

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



ZIRH ÇELİKLERİNİN ARK KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE
KAYNAKLANABİLİRLİĞİ

MUHAMMED AHMET ÇOBANOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN ADA

EYLÜL - 2023

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Muhammed Ahmet ÇOBANOĞLU tarafından hazırlanan “**ZIRH ÇELİKLERİNİN ARK KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **08.09.2023** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniwersitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA Kastamonu Üniwersitesi
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Arif UZUN Kastamonu Üniwersitesi
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi UĞur ARABACI Gazi Üniwersitesi

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniwersitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü V. Doç. Dr. Osman ÇİÇEK

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Muhammed Ahmet ÇOBANOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZIRH ÇELİKLERİNİN ARK KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİ

MUHAMMED AHMET ÇOBANOĞLU

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN ADA

Özellikle ağır savunma sanayinde yoğun olarak kullanılan zırh çelikleri için yapılan literatür araştırmalarında, kaynaklı birleştirme işlemlerinde uygulanan yüksek ısı nedeniyle, ısı tesiri altında kalan bölgeler ve kaynak metalinde oluşan mikroyapısal değişimlerin etkisiyle, ana metale nazaran daha düşük mekanik ve metalürjik özelliklerin oluştuğu bilinmektedir. Kaynak işlemi nedeniyle metalürjik, mekanik ve balistik özellikleri zayıflayan kaynak bölgesinin söz konusu özellikler bakımından iyileştirilmesi ve geliştirilmesi, ülkemizin de jeopolitik ve stratejik konumları göz önüne alındığında savunma sanayimiz için son derece önemli ve hayati bir konudur. Bu amaç doğrultusunda, bu çalışmada zırh çeliklerinin kaynak bölgesinde oluşan dezavantajlı durumlar tespit edilerek, bu durumların yok edilmesi veya azaltılması amacıyla Protection 500 zırh çeliğinin örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı ve gazaltı (MAG) kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi ve elde edilen birleştirmelerin mekanik - metalürjik performanslarının araştırılması hedeflenmiştir. Elde edilen birleştirmeler çekme, mikrosertlik, eğme testleri ile optik mikroskop, SEM, EDS ve kırılma yüzeyi incelemelerine tabi tutulmuştur. Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde; Protection 500 zırh çeliklerinin kaynaklı birleştirme işlemlerinde metalürjik ve mekanik performans açısından en verimli kaynak yönteminin MAG kaynağı olduğu, en uygun ilave malzemenin ise MAG kaynağında kullanılan MG 183 kodlu ilave tel olduğu tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Zırh çeliği, Protection 500, Kaynak, Mikroyapı, Mekanik özellikler

Eylül 2023, 166 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

WELDABILITY OF ARMOR STEELS BY ARC WELDING METHODS

MUHAMMED AHMET ÇOBANOĞLU

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. HAKAN ADA

In the literature researches conducted for armor steels, which are used extensively in the heavy defense industry, it is known that due to the high heat applied in welded joining processes, lower mechanical and metallurgical properties are formed compared to the base metal due to the effect of microstructural changes in the heat affected areas and weld metal. Improvement and development of the weld zone, which has weakened metallurgical, mechanical and ballistic properties due to the welding process, is an extremely important and vital issue for our defense industry, considering the geopolitical and strategic positions of our country. In line with this purpose, in this study, it was aimed to determine the disadvantageous conditions that occur in the welding zone of armor steels, to eliminate or reduce these conditions, to join Protection 500 armor steels by electric arc welding and gas metal arc welding (MAG) welding methods with covered electrode and to investigate the mechanical - metallurgical performances of the joints obtained. The joints obtained were subjected to tensile, microhardness, bending tests and optical microscope, SEM, EDS and fracture surface examinations. When all the results were evaluated together, it was determined that MAG welding was the most efficient welding method in terms of metallurgical and mechanical performance in the welded joints of Protection 500 armor steels, and the most suitable additional material was MG 183 coded additional wire used in MAG welding.

KEYWORDS: Armor steel, Protection 500, Welding, Microstructure, Mechanical properties

September 2023, 166 Page

TEŞEKKÜR

Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Programına başladığım tarihten itibaren yüksek lisans eğitimim boyunca; hiçbir şekilde desteklerini esirgemeyen çok kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA'ya teşekkürü bir borç bilirim. Tezime yaptıkları kıymetli değerlendirmeler için jüri üyesi hocalarım Doç. Dr. Arif UZUN ve Dr. Öğr. Üyesi Uğur ARABACI'ya teşekkür ederim. Yüksek lisans çalışmasına birlikte başladığım ilk danışmanım Prof. Dr. M. Fatih KILIÇASLAN'a, tez çalışmamda yardımcı olan, kaynaklı birleştirme işlemlerinin gerçekleştirildiği Birikim Mühendislik ve Endüstriyel Yüklenim Ltd. Şti. yetkilisi Dr. Ali AKAY'a, çekme testlerinin gerçekleştirilmesinde destek veren Doç. Dr. Volkan KILIÇLI ve Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne, makro görüntülerin alınmasında destek veren Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN ve Arş. Gör. Samet Nohutçu ile eğme testlerinde destek veren Doç. Dr. Yakup KAYA'ya, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü'ne ve ayrıca Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bu çalışmayı KÜ-BAP01/2019-34 numaralı proje ile destekleyen Kastamonu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne de teşekkürü borç bilirim. Bu günlere ulaşmamda, maddi ve manevi olarak desteklerini esirgemeyen, iyi günde kötü günde her zaman yanımda olan ve çalışmamın sonuna kadar beni sabırla destekleyen babam Halim ÇOBANOĞLU'na, annem Serpil ÇOBANOĞLU'na ve kardeşim Melih ÇOBANOĞLU'na minnettarlığımı belirterek teşekkürü bir borç bilirim.

MUHAMMED AHMET ÇOBANOĞLU

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ZIRHIN TARİHÇESİ	4
3. ZIRH MALZEMELERİ	6
3.1 Metalik Zırhlar	7
4. ZIRH ÇELİKLERİ	10
4.1 Zırh Çeliklerinin Türleri	10
4.2 Zırh Çeliğinin Üretimi	17
4.3 Zırh Çeliğinde Alaşımlama Mekanizması	19
4.4 Zırh Çeliğine Uygulanan Isıl İşlemler	21
4.5 Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalurjisi	23
4.5.1 Zırh Çeliklerinin Mekanik ve Kimyasal Özellikleri	23
4.6 Zırh Çeliklerinden Beklenen Özellikler	25
5. ZIRH ÇELİKLERİNİN KAYNAĞI	27
5.1 Kaynak	27
5.2 Kaynak Bölgesi	29
5.3 Kaynak Yöntemleri	31
5.3.1 Ergitme Kaynağı	31
5.3.2 Katı Hal Kaynağı	32
5.4 Örtülü Elektrod ile Elektrik Ark Kaynağı	32
5.4.1 Örtülü Elektrodla Elektrik Ark Kaynağının Tarihi	33
5.5 Gazaltı Ark Kaynağı	35
5.5.1 MIG ve MAG Kaynağı	35
5.5.2 Gazaltı Ark Kaynağının Tarihi	36
5.6 Zırh Çeliklerinde Kullanılan Kaynak Yöntemleri	38
5.7 Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti	38
5.7.1 Kaynak Kabiliyetine Etki Eden Faktörler	39
6. LİTERATÜR TARAMASI	41
7. DENEYSEL ÇALIŞMA	49
7.1 Materyal	49
7.2 Metod	50
7.2.1 Kaynak İşlemine Hazırlık	50
7.2.2 Kaynak İşlemleri	54
7.2.3 Örtülü Elektrodla Elektrik Ark Kaynağı	55
7.3 Test Numunelerinin Hazırlanması	60
7.4 Mikroyapı ve Makroyapı İncelemeleri	63

7.4.1	Optik ve Stereo Mikroskop İncelemeleri.....	65
7.4.2	SEM ve EDS İncelemeleri.....	66
7.5	Çekme Testi	67
7.6	Mikrosertlik Testi.....	68
7.7	Eğme Testi	70
8.	DENEYSEL SONUÇLARIN TARTIŞILMASI.....	71
8.1	Makroyapı İncelemeleri	71
8.2	Mikroyapı (Optik Mikroskop, SEM, EDS) İncelemeleri.....	76
8.2.1	Optik Mikroskop Görüntüleri İncelemeleri	76
8.2.2	SEM İncelemeleri	96
8.2.3	EDS İncelemeleri.....	122
8.3	Çekme Testi Sonuçları	136
8.3.1	Kırılma Yüzeyi İncelemeleri	139
8.4	Mikrosertlik Testi Sonuçları	143
8.5	Eğme Testi Sonuçları	148
9.	SONUÇ VE ÖNERİLER	154
9.1	Sonuçlar	154
9.2	Öneriler	157
KAYNAKLAR	158	
EKLER.....	163	
EK A.	Çekme Testi Sonuçları	164
ÖZGEÇMİŞ.....	166	

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Eski Mısır askerlerine ait silahlar	4
Şekil 2.2 Eski dönemlere ait zırh türleri. (a) Zırhlı elbise, (b) Brigandine isimli vücut zırhı, (c) Katmanlı zırh, (d) Perçinlenmiş bağcıklı zırh, (e) Japon zırhı, (f) ve (g) Mail ve plaka zırh, (h) Plaka zırh.....	5
Şekil 3.1 Zırh malzemeleri.....	6
Şekil 3.2 Metalik zırhlar.....	8
Şekil 3.3 Bazı metalik zırhların kalınlığa bağlı balistik performansı.....	9
Şekil 4.1 Çapraz haddeleme işleminin gösterimi.....	11
Şekil 4.2 HHA zırh çeliğine ait mikroyapı görüntüsü.....	12
Şekil 4.3 Zırh çeliklerinin türüne göre balistik performansı	12
Şekil 4.4 King Tiger tankına ait görüntü.....	13
Şekil 4.5 Çifte sertliğe sahip zırh çeliğinin mikroyapı görüntüsü.....	14
Şekil 4.6 Zırh çeliği şekillendirme işlemi	15
Şekil 4.7 Zırh çeliklerinin 7,62 mm zırh delici mermiye karşı kalınlığa bağlı olarak değişen V ₅₀ balistik limit hızı	16
Şekil 4.8 Zırh çeliklerinin balistik performansı	17
Şekil 4.9 Zırh çeliklerinin üretim prosedürü	18
Şekil 4.10 Zırh çeliklerinin üretim hattının şematik gösterimi	19
Şekil 4.11 Alaşım elementlerinin oluşturduğu karbürlerin temperleme karakteristiği.....	22
Şekil 4.12 Zırh çeliklerine uygulanan ısıl işlem basamakları	23
Şekil 5.1 Kaynak işleminin detaylı şeması	28
Şekil 5.2 Kaynak bölgesi.....	30
Şekil 5.3 Kaynak yöntemlerinin sınıflandırması.....	31
Şekil 5.4 Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağının çalışma prensibi.....	34
Şekil 5.5 Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynak yönteminin donanımları.....	34
Şekil 5.6 Gaz metal ark kaynağı yönteminin çalışma prensibi	36
Şekil 5.7 Gaz metal ark kaynağı yönteminin donanımları	37
Şekil 7.1 Kaynak ağzı açmada kullanılan CNC cihazı	51
Şekil 7.2 Kaynak ağzı geometrisi	52
Şekil 7.3 Kaynak ağzı açılmış malzeme çifti	52
Şekil 7.4 Kaynak işleminde kullanılan bakır altlık	55
Şekil 7.5 Kaynak öncesi ön ısıtma işlemi	55
Şekil 7.6 Elektrod kurutma fırını	57
Şekil 7.7 Kaynak işleminde kullanılan cihaz	59
Şekil 7.8 Kaynaklama işlemine hazırlanmış levha çifti	60
Şekil 7.9 Kaynaklama işlemi tamamlanmış levha çifti	60
Şekil 7.10 Levha çiftinden alınan numunelerin konumu	61
Şekil 7.11 Kesim işlemi yapan su jeti	61
Şekil 7.12 Kesim işlemi esnasındaki görüntü	62
Şekil 7.13 Kesim işleminin ardından alınan görüntü	62
Şekil 7.14 Zımparalama ve parlatma cihazı	63
Şekil 7.15 Zımparalama, parlatma ve dağlama işlemi uygulanmış numuneler	65
Şekil 7.16 Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop.....	66

Şekil 7.17 SEM görüntüleme ve EDS analiz cihazı.....	67
Şekil 7.18 Çekme testi cihazı	68
Şekil 7.19 Mikrosertlik ölçümünün şematik gösterimi	69
Şekil 7.20 Mikrosertlik cihazı	69
Şekil 7.21 Eğme testlerinin gerçekleştirildiği cihaz.....	70
Şekil 8.1 CITOCHROMAX kodlu örtülü elektrodla (Ø3,25 mm) yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N1 numaralı deney, b) N2 numaralı deney, c) N3 numaralı deney.....	72
Şekil 8.2 TENACITO 80 kodlu örtülü elektrodla (Ø3,25 mm) yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N4 numaralı deney, b) N5 numaralı deney, c) N6 numaralı deney	72
Şekil 8.3 EI 312/E 106 kodlu örtülü elektrodla (Ø2,5 mm) yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N7 numaralı deney, b) N8 numaralı deney, c) N9 numaralı deney	73
Şekil 8.4 EM 180 kodlu örtülü elektrodla (Ø2,5 mm) yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N10 numaralı deney, b) N11 numaralı deney, c) N12 numaralı deney	73
Şekil 8.5 EI 307B kodlu örtülü elektrodla (Ø2,5 mm) yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N13 numaralı deney, b) N14 numaralı deney, c) N15 numaralı deney	73
Şekil 8.6 MG 183 kodlu tel ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N16 numaralı deney, b) N17 numaralı deney, c) N18 numaralı deney	74
Şekil 8.7 MI 312 kodlu tel ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N19 numaralı deney, b) N20 numaralı deney, c) N21 numaralı deney	75
Şekil 8.8 MI 307Si kodlu tel ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N22 numaralı deney, b) N23 numaralı deney, c) N24 numaralı deney	75
Şekil 8.9 Ana malzemeye ait 20x mikroyapı görüntüsü	76
Şekil 8.10 Ana malzemeye ait 50x mikroyapı görüntüsü	77
Şekil 8.11 Kaynaklı birleştirme sonucunda zırh çeliği birleştirmesinde ısıdan etkilenen bölgeler a) 20x iri taneli bölge, b) 50x iri taneli bölge, c) 20x iri-ince taneli geçiş bölgesi, d) 50x iri-ince taneli geçiş bölgesi, e) 20x ince taneli bölge, d) 50x ince taneli bölge.....	78
Şekil 8.12 N1 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	79
Şekil 8.13 N2 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	79
Şekil 8.14 N3 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	80
Şekil 8.15 N4 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	81
Şekil 8.16 N5 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	81
Şekil 8.17 N6 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	82
Şekil 8.18 N7 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	83

Şekil 8.19 N8 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	84
Şekil 8.20 N9 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	84
Şekil 8.21 N10 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	85
Şekil 8.22 N11 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	86
Şekil 8.23 N12 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	86
Şekil 8.24 N13 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	87
Şekil 8.25 N14 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	88
Şekil 8.26 N15 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	88
Şekil 8.27 N16 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	89
Şekil 8.28 N17 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	90
Şekil 8.29 N18 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	90
Şekil 8.30 N19 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	91
Şekil 8.31 N20 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	92
Şekil 8.32 N21 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	92
Şekil 8.33 N22 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	93
Şekil 8.34 N23 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	94
Şekil 8.35 N24 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı	94
Şekil 8.36 Ana malzemeye (kaynaksız numune) ait 2500x SEM görüntüsü.....	97
Şekil 8.37 Ana malzemeye (kaynaksız numune) ait 5000x SEM görüntüsü.....	97
Şekil 8.38 N1 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	98
Şekil 8.39 N2 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	99
Şekil 8.40 N3 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	100
Şekil 8.41 N4 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	101

Şekil 8.42 N5 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	102
Şekil 8.43 N6 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	103
Şekil 8.44 N7 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	104
Şekil 8.45 N8 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	105
Şekil 8.46 N9 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	106
Şekil 8.47 N10 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	107
Şekil 8.48 N11 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	108
Şekil 8.49 N12 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	109
Şekil 8.50 N13 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	110
Şekil 8.51 N14 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	111
Şekil 8.52 N15 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	112
Şekil 8.53 N16 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	113
Şekil 8.54 N17 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	114
Şekil 8.55 N18 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	115
Şekil 8.56 N19 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	116
Şekil 8.57 N20 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	117

Şekil 8.58 N21 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	118
Şekil 8.59 N22 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	119
Şekil 8.60 N23 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	120
Şekil 8.61 N24 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi	121
Şekil 8.62 Ana malzemeye ait EDS analizi	122
Şekil 8.63 N2 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi	123
Şekil 8.64 N5 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi	124
Şekil 8.65 N8 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi	124
Şekil 8.66 N11 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi	125
Şekil 8.67 N14 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi	125
Şekil 8.68 N17 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi	126
Şekil 8.69 N20 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi	126
Şekil 8.70 N23 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi	127
Şekil 8.71 N2 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi	127
Şekil 8.72 N2 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi	128
Şekil 8.73 N5 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi	128
Şekil 8.74 N5 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi	129
Şekil 8.75 N8 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi	129
Şekil 8.76 N8 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi	130
Şekil 8.77 N11 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi	130
Şekil 8.78 N11 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi	131
Şekil 8.79 N14 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi	131
Şekil 8.80 N14 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi	132
Şekil 8.81 N17 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi	132
Şekil 8.82 N17 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi	133
Şekil 8.83 N20 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi	133
Şekil 8.84 N20 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi	134

Şekil 8.85 N23 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi	134
Şekil 8.86 N23 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi	135
Şekil 8.87 Ana malzemeye ait çekme testi gerçekleştirilmiş numuneler	136
Şekil 8.88 N1 numaralı birleştirme numunelerinin çekme testi sonrası görüntüsü	137
Şekil 8.89 Çekme testi sonuçları genel grafiği	137
Şekil 8.90 Ana malzemeye (kaynaksız numune) ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x	139
Şekil 8.91 N2 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x	140
Şekil 8.92 N5 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü	140
Şekil 8.93 N8 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü	140
Şekil 8.94 N11 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü	141
Şekil 8.95 N14 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü	141
Şekil 8.96 N17 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü	141
Şekil 8.97 N20 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü	142
Şekil 8.98 N23 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü	142
Şekil 8.99 Mikrosertlik testi uygulanmış numune	143
Şekil 8.100 3,25 mm elektrodlar ile yapılan birleştirmeye ait mikrosertlik grafiği	144
Şekil 8.101 2,5 mm elektrodlar ile yapılan birleştirmeye ait mikrosertlik grafiği ...	145
Şekil 8.102 1 mm ilave tellere ile yapılan birleştirmeye ait mikrosertlik grafiği	145
Şekil 8.103 Genel mikrosertlik testi sonuçları grafiği	146
Şekil 8.104 N2 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler	150
Şekil 8.105 N5 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler	150
Şekil 8.106 N8 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler	150
Şekil 8.107 N11 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler	151
Şekil 8.108 N14 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler	151
Şekil 8.109 N17 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler	151
Şekil 8.110 N20 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler	152
Şekil 8.111 N23 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler	152

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 7,62 ve 14,5 mm zırh delici mermilere karşı kullanılan zırh malzemeleri	7
Tablo 3.2 Metalik zırhların özellikleri	8
Tablo 4.1 Zırh çeliklerinin 7,62 mm zırh delici (AP) mermiye karşı koruması için gerekli olan özellikleri.....	15
Tablo 4.2 Alaşım elementlerinin zırh çeliklerine etkisi	20
Tablo 4.3 Bazı zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonu.....	23
Tablo 4.4 Bazı zırh çeliklerinin mekanik özellikleri.....	24
Tablo 4.5 Zırh çelikleri kullanılan imalatlarda istenilen metalürjik özellikler	25
Tablo 7.1 Kullanılan zırh çeliğinin kimyasal özelliği.....	49
Tablo 7.2 Kullanılan zırh çeliğinin mekanik özelliği.....	49
Tablo 7.3 Dolgu metallerinin standartlara göre adlandırılması	50
Tablo 7.4 Kaynak ağız geometrilerine ait ölçüler	52
Tablo 7.5 Dolgu metallerinin akım şiddeti değerlerine göre numaralandırması	53
Tablo 7.6 Örtülü elektrodların kimyasal kompozisyonu (%).....	56
Tablo 7.7 Dolgu metali elektrodların mekanik özellikleri	56
Tablo 7.8 Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı yönteminin kaynak parametreleri.....	57
Tablo 7.9 Dolgu metali kaynak tellerinin kimyasal kompozisyonu (%)	58
Tablo 7.10 Dolgu metali kaynak tellerinin mekanik özellikleri	58
Tablo 7.11 MAG kaynağı yönteminin kaynak parametreleri	58
Tablo 7.12 Deneylerde kullanılan dağlama ayrıçlarına ait bilgiler	64
Tablo 8.1 Eğme testi sonuçları.....	149

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

σ_y	: Akma Gerilmesi
σ_r	: Çekme Gerilmesi
E_m	: Kütle verimliliği
C	: Karbon
Si	: Silisyum
Mn	: Mangan
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Cr	: Krom
Ni	: Nikel
Mo	: Molibden
B	: Bor
V	: Vanadyum

Kısaltmalar

A	: Amper
AP	: Zırh Delici
CHA	: Dökme Homojen Zırh
cm	: Santimetre
DHA	: Çifte Sertliğe Sahip Zırh
dk	: Dakika
HB	: Brinell Sertliği
HHA	: Yüksek Sertlikte Zırh
HV	: Vickers Sertliği
kN	: KiloNewton
lt	: Litre
M.Ö.	: Milattan Önce
M.S.	: Milattan Sonra
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
N	: Newton
RHA	: Homojen Haddelenmiş Zırh
V	: Volt

1. GİRİŞ

İnsanlığın, varoluşundan beri hayatta kalma, yaşamını devam ettirme ve kendini koruma gibi iç güdülere sahip olduğu bilinmektedir. Bu iç güdülerin etkisi ile insan doğanın sert koşullarına, zorlu yaşam şartlarına ve zorlayıcı dış koşullara karşılık kendini geliştirmiştir. Bu gelişim, sığınmak amacıyla barınaklar, konutlar ve mağaralar şeklinde yapısal olarak karşımıza çıkmaktadır. Daha sonra gelişim ilerletilerek kişisel koruma noktasına kadar gelmiştir. Bu kişisel koruma isteği üzerine örtüler, koruyucu giysi ve kıyafetler, ayakkabılar ve başlıklar geliştirilerek dışarıdan gelebilecek saldırılar, çarpma, yabani hayvan saldırıları, darbeler, yaralanma ve yırtılma tehlikelerine karşı önlem alınmak istenmiştir. Dış tehditlerden korunma istekleri doğrultusunda geliştirilen bu malzeme ve teçhizatlar doğal malzemeler olup doğadan elde edilerek korunma ihtiyacı karşılanmıştır. İnsanlar ağaç parçaları, taş ve kaya parçaları, hayvan derileri, bitkiler, büyük hayvan dişleri ve kemikler gibi doğada kolayca bulunabilecek malzemeler ile dış tehditlerden korunmayı hedeflemişlerdir. Deri kıyafet ve örtüler, kemiklerden oluşan koruyucu malzemeler, dışarıdan gelen darbelerin, yaralayıcı unsurların vücutta oluşturabileceği hasarın büyük bir kısmını engelleyebildiği için insanların hayatını devam ettirebilmesinde önemli bir rol oynamıştır (Baykara vd., 2020).

Dış tehditlerden korunma amaçlı üretilen teçhizatlar tehdit unsuru olan silahların gelişmesi ile birlikte yetersiz kalmaya başlamıştır. Avcılık veya saldırma amacıyla kullanılan sert ve keskin kenarlı kayalar ile yapılan mızrak ve baltalar kişisel koruma teçhizatlarını da gelişmeye zorlamıştır. Gelişen tehdit unsurları karşısında kişisel koruma malzemeleri metal üretme ve işleme becerisi ile birlikte metal ürünü koruyucu teçhizatları gün yüzüne çıkarmıştır. Metal miğferler, metal parçalarıyla korunan göğüs kısmı ve kalkanlar ile birlikte sert ve keskin uçlu mızrak ve oklara karşı etkili bir koruma sağlanmıştır. Alaşımın keşfi ile birlikte bakır metalinin etkili olduğu bronz alaşımı kullanılarak kılıç, balta, bıçak, nacak, mızrak ve süngü gibi çeşitli kesici ve yaralayıcı aletlerin üretilmesi ve kullanılması ile birlikte zırh kavramı meydana gelmiş ve insanların hayatta kalabilmesi ve yaşama tutunabilmesi için çok büyük bir öneme sahip olmuştur (Baykara vd., 2020).

Gelişmelerden de gözlemlendiği üzere, insanın hayatında tehdit unsuru oluşturan silahların gelişimi, zırh teknolojisine önem kazandırmış ve ilkel korunma malzemelerinden modern zırh teknolojilerine gelişim, ihtiyaç arz etmiştir. Günümüzde kullanılan modern silahlardan ateşlenen çeşitli mermilerin kinematik özelliklerine karşılık zırh malzemesi olarak metal, seramik, polimer ve kompozit esaslı zırhlar geliştirilmiştir. Gelişmelere bakıldığında silah teknolojisi ile birlikte zırh teknolojisi birbirine paralel bir şekilde gelişmeye devam etmiş ve günümüzde de devam etmektedir (Kara, 2012).

Modern zırh teknolojisinde, zırh materyalleri arasında metal esaslı zırhlar birçok avantajı ile dikkatleri üzerine çekmektedir. Metal esaslı zırhlar çelik, alüminyum, titanyum ve magnezyum gibi malzemelerden üretilebilmektedir. Bu malzemelerin arasında en çok dikkat çeken materyal ise zırh çeliğidir. Yüksek mukavemet, yüksek sertlik, iyi tokluk düzeyi, kaynaklanabilirlik ve ısı işlem kolaylığı gibi özellikler zırh çeliklerini ön plana çıkarmaktadır (Jena vd., 2010). Zırh çelikleri, sertleştirilmiş çeliklerden meydana gelmektedir. Bu çelikler, nesnelere veya kişileri korumak için yıllardan beri dışarıdan gelebilecek darbelere karşı görev üstlenmektedir. Uygulama alanları arasında savaş tankları, askeri bölgeler ve kasalar gibi yerlerin korunmasında zırh çelikleri önemli rol oynamaktadır (Hu vd., 2002).

Zırh çelikleri sertlik ve mukavemet açısından mükemmel özellikler sergileyen malzemelerdir. Bu çalışmada ana malzeme olarak Miilux Protection 500 zırh çeliği kullanılmış olup, bu malzemenin katalogda belirtilen mekanik özellikleri (akma mukavemeti 1300 N/mm^2 , çekme mukavemeti 1600 N/mm^2 , sertlik 480 – 560 HB) çok yüksek sonuçlar sergilemektedir. Böyle yüksek mekanik özelliklere sahip malzemelerin kaynaklı birleştirme işlemleri her zaman problemli olmuştur. Özellikle ilave tel ile yapılan birleştirmelerde ana malzemenin kimyasal ve mekanik özelliklerine en uygun elektrodu belirleyerek kaynak işlemlerini gerçekleştirmek zaruri bir durumdur. Fakat bu malzemelerin özelliklerine yakın özellikte elektrod ve teller halihazırda geliştirilememiştir. Bu nedenle söz konusu zırh malzemeleri için gerçekleştirilen kaynaklı birleştirme işlemlerinin ana malzemenin mekanik ve metalurjik özelliklerini sergilemekten bir hayli uzak olduğu da bir gerçektir. Bu gerçek bilinmesine rağmen bu çalışmada Protection 500 malzemesi özelinde gazaltı ve örtülü

elektrodlarla elektrik ark kaynağı uygulamaları gerçekleştirilmiştir. İşbu nedenle, bu çalışma zırh malzemelerinde kaynak bölgesinin mekanik, metalürjik ve balistik açıdan geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için bir ön çalışma niteliği taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, öncelikle örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı ve gazaltı ark kaynağı (MAG) uygulamaları kapsamında Protection 500 malzemesinin birleştirme işlemlerinde endüstride kullanılabilen en uygun tel ve elektrod kombinasyonları belirlenmiştir. Gazaltı ark kaynağı için 3 farklı tel türü (3 adet Ø1,0 mm), örtülü elektrodla ark kaynağı uygulamalarında ise 5 farklı elektrod türü (2 adet Ø3,25 mm, 3 adet Ø2,5 mm) belirlenmiştir. Toplam 8 farklı ilave tel ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kaynaklı birleştirmelerin mekanik ve metalürjik performansını incelemek üzere birleştirmelerden alınan numunelere test ve analizler uygulanmıştır. Mekanik testler için numunelere çekme, eğme ve mikrosertlik testleri, mikroyapısal incelemeler için ise optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde Protection 500 malzemesinin kaynaklı birleştirme işlemlerinde MAG kaynağının daha uygun bir yöntem olduğu belirlenirken, MG183 kodlu elektrodun (AWS: ER100S-G) en yüksek mekanik ve metalürjik özellikleri sergilediği tespit edilmiştir. İşbu sonuçlar neticesinde Protection 500 malzemesinin kaynaklı birleştirme işlemlerinde kullanıcılara MG 183 elektrodla gerçekleştirilmek üzere MAG kaynağı uygulamaları tavsiye edilebilir.

2. ZIRHIN TARİHÇESİ

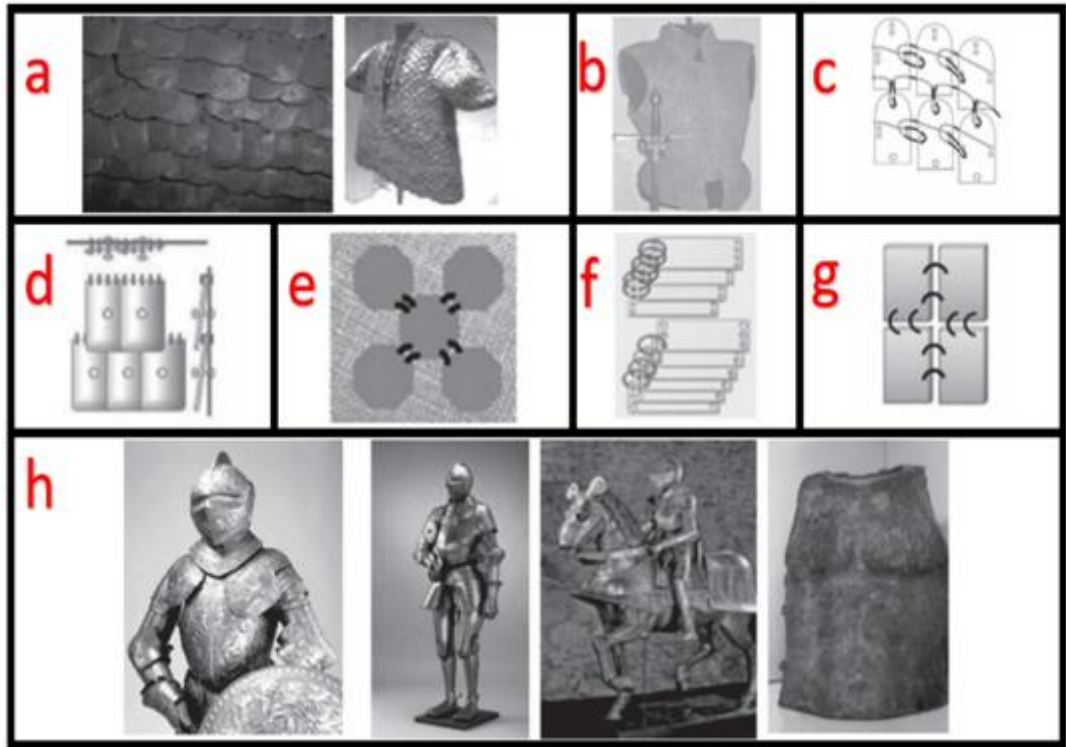
Zırhların tarihsel gelişimi, tarihteki devletlerin hakimiyet yarışı ve gelişen silah teknolojisi ile birlikte ivme kazanmıştır. Silah teknolojisinin ilerlemesi ile birlikte zırh teknolojisi önem kazanmıştır. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere eski Mısır uygarlığındaki askerlerin savaş esnasında kullandığı basit fakat yaralayıcı ve ölümcül olabilen silahlar görülmektedir. Kahire müzesinde bulunan ve günümüze göre ilkel sayılan balta, kısa kılıç, bakır uçlu mızrak, oklar ve hançerler o dönemde kullanılan silahlardandır (El Messiry, 2019).



Şekil 2.1 Eski Mısır askerlerine ait silahlar (El Messiry, 2019)

Kullanılan bu ilkel savaş silahlarının karşısında insanın hayatını kurtaracak ve yaralanmalara engel olacak vücut zırhları tasarlanmıştır. Tarihsel olarak bilinen ilk zırh, M.Ö. 1500’lü yıllara ait olduğu düşünülen ve Eski Mısırlılara ait olan kumaş ve gömlek gibi sırta geçirilen, ağır ve kullanışsız olan zırhtır. Bu zırhın savaş esnasında kullanılabilirliği pek uygun olmadığından ötürü tarihte pek kullanılmadığı bilinmektedir. Bununla birlikte, Asurlular M.Ö. 900 ile 600 yılları arasında, farklı bir zırh çeşidi keşfetmişlerdir. Küçük boyutlardaki dikdörtgen şekline sahip bronz parçalarını birbirlerine paralel bir şekilde dikerek MS 16.yüzyıla kadar kullanılacak olan zırhın temelini atmışlardır. M.Ö. 3000 ile 2000 yılları arasında bronzun keşfi ile

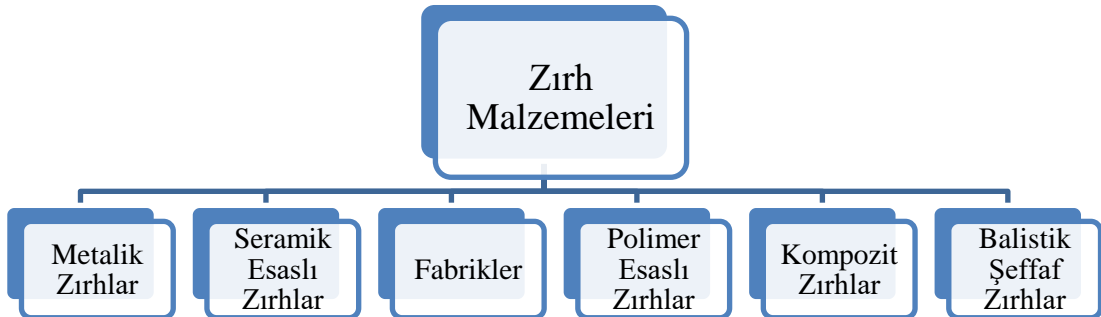
birlikte zırh teknolojisi alanında deri ve tahta gibi materyallere göre daha etkili olabileceği düşünülen metal, zırh teknolojileri alanında büyük adımlar atılmıştır. Asurlular, tarihte bronz miğfer, kalkan ve silah koruyucuları kullandığı bilinmektedir. Bununla birlikte, M.Ö. 8.yüzyılda, Eski Yunanlılar bronz plakaları vücudun göğüs ve sırt gibi bölgelerinin şekline göre şekillendirerek vücuttaki bazı bölgeleri korumayı amaçlamıştır. Bu gelişmeden etkilenen Romalılar, Eski Yunanlıların kullandığı zırh teknolojisini alıp, demir plaka kullanarak mail olarak adlandırdıkları zırhı geliştirmişlerdir (Baykara vd., 2020). Bu gelişmeler ile birlikte demir bazlı zırhların, bronz bazlı zırhlara göre üstünlükleri anlaşılmış ve bir müddet sonra bronz zırhlar etkinliğini yitirmiştir. Demir bazlı zırhlar tarihte bir süre daha yerini almıştır. Ayrıca, icat edilmesiyle birlikte çelik malzemeler, zırh materyallerinin en önemli ve vazgeçilemez üyesi haline gelmiştir. Şekil 2.2’de tarihsel süreçte kullanılan zırh malzemeleri verilmiştir.



Şekil 2.2 Eski dönemlere ait zırh türleri. (a) Zırhlı elbise, (b) Brigandine isimli vücut zırhı, (c) Katmanlı zırh, (d) Perçinlenmiş bağcıklı zırh, (e) Japon zırhı, (f) ve (g) Mail ve plaka zırh, (h) Plaka zırh (El Messiry, 2019)

3. ZIRH MALZEMELERİ

Zırhlar, olası tehdit unsurlarına karşılık maksimum direnci göstermek üzere tasarlanmış sistemlerdir. Kullanılan her türlü mermilerin yanında hedeflenen alana parçalanma yolu ile nüfuz ettirmek istenen patlayıcı mermiler, el bombaları, mayınlar ve kinetik enerjili deliciler gibi tehdit unsurlarını bertaraf etmek için zırh malzemeleri çatlamaya, kırılmaya ve parçalanmaya karşı dayanıklı olmalı ve bu tehdit unsurlarına karşı yapısal bütünlüğünü korumak zorundadır (Laible, 2012). Bu şartların yerine getirilmesinde en önemli parametrelerden biri zırh malzemeleridir. Zırh malzemeleri, bir sistemin kritik alanlarının korunmasında önemli rol oynamaktadır. Sivil ve askeri alanlarda koruma amacı taşıyan ve hava, deniz, kara ve uzay araçları gibi korunmaya ihtiyaç duyulan bölgelerde görevlendirilen malzemelerdir. İlerleyen silah teknolojisi ile birlikte modern silahlardan çıkan kinematik mermiler, yoğun tehdit unsuru haline gelmiş ve bu tehdit karşısında zırh sistemlerinde gelişime ihtiyaç duyulup zırh sistemlerinde uygulanan malzemeler büyük önem görmeye başlamıştır. Darbe yükü uygulayacak olan çeşitli kinematik mermilerin mekanik özellikleri ve geometrisi tercih edilecek zırh malzemelerini yakından ilgilendirmektedir (Karagöz ve Atapek, 2007). Mekanik özellikleri ve geometrisine bağlı olarak darbe yükü uygulayacak merminin penetrasyon sürecinde zırh malzemelerinin davranışı önemli olduğundan zırh malzemesi tercihi önem taşımaktadır. Halihazırda kullanılan zırh malzemelerinin sınıflandırması Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Zırh malzemeleri (Baykara vd., 2020)

Belirtilen zırh malzemelerinin çeşitli alanlarda uygulamaları bulunmaktadır. Bireysel koruma, araç koruması ve kapalı mekanın korunması amacıyla; tehdit unsurlarının ve zırh malzemelerinin özellikleri göz önünde bulundurularak zırh malzemesi seçimi yapılmalıdır. Bu kapsamda belirtilen tehdit unsurlarından olan 7,2 ve 14,5 mm zırh delici mermilere karşı kullanılan zırh malzemeleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 7,62 ve 14,5 mm zırh delici mermilere karşı kullanılan zırh malzemeleri (Karagöz ve Atapek, 2007)

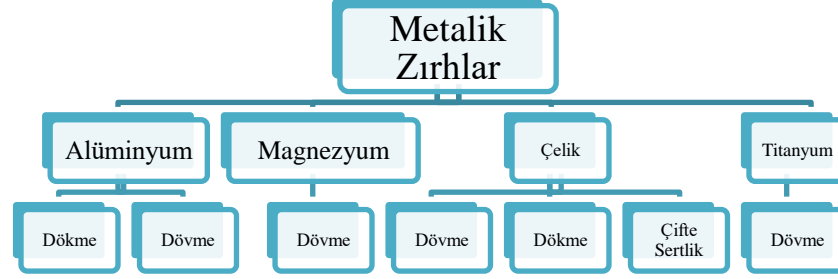
Zırh Malzemeleri	
Çelik - RHA (HB380) - Yüksek Sertlik (HB 550) - İki defa sertleştirilmiş (HB 440-600)	Cam Takviyeli - E cam - S cam
Alüminyum - 5083 alaşımı - 7039 alaşımı - 2519 alaşımı	Seramik - Alüminyum oksit - Alüminyum oksit + Al - Bor karbür - Bor karbür + Al - Titanyum diborür
Kompozit (Seramik yüzeyli çok katmanlı) - Al + RHA - Çelik + RHA - E cam + RHA	

Bütün zırh malzemelerinin, çeşitli uygulama alanlarında farklı avantajlar sağlamasına rağmen mekanik özelliklerde geniş yelpazeye ve yüksek üretim hızına sahip olmasından dolayı metalik zırhlar modern zırh teknolojilerinde ön planda olan zırh malzemelerinden biri olmuştur.

3.1 Metalik Zırhlar

Metalik zırhlar, alaşımlama ve ısıtma işlemlerinin uygulanması ile elde edilerek çeşitli tehdit unsurlarını engellemekte büyük oranda başarılı olan zırh malzemelerinden biridir (Laible, 2012). Mekanik özelliklerin (sertlik, tokluk ve dayanım) istenilen düzeylerde elde edilirliliği amacıyla ön plana çıkan metalik zırhlar; şekillendirilebilirlikleri, süneklikleri ve kaynaklanabilirliği iyi düzeyde olması sebebiyle istenilen boyut ve şekle getirilip yüksek üretim hızı sağlamaktadır (Baykara vd., 2020). Metalik zırh uygulamaları genellikle; alüminyum, magnezyum, çelik ve

titanyum olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır. Şekil 3.2’de üretim yöntemleri ile birlikte metalik zırhların gruplandırması belirtilmiştir.



Şekil 3.2 Metalik zırhlar (Hazell, 2022)

Günümüzde işlenebilirlik, maliyet ve istenilen geometri için kaynaklanabilirlik açısından alüminyum ve çelik metalik zırhlar ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte magnezyum ve titanyum gibi metalik zırhlar pahalı olmasına rağmen istenilen özellikler doğrultusunda tercih edilebilmektedir (Hazell, 2022).

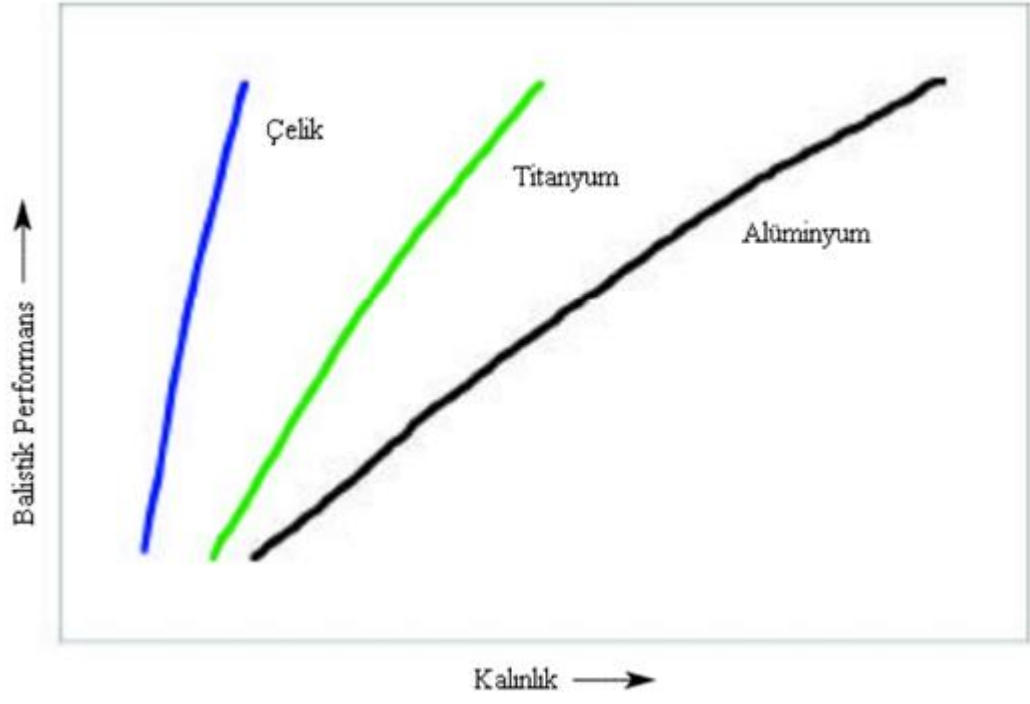
Şekil 3.2’de verilen metalik zırhların birer üyesi olan alüminyum, çelik ve titanyum alaşımlarına ait örnek zırh malzemelerinin mekanik özellikleri Tablo 3.2’de, balistik performansı ise Şekil 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Metalik zırhların özellikleri (Baykara vd., 2020)

Mekanik Özellikler	Çelik Zırh (RHA)	Alüminyum Zırh (5083)	Titanyum Zırh (Ti-6Al-4V)
Standart	MIL-A-12560	MIL-A46077	MIL-A46026
Çekme Dayanımı (MPa)	1170	350	970
Yoğunluk (g/cm ³)	7,86	2,70	4,5
Spesifik Dayanım* (MPa, cm ³ /g)	150	130	220
Kütle Verimi** (E _m)	1,0	1,0-1,2	1,5

*Spesifik Dayanım: Çekme dayanımının yoğunluğa oranı

**Kütle Verimi (E_m): Belirlenen balistik tehdidi yok edebilecek kabiliyette olan birim alana düşen ağırlıktaki çelik / Birim alandaki malzeme ağırlığı



Şekil 3.3 Bazı metalik zırhların kalınlığa bağlı balistik performansı (Lane vd., 2002)

4. ZIRH ÇELİKLERİ

Demir, M.Ö. 2000 yılı civarında insanlar tarafından keşfedilen en önemli malzemelerden biridir. Demirin keşfi ile bronz malzemedeki yapılan gündelik yaşamda kullanılan aletler ile savunma veya saldırı amacı için kullanılan silahların yerini demirden yapılan aletler ve silahlar almaya başlamıştır. Alaşımlamanın keşfi ile birlikte demir aletler bronz aletlerin yerini almıştır. Bunun nedeni, insanların demirin karbon alaşımlaması ile bronzla kıyasla daha sert, dayanıklı ve keskin kenarlı alet ve silahlar elde edilebilmesidir. Bu malzeme değişimi ile birlikte insanlar bronz çağından demir çağına geçiş sağlamıştır (Spoerl, 2004). Demir çağının başlamasıyla demirin kullanımında artış meydana gelmiş ve hayatın her alanında kullanılmıştır. Ancak ilerleyen zamanda bronzla göre iyi mekanik özelliklere sahip olan demir yeterliliğini kaybetmiş ve insanlar yeni arayışlar içine girmişlerdir. Daha yüksek mekanik özelliklere sahip malzemeler aranmış ve sonuçta çeliğin keşfi gerçekleşmiştir. Bu keşifle birlikte gelecekte modern ekonomi, insanların yaşam düzeyi ve hatta gelişmişlik düzeyinin göstergesi olacak olan çeliklerin temelleri atılmışlardır (Barad, 2010).

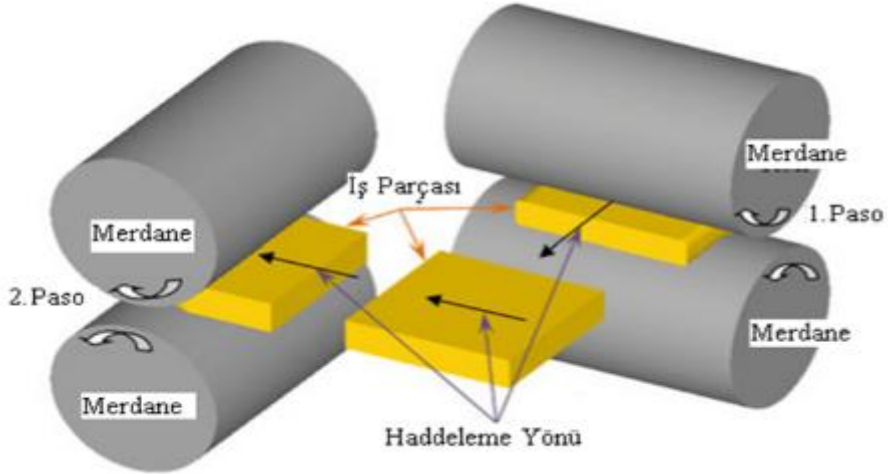
M.Ö. 202'den M.S. 220'ye kadar Han hanedanlığı altında bulunan Çinliler tarafından çeliğin keşfi gerçekleştirilmiştir. Bu keşif ile birlikte demirin dezavantajları giderilmiş olup, insanların ihtiyacını karşılayabilecek düzeyde daha sert, daha dayanıklı ve daha güçlü malzemelerin imalatı başlamıştır. Çinliler aynı zamanda çeliğin silahlarda da iyi özellikler gösterebileceğini ve silahlarındaki keskinliği üst düzeylere taşıyacaklarını keşfetmişler ki efsanelere göre ilk Han'ın kılıcı sadece çelikten imal edilmiştir (Barad, 2010). Bu şekilde çelik kullanımı silah teknolojileri ile birleşmiş ve gelecekte kullanılacak olan modern silah teknolojilerine ışık tutmuştur. Silah teknolojisine karşılık savunma sanayi üzerinde de etkili olan çelikler birçok tehdit unsuruna karşı koruma görevini üstlenmiş ve çelik üretimi ile birlikte alaşımlamanın da gelişmesi ile birlikte çeşitli tehdit unsurlarına karşı çelikler büyük görevler üstlenmiştir.

4.1 Zırh Çeliklerinin Türleri

Zırh çelikleri iki başlık olarak karşımıza çıkmaktadır (Baykara vd., 2020):

- RHA (Rolled Homogeneous Armour) (MIL-DTL 12560) - Haddelenmiş Homojen Zırh
- CHA (Cast Homogeneous Armour) (MIL-DTL 11356) - Döküm Homojen Zırh

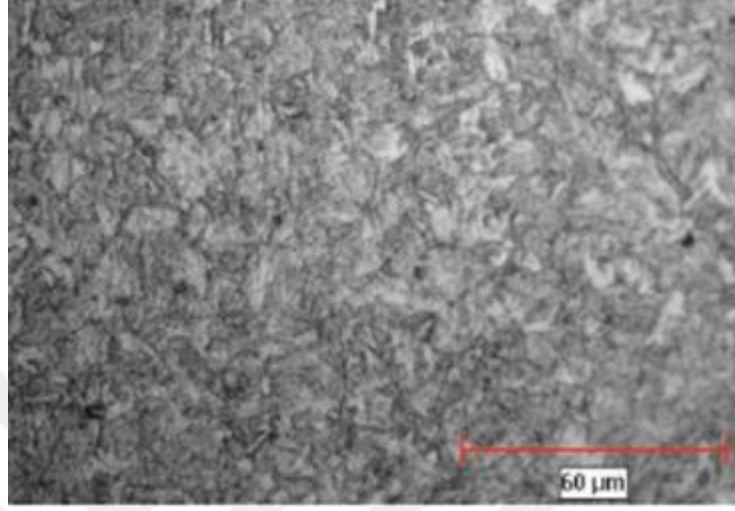
RHA (Haddelenmiş homojen zırh), yaygın olarak kullanılan zırh çeliklerinin temelini oluşturan, metalurjik ve mekanik olarak sürekli geliştirilmeye çalışılan en önemli zırh malzemelerinden biridir. Üstün balistik performans ve imalat esnasında kaynaklanabilirliğinin yüksek olması sebebiyle en çok tercih edilen malzemelerin başında gelmektedir (Baykara vd., 2020). RHA, homojenlik sağlanması için Şekil 4.1’de gösterildiği gibi çapraz sıcak haddeme ile üretilmiş, martenzitik yapı elde edilmesi için su verme işlemi uygulanmış ve malzemedeki gerilmeleri gidermek için de temperlenmiş olan zırh çelikleridir.



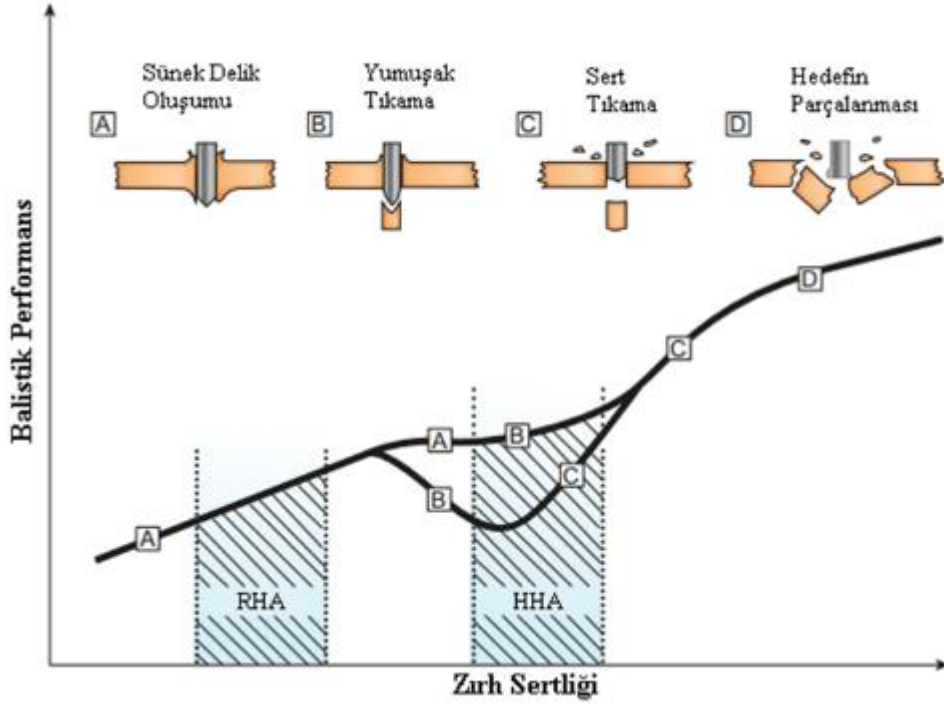
Şekil 4.1 Çapraz haddeme işleminin gösterimi (Rout vd., 2015)

Zırhlı araçların çetin arazi koşullarına karşılık manevra kabiliyetini kısıtlayan en önemli etkenlerden biri aracın ağırlığıdır. Zırh çeliklerinin, ağırlığı arttıran etmenlerden biri olduğu göz önünde bulundurulduğunda bu malzemede ağırlığın düşürülmesi önemli bir çalışma konusudur. Balistik performanstan ödün verilmemesi gereken durumlarda kalınlığı fazla kullanılmak zorunda kalınan RHA çelik yerine, kalınlığı biraz daha düşük ve yüksek sertlikte HHA (High Hardness Armor) – (Yüksek Sertlikte Zırh) zırh çeliği tasarlanmıştır. RHA’ya benzer aşamaları olan ve temperleme sıcaklığı azaltılıp daha yüksek sertlik düzeyine ulaşılan zırh çeliği, HHA olarak

adlandırılan zırh çeliğidir. Fakat dikkat edilmesi gereken husus sertliğin artması ile birlikte tokluğun azalması ve zırh çeliğinde oluşabilecek çatlamlardır (Hazell, 2022). Şekil 4.2’de örnek bir HHA zırh çeliği mikroyapı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.2 HHA zırh çeliğine ait mikroyapı görüntüsü (Odeshi vd., 2009)



Şekil 4.3 Zırh çeliklerinin türüne göre balistik performansı (Crouch, 2016)

Şekil 4.3’te verilen grafikte zırh çeliklerinin sertlik değerlerine göre merminin ve zırh çeliğinin deforme oluş biçimleri ve balistik performansı gösterilmiştir. Merminin enerjisi ile birlikte zırh çeliğine uygulanan darbe ile düşük sertlik değerlerine sahip

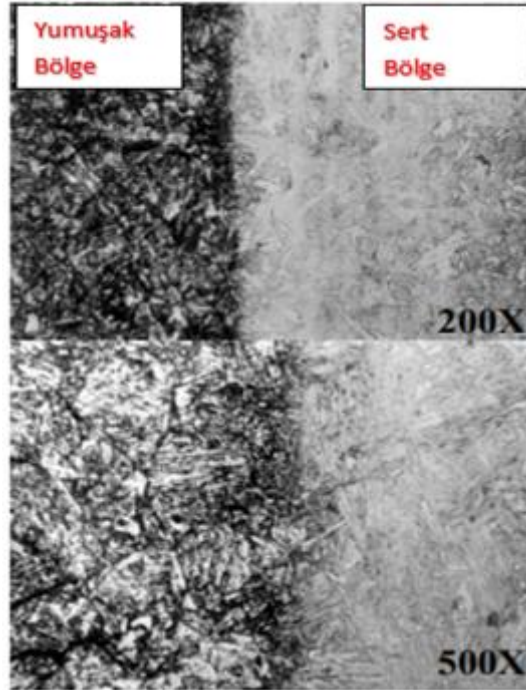
olan RHA zırh çeliğinde sünek deformasyon oluştuğu görülmektedir. HHA zırh çeliği türünde ise yüksek sertlik değerleri sebebiyle zırh çeliğinde gevrek kırılmalar meydana gelebilmektedir.

İlerleyen zamanlarda zırh çeliği bünyesine bir yenisi daha eklenmiş olup yüzey sertleştirme uygulaması eklenmiştir. Karbon kaynağı olarak odun kömürü veya kömürleşmiş kemiğin kullanıldığı, 850-900 °C sıcaklık düzeylerine çıkarılarak yüzeye karbon yayılımı ile nüfuz ettirilmesi amaçlanan yöntemde yüzeydeki sertlik artışı ile birlikte zırh çeliğinin balistik performansının artırılması hedeflenmiştir. Çeliğin ön tabakasında 600 HB sertlik elde edilebilirken arka yüzeyinde ise 400 HB sertlik elde edilmiştir (Hazell, 2022). Karbonlama ile yüzey sertleştirme işlemi uygulanan çeliklerde, çeliğin yüzeyinde kalınlığının %15-%40 oranındaki derinlikte sertlikte artışlar elde edilmiştir (Laible, 2012). Fakat bu yöntem, düşük kaynaklanabilirlik ve düşük balistik performans sergilediği için tercih edilmeyen bir yöntem olarak kalmıştır. Zırh çeliklerinde yüzey sertleştirme işlemlerinin üzerine gidilmiş olup, bir başka yöntemde ise zırh çeliğinin yüzeyi yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılıp su verme işlemi uygulanmıştır. Şekil 4.4'te verilen King Tiger olarak adlandırılan Alman tankına söz konusu ısıl işlem uygulanmıştır. Bu sayede, yüzeyde kırılğan martenzitik yapı elde edilip sertlikte artış beklenirken, parça kalınlığı boyunca değişim gösteren sertlik değerleri elde edilmiştir (Hazell, 2022).

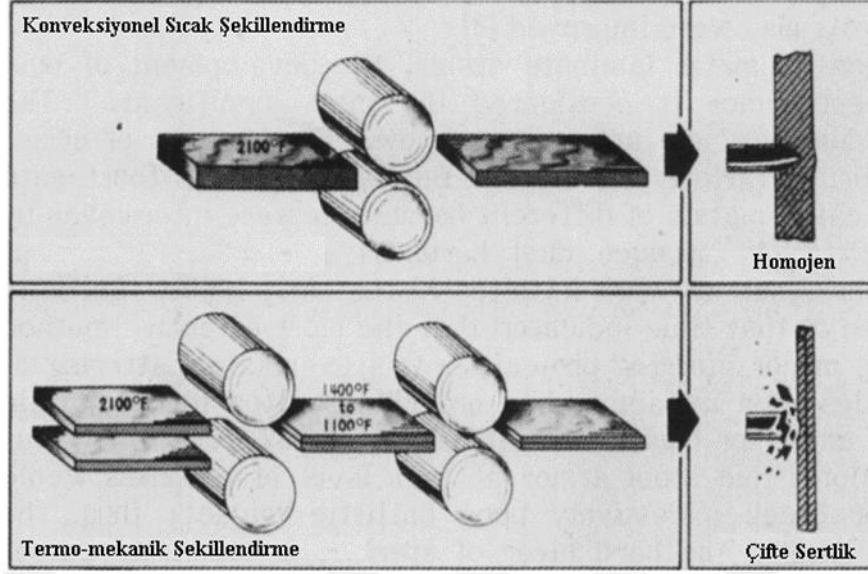


Şekil 4.4 King Tiger tankına ait görüntü (Hazell, 2022)

Gelen merminin etkisini azaltması ve daha sonra oluşan tehdidi ortadan kaldırması zırh çeliklerinden beklenmektedir. Zırh çeliklerinin tasarımında sertlik dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden biridir. Yüksek sertlik olması, gelen merminin zırh çeliğinin bütünlüğünü bozup parçalanmasına yol açmaktadır. Yüksek olmayan sertliklerde ise zırh çeliğinin mermiye karşı bir direnç gösterememesiyle birlikte koruma amacının gerçekleştirilememesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden DHA (Dual Hardness Armour) olarak adlandırılan ve çifte sertliğe sahip olan zırh çelikleri tasarlanmıştır. İki katmandan oluşan zırh çeliğinin 601-712 HB sertlik değerlerinde olan ön kısmı, merminin çekirdeğini parçalamaya yönelik görev alırken ön yüzeye kıyasla sert olmayan ve 461-534 HB sertlik düzeyinde olan arka kısmı ise kinetik enerjiye sahip mermi parçacıklarının enerjisinin sönmülmesinde görev almaktadır. Bu sayede merminin hedefe ulaşması kademeli olarak çifte sertlik değerine sahip zırh çeliği ile engellenmiş olmaktadır. Sert kısım olan ön yüzeyde yüksek karbon oranında Ni-Mo-Cr alaşımı kullanılmaktadır. İki farklı levha güçlü bir metalürjik bağlantı yöntemi ile birbirlerine yapıştırılması gerektiğinden sıcak haddeleme yöntemi tercih edilmektedir (Crouch, 2016). Şekil 4.5'te çifte sertliğe sahip zırh çeliğine ait mikroyapı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.5 Çifte sertliğe sahip zırh çeliğinin mikroyapı görüntüsü (Gooch vd., 2005)



Şekil 4.6 Zırh çeliği şekillendirme işlemi (Laible, 2012)

Zırh çeliklerinin 7,62 mm zırh delici (AP) mermiye karşı korumasında etkili olan kalınlık değerleri ve bu kalınlık değerine göre zırh çeliğinin zırhlı araçlara ağırlığını belirleyen parametreler Tablo 4.1’de verilmiştir.

