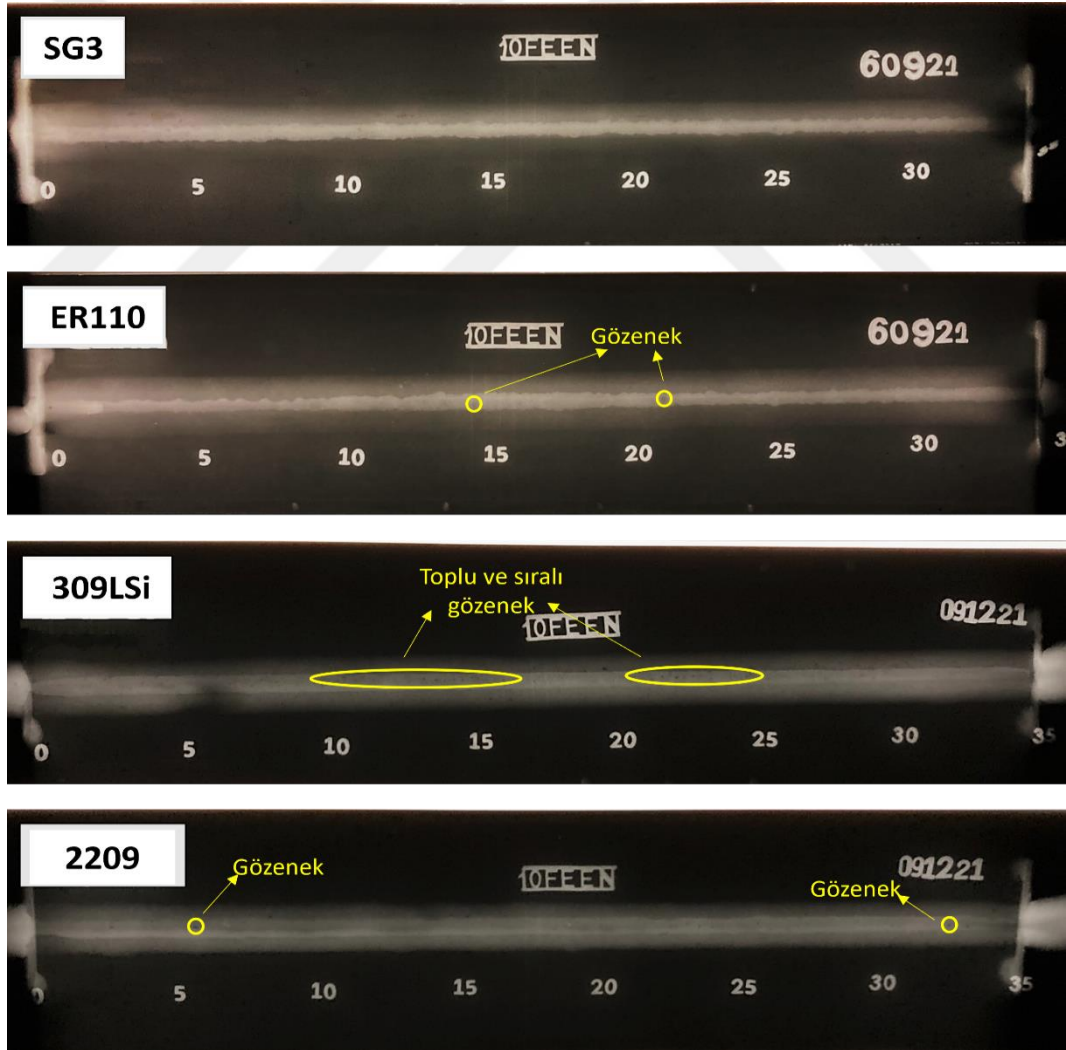
Görsel muayene ve sıvı penetrant muayenesi sonucunda; SG3 ve ER110 ilave metalleri ile yapılan kaynaklarda herhangi bir hata tespit edilmezken 309LSi ve ER2209 ilave metalleri ile yapılan kaynaklarda yüzeysel ve test kalitesini etkilemeyecek boyutlarda gözenek hataları tespit edilmiştir. Şekil 6.1-a ve Şekil 6.1-b'de sırasıyla 309LSi ve ER2209 ilave metalleri ile kaynaklanan plakaların genel görüntüsü, Şekil 6.1-c ve Şekil 6.1-d'de ise 309LSi ve ER2209 ilave metalleri ile kaynak yapılan plakaların sıvı penetrant muayenesi sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 6.1: Kaynak sonrası sıvı penetrant muayenesi yapılmış plakalar (a) 309LSi genel görüntü, (b) ER2209 genel görüntü, (c) 309LSi muayene sonucu, (d) ER2209 muayene sonucu

6.1.2 Radyografik muayene sonuçları

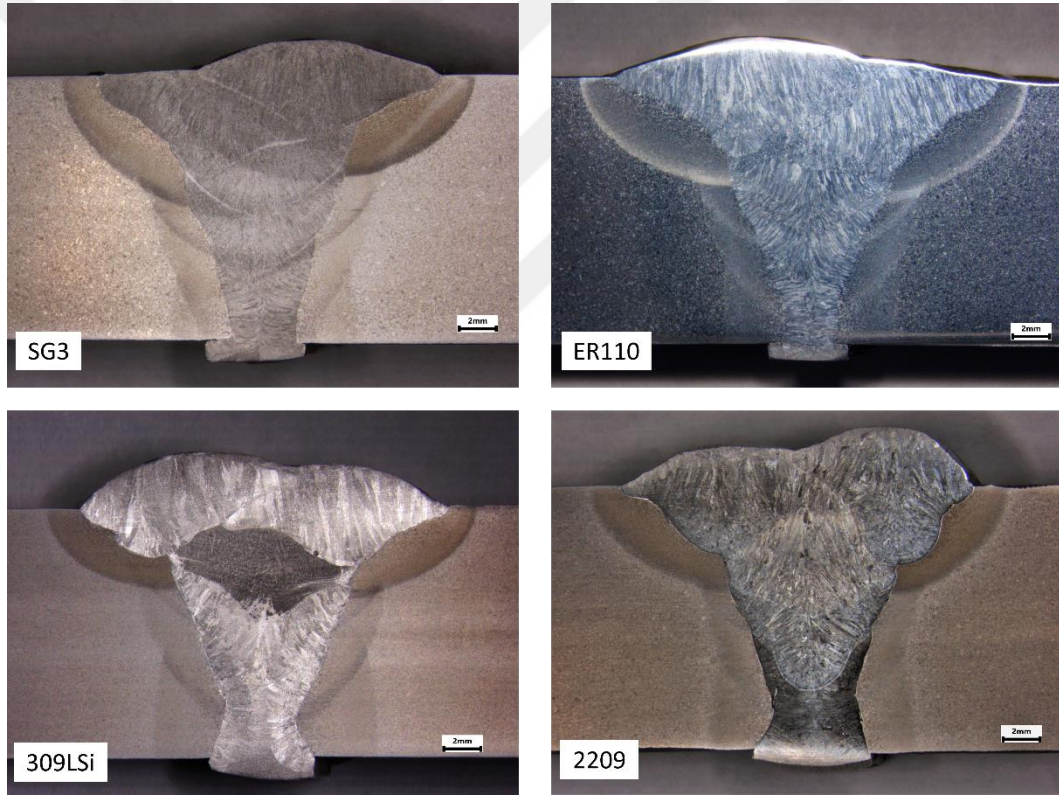
Şekil 6.2’de 4 farklı ilave metal ile birleştirilen zırh çeliği plakalarının radyografik muayene film görüntüleri verilmiştir. X-Ray muayenesi sonucunda ER110, ER309 ve ER2209 ilave metalleri ile yapılan kaynaklarda Şekil 6.2’de sarı ile yuvarlak içerisinde alınan bölgelerde çoğunluğu yüzeyde olan gözenek hataları tespit edilirken SG3 ilave metali ile yapılan kaynakta herhangi bir hata tespit edilmemiştir. Tespit edilen gözenek hataları ISO 5817-B standardına göre değerlendirildiğinde ER110 ve ER2209 ile kaynatılan plakalarda tespit edilen izole gözenekler ISO5817 standardının en yüksek kalite sınıfı olan B sınıfının içerisinde kalmaktadır. 309LSi ile kaynatılan plakada ise çekme, çentik ve eğme testlerinde kullanılacak numunelerin çıkartılması esnasında gözenek tespit edilen bölgelerden kaçınılmıştır.



Şekil 6.2: Radyografik muayene görüntüleri

6.1.3 Makro görüntü inceleme

Şekil 6.3'te SG3, ER110, 309LSi ve 2209 ilave metalleri ile kaynak yapılan zırh çeliği plakalarının kesit görüntüleri alındıktan sonra dağlama yapılarak elde edilen makro yapıların 5x0,67 büyütmedeki görüntüleri verilmiştir. İlave metal ile ana malzemenin yapıları birbirinden farklı olduğu için ve ilave metal ana malzemeden daha erken dağlanmıştır. Bu sayede dağlama sonrası ortaya çıkan görüntülerde ITAB ve kökten kepe doğru sırasıyla 1-1-1-2 paso sıralamasıyla atılan pasolar net bir şekilde görülmektedir. Hiçbir kaynakta nüfuziyetsizlik hatasına rastlanmamıştır. Ayrıca gözenek, çatlak veya pasolar arası ergime hatası gibi diğer hata türleri de tespit edilmemiştir. Tüm kaynaklı numunelerin ilave metal bölgesinde dentritik sütunların ilerleyişi görülebilmektedir.



Şekil 6.3: Numune makro görüntüleri

6.2 Tahribathı Muayene Sonuçları

6.2.1 Çekme testi sonuçları

Kaynaklı plakaların enine çekme test sonuçları Çizelge 6.1'de verilmiştir. Test boyunca kaynaklı numunelerin uzamaları ekstansometre yardımıyla ölçülmüş olup ilk uzunluk (L_0) değeri olarak 30 mm alınmıştır.

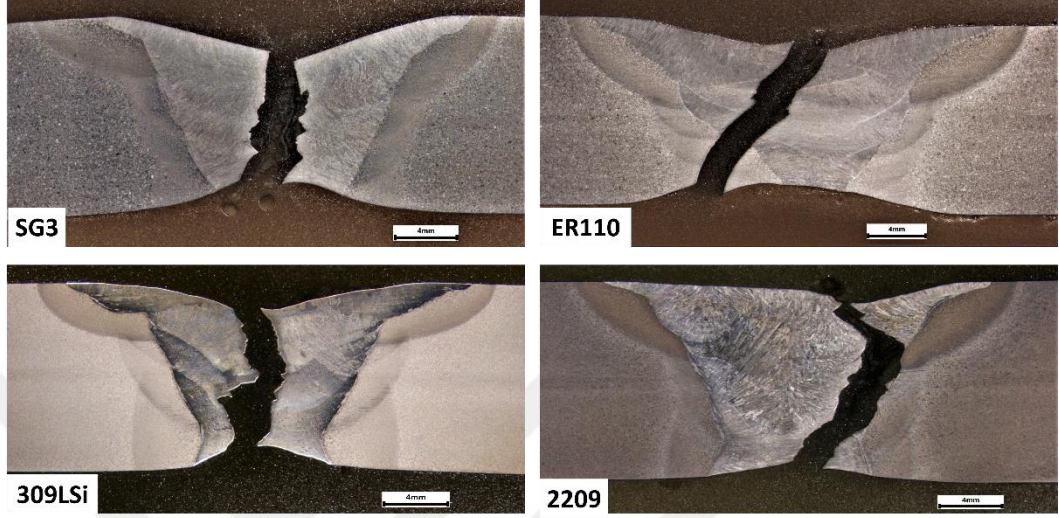
Çizelge 6.1: Çekme testi sonuçları (Lo: 30 mm)

	Akma (MPa)	Çekme (MPa)	Uzama (%)
SG3	575	795	15,3
	594	808	11,0
	Ort. 585	Ort. 802	Ort. 13,15
ER110	800	1046	17,7
	813	1057	14,2
	Ort. 807	Ort.1052	Ort. 15,95
309LSi	608	856	6,37
	613	850	6,23
	Ort. 611	Ort. 853	Ort. 6,30
2209	660	898	6,73
	681	844	5,04
	Ort. 671	Ort. 871	Ort. 5,88

Kaynaklı parçaların çekme mukavemetleri ana malzemenin mekanik özellikleri ile kıyaslanmıştır. Bu bağlamda; SG3, ER110, 309LSi ve ER2209 ilave metalleri ile yapılan kaynakların çekme mukavemetleri ana malzemenin çekme mukavemetine oranla sırasıyla; %48, %62, %51, %52'si şeklinde ölçülmüştür. Böylece ana malzemeye en yakın çekme mukavemetinin 1052 MPa ile ER110 ile yapılan kaynakta elde edildiği, en düşük çekme mukavemetinin ise ortalama 802 MPa ile SG3 ile yapılan kaynakta elde edildiği görülmüştür. Aynı şekilde akma mukavemeti açısından kıyaslayacak olursak yine en yüksek akma mukavemeti ortalama 807 MPa ile ER110'da en düşük akma mukavemeti ise ortalama 585 MPa ile SG3'te tespit edilmiştir. Fakat 2209, SG3 ve 309LSi ilave metalleri ile yapılan kaynakların akma mukavemetlerinin birbirine çok yakın değerler olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca, yapılan kaynakların çekme testlerinde akma ve çekme sonuçları tellerin sertifikalarında belirtilen akma ve çekme değerlerinden çok daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak ise ilave metallerin alaşımlı sert yapıdaki zırh çeliği ile kaynak sırasında seyrilmesi ve ilave metalin hızlı soğumasına bağlı olduğu gözlenmiştir.

Çekme test numunelerin kesit görüntüleri alınarak kopma esnasında gerçekleşen çatlak ilerlemesinin yönü tespit edilmiş ve sonuçları Şekil 6.4'te verilmiştir. Görüldüğü üzere SG3 ve 309LSi ile yapılan kaynaklarda kopma işlemi kaynak boyunca gerçekleşmiştir. Fakat ER110 ile yapılan kaynakta ise çatlaklar önce kök

tarafındaki ITAB bölgesinden başlamış ve daha sonra kaynağa doğru ilerlemiştir. Öte yandan 2209'da ise diğer üç kaynaktan farklı olarak çatlak ilerlemesi ilk olarak kaynak bölgesinin kök tarafından başlamış ve daha sonra ergime çizgisi boyunca ilerleyerek tekrardan kep bölgesinde kaynak metaline doğru yön değiştirmiştir.