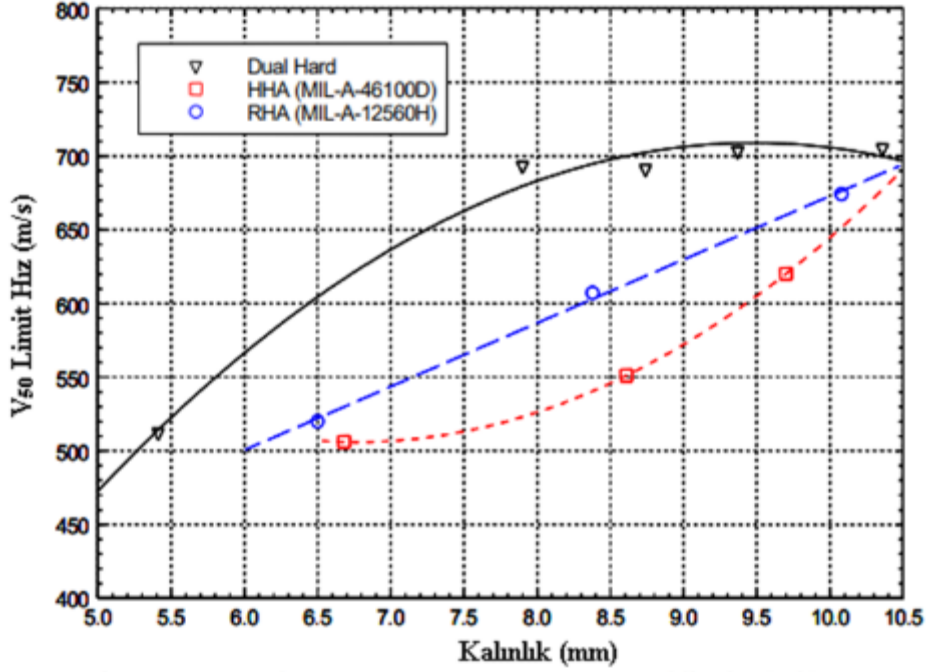
Tablo 4.1 Zırh çeliklerinin 7,62 mm zırh delici (AP) mermiye karşı koruması için gerekli olan özellikleri (Hazell, 2022)

Zırh Çelikleri	Yoğunluk (kg/m ³)	Kalınlık (mm)	Alansal Yoğunluk (kg/m ²)	Kütle Verimi E _m
RHA (380 BH)	7830	14,6	114	1,00
HHA (550 BH)	7850	12,5	98	1,16
DHA (600-440 BH)	7850	8,1	64	1,78

Zırhlı araçlarda yük miktarının düşürülmesinin sağladığı avantajlar göz önüne alındığında ince kesitteki zırh çeliklerinin zorlu arazi koşullarında araçlara yüksek manevra kabiliyetleri sağladığı gözlemlenmiştir. Tablo 4.1’de görüldüğü üzere alansal yoğunluğun, RHA zırh çeliği türünde yüksek, DHA zırh çeliği türünde ise düşük olduğu görülmektedir. Bu da zırhlı araçların ağırlığının azalmasına yol açarak arazi koşullarında avantaj sağlama durumu oluşacaktır.

Zırh çeliklerinde 7,62 mm zırh delici özelliği bulunan mermilere karşı yapılan deneylerde DHA zırh çeliğinin HHA ve RHA zırh çeliklerine karşılık avantajlarının

yüksek olduğu görülmektedir. Fakat karmaşık ve yüksek maliyetli üretim aşamaları olduğundan dolayı üretim hacmi sınırlıdır (Hazell, 2022).



Şekil 4.7 Zırh çeliklerinin 7,62 mm zırh delici mermiye karşı kalınlığa bağlı olarak değişen V_{50} balistik limit hızı (Gooch vd., 2005)

Şekil 4.7’de 7,62 mm zırh delici özelliğe sahip merminin farklı türdeki ve kalınlıklardaki zırh çeliklerine dik konumda çarpması sonucunda oluşan balistik dirençleri incelenmiştir. V_{50} limit hızı, zırh çeliğinin merminin yardımı ile oluşacak olan darbe sonucu, zırh çeliğinin hasara uğramadan merminin hızını gösteren parametredir. Bu hız değeri, zırh çeliğinin delinme veya delinmemesi olasılığının %50 olduğu hız değeridir. V_{50} limit hızı değerinin üzerindeki değerlerde zırh çeliğinde hasar gözlemlenebilirken, alt değerlerde ise zırh çeliğinde hasar gözlemlenmemektedir (Bozdoğan vd., 2015).

Zırh çeliklerinin balistik performansları Şekil 4.7’de verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere yüksek sertlik değerlerine sahip olan HHA zırh çeliği, 10 mm kalınlığın altında kalınlık değerlerinde pek bir değişim göstermemiştir. Daha düşük sertlik değerlerine sahip RHA zırh çeliğinin, HHA zırh çeliğine göre balistik deneylerde daha etkili olduğu belirtilmiştir. DHA zırh çeliğinde ise artış neredeyse doğrusal olarak gerçekleşmiş ve başlangıçta kütle verimliliği değeri (E_m) 1,3 düzeylerindeyken kalınlık arttıkça 1,0 düzeylerine gerilemiştir (Gooch vd., 2005).

CHA (Döküm homojen zırh), alaşımlama işlemi tamamlanan çeliğin ergitme işleminin ardından kalıplara dökülmesi ile üretilen zırh çeliği türüdür. Döküm ile üretilip belirli mekanik özellikler elde edildiği keşfedilen CHA zırh çeliklerinin üretimi önem kazanmış, yüksek hacimlerde üretiminin yapılabilmesi için yatırımlar yapılmış ve dökümhaneler kurulmuştur. CHA zırh çeliklerinin mekanik özellikleri, genellikle yapısında bulunan gözeneklilikler ve düşük tokluk değerlerinden dolayı dövme zırh çeliklerine göre düşüktür. Mekanik özelliğin düşük olması balistik performansa doğrudan etki edeceğinden dövme zırh çeliklerine göre balistik performans düşüktür. Bu yüzden bu çelikler, zırh çeliklerinin asıl amacı olan koruma görevini, dövme zırh çelikleri düzeyinde gerçekleştirememektedir. Fakat, CHA zırh çeliklerinde karmaşık geometrik şekillere sahip tek parça üretiminde büyük avantaj sağlanmaktadır. CHA zırh çeliği, askeri araçların gövde kısımları, taret ve kubbe gibi yerlerde kullanılmaktadır (Laible, 2012).

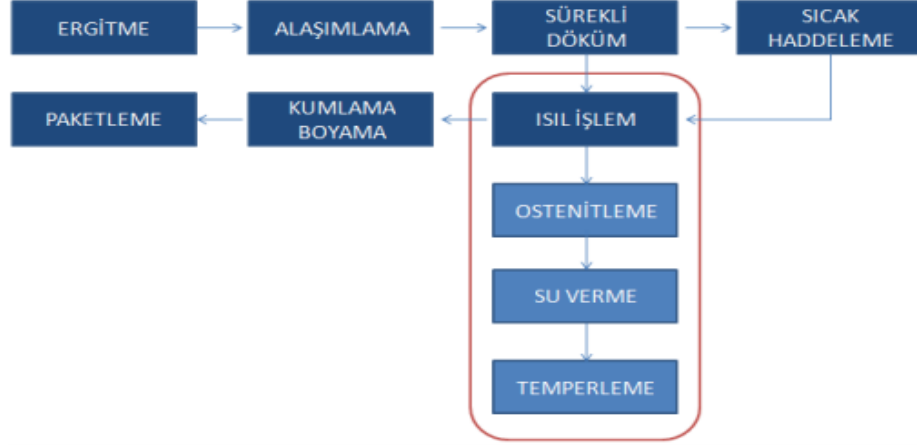


Şekil 4.8 Zırh çeliklerinin balistik performansı (Lane vd., 2002)

4.2 Zırh Çeliğinin Üretimi

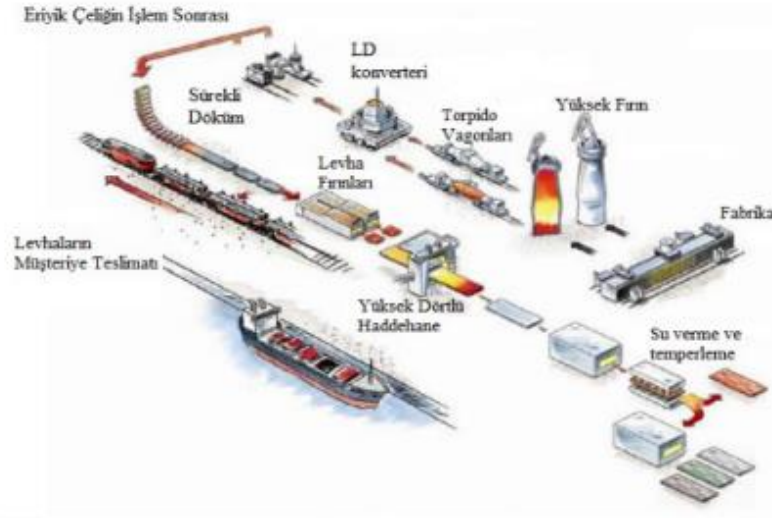
Zırh çeliklerinin balistik direncini belirleyen ve doğrudan etkileyen unsur zırh çeliğinin mekanik özellikleridir. Optimum sertlik, dayanım ve tokluk gibi bu mekanik özelliklerle birlikte zırh çeliğinin kullanılacağı ortam ve olası tehdit unsurlarının belirlenmesi önem taşımaktadır. Üretim esnasında uygulanan birtakım işlemlerle birlikte istenilen özelliklerde zırh çelikleri elde etmek mümkündür. Bu yüzden zırh

çeliğinin maruz kalacağı yük ve darbelere karşı, üretim esnasında uygulanacak işlem basamaklarının iyi bir şekilde tasarlanması çok önemlidir. Zırh çeliklerinin üretimi esnasında uygulanan işlem basamakları Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9 Zırh çeliklerinin üretim prosedürü (Merzalı, 2013)

Zırh çeliklerinin, bazik oksijen konverterinde ergime işlemi gerçekleştirilmekte ve Cr, Mo ve Ni gibi çeşitli alaşım elementlerinin ilave edilmesiyle slab halinde sürekli döküm işlemi gerçekleştirilmektedir. Döküm sonrasında sıcak haddeleme ile istenilen kalınlık seviyesine getirilmektedir. Haddeleme işleminin ardından istenilen düzeyde sertlik, mukavemet ve tokluk gibi mekanik özelliklere sahip olması için ısıtma işlemlerinden östenitleme, su verme ve temperleme işlemlerine maruz bırakılmaktadır. Isıtma işlemi tamamlanan zırh çeliklerine, yüzeyde oluşabilecek istenmeyen kalıntıların giderilmesi için kumlama ve boyama işlemi yapılmaktadır. Paketleme işleminin ardından ürün hizmete sunulmaktadır (Soykan vd., 2005). Zırh çeliklerinin üretim hattı şematik olarak Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10 Zırh çeliklerinin üretim hattının şematik gösterimi (Başar, 2021)

Zırh çeliklerinin üretiminde her basamak büyük önem taşımaktadır. Farklı mekanik özelliklere sahip çelik elde edebilmek için işlem basamaklarında değişiklikler yapılabilmektedir. Zırh çeliği üretiminde ergitme, alaşımlama, döküm, sıcak haddeleme ve ısıl işlem basamakları gerçekleştirilmektedir. Fakat standart zırh çeliği olan RHA olarak adlandırılan MIL-A 12560 çeliği üretiminde yüksek temperleme sıcaklığı (450-600°C) uygulanırken, yüksek sertlikte olan HHA olarak adlandırılan MIL-A 46100 zırh çeliği üretiminde daha düşük temperleme sıcaklığı (200°C) uygulanmaktadır. Zırh çeliklerindeki mekanik özelliklerde farklılaşma ile birlikte farklı özelliklerde zırh çeliği elde etmemize imkan tanınmaktadır. Böylece istenilen özelliklere göre zırh çeliğinin tasarım ve üretim aşamaları gerçekleştirilebilmektedir.

4.3 Zırh Çeliğinde Alaşımlama Mekanizması

Alaşım, en az birinin metal olması koşulu ile iki veya daha fazla elementin bir araya gelmesi ile oluşan ve metalik özellik sergileyen malzemelerdir (Savaşkan, 2021). Alaşımlama sisteminde elementlerin etkisi, mekanik ve metalürjik özelliklere doğrudan etki ettiğinden zırh çeliklerinin alaşımlaması balistik performans açısından çok önemlidir. Zırh çeliklerinin yüksek balistik performans sergilemesi açısından üretiminde elde edilmek istenen mekanik özellikler göz önünde bulundurularak kimyasal elementlerin oranları tespit edilip bu oranların uygulanması gerekmektedir. Tablo 4.2’de alaşım içerisinde bulunan elementlerin önerilen miktarları ve uygulanan elementlerin alaşım üzerindeki mekanik ve metalürjik etkileri verilmiştir.

Tablo 4.2 Alaşım elementlerinin zırh çeliklerine etkisi (Kasonde, 2007)

Element	Elementin Alaşıma Etkisi	Önerilen Miktar (%)
C (Karbon)	- Yüksek C içeriği, martenzite su verme sonrasında tutulan östenitin hacim oranını artırır. - Martenzitin mikrosertliğini artırır.	0,38 – 0,45
Mn (Mangan)	- Çeliğin sertleştirilebilirliğine katkı sağlar. - Zayıf karbür şekillendiricidir.	0,50 – 2,00
Mo (Molibden)	- Yarı kararlı Mo_2C ile temperleme sıcaklığı arttırarak ikincil sertleştirme sağlar (500 °C) - Mo_2C formu dislokasyonlar etrafında çekirdeklenir.	Bu durum için uygulanmaz.
	- $M_3C \rightarrow Mo_2C \rightarrow M_6C$ - 700 °C'de Mo_2C , M_6C 'ye dönüşür.	0,6 maks.
Ni (Nikel)	- Katı çözümleri sertleştirme. - Matrisin kafes aralığını değiştirerek çökeltme/matris uyumsuzluğunu artırır. - Taneleri iyileştirir. - Sünek-gevrek geçiş sıcaklığını azaltır. - A_{C1} sıcaklığını düşürmede etkilidir.	2,00 – 4,00
Cr (Krom)	- Temperleme sırasında Fe_3C bileşimini M_3C 'ye dönüştürerek yumuşamayı geciktirmede etkilidir. - M_7C_3 formunun çok az da olsa dayanım arttırıcı etkisi vardır.	1,5
Cu (Bakır)	- Matris çökmesini artırır. - Heterojen boşlukta çekirdeklenme mekanizması sağlar.	0,3
Si (Silisyum)	- Ferritik matrisin kafes aralığını azaltır ve çökelti/matris uyumsuzluğunu artırır. - Martenzitin ayrışmasını ve geçiş karbürlerinin çökeltmesini geciktirir. - Korozyon direncini artırır.	1,2 maks.
P (Fosfor)	- Tane sınırlarını ayırır	Bu durum için uygulanmaz fakat 0,005% eklenebilir.
S (Kükürt)	- Tane sınırlarını ayırır	Uygulanmaz
N (Azot)	- Sertleştirilebilirliği artırır. - Ms sıcaklığını azaltır ve kaba karbonitridler oluşumunu sağlar.	Uygulanmaz

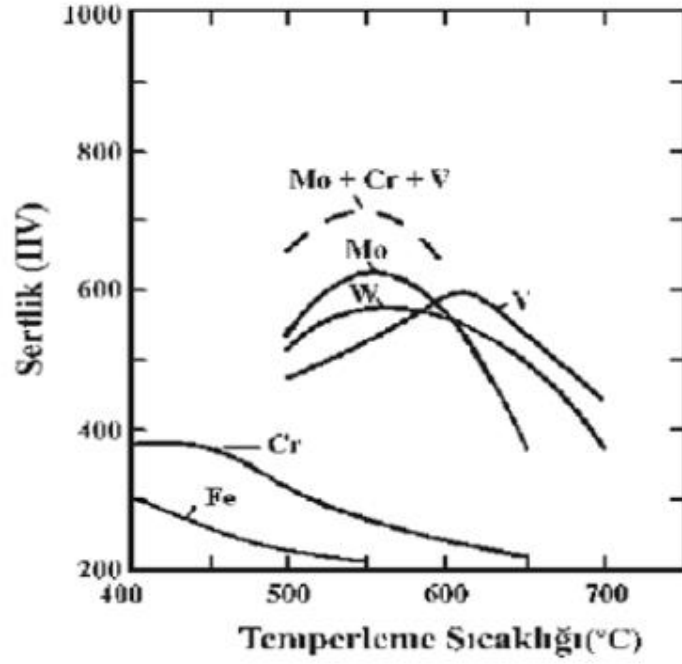
Zırh çeliklerinin üretiminde, istenilen düzeyde mekanik özelliklerin elde edilmesi aşamasında ilk işlem termomekanik işlem olarak görülebilmektedir. Fakat termomekanik işlemler tek başına bazı durumlarda yeterli olmamakla birlikte zırh çeliklerinden istenilen sertlik ve mukavemet düzeylerine bu aşamada ulaşılamamaktadır. Daha yüksek sertlik ve mukavemet değerlerinde zırh çeliklerinin elde edilebilmesi için zırh çeliğinin alaşımlama aşamasında kimyasal bileşimlerin tasarımı büyük önem taşımaktadır (Kasonde, 2007).

4.4 Zırh Çeliğine Uygulanan Isıl İşlemler

Zırh çeliklerinin istenilen özellikler doğrultusunda oluşturulmasında doğrudan doğruya etkili olan parametrelerden biri de zırh çeliğinin üretiminde uygulanacak olan ısıtma işlemidir (El-Bitar vd., 2017). Zırh çeliklerine uygulanan ısıtma işlemleri östenitleştirme, su verme ve temperleme olarak adlandırılmakla birlikte hedeflenen mikroyapı martenzitik bir yapıdır (Atapek, 2011).

Zırh çeliklerindeki martenzitik yapının elde edilmek istenmesinin amacı, çeliklerde en yüksek dayanımı veren mikroyapı olmasıdır. Fakat martenzitik yapıdaki iç gerilmeler yüksek oranda olduğu için bu mikroyapının ısıtma işleminden geçmesi gerekmektedir. Isıtma işlemi uygulanmamış martenzitik yapıdaki çeliğin kullanımı çok nadirdir. Bu ısıtma işlemi uygulaması temperleme olmakla birlikte gevrek yapıdaki çeliğin sünekliğini ve tokluk derecesini arttırmaktadır. Bu sayede malzeme dışarıdan gelebilecek darbelerin enerjilerini sönmeye konusunda daha etkili olmaktadır. Temperleme işlemi uygulanmış martenzitik yapılar en iyi dinamik mukavemeti sağlamaktadır (Jena vd., 2010).

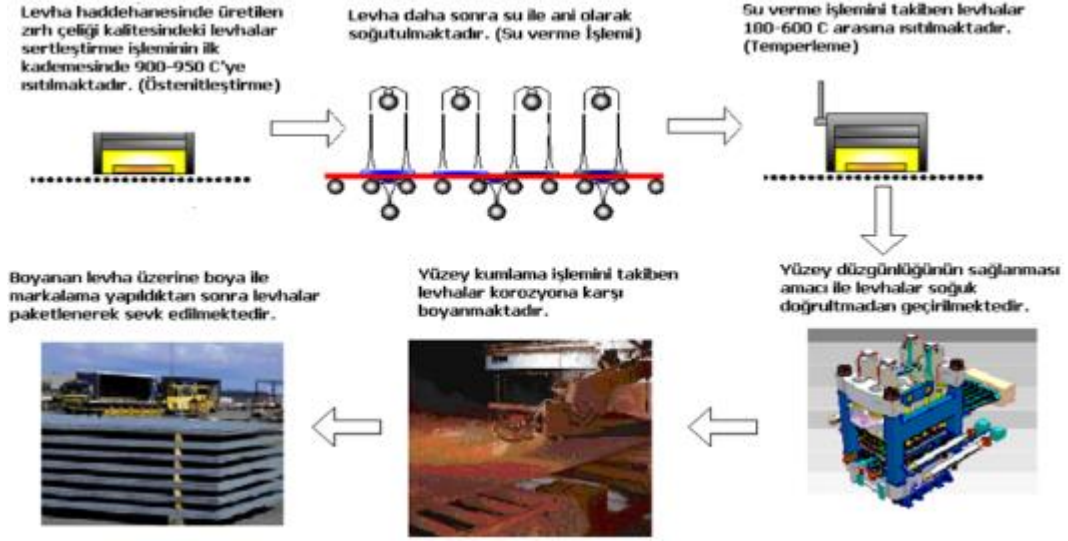
Genellikle yalın karbonlu çeliklerin temperleme işleminde su verme olayının ardından martenzit içerisinde bulunan C, Fe ile bileşik oluşturarak sementit (Fe_3C) çökmesine sebebiyet vermektedir. Bu durumda martenzitin ferrite dönüşmesiyle birlikte sertlikte düşüş meydana gelir. Çeliğin bileşimine eklenen kuvvetli karbür yapıcı alaşım elementleri karbon elementi ile çok daha yüksek temperleme sıcaklıklarında bileşik oluşturup farklı tip özel karbür çökelmesine neden olmaktadır. Bu olay sonucunda oluşan sertlik artışı ikincil sertlik olarak adlandırılmaktadır (Karagöz ve Atapek, 2007).



Şekil 4.11 Alaşım elementlerinin oluşturduğu karbürlerin temperleme karakteristiği (Örenler, 2018)

Şekil 4.11’de alaşım elementlerinin oluşturduğu karbürlerin temperleme karakteristiği görülmektedir. Burada Mo, Cr ve V gibi alaşım elementlerinin yüksek temperleme sıcaklığına karşılık matrise göre sertliğinin arttığı ve alaşım elementlerinin etkisiyle karbür oluşumunun yüksek temperleme sıcaklık düzeylerine geldiği gözlemlenmektedir (Karagöz ve Atapek, 2007).

Zırh çeliğinin sertleştirme işleminde, 900-950 °C sıcaklık seviyesinde uygulanan östenitleştirme ile birlikte matrisin karbon ve karbür oluşturu alaşım elementlerinin doyumu sağlanıp su verme işlemi gerçekleştirilir. İşlem sonucu lata tipi martenzit meydana gelmektedir. Standart bileşenlere sahip zırh çeliklerinde 600 °C sıcaklıkta temperleme işlemi uygulanmaktadır (Karagöz ve Atapek, 2007). Gerekli işlemler yapılan zırh çelikleri korozyonu önlemek için kumlama ve boyama işlemlerinin ardından istenilen ebatlarda kesilip paketlenmektedir. Zırh çeliğinin imalatında uygulanan ısıl işlem basamakları Şekil 4.12’de verilmektedir.



Şekil 4.12 Zırh çeliklerine uygulanan ısısal işlem basamakları (Soykan vd., 2005)

4.5 Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalurjisi

4.5.1 Zırh Çeliklerinin Mekanik ve Kimyasal Özellikleri

Kullanım alanları ve yerlerine göre mekanik özellikleri değiştirilebilen zırh çeliklerinin istenilen balistik direnci göstermesi gerekmektedir. Günümüzde en çok kullanım alanı olan standart zırh çeliği türü MIL-A-12560 çelikleridir. Yüksek sertliğe sahip MIL-A-46100 zırh çelikleri ise MIL-A-12560 zırh çeliklerine karşı 14,5 mm zırh delici mermilere karşı balistik performansta %20 daha etkilidir. Zırh çeliğinin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ısısal işlemlerin yanı sıra temel ve mikro alaşım elementleri önemli rol oynamaktadır (Atapek, 2011). Zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonu Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3 Bazı zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonu (Yılmaz, 2010)

Alaşım Elementleri (%)	Zırh Çeliği Türü					
	Mars 190	Mars 240	Mars 270	Mars 300	XH 129	Armox 440T
Karbon	<0,30	<0,30	0,37 maks.	0,45-0,55	0,26-0,32	0,21
Mangan	1,20	0,95	0,90	0,3-0,7	0,1-0,4	1,2
Kükürt	0,005	0,005	0,005	0,005	≤0,01	0,01
Fosfor	0,012	0,012	0,012	0,012	≤0,015	0,01
Silisyum	0,2-0,4	0,2-0,4	0,2-0,4	0,6-1,0	0,1-0,4	0,1-0,5
Nikel	1,80 maks.	1,85 maks.	3,00 min.	4,5 maks.	0,7	2,5
Krom	1,00	1,6	1,90 maks.	0,4 maks.	1,0-1,5	1,00
Molibden	0,3-0,5	0,5	0,3-0,5	0,3-0,5	0,1-0,5	0,7

Tablo 4.3'te verilen zırh çeliklerinde Mars 190, XH 129 ve Armox 440T zırh çelikleri haddelenmiş homojen zırh çeliği sınıfı olan MIL-A-12560 sınıfına ait çeliklerdir. Yüksek sertlikteki zırh çeliklerine karşılık gelen Mars 240, MIL-A- 46100 sınıfına ve Mars 270 zırh çeliği ise MIL-A-46173 standardına karşılık gelmektedir (Yılmaz, 2010). Tablo 4.3'te kimyasal kompozisyonu verilen zırh çeliklerinin mekanik özellikleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Bazı zırh çeliklerinin mekanik özellikleri (Atapek, 2011)

Mekanik Özellikler	Mars 190	Mars 240	Mars 270	Mars 300	XH 129*		Armox 440T
Sertlik (HB)	277-388	477-534	477-601	578-655	400-450	480-530	420-480
σ_Y (MPa)**	1150	≥ 1100	≥ 1100	≥ 1300	1200	1300	≥ 1100
σ_T (MPa)**	1250	≥ 1600	≥ 1700	≥ 2000	1375	1600	$\geq 1300-1500$
Uzama (%)	≥ 10	≥ 9	≥ 8	≥ 6	10	9	≥ 10
Tokluk ***	20-30	30-40	30	15	16	14	30

*: Isıl işlemine göre iki farklı gruba verilmiştir.

** σ_T = Çekme Mukavemeti ve σ_Y = Akma Mukavemeti.

***: Çentik darbe testi tokluk değeri (-40 °C, J/mm²)

Zırh çeliklerinin içeriğinde bulunan alaşım elementleri darbe dayanımı ve kaynaklanabilirlik açısından çok önemlidir. Özellikle karbon elementi kaynak işlemini doğrudan etkilemekte ve karbon oranının artmasıyla birlikte kaynak bölgesinde çatlak oluşumu ve devamında darbe dayanımında düşümlere olanak tanımaktadır. Çatlak oluşumu zırh çeliklerinin balistik performansını doğrudan etkileyeceğinden bu durumların engellenmesi gerekmektedir. Çatlak oluşumunu engellemek adına çeşitli işlemler uygulanabilmekle birlikte bu işlemler maliyeti arttırmaktadır. Hem kaynaklanabilirlik, hem darbe enerjisini sönmüleyebilmek adına karbon oranı düşük seviyelerde tutulabilmektedir. Tablo 4.3'te verilen kimyasal kompozisyonlara bakıldığında düşük karbonlu zırh çeliği türlerinin karbon oranı %0,3 civarlarındadır. Karbon miktarı, kaynaklanabilirlik ve darbe dayanımı açısından bu seviyeden daha düşük seviyelerde tutulabilir. Fakat kritik yerlerde görev alan ve yüksek mekanik özellikler beklenen zırh çeliklerinde yüksek karbon oranları görülebilmektedir. Mars 270 ve Mars 300 gibi yüksek karbon oranına sahip zırh çeliklerinin zırhlı araçlarda kullanımı mevcuttur (Atapek, 2011).

4.6 Zırh Çeliklerinden Beklenen Özellikler

Zırh çelikleri, belirli bir bölge veya hedefi, oluşan tehdit unsurlarına karşı koruma amacıyla imal edilen malzemelerin başında gelmektedir. Bu malzemelerin korumada başarılı olabilmesi için zırh çeliklerinden birtakım özellikler beklenmektedir. Zırhlı araçlarda kullanılan çeliklerden istenilen özellikler aşağıdaki verilmiştir (Atapek, 2011);

- İmalatının (kesim, kaynak, talaşlı imalat ve şekillendirme) kolay olması
- Balistik darbelere ve delinmeye karşı dayanıklı olması
- Uzun kullanım ömrünün olması (Yorulmaya karşı dirençli)

Zırh çelikleri yüksek sertlik değerlerine ve yüksek dayanımlara sahip malzemelerdir. Yüksek mekanik özelliklere sahip olmasından dolayı imalat aşamasında zorluklar ve dirençler ile karşılaşmak muhtemeldir. Askeri araçların zırh çelikleri ile donatımı esnasında bu dirençleri en az seviyeye indirmek, imalat kolaylığı sağlamanın yanında üretim hızına doğrudan etki etmektedir. Bu yüzden imalat esnasındaki dirençler en az düzeye indirilmelidir. İmalat esnasında zırh çeliklerinin kullanıldığı en uygun metalürjik durumlar Tablo 4.5'te verilmiştir. Orta karbonlu çelik tercih edilmesiyle birlikte istenilen mekanik özellikler (sertlik ve mukavemet) elde edilebilir. Kaynaklanabilirlik özelliğini doğrudan etkileyen karbon elementi, kaynaklı imalat için sınırlandırılmıştır (Atapek, 2011).

Tablo 4.5 Zırh çelikleri kullanılan imalatlarda istenilen metalürjik özellikler (Atapek, 2011)

	İmalat İşlemleri			
	Isıl Kesme	Kaynak	Talaşlı İmalat	Şekillendirme
İstenilen Metalürjik Özellikler	-Düşük karbon eşdeğeri - Sınırlı segregasyon -Düşük hidrojen miktarı -Düşük kalıntı gerilme	-Düşük karbon eşdeğeri -Düşük hidrojen miktarı -Düşük kalıntı gerilme	-Yüksek olmayan sertlik	-Yüksek süneklik

Zırh çeliklerinin balistik performansının yüksek olması malzemeden beklentiler arasında önemli bir yerdedir. Zırh çeliğinin amacını gerçekleştirmesi için çeliğin tehdit unsuru olan merminin kendisini delip geçmesini engellemesi ve aynı zamanda

bütünlüğünün korunması, yani parçalanmaması gerekmektedir. Yüksek olmayan sertlik değerlerinde zırh çeliği levhaları merminin penetrasyonuna engel olamayıp levhayı delip geçmesine olanak tanımakla birlikte, koruma amacını gerçekleştirememektedir. Yüksek sertlik değerlerinde mermilerin penetrasyonunu engellemede başarılı olma ihtimali yüksek olmasına karşılık gevrek kırılmalar sonucu levhanın bütünlüğünü koruyamama olasılığı da bulunmaktadır. 600 HV üzeri yüksek sertlik değerleri levhaları kırılğan yapabileceğinden dolayı mermilerin darbeleri ile birlikte gevrek kırılmalar meydana gelebilir. Bu yüzden, zırh çeliklerinde sertlik düzeyleri ve tokluk değerlerinin optimum düzeyde belirlenmesi ve uygulanması gerekmektedir. Zırh çeliğinin üretiminde, mekanik özelliklerden olan sertlik ve tokluk değerlerine göre kimyasal kompozisyon ve ısı işleme uygulamalarının iyi tasarlanması çok önemlidir. Çünkü, zırh çeliğinin balistik performansını belirleyen en önemli özellikler sertlik ve tokluk özellikleridir (Atapek, 2011).

Zırh çelikleri ile donatılmış zırhlı araçların sürekli engebeli, dağlık ve zorlu arazi şartlarında görevlendirilebileceği ve tehdit oluşturan mermilerin de darbeleri göz önüne alındığında özellikle zırh çeliklerinin kaynak bölgesi sürekli yüke maruz kalacaktır. Bu durumda kaynaklı bölgelerde yorulmalar meydana gelmesi ve deformasyonlar oluşması olası durumlardandır. Yüksek sertlikteki (>500 HB) zırh çeliklerinde gerilmeli korozyon oluşabilmektedir. Gerilimli bölgeler, korozif ortamda bulunmaları halinde korozyon oluşumu gerçekleşir. Bu yüzden kaynak bölgelerinin yorulma dirençlerinin yüksek olması gerekir. Zırhlı aracın bütünlüğünün korunması açısından yorulma direncinin yüksek olması önemlidir (Atapek, 2011).

5. ZIRH ÇELİKLERİNİN KAYNAĞI

Zırhlı araçlarda korunmanın gerekli olduğu yerlerde güçlendirilmiş çelik sacların kullanılması gerekmektedir. Güçlendirilmiş çelik sacların tercih edilmesinin en büyük nedenleri arasında çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertlik gibi mekanik özelliklerin yüksek olmasıdır. Yüksek mekanik özelliklere ve yüksek mukavemete sahip olan zırh çeliklerinde plastik şekil değiştirme işlemi ise oldukça zordur. Şekil değiştirme esnasında zırh çeliğinde bükme çizgisi boyunca çatlamlar meydana gelebilir.

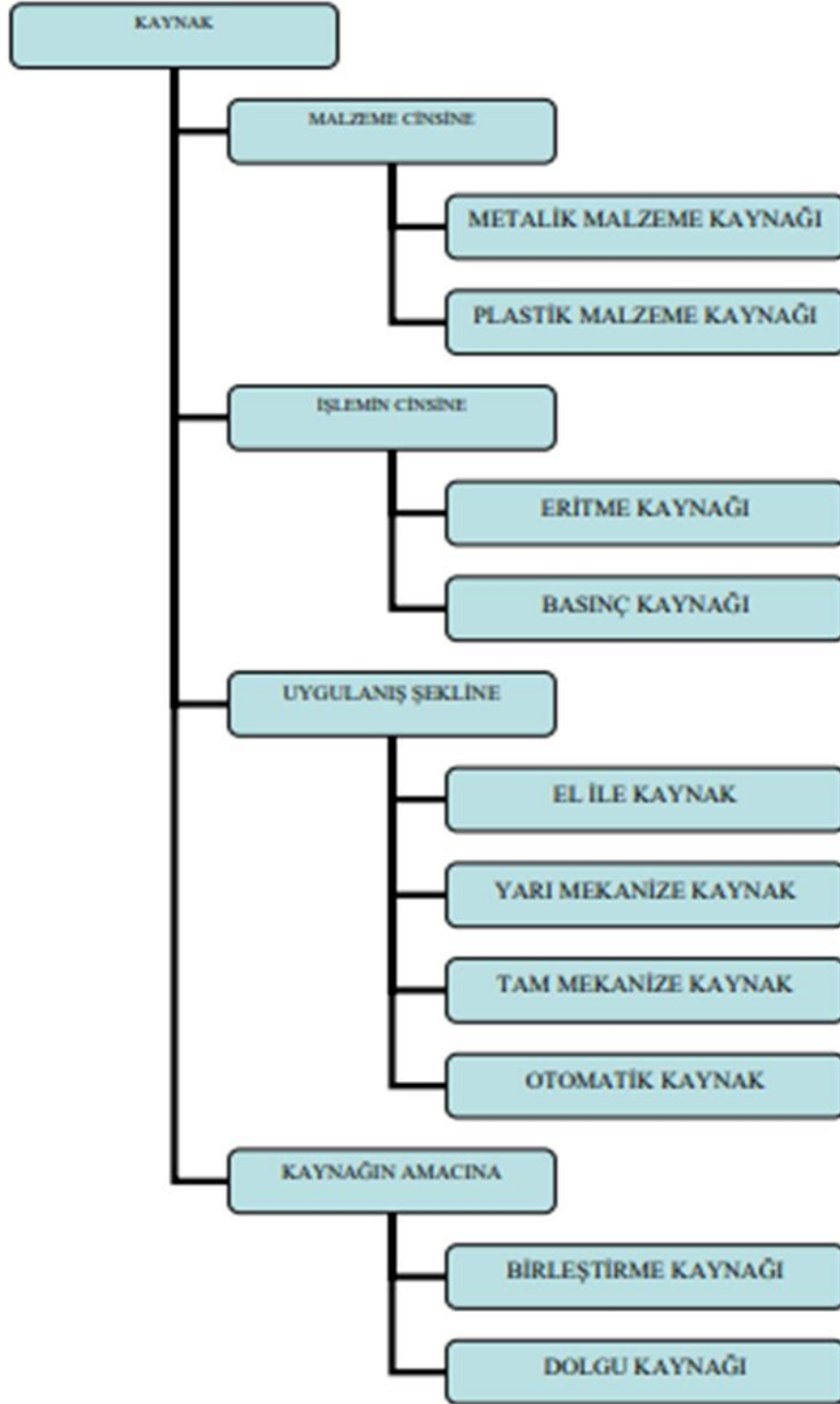
Zırh çeliklerinin yüksek mekanik özelliklere ve mukavemete sahip olmasından dolayı şekillendirme işlemi esnasında yüksek kuvvet uygulanması gerektiği gibi plastik şekil değiştirme kabiliyetinin zayıf olmasından ötürü zırh çeliklerinin istenilen boyut ve geometriye getirilebilmesinin en uygun yöntemlerinden biri kaynak işlemidir.

5.1 Kaynak

Birleştirme teknikleri iki farklı başlıktan meydana gelmektedir. Sökülebilen ve sökilemeyen bağlantılar, birleştirme tekniklerini oluşturmaktadır. Sökülebilen bağlantıları oluşturan bileşenler pim, vida ve kama gibi parçalar, sökilemeyen bağlantıları oluşturan bileşenler ise kaynak, perçin ve lehim gibi elemanlardan oluşmaktadır. Boyutsal ve geometrik olarak işlenmesi ve dökülmesi zor olan malzemelerin birleştirilmesi için endüstride yaygın kullanım alanına sahip, en etkili yöntem kaynaktır (Arık, 2018).

Kaynak işlemi, aynı cinsteki metalik veya termoplastik malzemelerin ısı ve/veya basınç veya her ikisinin de kullanıldığı, aynısının veya benzeri bir ilave malzemenin kullanıldığı veya kullanılmadığı, kullanılan malzemenin türüne göre ismini alan (plastik veya metal) birleştirme türüdür. Kaynak işlemi, yapılan malzemenin cinsine göre (metalik veya plastik malzeme kaynağı), kaynak yapılması esnasındaki uygulamaya göre (el ile kaynak, yarı mekanize kaynak, tam mekanize kaynak ve otomatik kaynak) ve kaynağın yapılma amacına göre (ergitme ve basınç kaynağı)

farklı türlere ayrılmaktadır. Kaynak işleminin bu sınıflandırması şematik olarak Şekil 5.1’de gösterilmektedir (Anık, 1991).



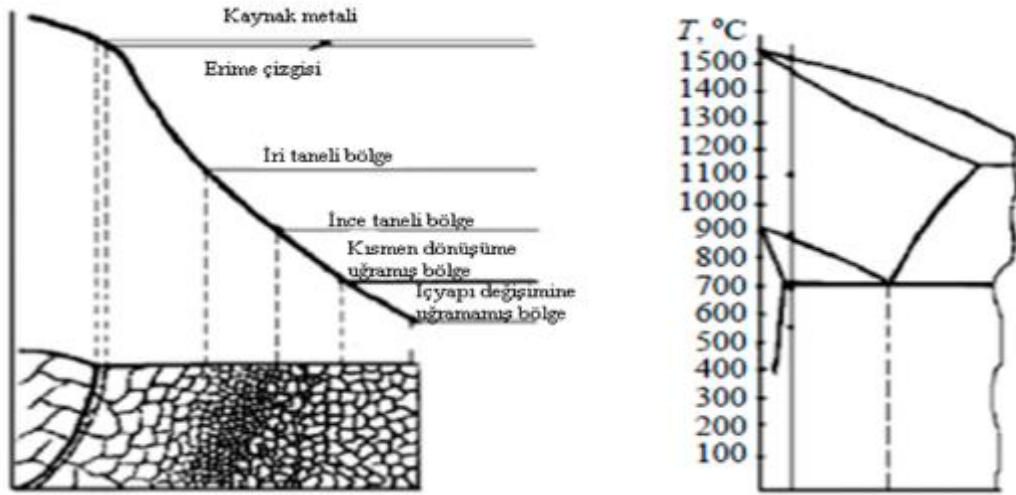
Şekil 5.1 Kaynak işleminin detaylı şeması (Bayar, 2019)

5.2 Kaynak Bölgesi

Kaynak işlemi sırasında kaynak metali ile iş parçasının ergime oluşum sınırından başlayıp ısıdan etkilenmeyen iş parçası bölgesine kadar olan bölge ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak adlandırılmaktadır. Kaynak sırasında ITAB, hızlıca ısınmakta ve ön tavlama sıcaklığı, kaynak işleminde verilen enerji ve iş parçasının kalınlığına bağlı olarak hızlıca soğumaktadır. Bu ısı değişimi esnasında çeliğin bileşimine bağlı olarak kritik soğuma hızının aşılması durumunda metalürjik yapıda değişimler gerçekleşmesi mümkündür. İş parçasında iç yapının değişmesi ile birlikte mekanik özelliklerde değişim olup, sertlikte artış meydana gelmektedir. Sertlik artışı ile birlikte kırılabilirlik artmakta ve kaynak hatalarına sebebiyet vermektedir. Bundan dolayı kaynak işlemi ile imal edilmiş malzemelerin en kritik bölgesi kaynak bölgeleridir (Ertürk, 2017).

Çelik malzemelerin kaynak işleminde, kaynak bölgesinde oluşan farklılıklar tanelerin ısı ile birlikte değişiminden dolayı oluşan boyut farklılıklarına göre değişim göstermekle birlikte kaynak bölgesini oluşturan alanlar aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır (Ertürk, 2017):

- Kaynak Metali
- Ergime Çizgisi
- İri Taneli Bölge
- İnce Taneli Bölge
- Kısmen Dönüşüme Uğramış Bölge
- İçyapı Değişimine Uğramamış Bölge

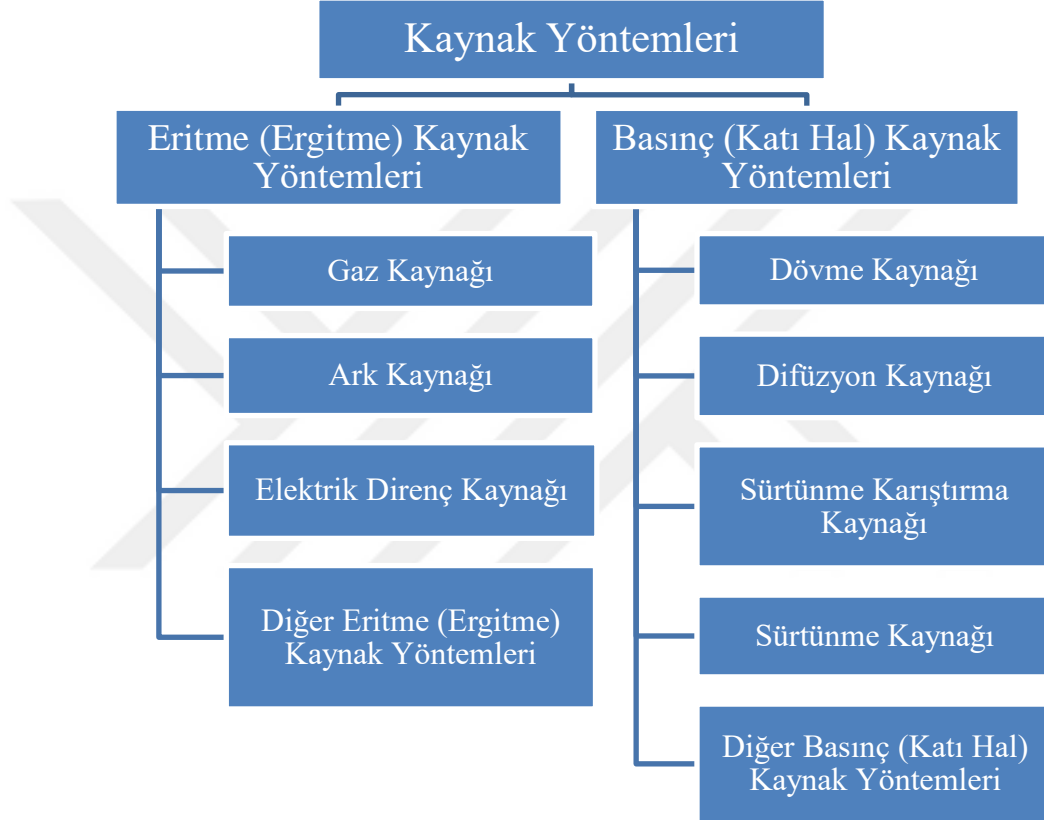


Şekil 5.2 Kaynak bölgesi (Suleimanov vd., 2018)

Kaynak metali, 1400 °C civarındaki sıcaklığın etkisi ile meydana gelen ve döküm özelliği gösteren bölgedir. Bu bölgede oluşan taneler ergime çizgisinden itibaren sütunsal olarak kaynak metali bölgesinin merkezine doğru yönelim göstermektedir. Ergime çizgisi ise kaynak metali ile ana malzeme arasında bulunan ve ana malzeme tarafından hızlı bir şekilde soğuması ile genellikle martenzitik bölge oluşumunun meydana geldiği bölgedir. Martenzitin oluşması ile birlikte gevrek bir bölge oluşur ve kırılma üst düzeyine ulaşır. İri taneli bölgede, sıcaklığın etkisiyle 725 °C ile 850 °C sıcaklıklar arasında perlitin östenit ve ferrite dönüşümü gerçekleşmektedir. Sıcaklıkların 1100 °C değerlere çıkması ile birlikte ince tane yapılarında östenitler meydana gelmektedir. 1100 °C ile 1300 °C arasında ise ince taneli östenitin yeniden kristalleşmesi ile birlikte tane büyümesi meydana gelmektedir. Tane büyümesinin ardından hızlı soğuma meydana gelmekle birlikte martenzitik yapı oluşmasına olanak sağlanır ve kırılmalıkta artış meydana gelir. Tane büyümesi ile birlikte mekanik özelliklerde değişim olmakta ve bu değişim malzemenin dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Kısmen dönüşüme uğramış bölgede, ısının etkisi ile östenitik yapı meydana gelmekte, fakat sıcaklığın düşük olmasından dolayı tane boyutlarında pek değişim oluşmamaktadır. Tane boyutlarının değişime uğramaması sebebiyle mekanik özelliklerde pek bir değişim gözlemlenmemektedir. İçyapı değişimine uğramayan bölgede ise kaynak işlemi esnasında kaynak metaline olan mesafeden dolayı mikroyapıyı etkileyecek düzeyde ısı ulaşamamasından dolayı değişim meydana gelmemektedir (Arık, 2018).

5.3 Kaynak Yöntemleri

İşlem cinsine göre değerlendirilen ergitme ve basınç (katı hal) kaynakları, uygulamaya göre farklılık göstermektedir. Kaynak işlemi esnasında kaynak işlemi yapılacak malzemeye uygulanan ısı ve basıncın etkisiyle birbirinden ayrılmakta ve kaynak yöntemleri Şekil 5.3’de verildiği gibi bu iki başlık altında toplanmaktadır.



Şekil 5.3 Kaynak yöntemlerinin sınıflandırması (Çam, 2020)

5.3.1 Ergitme Kaynağı

Ergitme kaynağı, üretilen ısının etkisiyle malzemenin bölgesel olarak ergitilmesiyle yapılan yöntemleri kapsamaktadır (Anık vd., 1991). Ergitilen bölgeye ek olarak dolgu metali eklenerek veya eklenmeksizin yapılan birleştirme işlemlerinde en çok kullanılan kaynak yöntemlerindedir. Ergitme kaynağı; gaz kaynağı yöntemleri, ark kaynağı yöntemleri, direnç kaynağı, elektron kaynağı, lazer kaynağı ve termit kaynağı gibi kaynak yöntemlerini kapsamaktadır (Çam, 2020).

5.3.2 Katı Hal Kaynağı

Katı hal kaynağı, basınç veya basınç ve ısının etkisi ile gerçekleştirilen birleştirme yöntemlerini kapsamaktadır. Basıncın etkin olarak uygulandığı katı hal kaynak yöntemlerinde, ısı uygulanması da mümkündür. Kaynak işlemi esnasında uygulanan ısı, malzemenin ergime sıcaklığının altında bir değerde bulunmakta ve malzemede ergime durumu gözlemlenmemektedir. Katı hal kaynak yöntemlerinde, genel olarak dolgu metali kullanılmamaktadır. Katı hal kaynağı; difüzyon kaynağı, sürtünme kaynağı, ultrasonik kaynağı, dövme(demirci) kaynağı, sürtünme karıştırma kaynağı, soğuk kaynak, indüksiyon kaynağı, sıcak basınç kaynağı, hadde kaynağı, patlatmalı kaynak, hibrit katı hal kaynağı ve manyetik alan kaynağı gibi yöntemleri içermektedir (Çam, 2020).

Bu tez çalışmasında ergitme kaynağı başlığı altında bulunan ark kaynak yöntemlerinden olan örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağı ve gazaltı ark kaynağı yöntemleri uygulanmış ve bu yöntemler üzerinde durulmuştur.

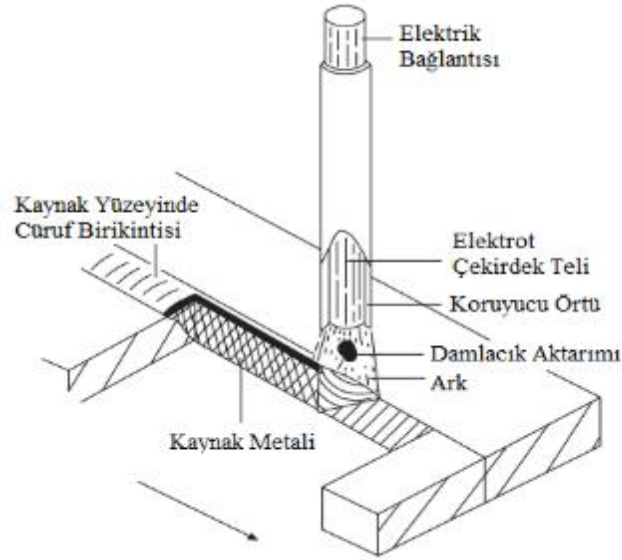
5.4 Örtülü Elektrod ile Elektrik Ark Kaynağı

Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağı, örtülü elektrodlar yardımı ile gerçekleştirilen ve metallerin birleştirilmesinde uygulanan ergitme kaynaklarından biridir. Ergitme işlemi esnasında elektrod ile iş parçası arasında ark oluşur. Oluşan ark ve arkı oluşturan elektrik akımının yardımı ile yüksek ısı meydana gelir. Yüksek ısının etkisi ile kaynak işlemi yapılacak malzeme ile birlikte elektrik akımının üzerinden geçtiği ve aynı zamanda dolgu metali olan elektrod eriyerek karışım oluşturur. Karışımda soğuma ve katılaşma meydana gelmesi ile birlikte metalürjik yönden bakıldığında kuvvetli bir bağ oluşur. Kaynak metali katılaşma esnasında havada bulunan azot ve oksijen gibi elementler ile tepkime gerçekleştirmeye çalışır. Bunu engellemek için elektrodun etrafında bulunan örtü, kaynak metalinin üzerinde cüruf oluşturarak kaynak metalinin hava ile temasını kesip havadaki elementler ile etkileşimini en az seviyeye indirmektedir. Bu oluşum “ark koruması” olarak adlandırılmakla birlikte kaynakta hata oluşumunu en az seviyeye çekmeyi amaçlamaktadır (Gavas vd., 2013).

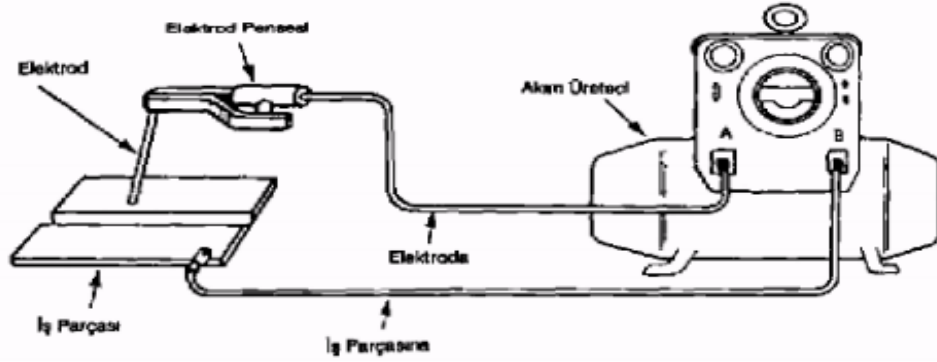
Kaynak işleminde uygulanan kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etki ettiği gibi kaynak işleminde kullanılacak elektrodun seçimi de mekanik özelliklere doğrudan etki etmektedir. Elektrodun örtü kısmına istenilen elementler eklenebilmektedir. Eklenen bu elementler, kaynak işlemi esnasında kaynak metalinde alaşımlandırma elementleri halinde kullanılarak kaynak metalinin mekanik özelliklerinde etkili olmakta ve istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesine yardımcı olmaktadır (Anık vd., 1991).

5.4.1 Örtülü Elektrodla Elektrik Ark Kaynağının Tarihi

Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı, 1885 yılında karbon elektrod kullanılması ile birlikte elektrod ve iş parçası arasında elektrik yardımı ile ark oluşturulan ve ilave tel kullanılan Bernardos yöntemi ile başlamıştır. 1889 yılına gelindiğinde Zenerer, bu kaynak yöntemini biraz daha geliştirerek elektrik ark oluşumunu iki karbon elektrod arasında gerçekleştirmiş ve arkın iş parçasına doğru yönlenmesini sağlamak amacıyla yöntemde manyetik bobin ve ilave tel kullanmıştır. Yine aynı sene içerisinde Slavianoff, günümüzde kullanılan elektrik ark kaynağı yönteminin temellerini atmış ve ergimeyen karbon elektrodların yerine kaynak bölgesini dolduran ve iş parçası ile arasında ark oluşumunu sağlayan örtüsüz elektrod kullanmıştır. Slavianoff kaynak yönteminde, havada bulunan oksijen ve azot gazlarının kaynak bölgesini olumsuz etkilediği ve kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinde düşüş meydana geldiğini gözlemlemiştir. Bu yüzden İsveçli Oscar Kjelberg 1904 yılında ergiyen elektrodun etrafını kaplamış ve kaynak esnasında kaynak bölgesinin üzerini kapatarak hava ile temasını kesmeyi amaçlamış ve başarmıştır (Anık, 1991). Bu yöntem ile birlikte örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağı yönteminin önemi anlaşılmış ve kaynak yöntemleri sınıflandırmasında üst sıralarda yer almıştır.



Şekil 5.4 Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağının çalışma prensibi (Norrish, 1992)



Şekil 5.5 Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynak yönteminin donanımları (Anık vd., 1991)

Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağının avantajları şunlardır (Doğrugiden, 2019);

- Basit bir kaynak yöntemidir.
- Maliyeti düşük ve ekipman taşıma işlemi kolaydır.
- Elektrod çeşitliliğinin çok olması sebebi ile çoğu malzemelerde kullanılabilir.
- Çoğu metal ve alaşımlarının kaynağında kullanılabilir.
- Çeşitli kaynak pozisyonlarında kaliteli kaynak dikişleri elde edilebilir.
- Sert kaplamalarda bile iyi kaynak işlemleri elde edilebilir.
- Zor konumlarda yapılması gereken kaynak işlemlerini başarı ile tamamlayabilir.

Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağının dezavantajları şunlardır (Doğrugiden, 2019);

- Kırılgan akı kaplaması ve elektrodların boylarının sınırlı olması sebebiyle otomasyon için uygun değildir.
- Elektrodun bitme durumunda diğer elektrod ile devam edilmesi halinde yeni elektrodun başladığı yer düzgün bir şekilde temizlenmezse kaynakta nüfuziyet problemi oluşabilir.
- Bu yöntemde elektrod türü çubuktur. MIG/MAG kaynak yöntemine göre daha yavaş bir kaynak yöntemidir.

5.5 Gazaltı Ark Kaynağı

Gazaltı ark kaynağı yöntemi, ergiyen ve ergimeyen elektrod olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Ergimeyen elektrod ile yapılan kaynak işlemi TIG (Tungsten Inert Gas) kaynağı olarak adlandırılmaktadır. Tungsten elektrod ve elektrik akımının yardımı ile ergimiş haldeki kaynak banyosuna ilave metal ergitilerek yapılan kaynak metodudur. Ergiyen elektrod ile ark kaynağı ise iki metal iş parçası ile ilave tel olan elektrodun arasında, elektrodun üzerinden geçen elektrik akımının etkisi ile oluşan ark ile yapılan ve ilave telin kaynak havuzunu ergiyerek doldurduğu kaynak yöntemlerinden biridir. (Pan vd., 2018). Bu yöntemde, ilave tel olarak çıplak tel kullanılmakla birlikte, çıplak telin özel besleme teçhizatı ile kaynak bölgesine sabit hızla sürekli olarak tel beslemesi yapılmaktadır. Kaynak metalini atmosferin olumsuz etkilerinden korumak için gaz veya gaz karışımları kullanılmaktadır (Eryürek, 2007). Ergiyen elektrodla yapılan gazaltı ark kaynağı, kaynak işlemi esnasında kaynak metalini korumak için kullanılan gazın türüne bağlı olarak MIG (Metal Inert Gas) ve MAG (Metal Active Gas) olarak ikiye ayrılmaktadır.

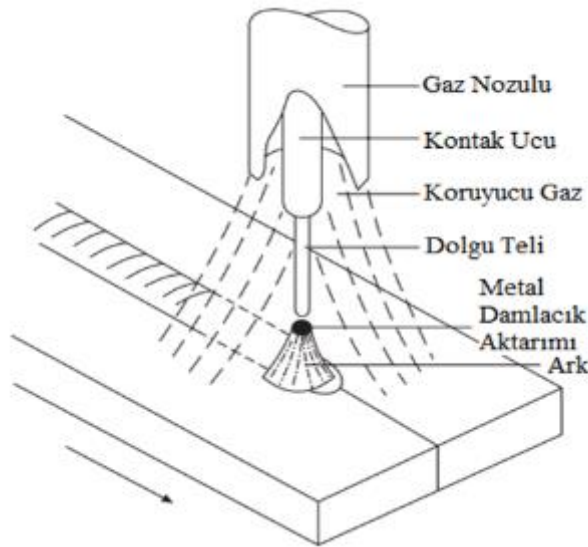
5.5.1 MIG ve MAG Kaynağı

Koruyucu gaz ortamında ergiyen elektrodla yapılan gazaltı ark kaynağı yöntemi, MIG ve MAG olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. MIG ve MAG kaynak yöntemleri prensip olarak aynı fakat koruyucu gazın farklılaşmasından dolayı farklılık göstermektedir. MIG kaynak yönteminde sadece argon, helyum ve bu inert gazların karışımları gibi gazlar kullanılırken, MAG kaynak yönteminde ise aktif gaz olan karbondioksit veya karbondioksit ile inert gazların karışımları kullanılabilir (Anık ve Vural, 1996).

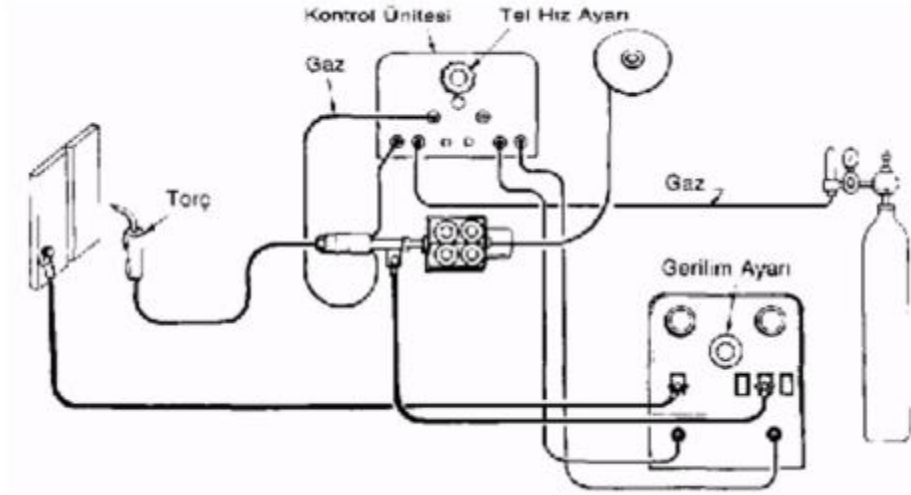
MIG kaynağı, ilk defa S.I.G.M.A (Shield Inert Gas Metal Arc) adıyla 1947 yılında endüstride kullanılmaya başlanmıştır. MIG kaynağında kullanılan gazın maliyetinin yüksek oluşundan dolayı 1952 yılında Rusya’da MIG kaynağının koruyucu gaz çeşitliliğine karbondioksit eklenerek günümüzde literatüre MAG kaynağı olarak geçen kaynak yöntemi de dahil olmuştur (Anık ve Vural, 1996).

5.5.2 Gazaltı Ark Kaynağının Tarihi

Ergiyik halde bulunan kaynak banyosunu atmosferin olumsuz etkilerinden koruma fikri geçmiş yıllara dayanır. İlk kez 1926 yılında Alexander usulü olarak adlandırılan ve metanol gazı kullanarak koruma işlemi gerçekleştirilmiş ve 1928’de Arcogen yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, koruyucu gaz olarak oksijen ve elektrod ilave edilmiş olup oksijenin yanması ile oluşan alev kaynak banyosunun korunmasında kullanılmıştır. Fakat bu iki uygulama sonradan anlaşılan olumsuz etkileri nedeniyle çok tercih edilmemiştir. Yine 1926 yılında koruyucu görevini üstlenecek olan hidrojen gazı kullanılmıştır. Kaynak banyosunu inert gaz ile koruma fikri ise 1930 yılında oluşmuş ve 1940 senesinde ilk defa uçakların magnezyum ve alaşımlarının kaynak işlemlerinde kullanılmıştır. Önce helyum gazı ve ardından argon gazı hafif metal ve alaşımlarının kaynak işlemlerinde kullanılmıştır. 1952 yılında inert gazın dışında karbondioksit gazı kullanılarak aktif gaz kullanımına başlanmıştır (Anık ve Vural, 1996).



Şekil 5.6 Gaz metal ark kaynağı yönteminin çalışma prensibi (Norrish, 1992)



Şekil 5.7 Gaz metal ark kaynağı yönteminin donanımları (Tülbentçi, 1990)

Gazaltı ark kaynağının avantajları şunlardır (Doğrugiden, 2019);

- Kaynak bölgesi atmosferin zararlı etkilerinden korunur.
- Cüruf oluşumu olmaz.
- Hızlı kaynak işlemine imkân tanır.
- Düşük ısı etkisi vardır.
- Kaynak işleminde tüm kaynak pozisyonlarında kullanılabilir.
- Kullanım avantajlarının sahaya uygunluğu sebebiyle en çok kullanılan kaynak yöntemlerinden biridir.

Gazaltı ark kaynağının dezavantajları şunlardır (Doğrugiden, 2019);

- Kaynak banyosunu koruyan gaz olduğu için rüzgârlı ve açık havada kullanılamaz.
- Kaynak esnasında kaynağı etkileyecek parametreleri kontrol etmek zordur ve deneyim gerektirir.
- Kaynak işlemi öncesi kaynak yüzeyinin kir, pas ve yağ gibi istenmeyen maddelerden arındırılması gerekmektedir.
- Parlak bir kaynak alevi oluşturduğu için gözü koruyan teçhizatlar uygun bir şekilde seçilmeli ve gözde hasar bırakmamasına dikkat edilmelidir.

5.6 Zırh Çeliklerinde Kullanılan Kaynak Yöntemleri

Zırh çeliklerinin kaynak işleminde kullanılan kaynak yöntemleri; örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı, gazaltı ark kaynağı (TIG, MIG, MAG), toz altı ark kaynağı yöntemleridir. Geçmişten gelen ve içlerinde en çok kullanımı mevcut olan yöntem örtülü elektrodla elektrik ark kaynağıdır. Bu kaynak yöntemi kullanışlı olmasının yanında, elektrodta bulunabilecek nemden dolayı hidrojenin kaynak bölgesine nüfuz etmesi ve sonrasındaki soğuma işlemi neticesinde zırh çeliklerinde çatlamalara yol açabilmektedir. Bu hususta çok dikkat edilmelidir. Elektrodların kurutulması tamamen nemden arındırılması gerekmektedir. Gazaltı kaynağı ise dışında kaynak banyosunu koruyacak bir örtüye sahip olmadığı için örtüden gelebilecek hidrojen bulunmamaktadır. Fakat gazaltı tel elektrodlarında tercih yaparken hidrojen oranı düşük tel elektrodlar tercih edilmelidir. Kaynak işleminin doğrusal ve uzun boyutlarda olması durumunda toz altı ark kaynağı tercih edilebilmektedir. Bu yöntem, büyük et kalınlığına sahip zırh çeliklerinin kaynak işlemini daha hızlı yapmamıza imkân tanımaktadır. Fakat dikkat edilmesi gereken husus kaynak işleminde kullanılan toz seçimidir. Tozun hidrojen oranına ve tozda bulunabilecek neme dikkat edilmelidir (Yakut, 2015).

5.7 Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti

Zırh çeliklerinin üretimi aşamasında çeşitli ısıl işlemler uygulanmaktadır. Bu ısıl işlemler ile birlikte zırh çeliğinden, istenilen mekanik özelliklere sahip olması beklenmektedir. Bu mekanik özellikler zırh çeliklerinin kullanım alanlarına, yerlerine ve amaçlarına göre değişmektedir. Kinetik enerjili mermilerin enerjilerini sönmölemek üzere tasarlanan ve sertlikleri her bölgelerinde aynı olan homojen zırh çelikleri ile mermileri durdurmak üzere tasarlanan yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış homojen olmayan zırh çelikleri de bulunmaktadır. Homojen olmayan zırh çeliklerinin kaynağı için daha fazla dikkat edilmeli ve her basamak planlı ve doğru bir biçimde uygulanmalıdır (Örenler, 2018).

5.7.1 Kaynak Kabiliyetine Etki Eden Faktörler

Kaynak kabiliyeti, kaynak işlemi gerçekleştirilecek iş parçalarının şekli, kalınlığı, yüzeyde bulunabilecek istenmeyen yabancı madde (kir, yağ ve pas) ve malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri gibi parametrelere bağlıdır (Çam, 2020). Zırh çelikleri ise yapısı gereği düşük alaşım ve yüksek mukavemetli çelikler sınıfının bir üyesi olmakla birlikte yüksek mukavemet değerleri ısıtma işlemleri ile elde edilebildiğinden karbon elementi zırh çelikleri için çok değerlidir. Yüksek sertlik değerlerine sahip zırh çeliklerinin standardı olan MIL-A-46100 standardına göre kaynaklanabilirliğe etkisi olan karbon eşdeğeri (CE) hesaplaması Denklem 5.1’de verilmiştir (Örenler, 2018).

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (5.1)$$

Ön ısıtma işlemi, kaynak dikişi etrafındaki sıcaklık değişimini yumuşatarak, kaynak dikişinde yavaş bir soğuma sağlayarak sertleşmeleri, iç gerilim oluşumunu ve çarpılmayı önlemek amacıyla uygulanmaktadır. Ferrit, beynit ve perlit gibi iç yapı değişimine olanak tanır. Çok pasolu kaynak uygulaması gerçekleşecek ise pasolar arası sıcaklık uygulaması gerekebilmektedir. Bu ısıtma işlemi ise kaynak bölgesinden hidrojeni uzaklaştırarak hidrojen çatlağı riskini en aza indirmektedir. Zırh çeliklerinde ısıtma işlem uygulamalarına çok dikkat edilmelidir. Zırh çeliklerinin yapısı ısıdan çok etkilenmekle birlikte mekanik özelliklerde düşüşler meydana gelebilir (Örenler, 2018).

Kaynak kabiliyetini etkileyen en önemli faktörlerden biri de zırh çeliğinin et kalınlığıdır. Malzemenin ısı kaybı et kalınlığına bağlı olduğundan dolayı kaynak işleminde ısı kaybının engellenmesi gerekmektedir. Isı kaybını önlemek için ön ısıtma işlemi uygulanmalı ve ön ısıtma sıcaklığı Daniel Seferian’ın ön tavlama sıcaklığı denkleminde göre belirlenmelidir. Ön ısıtma ile malzeme et kalınlığı arasındaki bağıntı Denklem 5.2’de verilmiştir (Örenler, 2018).

$$T = 350\sqrt{(CE(1 + 0,005d) - 0,25)} \quad (5.2)$$

d : et kalınlığı

Zırh çeliklerinin kaynağının en önemli parametrelerinden biri ısı girdisidir. Kaynak işlemi esnasında ısı girdisi meydana gelmektedir. Bu ısı girdisi kaynak işlemi için gerekli olsa da ısıl işlem uygulanmış zırh çelikleri için fazla ısı girdisi uygulamak mekanik özellikleri düşürebilmektedir. Bu yüzden kaynak işleminin uygulanmasında ısı girdisine çok dikkat edilmelidir. Denklem 5.3'teki ısı girdisi denklemindeki parametreler (akım ve voltaj değerleri) en az düzeye indirilmeli, kaynak hızı mümkün olduğunca yüksek tutulmalıdır (Örenler, 2018).

$$H = \frac{60EI}{1000S} \quad (5.3)$$

H : Isı girdisi (kj/inç veya kj/mm)

I : Akım (Amper)

E : Ark Voltajı (Volt)

S : Kaynak Hızı (inç/dakika ve mm/dakika)

6. LİTERATÜR TARAMASI

Zırhlı araçlar ve gereçler daima dış tehditlere karşı büyük bir önem arz etmektedir. Bu araçlar ve gereçler genellikle karmaşık şekillerde karşımıza çıkmaktadır. Zırh çeliklerinin şekillendirilebilirlik özelliğinin çok düşük olması sebebi ile bu malzemelerden karmaşık şekilli araç ve gereçlerin üretilebilmesi çok zordur. Bu yüzden kaynak zırh çeliklerinin birleştirme yöntemleri arasında önemli bir birleştirme tekniğidir.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında zırh çeliklerinin kaynağında daima en iyi birleştirme işlemi hedeflenmiştir. Bu hedefe ulaşılabilme, kaynaktaki en iyi parametreleri belirlemek ve en iyi mekanik özellikleri tespit etmek için sürekli çalışmalarda bulunulmuştur.

Kara (2012), tarafından yapılan çalışmada, zırh çelikleri arasında bulunan Ramor 500 zırh çeliği MIG kaynak yöntemi kullanılarak 307Si kaynak teli ile birlikte birleştirilmiş ve birleştirmelerin performansı incelenmiştir. Kaynak parametreleri olarak koruyucu gaz ve kaynak ağzı geometrisi belirlenmiştir. Kaynak ağzı geometrisinde V, X ve Y geometrileri kullanılmış olup, koruyucu gaz olarak Argon + %5 CO₂, Argon + %10 CO₂ ve Argon + %15 CO₂ koruyucu gazları ile birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi öncesinde herhangi bir ısıl işlem uygulanmamış olup kaynaklı birleştirmelerde soğuk ve sıcak çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Bu çalışmada, literatürdeki diğer çalışmalarda olduğu gibi kaynak metalinin sertliğinin ana metale göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi, ilave metalin mekanik özelliklerinin ana metale göre düşük olması ve iri taneli bölgelerde martenzit oluşumu ve karbür çökmesi meydana gelmesidir. Kaynak telinde bulunan Nikel elementinin karbür oluşmasını engelleyici etkisinden dolayı kaynak metalinin sertliğinin düşük çıkmıştır.

Yüksel (2019), tarafından yapılan çalışmada, ARMOX 500T zırh çelik çifti ESAB OK Autorod 16,95 kaynak teli kullanılarak farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilmiş ve kaynağın metalürjik ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan kaynak yöntemleri; HPAK (Hibrit Plazma Ark Kaynağı), GMAK (Gaz Metal Ark

Kaynağı) ve CMT (Soğuk Metal Transfer Kaynağı) ark kaynak yöntemleri ile optimum kaynak yöntemi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, kaynak bölgesinde makro ve mikro çatlaklara rastlanılmamıştır. Kaynak bölgesinde sıcak çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Bunun sebebi zırh çeliklerinde sürekli gözlemlenen sıcak çatlak oluşumunu engelleyen faktör olarak ilave telde yüksek oranda mangan elementinin oluşudur. HPAK ve GMAK kaynak yöntemlerinin CMT kaynak yöntemine göre daha üstün özellikleri olduğu çalışmada belirlenmiştir.

Kurt, vd.'in (2016) yaptıkları çalışmada, MIL-A 46100 zırh çeliği MIG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmiş ve kaynak ağzı geometrisinin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Kaynak teli olarak 307Si östenitik paslanmaz çelik tel kullanılmıştır. Kaynak işlemi %97 Argon + %3 CO₂ koruyucu gaz ortamında, 1 mm çapındaki 307Si kaynak teli ile V kaynak ağzı geometrisinde 6 farklı açılarda (30°, 36°, 42°, 48°, 54° ve 60°) kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. 3 pasolu şekilde yapılan bu kaynakta 150 A akım gücü, 24,5 V gerilim ve 16 cm/dk ilerleme hızı değerleri tercih edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına bakıldığında, en yüksek dayanım değerinin 48° kaynak açısında ve V kaynak ağzı geometrisinde kaynatılan zırh çeliklerinde 773,8 MPa olarak tespit edilmiştir. Kaynak metalindeki sertlik değerleri tüm kaynaklarda ana metale göre en düşük çıkmıştır. Sertlik açısından ana metale en yakın kaynak metal sertliği ise 48° kaynak ağız açısı ile yapılan kaynakta meydana geldiğinden optimum kaynak parametresi olarak bu ağız açısı belirlenmiştir.

Günen, vd.'in (2019), yaptıkları çalışmada, farklı ark kaynaklarının metalürjik ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, Ramor 500 zırh çeliğinin metal transfer ark kaynağı (CMT), gaz metal ark kaynağı (GMAW) ve hibrit plazma ark kaynağı (HPAW) ile kaynaklanabilirliği incelenmiştir. Kaynak işlemlerinde 1,2 mm kalınlığında ESAB Ok AutoRod 16,95 (307 Si) östenitik paslanmaz çelik ilave tel kullanılmıştır. Kaynak dikişinde çatlak, gözenek ve sıkışmış gaz boşluğu gibi kaynak hataları gözlemlenmemiştir. Tüm kaynak işleminde, kaynak metali ve ITAB sertliğinin, ana metalin sertliğinden daha fazla olduğu belirlenmiştir. Çekme dayanımlarına bakıldığında, ana metalin dayanımına en yakın değeri HPAW ark kaynağı vermiştir. İkinci en yüksek dayanım GMAW ark kaynağı ve en düşük dayanım ise CMT ark kaynağı olarak belirlenmiştir. CMT, GMAW ve HPAW ark

kaynak yöntemlerinin çekme dayanımları ana metale göre sırasıyla %45, %50 ve %65 olarak bildirilmiştir. CMT ile işlem yapılan numuneler kaynak metalinden kırılırken, diğer kaynak türlerinde ise kırılma ısıdan etkilenmiş bölgenin iri taneli bölgesinden meydana gelmiştir. Sonuç olarak, çekme dayanımı gerektiren yerlerde HPAW kaynak yöntemi etkili olurken, darbe dayanımının gerekli olduğu yerlerde ise CMT kaynak yönteminin daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Arık (2018), tarafından yapılan çalışmada, MARS 240 (MIL-A 46100) zırh çeliğinin kaynağı incelenmiştir. Kaynak teli olarak östenitik yapıda olan ESEB Ok Autorod 16.95 kaynak teli kullanılmış olup MIG kaynak yöntemi tercih edilmiştir. Kaynak parametrelerinden ilerleme hızının mukavemete etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda, çekme testlerine bakıldığında en dayanıklı kaynaklı numunenin 11,3 mm/sn ilerleme hızına sahip kaynakta gerçekleştiği belirlenmiştir. Numuneler incelendiğinde ITAB bölgesinde tane büyümesi meydana geldiği belirlenmiş olup, bu durumun ısı girdisinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Kaynak hızının düşmesiyle birlikte ısı girdisinin çok olmasından dolayı kaynak hızının yüksek olduğu kaynaklı numunelere göre yumuşak ve sünek olduğu tespit edilmiştir. En optimum kaynağın düşük kaynak hızında (7,3 mm/sn) işlem yapılan numune olduğu belirtilmiş olup sebebi ise uygun yumuşaklık ve süneklik göstermesidir.

Yiğittürk (2016), tarafından yapılan çalışmada, RAMOR 500 zırh çeliği ile AISI 304 paslanmaz çelik, RAMOR 500 zırh çeliği ile RAMOR 500 zırh çeliği ve AISI 304 paslanmaz çelik ile AISI 304 paslanmaz çelik çiftlerinin kaynaklanabilirliği incelenmiştir. Kaynak işlemleri PTA (Plazma Transfer Ark Kaynağı) yöntemi ile yapılmıştır. Kaynak işlemleri esnasında kaynak teli kullanılmamıştır. Kaynak işlemleri yapılırken ilerleme hızı 0,15 m/dk değerinde sabit tutulmuştur. Akım değerleri 80-100-120-140 A akım şiddeti aralığında değişkenlik gösterip argon gazı ortamında en optimum kaynak parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. AISI 304-AISI 304 paslanmaz çeliklerin kaynak işlemine bakıldığında 120-140 A akım şiddetinde en yüksek nüfuziyet tespit edilmiştir. 120 A akım şiddeti standartlara göre en uygun olan akım şiddeti olarak gözlemlenmiştir. Çekme testine bakıldığında ise 120-140 A akım değerlerindeki kaynak işlemine 478-483,3 MPa dayanım elde edilmiştir. RAMOR 500-RAMOR 500 zırh çeliği çiftinin kaynak işlemine bakıldığında en yüksek

nüfuziyet 140 A akım şiddetinde gözlemlenmiş olup çekme testindeki dayanım olarak ana metale en yakın olan değer 1007 MPa olarak gözlemlenmiştir. RAMOR 500-AISI 304 çelik çiftinin kaynağına baktığımızda ise 140 A akım değeri ile yapılan kaynakta en yüksek nüfuziyet tespit edilmiştir. Kaynak işleminden sonra yapılan çekme testinde 140 A akım değerinde kaynatılan çelik çiftinde kopma AISI 304 paslanmaz çelikte meydana gelmiştir. Kaynak metalinin dayanımının AISI 304 paslanmaz çelikten daha fazla olduğunu gözlemlemek mümkündür.

Kaçar ve Emre (2018), yaptıkları çalışmada; ARMOX 500T–ARMOX 500T kaynaklı zırh çeliği çifti ile ARMOX 500T–AISI 304 kaynaklı çelik çiftinin GMAK (Gaz Metal Ark Kaynağı) ile kaynaklanabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada, koruyucu gaz olarak Argon ve kaynak teli olarak 1,2 mm çapında ve AWS A5.9 standardına göre ER307 olarak adlandırılan ilave tel kullanılmıştır. Kaynak ağzı geometrisi olarak 60° ve V şeklinde yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, kaynak işlemi başarılı bir şekilde yapılmış olup kaynakta yüzey çatlaması ve süreksizlik gözlemlenmemiştir. ARMOX 500T–ARMOX 500T kaynaklı zırh çeliği çiftinin kaynağındaki çekme dayanımı 756 MPa ve uzama miktarı %2,5 ve ARMOX 500T–AISI 304 kaynaklı çelik çiftinin çekme dayanımı 700 MPa ve uzama miktarı %12,5 olarak belirlenmiştir. ARMOX 500T çelik çiftinin kaynağındaki çekme testi sonucunda kopmanın, kaynak metaline ile ergime sınırından gevrek kopma şeklinde meydana geldiği gözlemlenirken, ARMOX 500T–AISI 304 çeliklerinin kaynağındaki kopma AISI 304 çeliğinden sünek kopma şeklinde gerçekleşmiştir. Ayrıca üç nokta eğme testine bakıldığında ARMOX 500T zırh çeliği çiftinin kaynağında 90° eğme sonucunda kaynak metalinde çatlaklar gözlemlenmiştir. ARMOX 500T–AISI 304 çelik çiftinin kaynağında ise 180° katlama sonucunda kaynak metalinde herhangi bir çatlak gözlemlenmemiştir. Bu sonuca bakarak, ARMOX 500T–AISI 304 çelik çiftinin şekillendirilebilirliğinin ARMOX 500T çelik çiftine göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Örenler (2018) tarafından yapılan çalışmada, zırh çeliklerinin kaynaklanabilirliği hakkında çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada ARMOX 500T zırh çeliği çiftinin kaynaklanması hedeflenmiştir. X kaynak ağzı geometrisi kullanılan bu yöntemde, koruyucu gaz olarak %82 Argon ve %18 CO₂ tercih edilmiştir. Gaz basıncı ve kök açıklığı sabit tutulan bu çalışmada, Akım şiddeti değerleri ve diğer parametrelerde

değişiklikler yapılarak mekanik testler sonucunda optimum kaynak değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, çekme testine göre kopmalar tüm numunelerde beklenildiği üzere ana metale göre mekanik özellikleri daha düşük olan kaynak metalinden oluşmuştur. Parametrelerin artması ile birlikte, numunelerde akma mukavemeti değerinin yükseldiği gözlemlenirken, çekme mukavemeti değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Parametreler arttıkça, ITAB bölgesindeki sertlik değerlerinin arttığı belirlenmiş fakat bu sertlik değerlerinin ana metalin sertlik değerlerine göre çok düşük olduğu belirlenmiştir.

Taşkaya ve Gür (2019), tarafından yapılan çalışmada, Ramor 500 zırh çeliğinin toz altı kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmesinde tel ilerleme hızının nüfuziyete etkisi araştırılmıştır. Toz altı kaynağında kaynak teli olarak 307Si östenitik paslanmaz çelik tel kullanılmış olup 2,4 mm çapında tercih edilmiştir. Kaynak parametreleri olarak 250 A akım şiddeti ve 25 V gerilim uygulanmıştır. Değişken parametre ise ilerleme hızı olup, 20, 25 ve 30 cm/dk ilerleme hızları tercih edilmiştir. İlerleme hızı 20 cm/dk ile kaynaklama yapılan numunenin bitiş bölgesinde çatlaklar gözlemlenmiştir. İlerleme hızı 30 cm/dk ile kaynaklama yapılan numunenin başlangıç ve bitiş noktalarında küçük oranda nüfuziyet noksanlığı gözlemlenmiştir. Mikrosertlik testine bakıldığında kaynak dikişinin sertliğinin ana malzemeye göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Çekme deneyi sonucuna bakıldığında 20, 25 ve 30 cm/dk ilerleme hızlarıyla kaynatılan numunelerin çekme gerilmesi dayanımları sırasıyla 768,92; 838,28 ve 923,22 MPa olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, kaynak hızının artması sonucunda, dikiş genişliğinde ve nüfuziyette azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Erden, vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, alaşımsız çelik olan S235JR ile zırh çeliklerinden biri olan HARDOX zırh çeliği toz altı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmiş ve sertlik değerlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada, S235JR–S235JR, S235JR–HARDOX ve HARDOX-HARDOX çelik çiftlerinin kaynakları hedeflenmiştir. İki çelik çifti arasında 1 mm boşluk bırakılarak toz altı kaynak makinesi ile ön ve arka tarafından olmak üzere iki pasoda kaynatma işlemleri yapılmıştır. Kaynak teli olarak Oerlikon-S2 ticari ismiyle bilinen tel kullanılmakla birlikte tel çapı olarak 3,2 mm tercih edilmiştir. Kaynak parametreleri tüm kaynak işlemleri için aynı olup 325 A akım gücü, 30-32 V gerilim değeri ve 40 cm/dk ilerleme

hızı şeklinde belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, makro ve mikroyapı incelemelerinde S235JR çeliklerinin başlangıç mikroyapısını perlit ve ferrit fazları oluştururken, HARDOX çeliğinin mikroyapısını martenzitin oluşturduğu tespit edilmiştir. Mikroyapısal incelemede HARDOX zırh çeliği tarafındaki ITAB bölgesindeki tanelerin S235JR çeliğinin tarafındaki ITAB bölgesindeki tanelere göre daha küçük olduğu tespit edilmiş olup, buna HARDOX zırh çeliğinin içinde bulunan mikroalaşım elementleri V, Nb ve B'un varlığı sebep olarak belirtilmiştir. Bu elementlerin kaynak işlemi sırasında ve sonrasında östenit tane sınırında CN (karbonitrür) olarak çökelediğinden tane boyutunun büyümesini engellediği belirlenmiştir. Sertlik değerleri incelendiğinde, en yüksek sertlik değerinin HARDOX zırh çeliği çiftinin kaynağında gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, HARDOX çeliğinde bulunan ve sertlik arttıran Mo elementinin yanında, mikroalaşım elementlerinin çökmesinden meydana gelen karbonitrürlerin dislokasyon hareketlerini engellemesidir.

Kara ve Korkut'un (2012) yaptıkları çalışmada, ARMOX 500T zırh çeliği MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Birleştirilen iki parçadan birine 650 °C'de 4 saat boyunca gerilim giderme işlemi gerçekleştirilmiş, ısıtılmanın mukavemete etkisi incelenmiştir. Kaynak işleminde 1,2 mm çapında 307Si kaynak teli kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, ısıtılma işlemi uygulanan kaynaklı parçadaki mikroyapısal özelliğın, ısıtılma işlemi uygulanmayan kaynaklı parçaya göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Isıtılma işlemsiz parçadaki sertlik değerlerine bakıldığında ITAB bölgesindeki iri taneli bölgenin sertliğı 417,8 HV olarak belirlenmişken, kaynak metalinin sertliğı 205,1 HV olarak tespit edilmiştir. Isıtılma işlemli parçadaki sertlik değerlerinde ise en yüksek değer 309,9 HV olarak belirlenmiş olup, bu sertlik değeri iri taneli bölgenin ana metale yakın bölgesinde tespit edilmiştir. Isıtılma işlemi uygulanmamış parçadaki ana metalin sertlik değeri, 506–570 HV olan zırh çeliğinin orijinal sertliğini yansıtmakla birlikte, ısıtılma işlemi uygulanan parçadaki ana metalin sertliğinde düşüşler meydana gelmiştir. Buna sebep olarak, uygulanan ısıtılma işleminin ana metalini etkilemesi düşünülebilir. Darbe dayanımı sonucuna bakıldığında ısıtılma işlemsiz numune 38,5 Joule enerji sönümlenme yeteneğı gösterirken, ısıtılma işlemi uygulanmış numune ise 43 Joule enerji sönümlenme yeteneğı göstermiştir. Gerilim giderme işlemi sonucunda, istenmeyen mikroyapının ve mikrosertlikteki dağılımın kısmen giderildiğı tespit edilmiştir.

Taşkaya, vd., (2018) yaptığı çalışmada, Ramor 500 zırh çeliği toz altı ark kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmiş ve gerilimin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çalışmada 2,40 mm çapında östenitik paslanmaz çelik tel olan 307Si kullanılmış ve alümina bazik (AB) karakterli, SF-104 kaynak tozu tercih edilmiştir. Kaynak işleminde voltaj değerleri 20, 25 ve 30 V olarak seçilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, detaylı bir şekilde incelendiğinde kaynak metalinde makro ve mikro çatlaklara rastlanılmamakla birlikte yeterli nüfuziyet sağlanmıştır. Mikrosertlik açısından bakıldığında ITAB'da düşüş meydana geldiği ve kaynak metalindeki sertlikte artışların meydana geldiği belirlenmiştir. ITAB'daki sertlik düşüşünün meydana gelme sebebinin ferritik tanelerin büyümesinden kaynaklandığı belirlenmiştir.

Janicki'nin (2014) yaptığı çalışmada, disk lazer kaynağı ile değişken parametreler kullanılarak Armox 500T zırh çeliğinin kaynaklanabilirliği ve mekanik özellikleri incelemiştir. Bu çalışmada dolgu metali kullanılmamış ve kaynak parametreleri olarak kaynak hızı ve lazer gücü belirlenmiştir. Kaynak işleminde kaynak hızı ve lazerin gücü doğrudan ısı girdisini etkilemektedir. Isı girdisindeki farklılıklar ile birlikte kaynağın mekanik özelliklerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, ITAB bölgesinin ana metale göre %40 oranında sertlikte düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Çekme testleri incelendiğinde ana metale kıyasla yaklaşık %15 dayanımda düşüş meydana gelmiş ve darbe dayanımında ise ana metale kıyasla %30-%50 arasında bir düşüş meydana geldiği belirlenmiştir. Bu çalışmada, ısı girdisi arttıkça çekme ve darbe dayanımında azalma meydana gelmiştir.

Cabrilo ve Cvetinov'un (2017) yaptığı çalışmada, gaz metal ark kaynağı (GMAW) yöntemi ile Protac 500 zırh çeliğinin kaynağında mukavemet, darbe enerjisi ve yorulma dayanımını incelemeyi hedeflemişlerdir. Bu kaynak yönteminde V kaynak ağzı ve 55° kaynak ağzı açısı belirlenmiştir. ER307 adı ile tanımlanan 1 mm çapındaki ilave tel kullanılan bu çalışma robotik kaynak ile gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, testlerde gözlemlendiği üzere kaynaklı parçadaki kopma kaynak metalinde meydana gelmiştir. Dayanım sonuçlarına bakıldığında, 833 MPa çekme dayanımı ve 552 MPa akma dayanımı elde edilmiştir. Akma ve çekme dayanımlarının arasındaki farkın yüksek olmasının sebebi sünekliğin yüksek olduğunun bir göstergesi olarak

belirlenmiştir. Elde edilen çekme deneyi sonuçlarına göre manuel kaynak işleminde belirtilen kaynak metalinin dayanımına göre daha yüksek bir dayanım elde edilmiştir. Standartlarda belirtilen kaynak metalinin çekme mukavemeti 550 MPa ile ER307 östenitik tel ile sağlanmıştır. Kaynak işleminde yüksek sertlik elde edilememesine rağmen yüksek tokluk elde edilmiştir. Yüksek tokluğun elde edilmesinin sebebi olarak östenitik telin etkili olduğu belirlenmiştir.

İpek ve Elaldı'nın (2012) yaptıkları çalışmada, kaynak ağzı açısının ve geometrisinin zırh çeliği kaynağının mukavemetine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, yüksek mukavemetli MIL-A 46100 zırh çeliği kullanılmış olup özel üretilmiş 1 mm çapında östenitik paslanmaz çelik tel kullanılmıştır. 150 A akım değerinde yapılan kaynak işleminde %97 Argon ve %3 CO₂ koruyucu gaz ortamında kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaynak ağzı geometrisi olarak, X ve V kaynak geometrisinde, 48°, 54° ve 60° açılar tercih edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, 54° ve V kaynak ağzı geometrisi en yüksek akma dayanım değerlerini verirken, 48° ve V kaynak ağzı geometrisi en yüksek çekme dayanımını vermektedir. Elastiklik modül açısından X kaynak ağzı geometrisinin, V kaynak ağzı geometrisine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. En yüksek elastiklik modülünü veren parametrenin 60° ve X kaynak ağzı geometrisi olduğu belirlenmiştir. Basma test sonuçlarına bakıldığında ise en yüksek dayanımı veren parametrenin 48° ve X kaynak ağzı geometrisi olduğu belirlenmiştir. Üç nokta eğme testi sonuçlarında belirlenen Young modülünün en yüksek değerinin ise 48° ve V kaynak ağzı geometrisinde olduğu gözlemlenmiştir.

7. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada, yüksek sertlik ve mukavemete sahip MIL-A 46100 zırh çeliği sınıfındaki Miilux Protection 500 adıyla bilinen zırh çeliğinin, örtülü elektrod ark kaynağı ve gazaltı ark kaynağı yöntemleri kullanılarak kaynaklı birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Aynı çaplardaki dolgu metalleri kendi aralarında gruplandırılmak suretiyle, kaynak hızları sabit tutularak gerçekleştirilen birleştirmelerde akım şiddetinin değişimiyle farklı dolgu metali tiplerinin mekanik özellikler ve mikroyapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kaynak işlemi yapılan birleştirmelerde mekanik özellik incelemeleri için; çekme, mikrosertlik ve eğme testleri, mikroyapı incelemeleri için ise optik, mikroskop, SEM ve EDS incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

7.1 Materyal

Bu çalışmada, 500 HB değerinde yüksek sertliğe sahip Miilux Protection 500 zırh çeliği kullanılmıştır. 4,2 mm kesit kalınlığındaki zırh çelikleri Metaloks firmasından temin edilmiş olup Birikim Mühendislik ve Endüstriyel Yüklenim Ltd. Şti. firmasında standartlara uygun bir şekilde birleştirme işlemleri uygulanmıştır.

Çalışmada kullanılan zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 7.1 ve Tablo 7.2’de belirtilmiştir.

Tablo 7.1 Kullanılan zırh çeliğinin kimyasal özelliği (URL-1, 2023)

Element/Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Miilux Protection 500	0,30	0,70	1,70	0,015	0,005	0,75	0,80	0,50	0,004

Tablo 7.2 Kullanılan zırh çeliğinin mekanik özelliği (URL-1, 2023)

Malzeme	Akma Dayanımı Rp 0,2 (N/mm ²)	Çekme Dayanımı Rm (N/mm ²)	Uzama (%)	Charpy Darbe Dayanımı (-40°C) Joule	Sertlik HB	Karbon Eşdeğerliği (Ces)
Miilux Protection 500	1300	1600	8	17	480-560	0,70

Bu çalışmada, iki farklı kaynak yöntemi uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar için belirlenen toplam 8 adet dolgu metalinden 3 adedi MIG/MAG kaynak teli, 5 adedi de örtülü elektrod olarak belirlenmiştir. Kaynak işlemlerinde kullanılan dolgu metalleri; Magmaweld firmasına ait olup, firma tarafından elektrod ve teller EI 307B, EI 312/E106, EM 180, Citochromax, Tenacito 80, MG 183, MI 307Si ve MI 312 şeklinde isimlendirilmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan dolgu metallerinin standartlara ve firmaya göre isimlendirilmesi Tablo 7.3'te verilmiştir.

Tablo 7.3 Dolgu metallerinin standartlara göre adlandırılması

Kaynak Yöntemi	Magmaweld kodu	Standart ve İsimlendirme	AWS Kodu ve İsimlendirme
Örtülü Elektrodla Elektrik Ark Kaynağı	CITOCROMAX	TS EN ISO 3581 – A E 18 8 Mn B 22	AWS/ASME SFA - 5.4 E307-15
	TENACITO 80	TS EN ISO 18275 – A E 69 6 Mn2NiCrMo B 42 H5	AWS/ASME SFA - 5.5 E11018-G H4
	EI 312/E 106	TS EN ISO 3581 – A E 29 9 R 12	AWS/ASME SFA - 5.4 E312-16
	EM 180	TS EN ISO 18275 – A E 69 6 Mn2NiCrMo B 42 H5	AWS/ASME SFA - 5.5 E11018-G H4
	EI 307B	TS EN ISO 3581 – A E 18 8 Mn B 22	AWS/ASME SFA - 5.4 E307-15
MAG Kaynağı	MG 183	TS EN ISO 16834 – A G 69 4 M21 Mn3Ni1CrMo	AWS/ASME SFA - 5.28 ER100S-G
	MI 312	TS EN ISO 14343 – A G 29 9	AWS/ASME SFA - 5.9 ER312
	MI 307Si	TS EN ISO 14343 – A G 18 8 Mn	AWS/ASME SFA - 5.9 ER307

7.2 Metod

7.2.1 Kaynak İşlemine Hazırlık

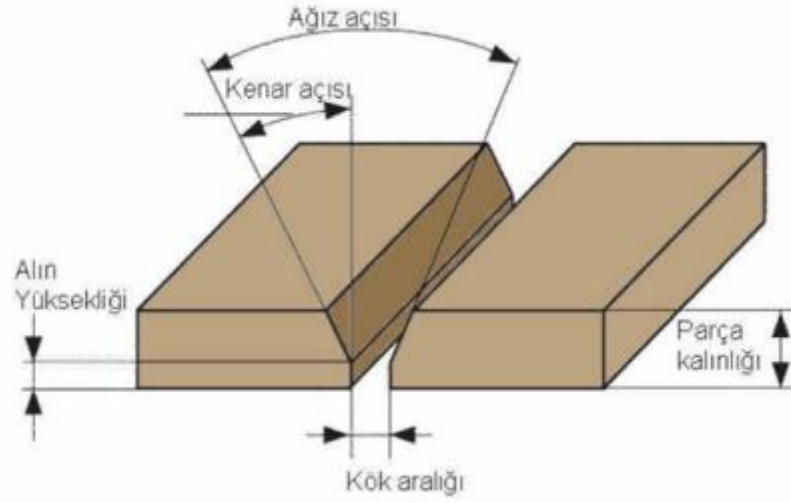
TS EN ISO 15614-1 standardına uygun ve zırh çeliğinin haddeleme yönü dikkate alınarak 380x200x4,2 mm boyutlarında kesilen zırh çeliklerine lazer ile kesme işlemi yapılmıştır. Tedarik edilen levhalara kaynak ağzı açma işlemi, dolgu metallerinin çapları ve TS EN ISO 9692-1 standardına uygun olarak MinaTech Uzay ve Havacılık

Makine ve Mühendislik Ltd. Şti. firmasında Şekil 7.1’de verilen CNC makinesinde frezeleme işlemine tabi tutulmuştur. Kaynak ağız geometrisinin şematik gösterimi ise Şekil 7.2’de verilmiştir. Bu çalışmada kaynak ağız Y olacak şekilde kaynak ağız geometrisi belirlenmiştir.



Şekil 7.1 Kaynak ağız açmada kullanılan CNC cihazı

Kaynak ağız açma işlemi yapılırken, 3,25 mm ve 2,5 mm çapındaki elektrodlar ile 1 mm çapındaki kaynak telleri için standardın belirlediği şekilde farklı ölçülerde kaynak ağız geometrileri oluşturulmuş ve bu ölçüler Tablo 7.4’te verilmiştir. Kaynak ağız açılan malzeme çiftlerinden biri ise örnek olarak Şekil 7.3’te verilmiştir.



Şekil 7.2 Kaynak ağzı geometrisi

Tablo 7.4 Kaynak ağzı geometrilerine ait ölçüler

Dolgu Metali Çapı (mm)	Kök Aralığı (mm)	Alın Yüksekliği (mm)	Ağız Açısı (°)	Kenar Açısı (°)	Parça Kalınlığı (mm)
Ø 2,5	3	1,75	50	25	4,2
Ø 3,25	3,5	2,00			
Ø 1	2	1,75			



Şekil 7.3 Kaynak ağzı açılmış malzeme çifti

Miilux Protection 500 zırh çeliğine uygulanacak kaynaklı birleştirmeler için deneylerin sınıflandırması genel olarak Tablo 7.5'te verilmiş olup, parametre detayları sonraki aşamalarda her metot içerisinde ayrıca detaylı olarak açıklanmıştır. Deneylerde kullanılan akım şiddeti değerleri elektrod çaplarına ve elektrod üretici

firmaların katalog değerlerine bağlı kalınarak tespit edilmiş olup, ortalama akım şiddeti değerleri Tablo 7.5'te görüldüğü gibi belirlenmiştir. Tablo 7.5'te görüleceği üzere; örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı uygulamalarında Ø3,25 mm elektrod için 100, 110 ve 120 Amper, Ø2,5 mm elektrod için 70, 80 ve 90 Amper, MAG kaynağı uygulamalarında ise Ø1 mm tel için 130, 140 ve 150 A akım şiddeti değerleri kullanılmıştır.

Tablo 7.5 Dolgu metallerinin akım şiddeti değerlerine göre numaralandırması

Deney Numarası	Kaynak Yöntemi	Dolgu Metali		Kullanılan Malzeme	Akım Şiddeti (Amper)
		Adı	Çapı (mm)		
N1	Örtülü Elektrodla Elektrik Ark Kaynağı	CITOCROMAX (E307-15)	Ø3,25	MiiLux Protection 500	100
N2					110
N3					120
N4		TENACITO 80 (E11018-G H4)	Ø3,25		100
N5					110
N6					120
N7		EI 312/E 106 (E312-16)	Ø2,5		70
N8					80
N9					90
N10					70
N11					80
N12					90
N13					70
N14					80
N15					90
N16	MAG Kaynağı	MG 183 (ER100S-G)	Ø1	130	
N17				140	
N18				150	
N19		MI 312 (ER312)	Ø1	130	
N20				140	
N21				150	
N22		MI 307Si (ER307)	Ø1	130	
N23				140	
N24				150	

7.2.2 Kaynak İşlemleri

Kaynak işlemi öncesinde malzeme üzerindeki yağ, kir, pas ve oksit tabakaları gibi kaynak içerisine nüfuz ederek kaynak metaline zarar verebilecek unsurlar mekanik temizleme işlemiyle giderilmiştir. TS EN ISO 9692-1 standardına ve dolgu metallerinin ebatlarına uygun olarak hazırlanan “Y” kaynak ağzı geometrisine sahip levhalar iki farklı kaynak yöntemi ile tek pasoda alın kaynaklama işlemi ile birleştirilmiştir. Birleştirme işlemleri Ankara Başkent Organize Sanayi’nde bulunan Birikim Mühendislik ve Endüstriyel Yüklenim Ltd. Şti’de gerçekleştirilmiştir.

Zırh çelikleri mikroyapısal olarak ısıya aşırı hassas çelik türlerinden biridir. Kaynak işlemi esnasında yüksek ısı girdisi ve soğuma hızı ile birlikte yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgelerin mikroyapısı kolaylıkla değişebilmektedir (Atabaki vd., 2014). Bu mikroyapı değişimi zırh çeliklerinin metalürjik ve mekanik özelliklerine doğrudan etki edeceği için, kaynak işlemi esnasında uygulanan ısı girdisine ve soğuma hızına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden kaynak işlemi esnasında ısıyı malzemeden hızlı bir şekilde uzaklaştırmak ve kaynak havuzunun daha kararlı bir yapıda olması amacıyla iki farklı kaynak yönteminde de Şekil 7.4’te verilne bakır altlık tercih edilmiştir. Aynı zamanda kaynak işlemlerinde tüm birleştirmeler için kaynak öncesi 150 °C sıcaklıkta ön ısıtma işlemi uygulanmıştır. Ayrıca malzemenin kesit kalınlığı (4,2 mm) nispeten ince olarak değerlendirildiğinden tüm birleştirmeler işkenceler yardımıyla Şekil 7.5’te verildiği gibi fikstürlenerek sabitlenmiştir. Birleştirmeler sac malzemenin kesit kalınlığı ve dolgu metali çaplarına uygun olarak tek pasoda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.4 Kaynak işleminde kullanılan bakır altlık



Şekil 7.5 Kaynak öncesi ön ısıtma işlemi

7.2.3 Örtülü Elektrodla Elektrik Ark Kaynağı

Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı uygulamasında kullanılan elektrodların kimyasal kompozisyonları ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 7.6'da ve Tablo 7.7'de verilmiştir.

Tablo 7.6 Örtülü elektrodların kimyasal kompozisyonu (%)

Dolgu Metali Çapı (mm)	Dolgu Metali Adı / Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
3,25	CITOCROMAX	0,12	0,40	6,00	19,00	9,00	-	≤0,020	≤0,025
	TENACITO 80	0,06	0,50	1,80	0,35	2,20	0,40	≤0,012	≤0,020
2,5	EM 180	0,05	0,30	1,60	0,40	2,20	0,45	-	-
	EI 307 B	0,08	0,30	6,00	19,50	9,50	-	-	-
	EI 312/E106	0,10	0,60	1,00	29,50	9,00	-	-	-

Tablo 7.7 Dolgu metali elektrodların mekanik özellikleri

Dolgu Metali Çapı (mm)	Dolgu Metali Adı / Mekanik Özellikler	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Uzama Miktarı (%)	Darbe Dayanımı (Joule) ve Test Sıcaklığı
3,25	CITOCROMAX	660	480	40	70 (20 °C)
	TENACITO 80	890	775	18	50 (-60 °C)
2,5	EM 180	890	775	18	50 (-60 °C)
	EI 307 B	640	500	38	70 (20 °C)
	EI 312/E106	780	-	23	50 (20 °C)

Elektrod yapısında nem bulunma ihtimalini ve hidrojenden kaynaklı oluşabilecek tüm olumsuzlukları ortadan kaldırmak için tüm elektrodlar Şekil 7.6'da verilen kurutma fırınında, elektrod üretim firmasının önerdiği sıcaklık ve zaman parametrelerine uygun olarak 350 °C'de 2 saat kurutulmuş ve fırından çıkar çıkmaz bekletilmeden kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7.8'de örtülü elektrodla elektrik ark kaynak metodunda gerçekleştirilen birleştirmelerde kullanılan kaynak parametreleri detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 7.6 Elektrod kurutma fırını

Tablo 7.8 Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı yönteminin kaynak parametreleri

Deney No	Elektrod Türü	Elektrod Çapı (mm)	Akım Şiddeti (Amper)	Gerilim (Volt)	Kaynak Hızı (cm/dk)	Kaynak Süresi (dk)
N1	CITOCHROMAX	Ø3,25	100	22,5	9,5	4
N2			110			
N3			120			
N4	TENACITO 80		100			
N5			110			
N6			120			
N7	EI 312/E 106	Ø2,50	70			
N8			80			
N9			90			
N10	EM 180		70			
N11			80			
N12			90			
N13	EI 307B		70			
N14			80			
N15			90			

7.2.4 MAG Kaynağı

MAG kaynağı yönteminde kaynak metalini olumsuz atmosferden korumak amacıyla M12 kodlu koruyucu gaz (%82 Ar + %18 CO₂) kaynak işlemi esnasında 12 lt/dk gaz debisinde kaynak havuzuna aktarılmıştır. Deneylerde kullanılan kaynak tellerinin kimyasal kompozisyonları ve mekanik özellikler ise sırasıyla Tablo 7.9’da ve Tablo 7.10’da verilmiştir.

Tablo 7.9 Dolgu metali kaynak tellerinin kimyasal kompozisyonu (%)

Dolgu Metali Çapı (mm)	Dolgu Metali Adı / Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
1	MI 312	0,01	0,40	1,80	30,00	9,00	-	-	-
	MI 307Si	0,07	0,80	7,00	19,00	8,00	-	-	-
	MG 183	0,09	0,55	1,55	0,30	1,40	0,25	-	-

Tablo 7.10 Dolgu metali kaynak tellerinin mekanik özellikleri

Dolgu Metali Çapı (mm)	Dolgu Metali Adı / Mekanik Özellikler	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Uzama Miktarı (%)	Darbe Dayanımı (J)-(Test Sıcaklığı)	Koruyucu Gaz Ortamı
1	MI 312	740	550	25	80 (20 °C)	M13
	MI 307Si	630	460	39	90 (20 °C)	M13
	MG 183	780	710	19	65 (-40 °C)	M21

Protection 500 zırh çelikleri Tablo 7.9 ve Tablo 7.10’da kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri verilen dolgu metalleri ile Tablo 7.11’de verilen parametreler dahilinde birleştirilmiştir.

Tablo 7.11 MAG kaynağı yönteminin kaynak parametreleri

Deney No.	Kaynak Teli	Tel Çapı (mm)	Akım Şiddeti (Amper)	Kaynak Süresi(dk)	Voltaj	Kaynak Hızı (cm/dk)	Tel Sürme Hızı(m/dk)	Gaz Debisi (lt/dk.)
N16	MG 183	Ø1,0	130	2,5	20,80	15,2	8,15	12
N17			140					
N18			150					

Tablo 7.11'in devamı

Deney No.	Kaynak Teli	Tel Çapı (mm)	Akım Şiddeti (Amper)	Kaynak Süresi(dk)	Voltaj	Kaynak Hızı (cm/dk)	Tel Sürme Hızı(m/dk)	Gaz Debisi (lt/dk.)
N19	MI 312	Ø1,0	130	2,5	20,80	15,2	8,15	12
N20			140					
N21			150					
N22	MI 307Si		130					
N23			140					
N24			150					

Tüm deneyler için örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı ve gaz altı kaynağı ile gerçekleştirilen birleştirmeler Şekil 7.7'de gösterilen Lincoln Powertec i500S marka kaynak cihazı ile yapılmıştır. Cihaz komplike bir cihaz olup, hem elektrik ark kaynağı hem de gazaltı kaynağı uygulamalarına imkan tanımaktadır. Şekil 7.8'de kaynaklı birleştirme öncesi işkenceler yardımıyla sabitleme yapılan levha çifti, Şekil 7.9'da ise kaynak işlemi tamamlanmış bir birleştirme örneği verilmiştir.



Şekil 7.7 Kaynak işleminde kullanılan cihaz



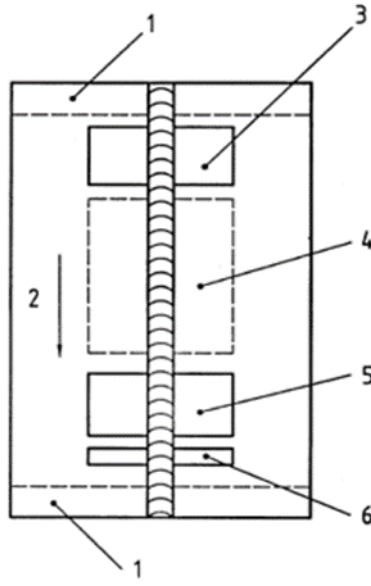
Şekil 7.8 Kaynaklama işlemine hazırlanmış levha çifti



Şekil 7.9 Kaynaklama işlemi tamamlanmış levha çifti

7.3 Test Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada, her bir deney için mekanik testler ve mikroyapısal incelemeler gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Mekanik testler; çekme testi, üç nokta eğme testi ve mikrosertlik testlerinden oluşmakla birlikte kaynak işleminin mekanik ve mikroyapısal performansını araştırmak amaçlanmıştır. Zırh çelikleri ısıdan kolayca etkilendiği bilindiğinden numunelerin kesme işlemi su jeti yardımı ile yapılmıştır. TS EN ISO 15614-1 standardına göre göre konumlandırılan numunelerin kaynaklanmış levha çifti üzerinde gösterimi Şekil 7.10'da, su jeti kesimini gösteren fotoğraf ise Şekil 7.12'de, kesim işlemi tamamlanan numunelerin görüntüsü ise Şekil 7.13'te verilmiştir.



Bölgeler:

1. Atık Bölge
2. Kaynak Yönü
3. Makro ve Sertlik Test Numuneleri
4. Çekme ve Eğme Test Numuneleri
5. Darbe ve Ek Test Numuneleri
6. Çekme ve Bükme Test Numuneleri

Şekil 7.10 Levha çiftinden alınan numunelerin konumu



Şekil 7.11 Kesim işlemi yapan su jeti



Şekil 7.12 Kesim işlemi esnasındaki görüntü



Şekil 7.13 Kesim işleminin ardından alınan görüntü

7.4 Mikroyapı ve Makroyapı İncelemeleri

Mikroyapı ve makroyapı numunelerinin incelenmesi için numunelerin zımparalama ve parlatma işlemleri Şekil 7.14'te gösterilen SIEMENS marka cihaz yardımı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.14 Zımparalama ve parlatma cihazı

Numunelerin yüzeyindeki çiziklerin giderilmesi için gerçekleştirilen zımparalama işlemlerinde sırasıyla 80, 120, 240, 400, 800, 1200 ve 2500 gridlik zımparalar kullanılmıştır. Zımparalamanın ardından yüzeyde oluşan ve mikro düzeyde olan çiziklerin giderilmesi için numuneler sırasıyla 3 ve 1 μm 'lik elmas solüsyonlarla parlatma keçelerinde parlatılmıştır.

Parlatma işleminin ardından tanelerin optik mikroskop ve SEM üzerinde daha net bir şekilde gözlemlenebilmesi ve yapıdaki dönüşümlerin incelenebilmesi için dağlama işlemi yapılmıştır. Ana metal ve dolgu metalleri kimyasal kompozisyon ve yapı olarak birbirinden farklı olduğu için bu malzemelerin dağlayıcılara farklı tepkiler verdiği gözlemlenmiştir. Bu yüzden bazı birleştirmelerde ana metal ve dolgu metalinde farklı dağlayıcı uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan dağlama ayraçları

hakkındaki bilgiler Tablo 7.12’de verilmiştir. Tablo 7.12’de verilen deneylerde %10 oksalik asit ile elektrolitik dağlama işlemi uygulanmıştır. Elektrolitik dağlama işlemleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakóltesi İmalat Mühendisliği Bölümü’nde gerçekteştirilmiştir.

Tablo 7.12 Deneylerde kullanılan dağlama ayaçlarına ait bilgiler

Deney No	Kaynak Metodu	Malzeme	Dağlayıcı		Dağlama Süresi(sn)				
			Adı	İçeriği					
-	-	Ana metal MiiLux Protection 500	%5 Nital Çözelti	5 ml HNO ₃ 95 ml metil alkol	20				
N1	Örtülü Elektrodlarla Ark Kaynağı	CITOCHROMAX	%10 Oksalik Asit	10 gr oksalik asit 90 ml su	60				
N2									
N3									
N4		TENACITO 80	%5 Nital Çözelti	5 ml HNO ₃ 95 ml metil alkol	20				
N5									
N6									
N7		EI 312/E 106	%10 Oksalik Asit	10 gr oksalik asit 90 ml su	20				
N8									
N9									
N10									
N11						EM 180	%5 Nital Çözelti	5 ml HNO ₃ 95 ml metil alkol	20
N12									
N13									
N14									
N15									
N16	MAG Kaynağı	MG 183	%5 Nital Çözelti	5 ml HNO ₃ 95 ml metil alkol	20				
N17									
N18									
N19		MI 312	-	10 ml HNO ₃ 20 ml HCl 30 ml saf su	60				
N20									
N21		MI 307Si	-	10 ml HNO ₃ 20 ml HCl 30 ml saf su	480				
N22									
N23									
N24									

Zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri tamamlanan numunelerin görüntüleri Şekil 7.15’de verilmiştir.



Şekil 7.15 Zımparalama, parlatma ve dağlama işlemi uygulanmış numuneler

7.4.1 Optik ve Stereo Mikroskop İncelemeleri

Dağlama işlemleri gerçekleştirilen numunelerin kaynak metali, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve ana malzeme bölgelerinden görüntüleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikro incelemeleri (optik mikroskop görüntülemeleri) Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan ve Şekil 7.16'da verilen Olympus marka GX41 model optik mikroskop yardımı ile, numunelerin makro incelemeleri (stereo mikroskop görüntülemeleri) ise Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Laboratuvarında bulunan cihaz yardımı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.16 Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop

7.4.2 SEM ve EDS İncelemeleri

SEM ölçümleri, odaklandırma işlemi uygulanan elektronlar yardımı ile yapılmaktadır. Cihaz içerisine konumlandırılan mikroyapı numuneleri veya tahribatlı deney numunelerinin yüzeyleri hakkında bilgi edinmemize olanak sağlamaktadır. EDS ölçümleri ise numunelerde çizgisel, noktasal ve alan taramaları yaparak kimyasal kompozisyon hakkında bilgi edinmemizi sağlayan bir analiz yöntemidir. SEM görüntülemeleri ile birlikte gerçekleştirilen EDS analizleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Şekil 7.17’de verilen FEI QUANTA FEG 250 marka ve model cihaz yardımı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.17 SEM görüntüleme ve EDS analiz cihazı

7.5 Çekme Testi

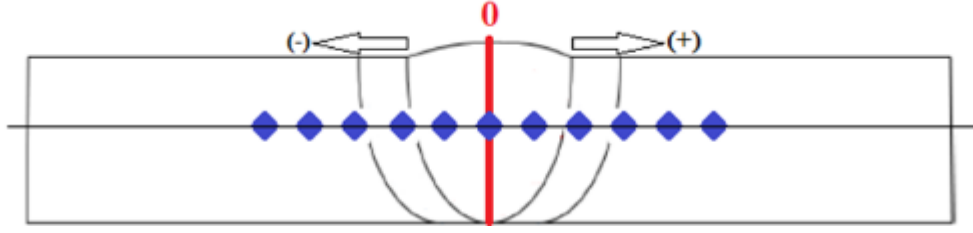
Kaynak işlemleri tamamlanan levhalardan çekme test numuneleri standartlara uygun bir şekilde ölçülendirilerek levhadan çıkarılmıştır. Kaynak ile birleştirilmiş levha çiftinden alınan numuneler TS EN ISO 4136, ana malzemedен alınan numuneler ise TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak ölçülendirilmiştir. Standartlara uygun olarak elde edilen çekme numuneleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan, 500kN güce sahip olup, çekme ve basma testleri yapabilen ve Şekil 7.18’de verilen Instron 8503 marka cihaz yardımı ile oda sıcaklığında çekme testlerine tabi tutulmuştur. Çekme işlemi esnasında numunelerdeki uzamanın hesaplanabilmesi için numunelerde test öncesi ilk ölçü uzunluğu numuneler üzerinde çizilerek, test sonrası gerekli ölçümler yapılarak uzama miktarları belirlenmiştir.



Şekil 7.18 Çekme testi cihazı

7.6 Mikrosertlik Testi

Mikrosertlik testi, belirli bir yük uygulanan malzemelerin deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Tahribatlı muayene yöntemlerinin bir üyesi olan bu test yönteminde; sertlik cihazları ile ölçümler yapılarak malzemenin sertliği hakkında bilgi almamız sağlanmaktadır. Mikrosertlik testi öncesi numunelere gerekli yüzey işlemleri uygulanmış ve parlatılmış yüzeylerden mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadaki mikrosertlik ölçümleri TS EN ISO 9015-2 standardına uygun olarak Şekil 7.19’da şematik olarak gösterilen görüntüdeki gibi, ana malzeme sertliği ölçümüne kadar kaynak merkezinin soluna ve sağına uygulanacak şekil ve sayıda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.19 Mikrosertlik ölçümünün şematik gösterimi

Şekil 7.24'te gösterildiği üzere kaynak metalinin merkezi (0 noktası) mikrosertlik ölçümlerinde referans noktası olarak belirlenmiştir. Numunede, referans noktasının (+) ve (-) yönlerinde, her yönde eşit mesafede 25 noktadan olmak üzere toplamda 50 adet ölçüm ile testler gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümlerinde iki nokta arasındaki mesafe 0,5 mm olarak belirlenmiştir. Ölçümler sonucunda numunelerde ana malzemenin sertlik değerlerine ulaşamadığı tespit edilmiştir. Bu durumun ısı girdisi nedeniyle oluşan ITAB genişliğiyle alakalı olduğu düşünülmektedir. Mikrosertlik ölçümlerinde ana malzemenin sertlik değerine ulaşılabilmesi için ilave ölçümlere ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle 25. noktadan başlamak üzere 37. noktaya kadar (+25 noktası ile +37 noktası arası ve -25 noktası ile -37 noktası arası) tüm numunelere 1 mm mesafe aralıklarla ekstra ölçümler gerçekleştirilmiştir. Tüm mikrosertlik ölçümleri 1 kg yük altında ve Vickers sertlik ölçüm yöntemi ile yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri Kastamonu Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan, Şekil 7.20'de verilen SHIMADZU HMV-G21 marka cihaz yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.20 Mikrosertlik cihazı

7.7 Eğme Testi

Eğme testi, kaynak ile birleştirilen malzemelerin kaynak dikişinin plastik veya elastik şekil değişimi hakkında bilgi veren ve kaynağın uygunluğunu gösteren önemli tahribatlı testlerden biridir. Eğme testi için kaynaklı levhalardan TS EN ISO 5173 standardına uygun ölçülerde numuneler alınmış ve ölçümler yapılmıştır. Eğme testi Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan 500 kN güce sahip, Şekil 7.21’de verilen Hidroliksan marka cihaz yardımı ile yapılmıştır. Numunelere oda sıcaklığında 180° eğme işlemleri uygulanmıştır. 20 mm çapında mandren kullanılmış olup mesnetler arası mesafe standarda uygun olarak 28,4 mm olarak ayarlanmıştır.