Şekil 6.4: Çekme numunelerinin makro kopma görüntüleri

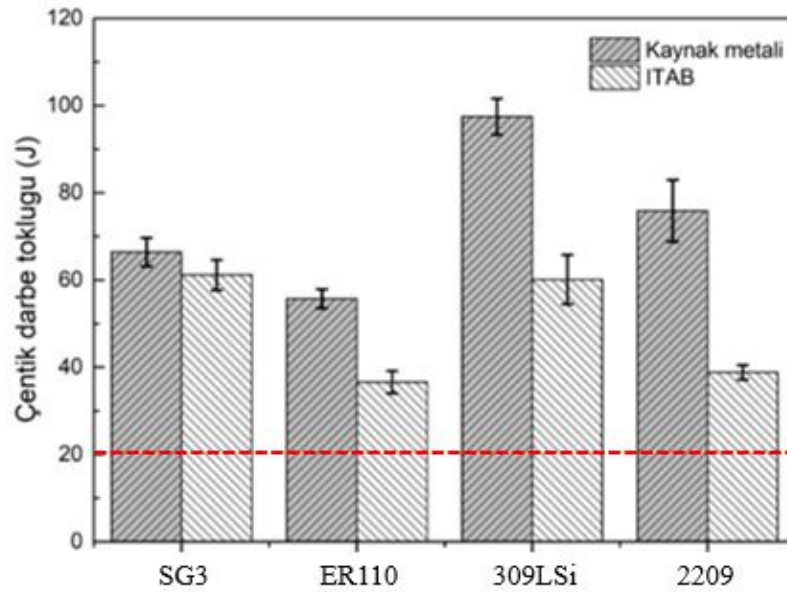
6.2.2 Çentik darbe testi sonuçları ve kırılma morfolojisi

Kaynak işlemleri sonrasında tüm kaynaklı birleştirmelerden 3'er adet olmak kaydıyla kaynak ve ITAB bölgelerinden çentik numuneleri çıkartılmış ve bu numuneler -40°C'de test edilmiştir. Elde edilen test sonuçları Çizelge 6.2'de, birbirleri ile karşılaştırması ise Şekil 6.5'te verilmiştir. Ayrıca yine Şekil 6.5'te referans alınabilmesi için yatay ekseninde Miilux P500 kalite çeliğin Miilux ürün kataloglarında belirtilen -40°C'deki minimum sınır olarak belirtilen 20J'lük değer kırmızı noktalar ile gösterilmiştir. Görüleceği üzere kaynak bölgesinde en yüksek tokluk değeri ortalama 97 J ile 309LSi ile yapılan kaynaklarda, sonrasında ise sırasıyla 78 J ortalama ile SG3'te, 68 J ortalama ile 2209'da tespit edilmiş olup, en düşük tokluk değeri ise ortalama 37 J ile ER110 ilave metali ile yapılan kaynaklarda tespit edilmiştir. ITAB bölgesinde ise en yüksek tokluk 67 J ile SG3'te, sonrasında ise 60 J ve 36 J değerleri ile sırasıyla 309LSi ve 2209 ile yapılan kaynaklarda tespit edilmiştir. Burada da yine en düşük çentik darbe direnci ortalama 36 J ile ER110'da tespit edilmiştir. Fakat tüm sonuçlar değerlendirildiğinde yapılan bütün kaynakların kaynak bölgesi ve ITAB bölgesi darbe çentik değerleri ana malzeme için -40 °C'de minimum değer olarak belirtilen 20 J'ün üzerinde olması nedeniyle başarılı

birleştirmelerin elde edildiği kanısına varılmıştır. Yapılan bu testler sonucunda kaynak bölgesinin çentik darbe numunelerinden en yüksek tokluk değeri 97 J ortalama ile 309 LSi ilave metaliyle yapılan kaynak numunesinde görülmüştür. ITAB'ın çentik darbe numunelerinden en yüksek tokluk değeri ise 67 J ortalama ile SG3 ilave metaliyle yapılan kaynak numunesinde gözlenmiştir. Şekil 6.5'te 309LSi ilave metali östenitik bir yapıda olduğu için tokluk değeri en yüksek, 2209 ilave metali dubleks yapıda olup östenitik + ferritik bir yapıda olduğu için tokluk değeri biraz daha düşük, SG3 ile ER110 ilave metalleri ferritik yapıda oldukları için tokluk değerlerinin en düşük seviyede olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 6.2: Çentik darbe testi sonuçları

Çentik Darbe Testi Sonuçları (J) -40 °C (10x10 mm)		
	Kaynak Bölgesi	ITAB
SG3	Min. 58 Ort. 78	Min. 63 Ort. 67
ER110	Min. 29 Ort. 37	Min. 34 Ort. 36
309LSi	Min. 93 Ort. 97	Min. 56 Ort. 60
2209	Min. 68 Ort. 76	Min. 37 Ort. 39

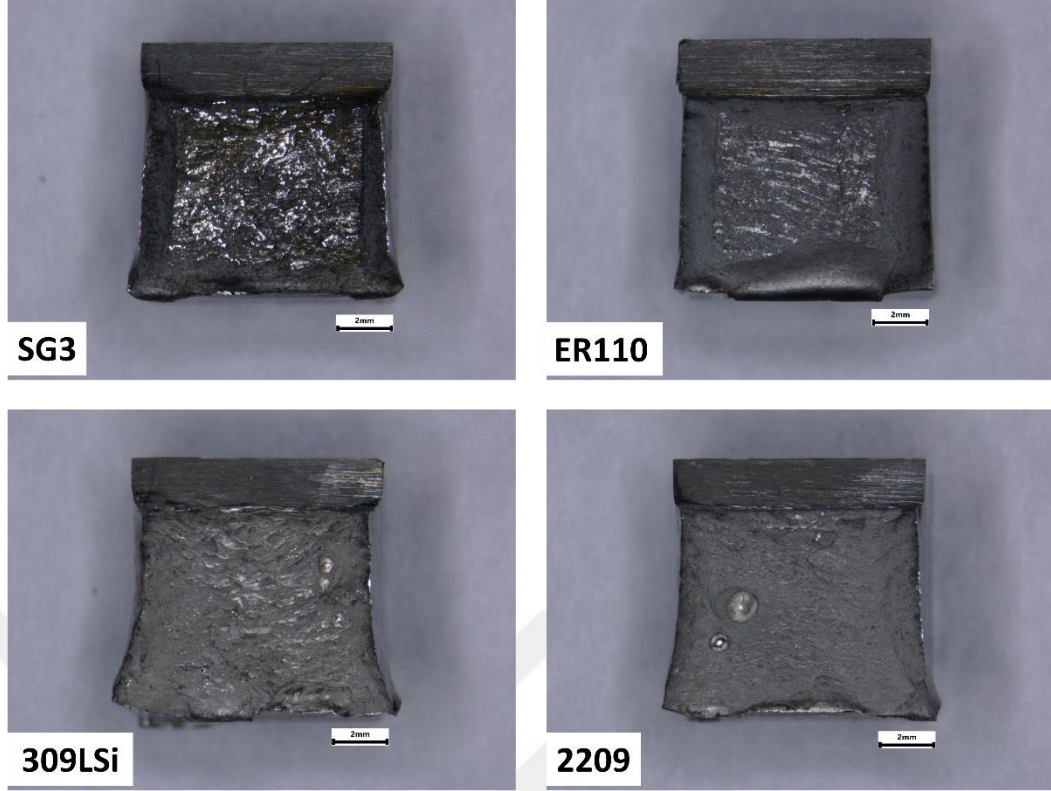


Şekil 6.5: Numunelerin çentik darbe sonuç grafiği

Kaynak bölgesinden alınan çentik darbe numunelerinin kırık yüzey görüntüleri şekil 6.6'da makro olarak incelenmiştir. Bu görüntülere göre 309 ilave metal ile yapılan kaynağın kaynak bölgesinden alınan çentik darbe numunesinin alt kısmı en geniş numune olduğu görülmektedir. Bu genişleme darbeye karşı mukavemet göstermesi sonucu oluşmuştur. Bu fazla genişlemenin nedeni Çizelge 6.2'de görüldüğü üzere 309 ilave metal ile yapılan kaynağın çentik darbe numunesinin ortalama tokluk değeri 97 j olup tokluğu en yüksek numune olmasından kaynaklanmaktadır.

2209 ve SG3 ilave metal ile yapılan kaynakların kaynak bölgelerinden alınan çentik darbe numunelerinin alt kısımlarının birbirine benzediği ve fazla geniş olmadığı görülmektedir. Bu orta düzey genişlemenin nedeni Çizelge 6.2'de görüldüğü üzere 2209 ve SG3 kaynak metalleri ile yapılan kaynakların çentik darbe numunelerinin ortalama tokluk değerleri sırasıyla 76 j ve 78 j olup tokluk değerleri birbirine yakın numuneler olmasından kaynaklanmaktadır.

ER 110 ilave metal ile yapılan kaynağın kaynak bölgesinden alınan çentik darbe numunesinin alt kısmı ise en dar numune olduğu görülmektedir. Bu sebeple de darbeye karşı yeteri kadar mukavemet gösterememiştir. Bu darlığın nedeni Çizelge 6.2'de görüldüğü üzere ER 110 ilave metal ile yapılan kaynağın çentik darbe numunesinin ortalama tokluk değeri 37 j olup tokluğu en düşük numune olmasından kaynaklanmaktadır.

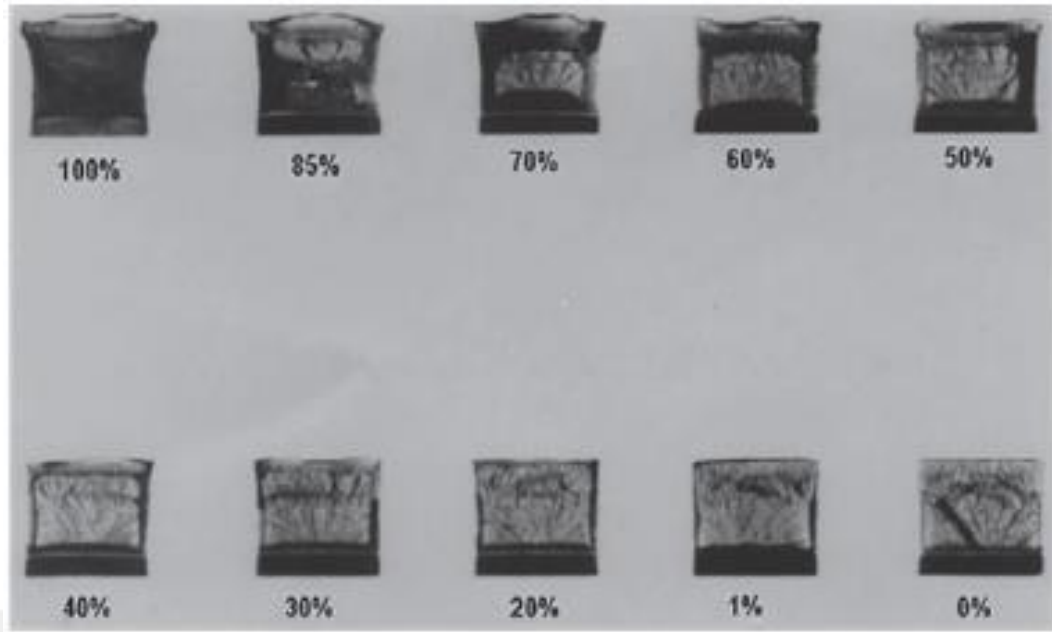


Şekil 6.6: Kaynak bölgesinin çentik kırılma yüzey görüntüleri

Çentik darbe numunelerinin yüzey kırılma yüzdelerine bakarak sünek, gevrek analizleri yapılabilmektedir. Süneklik, gevreklik analizleri, TS-EN-ISO-148-1 standardına göre Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de gösterilen % görüntüleri esas alınarak belirlenmektedir. İncelenen standarda göre 309 ilave metal ile kaynaklanan numunenin çentik darbe kırılma yüzey yüzdesi %100 olarak belirlenmiş olup sünekliği yüksektir, 2209 ilave metal ile kaynaklanan numunenin çentik darbe kırılma yüzey yüzdesi %100 olarak belirlenmiş olup sünekliği yüksektir, ER110 ilave metal ile kaynaklanan numunenin çentik darbe kırılma yüzey yüzdesi %50 olarak belirlenmiş ve yarı gevrek yarı sünek bir yapıdadır. SG3 ilave metal ile kaynaklanan numunenin çentik darbe kırılma yüzey yüzdesi %70 olarak belirlenmiş olup sünekliği daha yüksek bir malzeme olduğu görülmüştür.