Şekil 7.21 Eğme testlerinin gerçekleştirildiği cihaz

8. DENEYSEL SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

8.1 Makroyapı İncelemeleri

Yüksek sertliğe sahip ve MIL-A-46100 sınıfından olan Miilux Protection 500 zırh çeliği, MAG ve örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı yöntemleri ile birleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Makroyapı incelemeleri uygulanan kaynak metotlarına uygun olarak iki farklı grupta değerlendirilmiştir. Birinci grupta örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı yöntemi ile birleştirilen numunelere ait görüntüler incelenmiş olup, ikinci grupta MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelere ait görüntüler incelenmiştir. Birinci grupta örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı yöntemi ile birleştirilen numunelerin makroyapı görüntüleri Şekil 8.1-Şekil 8.5 arasında, ikinci grupta MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin makroyapı görüntüleri ise Şekil 8.6-Şekil 8.8 arasında verilmiştir. Tüm makroyapı görüntülerinden nüfuziyetin tam ve istenilen şekilde oluştuğu anlaşılmakta olup, kaynak bölgesini oluşturan ergime çizgisi ve ITAB net bir şekilde gözlemlenmiştir. Yine makroyapı görüntülerinden kaynak metalindeki tanelerin merkeze doğru ısı kaçış yönünde yönlendiği tespit edilmiştir. Yine tüm makroyapı görüntüleri birlikte değerlendirildiğinde; ferritik özellik gösteren elektrodların makroyapı ve hatta tane yapıları daha net bir şekilde görülmüştür. Ferritik özellik gösteren ilave malzemelerle gerçekleştirilen birleştirmelerin görüntülerinde (Şekil 8.2, Şekil 8.4, Şekil 8.6) ışın mikroskobundan yansıyan ışınlar daha parlak bir şekilde oluşarak, daha net görüntüler elde edilmiştir. Bu görüntülerde tane yapıları ve kaynak metalindeki yönelmeler açıkça görülmüştür. Östenitik paslanmaz çelik özelliği gösteren ilave malzemelerle birleştirilen numunelerin görüntülerinde (Şekil 8.1, Şekil 8.5, Şekil 8.8) ise daha koyu bir görüntü oluşmakla birlikte, tane yapıları ve yönelmeler görülememiştir. Bu durumun oluşmasında östenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonu ile birlikte kullanılan dağlama ayracının etkisinin olduğu düşünülmektedir. Doubleks (östenitik – ferritik) paslanmaz çelik özelliği gösteren elektrod ve telin görüntülerinde ise (Şekil 8.3, Şekil 8.7) ferritik ve östenitik paslanmaz çelik özellik gösteren ilave malzemelerle birleştirilen numunelerden alınan görüntülerin ortalaması şeklinde nitelendirilebilecek görüntüler elde edilmiştir.

Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı yöntemi ile birleştirilen numunelerin makroyapı görüntüleri

Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı yöntemi ile birleştirilen numunelerin makroyapı görüntüleri Şekil 8.1-Şekil 8.5 arasında verilmiştir. Ø3,25 mm çapındaki elektrodlar Şekil 8.1 ve Şekil 8.2’de, Ø2,5 mm çapındaki elektrodlar ise sırasıyla Şekil 8.3, Şekil 8,4 ve Şekil 8.5’te verilmiştir.



Şekil 8.1 CITOCHROMAX kodlu örtülü elektrodla (Ø3,25 mm) yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N1 numaralı deney, b) N2 numaralı deney, c) N3 numaralı deney



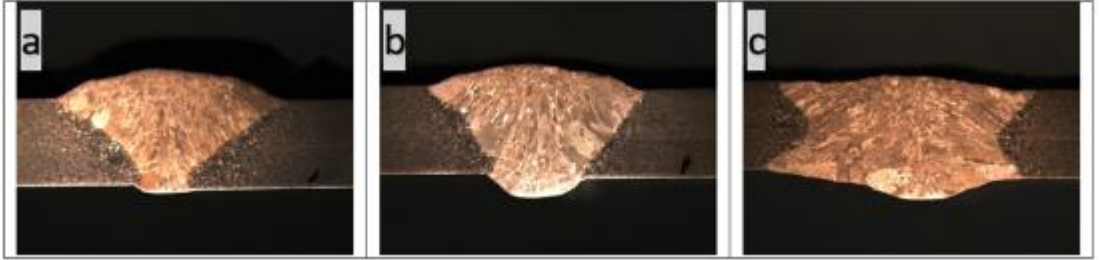
Şekil 8.2 TENACITO 80 kodlu örtülü elektrodla (Ø3,25 mm) yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N4 numaralı deney, b) N5 numaralı deney, c) N6 numaralı deney

Ø3,25 mm elektrodlar kullanılarak yapılan birleştirmelerin makroyapı görüntüleri incelendiğinde; kaynak dikiş formunu olumsuz etkileyen herhangi bir unsura rastlanmamıştır. Şekil 8.1’de verilen Citochromax kodlu elektrodun östenitik paslanmaz çelik özellik gösterdiği, Şekil 8.2’de verilen Tenacito 80 kodlu elektrodun ise ferritik özellik gösterdiği elektrod kataloglarından bilinmektedir. Östenitik paslanmaz çelik özelliği gösteren Citochromax kodlu elektrodun görüntüleri (Şekil 8.1) incelendiğinde kep ve kök bölgelerinde kaynak merkezine doğru tanelerin yönlenmeleri gözlemlenebilirken, orta kısımlarda koyu ve karanlık görüntülerin olduğu görülmüştür. Şekil 8.2’de gösterilen ferritik özellik sergileyen Tenacito 80 kodlu elektrodun makroyapı görüntüsü ise çelik malzemelerin tipik kaynak

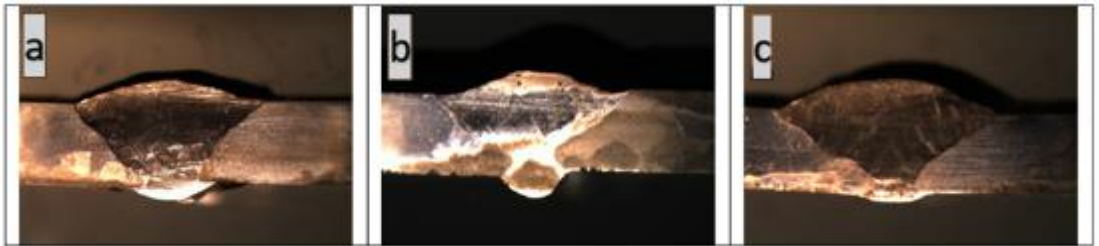
görüntüsünü vermektedir. Şekil 8.1 ve Şekil 8.2 birlikte değerlendirildiğinde akım şiddeti değerlerinin artmasıyla birlikte kaynak bölgesinin (kaynak metali ve ITAB) genişlediği tespit edilmiştir. Düşük akım şiddeti değerlerinde gerçekleşen birleştirmelerde kepten köke doğru daralan V hatlı bir kaynak dikişi formu oluşurken, akım şiddeti değerlerinin artmasıyla birlikte bu formun kaybolarak daha geniş bir şekilde kepten köke doğru hatların daha düzleşerek V'den U'ya doğru değiştiği dikiş formlarının oluştuğu görülmüştür.



Şekil 8.3 EI 312/E 106 kodlu örtülü elektrodla (Ø2,5 mm) yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N7 numaralı deney, b) N8 numaralı deney, c) N9 numaralı deney



Şekil 8.4 EM 180 kodlu örtülü elektrodla (Ø2,5 mm) yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N10 numaralı deney, b) N11 numaralı deney, c) N12 numaralı deney



Şekil 8.5 EI 307B kodlu örtülü elektrodla (Ø2,5 mm) yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N13 numaralı deney, b) N14 numaralı deney, c) N15 numaralı deney

Ø2,5 mm elektrodlar kullanılarak yapılan birleştirmelerin makroyapı görüntüleri incelendiğinde Ø3,25 mm elektrodarda elde edilenlere benzer görüntüler elde edilmiştir. Elektrod ürün kataloğunda ferritik özellik gösteren EM180 kodlu

elektrodun görüntüsü (Şekil 8.4) daha net ve anlaşılır bir şekilde oluşurken, ergime çizgisi, ITAB, tane yapıları ve yönlenmeler çok net bir şekilde görülmektedir. EI 307B kodlu elektrodun makro görüntüsünde (Şekil 8.5) ise östenitik paslanmaz çelik özelliği gösteren diğer makroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir. Kep ve kök bölgelerinde daha parlak yapılar oluşurken, koyu ve karanlık bölgeler dikkat çekmektedir. Ferritik – östenitik (dubleks) paslanmaz çelik özelliği gösteren EI 312/E 106 kodlu elektrodda ise her iki elektroddaki görüntünün ortalaması şeklinde bir görüntünün oluştuğu söylenebilir. Ø2,5 mm elektrodla kaynaklanan birleştirmelerin makroyapı görüntülerinde, daha önceki görüntülere benzer şekilde akım şiddeti değerlerinin artmasıyla birlikte, kaynak bölgelerinin genişlediği de gözlemlenmiştir.

Ø3,25 mm ve Ø2,5 mm elektrodla ait makroyapı görüntüleri birlikte değerlendirildiğinde elektrod çapına bağlı olarak oluşan ısı girdisinin etkisiyle Ø3,25 mm elektrodla daha geniş bir kaynak bölgesi gözlemlenirken, Ø2,5 mm elektrodla daha dar bir kaynak bölgesi elde edilmiştir. Zırh çeliklerinin kaynağında ısının malzemeye yoğun bir şekilde tatbik edilmesi ve yüksek ısı girdisi pek istenmeyen bir durumdur. Bu yüzden Ø2,5 mm elektrodla zırh çelikleri için makroyapısal açıdan daha arzu edilen birleştirmeler elde edilmiştir.

MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin makroyapı görüntüleri

MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin makroyapı görüntüleri Şekil 8.6-Şekil 8.8 arasında verilmiştir. MG183 kodlu elektrodun (Şekil 8.6) ferritik özellik gösterdiği, MI312 kodlu elektrodun (Şekil 8.7) dubleks paslanmaz çelik özelliği gösterdiği, MI 307Si kodlu elektrodun (Şekil 8.8) ise östenitik paslanmaz çelik özellik gösterdiği ürün kataloglarından bilinmektedir.



Şekil 8.6 MG 183 kodlu tel ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N16 numaralı deney, b) N17 numaralı deney, c) N18 numaralı deney



Şekil 8.7 MI 312 kodlu tel ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N19 numaralı deney, b) N20 numaralı deney, c) N21 numaralı deney



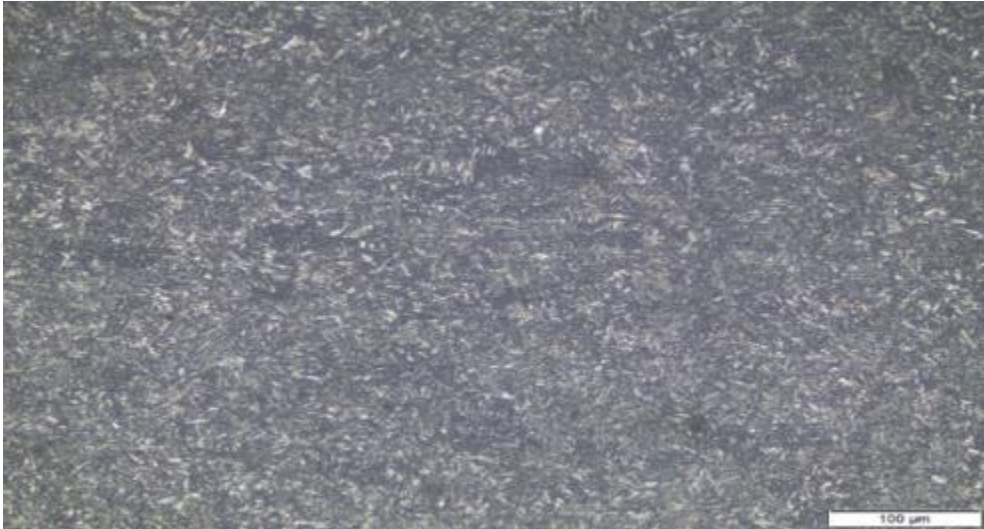
Şekil 8.8 MI 307Si kodlu tel ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait makroyapı görüntüleri a) N22 numaralı deney, b) N23 numaralı deney, c) N24 numaralı deney

Şekil 8.6-Şekil 8.8 arasında verilen makroyapı görüntülerinde diğer görüntülerde görüldüğü gibi ferritik özellik gösteren elektrod olan MG183 kodlu telin (Şekil 8.6) kaynak metalürjisi net bir şekilde gözlemlenmektedir. Dupleks paslanmaz çelik özelliği gösteren MI 312 kodlu telin makroyapı görüntüsünde (Şekil 8.7) diğer dupleks paslanmaz çelik özelliği gösteren elektrolarda elde edilen görüntülere benzer görüntüler elde edilmiştir. Söz konusu görüntülerde ergime çizgisi ve ITAB gözlemlenebilirken, tanelerin ısı kaçış yönünde kaynak merkezine doğru yöneldiği görülmüştür. MI 307Si tel ile yapılan birleştirmelerden alınan makroyapı görüntülerinde (Şekil 8.8) ise söz konusu ilave malzemenin östenitik paslanmaz çelik özelliği göstermesi nedeniyle daha önce bu özellikte belirtilen görüntülere benzer görüntüler elde edilirken diğer görüntülerden farklı olarak taneler biraz daha net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. MAG kaynağıyla gerçekleştirilen tüm birleştirmelerde akım şiddeti değerlerinin artmasıyla kaynak bölgesinin (kaynak metali, ITAB) genişlediği tespit edilmiştir.

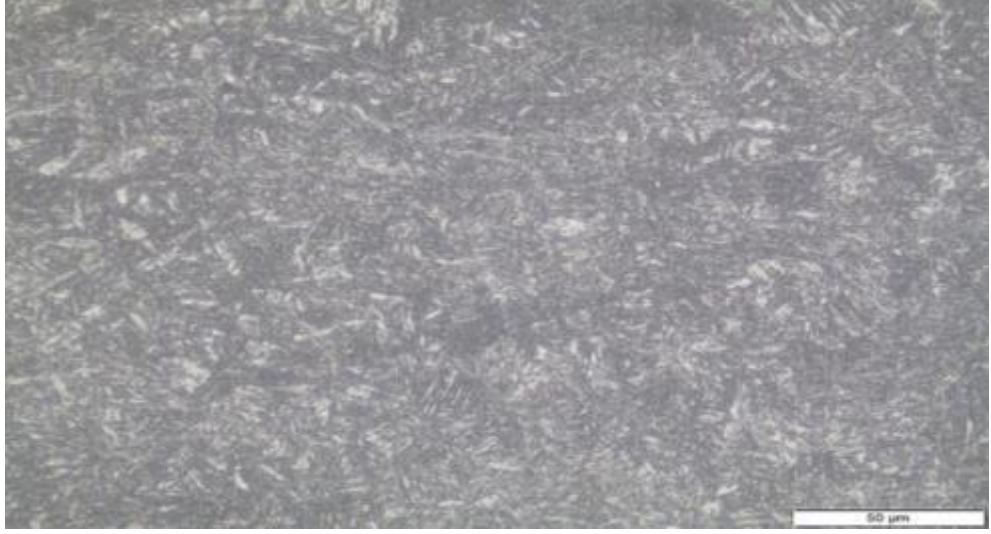
8.2 Mikroyapı (Optik Mikroskop, SEM, EDS) İncelemeleri

8.2.1 Optik Mikroskop Görüntüleri İncelemeleri

Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı ve MAG kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirme işlemleri uygulanan Protection 500 zırh çeliklerinin, kaynak yöntemlerinde kendi aralarında farklı akım değerlerinde yapılan birleştirmelerin mikroyapısal etkilerini incelemek için optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır. Mikroyapı görüntülerinde 200 ve 500 büyütmede görüntüler alınmıştır. Ana malzemenin mikroyapı görüntüsü Şekil 8.9 ve Şekil 8.10'da verilmiştir. Kaynak ile birleştirilen numunelerin mikroyapı görüntüleri ise Şekil 8.12 ile Şekil 8.35 arasında ayrıntılı olarak verilmiştir.



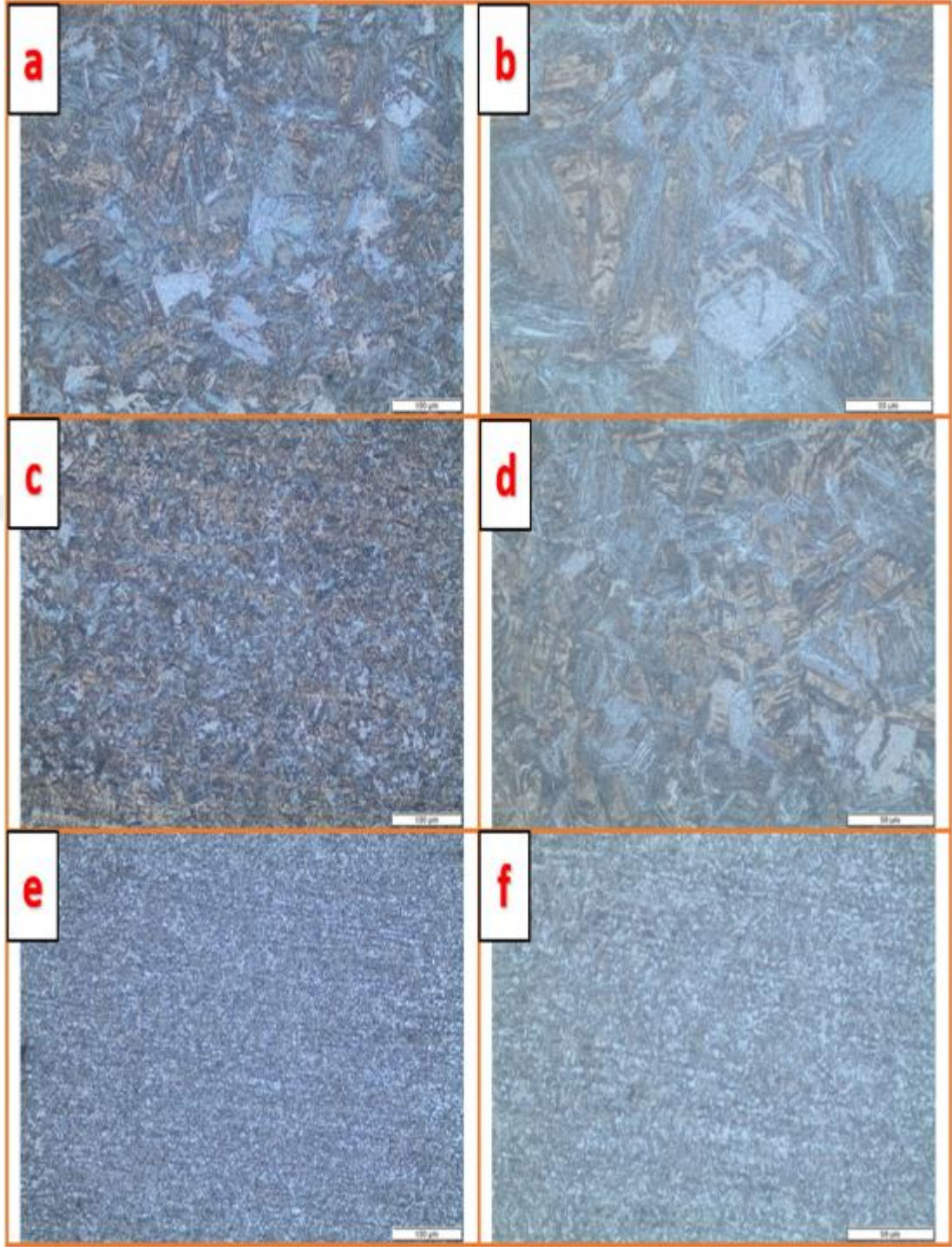
Şekil 8.9 Ana malzemeye ait 20x mikroyapı görüntüsü



Şekil 8.10 Ana malzemeye ait 50x mikroyapı görüntüsü

Ana malzeme mikroyapısı incelendiğinde martenzitik yapının hakim olduğu görülmektedir. Zırh çeliklerine yüksek sertlik ve yüksek mukavemet kazandıran martenzitik yapının iğnemsisi ve çıta tipinde oluştuğu bilinmektedir. İğnemsisi ve çıta tipinde oluşan martenzit dislokasyon hareketlerini engelleyici özelliği ile malzemeye mukavemet ve sertlik kazandıran önemli bir fazdır (Jena vd., 2010).

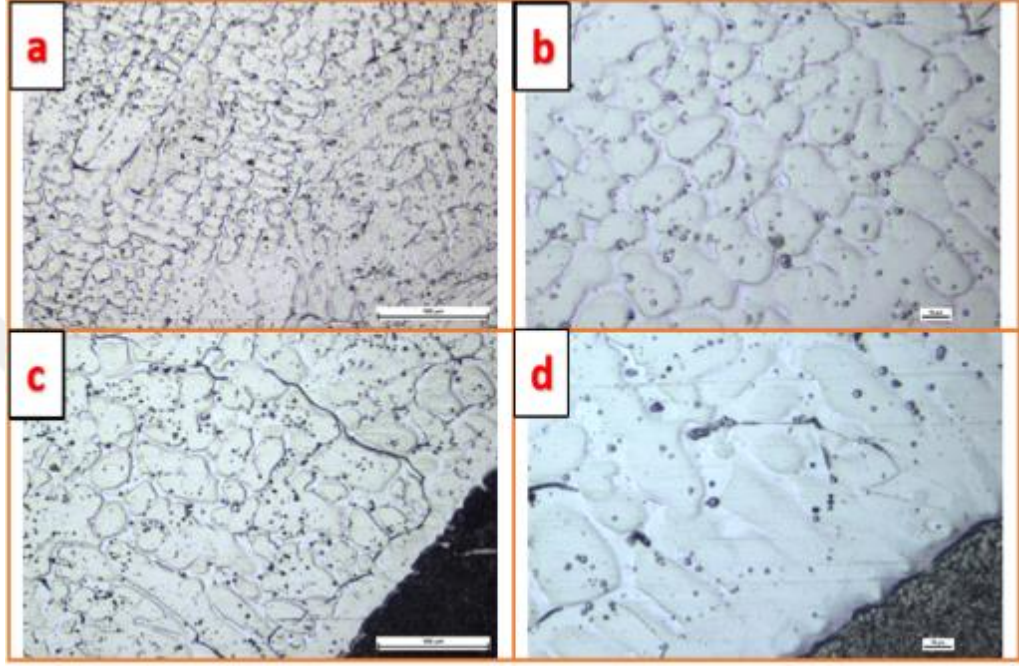
Kaynaklı birleştirme uygulanan levhalardan alınan numunelerin ısıdan etkilenen bölgelerinin mikroyapıları incelendiğinde, ITAB'ı oluşturan bölgelerin tüm numunelerde iri taneli bölge, iri-ince taneli geçiş bölgesi ve ince taneli bölgenin olduğu görülmüş ve ITAB'a ait mikroyapı görüntüleri Şekil 8.11'de verilmiştir. Şekil 8.11'de kaynaklı birleştirme yapılan numunelerin mikroyapı görüntülerinde genel olarak; ITAB bölgesi benzer görüntülerden oluştuğu için tüm numuneler için benzer görüntüleri tekrar vermek yerine iri taneli bölge, iri-ince taneli geçiş bölgesi ve ince taneli bölgeyi kapsayan örnek bir ITAB mikroyapısı verilmiştir.



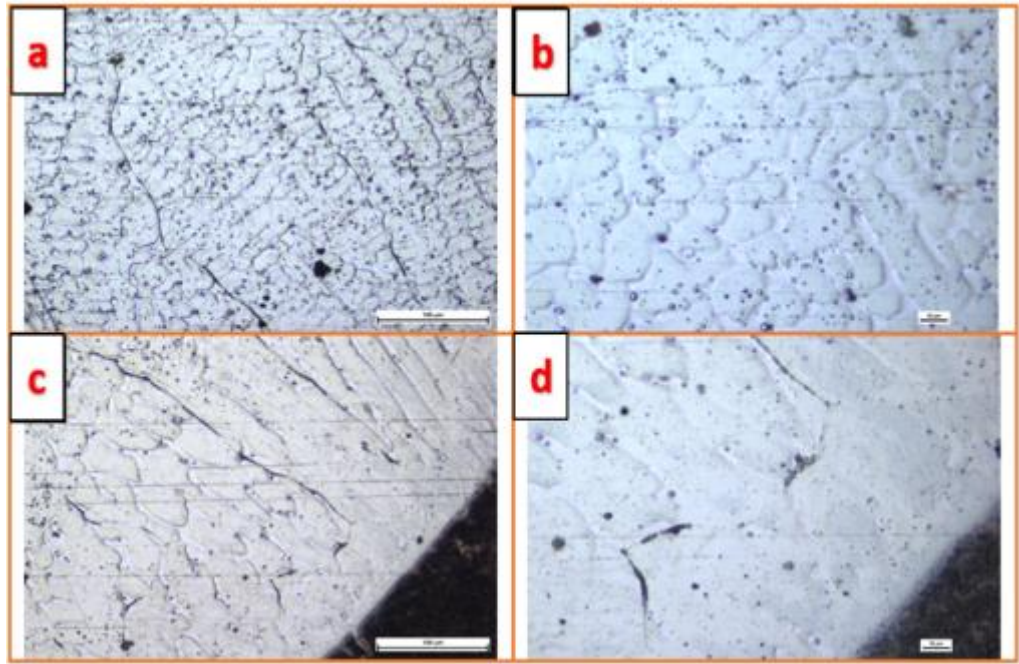
Şekil 8.11 Kaynaklı birleştirme sonucunda zırh çeliği birleştirmesinde ısıdan etkilenen bölgeler a) 20x iri taneli bölge, b) 50x iri taneli bölge, c) 20x iri-ince taneli geçiş bölgesi, d) 50x iri-ince taneli geçiş bölgesi, e) 20x ince taneli bölge, f) 50x ince taneli bölge

Şekil 8.12 ile Şekil 8.35 arasında ise kaynaklı birleştirmelerden alınan numunelerin kaynak metali ve kaynak metalinden ITAB'a doğru geçiş bölgelerinin mikroyapı görüntüleri verilmiştir.

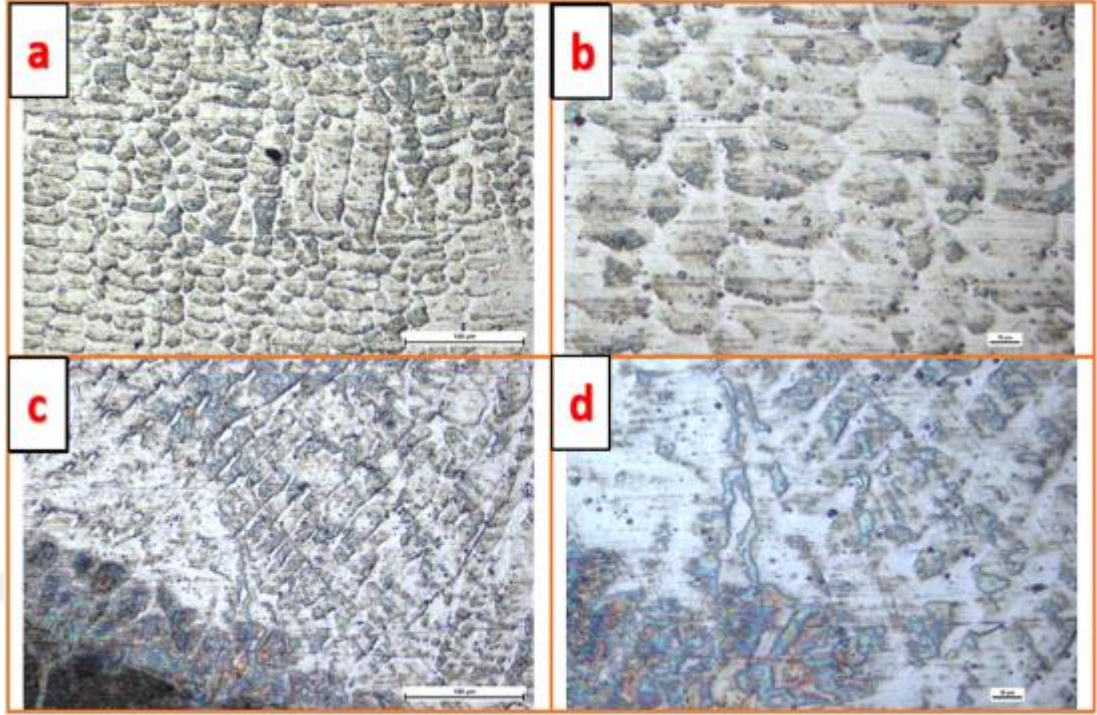
Ø3,25 mm çapındaki Citochromax kodlu elektrodla farklı akım şiddeti değerlerinde 100, 110 ve 120 A akım şiddeti ile yapılan N1, N2, N3 numaralı birleştirmelerin kaynak metali ve geçiş bölgesi mikroyapılarının görüntüleri Şekil 8.12, Şekil 8.13 ve Şekil 8.14'te sırasıyla verilmiştir.



Şekil 8.12 N1 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı



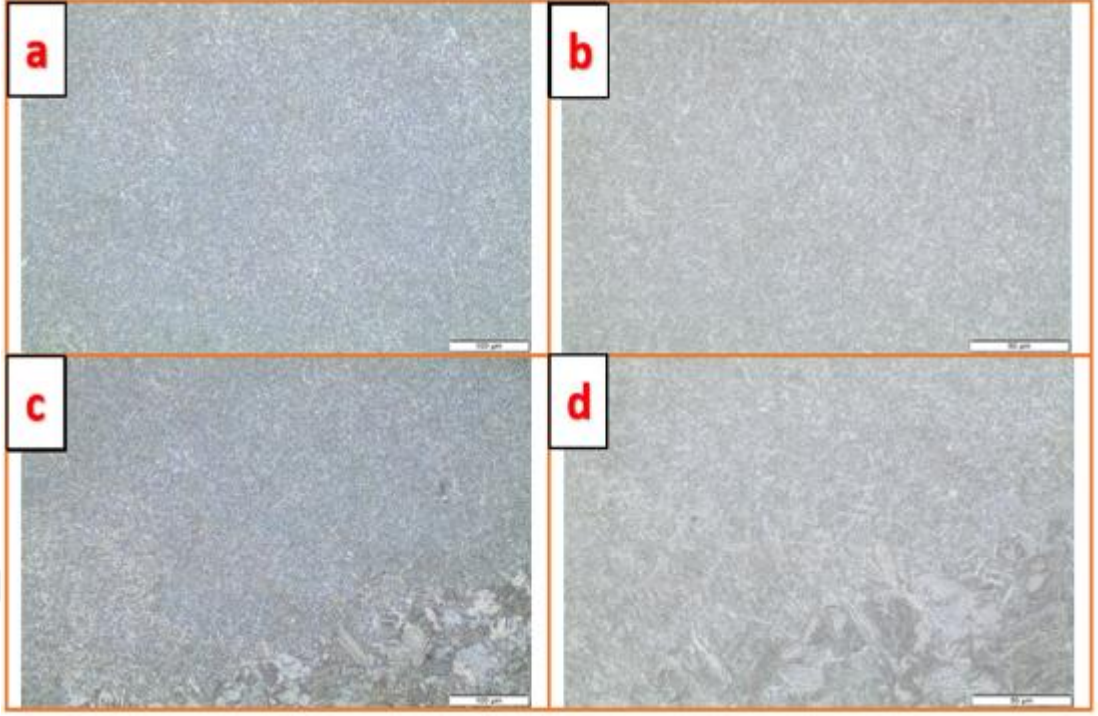
Şekil 8.13 N2 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı



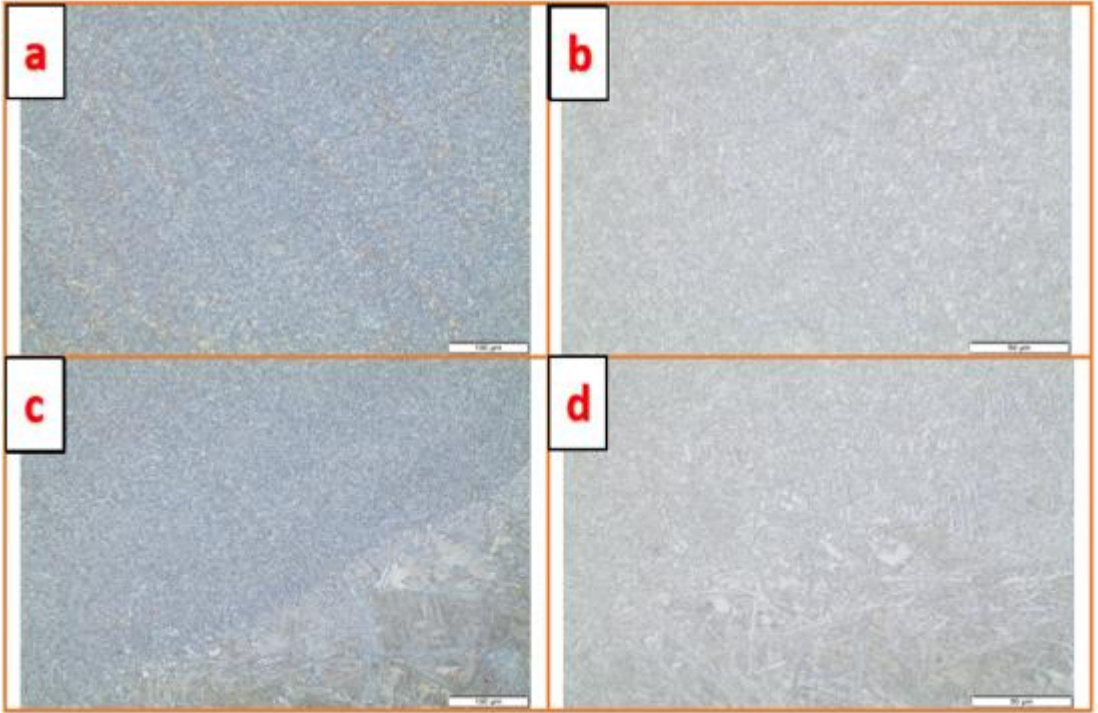
Şekil 8.14 N3 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı

Citochromax kodlu örtülü elektrod, östenitik paslanmaz çelik elektrodlar sınıfındadır. Östenitik paslanmaz çelik elektrod yaklaşık ağırlıkça %8 Ni içermektedir. Bu oran östenit fazının oluşumunu doğrudan etkilemektedir. Aslında, bu elektrod ile östenitik yapı oluşumu gerçekleşirken, birleşme işlemlerinin gerçekleşmesi ile birlikte östenitik matrisin içerisinde sınırlı miktarda delta ferrit oluşumu ile kaynak metalinde, özellikle tane sınırlarında ferritik yapılar oluşmaktadır (Abo Al Ela vd., 2013). Kaynak metali ve ergime hattına ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; ilave metalin kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak kaynak metalinde östenitik yapıların meydana geldiği ve tane sınırlarında ise delta ferrit oluşumları görülmektedir. Benzer çalışmalarda da mikroyapı bu şekilde yorumlanmıştır (Abo Al Ela vd., 2013). Kaynak metalinde dentritik ve sütunsal yapıların meydana geldiği ve tanelerin ısı akış yönüne ters olacak şekilde kaynak metalinin merkezine doğru yönlendiği de görülmüştür.

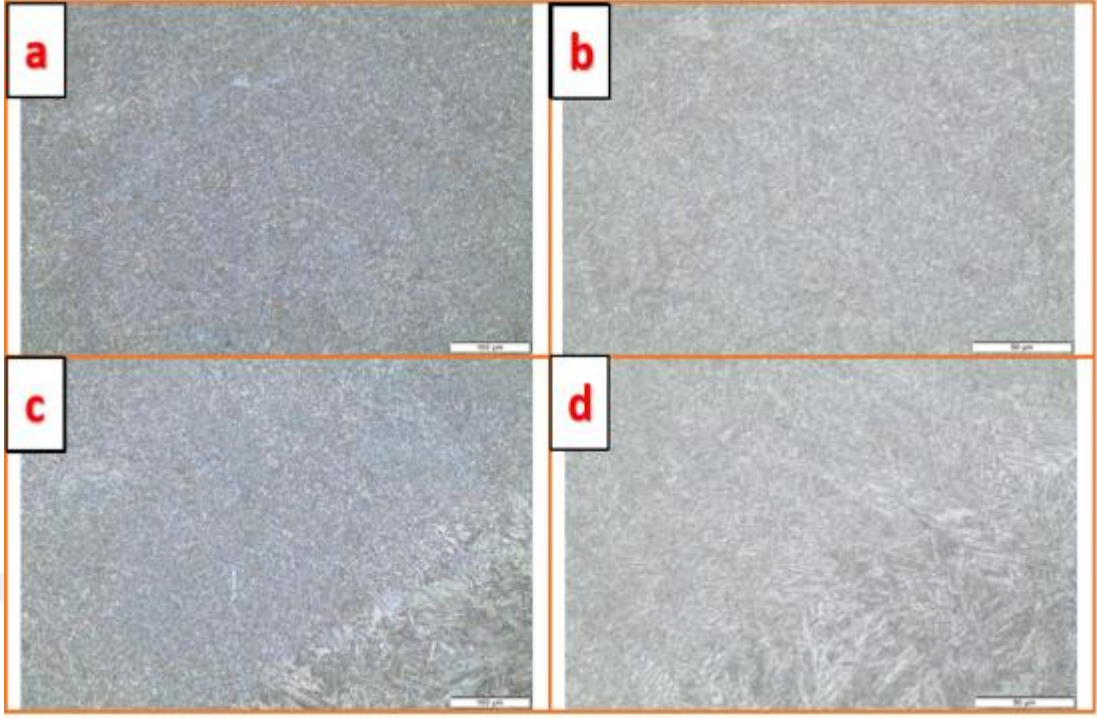
Ø3,25 mm çapındaki Tenacito 80 kodlu elektrodla farklı akım şiddeti değerlerinde 100, 110 ve 120 A akım şiddetinde yapılan N4, N5 ve N6 numaralı birleştirmelerin kaynak metali ve geçiş bölgesi mikroyapılarının görüntüleri Şekil 8.15-Şekil 8.17'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 8.15 N4 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı



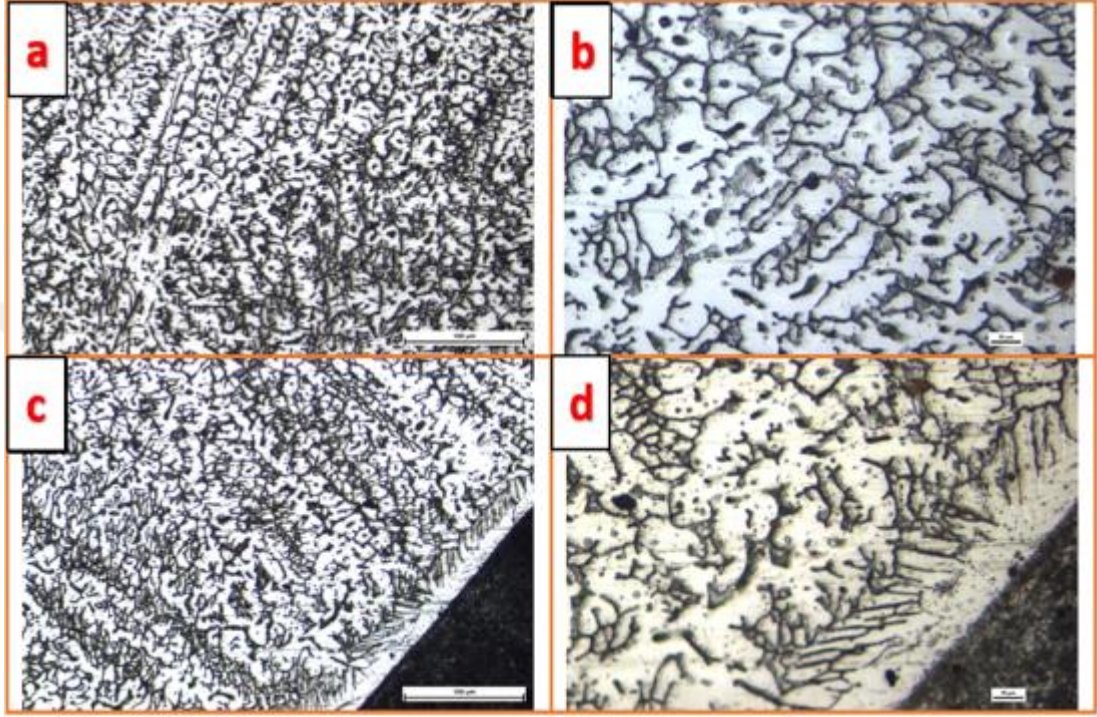
Şekil 8.16 N5 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı



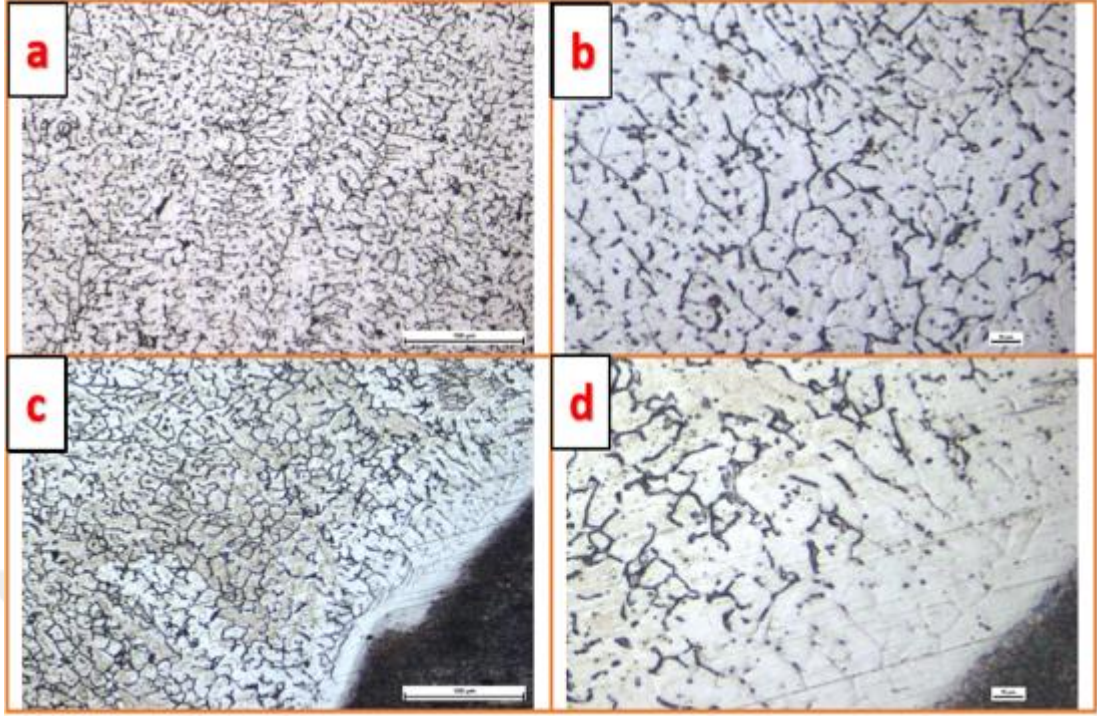
Şekil 8.17 N6 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı

Tenacito 80 kodlu elektrod, çok düşük hidrojen oranına sahip kalın örtülü bazik tip, düşük karbon ve alaşımlı ferritik bir elektrod türüdür. Düşük karbon düzeyine sahip elektrodlar, östenitik veya östenitik-ferritik yapılara göre daha güçlü olan asiküler ferrit veya martenzit ve beynit oluşumuna olanak tanımaktadır. Düşük karbonlu çeliklerin kaynaklı birleştirme işlemlerinde dayanım ve tokluğun iyi bir kombinasyonu, östenit tanelerinin içerisinde iç içe geçmiş ferrit plakalarından oluşan ve düşük karbonlu çeliklerde en çok istenen yapı olan asiküler ferrit mikroyapısından meydana gelir. Asiküler ferrit ile ince taneli yapılar oluşmakta ve buna bağlı olarak kaynaklı birleştirmelerde yüksek mekanik özellikler görülebilmektedir (Abo Al Ela vd., 2013). Şekil 8.15–Şekil 8.17’de Ø3,25 mm Tenacito 80 kodlu kalın örtülü bazik tip elektrod ile 100, 110 ve 120 Amper akım şiddeti değerlerinde kaynaklı birleştirme işlemleri gerçekleştirilen N4, N5 ve N6 numaralı deneylerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Kaynak metali ve ergime hattına ait görüntüler incelendiğinde; asiküler ferrit yapının meydana geldiği görülmüştür. Elektrod yapısında bulunan yüksek Mn ve Ni içeriğinden dolayı soğuma oranında düşüş meydana gelmesi ile birlikte ince taneli yapı oluşumu gerçekleşmiştir.

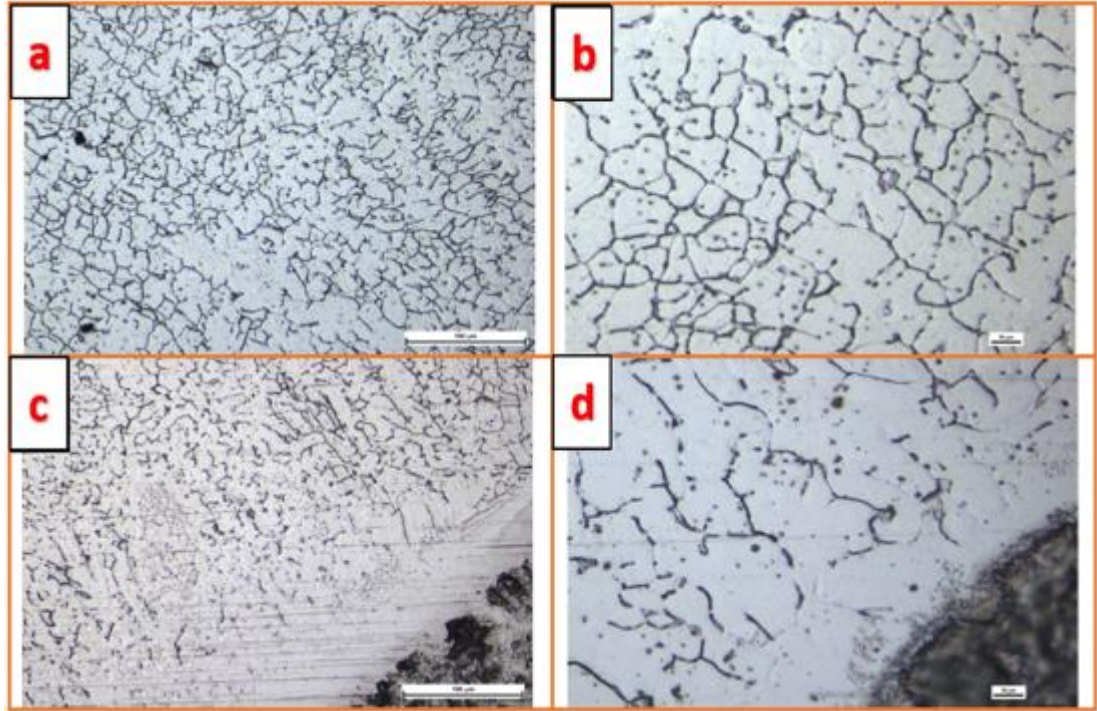
Ø2,5 mm çapındaki EI 312/E 106 kodlu elektrodla farklı akım şiddeti değerlerinde 70, 80 ve 90 A akım şiddeti ile yapılan N7, N8 ve N9 numaralı birleştirmelerin kaynak metali ve geçiş bölgesi mikroyapılarının görüntüleri Şekil 8.18, Şekil 8.19 ve Şekil 8.20’de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 8.18 N7 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı



Şekil 8.19 N8 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı

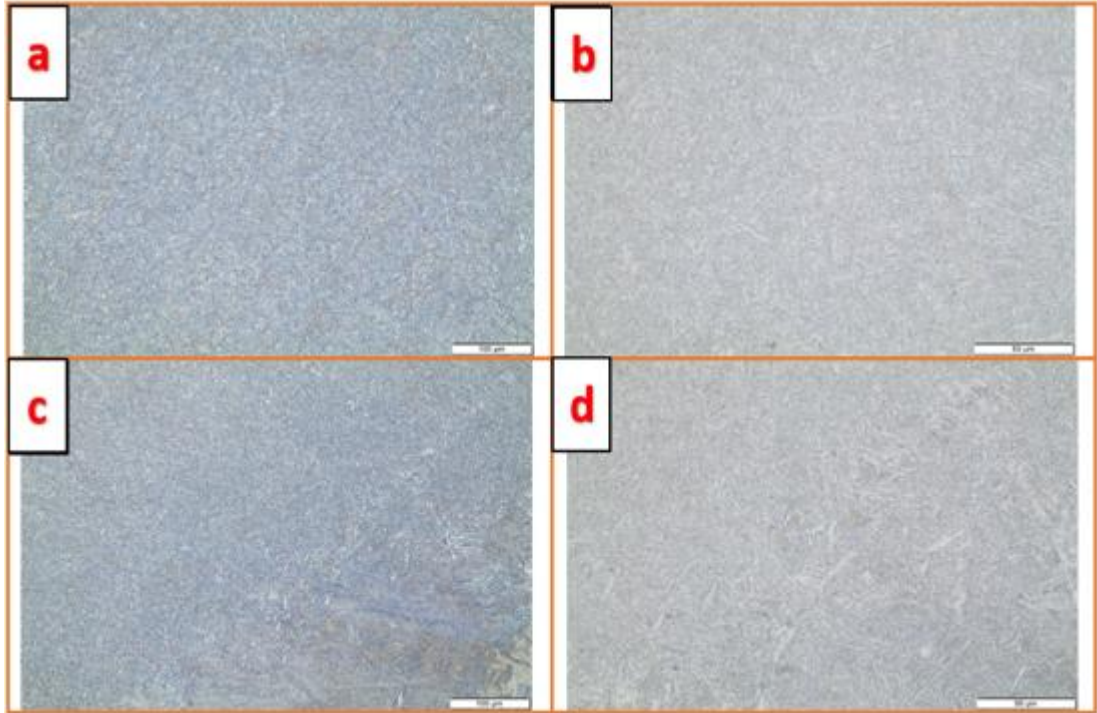


Şekil 8.20 N9 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı

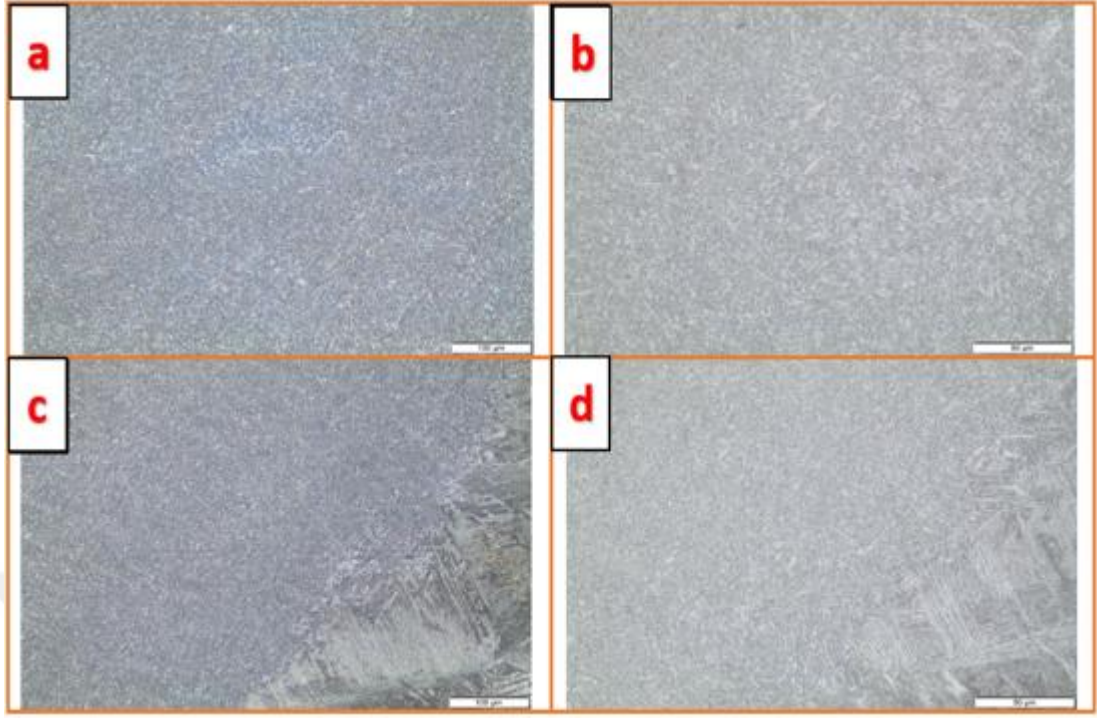
EI 312/E 106 kodlu elektrod, rutil örtülü ferritik – östenitik (dubleks) yapıya sahip paslanmaz çelik elektrodlarından biridir. %16-30 Cr ve en az %8 Ni içeriğe sahip olan

bu elektrod, genellikle östenitik yapı ile tek fazlı bir yapı sergilemektedir. Fakat kaynak işlemi sonrasında bu malzemede ferrit yapılarının oluşumu gerçekleşebilmektedir. Ferrit yapısının oluşumu ile birlikte kaynak hatalarından biri olan sıcak çatlağın önüne geçilebilir (Syahrani vd., 2018). Şekil 8.18 – Şekil 8.20’de kaynak metali ve ergime hattına ait görüntülerin verildiği mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; literatürden de destek alınarak östenit ve delta ferrit yapılarının meydana geldiği tespit edilmiştir (Syahrani vd., 2018). Ek olarak, akım şiddetinin artması ile birlikte ısı girdisinde artış meydana geldiği ve buna bağlı olarak tanelerin boyutlarında artış meydana geldiği görülmektedir. Akım şiddetinin artması ile birlikte dendritler arasındaki mesafelerde de artış meydana geldiği görülmüştür.

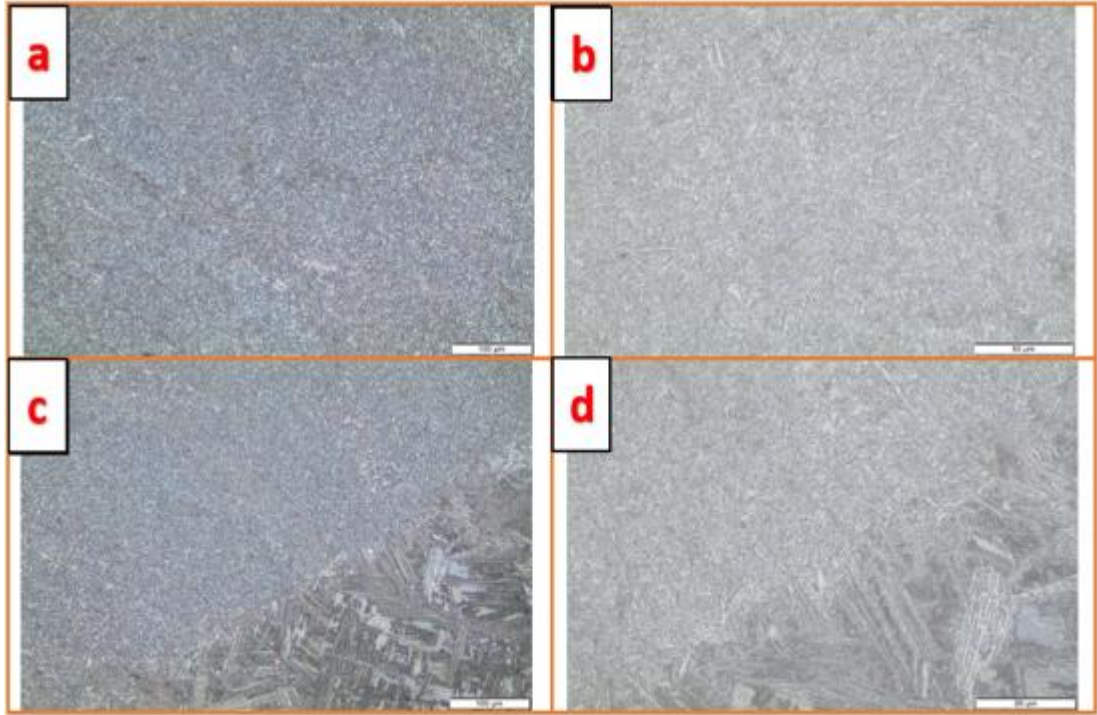
Şekil 8.21–Şekil 8.23’te EM 180 kodlu Ø2,5 mm çapındaki kalın örtülü bazik tip elektrod ile sırasıyla 70, 80 ve 90 A akım şiddeti değerlerinde yapılan N10, N11 ve N12 numaralı deneylerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8.21 N10 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı



Şekil 8.22 N11 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı

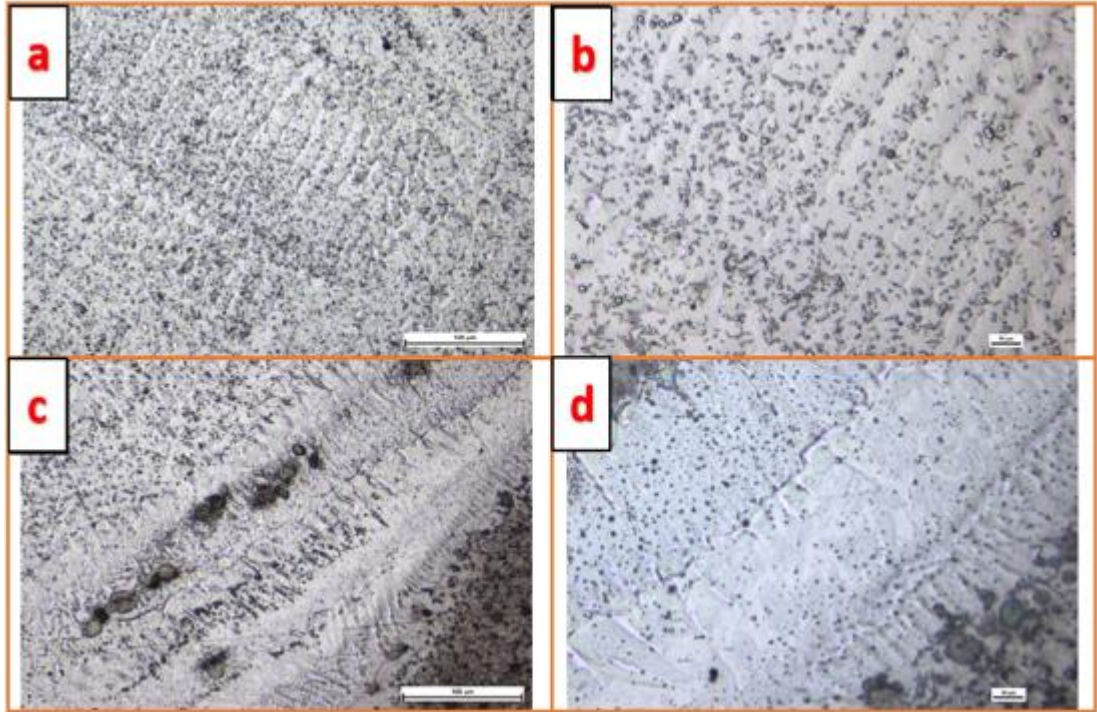


Şekil 8.23 N12 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı

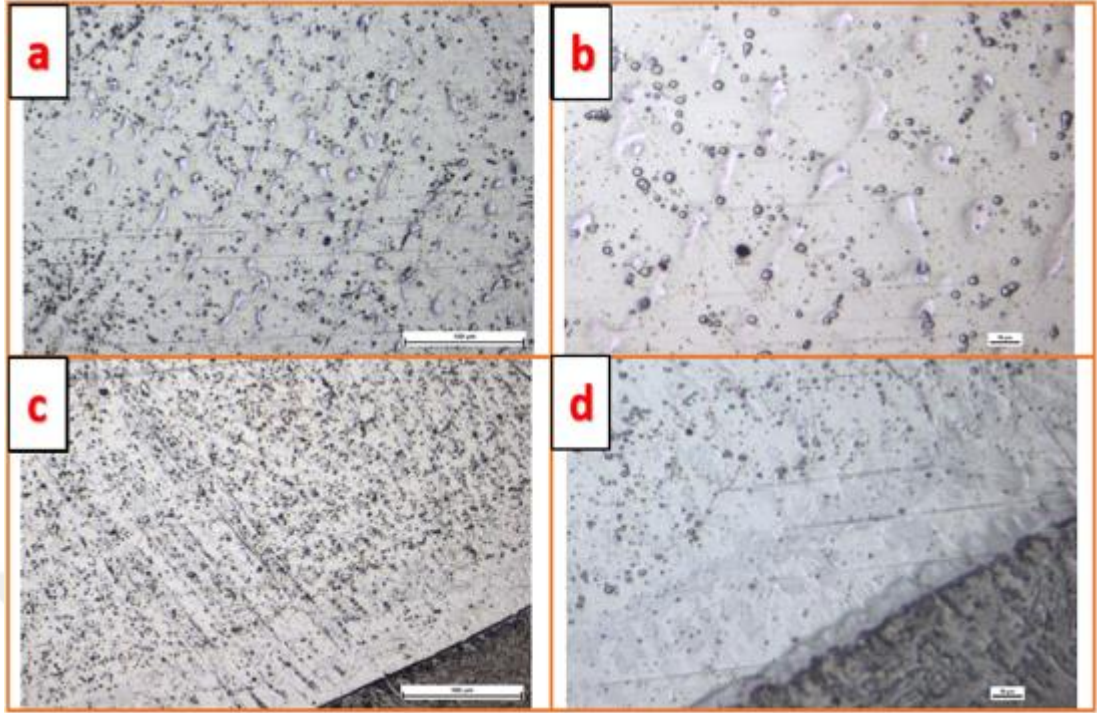
Şekil 8.21–Şekil 8.23’te mikroyapı görüntüleri verilen EM 180 kodlu elektrod, çok düşük hidrojen oranına sahip, bazık tip, kalın örtülü, düşük karbon ve alaşımlı ferritik

bir elektrodur. Düşük karbon oranına sahip elektrodlarda östenitik-ferritik ve östenitik yapılara göre daha dayanımı yüksek olan asiküler ferrit, martenzit veya beynit yapılarının oluşumu gerçekleşebilmektedir. Düşük karbonlu çeliklerin kaynaklı birleştirme işleminde dayanım ve tokluğun iyi bir kombinasyonu, östenit tanelerinin içerisinde iç içe geçmiş ferrit plakalarından oluşan ve düşük karbonlu çeliklerde en çok istenen yapı olan ince taneli asiküler ferrit mikroyapısı meydana gelmiştir. İnce taneli yapı oluşumuna bağlı olarak kaynaklı birleştirme sonrasında malzeme, yüksek mekanik özellikler sergileyebilmektedir (Abo Al Ela vd., 2013). Kaynak metali ve ergime hattına ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; asiküler ferrit yapının hâkim olduğu görülmüştür. Elektrod yapısında bulunan yüksek Mn ve Ni içeriğinden dolayı soğuma oranında düşüş meydana gelmiş ve ince taneli yapı oluşumu gerçekleşmiştir.