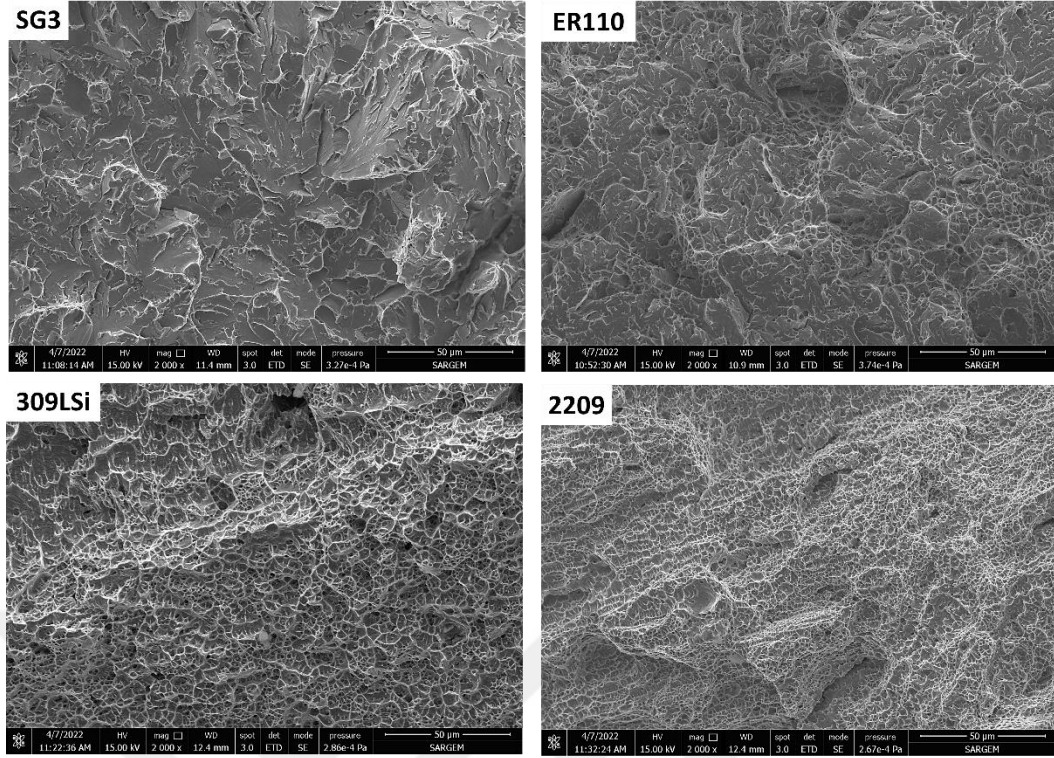
Şekil 6.7: Çentik darbe numunelerinin kırık yüzey % hesaplama standardı [73]



Şekil 6.8: Çentik darbe yapılmış numunelerin hesaplanmış yüzey yüzdeleri [73]

Şekil 6.9’da çentik darbe deneyi sonrası oluşan kırılma yüzeylerinin SEM görüntüsü yer almaktadır. Bu fotoğraflarda kırılma yüzeylerinde girinti ve çıkıntı oluşumu kırılma türünün sünek olduğunu belirtmektedir. Yapılan bir çalışmada çentik darbe numunelerinin kırık yüzey görüntüleri SEM’de incelenmiş ve yüzeylerdeki girinti çıkıntı yapılarının kırılma ile beraber dentrit kollarının kopması nedeniyle ortaya çıkan boşluklar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca oluşan bu kırılmaların tane sınırı bölgelerinden kopması, görülen boşlukların dentrit kolları nedeniyle oluştuğunu desteklemektedir. Bu gibi kırılma yapılarına; taneler arası veya intergranüler kırılmalar denilmektedir [74].

Birleştirmelerin kaynak bölgesine uygulanan çentik darbe deneyleri sonucunda elde edilen kırılma yüzey morfolojileri Şekil 6.9’da incelendiğinde; -40°C’de uygulanan testlerde minimum gereklilikleri sağlayan ferritik yapıya sahip SG3 ve ER110 kırılma morfolojileri yarı gevrek formda gerçekleşmiştir. Fakat doğası gereği östenitik yapıya sahip 309LSi östenitik-ferritik yapıya sahip dubleks paslanmaz çelik tam sünek yapıyla kırılma gerçekleştirmiştir. Farklı kimyasal kompozisyonlara sahip ilave metallerin faz yapıları tokluk değerlerine sınırlı bir şekilde etki etmiştir.



Şekil 6.9: SEM çentik darbe numunesi kırık yüzey incelemeleri

6.2.3 Eğme testi sonuçları

Yapılan SG3 ve ER110 eğme numunelerinin denemeleri Şekil 6.10’da gösterilmiştir. Buna göre SG3 kaynak teli ile kaynatılmış plakanın birinci eğme numunesinin kaynak bölgesi 82°’de çatlamaya başlamışken ikinci eğme numunesinin kaynak bölgesi 100°’de çatlamaya başlamıştır. ER110 ilave metal ile kaynatılmış plakanın birinci eğme numunesinin kaynak bölgesi 89°’de çatlamaya başlamışken ikinci eğme numunesinin kaynak bölgesi 60°’de çatlamaya başlamıştır.

Yapılan ER2209 ve ER309LSi eğme numunelerinin denemeleri incelendiğinde ER2209 kaynak teli ile kaynatılmış plakanın birinci eğme numunesinin kaynak bölgesi 47°’de çatlamaya başlamışken ikinci eğme numunesinin kaynak bölgesi 60°’de çatlamaya başlamıştır. ER309LSi ilave metal ile kaynatılmış plakanın birinci eğme numunesinin kaynak bölgesi 49°’de çatlamaya başlamışken ikinci eğme numunesinin kaynak bölgesi 52°’de çatlamaya başlamıştır.

Diğer bir sonuç olarak da SG3 ve ER110 ferritik ilave metalleri ile yapılan kaynakların eğme testleri daha büyük açılarda kıvrıldığı için 2209 ve 309LSi östenitik paslanmaz ilave metallerine göre eğilme kabiliyetlerinin daha iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 6.10: Kaynaklı numunelerinin eğme sonuçları

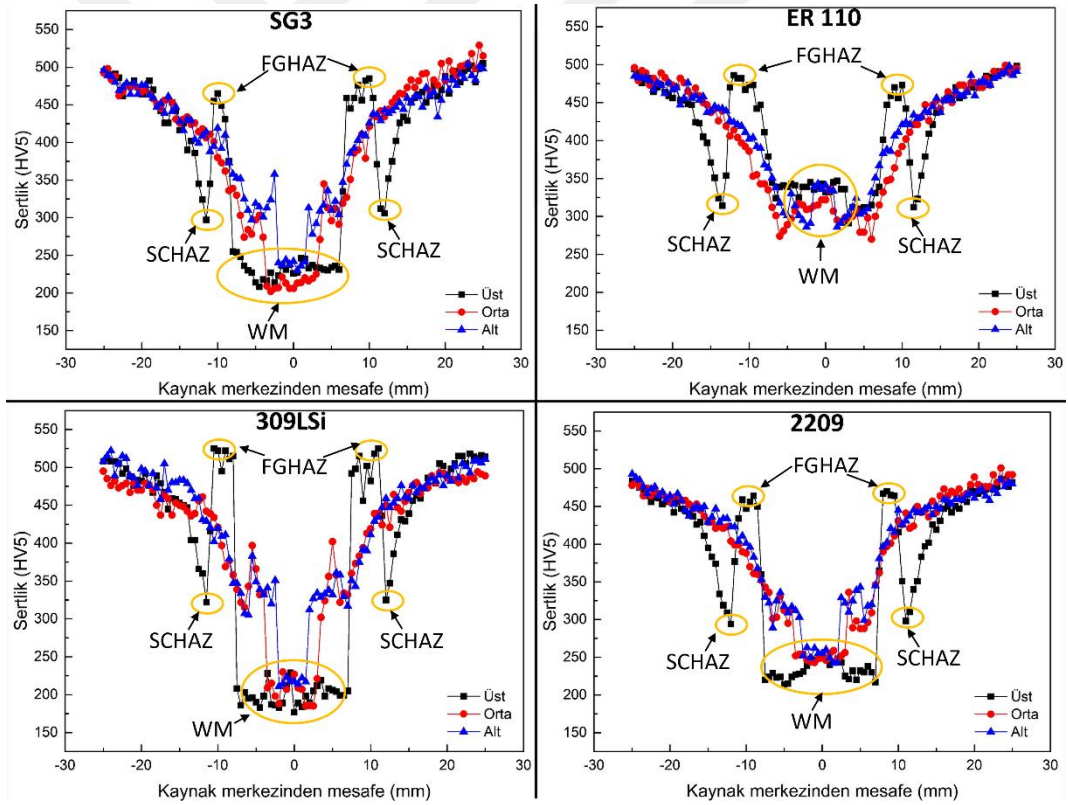
6.2.4 Sertlik testi sonuçları

Tüm kaynaklı birleştirmelerin kesitlerine sıralı sertlik testi uygulanmıştır. Seyrelme sonucu değişen kimyasal kompozisyon ve mikroyapısal dönüşümler sertlik sonuçları üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Bu nedenle ilave metaldeki seyrermenin oransal açıdan farklı olarak gerçekleştiği üst, orta ve alt bölgelerin sertlik değerleri detaylı olarak incelenmiştir. P500 ana malzemesi 480-540 HBW sertlik aralığına sahiptir. Farklı kaynak metalleri kullanılarak yapılan birleştirmelerde, ısı etkisi altındaki bölgelerde meydana gelen sertlik değişimleri dikkat çekicidir. Kök ve ara pasoların ITAB'ları birkaç kez termal çevrime maruz kaldığı için ITAB'da ciddi bir sertlik düşüşü meydana gelmiştir. Fakat üst pasolar tekrarlı çevrime maruz kalmadığı için

hemen hemen ana malzeme P500 ile aynı sertlik değerini korumuştur. Birleştirmelerin SC haz (dönüşmemiş bölge) bölgesinde tekrarlı ısıl çevrimler sonucu meydana gelen dislokasyon azalması nedeniyle ciddi sertlik düşüşleri meydana gelmiştir.

Kaynak yapılmamış haldeki P 500 ana malzemesinin sertliği 480-540 HBW aralığında ölçülmüştür. Yaptığımız tüm kaynaklarda kep genişlikleri ortalama olarak 20 mm gelmektedir. Kaynaklarda kullandığımız plakaların kaynak ağızları da V şeklinde olduğu için ilave metalin genişliği aşağılara doğru azalmaktadır. Sertlik ölçümü aldığımız üst, orta ve alt kısımlarda da sertlik grafiklerinden anlaşılaacağı üzere ITAB'a giderken yani sıfır noktasından ani sertlik değişimlerinin olduğu bölgeye giderkenki genişliğin en fazla olduğu kısmın üst, biraz daha dar olduğu kısmın orta ve en az genişlikteki kısmın alt bölge olduğu görülmektedir. P 500 plakalarının SG3 ilave metal ile yapılan kaynak çalışmasının sertlik sonuçları Şekil 6.11'de verilmiştir. İncelenen verilere göre; numunenin üst kısmından alınan sertliklerde kaynak bölgesinin ortalama sertliği 241 HV, ITAB'ın ortalama sertliği 404 HV olduğu görülmüştür. Numunenin orta kısmından alınan sertliklerde kaynak bölgesinin ortalama sertliği 227 HV, ITAB'ın ortalama sertliği 299 HV olduğu görülmüştür. Numunenin alt kısmından alınan sertliklerde kaynak bölgesinin ortalama sertliği 247 HV, ITAB'ın ortalama sertliği 315 HV olduğu görülmüştür. P 500 plakalarının ER 110 ilave metal ile yapılan kaynak çalışmasının sertlik sonuçları incelendiğinde numunenin üst kısmından alınan sertliklerde kaynak bölgesinin ortalama sertliği 331 HV, ITAB'ın ortalama sertliği 452 HV olduğu görülmüştür. Numunenin orta kısmından alınan sertliklerde kaynak bölgesinin ortalama sertliği 310 HV, ITAB'ın ortalama sertliği 291 HV olduğu görülmüştür. Numunenin alt kısmından alınan sertliklerde kaynak bölgesinin ortalama sertliği 338 HV, ITAB'ın ortalama sertliği 303 HV olduğu görülmüştür. ER110 ilave metal kullanılarak yapılan kaynağın numunesinin ilave metal bölgesindeki sertlik değerleri diğer tüm kaynak metalleri kullanılarak yapılan numunelerin ilave metal bölgesindeki sertlik değerlerinden daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. P 500 plakalarının 309LSi ilave metal ile yapılan kaynak çalışmasının sertlik sonuçları incelendiğinde numunenin üst kısmından alınan sertliklerde kaynak bölgesinin ortalama sertliği 199 HV, ITAB'ın ortalama sertliği 494 HV olduğu görülmüştür. Numunenin orta kısmından alınan sertliklerde kaynak bölgesinin ortalama sertliği 206 HV, ITAB'ın

ortalama sertliği 355 HV olduğu görülmüştür. Numunenin alt kısmından alınan sertliklerde kaynak bölgesinin ortalama sertliği 217 HV, ITAB'ın ortalama sertliği 338 HV olduğu görülmüştür. Ayrıca 309LSi ilave metal kullanılarak yapılan kaynağın numunesinde ilave metalden ITAB' a doğru geçerken (iri taneli bölgede) sertlik değerlerinde diğer tüm kaynak metallerinden daha keskin artışlar görülmüştür. ITAB' dan ana malzemeye geçerken de (kısmi dönüşmüş bölge) keskin sertlik düşüşleri görülmüştür. P 500 plakalarının 2209 ilave metal ile yapılan kaynak çalışmasının sertlik sonuçları incelendiğinde numunenin üst kısmından alınan sertliklerde kaynak bölgesinin ortalama sertliği 232 HV, ITAB'ın ortalama sertliği 435 HV olduğu görülmüştür. Numunenin orta kısmından alınan sertliklerde kaynak bölgesinin ortalama sertliği 250 HV, ITAB'ın ortalama sertliği 302 HV olduğu görülmüştür. Numunenin alt kısmından alınan sertliklerde kaynak bölgesinin ortalama sertliği 253 HV, ITAB'ın ortalama sertliği 320 HV olduğu görülmüştür.