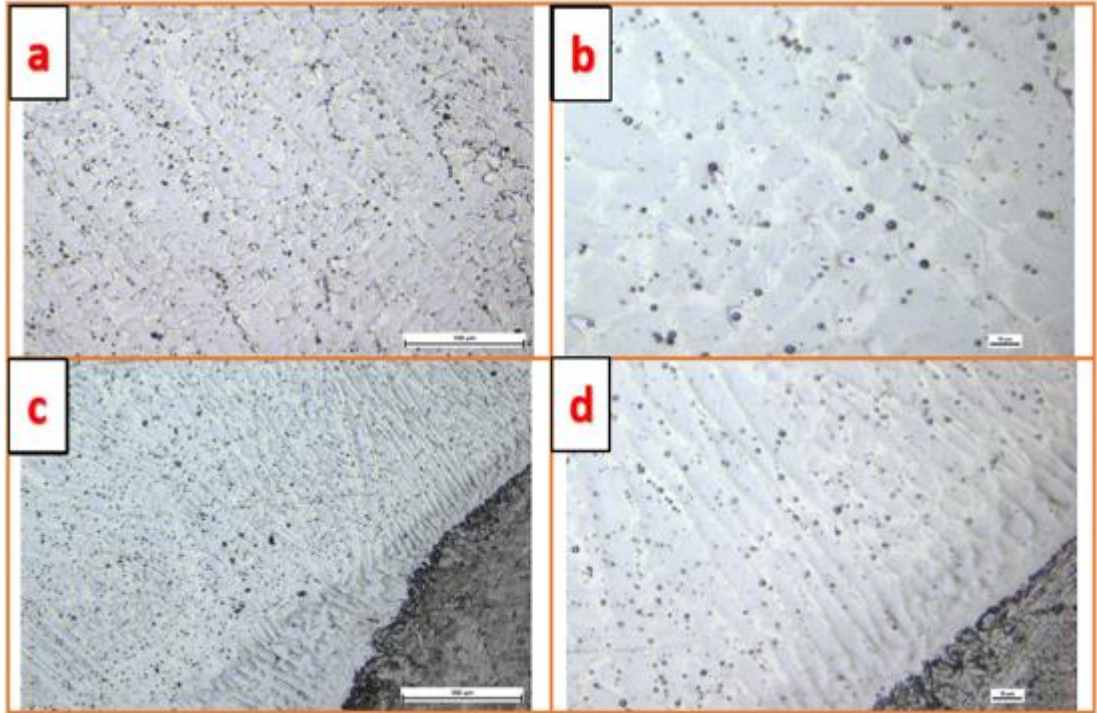
Şekil 8.24–Şekil 8.26’da Ø2,5 mm çapındaki EI 307B kodlu östenitik paslanmaz çelik elektrod ile 70, 80 ve 90 A akım şiddeti değerlerinde kaynaklı birleştirme işlemi gerçekleştirilen sırasıyla N13, N14 ve N15 numaralı deneylere ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8.24 N13 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı



Şekil 8.25 N14 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı

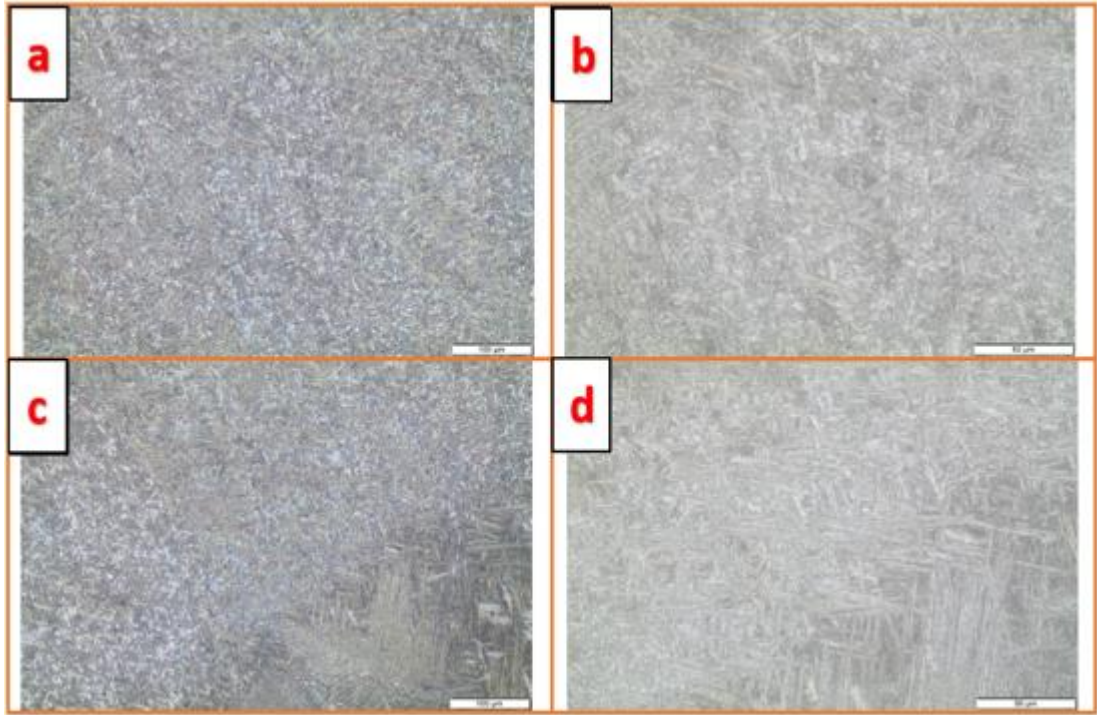


Şekil 8.26 N15 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı

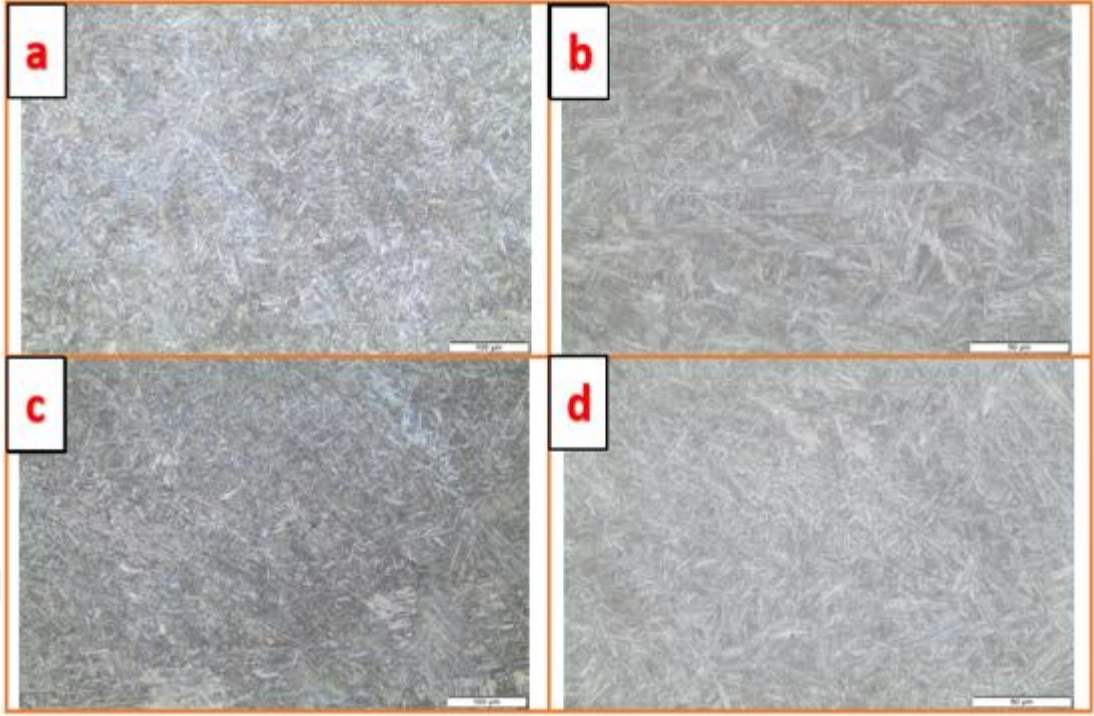
EI 307B kodlu örtülü elektrod, östenitik paslanmaz çelik elektrodlar sınıfındadır. Östenitik paslanmaz çelik elektrodlar yaklaşık ağırlıkça %8 Ni içermektedir.

Elektrodun kimyasal özelliklerine bağlı %8 Nikel oranı östenit fazının oluşumuna olanak tanır fakat ana malzemedeki ferritik yapı nedeniyle birleştirme işlemleriyle birlikte östenitik matrisin içerisinde sınırlı miktarda ferrit oluşumu da gerçekleşmektedir (Abo Al Ela vd., 2013). Literatüre bağlı kalınarak gerçekleştirilen kaynak metali ve ergime hattı görüntüleri incelendiğinde; kaynak metalinin kimyasal yapısına bağlı olarak östenitik yapının meydana geldiği ve tane sınırlarında ise delta ferrit oluşumları görülmüştür. Diğer mikroyapı fotoğraflarında görüldüğü gibi, kaynak metalinde dentritik ve sütunsal yapıların meydana geldiği ve tanelerin ısı akış yönüne ters olacak şekilde kaynak metalinin merkezine doğru yönlendiği görülmüştür.

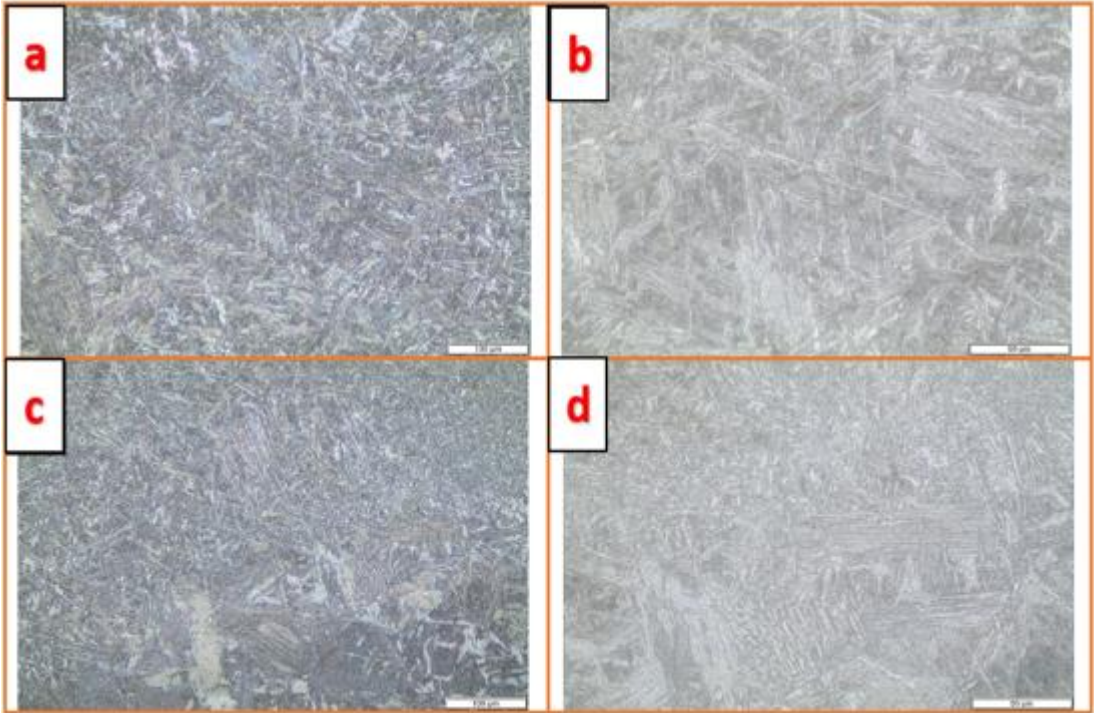
Şekil 8.27–Şekil 8.29 arasında, MG 183 kodlu, Ø1 mm çapındaki hafif alaşımlı kaynak teli ile 130, 140 ve 150 A akım şiddeti değerlerinde, N16, N17 ve N18 numaralı deneylerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8.27 N16 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı



Şekil 8.28 N17 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı

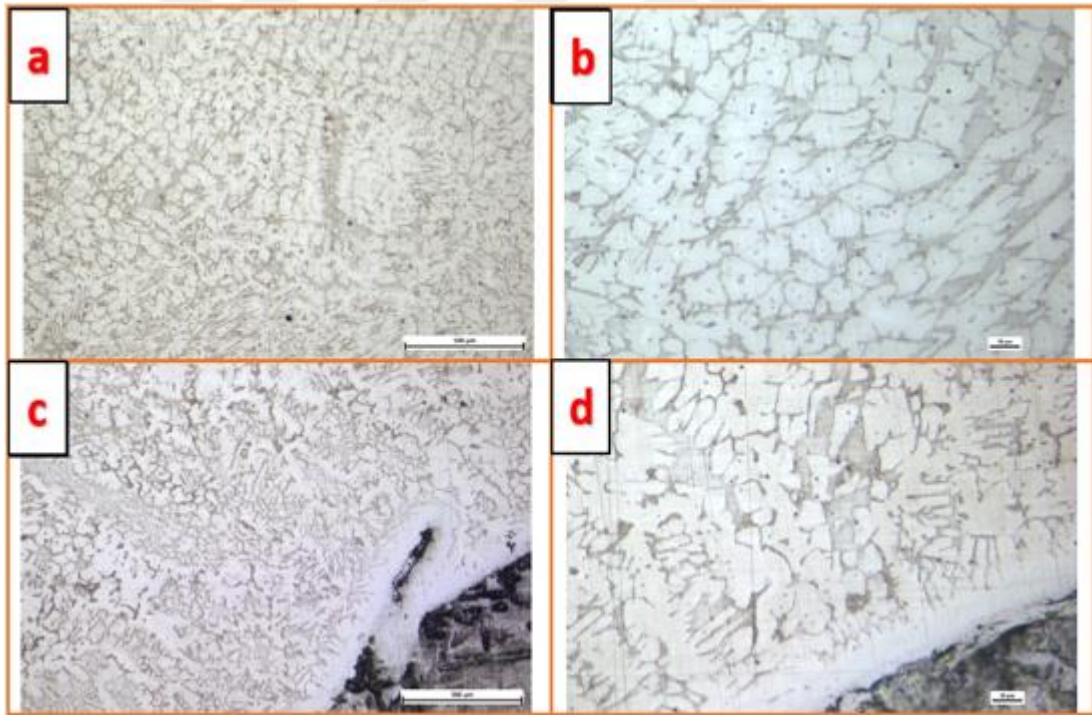


Şekil 8.29 N18 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı

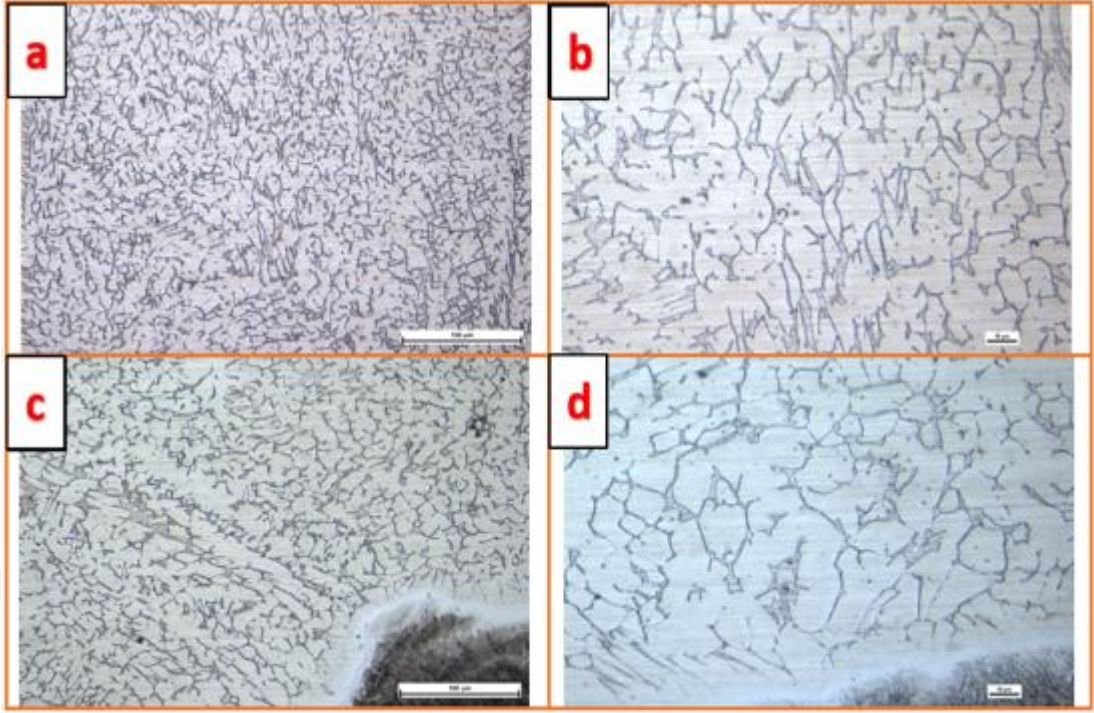
Şekil 8.27–Şekil 8.29 arasında mikroyapı görüntüleri verilen birleştirmelerde kullanılan MG 183 kodlu kaynak teli, ferritik yapıya sahip hafif alaşımlı bir kaynak

telidir. Hafif alaşım ve düşük karbon yapısına sahip kaynak telinde iç içe geçen iğnemsî ve asiküler ferritin meydana gelmesi mümkündür. Östenitik ve östenitik-ferritik (dubleks) yapıya göre daha güçlü olan asiküler ferrit, ince ve iç içe geçmiş yapısının olması ile çatlak oluşumunu engelleyen ve mekanik özellikler konusunda üstün özellikler sergilemesi mümkün olan bir fazdır. Kaynak metali ve ergime hattına ait görüntülerin verildiği mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; iç içe geçen ve ince ferrit tabakalarından oluşan iğnemsî ferrit olarak da adlandırılan asiküler ferrit yapısının oluştuğu görülmektedir.

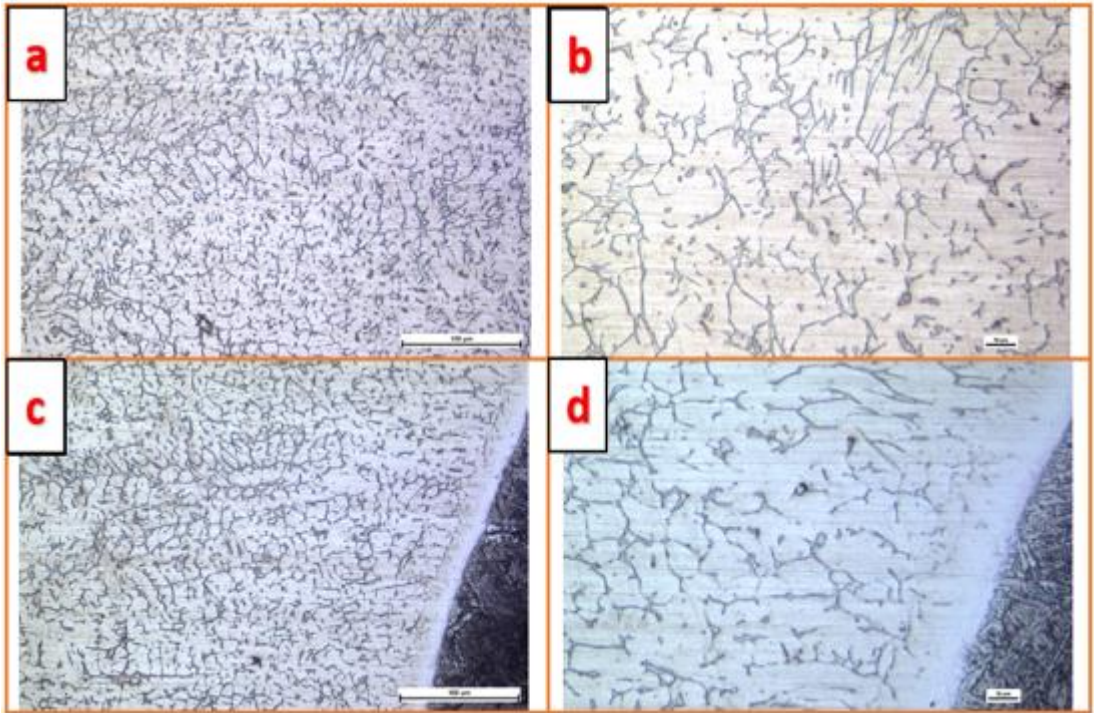
Şekil 8.30–Şekil 8.32’de MI 312 kodlu Ø1 mm çapındaki hafif alaşımli kaynak teli ile 130, 140 ve 150 A akım şiddeti değerlerinde kaynaklı birleştirme işlemi gerçekleştirilen sırasıyla N19, N20 ve N21 numaralı deneylerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8.30 N19 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı



Şekil 8.31 N20 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı

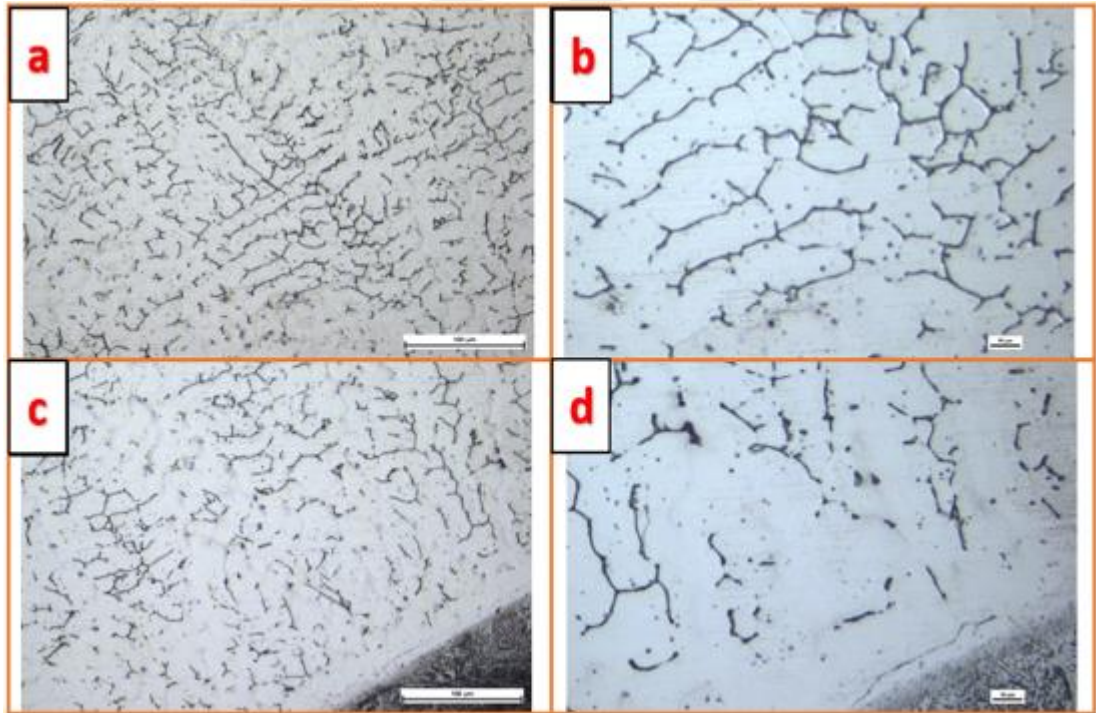


Şekil 8.32 N21 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı

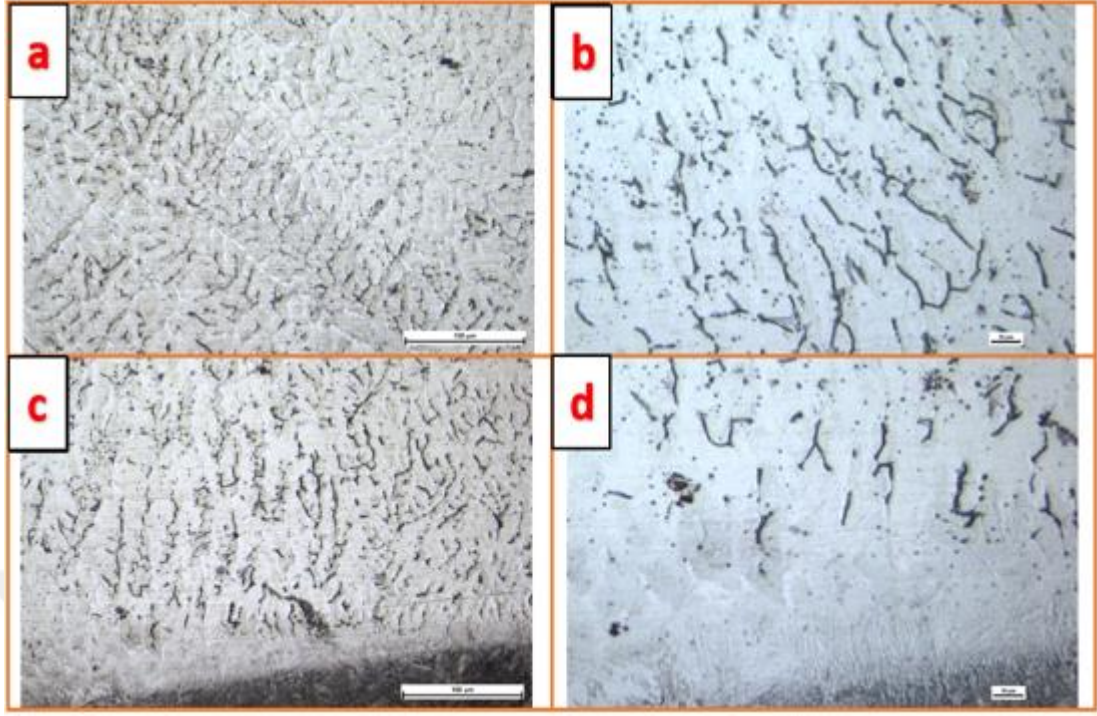
MI 312 kodlu kaynak teli, östenitik-ferritik (dubleks) yapıya ve yüksek krom ve nikel oranına sahip bir paslanmaz çelik kaynak telidir. Krom elementinin ferrit dengeleyici

alaşım elementi olduğu bilinmektedir. Yapısında yaklaşık %30 Cr ve %10 Ni bulduran kaynak teli içerisindeki yüksek krom oranından dolayı delta ferrit oluşumu mümkündür (Varmaziar vd., 2021). Kaynak metali ve ergime hattına ait görüntülerin verildiği mikroyapı görüntüleri literatür çalışmalarıyla birlikte değerlendirilerek incelendiğinde; östenitik yapı oluşumunun gerçekleştiği ve östenitik yapının yanı sıra yüksek krom oranının olması ile birlikte delta ferrit yapının meydana geldiği de görülmüştür (Varmaziar vd., 2021).

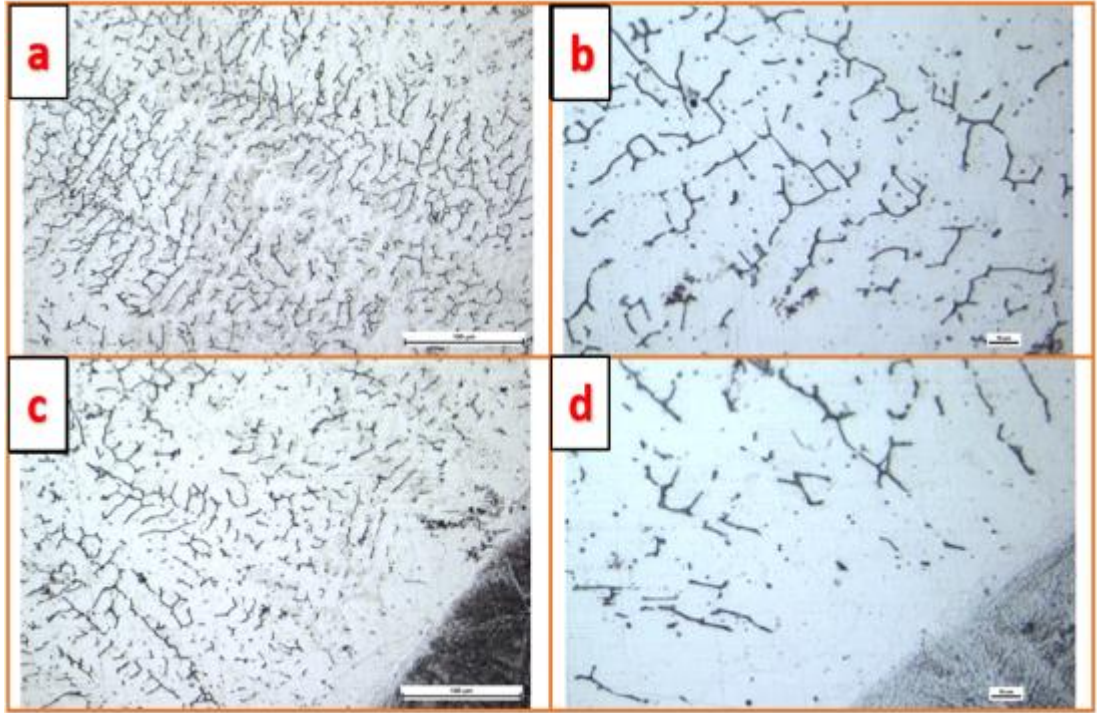
Şekil 8.33–Şekil 8.35 arasında MI 307Si kodlu Ø1mm çapındaki kaynak teli ile sırasıyla 130, 140 ve 150 A akım şiddeti değerlerinde birleştirme işlemleri gerçekleştirilen N22, N23 ve N24 numaralı deneylerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8.33 N22 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı



Şekil 8.34 N23 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı



Şekil 8.35 N24 deneyine ait mikroyapı görüntüsü a) 20x kaynak metali, b) 50x kaynak metali, c) 20x ergime hattı, d) 50x ergime hattı

MI 307Si kodlu kaynak teli, yüksek krom, nikel ve mangan oranına sahip az miktarda delta ferrit içeren bir östenitik paslanmaz çelik kaynak telidir. Kaynak telinin içerisinde

bulunan Cr ve Ni oranı, soğuma hızına etki edeceğinden delta ferrit oluşumunu ve dolayısıyla mukavemet ve tokluk gibi mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir (Cabrilo ve Geric, 2016). Kaynak metali ve ergime hattına ait görüntülerin verildiği mikroyapı görüntüleri literatüre bağlı kalınarak incelendiğinde; östenitik matris içerisinde az miktarda delta ferritik yapının meydana geldiği görülmüştür (Cabrilo ve Geric, 2016). Yine daha önceki görüntülerde olduğu gibi kaynak metalinde tanelerin ısı akış yönüne ters olacak şekilde kaynak metalinin merkezine doğru yönlendiği görülmüştür.

Mikroyapı sonuçlarının genel olarak değerlendirilmesi

Birleştirmelerin kaynak metali geçiş bölgelerinden elde edilen mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 8.12-Şekil 8.35'te verilen mikroyapı görüntüleri genel olarak incelendiğinde; kaynaklı birleştirmede uygulanan akım şiddetinin artması ile birlikte ısı girdisinin arttığı ve buna bağlı olarak ITAB'ın daha geniş bir alana yayıldığı tespit edilmiştir. En geniş ITAB bölgesi genişliği; yüksek akım şiddeti değerlerinde birleştirilen Ø1 mm çapındaki ilave tel ile yapılan MAG kaynaklı birleştirmeler ile elde edilirken, en dar ITAB bölgesi ise Ø2,5 mm çapa sahip elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde elde edilmiştir. Şekil 8.11'de verilen ITAB'da oluşan mikroyapılar incelendiğinde; ergime hattından ana malzemeye doğru gidildikçe kaba taneli bölgelerde lata tipi ve iğnesel martenzit oluşumları görülmüş ve bu durum literatürde Kurt (2022) tarafından da belirtilmiştir. Bu da elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğunu göstermektedir.

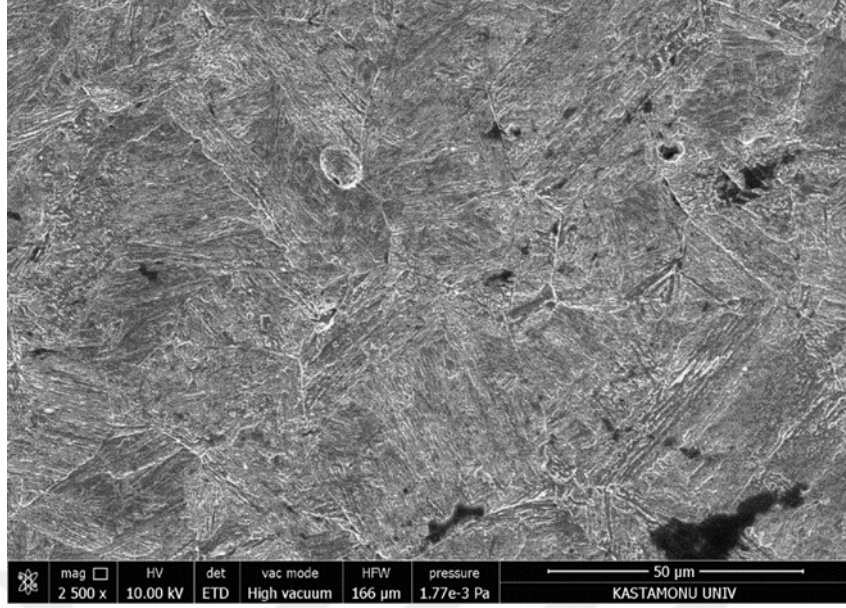
Şekil 8.12 ve Şekil 8.35 arasındaki görüntüler 200 ve 500 büyütme olarak kaynak metali ve ergime sınırını kapsamaktadır. 200 ve 500 büyütme olarak alınan görüntülere ancak kaynak metali bölgesi ile ITAB sığabilmektedir. Herhangi bir büyütme değerinde tek görüntü içerisinde tüm bölgeleri içeren düzgün bir görüntü elde edilemediği için Şekil 8.11'de ITAB'dan alınan mikroyapı görüntüleri tek görüntü içerisinde verilmiştir. Kaynak metali ve geçiş bölgesi görüntüleri ise her bir deney için 200 ve 500 büyütmede tek bir görüntü halinde verilmiştir.

Kaynak dikişinde fiziksel sınır, metalin ergime sınırındır. Parlatma ve dağlama işlemi gerçekleştirilen numunelerde bu sınır çıplak gözle rahatlıkla görülebilmekle birlikte, makroyapı görüntülerinde daha net bir şekilde görülebilmektedir. Ancak kaynak sırasında oluşan yüksek sıcaklık, ergime sınırının da ötesine etki edebilmekte ve alt kritik sıcaklık sınırına (723 °C) ulaşan bölgelere kadar değişim gerçekleşebilmektedir.

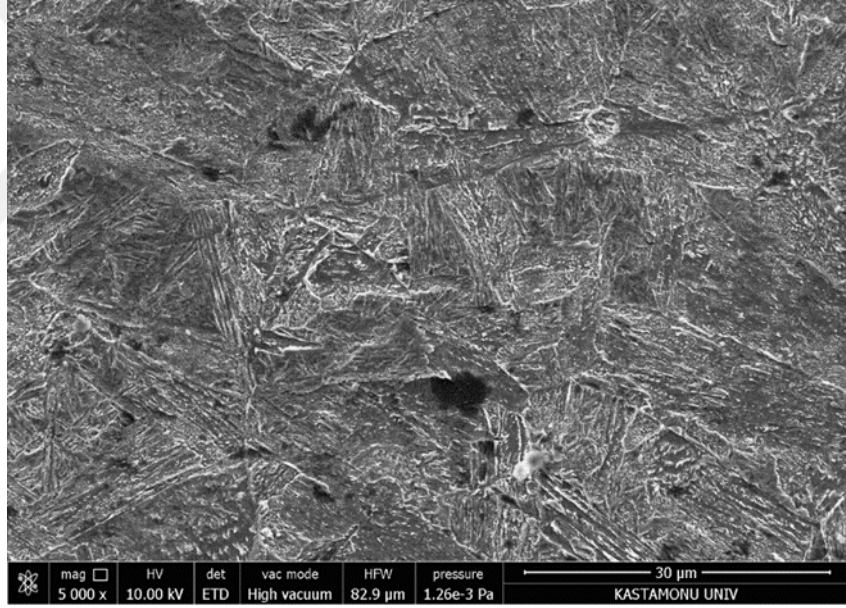
Tüm görüntüler genel olarak incelendiğinde; Citochromax, EI 312/E106, EI 307B, MI 312 ve MI 307Si kodlu kaynak metallerin, östenitik yapıda olduğu ve tane sınırlarında delta ferrit oluşumlarının olduğu tespit edilmiştir. Tenacito 80, EM 180 ve MG 183 kodlu kaynak metallere ise ince taneli yapı olan asiküler ferrit oluşumları gözlemlenmiştir. Ek olarak, akım şiddeti miktarının artmasıyla görüntülerdeki iri taneli bölgelerin ve dolayısıyla ITAB genişliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde bu durum kaynak nüfuziyeti için de söz konusudur. Akım şiddeti değerlerinin artırılmasıyla birlikte daha nüfuziyetli kaynak birleştirmeleri elde edilmiştir. Buna neden olarak, akım şiddeti miktarının artmasıyla ısı girdisinin artmasıdır. Isı girdisinin artması ve üç boyutlu ısı dağılımı ile ITAB daha geniş bir alanda oluşurken kaynak nüfuziyeti de benzer şekilde artış göstermiştir.

8.2.2 SEM İncelemeleri

Kaynaklı parçalardan alınan numunelerin ergime bölgesi ve ana malzeme kısımlarından SEM görüntülemeleri yapılmıştır. Ana malzeme ve ergime hattından 2500 ve 5000 büyütmede görüntüler alınırken daha genel bir görüntü olması adına kaynaklı birleştirmelerde ITAB bölgesinden 1500 büyütmede SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 8.36 ve Şekil 8.37’de ana malzemenin ve Şekil 8.38–Şekil 8.61 arasında ise kaynaklı birleştirmelere ait kaynak metali, ergime hattı ve ITAB bölgesine ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 8.36 Ana malzemeye (kaynaksız numune) ait 2500x SEM görüntüsü

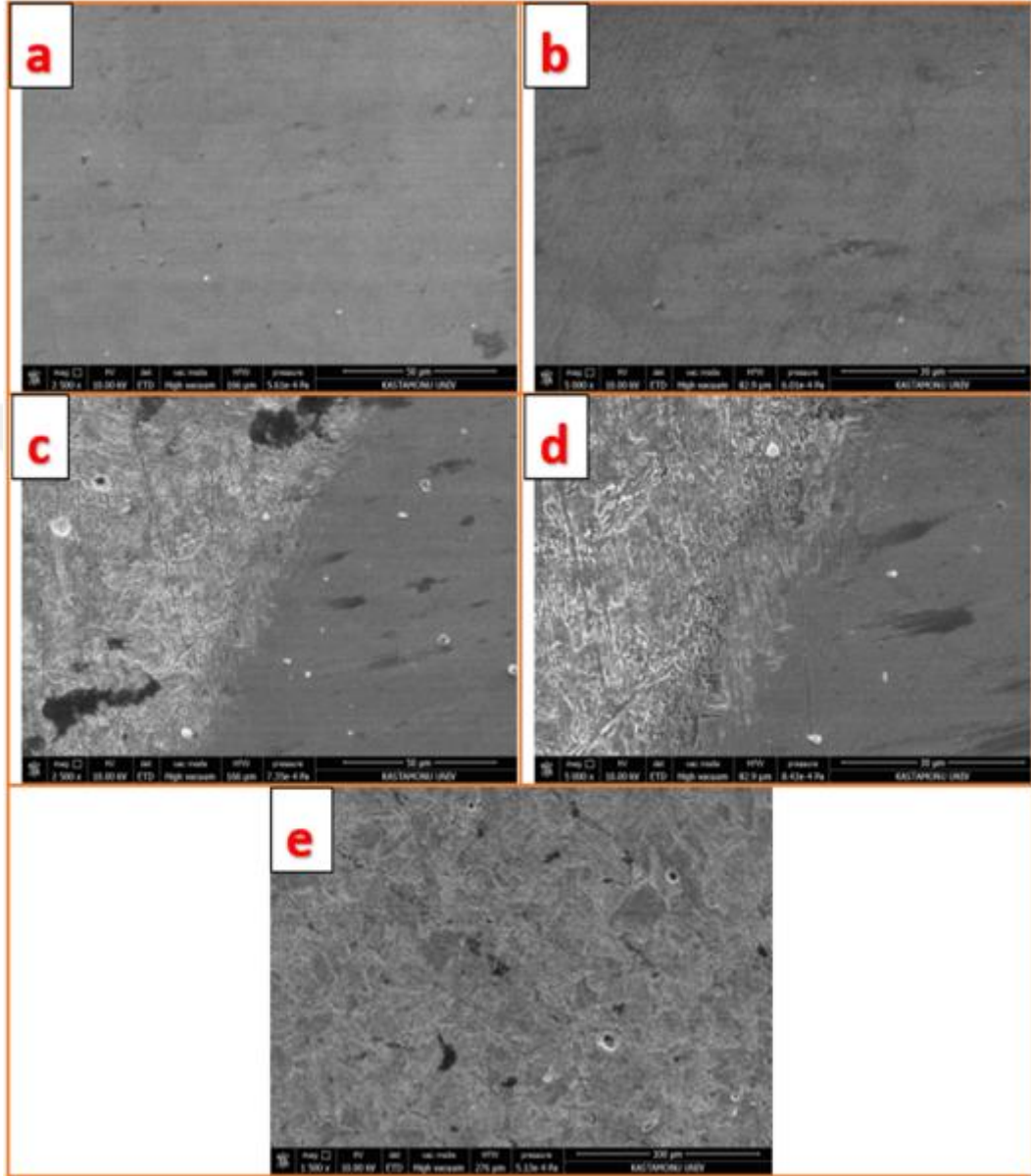


Şekil 8.37 Ana malzemeye (kaynaksız numune) ait 5000x SEM görüntüsü

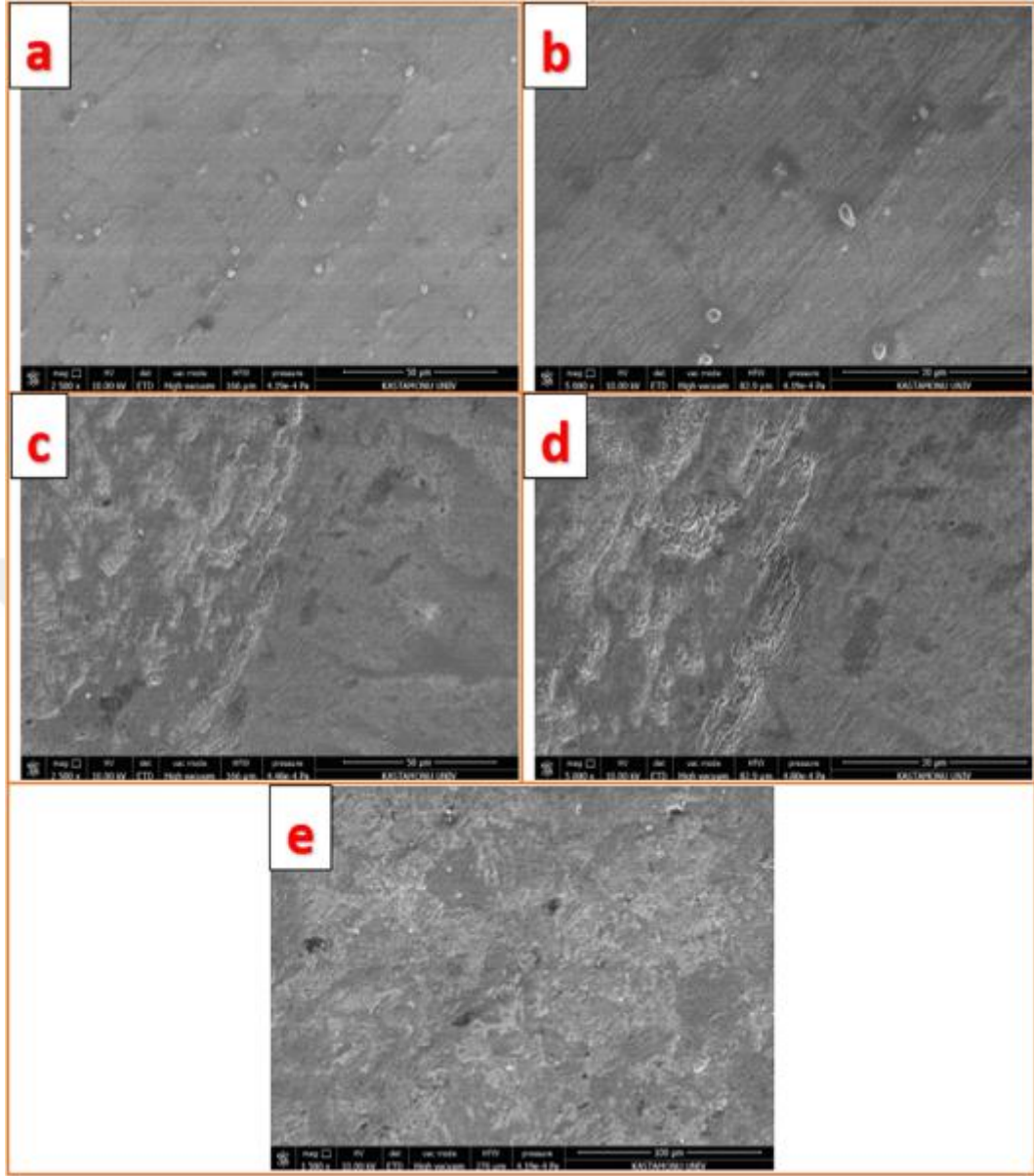
Ana malzemeden alınan SEM görüntüleri incelendiğinde; mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir. Şekil 8.9 ve Şekil 8.10’da verilen ana malzeme optik mikroskop görüntüsüne benzer olarak SEM görüntülerinde martenzitik yapının hakim olduğu görülmektedir.

Sırasıyla Şekil 8.38, Şekil 8.39 ve 8.40’ta Ø3,25 mm çapındaki Citochromax elektrod ile 100, 110 ve 120 A akım şiddeti değerlerinde birleştirilen N1, N2 ve N3 numaralı numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde kaynak metali, ergime hattı

ve ITAB bölgesine ait bölgeler verilmiş olup, aynı elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir.

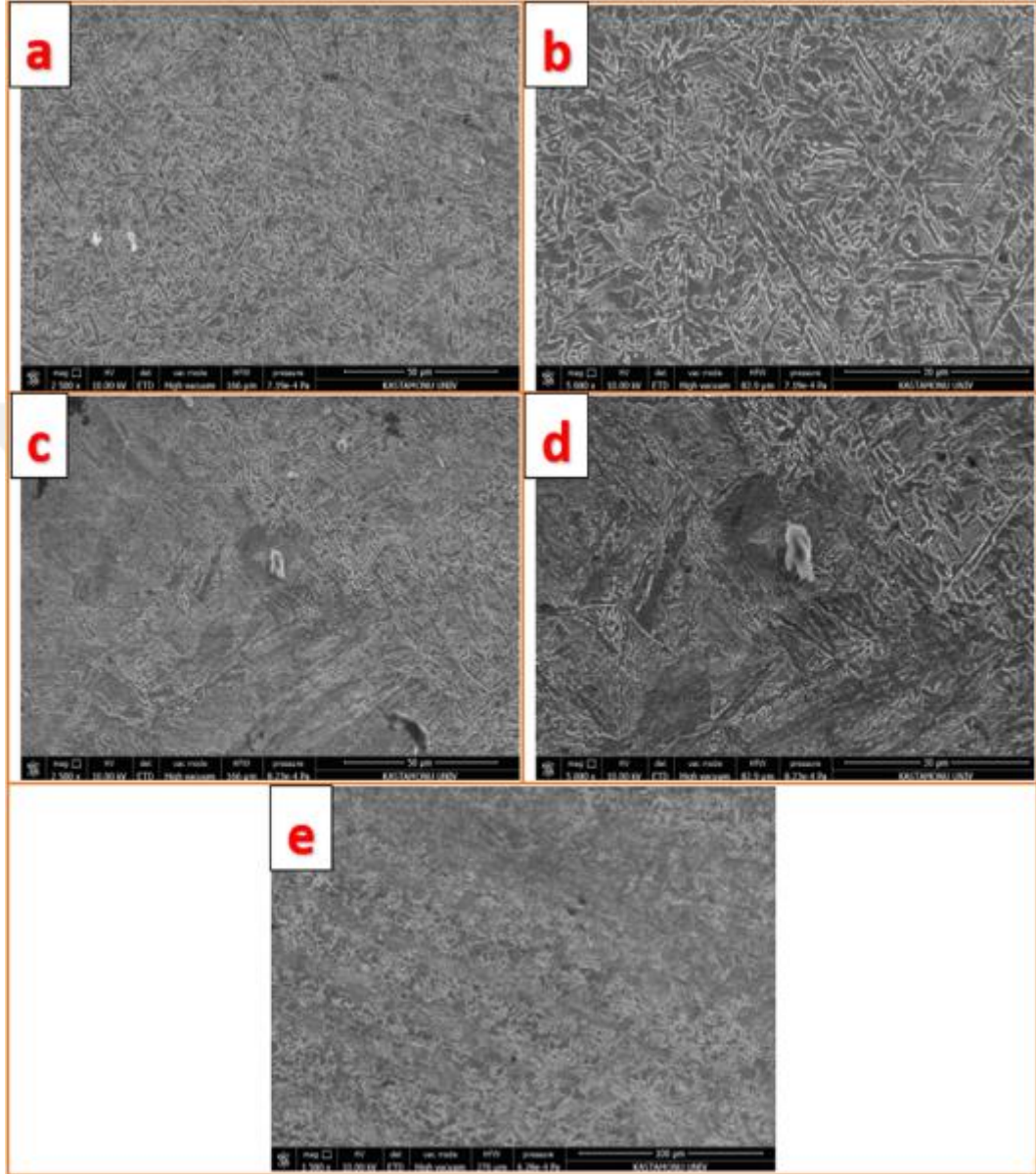


Şekil 8.38 N1 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

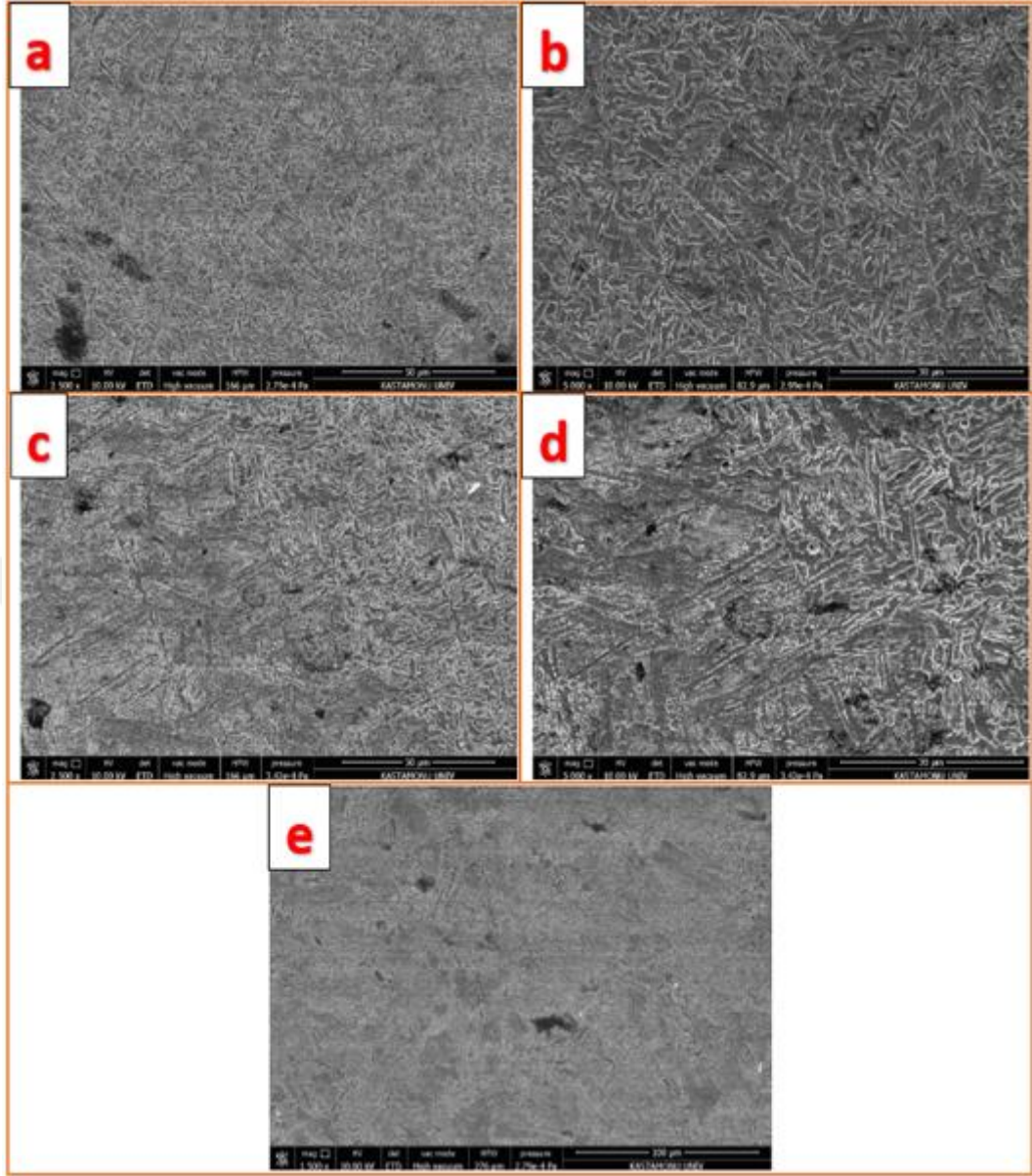


Şekil 8.39 N2 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

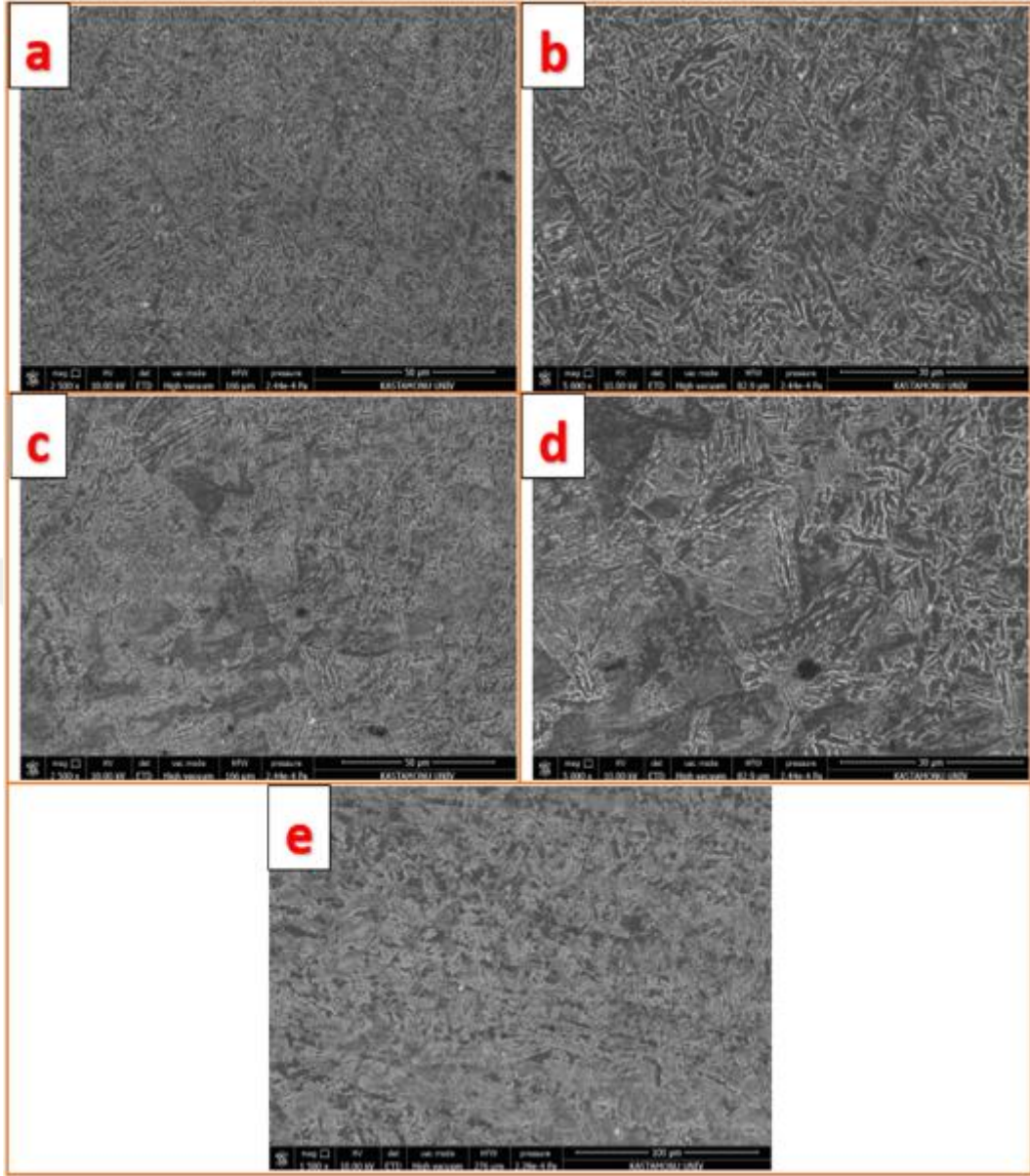
elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı görüntülerinde de benzer görüntüler elde edilmiştir.



şekil 8.41 N4 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

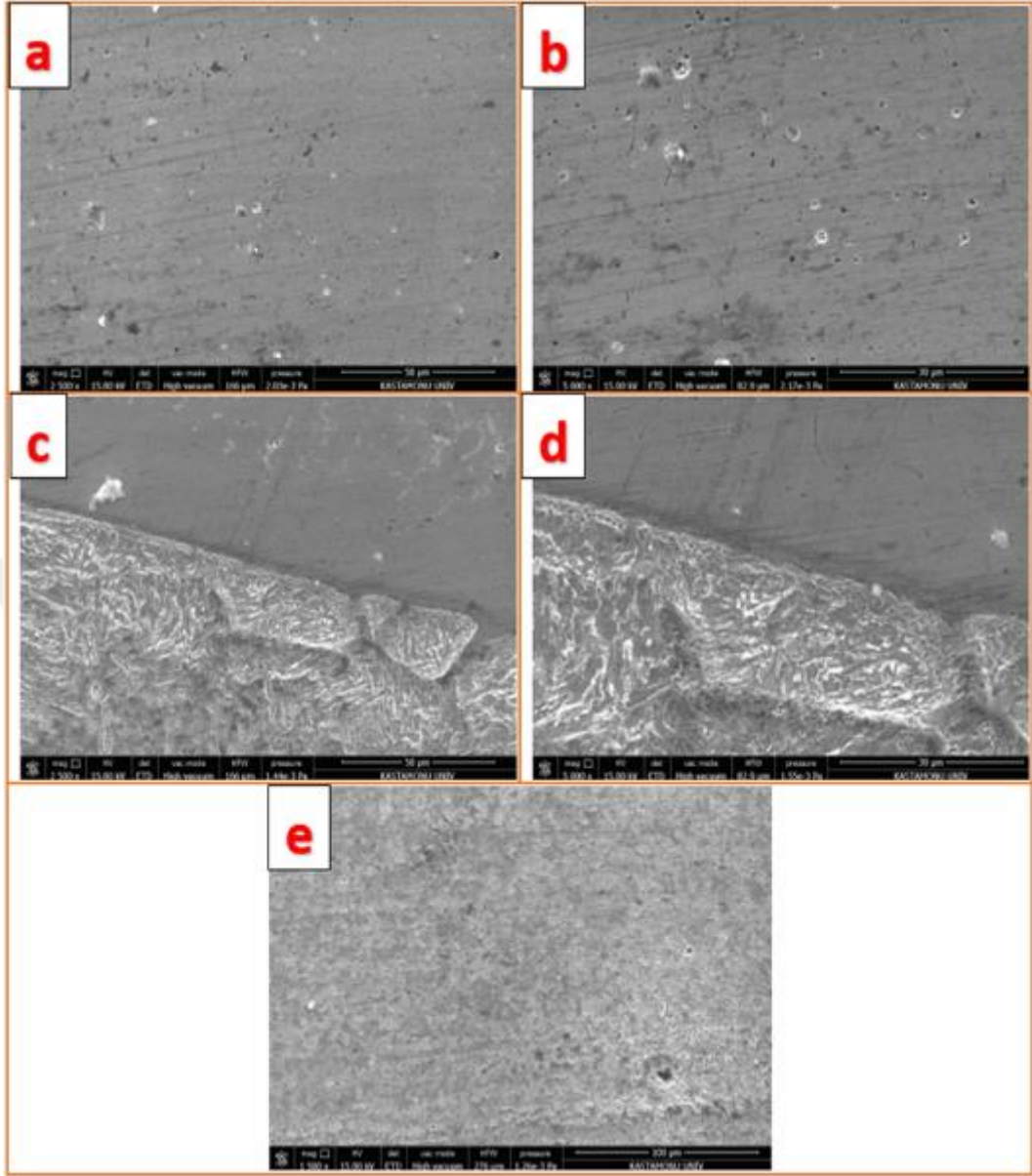


Şekil 8.42 N5 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

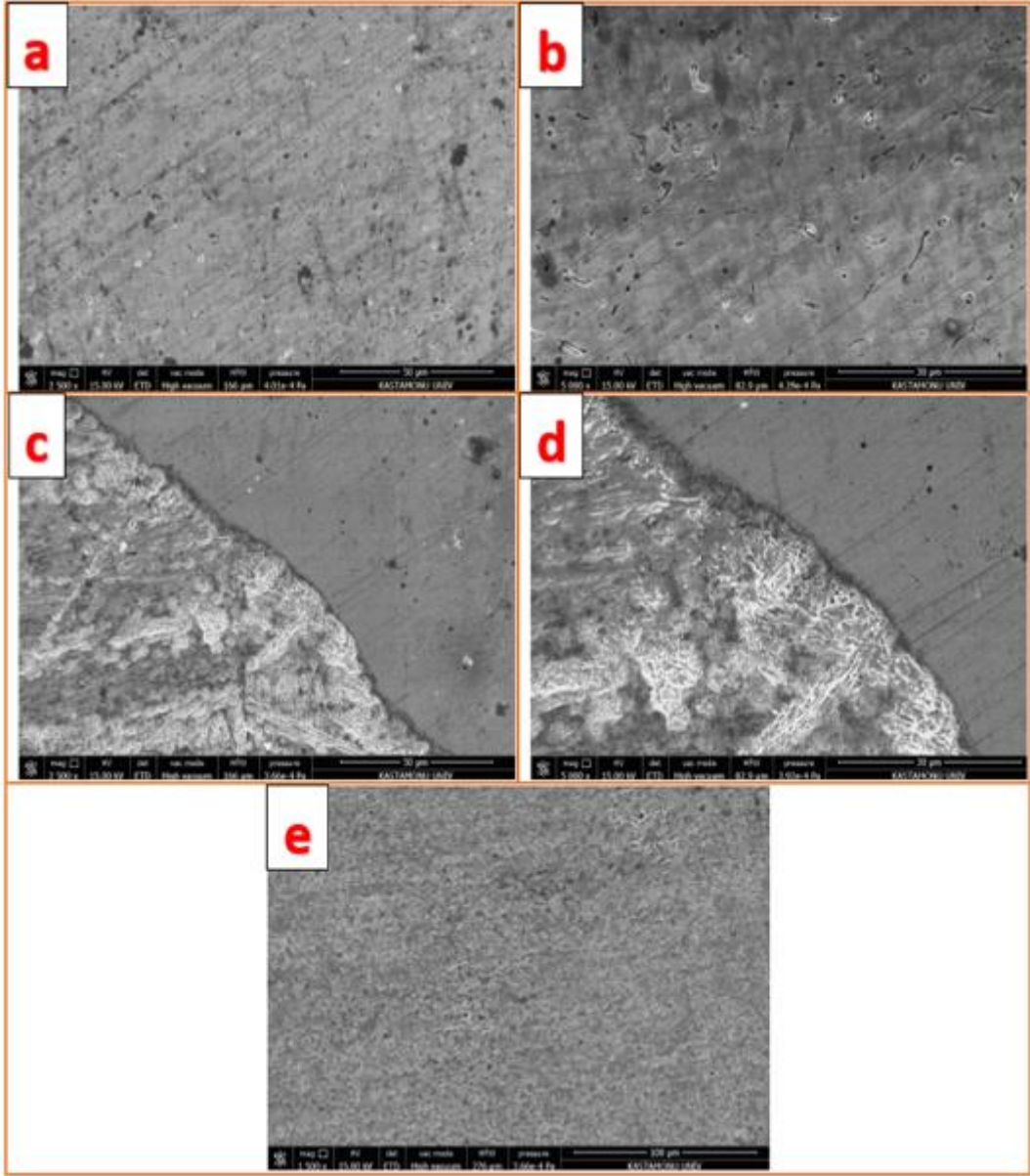


Şekil 8.43 N6 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

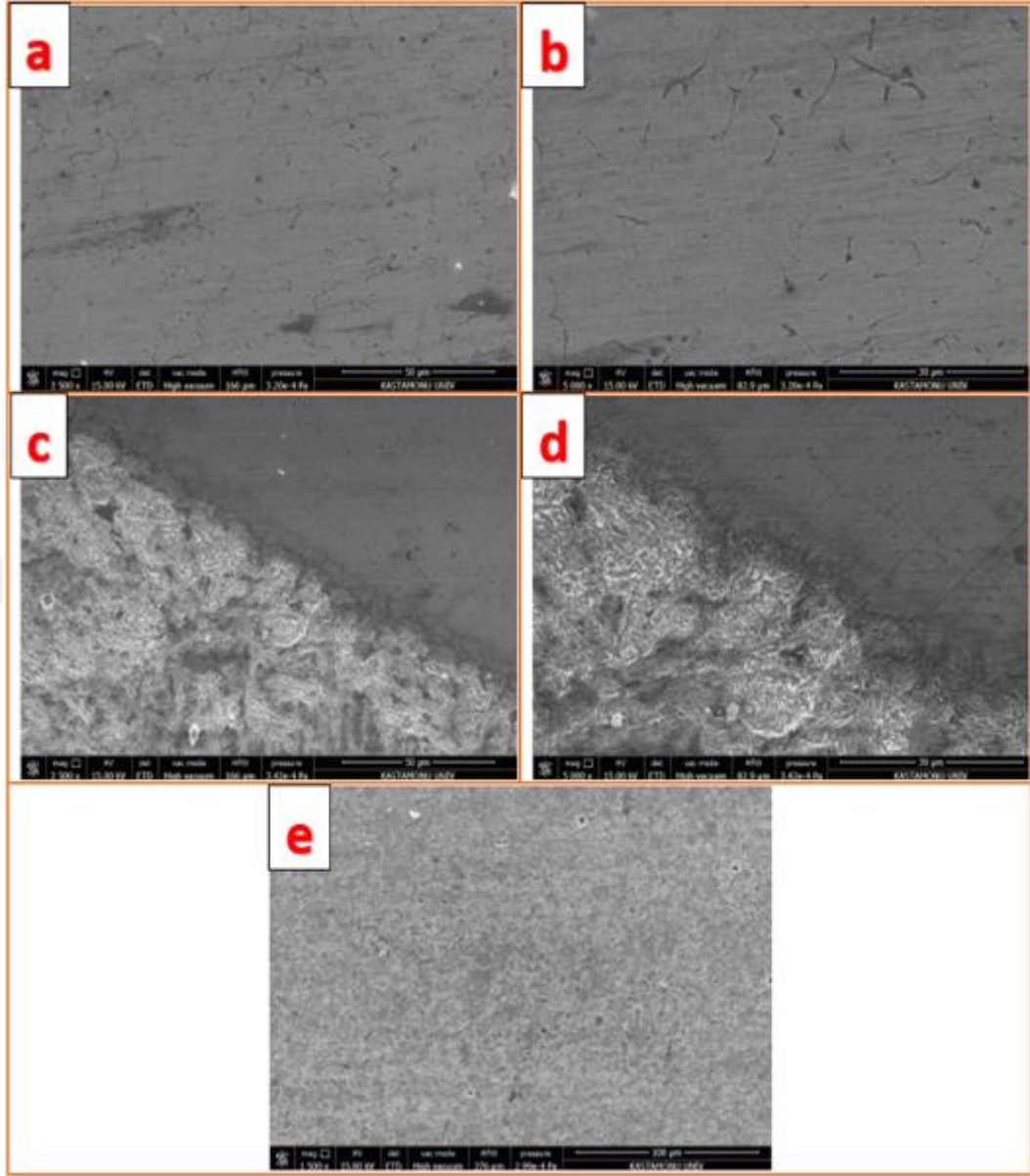
Şekil 8.44, Şekil 8.45 ve 8.46'da $\text{Ø}2,5$ mm çapındaki EI 312/ E106 kodlu elektrod ile 70, 80 ve 90 A akım şiddeti değerlerinde birleştirilen N7, N8 ve N9 numaralı numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde daha önceki görüntülerdeki gibi kaynak metali, ergime hattı ve ITAB bölgesine ait bölgeler görülmekte olup, aynı elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 8.44 N7 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

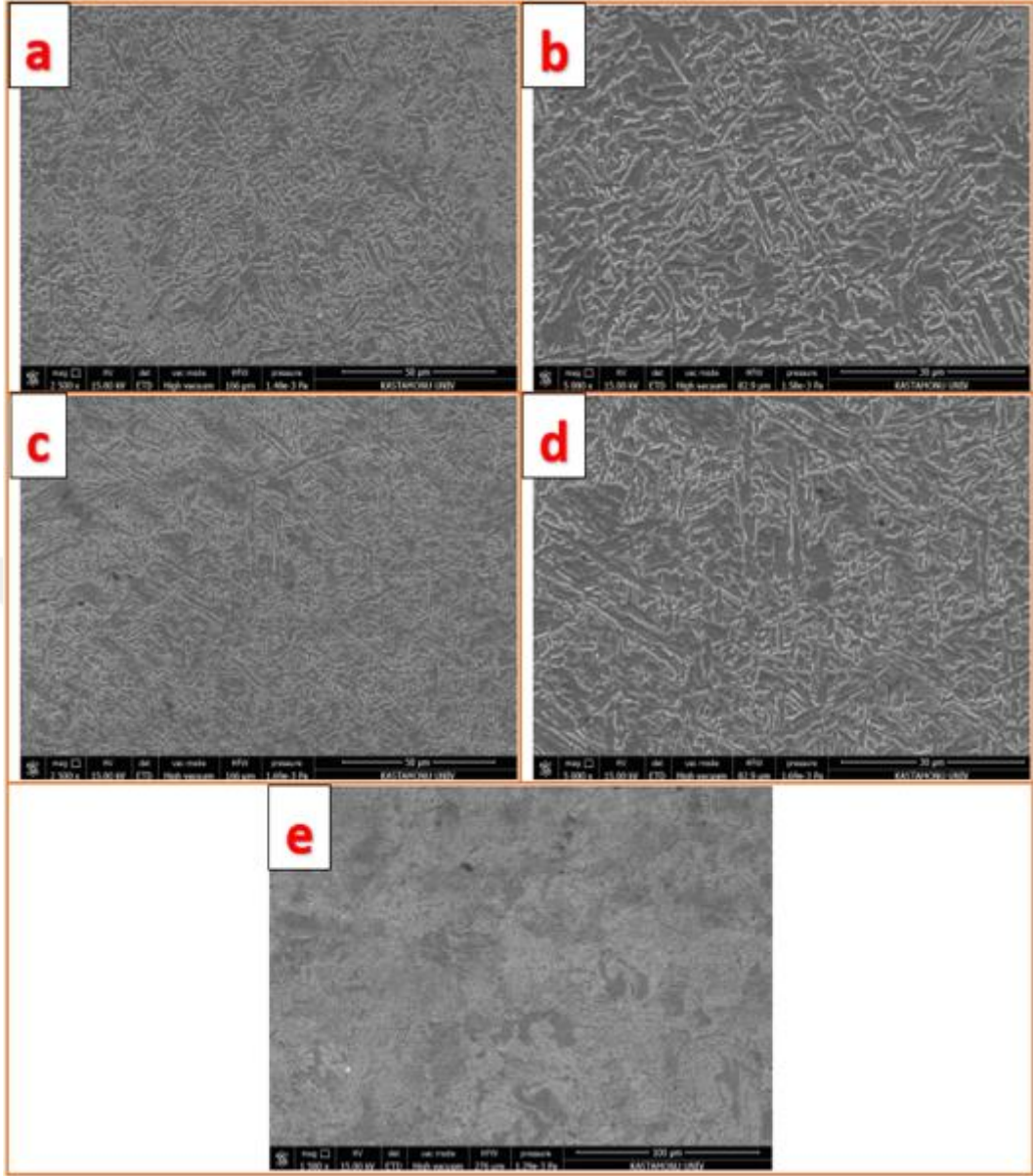


Şekil 8.45 N8 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

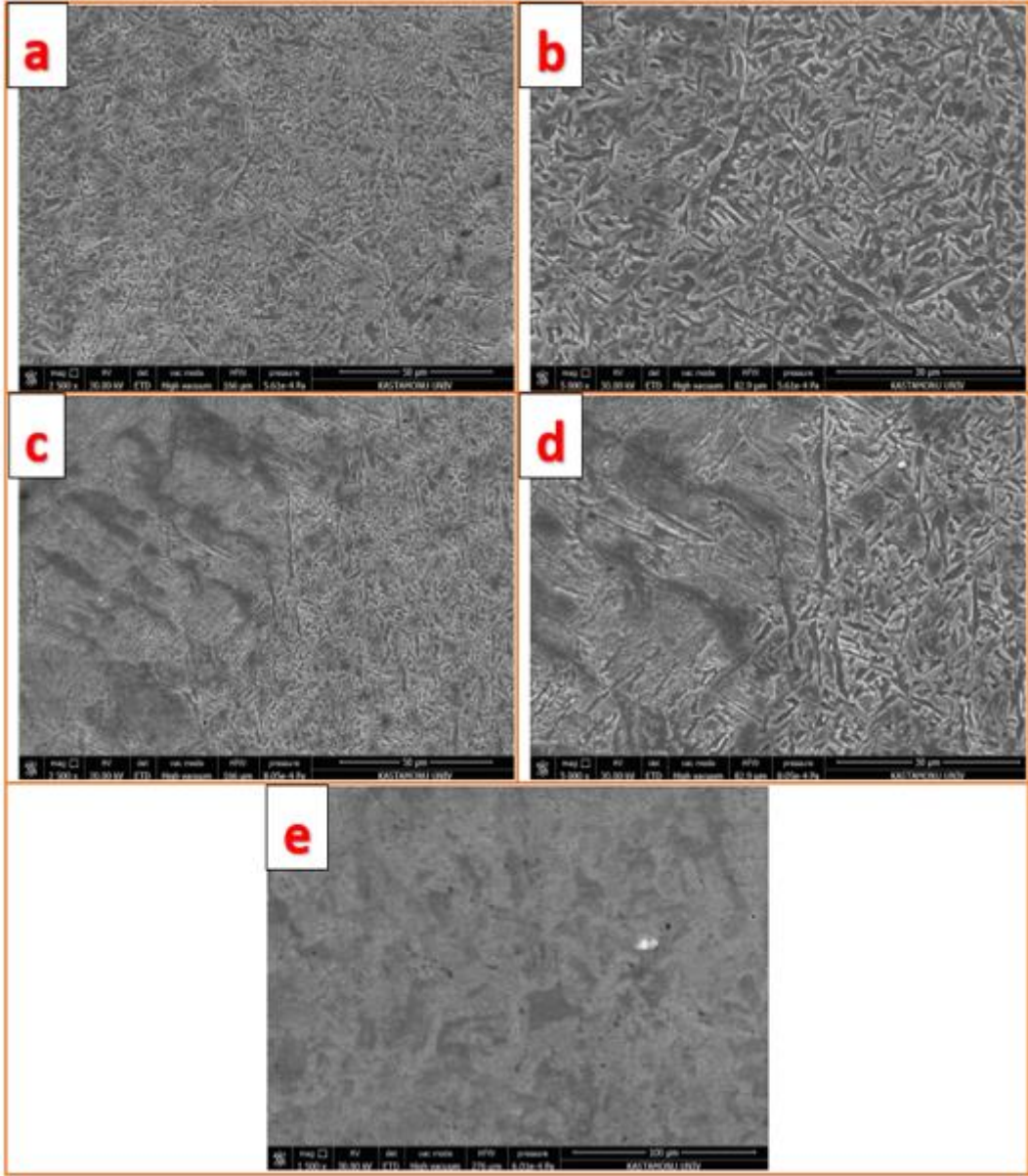


Şekil 8.46 N9 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

Şekil 8.47, Şekil 8.48 ve 8.49’da $\text{Ø}2,5$ mm çapındaki EM 180 kodlu elektrod ile 70, 80 ve 90 A akım şiddeti değerlerinde birleştirilen N10, N11 ve N12 numaralı numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler daha önceki görüntülerdeki gibi kaynak metali, ergime hattı ve ITAB bölgesine ait bölgelerden oluşmakta olup, aynı elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir. Görüntülerde literatürde de belirtildiği şekilde ince taneli asiküler ferritin oluşumu görülmüştür (Abo Al Ela vd., 2013). SEM incelemelerinde, aynı elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir.

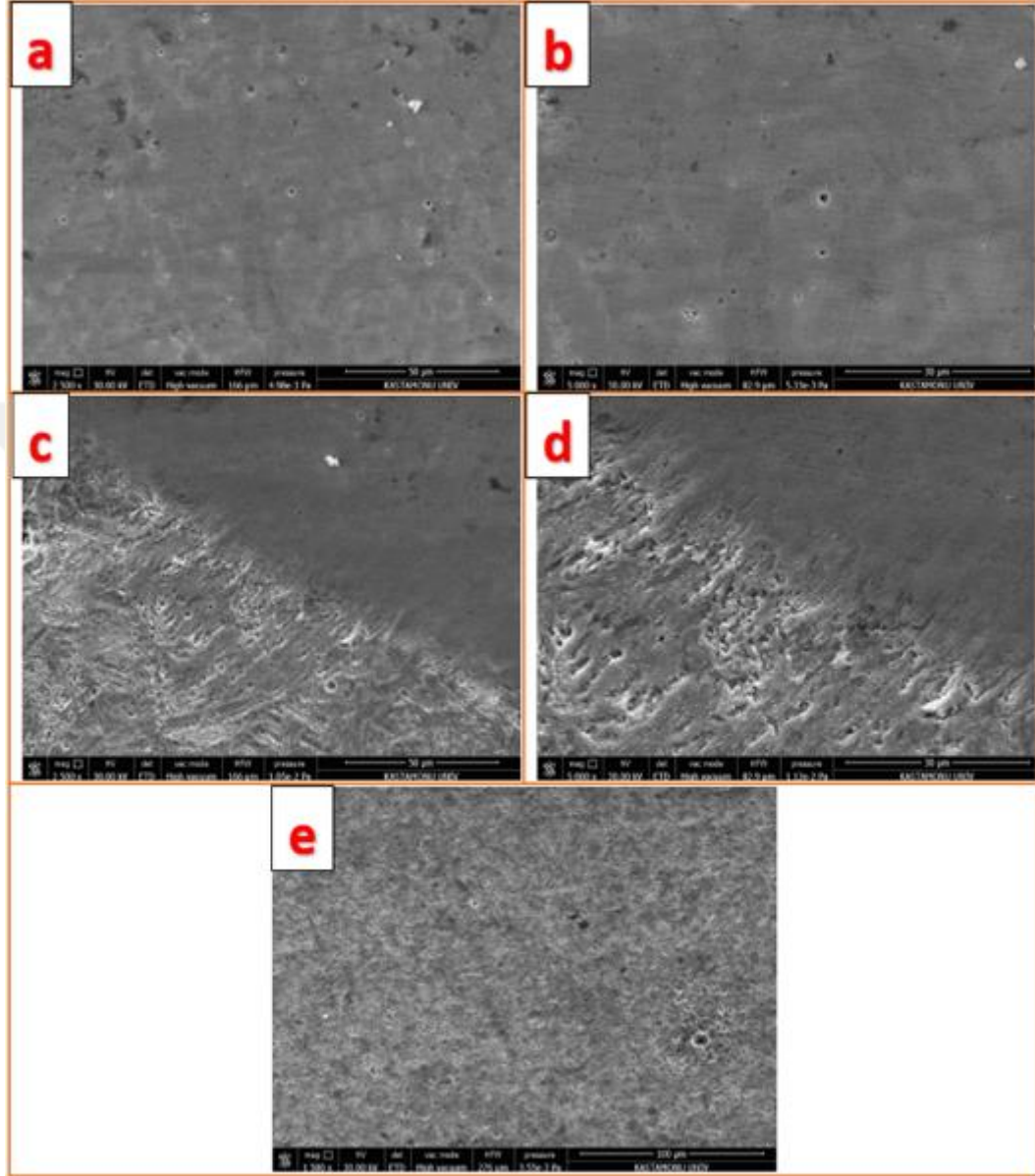


Şekil 8.47 N10 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

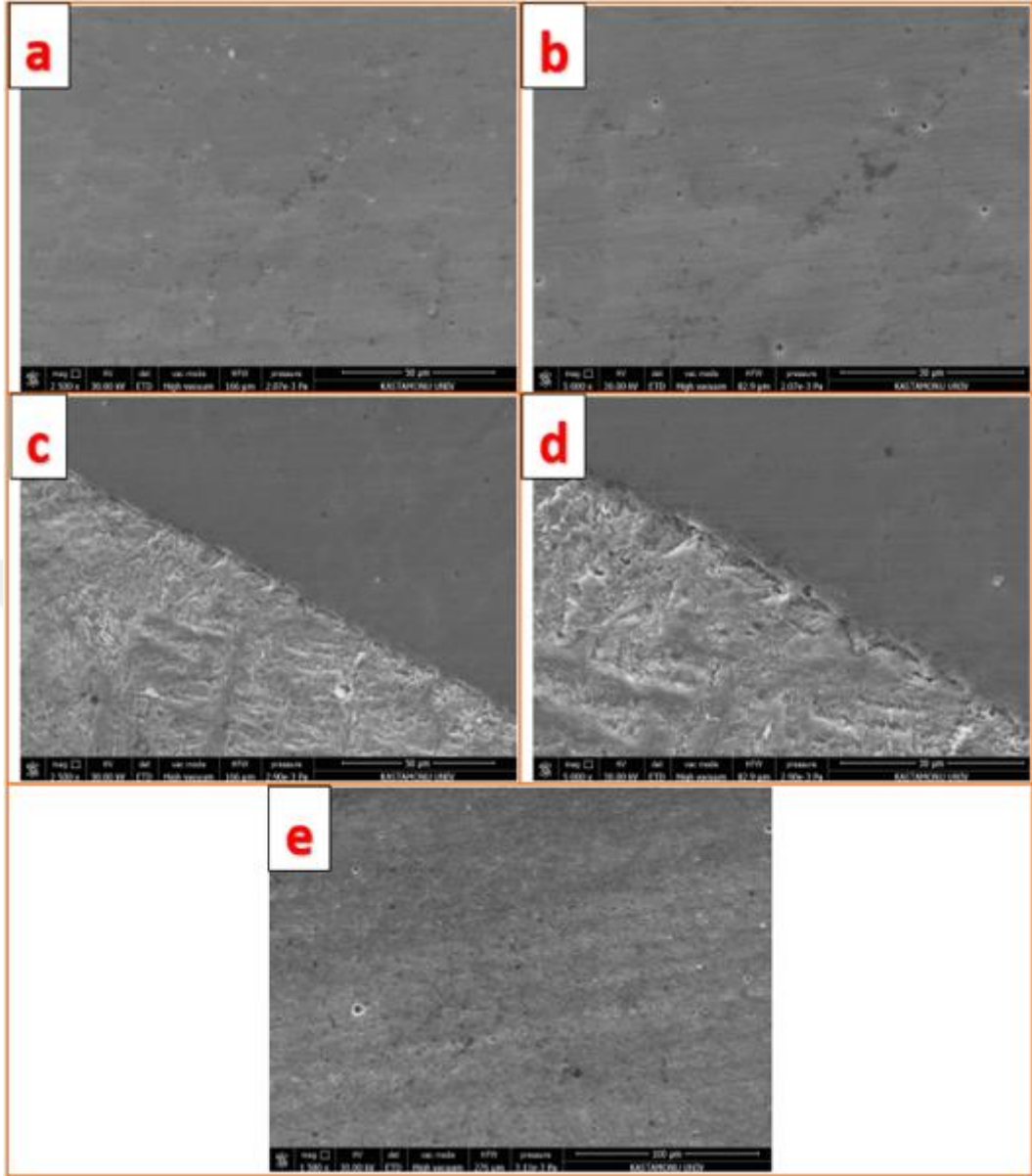


Şekil 8.48 N11 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

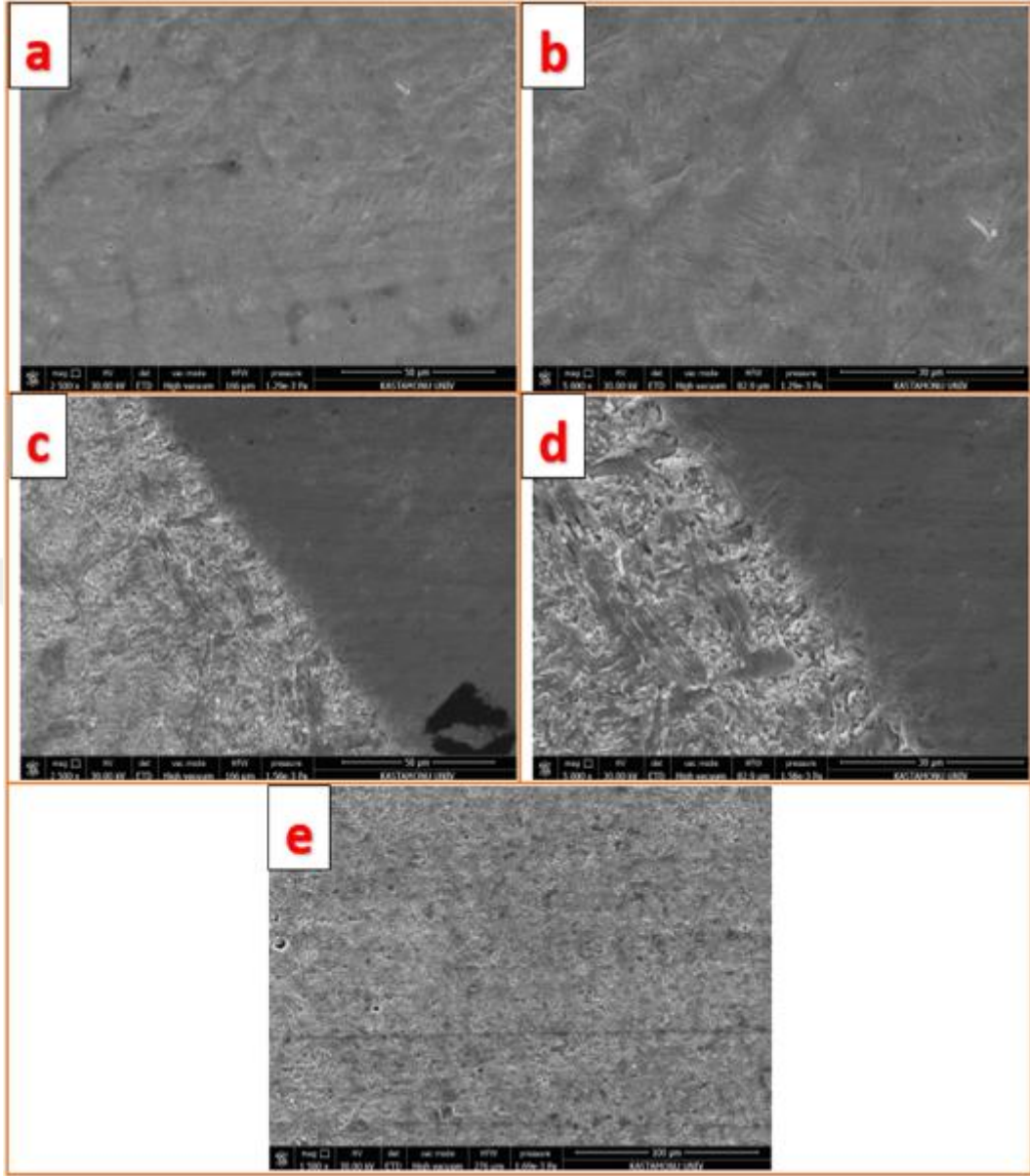
elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir.



şekil 8.50 N13 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

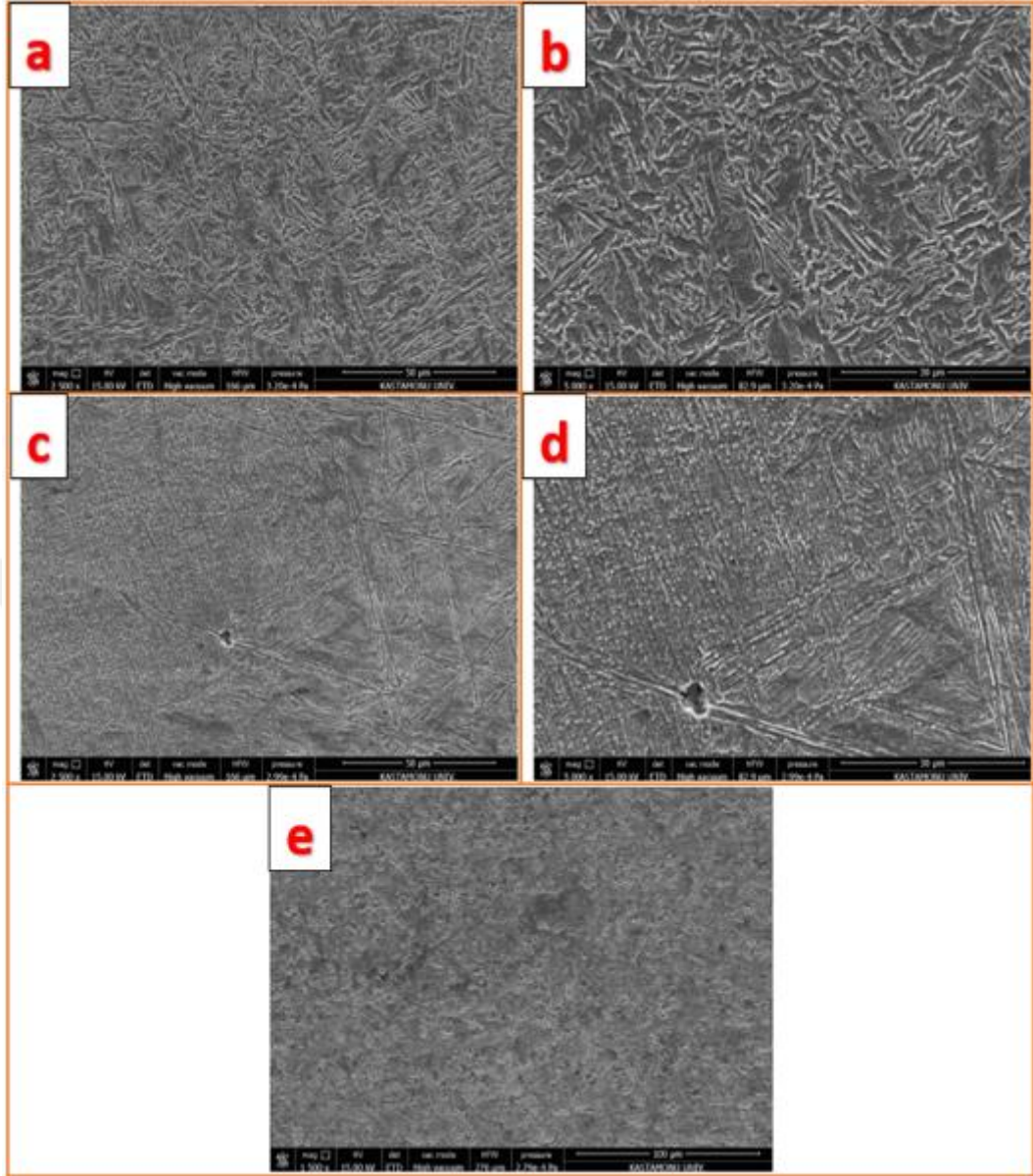


Şekil 8.51 N14 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

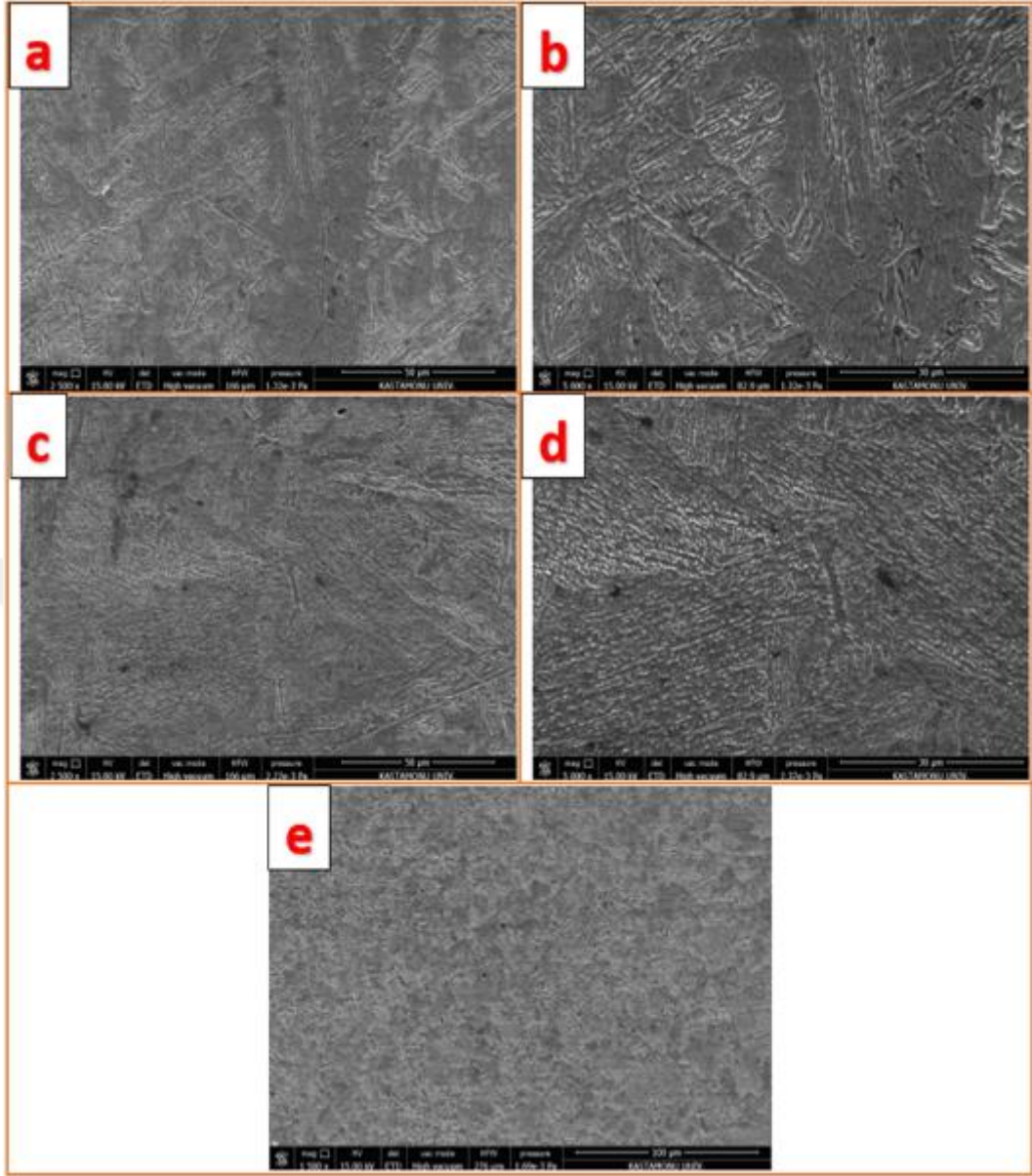


Şekil 8.52 N15 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

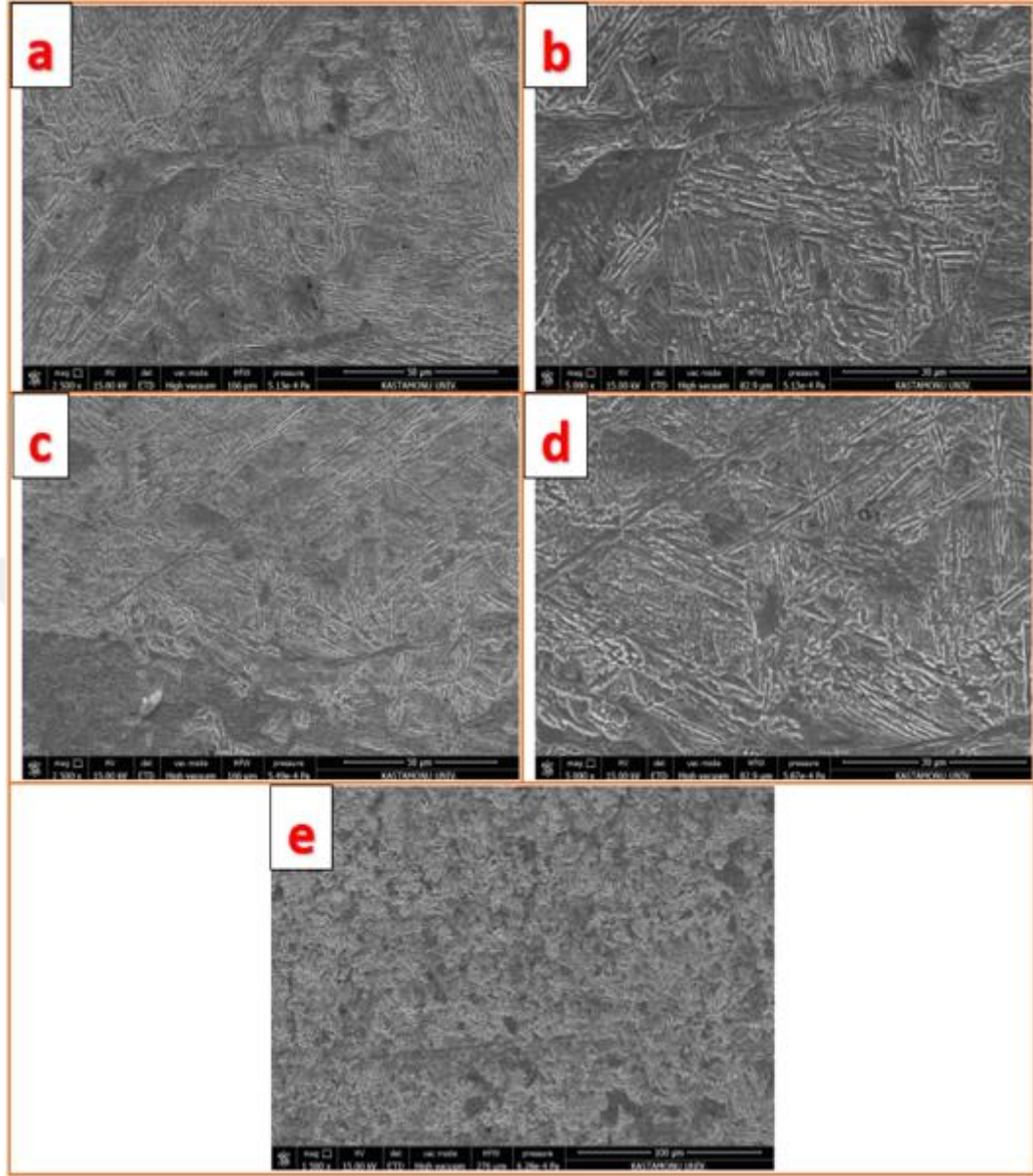
Şekil 8.53, Şekil 8.54 ve 8.55’te Ø1 mm çapındaki MG 183 kodlu tel ile 130, 140 ve 150 A akım şiddeti değerlerinde birleştirilen N16, N17 ve N18 numaralı numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler daha önceki görüntülerdeki gibi kaynak metali, ergime hattı ve ITAB bölgesine ait bölgelerden oluşmakta olup, aynı elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir. Görüntülerde, iç içe geçen ince ferrit tabakalarının meydana geldiği ve iğnemsî ferrit olarak da adlandırılan asiküler ferrit yapısının meydana geldiği görülmüştür. SEM incelemelerinde, aynı elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 8.53 N16 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

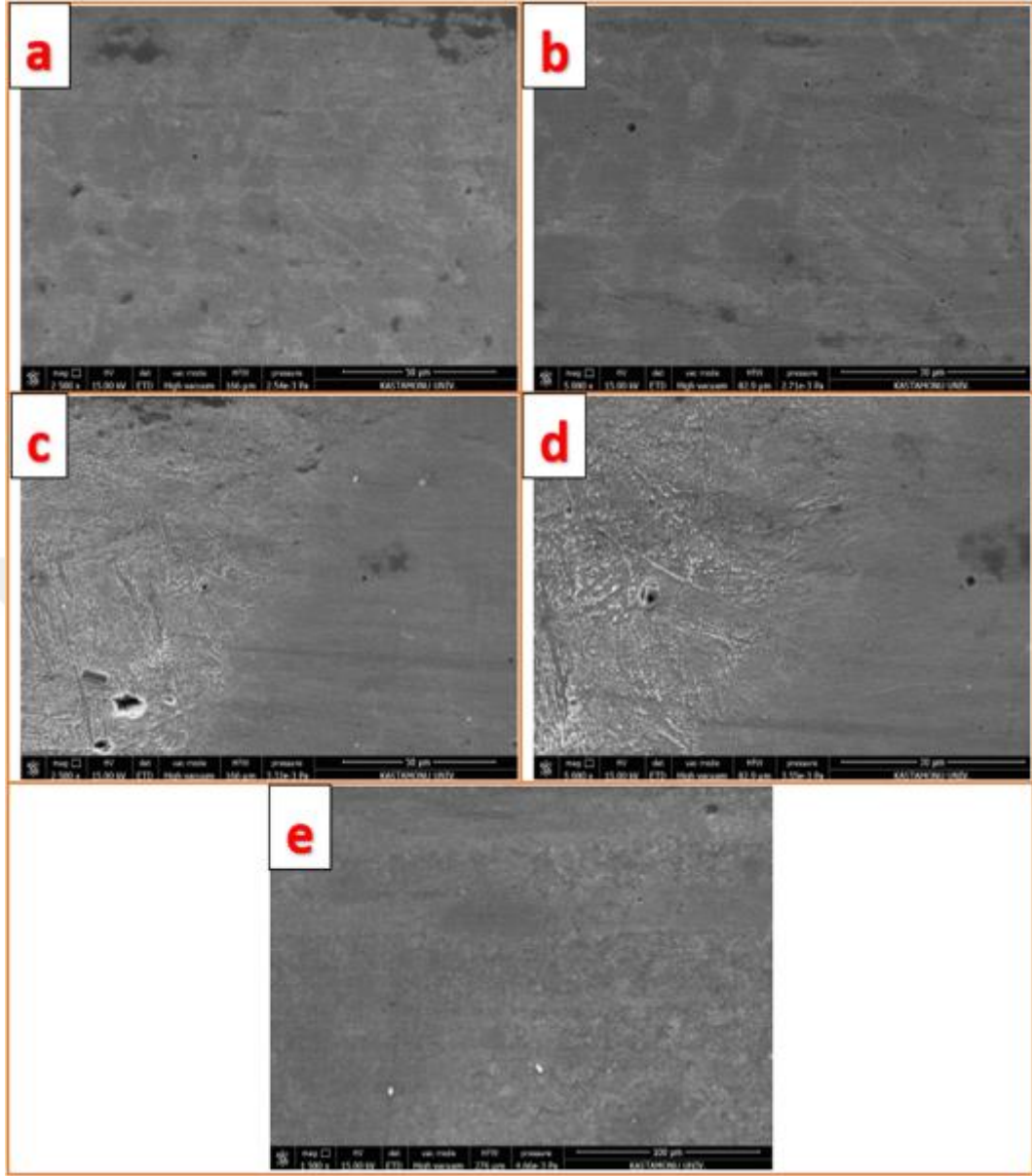


Şekil 8.54 N17 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

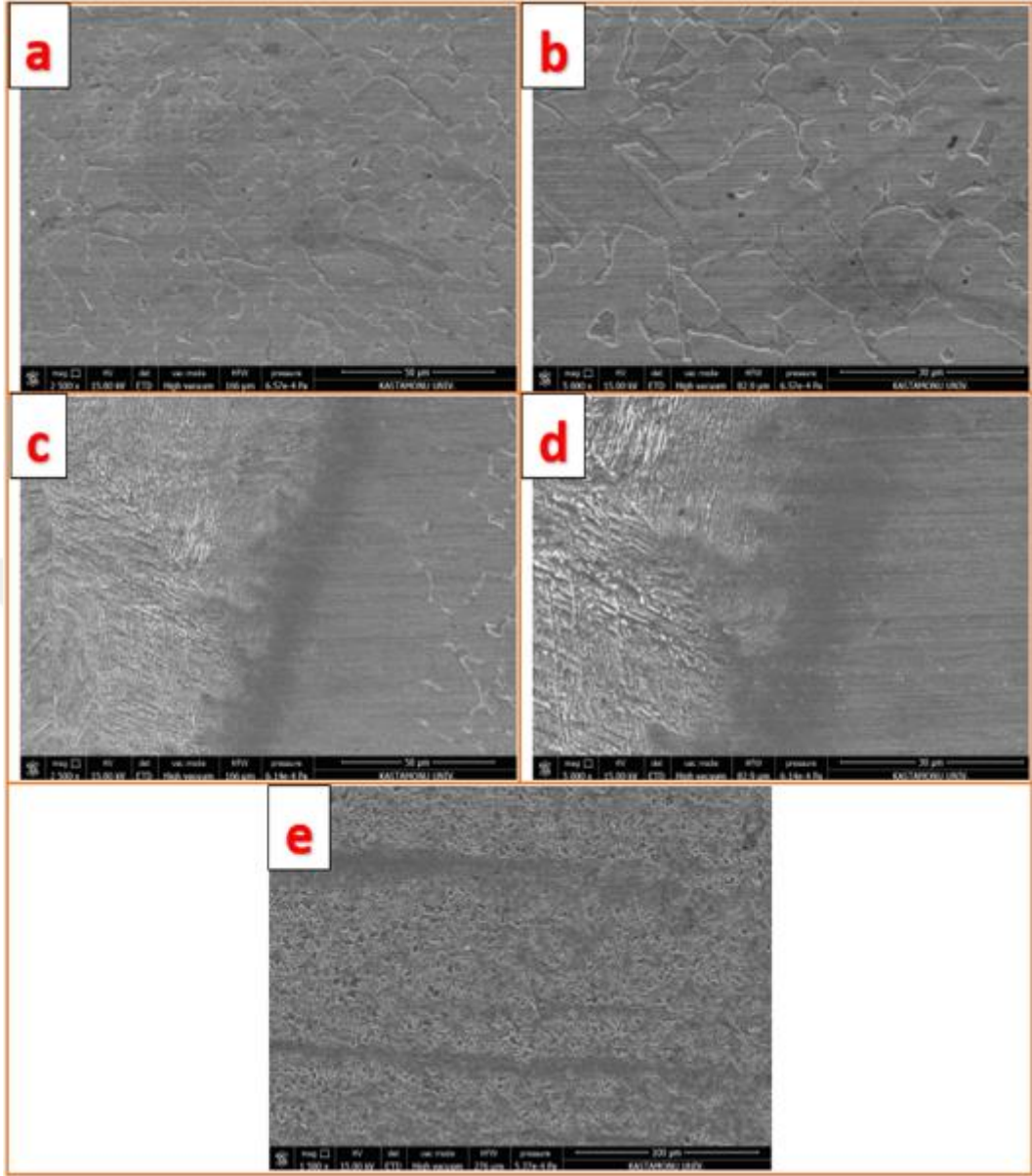


Şekil 8.55 N18 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

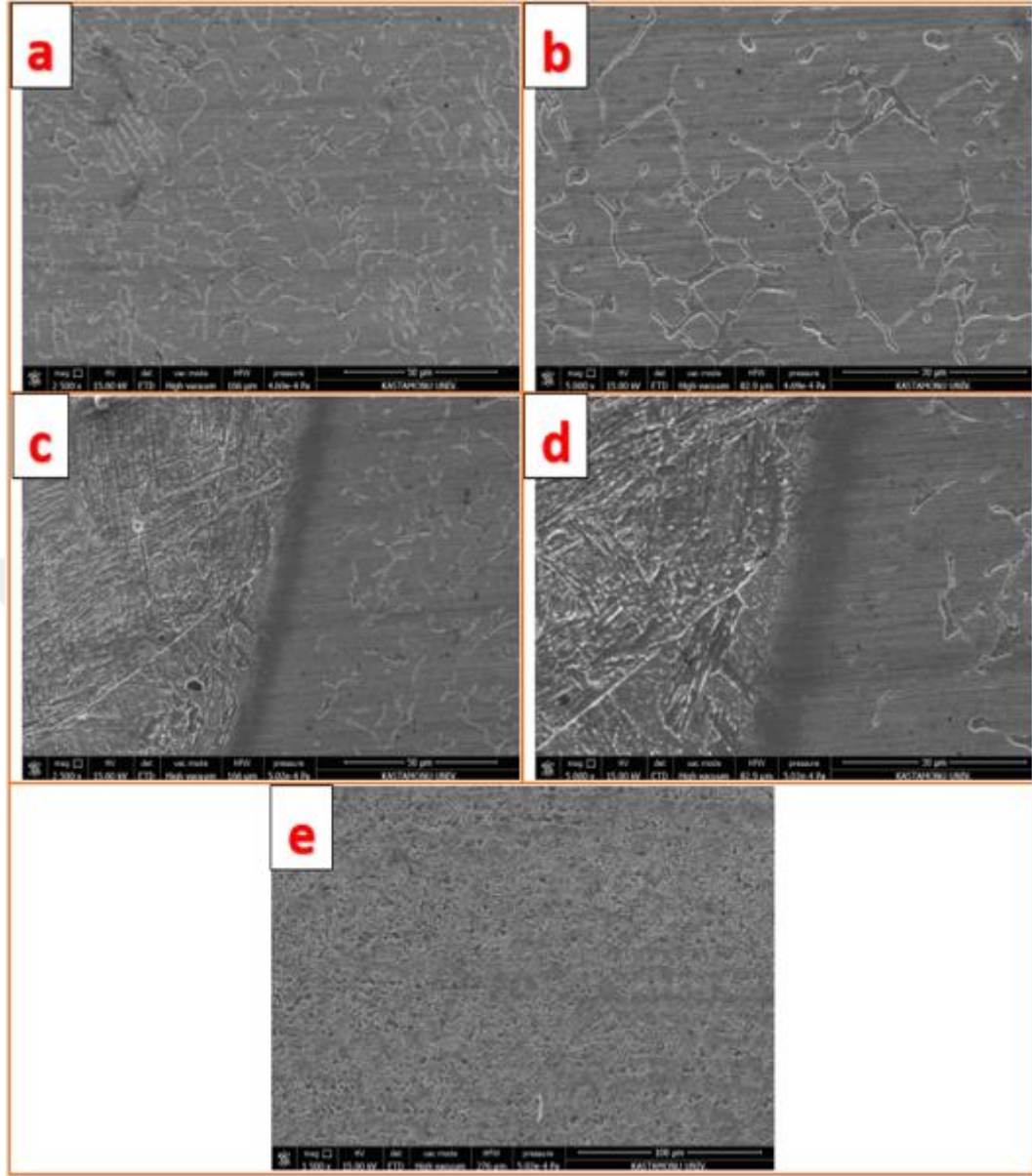
Şekil 8.56, Şekil 8.57 ve 8.58’de Ø1 mm çapındaki MI 312 kodlu tel ile 130, 140 ve 150 A akım şiddeti değerlerinde birleştirilen N19, N20 ve N21 numaralı numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler daha önceki görüntülerdeki gibi kaynak metali, ergime hattı ve ITAB bölgesine ait bölgelerden oluşmakta olup, aynı elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir. Görüntülerde literatürde de belirtildiği şekilde östenitik yapı ve tane sınırlarında delta ferrit yapılarının oluştuğu görülmüştür (Varmaziar vd., 2021). SEM incelemelerinde, aynı elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 8.56 N19 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

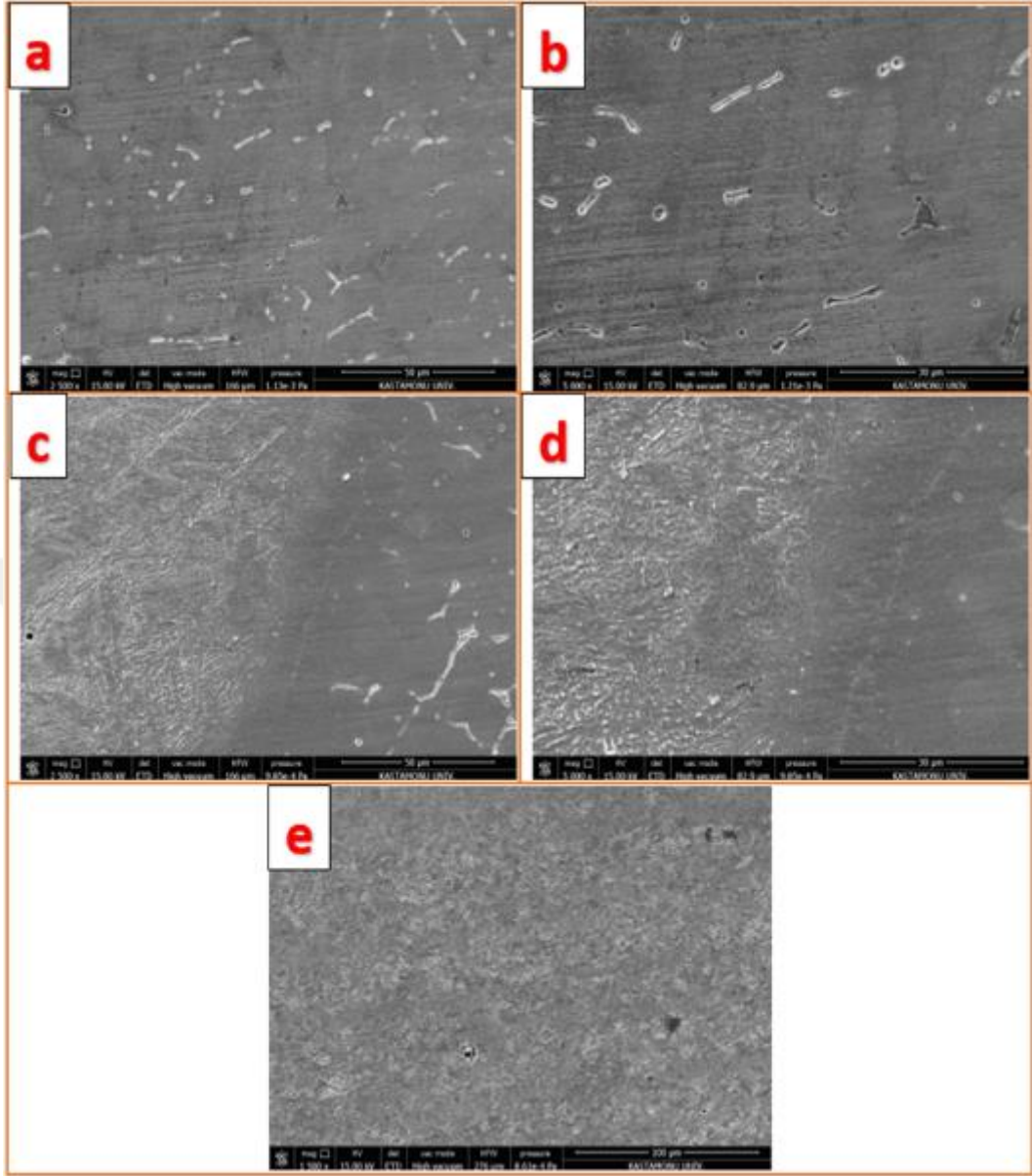


Şekil 8.57 N20 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

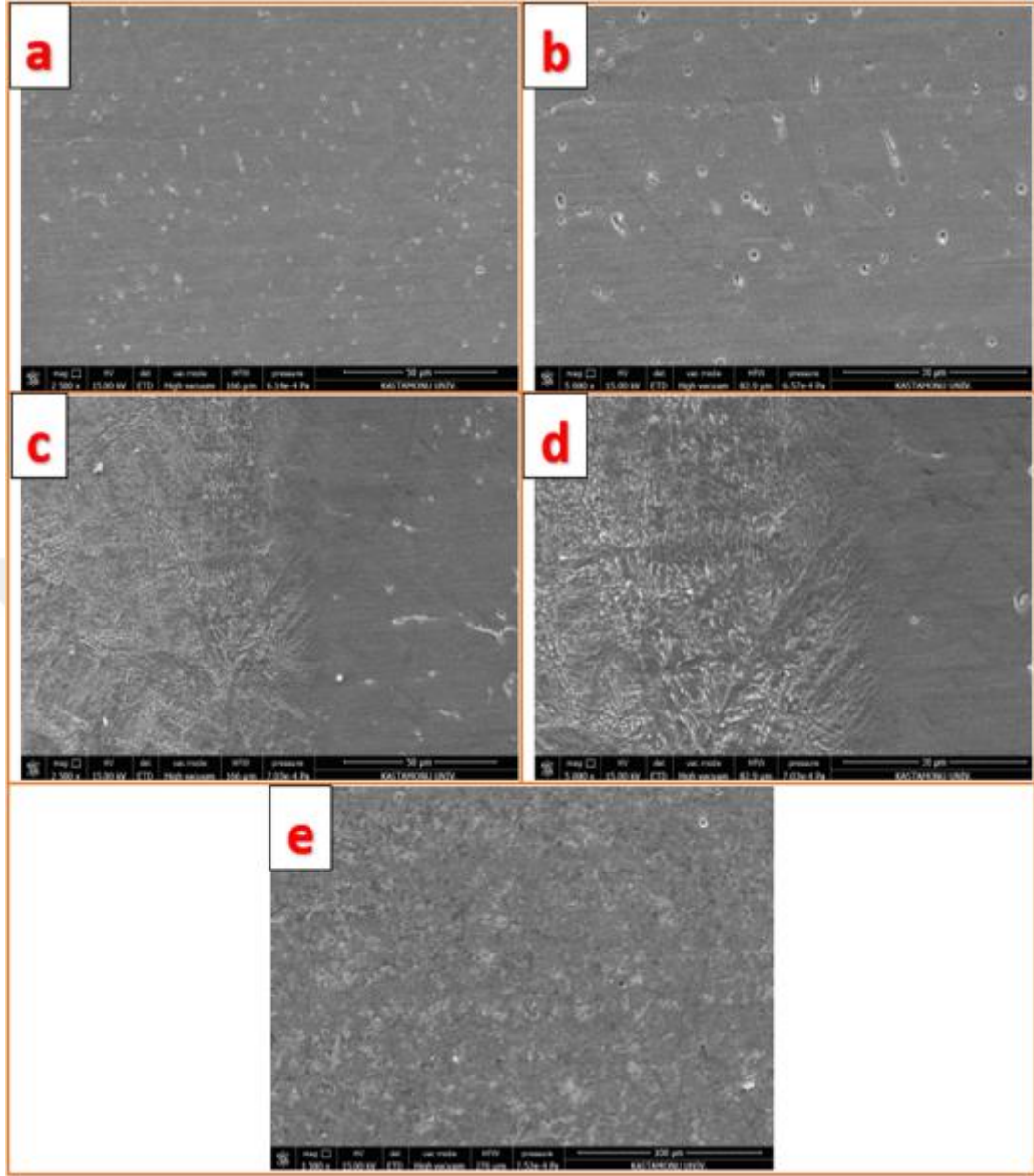


Şekil 8.58 N21 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

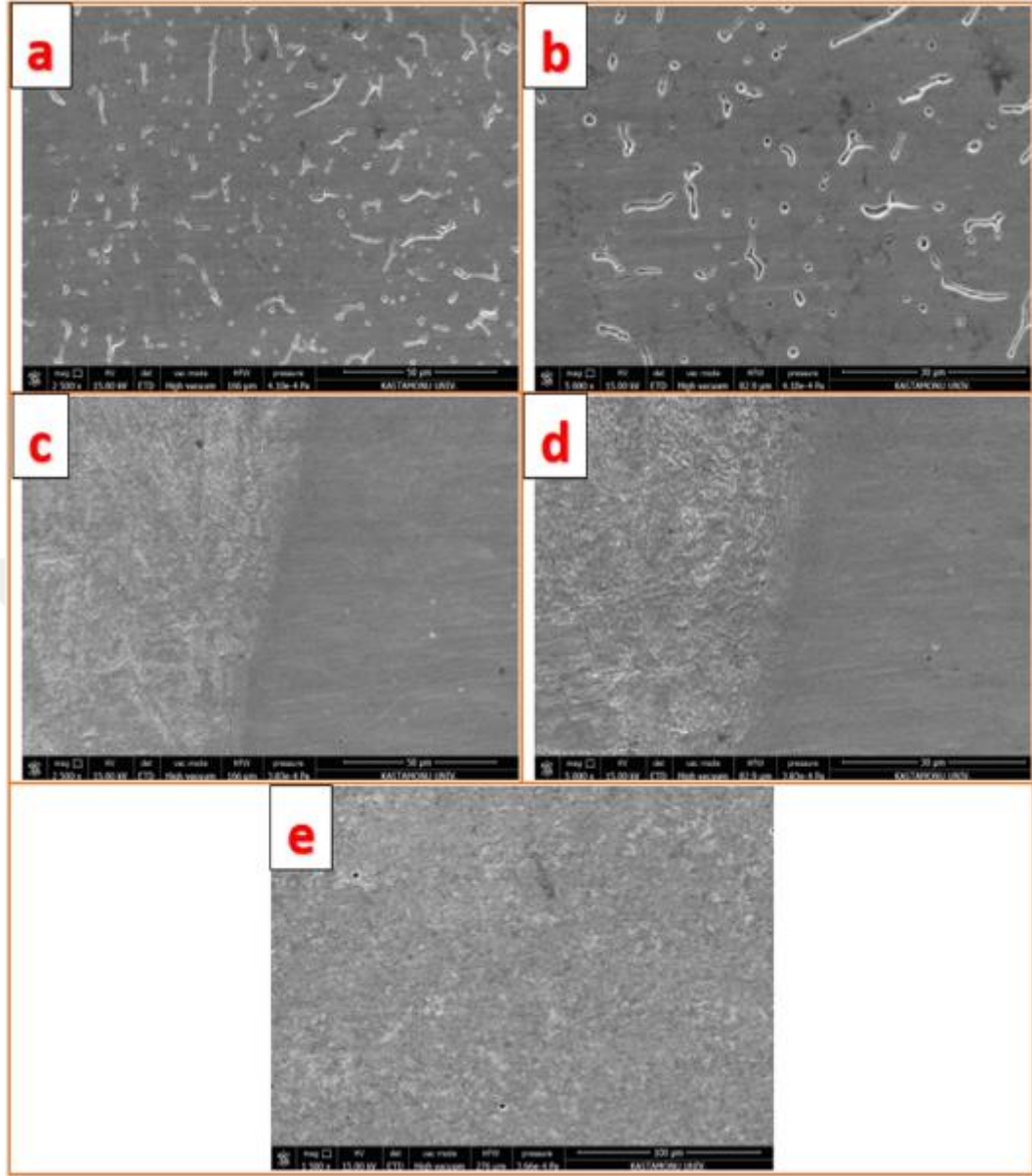
Şekil 8.59, Şekil 8.60 ve 8.61’de Ø1 mm çapındaki MI 307Si kodlu tel ile 130, 140 ve 150 A akım şiddeti değerlerinde birleştirilen N22, N23 ve N24 numaralı numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler daha önceki görüntülerdeki gibi kaynak metali, ergime hattı ve ITAB bölgesine ait bölgelerden oluşmakta olup, aynı elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir. Görüntülerde literatürde de belirtildiği şekilde östenitik matrisli ve az miktarda delta ferritik yapıların oluştuğu görülmüştür (Cabrilo ve Geric, 2016). SEM incelemelerinde, aynı elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmeye ait mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 8.59 N22 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi



Şekil 8.60 N23 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi



Şekil 8.61 N24 deneyine ait SEM görüntüleri a) 2500x kaynak metali, b) 5000x kaynak metali, c) 2500x ergime hattı, d) 5000x ergime hattı, e) 1500x ITAB bölgesi

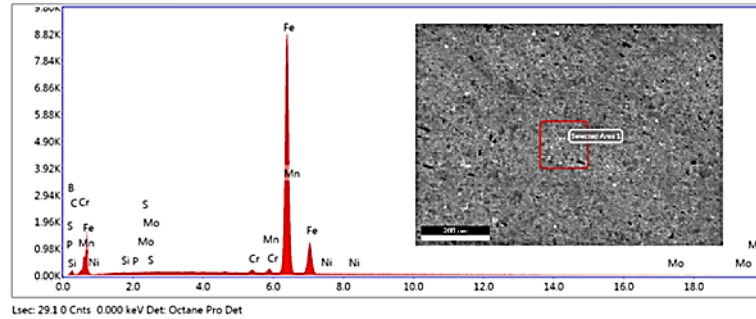
SEM görüntülerinin genel olarak değerlendirilmesi

Ana malzemeye ait SEM görüntülerinde genel olarak tane yapısının martenzitik yapıda olduğu görülmüştür. Kaynaklı birleştirmelerden alınan kaynak metali ve geçiş bölgelerine ait SEM görüntülerinde ise kaynak metali, ergime hattı ve ITAB bölgesine görülmüştür. Fotoğraflar genel olarak değerlendirildiğinde, farklı tip dolgu metalleri, ısı girdisi ve soğuma süresinin etkisi ile tane yapılarında farklılıklar gözlenmiş ve görüntülerde oluşan bu farklı yapılar literatüre dayandırılarak yorumlanmıştır. SEM incelemelerinde, aynı elektrod ile yapılan kaynaklı

birleştirmeye ait mikroyapı görüntülerine benzer yapı ve görüntülerin elde edildiğini söylemek mümkündür.