Şekil 6.11: Sertlik test sonuçları

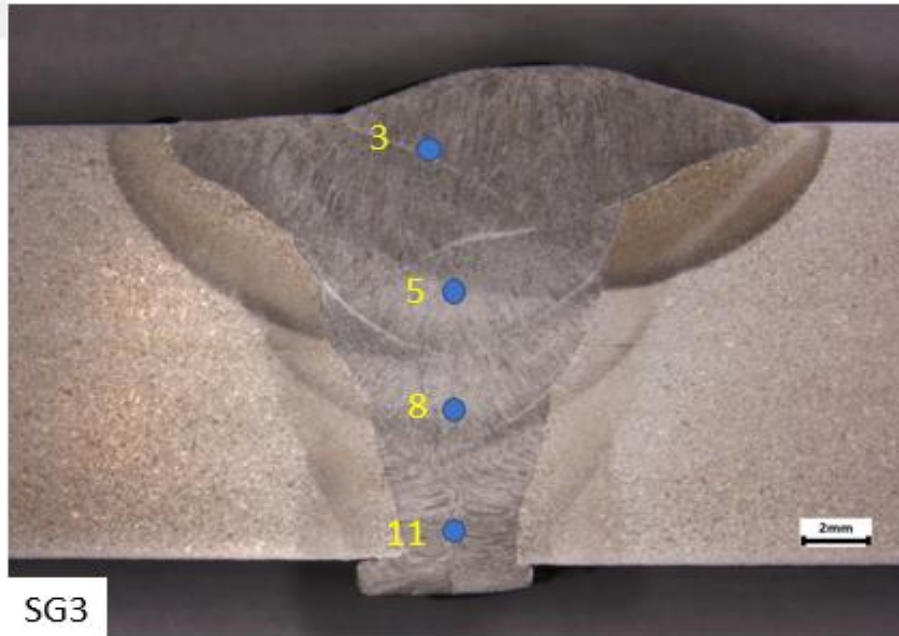
Sonuç olarak genel bir değerlendirme yapılacak olursa tüm numunelerde üst bölgelerin ITAB sertlikleri alt ve orta bölgelerin ITAB sertliklerinden çok daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi olarak alt ve orta bölgelerdeki ITAB'ların sonraki pasolar tarafından tavlınması fakat en üst pasonun üstünde başka bir pas

olmadığından tavlanmaması gösterilmiştir. Ayrıca MIL STD-1185 askeri standartlarına göre kaynak bölgesinin sertliğinin herhangi bir ergime sınırından itibaren 15,9 mm mesafede ana malzemenin sertliğine ulaşması gerektiği belirtilmektedir. Bu kapsamda bir değerlendirme yapıldığında SG3, ER110, 309LSi ve 2209 ilave metalleri ile yapılan kaynaklarda üst bölgeden alınan sertlik değerlerinin sırasıyla 13, 14, 10, 14,5 mm mesafede ana metal sertliğine ulaştığı görülmüştür. Bu da ısı girdisi parametrelerinin ITAB mukavemeti açısından uygun olduğunu göstermektedir.

6.3 Metalografik İnceleme Sonuçları

6.3.1 XRF noktasal element analizi incelemeleri

Çizelge 6.3'te incelenen verilere göre SG3 ilave metaliyle yapılan kaynak numunesinin yüzeyinde kepten köke doğru dikine yapılan noktasal element analizi incelemesinde bölgeler arası geçişlerde element değerlerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir. SG3 numunesinden alınan noktasal element analizinin ölçüm noktaları makro numunesinin üzerinde Şekil 6.12'deki gibi gösterilmektedir.

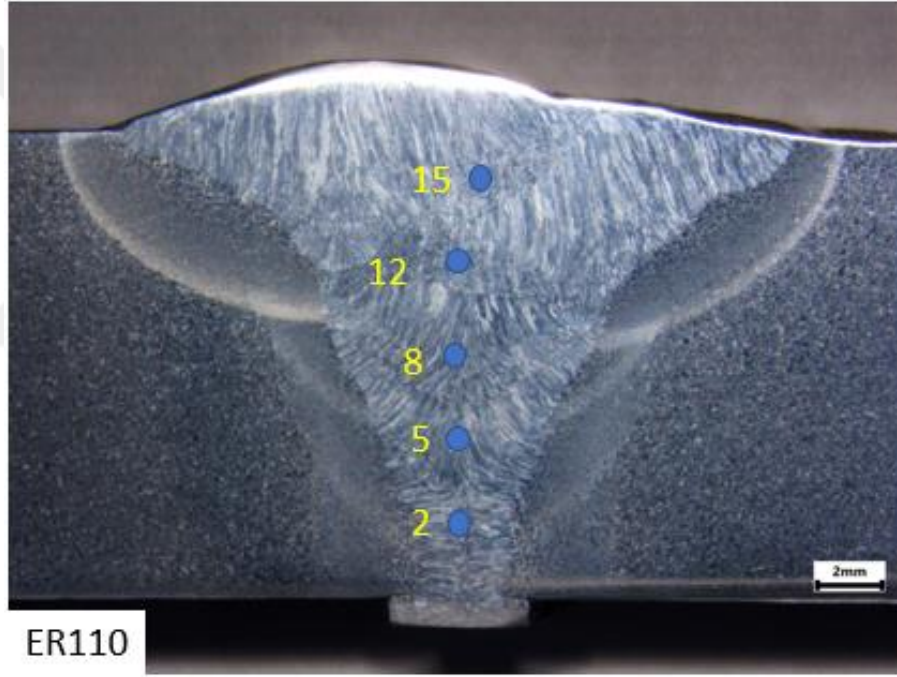


Şekil 6.12: SG3 noktasal element analizi makro görüntüsü

Çizelge 6.3: SG3 noktasal element analizi sonuçları (% ağırlıkça)

Bölge	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
3	97.8	0.1	0.09	0.03	1.5	0.5
5	97.7	0.09	0.09	0.03	1.5	0.5
8	97.7	0.07	0.06	0.02	1.6	0.6
11	97.7	0.1	0.1	0.03	1.6	0.5

Çizelge 6.4'te incelenen verilere göre ER 110 ilave metaliyle yapılan kaynak numunesinin yüzeyinde kepten köke doğru dikine yapılan noktasal element analizi incelemesinde bölgeler arası geçişlerde element değerlerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir. ER110 numunesinden alınan noktasal element analizinin ölçüm noktaları makro numunesinin üzerinde Şekil 6.13'teki gibi gösterilmektedir.

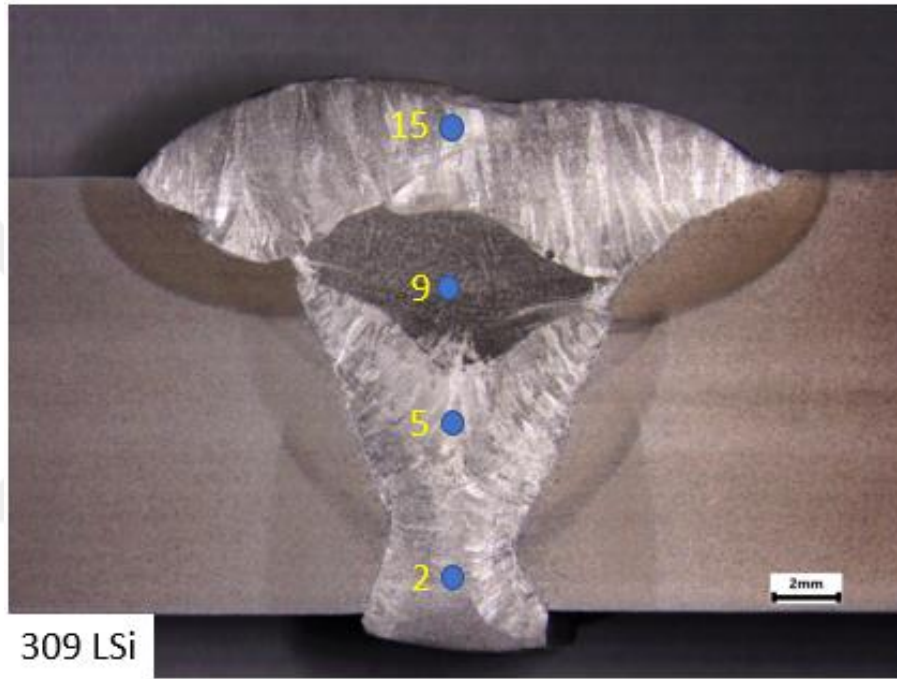


Şekil 6.13: ER110 noktasal element analizi makro görüntüsü

Çizelge 6.4: ER110 noktasal element analizi sonuçları (% ağırlıkça)

Bölge	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
15	95.2	0.3	2	0.5	1.5	0.4
12	94.7	0.3	2.3	0.6	1.6	0.5
8	94.6	0.3	2.3	0.6	1.6	0.6
5	94.7	0.3	2.1	0.6	1.7	0.5
2	95	0.3	2	0.5	1.7	0.5

309LSi ilave metaliyle yapılan numuneden alınan noktasal element analizinin ölçüm noktaları makro numunesinin üzerinde Şekil 6.14'teki gibi gösterilmektedir. Çizelge 6.5'te incelenen verilere göre 309LSi ilave metaliyle yapılan kaynak numunesinin yüzeyinde kepten köke doğru dikine yapılan noktasal element analizi incelemesinde üçüncü pasodaki 9 numaralı analizde Fe oranının 68,1 değerine düşüp, Cr oranının 19'a ve Ni oranının 12,3'e çıktığı gözlenmiştir. Numunenin kök pasosundaki 2 numaralı analizde Fe oranının 72,7 ile en yüksek, Cr oranının 16,6 ve Ni oranının 10 ile en düşük değerlerde çıktığı gözlenmiştir.



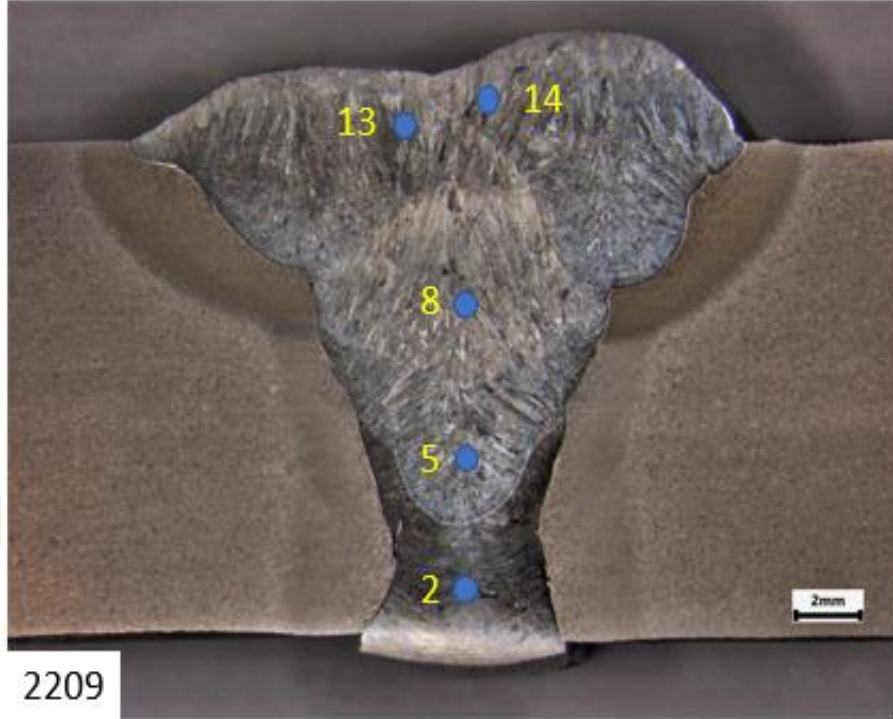
Şekil 6.14: 309 LSi noktasal element analizi makro görüntüsü

Çizelge 6.5: 309 LSi noktasal element analizi sonuçları (% ağırlıkça)

Bölge	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
15	71	17,6	10,8	0.06	0.008	0.5
9	68.1	19	12.3	0.02	0.08	0.4
5	71	17.7	10.7	0.05	0.07	0.53
2	72.7	16.6	10	0.08	0.06	0.5

2209 numunesinden alınan noktasal element analizinin ölçüm noktaları makro numunesinin üzerinde Şekil 6.15'teki gibi gösterilmektedir. Çizelge 6.6'da incelenen verilere göre 2209 ilave metaliyle yapılan kaynak numunesinin yüzeyinde kepten köke doğru dikine yapılan noktasal element analizi incelemesinde üçüncü pasodaki 8 numaralı analizde Fe oranının 67,2 değerine düşüp, Cr oranının 20,5' e ve Ni

oranının 8,8' e çıkarak en yüksek değerleri aldığı gözlenmiştir. Numunenin kök pasosundaki 2 numaralı analizde Fe oranının 75 ile en yüksek, Cr oranının 15,6 ve Ni oranının 6,7 ile en düşük değerlerde çıktığı gözlenmiştir.



Şekil 6.15: 2209 noktasal element analizi makro görüntüsü

Çizelge 6.6: 2209 noktasal element analizi sonuçları (% ağırlıkça)

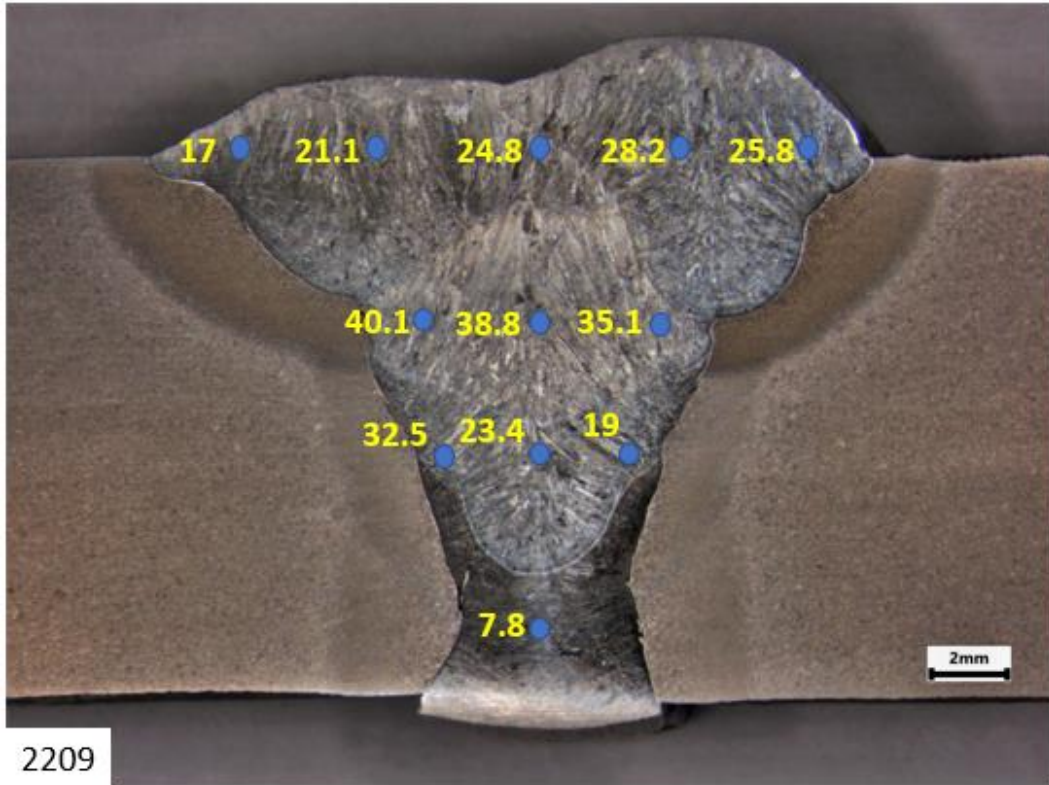
Bölge	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
14	70.2	18.7	7.9	2.9	-	0.3
13	71.8	17.6	7.5	2.8	-	0.3
8	67.2	20.5	8.8	3.2	-	0.3
5	69	19.4	8.3	3	-	0.3
2	75	15.6	6.7	2.4	-	0.3

6.3.2 Feritscope incelemeleri

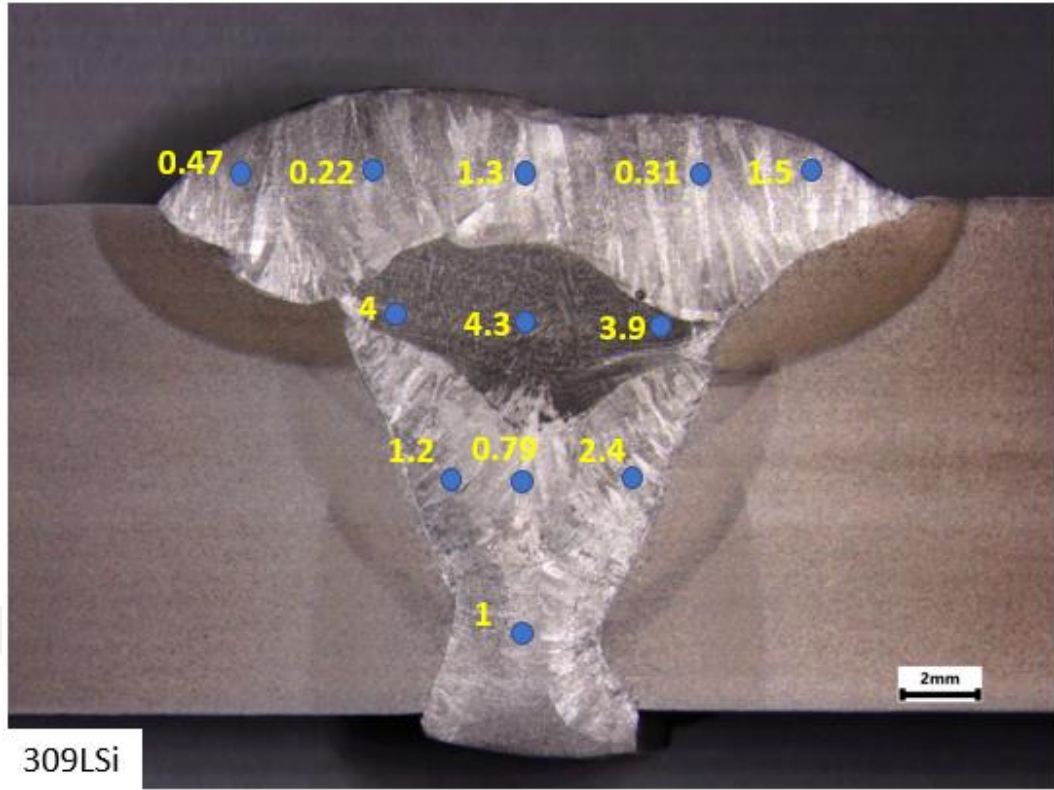
309LSi paslanmaz ve 2209 dubleks paslanmaz ilave metalleri kullanılarak yapılan birleştirmelerin makro numunelerinin noktasal feritscope manyetik ferrit ölçüm cihazı yardımıyla % ferrit değerleri olarak ölçülmüştür. Bu cihaz manyetiklik prensibi yardımıyla çalışmakta olup kaynak bölgesindeki delta ferrit miktarlarını % olarak ölçmektedir. Numunemizden ölçüm almadan önce daha önceden ferrit oranları standart olarak ölçülmüş kalibrasyon parçalarından ölçümler alınıp cihazın kalibre ayarı yapılmıştır. Daha sonra da Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'deki gibi

numunemizin üzerinden noktalarla belirtildiği gibi ölçümler yapılmıştır. Yapılan bu ölçümlerle östenitik yapılarda bulunan delta ferrit miktarları belirlenmiştir. Yapılan bir çalışmada çok pasolu kaynaklama işleminde ferrit miktarlarının değişimi incelenmiştir. Ferrit ölçümlerinde üst pasolara çıkıldıkça hava ile direk temas ederek hızlı bir katılaşma durumu olduğu için ferrit miktarlarının da arttığı gözlenmiştir. Fakat kaynağın kök ve orta bölümlerinde bir üst pasonun teması ile oluşan ısı işlem nedeniyle soğumanın yavaşlamasıyla beraber daha uzun süre faz dönüşüm sıcaklıklarında kaldığından dolayı östenitlik artacağından ferrit oranlarında düşüş gözlenmiştir [75].

Fakat bu çalışmada üst ve alt bölgedeki seyrelme oranları uygulanan sıralı pasolar nedeniyle daha fazla seyrelmeye neden olduğu için ferrit östenit dengesinin ilave metal boyunca dengesiz olmasına neden olmuştur. Ara pasolarda daha az seyrelmenin gerçekleşmesi yeterli ferrit miktarının oluşumuna olanak sağlamıştır. Bu bölgelerde seyrelmenin daha az oluşumu bölüm 6.3.2’de yapılan noktasal kimyasal analizler sonucu elde edilen veriler göstermiştir.



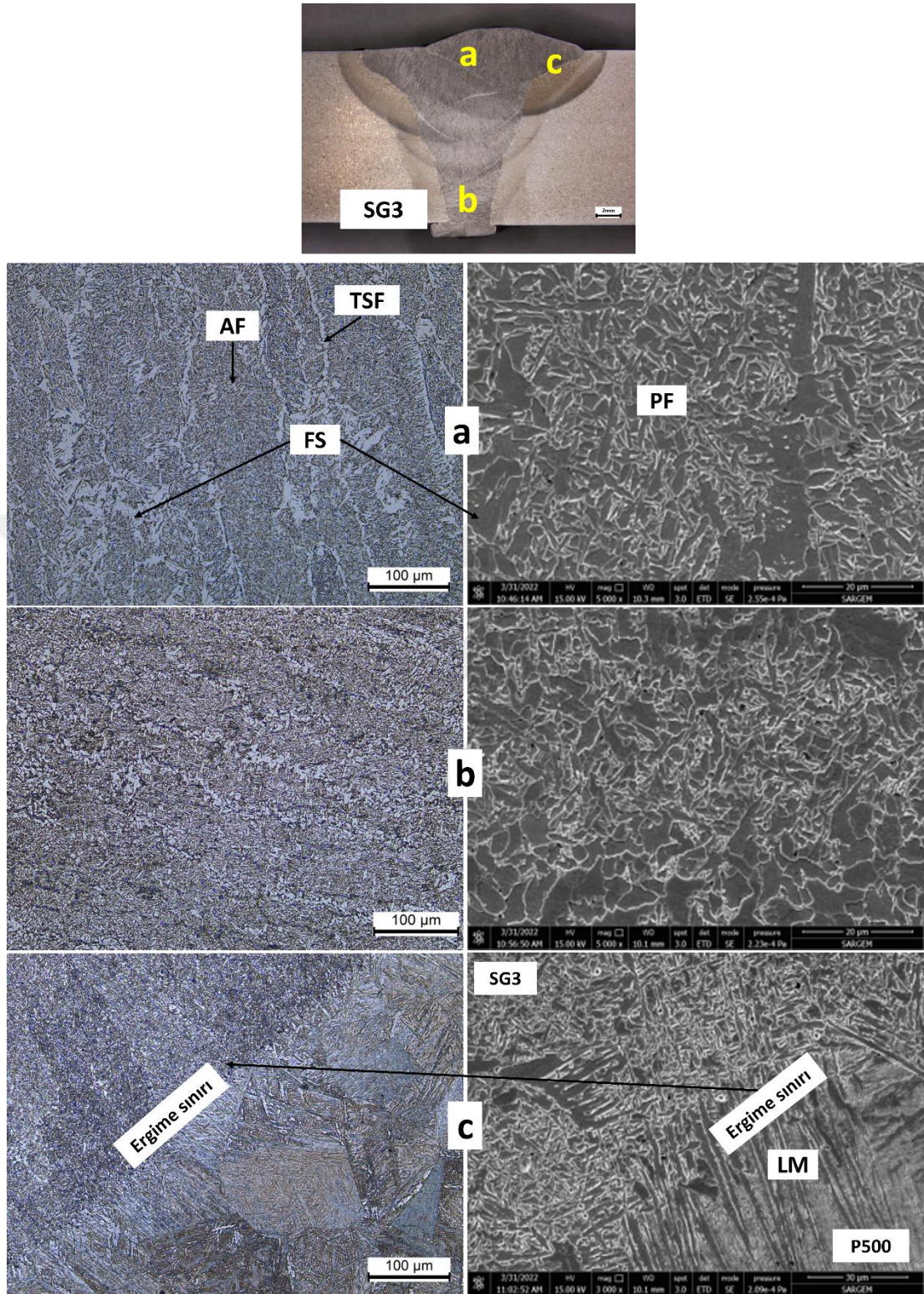
Şekil 6.16: 2209 numunesinin delta ferrit oranları (FN)



Şekil 6.17: 309LSi numunesinin delta ferrit oranları (FN)

6.3.3 Mikroyapı analizi

SG3 ilave metalinin kimyasal içeriğinde bulunan Mangan ve Silisyum değerleri nedeniyle kaynak sırasında östenit yapıların ferrite dönüşme sıcaklıklarını düşürerek sertleşmeyi hızlandırmaktadır [76]. Bu sayede martenzit yapıyla beraber asiküler ferrit yapıların oluşumu görülür. SG3 ilave metal ile birleştirilmiş P500 martenzitik zırh çeliğinin OM ve SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 6.18’de gösterilmiştir. İlave metalin kep pasolarında (Şekil 6.18-a) ikincil ferrit fazı oluşumu (FS), poligonal ferrit (PF), asiküler ferrit (AF) ve tane sınırı ferrit (TSF) oluşumları görülmektedir. ITAB’da ise ergime sınırı bölgesinden ana metale doğru ilerledikçe (Şekil 6.18-c) kaba taneli bölgelerde lata martenzit yapı oluşumları ile beraber iğnesel martenzitler görülmektedir. ITAB’da oluşmuş kaba taneli bölgelerin ortalama genişlikleri 200 mikron civarındadır

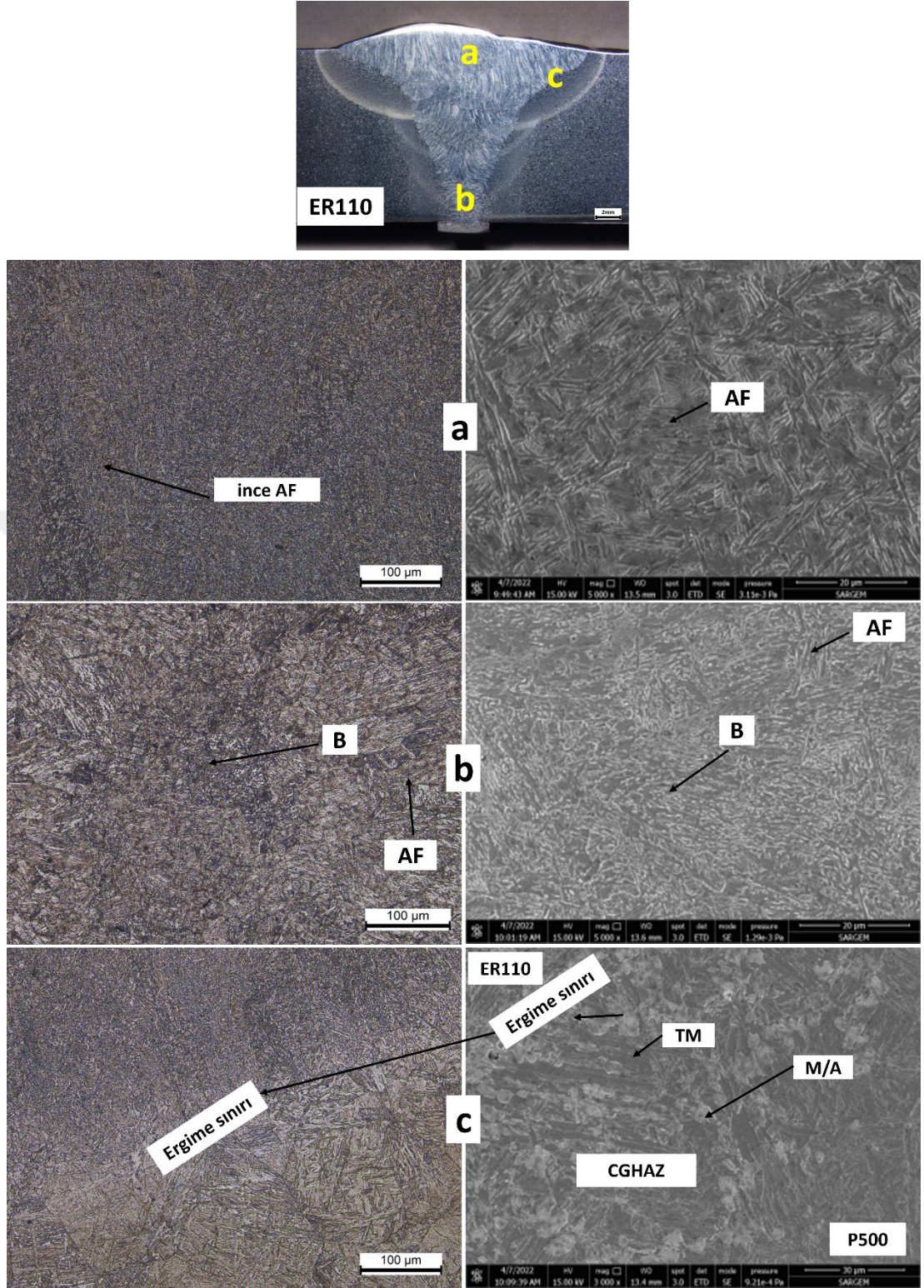


Şekil 6.18: SG3 numunesinin mikroyapı görüntüleri

Şekil 6.19'da ER110 ilave metali ile yapılan kaynak numunesinin mikroyapı görüntü incelemeleri verilmiştir. İncelenen mikroyapı görüntülerine göre zırh çeliklerinde atılan kaynak pasolarının soğuma sürelerinin değişimi ve üst üste çok pasolu olarak yapılan kaynak işlemlerinde soğuma koşullarının da değişiminden dolayı mikroyapılarda önemli değişimler olduğu görülmüştür.