8.2.3 EDS İncelemeleri

Ana malzeme ve kaynaklı birleştirme numunelerinden alınan SEM görüntüleri üzerinden alan taramalı EDS analizleri yapılmıştır. EDS analizlerinin yapıldığı SEM görüntüleri kaynak metali ve ergime hattından alınarak gerçekleştirilmiştir. Ana malzemeden alınan EDS analizleri Şekil 8.62’de, kaynak metallerine ait EDS analizleri Şekil 8.63–Şekil 8.70 arasında, ergime hattına ait EDS analizleri ise Şekil 8.71–Şekil 8.86 arasında verilmiştir. Ayrıca EDS analizi yapılan bölgelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Aynı kimyasal kompozisyona sahip olup, farklı akım şiddeti değerlerinde birleştirilen numunelerin EDS analizleri benzerlik arz ettiği için her elektrod kapsamında bir adet EDS analizi yapılarak incelemeler gerçekleştirilmiştir. EDS incelemelerinde ortalama akım şiddeti değerine sahip olan numunelerin analizleri gerçekleştirilmiştir.



eZAF Smart Quant Results

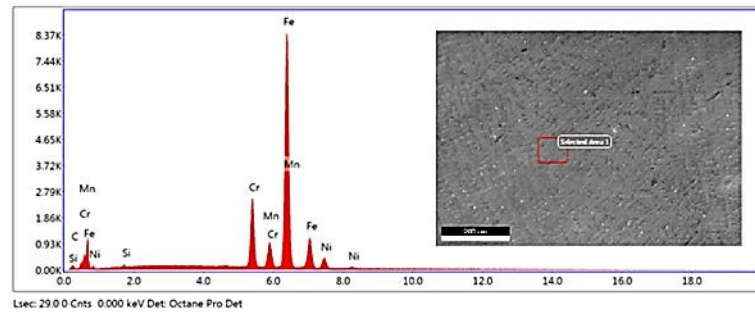
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	0.08	0.29	0.04	99.99	0.00	1.16	0.83	0.21	1
C K	10.51	35.54	41.15	12.14	0.03	1.23	0.85	0.23	1
Si K	0.07	0.10	2.97	75.22	0.00	1.11	0.93	0.3	1.01
P K	0.03	0.04	1.44	73.24	0.00	1.07	0.94	0.42	1.01
S K	0.00	0.00	0.02	99.99	0.00	1.1	0.95	0.54	1.02
Cr K	0.71	0.55	63.25	16.25	0.01	0.97	1	0.98	1.51
Mn K	1.14	0.84	69.17	10.42	0.01	0.95	1.01	0.99	1.14
Fe K	84.18	61.21	4,276.37	1.24	0.83	0.97	1.01	1	1.03
Ni K	0.12	0.08	4.16	60.86	0.00	0.99	1.02	0.79	1.04
Mo K	3.16	1.34	5.42	60.02	0.04	0.83	1.04	0.99	1.45

Şekil 8.62 Ana malzemeye ait EDS analizi

Ana malzemeden alınan EDS analizi incelendiğinde ana malzemenin katalog değerlerine uygun olarak ana malzemeyi oluşturan elementlerin analizde pikler oluşturduğu tespit edilmiştir.

Kaynak metallerin EDS analizi

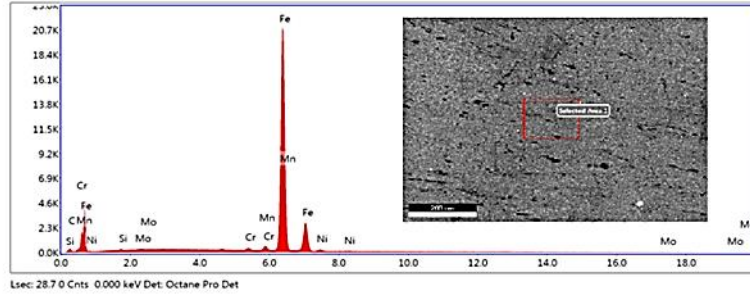
Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı uygulanan ve Ø3,25 mm çapındaki elektrodlar kullanılan deneylerde, kaynak metaline ait EDS analizleri sırasıyla Şekil 8.63 ve Şekil 8.64'te verilmiştir.



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	10.01	33.84	49.37	11.73	0.03	1.23	0.85	0.24	1
Si K	0.24	0.34	12.01	37.55	0.00	1.11	0.93	0.3	1.01
Cr K	12.15	9.49	1,138.28	3.11	0.15	0.97	1	0.99	1.29
Mn K	4.38	3.24	309.45	3.32	0.04	0.95	1.01	0.99	1.09
Fe K	68.70	49.96	4,087.83	1.69	0.66	0.97	1.02	0.96	1.03
Ni K	4.52	3.13	191.81	6.30	0.04	0.98	1.03	0.8	1.04

Şekil 8.63 N2 numaralı deneye ait kaynak metaline ait EDS analizi

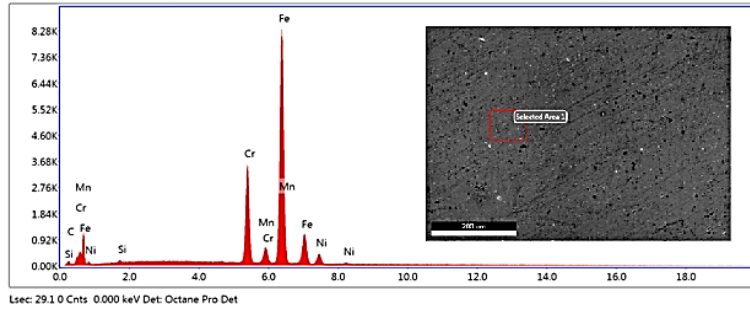


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	9.41	32.81	86.57	11.09	0.03	1.24	0.85	0.23	1
Si K	0.08	0.12	7.86	68.58	0.00	1.12	0.93	0.3	1.01
Cr K	0.47	0.38	99.90	16.15	0.01	0.97	1	0.98	1.53
Mn K	1.33	1.02	192.06	6.06	0.01	0.95	1.01	0.99	1.14
Fe K	85.34	63.96	10,248.09	1.13	0.85	0.97	1.01	1	1.03
Ni K	0.90	0.64	73.03	16.16	0.01	0.99	1.02	0.79	1.04
Mo K	2.47	1.08	10.04	58.45	0.03	0.84	1.04	0.99	1.46

Şekil 8.64 N5 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi

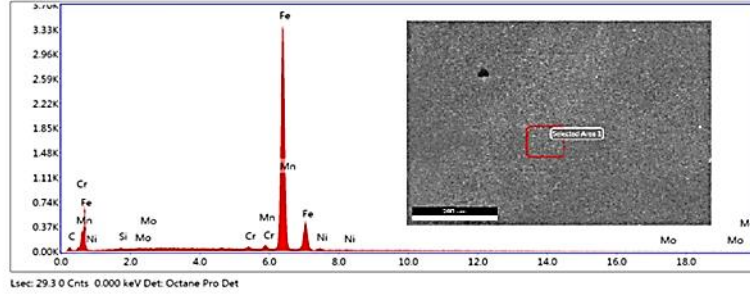
Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı uygulanan ve Ø2,5 mm çapındaki elektrodlar kullanılarak yapılan deneylerde, kaynak metaline ait EDS analizleri Şekil 8.65, Şekil 8.66 ve Şekil 8.67’de verilmiştir.



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	9.78	33.18	49.02	11.73	0.03	1.23	0.85	0.24	1
Si K	0.27	0.39	13.89	38.56	0.00	1.11	0.93	0.31	1.01
Cr K	16.84	13.20	1,543.53	2.72	0.20	0.97	1	0.99	1.25
Mn K	1.34	0.99	95.18	8.89	0.01	0.95	1.01	0.99	1.08
Fe K	67.50	49.27	3,992.76	1.86	0.63	0.97	1.02	0.94	1.03
Ni K	4.27	2.96	183.07	6.67	0.03	0.98	1.03	0.8	1.04

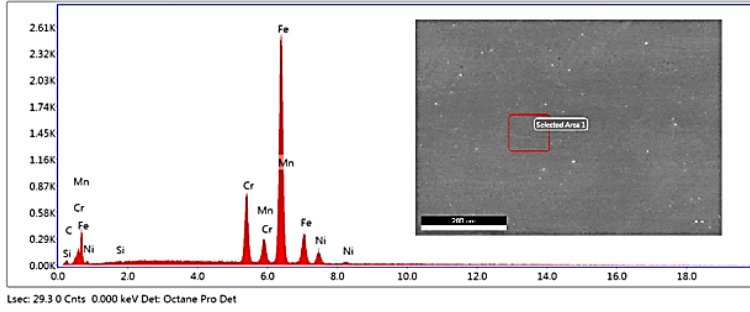
Şekil 8.65 N8 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	10.36	35.33	15.41	14.75	0.03	1.23	0.85	0.23	1
Si K	0.07	0.11	1.18	86.10	0.00	1.12	0.93	0.3	1.01
Cr K	0.62	0.49	20.95	21.56	0.01	0.97	1	0.97	1.49
Mn K	1.26	0.94	29.11	19.03	0.01	0.95	1.01	0.99	1.14
Fe K	83.05	60.92	1,609.24	1.48	0.82	0.97	1.01	1	1.03
Ni K	0.85	0.60	11.29	31.73	0.01	0.99	1.02	0.8	1.04
Mo K	3.79	1.62	2.47	61.76	0.05	0.83	1.04	0.99	1.44

Şekil 8.66 N11 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi

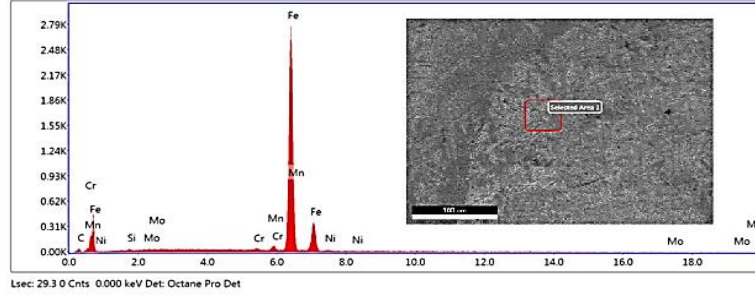


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	10.48	35.06	15.90	14.57	0.03	1.23	0.85	0.24	1
Si K	0.10	0.14	1.56	78.69	0.00	1.11	0.93	0.3	1.01
Cr K	12.17	9.40	348.92	3.80	0.15	0.97	1	0.99	1.29
Mn K	4.10	3.00	88.88	6.12	0.04	0.95	1.01	0.99	1.09
Fe K	67.58	48.60	1,234.69	1.97	0.64	0.97	1.02	0.96	1.03
Ni K	5.56	3.80	72.53	8.03	0.05	0.98	1.03	0.81	1.04

Şekil 8.67 N14 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi

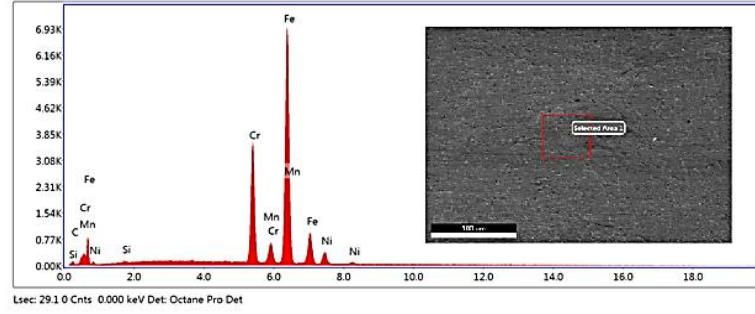
MAG kaynağı uygulanan ve Ø1 mm çapındaki kaynak telleri kullanılan deneylerde, kaynak metaline ait EDS analizleri Şekil 8.68, Şekil 8.69 ve Şekil 8.70’te verilmiştir.



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
CK	9.31	32.88	11.02	16.62	0.03	1.24	0.84	0.22	1
SiK	0.13	0.19	1.64	79.37	0.00	1.12	0.93	0.31	1.01
CrK	0.57	0.47	15.10	25.65	0.01	0.98	1	0.97	1.46
MnK	1.34	1.03	24.82	19.63	0.01	0.96	1	0.98	1.13
FeK	81.87	62.22	1,284.63	1.58	0.81	0.98	1.01	0.99	1.03
NiK	0.73	0.53	7.89	36.38	0.01	0.99	1.02	0.8	1.04
MoK	6.06	2.68	3.16	61.46	0.07	0.84	1.04	0.99	1.42

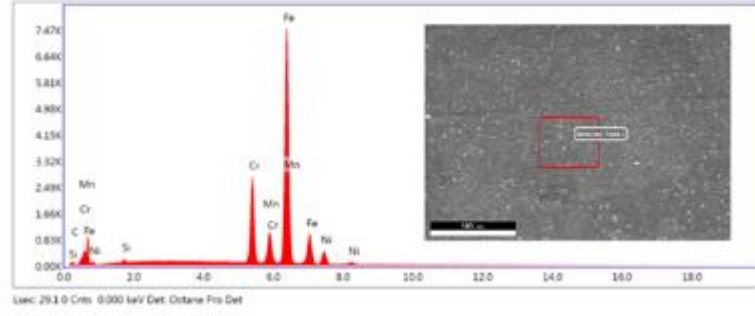
Şekil 8.68 N17 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
CK	8.56	30.01	37.73	12.21	0.03	1.24	0.85	0.24	1
SiK	0.14	0.21	6.31	68.78	0.00	1.12	0.93	0.3	1.01
CrK	20.32	16.44	1,593.92	2.52	0.24	0.97	1	0.99	1.22
MnK	1.66	1.27	102.76	8.09	0.02	0.95	1.01	0.99	1.08
FeK	64.65	48.72	3,309.22	2.04	0.60	0.97	1.01	0.93	1.03
NiK	4.66	3.34	175.34	6.21	0.04	0.99	1.03	0.8	1.04

Şekil 8.69 N20 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi



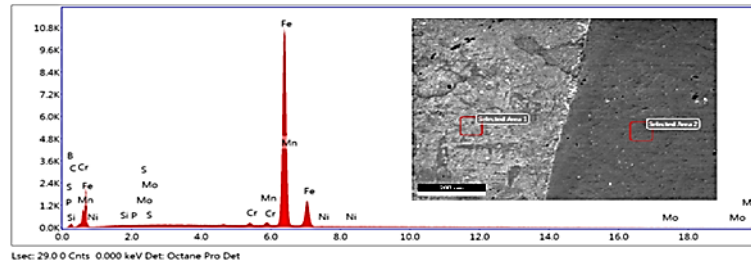
eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
CK	9.46	32.38	44.22	11.96	0.03	1.23	0.85	0.23	1
SiK	0.45	0.68	21.65	23.79	0.00	1.11	0.93	0.3	1.01
CrK	14.45	11.42	1,254.46	2.89	0.17	0.97	1	0.99	1.28
MnK	5.37	4.01	357.15	3.19	0.05	0.95	1.01	0.99	1.08
FeK	64.92	47.78	3,640.09	1.81	0.61	0.97	1.02	0.95	1.03
NiK	5.36	3.75	218.44	5.58	0.04	0.99	1.03	0.8	1.04

Şekil 8.70 N23 numaralı deneye ait kaynak metali EDS analizi

Ergime hattının EDS analizi

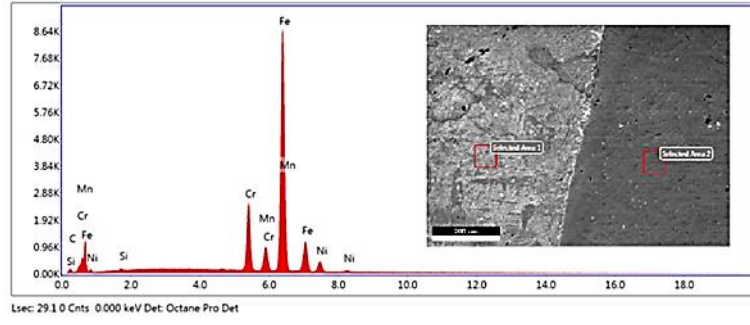
Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı uygulanan ve Ø3,25 mm çapındaki elektrodlar kullanılan deneylerde, ergime hattına ait EDS analizleri Şekil 8.71-Şekil 8.74 arasında verilmiştir.



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	0.24	0.92	0.14	99.99	0.00	1.16	0.83	0.21	1
CK	9.89	33.68	46.43	11.97	0.03	1.23	0.85	0.23	1
SiK	0.07	0.10	3.55	72.33	0.00	1.11	0.93	0.3	1.01
PK	0.01	0.01	0.57	82.20	0.00	1.07	0.94	0.41	1.02
SK	0.00	0.00	0.02	99.99	0.00	1.1	0.95	0.53	1.02
CrK	0.85	0.67	92.57	11.36	0.01	0.97	1	0.98	1.53
MnK	1.31	0.98	96.11	7.35	0.01	0.95	1.01	0.99	1.14
FeK	85.62	62.74	5,226.94	1.20	0.85	0.97	1.01	1	1.03
NiK	0.12	0.08	4.91	61.10	0.00	0.99	1.02	0.79	1.04
MoK	1.89	0.81	3.94	60.30	0.02	0.83	1.04	0.99	1.47

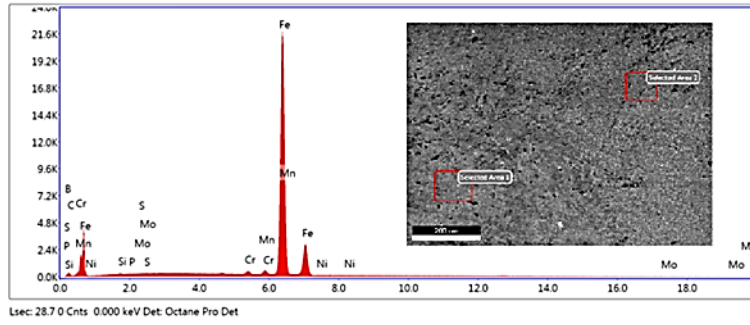
Şekil 8.71 N2 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	9.99	33.82	50.02	11.73	0.03	1.23	0.85	0.24	1
Si K	0.21	0.30	10.55	48.74	0.00	1.11	0.93	0.3	1.01
Cr K	11.76	9.20	1,124.14	3.14	0.15	0.97	1	0.99	1.29
Mn K	4.28	3.17	307.46	3.35	0.04	0.95	1.01	0.99	1.09
Fe K	69.28	50.42	4,191.25	1.67	0.66	0.97	1.02	0.96	1.03
Ni K	4.48	3.10	192.59	6.35	0.04	0.98	1.03	0.8	1.04

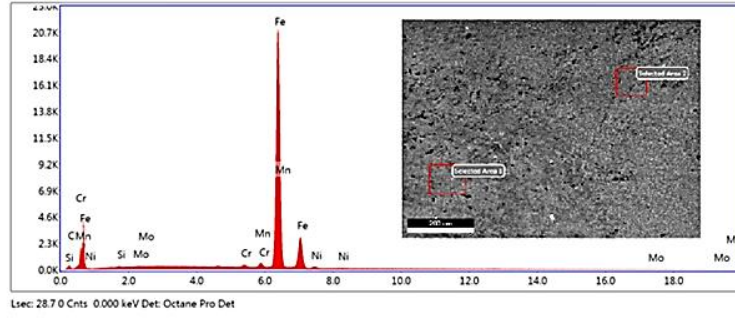
Şekil 8.72 N2 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	0.03	0.12	0.03	99.99	0.00	1.17	0.83	0.21	1
C K	8.65	30.67	81.18	11.20	0.02	1.24	0.85	0.23	1
Si K	0.10	0.15	9.75	67.08	0.00	1.12	0.93	0.3	1.01
P K	0.00	0.00	0.21	99.99	0.00	1.08	0.94	0.41	1.02
S K	0.00	0.00	0.02	99.99	0.00	1.1	0.94	0.53	1.02
Cr K	0.66	0.54	145.63	10.61	0.01	0.97	1	0.98	1.54
Mn K	1.16	0.90	171.12	6.93	0.01	0.96	1.01	0.99	1.15
Fe K	87.45	66.73	10,722.82	1.11	0.87	0.97	1.01	1	1.03
Ni K	0.06	0.04	4.76	60.53	0.00	0.99	1.02	0.79	1.04
Mo K	1.89	0.84	7.92	59.51	0.02	0.84	1.04	0.99	1.47

Şekil 8.73 N5 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi

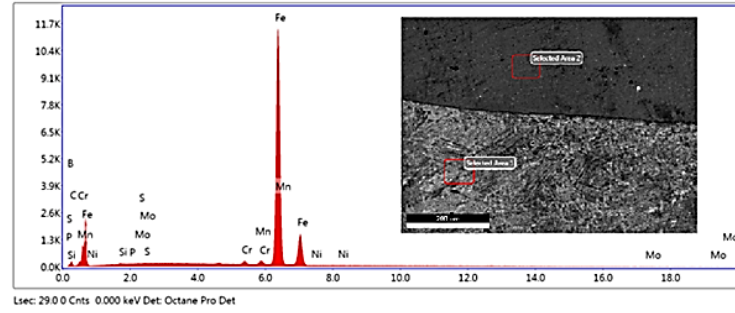


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
CK	9.38	32.64	85.78	11.09	0.03	1.24	0.85	0.23	1
SiK	0.10	0.15	9.55	67.44	0.00	1.12	0.93	0.3	1.01
CrK	0.55	0.44	118.19	14.10	0.01	0.97	1	0.98	1.54
MnK	1.28	0.97	182.66	5.60	0.01	0.95	1.01	0.99	1.15
FeK	86.21	64.50	10,255.66	1.11	0.86	0.97	1.01	1	1.03
NiK	0.80	0.57	64.22	16.35	0.01	0.99	1.02	0.79	1.04
MoK	1.67	0.73	6.78	59.17	0.02	0.83	1.04	0.99	1.47

Şekil 8.74 N5 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi

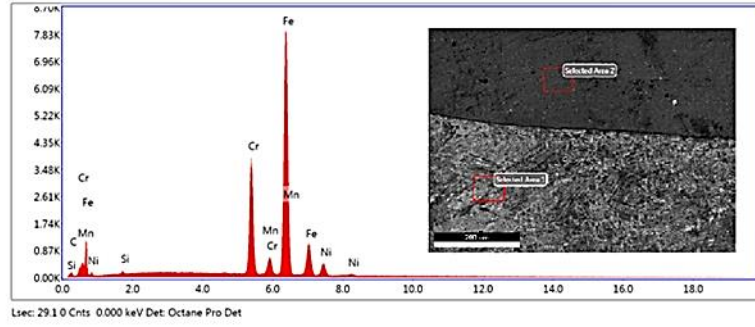
Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı uygulanan ve Ø2,5 mm çapındaki elektrodlar kullanılan deneylerde, ergime hattına ait EDS analizleri Şekil 8.75-Şekil 8.80 arasında verilmiştir.



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
BK	0.84	2.96	0.56	99.99	0.00	1.16	0.84	0.22	1
CK	11.96	38.15	61.98	11.51	0.03	1.23	0.85	0.23	1
SiK	0.01	0.01	0.59	99.99	0.00	1.11	0.93	0.31	1.01
PK	0.00	0.00	0.00	99.99	0.00	1.07	0.94	0.43	1.01
SK	0.00	0.00	0.00	99.99	0.00	1.09	0.95	0.55	1.02
CrK	0.74	0.54	87.41	12.75	0.01	0.96	1	0.98	1.5
MnK	1.17	0.82	95.13	7.88	0.01	0.95	1.01	0.99	1.14
FeK	81.77	56.09	5,544.08	1.20	0.81	0.96	1.02	1	1.03
NiK	0.11	0.07	5.14	60.07	0.00	0.98	1.03	0.8	1.04
MoK	3.40	1.36	7.78	59.08	0.04	0.83	1.04	0.99	1.45

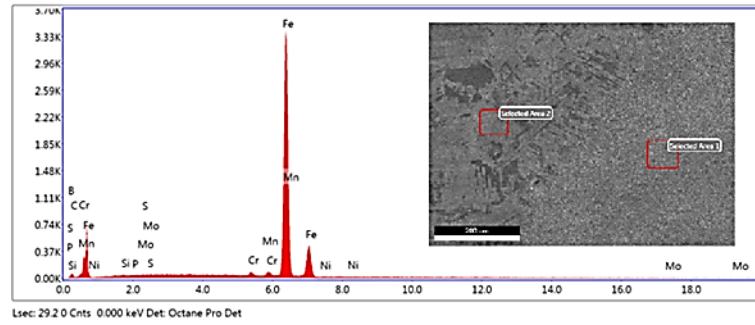
Şekil 8.75 N8 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
CK	10.00	33.72	50.59	11.67	0.03	1.23	0.85	0.24	1
SiK	0.25	0.37	13.18	36.99	0.00	1.11	0.93	0.31	1.01
CrK	18.24	14.21	1,659.56	2.60	0.21	0.97	1	0.99	1.23
MnK	1.40	1.03	99.60	8.21	0.01	0.95	1.01	0.99	1.08
FeK	65.36	47.40	3,864.49	1.91	0.61	0.97	1.02	0.93	1.03
NiK	4.74	3.27	204.76	6.08	0.04	0.98	1.03	0.8	1.04

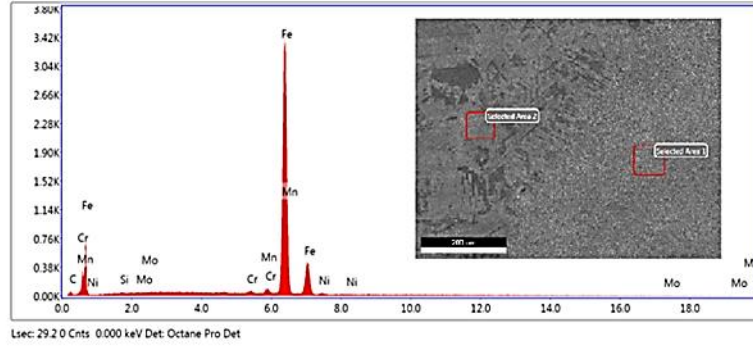
Şekil 8.76 N8 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	0.19	0.73	0.04	99.99	0.00	1.17	0.83	0.22	1
CK	9.33	32.69	14.00	15.14	0.03	1.24	0.84	0.22	1
SiK	0.15	0.22	2.41	74.82	0.00	1.12	0.93	0.31	1.01
PK	0.03	0.04	0.61	80.41	0.00	1.08	0.93	0.42	1.01
SK	0.00	0.00	0.02	99.99	0.00	1.1	0.94	0.54	1.02
CrK	1.02	0.83	34.28	16.28	0.01	0.98	1	0.97	1.45
MnK	1.33	1.02	31.27	13.45	0.01	0.96	1	0.98	1.13
FeK	81.91	61.76	1,629.66	1.52	0.81	0.98	1.01	0.99	1.03
NiK	0.21	0.15	2.86	62.40	0.00	0.99	1.02	0.79	1.04
MoK	5.84	2.56	3.88	60.95	0.07	0.84	1.04	0.99	1.42

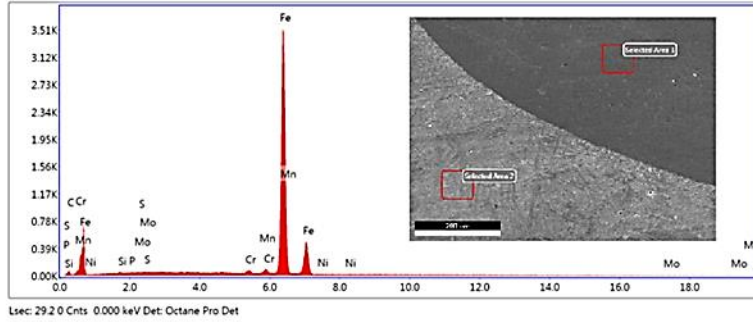
Şekil 8.77 N11 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
CK	9.38	33.02	13.89	15.17	0.03	1.24	0.84	0.22	1
SiK	0.16	0.24	2.54	74.22	0.00	1.12	0.93	0.31	1.01
CrK	0.39	0.32	13.06	31.45	0.01	0.98	1	0.97	1.47
MnK	1.08	0.83	25.15	20.06	0.01	0.96	1	0.98	1.14
FeK	83.29	63.02	1,629.18	1.50	0.83	0.98	1.01	0.99	1.03
NIK	0.22	0.16	2.97	64.79	0.00	0.99	1.02	0.79	1.04
MoK	5.48	2.41	3.57	61.26	0.06	0.84	1.04	0.99	1.43

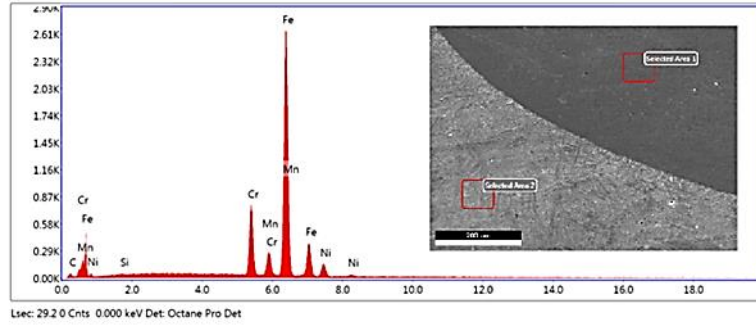
Şekil 8.78 N11 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metalı bölgesi EDS analizi



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
CK	10.17	35.04	15.98	14.78	0.03	1.24	0.85	0.22	1
SiK	0.15	0.22	2.54	73.57	0.00	1.12	0.93	0.31	1.01
PK	0.03	0.04	0.60	81.32	0.00	1.08	0.94	0.42	1.01
SK	0.00	0.00	0.02	99.99	0.00	1.1	0.94	0.54	1.02
CrK	0.83	0.66	28.95	19.66	0.01	0.97	1	0.97	1.45
MnK	1.39	1.04	33.88	12.62	0.01	0.96	1.01	0.98	1.13
FeK	81.45	60.37	1,680.48	1.51	0.81	0.97	1.01	0.99	1.03
NIK	0.18	0.13	2.52	62.84	0.00	0.99	1.02	0.8	1.04
MoK	5.81	2.51	4.00	60.94	0.07	0.84	1.04	0.99	1.42

Şekil 8.79 N14 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi

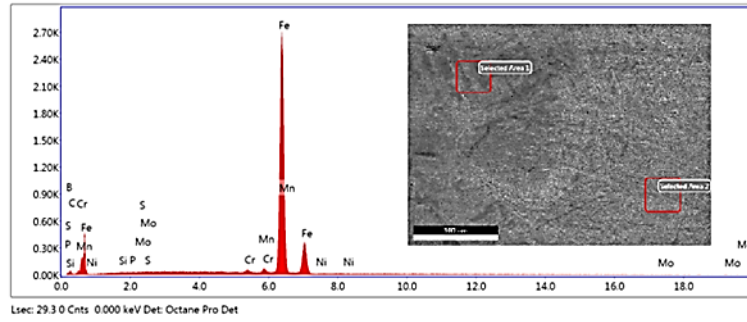


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
CK	10.02	33.90	15.01	14.78	0.03	1.23	0.85	0.23	1
SiK	0.19	0.27	2.86	72.83	0.00	1.11	0.93	0.3	1.01
CrK	11.64	9.10	334.27	3.89	0.14	0.97	1	0.99	1.3
MnK	3.59	2.65	77.47	6.78	0.04	0.95	1.01	0.99	1.09
FeK	69.34	50.46	1,261.61	1.96	0.66	0.97	1.02	0.96	1.03
NiK	5.23	3.62	67.64	8.93	0.04	0.98	1.03	0.8	1.04

Şekil 8.80 N14 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metal bölgesi EDS analizi

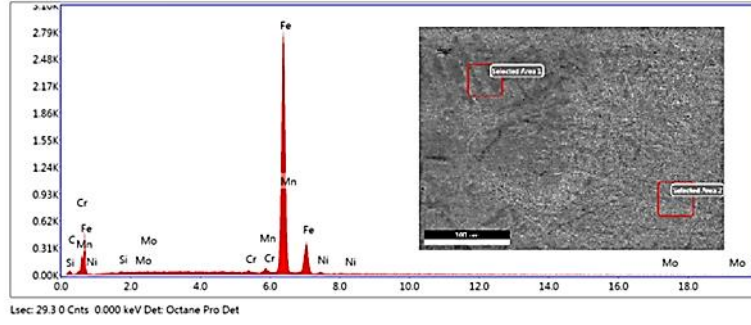
MAG kaynağı uygulanan ve Ø1 mm çapında kaynak telleri kullanılan deneylerde, ergime hattına ait EDS analizleri Şekil 8.81-Şekil 8.86’da verilmiştir.



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	0.24	0.93	0.04	99.99	0.00	1.17	0.83	0.22	1
C K	9.30	32.60	10.89	16.70	0.03	1.24	0.84	0.22	1
SiK	0.07	0.11	0.91	83.49	0.00	1.12	0.93	0.31	1.01
P K	0.06	0.08	0.93	76.04	0.00	1.08	0.93	0.42	1.01
S K	0.00	0.00	0.02	99.99	0.00	1.1	0.94	0.54	1.02
CrK	0.61	0.49	16.15	23.62	0.01	0.98	1	0.97	1.46
MnK	1.06	0.81	19.59	22.00	0.01	0.96	1	0.98	1.13
FeK	82.81	62.40	1,288.59	1.57	0.82	0.98	1.01	0.99	1.03
NiK	0.05	0.03	0.49	70.44	0.00	0.99	1.02	0.79	1.04
MoK	5.80	2.54	3.01	61.64	0.07	0.84	1.04	0.99	1.42

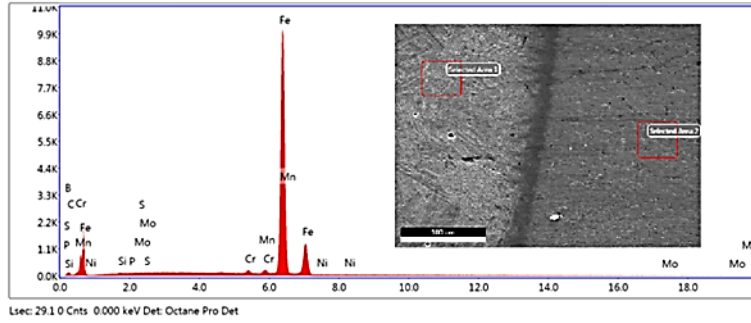
Şekil 8.81 N17 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
CK	9.97	34.63	12.16	15.50	0.03	1.24	0.84	0.22	1
SiK	0.17	0.25	2.23	74.68	0.00	1.12	0.93	0.31	1.01
CrK	0.44	0.35	11.87	29.73	0.01	0.97	1	0.97	1.45
MnK	1.18	0.90	22.59	21.77	0.01	0.96	1	0.98	1.13
FeK	81.23	60.68	1,310.67	1.57	0.81	0.97	1.01	0.99	1.03
NiK	0.54	0.38	6.01	58.13	0.00	0.99	1.02	0.8	1.04
MoK	6.48	2.82	3.47	61.62	0.08	0.84	1.04	0.99	1.42

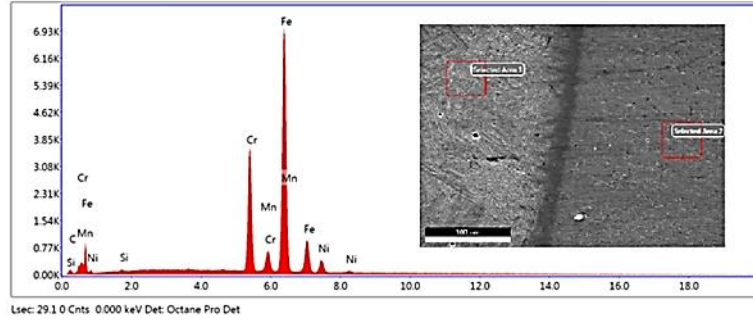
Şekil 8.82 N17 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
B K	0.06	0.26	0.03	99.99	0.00	1.17	0.83	0.21	1
CK	8.00	28.94	34.26	13.02	0.02	1.24	0.84	0.22	1
SiK	0.05	0.08	2.23	77.55	0.00	1.12	0.93	0.3	1.01
PK	0.00	0.00	0.02	99.99	0.00	1.08	0.93	0.41	1.02
SK	0.00	0.00	0.02	99.99	0.00	1.11	0.94	0.53	1.02
CrK	0.95	0.79	93.97	10.23	0.01	0.98	1	0.98	1.51
MnK	1.30	1.03	87.47	7.50	0.01	0.96	1	0.99	1.14
FeK	86.87	67.60	4,886.09	1.23	0.87	0.98	1.01	0.99	1.03
NiK	0.18	0.13	6.70	59.97	0.00	0.99	1.02	0.79	1.04
MoK	2.60	1.18	4.97	60.86	0.03	0.84	1.04	0.99	1.46

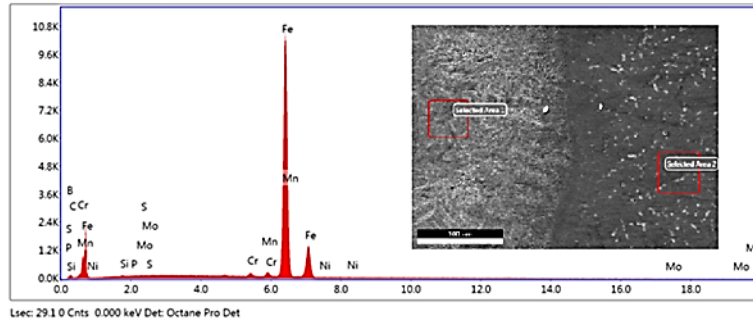
Şekil 8.83 N20 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
CK	8.81	30.67	39.45	12.09	0.03	1.24	0.85	0.24	1
SiK	0.11	0.17	5.17	70.37	0.00	1.12	0.93	0.3	1.01
CrK	20.04	16.12	1,596.74	2.52	0.23	0.97	1	0.99	1.22
MnK	2.00	1.52	125.24	6.02	0.02	0.95	1.01	0.99	1.08
FeK	64.22	48.09	3,339.61	2.02	0.60	0.97	1.02	0.93	1.03
NIK	4.82	3.44	184.23	6.10	0.04	0.99	1.03	0.8	1.04

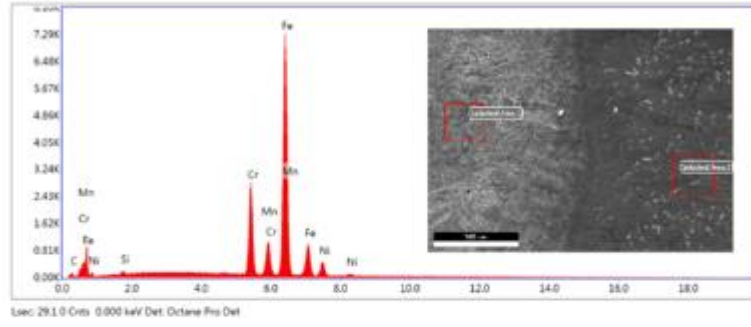
Şekil 8.84 N20 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
BK	0.06	0.25	0.03	99.99	0.00	1.17	0.83	0.21	1
CK	8.13	29.28	35.80	12.95	0.02	1.24	0.84	0.22	1
SiK	0.09	0.14	4.13	72.04	0.00	1.12	0.93	0.3	1.01
PK	0.01	0.02	0.61	81.23	0.00	1.08	0.93	0.41	1.02
SK	0.00	0.00	0.03	99.99	0.00	1.1	0.94	0.53	1.02
CrK	0.66	0.55	68.10	16.78	0.01	0.98	1	0.98	1.53
MnK	1.12	0.88	77.89	9.36	0.01	0.96	1	0.99	1.14
FeK	87.41	67.71	5,059.53	1.21	0.87	0.98	1.01	1	1.03
NIK	0.13	0.09	4.89	60.71	0.00	0.99	1.02	0.79	1.04
MoK	2.39	1.08	4.71	60.20	0.03	0.84	1.04	0.99	1.46

Şekil 8.85 N23 numaralı deneye ait ergime hattı ana malzeme bölgesi EDS analizi



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kraße	Z	R	A	F
C K	9.67	32.91	44.46	11.92	0.03	1.23	0.85	0.24	1
Si K	0.42	0.62	20.06	22.82	0.00	1.11	0.93	0.31	1.01
Cr K	14.76	11.60	1,254.31	2.87	0.18	0.97	1	0.99	1.25
Mn K	5.24	3.90	342.42	3.21	0.05	0.95	1.01	0.99	1.08
Fe K	64.54	47.24	3,547.49	1.84	0.61	0.97	1.02	0.95	1.03
Ni K	5.36	3.73	212.66	6.00	0.04	0.98	1.03	0.8	1.04

Şekil 8.86 N23 numaralı deneye ait ergime hattı kaynak metali bölgesi EDS analizi

Kaynaklı birleştirme işlemi uygulanan numunelerin birleşme hattında ana malzeme ve kaynak metalinden alınan grafiklerde element oranları incelenmiştir. EDS analizleri incelendiğinde; kimyasal kompozisyonlarda değişimler gözlemlenmektedir. EDS analizleri ergime hattında, kaynak metali ve ana malzeme tarafından olmak üzere 2 bölgeden yapılmıştır. Literatürden yararlanılarak elde edilen bilgilerde; kaynak işlemi sırasında yüksek ısı girdisi ile birlikte alaşım elementlerinin yanması ve kaynak metali ile ana malzemedeki ısının etkisi ile birlikte element oranlarındaki azalmalar meydana geldiği de düşünülmektedir (Kurt, 2022). Kaynak metalinde ana malzeme ve ilave dolgu metalinin kimyasal kompozisyonlarının karışımı şeklinde bir kimyasal kompozisyonun oluştuğu, ITAB bölgesinde ise ana malzemenin kimyasal kompozisyonuna uygun verilerin elde edildiği yapılan incelemelerde tespit edilmiştir. C atomunun çok küçük olması nedeniyle EDS analizlerinde zaman zaman malzeme içeriklerinden farklı sonuçlara ulaşılabilmesi mümkündür. Deneylerde kullanılan malzemelerin (ana malzeme–ilave dolgu metali) kimyasal kompozisyonunda belirtilen ortalama C oranları ile EDS ölçümlerinden elde edilen oranlar arasındaki farklılıkların bu nedenle oluştuğu düşünülmektedir.

8.3 Çekme Testi Sonuçları

Kaynaklı birleştirme işlemi gerçekleştirilen levhalardan ve ana malzemedan 3'er adet alınan numunelere çekme testi gerçekleştirilmiştir. Toplamda 75 adet çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi uygulanan ana malzeme ve kaynaklı birleştirmelerden alınan bir numune grubunun test sonrası görüntüleri Şekil 8.87 ve Şekil 8.88'de verilmiştir. Çekme testi uygulamaları sonucunda ana malzeme ve kaynaklı birleştirmeden alınan numunelerin maksimum çekme dayanımları ve bu çekme dayanımlarının ortalamaları ile birlikte % uzama miktarları ve % kesit daralmaları tespit edilmiştir. Deneylerden elde edilen tüm sonuçlar Ekler kısmında bulunan Ek A.'da verilmiştir. Testlerde oluşacak ölçüm belirsizliklerinin önüne geçmek adına tüm numunelerin ilk boyu ve kesiti test öncesinde işaretlenerek, test sonrasındaki uzama ve kesit daralmaları ayrıca hesaplanmıştır. Bu ölçümler sonucunda ana malzeme ve kaynaklı birleştirmelerden alınan her bir deneyde maksimum çekme mukavemeti için $\pm 5 \text{ N/mm}^2$ olacak şekilde tolerans aralığı belirlenmiştir.



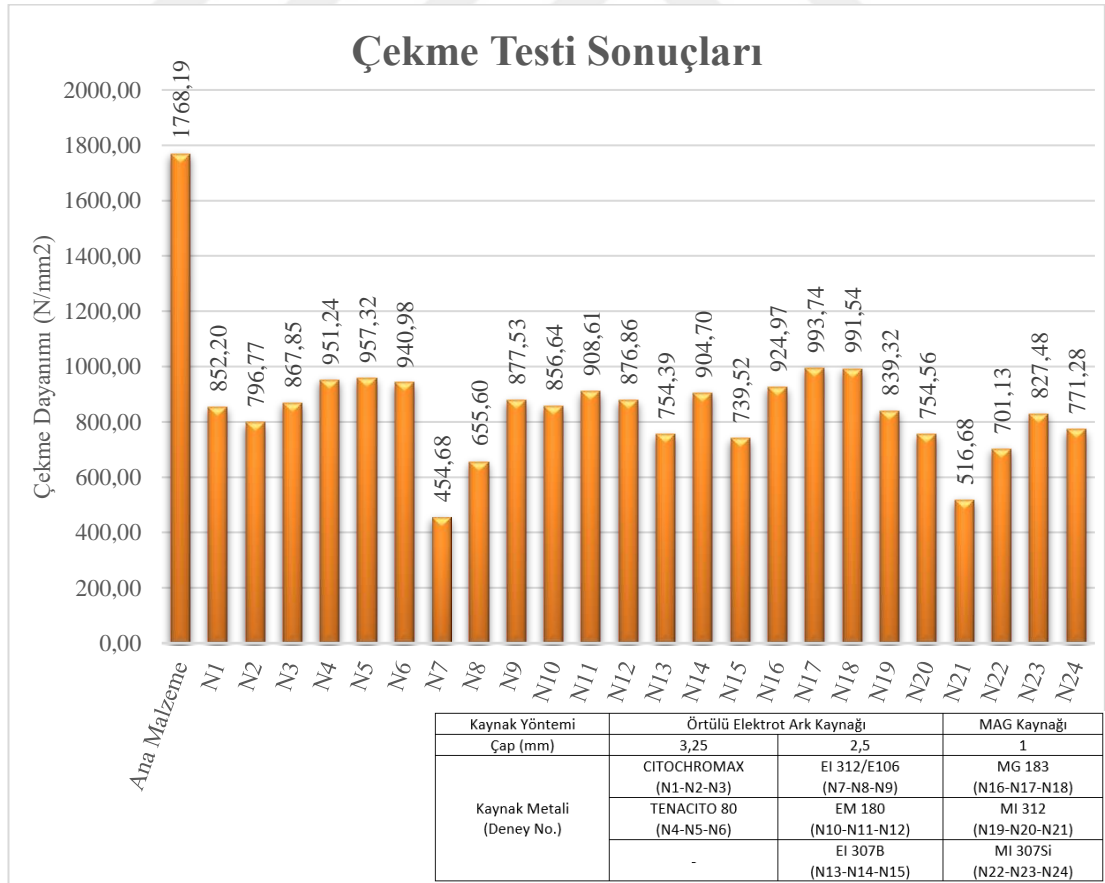
Şekil 8.87 Ana malzemeye ait çekme testi gerçekleştirilmiş numuneler



Şekil 8.88 N1 numaralı birleştirme numunelerinin çekme testi sonrası görüntüsü

Çekme testi sonuçlarının genel değerlendirilmesi

Çekme testleri ile elde edilen maksimum çekme mukavemeti sonuçlarını ifade eden genel grafik Şekil 8.89’da verilmiştir.



Şekil 8.89 Çekme testi sonuçları genel grafiği

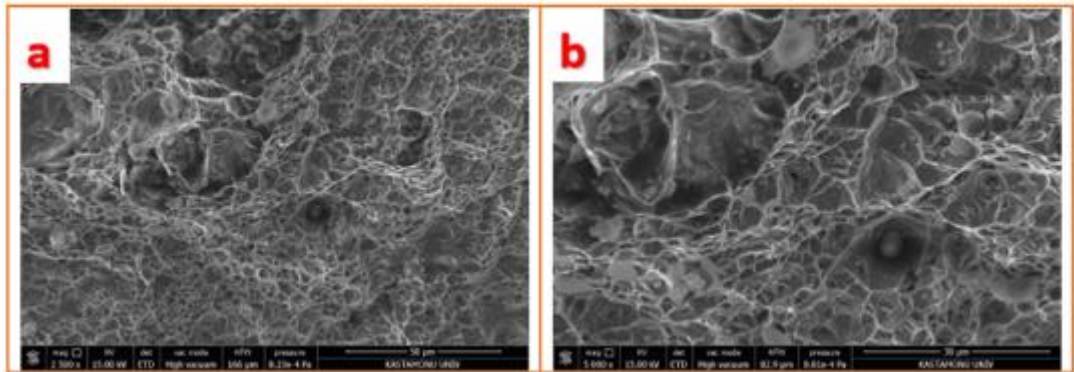
Şekil 8.89’da verilen çekme testi sonuçlarına ait grafik incelendiğinde Protection 500 ana malzemenin muazzam bir mukavemet değerine sahip olduğu görülmektedir. Sahip olduğu üstün mekanik özellikler nedeniyle zırh özelliği sergileyen bu malzemenin kaynak işlemleri ise ana malzemeye uygun bir elektrod türünün halihazırda ilave malzeme üreticileri tarafından bulunmaması ve kaynak işleminde uygulanan ısı neticesinde, bahsedilen üstün özelliklerin zayıflaması gibi sonuçlara neden olduğundan kaynaklı birleştirmelerin mukavemet değerleriyle, ana malzemenin mukavemet değeri arasında muazzam bir fark bulunmaktadır. Bu beklenen bir sonuçtur. Beklenen bu sonuca rağmen bu çalışmada Protection 500 malzemesinin kaynaklı birleştirme işlemlerinde kullanılabilecek ilave malzemeler tespit edilerek, bu malzemelerin metalürjik ve mekanik performanslarının araştırılması suretiyle endüstriyel olarak kullanımı noktasında kullanıcılara rehberlik etmesi açısından önem arz etmektedir.

Kaynaklı birleştirmelerin maksimum çekme mukavemeti, ana malzemenin maksimum çekme mukavemeti ile kıyaslanmıştır. Ana malzemenin alınmış numunelere uygulanan çekme testi sonucunda ortalama $1.768,19 \text{ N/mm}^2$ çekme mukavemeti tespit edilmiştir. Deneysel olarak $\varnothing 3,25 \text{ mm}$ çapında elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde en yüksek maksimum çekme dayanımı ortalama $957,32 \text{ N/mm}^2$ ile Tenacito 80 kodlu elektrodla birleştirilen N5 numaralı deneyde, $\varnothing 2,5 \text{ mm}$ çapında elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde yüksek maksimum çekme dayanımı ortalama $908,61 \text{ N/mm}^2$ ile EM 180 kodlu elektrodla birleştirilen N11 numaralı deneyde ve $\varnothing 1 \text{ mm}$ çapında ilave tel ile yapılan MAG kaynaklı birleştirmelerde ise en yüksek maksimum çekme dayanımı ortalama $993,74 \text{ N/mm}^2$ ile MG 183 kodlu ilave metalle birleştirilen N17 numaralı deneyde ölçülmüştür. İlave malzemeler içerisinde en yüksek maksimum çekme dayanımı veren malzeme MG 183 kodlu ilave teldir. Deneysel olarak $\varnothing 3,25 \text{ mm}$ çapında elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde en düşük maksimum çekme dayanımı ortalama $796,77 \text{ N/mm}^2$ ile Citochromax kodlu elektrodla birleştirilen N2 numaralı deneyde, $\varnothing 2,5 \text{ mm}$ çapında elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde en düşük maksimum çekme dayanımı ortalama $454,68 \text{ N/mm}^2$ ile EI 312/E 106 kodlu elektrodla birleştirilen N7 numaralı deneyde, $\varnothing 1 \text{ mm}$ çapında ilave tel ile yapılan MAG kaynaklı birleştirmelerde ise en düşük maksimum çekme dayanımı ortalama $516,68 \text{ N/mm}^2$ ile MI 312 kodlu ilave metalle birleştirilen N21 numaralı deneyde elde

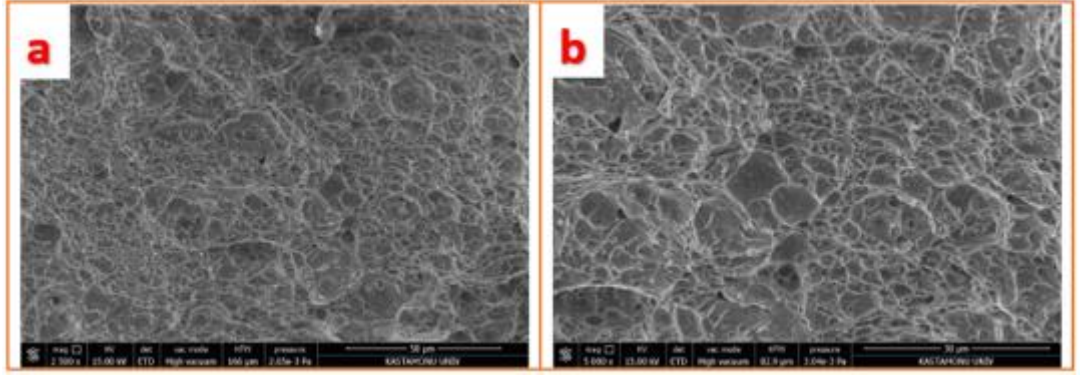
edilmiştir. Sonuç olarak; ilave dolgu metallereinden elde edilen çekme testi sonuçlarına göre, en yüksek çekme dayanımı MG 183 kodlu ilave telde, en düşük dayanım ise Ø2,5 mm çapındaki EI 312/E 106 kodlu elektrodda elde edilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin çekme testi sonuçlarından elde edilen en yüksek ve en düşük çekme mukavemeti değerleri ana malzemeye oranla mukayese edildiğinde MG 183 kodlu tel ana malzemenin %56,20'si, EI 312 / E106 kodlu tel ise ana malzemenin %25,71'i oranında dayanım göstermiştir. Doğal bir sonuç olarak; çekme testi uygulanan kaynaklı birleştirmelerin tümünde kopmaların hepsi kaynak metalinden gerçekleşmiştir.