Kaynaklı birleştirmelerde soğuma oranları ve soğuma zamanları $t_{8/5}$ parametresi kullanılarak 800-500 °C aralığındaki sıcaklıklarda uygun γ demir – α östenit faz dönüşümleri gerçekleştirilerek ayarlanabilmektedir. Bu faz dönüşümlerinde soğuma oran ve zamanlarındaki herhangi bir değişim mikroyapıyı direkt etkileyeceği için çeliklerin kaynağında $t_{8/5}$ parametreleri önemli rol oynamaktadır. Kaynak bölgesinin soğuması Δt 8/5 değerinden daha kısa bir sürede gerçekleşirse martenzitik veya beynitik (B) bir mikroyapı oluşumu gözlenmektedir [77].

En üst kapak pasolar (Şekil 6.19-a) hava ile serbest bir şekilde temas ederek hızlı bir soğuma gerçekleştirdikleri için mikro yapılarında genelde ince asiküler ferrit (AF) yapılar gözlenmiştir. Fakat martenzitik bir yapı görülememiştir. Kök pasoda (Şekil 6.19-b) ise yine ince asiküler ferrit oluşumları ile beraber östenit taneleri sınırlarında belirginleşen M/A (martenzit-östenit) yapılar görülmektedir. Çok pasolu kaynaklarda ilave metal matrisi, A_{c1} ve A_{c3} kritik sıcaklıklarına tekrardan ısıtılarak östenit dönüşümü gerçekleştirir. Bu östenitik bölgeler önceden bulunan östenit tane sınırlarında çekirdeklendiği için karbon oranları yüksektir. Soğutulduktan sonra östenitlerin bir bölümü M_s sıcaklığının üstünde beynitik ferrite dönüşürken M_s sıcaklığının altında bir sıcaklığa soğutulduğunda martenzitik bir dönüşüm gözlenir. ER110 ilave metaliyle kaynaklanan numunenin ITAB bölgesindeki (Şekil 6.19-c) ergime sınırı kenarında oluşan kaba taneli bölge (CG HAZ) oluşumları görülmektedir [78].

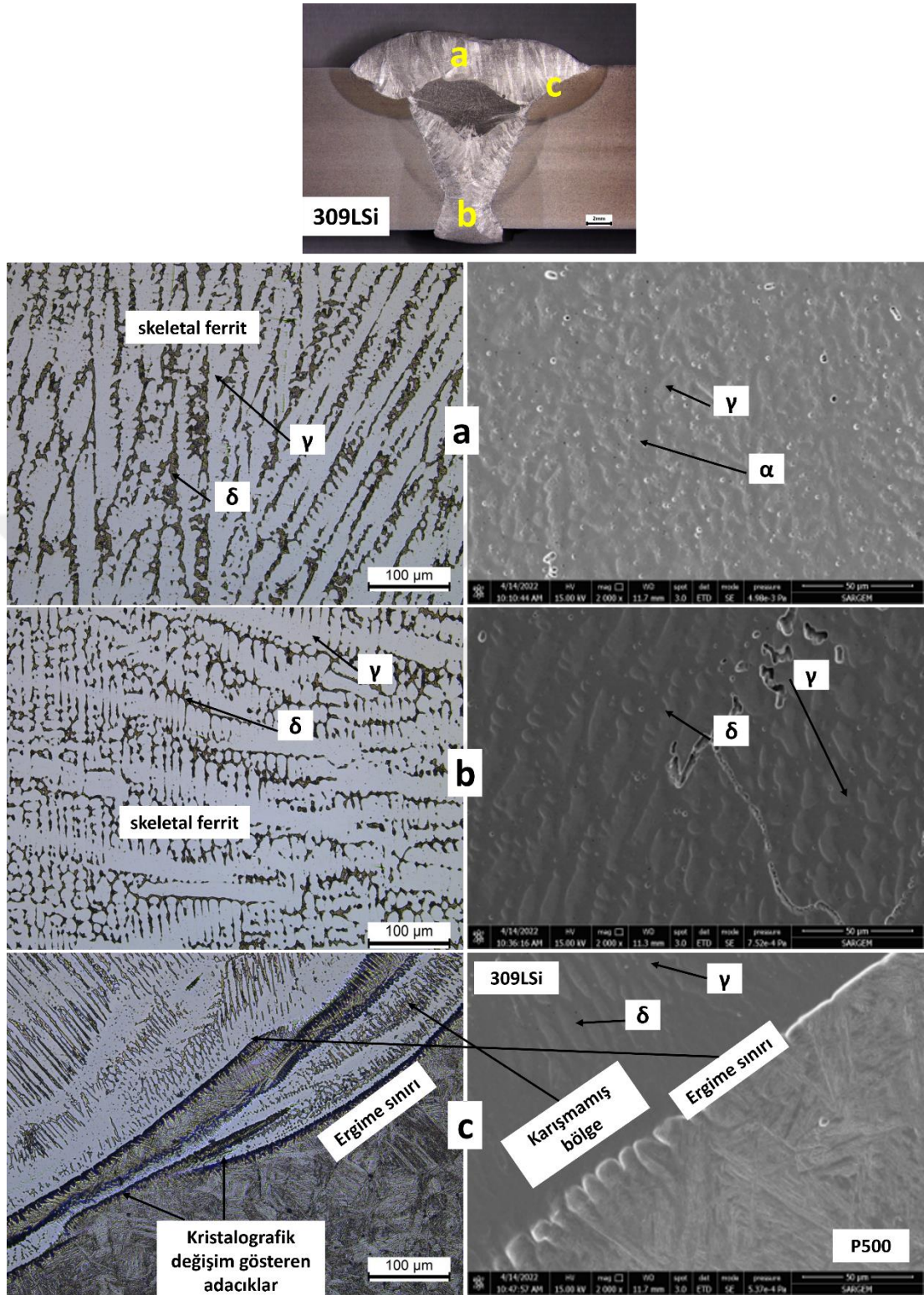


Şekil 6.19: ER110 numunesinin mikroyapı görüntüleri

Şekil 6.20’de 309LSi ilave metali ile yapılan kaynak numunesinin mikroyapı görüntü incelemeleri verilmiştir. Genel olarak ilave metalin kep ve kök bölgelerindeki koyu renkli yapıların δ -skeletal ferrit olduğu gözlenmiştir. İlave metalde kepteki (Şekil 6.20-a) açık renklere östenit (γ) yapıların oluşumu görülmektedir. Ergime sınırında bazı bölgelerde tam karışmamış bölge oluşumları görülmektedir. İlave metalde oluşan skeletal ferrit bölgeleri karşılaştırıldığında kökteki (Şekil 6.20-b) ince yapılı skeletal bölgenin sertlik değerlerinin kepe göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Gedik Kaynak ürün detaylarına bakıldığında AWS A8.16 standardına göre ER309LSi ilave metali için ER309L ilave metali ile arasındaki tek farkın yüksek silikon içeriği olduğu belirtilmiştir. ER309LSi ilave metalinin AWS A9.2 standardına göre gaz metal ark kaynağı uygulamalarında kullanılabildiği ve ana metal tarafından seyreltilerek düşük bir ferrit yüzdesi ya da tamamen östenitik kaynak bölgesi oluşturduğu belirtilmiştir.

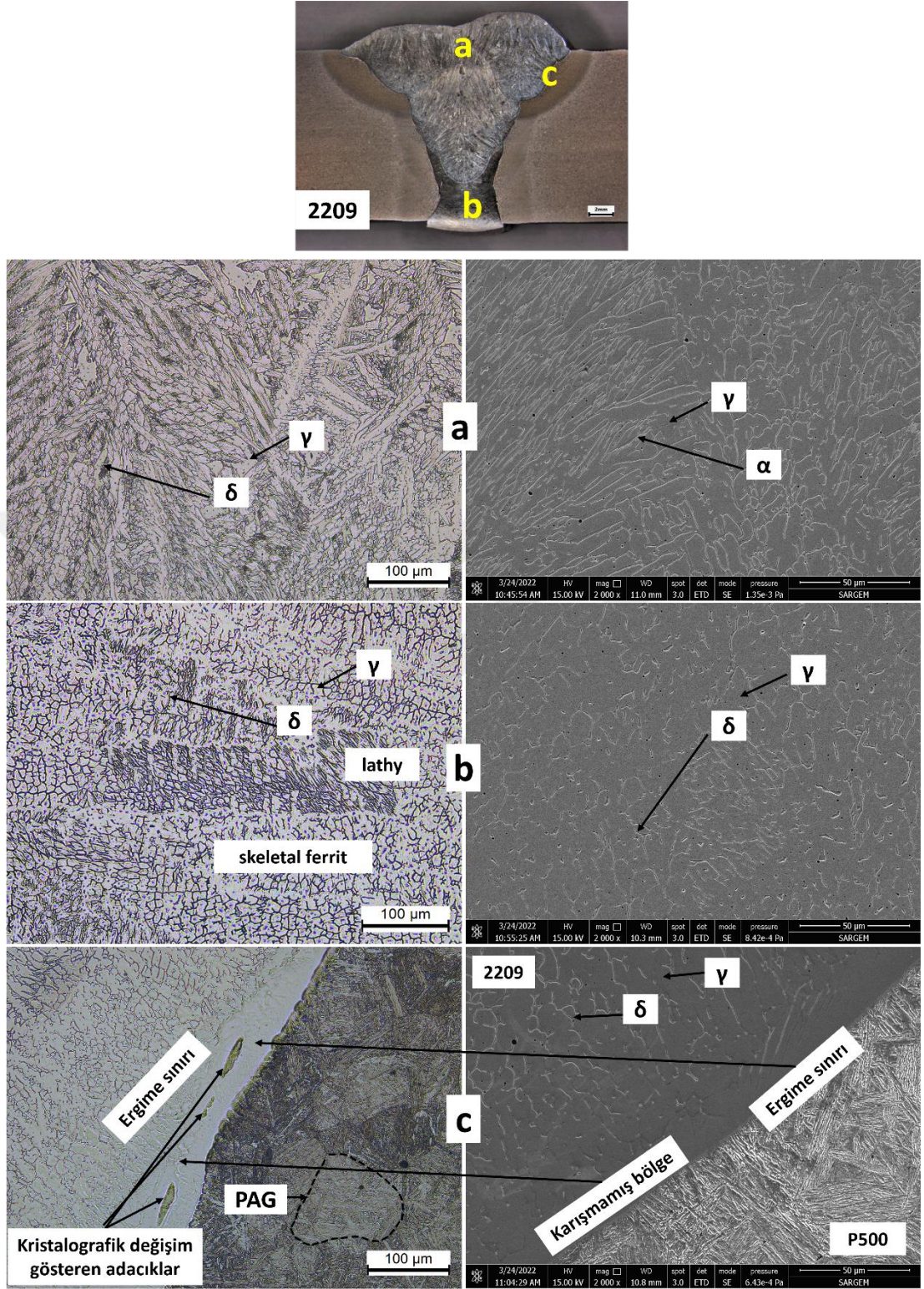
Dengesiz bir şekilde soğuyan ilave metal delta ferrit fazının yönelimlerini ve hacim oranını etkilemiştir. Hızlı soğuma genel olarak delta ferrit hacim oranında artışa neden olurken yavaş soğuma östenit miktarının artmasına neden olmaktadır [79]. Delta ferrit fazının miktarının değişiminde seyrelmenin rolü de yadsınamaz ergime sınırı bölgesi incelendiğinde seyrelme nedeniyle yoğun bir şekilde ergiyen ana malzeme ilave metal içinde kimyasal içeriğini koruduğu bölgelerde aynı faza sahip adacıkların oluşmasına neden olmuştur (Şekil 6.20-c).



Şekil 6.20: 309LSi numunesinin mikroyapı görüntüleri

2209 ilave metali ile birleştirilmiş P500 martenzitik zırh çeliğinin OM ve SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 6.21'de gösterilmiştir. Dubleks paslanmaz çeliklerin diğer paslanmaz paslanmaz çeliklerden farkı, hassas bir şekilde ayarlanan kimyasal içeriği ile ferrit ve ostenit fazlarının bir arada bulunmasıdır. Ferrit fazı mukavemet özelliklerini geliştirirken, tokluk ise ostenit fazı ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada ana malzeme ve ilave metalin farklı bir kimyasal kompozisyona sahip olması ilave metalin kimyasal kompozisyonunu seyrelme nedeni ile etkilemektedir. P500 tarafından ergime sonucu ilave metale katılan Fe elementi, kaynak esnasında katılma modunun değişmesine neden olmuştur. Seyrelme sonucu ilave metalin değişen kimyasal kompozisyonu ferrit-ostenit faz dengesinin bozulmasına neden olarak ve değişen Creş ve Nieş nedeni ile katılma yapısının değişmesine neden olmuştur. En az seyrelmenin meydana geldiği ilave metalin üst pasolarında (Şekil 6.21-a) ferrit-ostenit dengesi korunurken, kök bölgesinde ana malzemeden seyrelen Fe elementi miktarı nihai katılmanın tipik bir östenitik ilave metal kullanılmış gibi skeletal/lathy ferrit + östenit fazında katılmaya neden olmuştur (Şekil 6.21-b). Kimyasal kompozisyonda ve mikroyapıda meydana gelen bu değişim, istenen tokluk ve mukavemet özelliklerine kısmen etki edebilir. Bu durum aynı zamanda dubleks paslanmaz çeliğin korozyon direncini düşürmesine rağmen zırh çeliklerinin birleştirilmesinde bu durum gözardı edilmektedir. Bunun yanısıra ilave metal için ısı girdisi ve soğuma hızının önemi büyüktür. Hızlı soğuma dubleks ilave metal mikroyapısı içerisinde ferrit fazını, yavaş soğuma ise östenit fazını desteklemektedir [80].

Ergime sınırı boyunca tam karışmamış bölgenin oluşumu dikkat çekmektedir (Şekil 6.21-c). Ayrıca yine bu bölgede muhtemelen kristalografik özellikleri P500 ile aynı adacıklar mevcuttur. Daha önceki çalışmalarda bu bölgeden ana metalden meydana gelen seyrelmenin neden olduğu C göçü ve sertlik artışı rapor edilmiştir [81]. Karışmamış bölgeden ilave metale ilerlendiğinde Fe elementinin seyrelmesi sonucu katılmanın skeletal ferrit+ostenit yapısında gerçekleştiği göze çarpmaktadır. Ana malzemede ise ergime sınırı ile komşu kaba taneli bölge oldukça büyük PAG (prior austenite grain) birincil östenitik tane yapısı içerisinde bloklanmış çita martenzit fazından oluşmaktadır.



Şekil 6.21: 2209 numunesinin mikroyapı görüntüleri a) Kep b) Kök c) Ergime sınırı

7. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında savunma sanayiinde yaygın bir şekilde kullanılmakta olan 15 mm et kalınlığındaki MIL-A-46100 (Protection 500 sınıfı) sınıfı zırh çeliği plakaları ferritik (SG3, ER110), paslanmaz (ER309LSi) ve dubleks (ER2209) yapıya sahip ilave metalleri kullanılarak toplam 5 pasoda alın altına birleştirilmiştir. Kaynak işlemleri artan kalite gereksinimlerine bağlı olarak operatör kaynaklı hataların ortadan kaldırılabilmesi ve zırh çeliklerinin kaynak işlemleri sonucunda ITAB bölgelerinde meydana gelen mekanik zayıflamanın ve buna bağlı olarak da balistik zafiyetinin minimuma indirilmesi amacıyla düşük ısı girdileri kullanılarak (max. 1.08kj/mm) 6 eksenli kaynak robotu ile gerçekleştirilmiştir.

Farklı kaynak ilave metallerinin P 500 serisi zırh çeliklerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkilerinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen tüm çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- Kaynaklı birleştirmelerin kalite açısından uygunluğunun belirlenebilmesi amacıyla gerçekleştirilen görsel muayene, sıvı penetrant muayene ve radyografik muayene işlemleri sonucunda; kaynak veya ITAB'da herhangi bir mikro / makro boyuttaki katılama çatlaklarına veya soğuk çatlak olarak bilinen ve özellikle ferritik kaynak telleri için büyük risk oluşturan hidrojen çatlaklarına, kaynaktan sonra minimum 48 saat süre geçtikten sonra yapılan radyografi testleri sonucunda rastlanmamıştır. Bu da 15 mm et kalınlığına sahip P500 serisi zırh çeliği plakalarının herhangi bir ön ısıtma işlemi gerçekleştirilmeden ferritik (SG3 ve ER110S-G), paslanmaz (309LSi) ve dubleks (SG2209) kaynak metalleri ile toplam beş pasoda, maksimum 1.08 kj/mm ısı girdisiyle başarılı bir şekilde kaynatılabildiğini göstermektedir.

-Benzer olmayan ve farklı kimyasal kompozisyonlara sahip ilave metallerin kullanılmasıyla elde edilen kaynak bölgelerinin mekanik ve mikroyapısal özelliklerinde seyrelmenin önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Özellikle dubleks ve östenitik paslanmaz çelik ilave metalleri ile yapılan birleştirmelerde bu seyrelme etkisi daha belirgin bir şekilde gözlenmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin V

kaynak ağzına sahip olmaları nedeniyle alt, orta ve üst bölgelerindeki farklı oranlarda gerçekleşen seyrelme miktarları ferrit-östenit dengesinin kalınlık boyunca dengesiz olmasına neden olmuştur. Ana metal ile seyrelme miktarının azalması Cr, Ni, Mo gibi elementlerin artışına ve buna bağlı olarak da ferrit miktarının yükselmesine sebebiyet vermiştir.

-Mukavemet açısından değerlendirildiğinde ER110 SG ilave metalinin sağladığı asiküler ferrit ve kısmen beynit faz yapısı diğer ilave metallerden daha yüksek bir akma, çekme ve yüzde uzama değerlerinin elde edilmesine neden olmuştur. Kullanılan paslanmaz çelik ilave metallerinin farklı kimyasal kompozisyonları nedeniyle meydana gelen ergime sınırı boyunca tam karışmamış bölge sertliğinin artmasına neden olmuştur. Özellikle ergime sınırı boyunca faz değişikliği gösteren adacıkların yük altında çatlak başlangıcının oluşmasında etkili olduğu düşünülmektedir.

-Kaynaklı birleştirmelerin enine gerçekleştirilen çekme testlerinin sonucunda SG3, ER110, 309LSi ve ER2209 ilave metalleri ile yapılan kaynakların çekme mukavemetlerinin ana malzemenin çekme mukavemetine oranla sırasıyla; %48, %62, %51, %52'si şeklinde olduğu görülmüştür. Böylece ana malzemeye en yakın çekme mukavemetinin 1052 MPa ile ER110 ile yapılan kaynakta elde edildiği, en düşük çekme mukavemetinin ise ortalama 802 MPa ile SG3 ile yapılan kaynakta elde edildiği görülmüştür. Öte yandan test sonucunda elde edilen akma ve çekme değerlerinin kaynak telleri için üretici tarafından belirtilen sertifika değerlerinden çok daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu durumun sebebi olarak kaynak tellerinin kendilerinden çok daha yüksek akma ve çekme mukavemetine sahip zırh çelikleri ile kaynak edilmeleri esnasında seyrelmeleri ve kaynak bölgesinin hızlı soğumasından kaynaklandığı görülmüştür.

-Kaynaklı birleştirmelerin sertlik ölçümleri farklı termal döngülere ve seyrelme oranlarına sahip alt, orta ve üst bölgelerinden gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar çekme test sonuçlarına benzer şekilde ana malzeme sertliğine en yakın kaynak sertliğinin ER110 ilave metali ile elde edilebildiğini göstermiştir. Ayrıca, tüm numunelerde üst bölgelerin ITAB sertlikleri alt ve orta bölgelerin ITAB sertliklerinden çok daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi olarak alt ve orta bölgelerdeki ITAB'ların sonraki pasolar tarafından tavlınması fakat en üst pasonun

üstünde başka bir paso olmadığından tavlanmaması gösterilmiştir. İlaveten, SG3, ER110, 309LSi ve 2209 ilave metalleri ile yapılan kaynaklarda kep bölgesine yakın ergime bölgesi sınırından ana metale doğru alınan sertlik değerlerinin sırasıyla 13, 14, 10, 14,5 mm mesafede ana metal sertliğine ulaştığı ve kaynakların MIL STD-1185 standardında belirtilen ITAB bölgesindeki sertliğin herhangi bir ergime sınırından itibaren 15,9 mm mesafede ana malzemenin sertliğine ulaşması gerektiği kriterini sağladığını göstermektedir. Bu da çalışmada kullanılan 15 mm et kalınlığındaki P500 zırh çeliği plakaları için elde edilen ısı girdisi değerlerinin ITAB mukavemeti açısından uygun olduğunu göstermektedir.

-Kaynaklı birleştirmelerin kaynak bölgelerinden ve ITAB bölgelerinden gerçekleştirilen darbe çentik testleri sonucunda -40 °C gibi düşük bir sıcaklıkta dahi ferritik, östenitik ve dubleks yapıya sahip ilave metaller ile bu sıcaklıkta istenilen minimum tokluk değerlerinin hem kaynak hem de ITAB bölgelerinde karşılanabildiği ve elde edilen tokluk değerlerin ana metalin çentik darbe değerlerinden yüksek olduğu görülmüştür. Yüksek miktardaki östenitik yapıları nedeniyle sünek bir yapıya sahip olan paslanmaz çelik ilave metaller ile gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin kaynak bölgesi çentik numuneleri ferritik ilave metallere nazaran daha yüksek tokluk değerleri sergilemiştir. Bu bağlamda kaynak bölgesi için en yüksek tokluk değeri ortalama 97J ile 309 LSi ilave metaliyle, en düşük tokluk değeri ise ortalama 37J ile ER110 ilave metaliyle elde edilmiştir. İlaveten, ITAB bölgesinde meydana gelen mikroyapısal değişimler tüm ilave metallerin tokluk değerlerinde bir miktar düşüşe sebebiyet olsa da bu düşüşler kaynaklı bağlantıdan beklenen -40°C’de min. 20 J değerini rahatlıkla sağlamıştır. Öte yandan, çentik darbe testleri sonrasında SEM’de incelenen kırık yüzeylerde dentrit kollarının kopması sonucu oluşmuş girinti çıkıntıların sünekliği arttıran bir etken olduğu gözlenmiştir.

8. ÖNERİLER

Endüstride zırh çeliklerinin kaynaklarında genellikle hidrojen kırılabilirliğinden kaçınmak üzere östenitik paslanmaz ilave metalleri kullanıldığı bilinmektedir (Örn. ER309LSi ve ER307). Fakat, bu ilave metallere alternatif olarak kullanım yeri, amacı ve parça et kalınlığına bağlı olarak uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesi ile düşük hidrojen içerikli ferritik ilave metaller de kullanılabilir. Burada ilave metalin seçiminde sadece tokluk değerlerinin değil, aynı zamanda kaynaklı birleştirmenin mukavemet değerlerinin ve ilave metalin sertliğindeki düşüşün de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu sebeple tez çalışmamızda diğer ilave metallere göre daha yüksek mukavemet ve sertlik değerleri gösteren ve aynı zamanda ana metalden beklenen çentik darbe değerlerini ($>20J$, $-40^{\circ}C$) sağlayan ER110 ilave metalinin balistik testlerde de daha iyi sonuçlar verebileceği düşüncesi ile sonuçları doğrulamak amacıyla tüm kaynaklı birleştirmeler ek olarak balistik testlere tabi tutulabilir.

-Ülkemizde ve tüm dünyada özlü kaynak tellerin yüksek kaynak hızlarına, yüksek metal yığılma oranlarına, yüksek pozisyon kabiliyetlerine ve masif kaynak tellerine kıyasla düşük miktarlarda istenilen kimyasal analizlerin üretilebilmesi gibi kritik bir esnekliğe sahip olmaları nedeniyle kullanımları gün geçtikçe artmaktadır. Bu sebeple P500 çelikleri düşük hidrojen içeriğine sahip ($H<5ml/100\text{ g}$) düşük alaşımlı & yüksek mukavemetli özlü kaynak telleri kullanılarak aynı şartlar altında birleştirilebilir ve sonuçları bu tezin çıktısı olan masif teller ile kıyaslanabilir.

-Bu tez çalışmasına ilaveten farklı sıcaklıklarda da çentik darbe testleri yapılarak çentik darbe enerjilerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimleri incelenebilir ve kaynaklı birleştirmelerin sünek-gevrek geçiş sıcaklıklarının tespiti gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Demir, T.** 2008, “Metal ve katmanlı zırh malzemelerin 7,62 mm lik zırh delici mermiler karşısında balistik başarılarının incelenmesi”, yüksek lisans tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara.
- [2] **Pekbey Y., Aslantas K., Yumak N.**, 2013, “Zırh tasarımında kullanılan kompozit malzemelerin deformasyon karakteristiğinin araştırılması,” *Makine Teknol. Elektron. Derg.*, vol. 10, no. 4, pp. 1–21.
- [3] **Meyers M. A.**, 1994, "Dynamic Behavior Of Materials", *Copyright 1994 John Wiley & Sons*, Available: <https://books.google.com.au/books?id=WoEDHtRTOhoC>
- [4] **Gür A. K., Calıgölü U., Yıldız T., Ballıkaya H., Yiğittürk N.**, 2018, “AISI 304 / ramor 500 çelik çiftlerinin 1 . 1 kJ/s kaynak ark gücünde PTA kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliği”, *ReserchGate*.
- [5] **Karagöz Ş., Atapek H., Yılmaz A.**, 2007, “Su verilmiş ve temperlenmiş çeliğin alaşım ve ısıtım işlem doğrultusunda zırh malzemesi olarak geliştirilmesi,” 4. *Demir-Çelik Kongresi Zonguldak*, pp. 63–68.
- [6] **Karagöz Ş., Atapek H.**, 2007 “Bor katkılı zırh çeliklerinin kırılma davranışı” 8. *Uluslar Arası Kırılma Konf. Bildir. Kitabı*, no. November, pp. 186–196.
- [7] **Madhusudhan Reddy G., Mohandas T.**, 1996, “Ballistic performance of high-strength low-alloy steel weldments,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 57, no. 1–2, pp. 23–30, doi: 10.1016/0924-0136(95)02041-1.
- [8] **Eryürek İ. B.**, 2007 “Kaynak teknolojisi gazaltı ark kaynağı,” *Askaynak El Kitabı*, vol. 2, pp. 47–120.
- [9] **Evcı C.**, 2009 “Seramik kompozit zırh sistemlerinin darbe ve balistik özelliklerinin belirlenmesi”, doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [10] **Atapek Ş. H.**, 2006 “Zırh çeliklerinin fiziksel metalurjik esaslar doğrultusunda geliştirilmesi ve karakterizasyonu”, yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- [11] **Aslan B.**, 2020, “Lazer kaplama yöntemiyle zırh çeliklerinde balistik performansın incelenmesi,” Milli Savunma Üniversitesi, Ankara.
- [12] **Arık M.**, 2018, “Mars 240 (Mil A 46100) zırh çeliğinin korumalı metal ark kaynağı ile birleştirilerek kaynak performansının incelenmesi,” Mersin Üniversitesi, Mersin.