8.3.1 Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

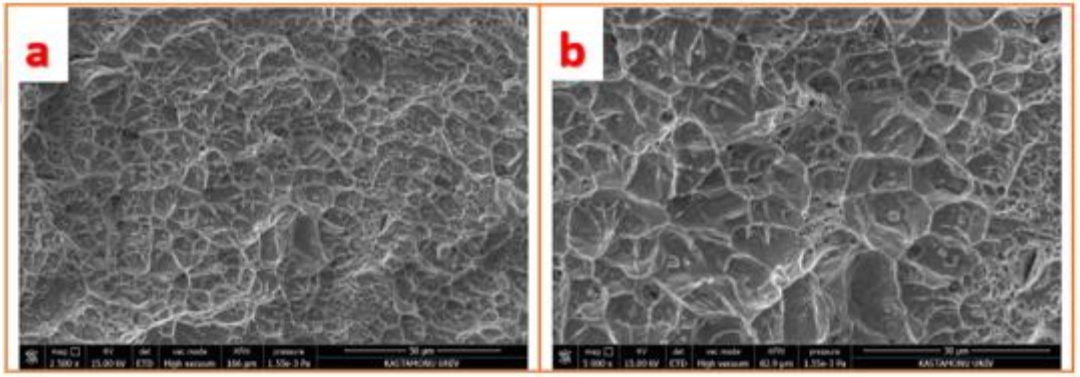
Çekme testi uygulanan numunelerde kırılma şekilleri hakkında değerlendirme yapmak ve numunelerdeki sünek-gevrek kırılmalar hakkında gözlem yapabilmek amacıyla numunelerin kırılma yüzeyleri üzerinde 2500 ve 5000 büyütmede SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Aynı kimyasal kompozisyona sahip olup, farklı akım şiddeti değerlerinde birleştirilen numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri birbirine çok benzediği için her elektrod kapsamında bir adet kırılma yüzeyi incelemesi yapılarak değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Kırılma yüzeyi incelemelerinde; ortalama akım şiddeti değerine sahip olan numunelerin analizleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi uygulanmayan ana malzemeye ait numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 8.90'da, kaynaklı birleştirmelerden alınan numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri ise Şekil 8.91–Şekil 8.98 arasında verilmiştir.



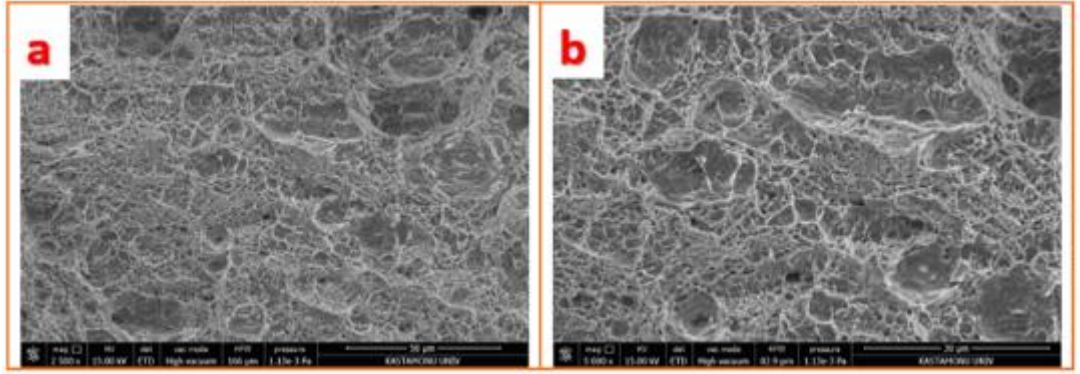
Şekil 8.90 Ana malzemeye (kaynaksız numune) ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x



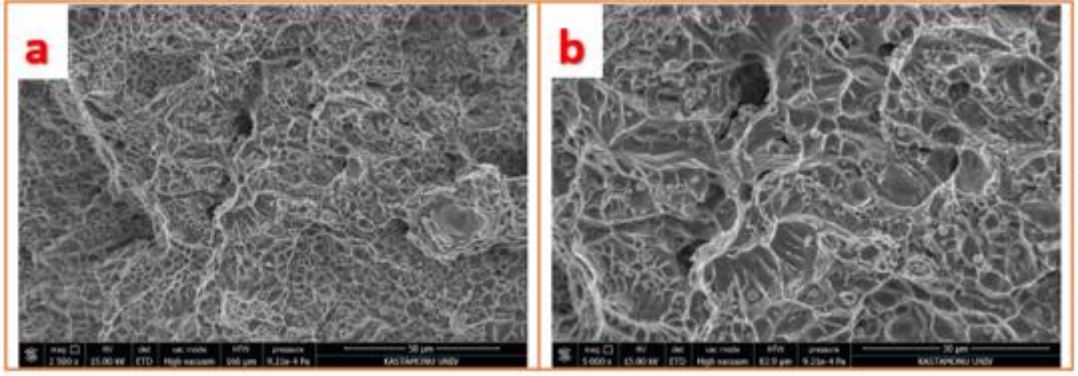
Şekil 8.91 N2 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x



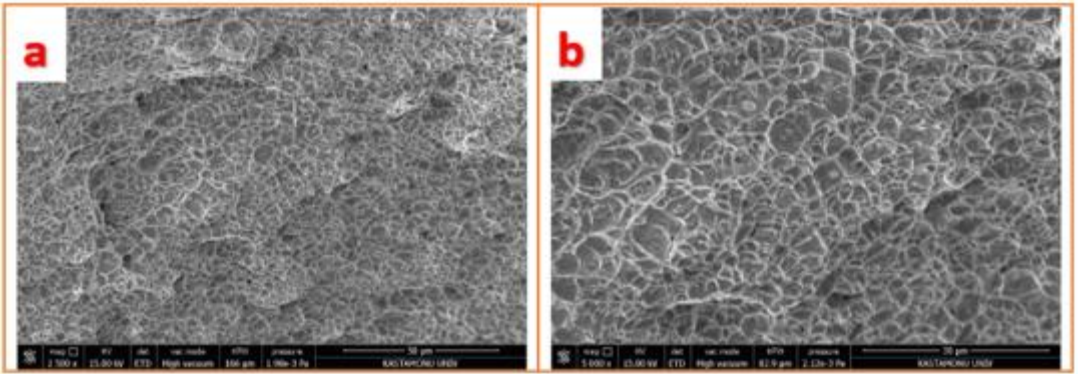
Şekil 8.92 N5 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü



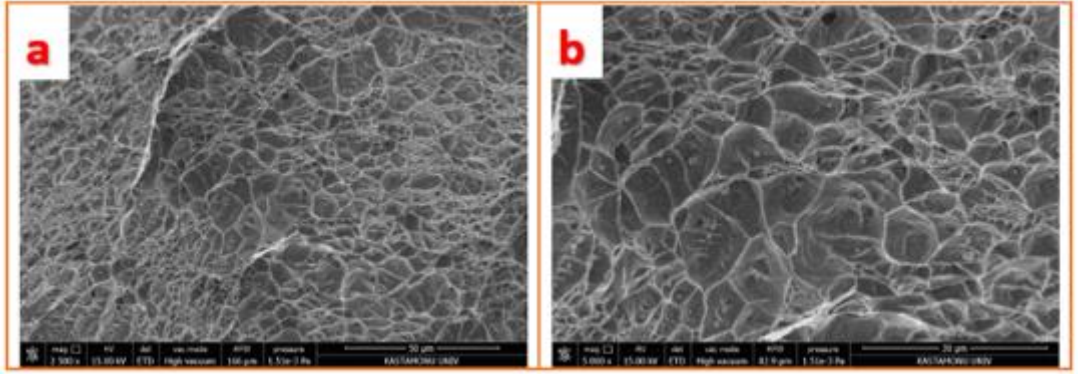
Şekil 8.93 N8 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü



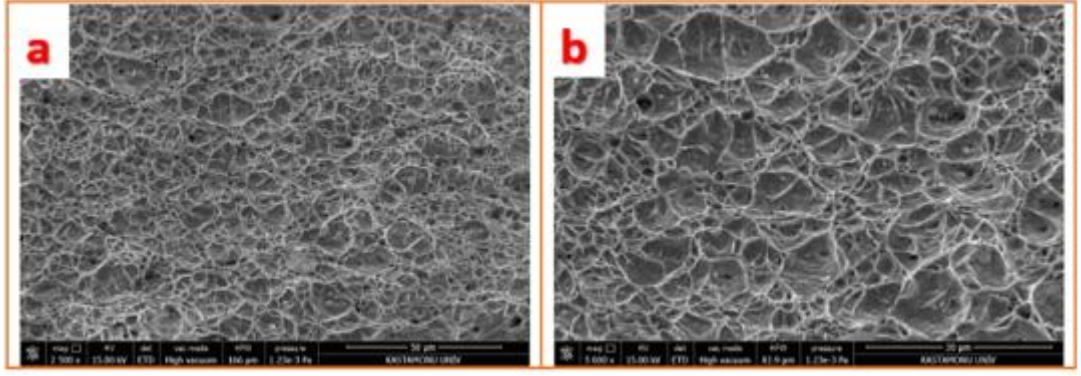
Şekil 8.94 N11 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü



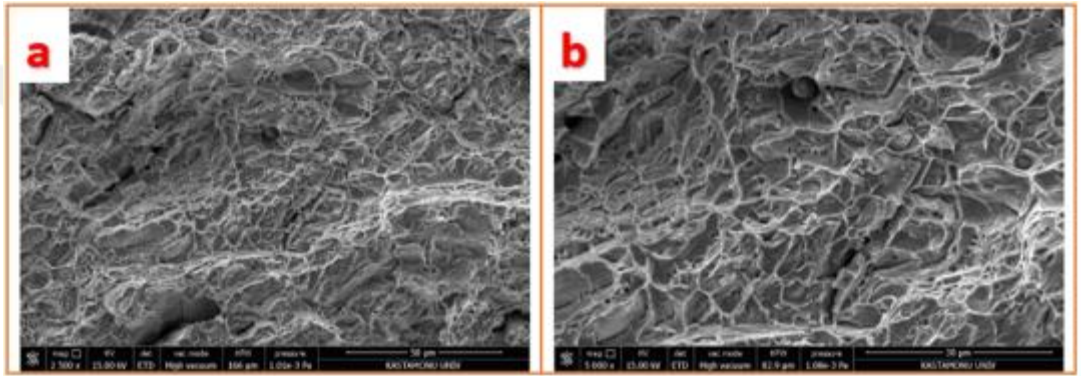
Şekil 8.95 N14 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü



Şekil 8.96 N17 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü



Şekil 8.97 N20 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü



Şekil 8.98 N23 deneyine ait çekme test numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü a) 2500x, b) 5000x görüntü

Şekil 8.90–Şekil 8.98 arasında verilen çekme test numunelerinin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntülerinde; numunelerin sergilediği uzama ve yönlenmeden, kaynaklı birleştirmelerin genel olarak sünek bir davranış sergilediği, ancak bazı bölgelerde oluşan klivaj kırılmaları nedeniyle gevrek kırılmaların da olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak kırılmalar yarı gevrek-yarı sünek olarak ya da her iki kırılma türünü birlikte ifade eden kombine mod olarak da adlandırılabilir. Numunelerin kopması genel olarak kayma kırılması sonucu oluşmaktadır. Kırılmalar SEM görüntülerinde lifli yapıları oluşturmuştur. Ayrıca, meydana gelen kırılmalar plastik deformasyon etkisi ile gerçekleştiğinden genel olarak sünek özellik gözlemlenmiştir. SEM incelemelerinde görülen eş eksenli ve peteksi görüntülerin oluşumu ve kırılmaların tek parça olması sünek kopma meydana geldiğini göstermektedir. Dislokasyon hareketleri kalıntılarda ve tane sınırlarında sonlandığı için bu bölgelerde önce boşlukların oluştuğu, sonra da bu boşlukların birleşerek genişlediği ve kırılma yüzeylerinin mat ve lifli yapıda oluştuğu belirtilmiştir (Aşıkuzun vd., 2018). Bu durum bizim çalışmamızla benzerlik arz etmektedir. Boşluklar yeterince büyüdüğünde ise

aralarında köprü oluşmuş ve petek görünümü meydana gelmiştir. Bu yüzden görüntülerde lifli bir yapı ile beraber petek görünümünü de görmek mümkündür.

Yine deneylerde kullanılan zırh çeliğinin mikroyapısı martenzitik yapıdan oluşmaktadır. Mikroyapının sahip olduğu tane büyüklüğün ve mikroalaşım elementi oranları da kırılma davranışı üzerine etki etmektedir. Mukavemet ve kaynaklanabilirlik için en etkili yöntem ise tane boyutunun küçültülmesidir. Tane boyutunun küçüklüğü, plastik deformasyon esnasında daha yüksek gerilimlere ötelenmektedir. Bu nedenle numunede oluşacak kopma durumu daha yüksek gerilmelere ötelenmiş ve kırılma mekaniği üzerinde olumlu etkiler oluşmuştur. İncelediğimiz Protection 500 zırh çeliğinin genel olarak sünek davranış göstermesi sonucunda malzeme çatlak sonucunda şekil değiştirmekte ve çatlak ucu kütleşmektedir. Böylece gerilim yığılma faktörü azalmakta ve çatlağın daha da ilerlemesi engellenmektedir. Böyle durumlarda numunenin daha fazla enerji absorbe ettiği ve ana çatlağın ilerleme hızının yavaşladığı Taş (2004) tarafından da belirtilmiştir. Çalışmamız bu özellikleriyle literatürle benzer sonuçlar sergilemiştir.

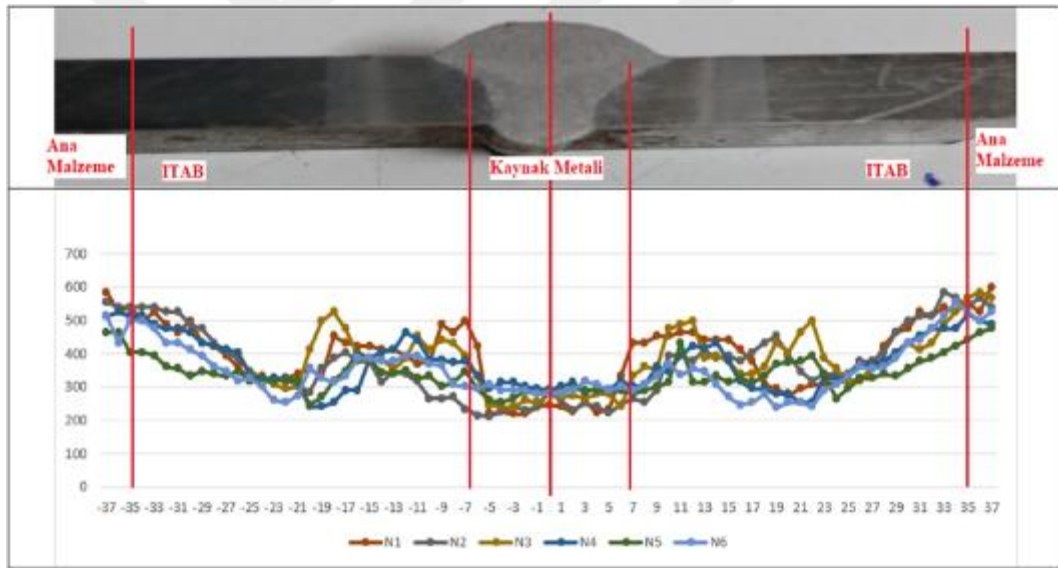
8.4 Mikrosertlik Testi Sonuçları

Kaynak işlemi uygulanmış levhalardan mikrosertlik test numuneleri alınmıştır. Mikrosertlik testi öncesi doğru sonuçlara ulaşabilmek adına numunelerde en doğru sonuçları almak için parlatılmış yüzey oluşturulması amacıyla numnelere zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında her bir kaynaklı numuneden 75 adet ölçüm alınmakla birlikte toplamda 1800 adet mikrosertlik ölçüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik testi uygulamasından önce, kaynaklı birleştirme uygulanmış levhadan alınan numunenin görüntüsü Şekil 8.99'da verilmiştir.



Şekil 8.99 Mikrosertlik testi uygulanmış numune

Kaynaklı birleştirmelerin plastik deformasyona karşı direncini ölçmek için numunelere mikrosertlik testleri uygulanmıştır. Elde edilen mikrosertlik sonuçları deneylerde kullanılan ilave metalin türü ve çapına göre ayrı ayrı grafikler halinde verilmiştir. Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağı uygulamalarında Ø3,25 mm çapındaki elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmelerin mikrosertlik sonuçları Şekil 8.100'de, Ø2,5 mm çapındaki elektrod ile yapılan kaynaklı birleştirmelerin mikrosertlik sonuçları ise Şekil 8.101'de verilmiştir. MAG kaynağı uygulamalarında kullanılan Ø1 mm çapındaki kaynak teli ile yapılan kaynaklı birleştirmelerin mikrosertlik sonuçları ise Şekil 8.102'de verilmiştir. Ek olarak, ölçüm belirsizliklerinin önüne geçmek için tüm sonuçlarda tolerans aralığı ± 5 HV olacak şekilde verilmiştir. Elde edilen tüm mikrosertlik sonuçları ise Şekil 8.103'te verilmiştir.



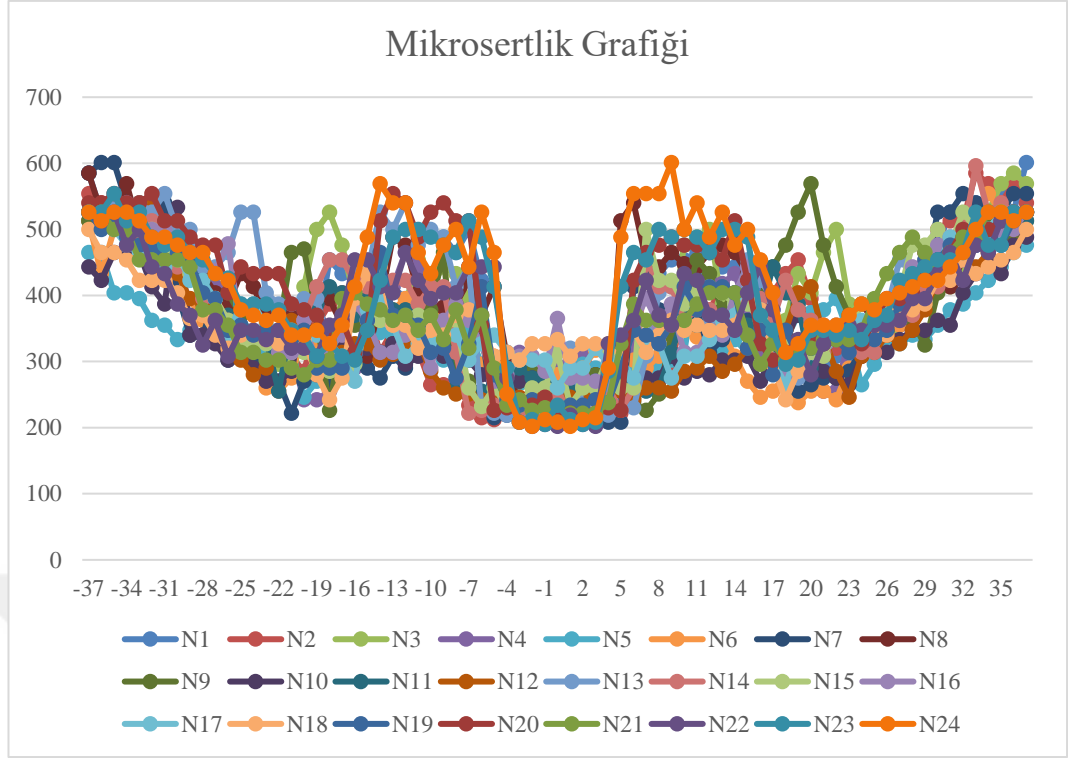
Şekil 8.100 3,25 mm elektrodla yapılan birleştirmeye ait mikrosertlik grafiği



Şekil 8.101 2,5 mm elektrodla ile yapılan birleştirmeye ait mikrosertlik grafiği



Şekil 8.102 1 mm ilave tellere ile yapılan birleştirmeye ait mikrosertlik grafiği



Şekil 8.103 Genel mikrosertlik testi sonuçları grafiği

Mikrosertlik testi sonuçları incelendiğinde; ilave tel, elektrod türü ve uygulanan akım şiddeti değerlerine bağlı olarak numunelerin mikrosertlik değerlerinde değişimler gözlemlendiği tespit edilmiştir. Akım şiddetinin değişken olduğu durum göz önüne alındığında akım şiddeti değerlerinin artış göstermesiyle birlikte mikrosertlik değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Akım şiddeti değerlerinin artmasıyla birlikte ısı girdisi de artmakta, ısı girdisinin artışına ters orantılı olarak mikrosertlik değerleri ise düşmektedir. Bariz bir dalgalanma olmasa da mikrosertlik sonuçlarını gösteren grafiklerden artan akım şiddeti değerlerinin tersine mikrosertlik değerlerinin düştüğü görülmektedir.

Mikrosertlik testi sonuç grafiği detaylı bir şekilde incelendiğinde; tüm birleştirmelerde benzer mikrosertlik eğrilerinin oluştuğunu söylemek mümkündür. Elde edilen verilerde ana malzeme ve ITAB'da yaklaşık olarak birbirine yakın sonuçlar elde edilirken, dolgu metali türünün değişken olması nedeniyle kaynak metali bölgesinde yer yer farklı ölçümlerin elde edildiği görülmüştür.

Kaynak metali mikrosertlik sonuçları birbiri içerisinde kıyaslandığında; en yüksek ortalama mikrosertlik sonuçları, 335 HV olarak MI 307Si kodlu ilave tel ile yapılan

N24 numaralı birleştirmede tespit edilirken, en dūřük mikrosertlik sonuçları ortalama 240 HV olarak Ø3,25 mm çapındaki Citochromax elektrod ile gerçekleştirilen N2 numaralı birleştirmeden alınan ölçümlerden elde edilmiştir. Aradaki farkın temel sebebi uygulanan kaynak yöntemi ve ilave telin sahip olduğu kimyasal kompozisyon ve mekanik özellikler nedeniyledir.

Kaynak metali mikrosertlik değerlerinin incelendiği Protection 500 malzemeye ait farklı parametrelerde birleştirilen deneylerden elde edilen mikrosertlik grafikleri genel olarak birbirine benzemekte olup, uygulanan akım şiddeti ve elektrod türüne göre mikrosertlik değerleri farklılık göstermektedir. Tüm deneylerdeki mikrosertlik grafiklerinde mikrosertliğin en yüksek tayin edildiği bölge ITAB, en düşük tayin edildiği bölge ise kaynak metali bölgesidir. Ana malzeme bölgesi ise kaynak metali ve ITAB mikrosertliklerinin arasında bir değerde olup, ITAB değerlerine daha yakın değerler göstermiştir. ITAB ve kaynak metalinde, esas metalden farklı mikrosertlik değerleri tespit edilmiş olup, söz konusu değerlerin yüksek sıcaklıklarda uygulanan kaynak işlemine bağlı olarak değiştiği bilinmektedir (Kurt, 2022). Kaynaklı birleştirme işlemlerinde uygulanan ısının söz konusu bölgelerde, malzemeye bir nevi ısı işlem uygulayarak etkin olduğu görülmektedir. Deneylerde en yüksek mikrosertlik değerlerine ITAB'da ulaşılmıştır. Buna sebep olarak kaynak esnasında en hızlı soğuyan bölgenin ITAB bölgesi olmasıdır. Kaynak esnasında katılaşma ana malzeme sınırlarından başlayarak kaynak merkezine doğru gerçekleştiği için ITAB'da soğuma daha önce ve hızlı bir şekilde gerçekleşmiş bu nedenle tüm deneylerde söz konusu bölgede soğuma hızına bağlı olarak en yüksek mikrosertlik değerlerine ulaşılmıştır. En son katılaşan bölge olduğundan yavaş soğuma nedeniyle de kaynak metalinde ITAB'a göre daha düşük mikrosertlik değerleri elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde; tane yapısı ve mikrosertlik değerleri arasında bir ilişki kurulduğunda; normal şartlarda daha düşük mikrosertlik değerleri sergilemesi gereken ITAB'daki iri taneli bölgelerde yüksek mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Bu durum tane yapısı ile alakalı olmayıp, tamamen soğuma hızıyla ilgilidir. Grafiklerde ölçülen iri taneli bölgelerdeki yüksek sertliğin sebebi, tane irileşmesinden değil, hızlı soğumadan dolaydır. İri taneli bölgeler, birleştirmelerde daha yüksek sıcaklığa maruz kaldığı için taneler daha iridir, fakat ITAB bölgesinde daha hızlı soğuma olduğu için yapı burada ciddi bir şekilde sertleşme eğilimi gösterir. Mikrosertlik ölçümleri diğer testler ve

incelemeler ile birlikte değerlendirildiğinde testler ve incelemeler arasında bir bütünlük olduğu görülmektedir. Yüksek akım şiddeti uygulanan kaynaklı birleştirmelerde ısı girdisinin daha fazla olması nedeniyle ITAB bölgesi daha geniş oluşmuştur. Kaynaklı birleştirmelerdeki ITAB genişlikleri akım şiddetinin artması ile birlikte artış gösterdiği, en yüksek ITAB genişliğinin ise daha yüksek akım şiddeti değerleri ve dolayısıyla ısı girdisi ile birleştirilen MAG kaynak yöntemi kullanılan Ø1 mm çapındaki ilave tel ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde olduğu makro ve mikro yapı incelemelerinde tespit edilmiştir. Örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı kullanılarak, Ø3,25 mm çapındaki elektrodla yapılan kaynaklı birleştirmelerde, MAG kaynak yöntemine göre daha dar bir ITAB tespit edilirken, en dar ITAB bölgesinin Ø2,5 mm çapındaki elektrodla yapılan kaynaklı birleştirmelerde olduğu tespit edilmiştir. Akım şiddeti değerlerinin yüksek seçildiği deneylerde malzemeye uygulanan ısı girdisi arttığından taneler daha iri taneli ve ITAB'lar daha geniş alanda oluşmuştur. Makro ve mikro yapı incelemelerinden elde edilen görüntüler bu durumu desteklemektedir. Çekme testlerinden elde edilen verilerde de; daha yüksek ısının uygulanması nedeniyle ITAB'ın daha geniş olduğu ve daha iri tanelerin olduğu deneylerde, birleştirmelerin mukavemet değerlerinde düşüş görülürken, yüzde uzama değerlerindeki artışlar dikkat çekmiştir. Uygulanan akım şiddeti değerlerine bağlı olarak oluşan ısı girdisi ve soğuma hızının etkisiyle iri taneli yapıların olduğu deneylerde, daha ince taneli yapıların olduğu diğer deneylere göre daha düşük mikrosertlik değerleri görülmüştür. Mikrosertlik ve mukavemetin doğru orantılı ilişkisi, deneysel çalışmalarda çekme ve mikrosertlik testlerinde de görülmüştür.

8.5 Eğme Testi Sonuçları

Kaynak bölgesi merkezde bulunacak şekilde numunelere TS EN ISO 5173 standardına uygun olarak eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelere kep ve kök bükme olarak iki farklı yönde her bir deneyden 3'er numune olmak üzere toplamda 72 adet eğme test numunesi hazırlanmış ve numunelere eğme testleri uygulanarak kaynaklı birleştirmelerin ana malzemenin süneklik formuna yakın bir form sergileyip sergilemedikleri tayin edilmeye çalışılmıştır. Yine bu yöntemde kaynaklı birleştirmede oluşabilecek hatalar da göz önüne çarpıcı bir şekilde çıkacağından kaynaklı birleştirmelerin uygunluğu tespit edilmiştir. Uygun olan kaynaklı birleştirmeler 180°

büküm açısına ulaşırken, uygun olmayan kaynaklı birleştirmeler ise kırılma açıları ile birlikte tolerans aralığı $\pm 2^\circ$ olacak şekilde Tablo 8.1’de verilmiştir.

Tablo 8.1 Eğme testi sonuçları

Deney No	Kaynak Yöntemi	İlave Malzeme Çapı (mm)	Mandrel Çapı (mm)	Kalıp Mesafesi (mm)	Bükme Açısı ($^\circ$)	Kep Bükme		Kök Bükme	
						Sonuç	Açı	Sonuç	Açı
N1	Örtülü Elektrodla Elektrik Ark Kaynağı	Ø3,25	20	28,4	180	Uygun	180°	Uygun Değil	175°
N2						Uygun Değil	72°	Uygun Değil	65°
N3						Uygun Değil	54°	Uygun Değil	175°
N4						Uygun	180°	Uygun Değil	74°
N5						Uygun	180°	Uygun	180°
N6						Uygun	180°	Uygun Değil	55°
N7		Uygun Değil				20°	Uygun Değil	70°	
N8		Uygun				180°	Uygun Değil	30°	
N9		Uygun Değil				53°	Uygun Değil	86°	
N10		Uygun				180°	Uygun	180°	
N11		Uygun				180°	Uygun	180°	
N12		Uygun				180°	Uygun	180°	
N13		Uygun Değil				57°	Uygun Değil	175°	
N14		Uygun Değil				45°	Uygun Değil	87°	
N15		Uygun				180°	Uygun	180°	
N16	MAG Kaynağı	Ø1,0	20	28,4	180	Uygun	180°	Uygun Değil	112°
N17						Uygun	180°	Uygun	180°
N18						Uygun	180°	Uygun	180°
N19						Uygun	180°	Uygun	180°
N20						Uygun	180°	Uygun	180°
N21						Uygun	180°	Uygun Değil	50°
N22						Uygun	180°	Uygun	180°
N23						Uygun	180°	Uygun Değil	175°
N24						Uygun	180°	Uygun	180°

Eğme testleri sonucunda plastik deformasyona uğrayan eğme testi numuneleri Şekil 8.104–Şekil 8.111 arasında verilmiştir. Şekillerde görüntü tekrarı olmaması açısından her elektrod türünde ortalama akım şiddeti değerinde birleştirilmiş deneylerden alınan eğilmiş numune görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8.104 N2 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler



Şekil 8.105 N5 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler



Şekil 8.106 N8 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler



Şekil 8.107 N11 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler



Şekil 8.108 N14 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler



Şekil 8.109 N17 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler



Şekil 8.110 N20 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler



Şekil 8.111 N23 deneyine ait eğme testi gerçekleştirilmiş numuneler

Eğme testi sonuçları incelendiğinde; bazı numunelerin bükme işleminin kusursuz bir şekilde gerçekleştiği, bazı numunelerde ise 180° büküm açısına ulaşmadan kırılmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Yapılan incelemelerde inklüzyon ve mikro gözenek gibi gözle görülür kaynak hatası olmadığı da gözlemlenmiştir. Meydana gelen kırılmaların ana malzeme-dolgu metali arasındaki kimyasal kompozisyon ve mekanik özelliklerin uyumsuzluğu sebebiyle gerçekleştiği düşünülmektedir.

Eğme deneyinde numunenin iç yüzeylerinde basma ve dış yüzeylerinde ise çekme gerilmelerine maruz kalmıştır. Dolayısıyla iç yüzeyde genişleme ve dış yüzeyde kesit daralması oluşmuştur. Tablo 8.1’de verilen eğme testi sonuçları ve eğilen numunelerin görüntüleri incelendiğinde; 180° büküm işlemi gerçekleştirilmiş numunelerden iki

yönlü (kep ve kök) eğme testi sonucunda; N5, N10, N11, N12, N15, N17, N18, N19, N20, N22 ve N24 numaralı deneylerde birleşim ara yüzlerinde gözle görülebilir herhangi bir çatlama veya ayrılma hatası gözlenmemiştir. N1, N4, N5, N6, N8, N10, N11, N12, N15, N16, N17, N18, N19, N20, N21, N22 ve N23 numaralı deneylerde ise kep eğme deneyleri başarılı olup, kök eğme deneylerinde başarılı olmadığı gözlemlenmiştir. N2, N3, N7, N9, N13 ve N14 numaralı deneylerde ise hem kep ve hem kök eğme deneylerinde uygun olmadığı gözlemlenmiştir.

Eğme testlerinde kaynaklı bağlantılar herhangi bir hasara uğramadan eğilebiliyorsa, birleştirmelerin sağlıklı olduğunun göstergesi olarak yorumlanabilir. Bu noktada eğme testlerinde kaynaklı birleştirmelerin çoğunluğundan olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

9.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, yüksek sertliğe sahip Protection 500 zırh çeliğinin, örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı ve gaz metal ark kaynağı yöntemleri kullanılarak kaynaklı birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

- Makroyapı görüntüleri incelendiğinde kaynak metali, birleşme hattı ve ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) net bir şekilde görülebilmektedir. Ayrıca kaynak bölgesinde makro boyutta hataya neden olabilecek çatlak vb. herhangi bir süreksizliğe de rastlanılmamıştır. Yine makroyapı fotoğraflarında aynı elektrod ile birleştirilen deneylerde akım şiddetinin artmasıyla birlikte oluşan ısı girdisi artışıyla birlikte daha geniş bir kaynak bölgesinin oluştuğu buna bağlı olarak da tane yapılarının farklılaştığı gözlemlenmiştir.
- Mikroyapı görüntülerinde; kaynak metali sınırında iri tanelerden oluşan ITAB makroyapısının, ana metale yaklaştıkça daha ince tanelerden oluştuğu görülmüştür. ITAB'da ince taneli bölgelerde eş eksenli benzer mikroyapıların oluştuğunu söylemek mümkündür. ITAB'daki iri taneli bölgeler ise genel olarak birbirine benzemekte olup, kaynak işlemi esnasında oluşan yüksek ısı nedeniyle, kaynak metali sınırlarında daha iri taneli olarak oluşmuştur.
- Kaynak metali mikroyapısında ince taneli bir yapının oluştuğu, kaynak metallerinin içerdikleri element oranları ve aşırı ısınma ve aşırı soğuma hızlarına göre mikroyapılarda farklılıklar görülmüştür. Kaynak metalleri incelendiğinde, östenitik, östenitik-ferritik ve ince taneli yapı olan asiküler ferrit yapılarının oluştuğu, kaynak esnasında oluşan yüksek türbülans dolaylı kaynak metalindeki tanelerin diğer bölgelere oranla çok daha homojen bir şekilde ve daha ince tanelerden oluştuğu, kaynak metalinde tane yapısı olarak; klasik kaynak metalindeki dendritik yapının hâkim olduğu görülmüştür.

- SEM fotoğrafları genel olarak değerlendirildiğinde ısı girdisi ve soğuma süresinin etkisi ile tane yapılarında farklılıklar gözlenmiştir. SEM görüntülerinde mikroyapı görüntülerine benzer görüntüler elde edilmiş ve aynı sonuçlara varılmıştır.
- EDS analizleri sonucunda kaynak metalinde, ana malzeme ve ilave malzemenin kimyasal kompozisyonlarının karışımı şeklinde, seyrelmelerin de etkili olduğu bir kimyasal kompozisyonun olduğu, ITAB bölgesinde ise ana malzemenin kimyasal kompozisyonuna yakın verilerin elde edildiği tespit edilmiştir.
- Ana malzemedan elde edilen ve 3 numunenin teste tabi tutulduğu çekme testi sonuçları ortalamalarına göre, ana malzemede çekme mukavemeti ortalama 1768,19 N/mm², ortalama yüzde uzama değeri %5,78, ortalama % kesit daralması ise %8,93 olarak tespit edilmiştir.
- Kaynaklı birleştirmelerden elde edilen çekme testi sonuçları incelendiğinde, en yüksek dayanım Ø1 mm çapındaki MG 183 kodlu ilave tel ile birleştirilen N17 numaralı deneyde, en düşük dayanım ise Ø2,5 mm çapındaki EI 312/E 106 kodlu N7 numaralı deneyde ölçülmüştür. N17 numaralı deney ortalama 993,74 N/mm², N7 numaralı deney ise ortalama 454,98 N/mm² çekme mukavemeti değeri sergilemiştir. Elde edilen en yüksek ve en düşük dayanım değerleri sırasıyla ana malzemedan elde edilen dayanıma oranlandığında, kaynaklı birleştirmelerin ana malzeme dayanımına oranlamaları en yüksek mukavemet değerinde %56,20 ve en düşük mukavemet değerinde %25,71 olarak elde edilmiştir.
- Kırılma yüzeylerinin SEM incelemelerinde tanelerin sergilediği uzama ve yönlenmeden, kaynaklı birleştirmelerin genel olarak sünek bir davranış sergilediği ancak bazı bölgelerde oluşan klivaj kırılmaları nedeniyle de gevrek kırılmaların olduğu tespit edilmiştir.
- Mikrosertlik grafiği detaylı incelendiğinde tüm deneylerde yaklaşık olarak benzer mikrosertlik eğrilerinin oluştuğunu söylemek mümkündür. Elde edilen verilerde ana malzeme ve ITAB sınırlarında yaklaşık olarak birbirine yakın sonuçlar elde edilirken, dolgu metali türünün değişken olması nedeniyle kaynak metali mikrosertlik sonuçlarında farklılıklar oluştuğu görülmüştür.

- Kaynak metali mikrosertlik sonuçları birbiri içerisinde kıyaslandığında; en yüksek ortalama mikrosertlik sonuçları, 335 HV olarak MI 307Si kodlu ilave tel ile yapılan N24 numaralı birleştirmede tespit edilirken, en düşük mikrosertlik sonuçları ortalama 240 HV olarak Ø3,25 mm çapındaki Citochromax elektrod ile gerçekleştirilen N2 numaralı birleştirmeden alınan ölçümlerden elde edilmiştir. Aradaki farkın temel sebebi uygulanan kaynak yöntemi ve ilave telin sahip olduğu kimyasal kompozisyon ve mekanik özellikler nedeniyledir.
- Tüm deneylerdeki mikrosertlik grafiklerinde sertliğin en yüksek tayin edildiği bölge ITAB, en düşük tayin edildiği bölge ise kaynak metali bölgesidir. Ana malzeme bölgesi ise kaynak metali ve ITAB mikrosertliklerinin arasında bir değerde olup, ITAB değerlerine daha yakın değerler göstermiştir.
- Eğme testi sonrası görüntüler incelendiğinde; bazı numunelerin bükme işleminin kusursuz gerçekleştiği bazı numunelerde ise 180° büküm gerçekleşmeden kırılmaların olduğu tespit edilmiştir. Yapılan incelemelerde mikro gözenekler ve inklüzyonlar gibi gözle görülür bir kaynak hatası olmadığı görülmüştür.
- Eğme testi sonrası tüm numuneler gözle incelendiğinde; N5, N10, N11, N12, N15, N17, N18, N19, N20, N22 ve N24 numaralı deneylerde birleşim ara yüzeylerinde gözle görülebilir herhangi bir ayrılma veya çatlama hatasının oluşmadığı, N1, N4, N6, N8, N16, N21 ve N23 numaralı deneylerin kep eğme deneylerinde başarılı olup kök eğme deneylerinde uygun olmadığı ve N2, N3, N7, N9, N13 ve N14 numaralı deneylerin ise hem kep hem de kök eğme deneylerinde uygun olmadığı gözlemlenmiştir.
- Eğme testinde kaynaklı bağlantı herhangi bir hasara uğramadan eğilebilmesi, birleştirmelerin sağlıklı olduğunun göstergesi olarak yorumlanabileceğinden, deneylerin çoğunluğundan olumlu sonuçlar elde edildiği ve kaynaklı birleştirmelerin kuvvet uygulanarak plastik deformasyon oluşmasına rağmen kopma meydana gelmeden genel olarak yapısal bütünlüğünü koruduğu görülmüştür.

- En iyi mekanik ve yapısal performansı gösteren elektrod ve telleri belirlemek için yapılan genel incelemeler ve sonuç değerlendirmesinde; örtülü elektrodla ark kaynağı ile birleştirilen ve Ø3,25 mm çapındaki elektrodlar arasında yapılan kıyaslamada Tenacito 80 kodlu elektrod ile yapılan N5 numaralı deney, Ø2,5 mm çapındaki elektrodlar arasında EM 180 kodlu elektrod ile yapılan N11 numaralı deney ve Ø1 mm çapındaki ilave tellerle gazaltı kaynağı (MAG) ile birleştirilen malzemeler arasında MG 183 kodlu kaynak teli ile yapılan N17 numaralı deneyde daha iyi sonuçların elde edildiği tespit edilmiştir.
- Protection 500 zırh çeliklerinin birleştirilmesinde, MAG kaynağının, örtülü elektrodla elektrik ark kaynağı uygulamalarına göre daha iyi sonuçlar sergilediği tespit edilmiş ve kaynaklı birleştirmeler için daha verimli olduğu, tüm kaynaklı birleştirmeler incelendiğinde, mekanik özellikler açısından en iyi sonuçları sergileyen ilave metalin, N17 numaralı deneyde MAG kaynak yönteminde kullanılan MG 183 kodlu ilave tel olduğu tespit edilmiştir.

9.2 Öneriler

- Yapılan tüm kaynaklar manuel olarak yapılmıştır. İnsana bağlı kaynak hatalarını engellemek için aynı dolgu metalleri kullanılarak kaynak işlemleri otomatik olarak gerçekleştirilebilir.
- Bu tez çalışmasına ek olarak kaynaklı birleştirmelere yorulma testi gerçekleştirilebilir. Zırh çeliği kaplama işlemi gerçekleştirilen askeri araçların engebeli arazilerde görev yapabileceğini göz önünde bulundurursak, kaynaklı birleştirmenin yorulma dayanımının belirlenmesi önemlidir.
- Tercih edilen kaynak tellerinden en iyi performansı sergileyen dolgu metallerinin özlü olarak üretilip performansı geliştirilebilir.
- Yüksek sertliğe sahip zırh çeliklerinin; aşınmanın yoğun olduğu endüstrilerde kullanımına yönelik çalışmalar kapsamında farklı malzemelerle kaynaklanabilirliği araştırılarak yeni alanlar oluşturulabilir.

KAYNAKLAR

- Abo Al Ela, M. A., Abdo, G. M., Elmahallawy, A. M., & Sallam, M. T. (2013). Effect of SMAW Welding Parameters on Mechanical and Structure Properties of Welded Joints of the Armoured Steel 0.32% C, 1% Cr, 1.8% Ni and 0.7% Mo. In *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology* (Vol. 15, No. AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY, ASAT-15–May 28-30, 2013, pp. 1-11). The Military Technical College.
- Anık, S. (1991). *Kaynak tekniği el kitabı: Yöntemler ve donanımlar*. Gedik Holding.
- Anık, S., & Vural, M. (1996). *Gazaltı ark kaynağı:(TIG-MIG-MAG)*. GEV.
- Anık, S., Tülbentçi, K., & Kaluç, E. (1991). *Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağı*. Gedik Holding.
- Arık, M. (2018). Mars 240 (MIL A46100) Zırh Çeliğinin Korunmalı Metal Ark Kaynağı ile Birleştirilerek Kaynak Performansının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Mersin.
- Aşıkuzun, E., Cetinkaya, C., Boz, M., & Ada, H. (2018). Fracture surface investigations of API pipes welded with parameters determined by Taguchi method. *Sakarya University Journal of Science*, 22(5), 1392-1402.
- Atabaki, M. M., Ma, J., Yang, G., & Kovacevic, R. (2014). Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations. *Materials & Design*, 64, 573-587.
- Atapek, Ş. H. (2011). Bor Katkılı Bir Zırh Çeliğinin Fiziksel Metalurjik Esaslar Doğrultusunda Geliştirilmesi ve Balistik Performansının Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kocaeli.
- Atapek, Ş. H., (2011). Temper Beynitik Bir Çeliğin Delinme Modu Üzerine Mikroyapısal İncelemeler, *6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ.
- Barad, M. M. (2010). *A study of liquidity management of Indian steel industry* (Doctoral dissertation, Saurashtra University).
- Başar, M. (2021). Armox 500 Zırh Çeliğinin Tuz Banyosunda Trd Yöntemiyle Vc Kaplanabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Nevşehir Hacı Bektaşî Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Nevşehir.
- Bayar, S. (2019). Ramor 500 Zırh Çeliğinin Farklı Ark Ergitme Kaynak Birleştirmelerinin Metalurjik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*. Hatay.

- Baykara, T., & Günay, V., & Demirural, V., (2020). *Zırh Teknolojileri*. 1. Baskı, İstanbul: Yeditepe Üniversitesi Yayınevi.
- Bozdoğan, F., Üngün, S., Temel, E., & Mengüç, G. (2015). Balistik koruma amaçlı kullanılan tekstil materyalleri, özellikleri ve balistik performans testleri. *Tekstil ve Mühendis*, 22(98), 84-103.
- Cabrilo, A., & Cvetinov, M. (2017). Fatigue crack propagation and Charpy impact properties in armor steel welds. *Materiale Plastice*, 54(4), 694.
- Cabrilo, A., & Geric, K. (2016). Weldability of High Hardness armor steel. *Advanced Materials Research*, 1138, 79-84.
- Crouch, I. (Ed.). (2016). *The science of armour materials*. Woodhead Publishing.
- Çam, G. (2020). *Kaynak Bilimi ve Teknolojisi*. 1. Baskı, Ankara: Nobel Yayın.
- Doğrugiden, M. Y. (2019). Farklı Kaynak Metotları ile Birleştirilen Zırh Çeliklerinin Kırılma Tokluk Değerlerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Uşak.
- El Messiry, M. (2019). *Protective armor engineering design*. CRC Press.
- El-Bitar, T., El-Meligy, M., El-Shenawy, E., Almosilhy, A., & Dawood, N. (2017). Thermo-mechanical processing of armor steel plates. *Int J Mater Met Eng*, 11(3), 214-220.
- Erden, M. A., Gündüz, S., Çalgülü, U., & Boz, M. (2018). Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen Alaşımssız ve Hardoks Çeliklerin Mikroyapı ve Sertlik Özelliklerinin Araştırılması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1), 221-226.
- Ertürk, İ., Durukan, T., & Şentürk, B. (2017). Çeliklerin kaynağında ısıdan etkilenen bölgenin mikro yapı ve özelliklerinin tahmini, X. *Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*.
- Eryürek, B. İ. (2007). Kaynak Teknolojisi, Gazaltı Ark Kaynağı, 2, 47-120, Askaynak Yayını, İstanbul.
- Gavas, M., Yaşar, M., Aydın, M., & Altunpak, Y. (2013). *Üretim yöntemleri ve imalat teknolojileri*. 3. baskı, Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Gooch, W., Burkins, M., Mackenzie, D., & Vodenicharov, S. (2005, November). Ballistic analysis of bulgarian electroslag remelted dual hard steel armor plate. In *Proc. of 22nd International Symposium on Ballistics*.
- Günen, A., Bayar, S., & Karakaş, M. S. (2020). Effect of different arc welding processes on the metallurgical and mechanical properties of Ramor 500 armor steel. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 142(2).
- Hazell, P. J. (2022). *Armour: materials, theory, and design*. CRC press.

- Hu, C. J., Lee, P. Y., & Chen, J. S. (2002). Ballistic performance and microstructure of modified rolled homogeneous armor steel. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 25(1), 99-107.
- İpek, N. E., & Elaldı, F. (2012). Analysis of welding groove angle and geometry on strength of armor steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(12), 1437-1441.
- Janicki, D. (2014). Disk laser welding of armor steel. *Archives of Metallurgy and Materials*, 59.
- Jena, P. K., Mishra, B., RameshBabu, M., Babu, A., Singh, A. K., SivaKumar, K., & Bhat, T. B. (2010). Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel. *International journal of impact engineering*, 37(3), 242-249.
- Kaçar, R., & Emre, H. E. (2018). Gaz metal ark kaynaklı zırh çeliklerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 1(1), 15-23.
- Kara, S. & Korkut, M. H. (2012). Zırhlı Muharebe Araçlarında Kullanılan Zırh Plakalarında Kaynak Sonrası Isıl İşlemin Birleşim Mukavemetine Etkisinin Araştırılması. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 11(2), 159-171.
- Kara, S. (2012). Çelik esaslı zırh malzemesinin 307Si elektrodu ile kaynak edilebilirliğinin ve mikroyapı üzerindeki etkisinin deneysel araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Elazığ.
- Karagöz, Ş. & Atapek, H., (2007). Bor katkılı zırh çeliklerinin kırılma davranışı, 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı, 187-190, İstanbul.
- Kasonde, M. (2007). *Optimising the mechanical properties and microstructure of armoured steel plate in quenched and tempered condition* (Doctoral dissertation, University of Pretoria).
- Kurt, R. M. (2022). Zırh çeliklerinin robotik MIG/MAG kaynağı ile birleştirilmesinde ilave metallerin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Gedik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Kurt, S. & Evcı, C. & Işık, H. & Işık, M. S. (2016). Farklı Kaynak Ağız Açılarının 307Si Elektroduyla Kaynak Edilmiş Mıl-A 46100 Zırh Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(ÖS1), 155-162.
- Laible, R. (Ed.). (2012). *Ballistic materials and penetration mechanics* (Vol. 5). Elsevier.
- Lane, R., Craig, B., & Babcock, W. (2002). Materials for blast and penetration resistance. *AMPTIAC Quarterly*, 6(4), 39-45.

- Merzalı, C. E. (2013). Zırh Çeliklerinde Kaynak Sonrası Isı Tesiri Altında Kalan Bölgenin Özelliklerinin Isıl İşlem ile İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Norrish, J. (1992). *Advanced welding processes*. Springer Science & Business Media.
- Odeshi, A. G., Bassim, M. N., & Bolduc, M. (2009). Damage mechanism in high hardness armor (HHA) steel subjected to V50 ballistic impact. *DYMAT*, 563-567.
- Örenler, A. (2018). Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Sakarya.
- Pan, Z., Ding, D., Wu, B., Cuiuri, D., Li, H., & Norrish, J. (2018). Arc welding processes for additive manufacturing: a review. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing: Volume I No. 1 2017*, 3-24.
- Rout, M., Pal, S. K., & Singh, S. B. (2015). Cross rolling: a metal forming process. *Modern manufacturing engineering*, 41-64.
- Savaşkan, T. (2021). *Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi*. 11. Baskı, İstanbul: Papatya Yayıncılık Eğitim.
- Soykan, Y., Aslanoğlu, H. Ş., & Karakaş, Z. (2005). Zırh Çeliklerinin Metalurjisi Erdemir Semineri.
- Spoerl, J. S. (2004). A brief history of iron and steel production.
- Suleimanov, R. I., Zainagalina, L. Z., Khabibullin, M. Y., Zaripova, L. M., & Kovalev, N. O. (2018, March). Studying heat-affected zone deformations of electric arc welding. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 327, No. 3, p. 032053). IOP Publishing.
- Syahrani, A., Naharuddin, N., & Nur, M. (2018). Analisis kekuatan tarik, kekerasan, dan struktur mikro pada pengelasan smaw stainless steel 312 dengan variasi arus listrik. *Jurnal Mekanikal*, 9(1).
- Taş, Z. (2004). Termomekanik İşlem Görmüş Mikroalaşımli Çeliklerin Kırılma Mekanikliği-Kırılma Tokluğu-Açısından İncelenmesi. Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Taşkaya, S., & Gür, A. K. (2019). Ramor 500 Zırh Çeliğinin Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde Tel İlerleme Hızının Kaynak Metalindeki Nüfuziyet Dengesinin İncelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(3), 444-453.
- Taşkaya, S., Yıldız, T., & Gür, A. K. (2018). Ramor 500 Zırh Çeliğinin Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde Gerilimin Etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 357-363.
- Tülbentçi, K. (1990). *MIG-MAG eriyen elektrod ile gazaltı kaynağı*. Gedik Holding.

URL-1. Miilux Protection 500'e ait Mekanik Özellikler ve Kimyasal Kompozisyonu, <https://www.miilux.com.tr/tr/urunler/zirh-celikleri/protection-500> Erişim Tarihi; 20/06/2023

Varmaziar, S., Mostaan, H., Rafiei, M., & Yeganeh, M. (2021). Welding and Corrosion Behavior of AISI H13 Welds: The Effect of Filler Metal on the Microstructural Evolutions. *Archives of Metallurgy and Materials*, 66.

Yakut, V. (2015). Zırh Çeliklerinin Ferritik ve Östenitik Dolgu Malzemeleri ile Kaynağının İncelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Sakarya.

Yılmaz, A. (2010). Development of an armor steel for ballistic protection. *Materials Testing*, 52(11-12), 811-818.

Yiğittürk, N. (2016). Ramor Zırh Çeliği ile AISI 304 Paslanmaz Çelik Çiftlerinin Plazma Transferli Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Elazığ.

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. Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Hatay.



EKLER

EK A. Çekme Testi Sonuçları

Deney No. (Kaynak metali çapı (mm))		L ₀ (mm)	L _{son} (mm)	A ₀ (mm ²)	A _{son} (mm ²)	% Uzama	% Kesit Daralması	Maks. Çekme Dayanımı (N/mm ²) (Tolerans ±5 N/mm ²)	Ortalama (N/mm ²) (Tolerans ±5 N/mm ²)
Ana Malzeme	1	120,00	128,03	75,00	66,33	6,69	11,56	1.773,84	1.768,19
	2	120,00	125,54	75,00	67,39	4,62	10,14	1.754,59	
	3	120,00	127,23	75,00	71,18	6,03	5,09	1.776,13	
N1 (3,25)	1	73,10	74,53	108,79	90,03	1,96	17,25	871,09	852,20
	2	72,50	73,60	108,79	81,40	1,52	25,18	873,20	
	3	72,50	74,59	108,79	90,12	2,88	17,17	812,30	
N2 (3,25)	1	72,00	73,33	108,79	81,63	1,85	24,96	851,87	796,77
	2	72,60	73,84	108,79	90,56	1,71	16,75	793,59	
	3	72,50	74,14	108,79	77,46	2,26	28,80	744,85	
N3 (3,25)	1	72,00	73,76	108,79	93,58	2,44	13,98	795,65	867,85
	2	73,70	76,05	108,79	93,20	3,19	14,33	996,95	
	3	73,10	74,20	108,79	101,39	1,50	6,80	810,94	
N4 (3,25)	1	72,60	75,72	108,79	81,76	4,30	24,85	974,78	951,24
	2	72,90	78,11	108,79	81,84	7,15	24,77	983,01	
	3	73,06	76,13	108,79	90,44	4,20	16,87	895,93	
N5 (3,25)	1	73,20	76,97	108,79	81,55	5,15	25,04	977,58	957,32
	2	72,35	75,57	108,79	81,70	4,45	24,90	927,44	
	3	73,45	76,82	108,79	84,86	4,59	22,00	966,92	
N6 (3,25)	1	75,00	78,84	108,79	90,22	5,12	17,07	922,77	940,98
	2	73,20	77,32	108,79	86,91	5,63	20,11	961,12	
	3	73,00	76,70	108,79	75,92	5,07	30,21	939,04	
N7 (2,5)	1	72,00	72,76	108,79	91,61	1,06	15,79	612,20	454,68
	2	72,00	72,64	108,79	88,31	0,89	18,83	415,67	
	3	72,50	73,06	108,79	94,50	0,77	13,14	336,18	
N8 (2,5)	1	72,20	72,33	108,79	79,71	0,18	26,73	515,19	655,60
	2	71,70	72,65	108,79	97,52	1,32	10,36	619,31	
	3	71,30	72,87	108,79	94,64	2,20	13,01	832,32	
N9 (2,5)	1	72,00	73,12	108,79	97,89	1,56	10,02	852,24	877,53
	2	71,50	73,51	108,79	91,26	2,81	16,11	934,55	
	3	71,80	73,67	108,79	97,79	2,60	10,11	845,79	
N10 (2,5)	1	73,60	77,58	108,79	87,38	5,41	19,68	894,11	856,64
	2	72,00	73,71	108,79	97,20	2,38	10,65	796,39	
	3	70,05	72,76	108,79	98,70	3,87	9,28	879,42	
N11 (2,5)	1	72,30	74,50	108,79	81,73	3,04	24,88	901,44	908,61
	2	72,25	74,94	108,79	86,40	3,72	20,59	899,38	
	3	72,00	75,53	108,79	70,91	4,90	34,82	925,01	
N12 (2,5)	1	73,00	76,08	108,79	75,15	4,22	30,92	904,15	876,86
	2	72,80	75,09	108,79	79,96	3,15	26,50	841,44	
	3	70,00	72,38	108,79	81,33	3,40	25,24	884,99	

Ek A'nın devamı

N13 (2,5)	1	72,30	73,43	108,79	96,62	1,56	11,19	734,47	754,39
	2	73,20	74,87	108,79	91,21	2,28	16,16	827,55	
	3	72,30	73,57	108,79	89,11	1,76	18,09	701,16	
N14 (2,5)	1	71,70	73,42	108,79	88,25	2,40	18,88	787,74	904,70
	2	70,80	73,81	108,79	93,45	4,25	14,10	935,86	
	3	73,10	75,70	108,79	97,20	3,56	10,65	990,49	
N15 (2,5)	1	71,60	73,62	108,79	97,24	2,82	10,62	883,44	739,52
	2	71,60	74,22	108,79	97,04	3,66	10,80	560,33	
	3	72,80	74,14	108,79	94,18	1,84	13,43	774,79	
N16 (1)	1	72,50	73,41	108,79	84,71	1,26	22,14	880,80	924,97
	2	71,80	73,50	108,79	76,79	2,37	29,42	929,40	
	3	72,90	74,56	108,79	100,41	2,28	7,70	964,70	
N17 (1)	1	73,00	75,18	108,79	86,21	2,99	20,75	1.040,17	993,74
	2	72,30	76,34	108,79	68,06	5,59	37,44	954,57	
	3	72,80	76,59	108,79	87,19	5,21	19,86	986,47	
N18 (1)	1	71,80	72,60	108,79	101,43	1,11	6,76	889,43	991,54
	2	72,40	75,32	108,79	81,80	4,03	24,81	1.039,51	
	3	72,20	76,14	108,79	70,55	5,46	35,15	1.045,69	
N19 (1)	1	72,20	74,07	108,79	83,84	2,59	22,94	789,85	839,32
	2	72,30	73,90	108,79	79,73	2,21	26,71	836,90	
	3	71,40	73,01	108,79	87,08	2,25	19,95	891,21	
N20 (1)	1	72,70	73,33	108,79	77,92	0,87	28,37	792,19	754,56
	2	71,70	72,86	108,79	91,25	1,62	16,12	737,13	
	3	72,80	73,52	108,79	93,44	0,99	14,11	734,37	
N21 (1)	1	71,70	72,34	108,79	104,28	0,89	4,14	449,35	516,68
	2	73,65	74,14	108,79	97,91	0,67	10,00	601,21	
	3	73,00	73,76	108,79	96,18	1,04	11,59	499,47	
N22 (1)	1	72,80	74,80	108,79	88,21	2,75	18,92	763,56	701,13
	2	72,30	73,55	108,79	88,04	1,73	19,08	790,78	
	3	73,30	73,68	108,79	88,01	0,52	19,10	549,05	
N23 (1)	1	73,14	75,10	108,79	87,22	2,68	19,83	821,42	827,48
	2	72,90	75,08	108,79	83,43	2,99	23,32	811,27	
	3	72,80	74,03	108,79	90,42	1,69	16,89	849,76	
N24 (1)	1	73,35	74,33	108,79	87,35	1,34	19,71	755,98	771,28
	2	73,80	75,89	108,79	90,67	2,83	16,66	784,37	
	3	73,20	74,36	108,79	88,31	1,58	18,83	773,48	