- [13] **Yüksel C.**, 2019 , “Hibrit plazma ark kaynağı (HPAK), gaz metal ark kaynağı (GMAK) ve soğuk metal transfer kaynağı (CMT) yöntemleri ile armox 500T zırh çeliğinin kaynak edilebilirliğinin araştırılması”, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay.
- [14] **Kurt S.**, 2015 “Farklı kaynak ağız açısı ve geometrilerinde gerçekleştirilen kaynakların MIL-A 46100 zırh çeliği mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi,” Kara Harp Okulu, Ankara.
- [15] **Doğrugiden M. Y.**, 2019, “Farklı kaynak metotları ile birleştirilen zırh çeliklerinin kırılma tokluk değerlerinin incelenmesi,” Uşak Üniversitesi, Uşak.
- [16] **Yıldırım M.**, 2019 “Poliüre kaplı metal levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi ve zırh malzemesi olarak kullanımının değerlendirilmesi,” Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [17] **T. C. S. S. Müsteşarlığı**, 2018, “2018-2022 Savunma sanayi sektörel strateji dökümanı”, Ankara .
- [18] **Miilux OY**, 2020, “Miilux türkiye tanıtım sunumu” Manisa.
- [19] **Engin T.**, 2007, “Türk ordusunda zırhlı birlikler”, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- [20] **Bilekli İ.**, 2020, “Tank ve zırhlı araçlarda aselsan”, *aselsan dergi*, ISSN 1300-2473, sayfa 1-124.
- [21] **Aslanlar S.**, 2009, “Kaynak teknolojisi ve uygulamaları”, kaynak teknolojisi ders notu, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- [22] **Norrish J.**, 2006, *Advanced Welding Processes*, Cambridge, England: WOODHEAD PUBLISHING LIMITED.
- [23] **Mansuroğlu Y.**, 2018, “Gazaltı kaynak yöntemi ve bu yöntemde kullanılan koruyucu gazlar” www.xengineer.net
- [24] **Ahmed N.**, 2005, *New developments in advanced welding*, Cambridge England: WOODHEAD PUBLISHING LIMITED.
- [25] **Anık S.**, 1991, *Kaynak tekniği el kitabı*, İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı.
- [26] **Vural M., Piroğlu F., Çağlayan Ö.B., Uzgider E.**, 2003, “Yapı çeliklerinin kaynaklanabilirliği”, *THM-Türkiye Mühendislik Haberleri*, vol. 426, no. 4, pp. 47–51.
- [27] **Oğuz B.**, 1985 “Karbonlu çeliklerin kaynağı,” *Karbonlu ve Alaşımlı Çeliklerin Kaynağı - Oerlikon Yayını*, pp. 1–3.
- [28] **Weman K.**, 2003, *Welding processes handbook*, Cambridge, England: WOODHEAD PUBLISHING LIMITED.
- [29] **MIL-STD-1185**, 1979, *Welding high hardness armor*, Department Of Defense Manufacturing Process Standard, Washington.
- [30] **MIL-DTL-46100E**, 2008, *Detail specification armor plate, steel, wrought, high-hardness*, Department Of Defense Standarts, Washington.
- [31] **SSAB**, 2020, *Armox workshop recommendation*, pp. 1–12, Sweden.

- [32] **Çam G.**, 2020, *Kaynak Bilimi Ve Teknolojisi*, Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık.
- [33] **Gök G. V., Afyon Ç.**, 1998, “Kaynak uygulamalarında robot teknolojisi,” *Altınay Robotik ve Otomasyon A.Ş.*
- [34] **Yumurtacı S., Mert T.**, 2003, “Robotik kaynak sistemleri ve gelişme istikametleri”, *Kaynak Teknol. IV. Ulus. Kongresi*, Kocaeli.
- [35] **Magmaweld robotik sistemler**, görüntüleme: Mart 2022, <<https://www.magmaweld.com.tr/robotik-sistemler/panasonic-towers-kaynak-robotlari/towers-tig-kaynak-teknolojisi/r/8211>>.
- [36] **Savic B., Cabrilo A.**, 2021, “Effect of heat input on the ballistic performance of armor steel weldments”, *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 13, pp. 1–16, doi: 10.3390/ma14133617.
- [37] **Cabrilo A., Geric K.**, 2016, “Weldability of high hardness armor steel”, *ResearchGate*, pp. 1-6, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1138.79.
- [38] **Souza E. R. S., Weber R. P., Monteiro S. N., Oliveira S.**, 2021 “Microstructure effect of heat input on ballistic performance of welded high strength armor steel,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 19, pp. 1–18, doi: 10.3390/ma14195789.
- [39] **Pacek D., Kolodziejczak P., Grzelak K., Torzewski J., Podgorzak P.**, 2020, “The protective capability of the laser welded armour steel plates”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 234, no. 5, pp. 711–721, doi: 10.1177/1464420720906429.
- [40] **Kah P., Pirinen M., Suoranta R., Martikainen J.**, 2014 “Welding of ultra high strength steels,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 849, no. January, pp. 357–365, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.849.357.
- [41] **Mvola B., Kah P., Martikainen J., Suoranta R.**, 2016 “Dissimilar high-strength steels: Fusion welded joints, mismatches, and challenges,” *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 44, no. 2, pp. 146–159.
- [42] **Saxena A., Prakash S.P., Sharma S., Srivastava V.S.**, 2021, “A comparative numerical analysis on the effect of welding consumables on the ballistic resistance of SMAW joints of Armor steel,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 8, pp. 3–13, doi: 10.3390/app11083629.
- [43] **Evans W. C.**, 2019 “Advancements in joining of armor grade steels”, yüksek lisans tezi, Ohio Devlet Üniversitesi, Amerika.
- [44] **Magudeeswaran G., Balasubramanian, Sathyanarayanan S.**, 2010, “Dynamic fracture toughness of armour grade quenched and tempered steel joints fabricated using low hydrogen ferritic fillers,” *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 17, no. 5, pp. 51–56, doi: 10.1016/S1006-706X(10)60099-4.
- [45] **Turichin G., Kuznetsov M., Sklyar M., Zhitenev A., Pozdnyakov A.**, 2018, “Laser-Arc hybrid welding perspective ultra-high strength steels: Influence of the chemical composition of weld metal on microstructure and mechanical properties”, *Procedia CIRP*, vol. 74, pp. 752–756, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.017.

- [46] **Kurt S., Evcı C., Işık H., Işık M. S.**, 2016 “Farklı kaynak ağız açılarının 307Si elektrouyla kaynak edilmiş M1-A 46100 zırh çeliğinin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi,” *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimar. Fakültesi Derg.*, vol. 31, pp. 155–162.
- [47] **Kara S., Korkut M. H.**, 2012, “Zırh çeliklerinde kaynak ağızı tasarımının metalurjik ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, cilt. 9, no. 1, syf. 35–45, ulaşım: www.teknolojikarastirmalar.com
- [48] **Lazić V., Arsić D., Rakićević M., Nikolić R., Uhrićik M., Hadzima B.**, 2019 “Influence of the welding joint type on safety properties of the armor steel armox 500T”, *Syst. Saf. Hum. - Tech. Facil. - Environ.*, vol. 1, no. 1, pp. 753–759, doi: 10.2478/czoto-2019-0096.
- [49] **Tümer M., Warchomicka F. G., Pahr H., Enzinger N.**, 2021, “Mechanical and microstructural characterization of solid wire undermatched multilayer welded S1100MC in different positions,” *J. Manuf. Process.*, vol. 73, pp. 849–860, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.11.021.
- [50] **Børvik T., Dey S., Clausen A. H.**, 2009, “Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 36, no. 7, pp. 948–964, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003.
- [51] **Çoban O., Gürol U., Erdöl S., Koçak M.**, 2021 “Effect of plate thickness on the microstructure and hardness effect of plate thickness on the microstructure and hardness,” *Int. Conf. Weld. Technol. and Exhib. (ICWET-21)*, pp.1-13.
- [52] **Luksa K., Bednarek M.**, 2016 “Characteristics and Weldability of Toughened Steels Used for Ballistic Shields”, *Biul. Inst. Spaw.*, no. 5, doi: 10.17729/ebis.2016.5/20.
- [53] **Zengin E.**, 2010, “Farklı ön tav sıcaklıklarında kaynaklı birleştirilen zırh çeliklerinin mekanik özelliklerinin araştırılması”, yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [54] **Merzalı C. E.**, 2013, “Zırh çeliklerinde kaynak sonrası ısı tesiri altında kalan bölgenin özelliklerinin ısıtma işlemi ile iyileştirilmesi”, yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [55] **Taşkaya S., Gür A. K.**, 2019, “Ramor 500 zırh çeliğinin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde tel ilerleme hızının kaynak metalindeki nüfuziyet dengesinin incelenmesi,” *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 9, pp. 444–453, doi: 10.17714/gumusfenbil.426195.
- [56] **Magudeeswaran G., Balasubramanian V., Reddy G. M.**, 2014, “Effect of welding processes and consumables on fatigue crack growth behaviour of armour grade quenched and tempered steel joints,” *Def. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 47–59, doi: 10.1016/j.dt.2014.01.005.
- [57] **Mandolino C., Lertora E., Davini L., Gambaro C.**, 2014, “Investigation on gas metal arc weldability of a high strength tool steel,” *Mater. Des.*, vol. 56, pp. 345–352, doi: 10.1016/j.matdes.2013.11.042.

- [58] **Balaguru V., Balasubramanian V., Sivakumar P.,** 2020, “Effect of weld metal composition on ballistic performance of shielded metal arc welded ultra high hard armour steel joints,” *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, vol. 29, pp. 186–194, doi: 10.1515/jmbm-2020-0019
- [59] **Garasic I., Jurica M., Barisic A., Iljkic D.,** 2019, “Determination of ballistic properties on ARMOX 500T steel welded joint”, *Eng. Rev.*, vol. 39, no. 2, pp. 186–196, doi: 10.30765/er.39.2.8.
- [60] **Magudeeswaran G., Balasubramanian V., Madhusudan G.R.,** 2018, “Metallurgical characteristics of armour steel welded joints used for combat vehicle construction,” *Def. Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. 590–606, doi: 10.1016/j.dt.2018.07.021.
- [61] **Robledo D. M., Gómez J. A. S., Barrada J. E. G.,** 2011, “Development of a welding procedure for mil a 46100 armor steel joints using gas metal arc welding”, *DYNA*, vol. 78, no. 168, pp. 65–71.
- [62] **Saxena A., Kumaraswamy A., Madhusudhan G. R., 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,” *Def. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 188–195, doi: 10.1016/j.dt.2018.01.005.
- [63] **Gürol U., Karahan T., Erdöl S., Çoban O., Baykal H., Koçak M.,** 2022, “Characterization of armour steel welds using austenitic and ferritic filler metals,” *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 75, no. 3, pp. 757–770, doi: 10.1007/s12666-021-02464-7.
- [64] **Karhu M., Kujanpää V., Leino K., Siltanen J.,** 2012, “Laser-GMA hybrid welding of direct quenched steel in lap joint configuration - A preliminary study,” *ICALEO 2012 - 31st Int. Congr. Appl. Lasers Electro-Optics*, vol. 486, pp. 486–493, doi: 10.2351/1.5062497.
- [65] **Özdemir T.,** 2020, “Mechanical & microstructural analysys of armor steel welded joints”, *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, vol. 12, no. 1, pp. 166–175, doi: 10.29137/umagd.488104.
- [66] **Balakrishnan M., Balasubramanian V., Madhusuhan G.R., Sivakumar K.,** 2011, “Effect of buttering and hardfacing on ballistic performance of shielded metal arc welded armour steel joints,” *Materials and Design*, vol. 32, no. 2, pp. 469–479, doi: 10.1016/j.matdes.2010.08.037.
- [67] **Balakrishnan M., Balasubramanian V., Madhusudhan G. R.,** 2014, “Effect of hardfacing processes on ballistic performance of Q&T steel joints,” *Mater. Perform. Charact.*, vol. 3, no. 1, p. 20130021, doi: 10.1520/MPC20130021.
- [68] **Babu S., Balasubramanian V., Madhusudhan G. R., Balasubramanian T. S.,** 2010, “Improving the ballistic immunity of armour steel weldments by plasma transferred arc (PTA) hardfacing,” *Materials and Design*, vol. 31, no. 5, pp. 2664–2669, doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.060.

- [69] **Balakrishnan M., Balasubramanian V., Madhusudhan G. R.**, 2013, "Microstructural Analysis of Ballistic Tests on Welded Armor Steel Joints," *Metallogr. Microstruct. Anal.*, vol. 2, no. 3, pp. 125–139, doi: 10.1007/s13632-013-0069-5.
- [70] **Kayhan O.**, 2011, "Tahribatsız muayene yöntemleri", Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi ders notu, Konya.
- [71] **M.E.B.**, 2011, "Metal teknolojisi tahribatsız muayene", Milli Eğitim Bakanlığı tahribatsız muayene modülü eğitim föyü, Ankara.
- [72] **Albayrak M., Kaman M. O.**, 2019, "Charpy darbe testinin deneysel ve sayısal analizi", *DÜMF Mühendislik Derg.*, vol. 10, no. 3, pp. 945–957, doi: 10.24012/dumf.475979.
- [73] **TS EN ISO 148-1**, 2017, *Metallik malzemeler-charpy vurma deneyi-bölüm 1: deney metodu*, p. 39, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [74] **Kara S., Korkut M. H.**, 2012, "Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan zırh plakalarında kaynak sonrası ısıtılma işleminin birleşim mukavemetine etkisinin araştırılması," *Savunma Bilimleri Dergisi*, vol. 11, no. 2, pp. 159–171.
- [75] **Tümer M.**, 2012, "Koruyucu gaz kompozisyonunun özlü tel ark kaynak yöntemi ile birleştirilen paslanmaz çeliklerin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi", doktora tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- [76] **Yılmaz T.**, 2010, "Masif ve özlü kaynak telleri ile birleştirilen hardox 400 çeliklerinin mekanik ve mikroyapı özellikleri", yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- [77] **Kurt A.**, 2013, "Kaynak metalurjisi ders notları", Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [78] **Wang X. L., Nan Y. R., Xie Z. J., Tsai Y. T., Yang J. R., Shang C. J.**, 2017, "Influence of welding pass on microstructure and toughness in the reheated zone of multi-pass weld metal of 550 MPa offshore engineering steel," *Materials Science Engineering A*, vol. 702, pp. 196–205, doi: 10.1016/j.msea.2017.06.081.
- [79] **Yılmaz R. , Tümer M.**, 2013, "Microstructural studies and impact toughness of dissimilar weldments between AISI 316 L and AH36 steels by FCAW", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 5–8, pp. 1433–1447, doi: 10.1007/s00170-012-4579-0.
- [80] **Gunn N. R.**, 1997, *Duplex Stainless Steels*, Amerika:ABINGTON PUBLISHING.
- [81] **Tümer M., Yılmaz R.**, 2016, "Characterization of microstructure, chemical composition, and toughness of a multipass welded joint of austenitic stainless steel AISI316L," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 87, no. 9–12, pp. 2567–2579, doi: 10.1007/s00170-016-8614-4.