



**İSKENDERUN TEKNİK**

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**HİBRİT PLAZMA ARK KAYNAĞI (HPAK),  
GAZ METAL ARK KAYNAĞI (GMAK) VE  
SOĞUK METAL TRANSFER  
KAYNAĞI (CMT)  
YÖNTEMLERİ İLE ARMOX 500T  
ZIRH ÇELİĞİNİN KAYNAK  
EDİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Cihan YÜKSEL**

İLERİ METALURJİ VE MALZEME TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

OCAK 2019





**HİBRİT PLAZMA ARK KAYNAĞI (HPAK), GAZ METAL ARK KAYNAĞI  
(GMAK) VE SOĞUK METAL TRANSFER KAYNAĞI (CMT)  
YÖNTEMLERİ İLE ARMOX 500T ZIRH ÇELİĞİNİN KAYNAK  
EDİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Cihan YÜKSEL**

**YÜKSEK LİSANS**

**İLERİ METALURJİ VE MALZEME TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2019**

Cihan YÜKSEL tarafından hazırlanan “HİBRİT PLAZMA ARK KAYNAĞI (HPAK), GAZ METAL ARK KAYNAĞI (GMAK) VE SOĞUK METAL TRANSFER KAYNAĞI (CMT) YÖNTEMLERİ İLE ARMOX 500T ZIRH ÇELİĞİNİN KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi İleri Metalurji ve Malzeme Teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Dr.Öğr. Üyesi Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Başkan:** Dr.Öğr. Üyesi Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

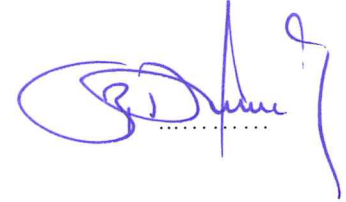
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Üye:** Prof. Dr. Bilge DEMİR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi

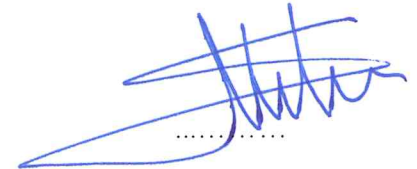
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Üye:** Doç. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU

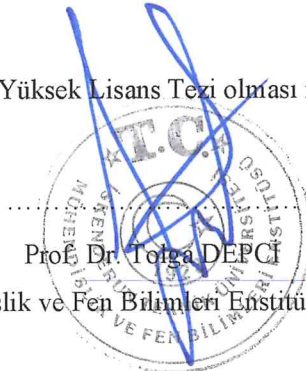
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 21 /01/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.



Prof. Dr. Tolga DEPCI

Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



Cihan YÜKSEL

21/01/2019



HİBRİT PLAZMA ARK KAYNAĞI (HPAK), GAZ METAL ARK KAYNAĞI (GMAK)  
VE SOĞUK METAL TRANSFER KAYNAĞI (CMT) YÖNTEMLERİ İLE ARMOX  
500T ZIRH ÇELİĞİNİN KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI  
(Yüksek Lisans Tezi)

Cihan YÜKSEL

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2019

ÖZET

Savunma endüstrisinde zırh malzemesi olarak kullanılan ARMOX 500T zırh çeliğinin, Hibrit Plazma Ark Kaynağı (HPAK), Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAK) ve Soğuk Metal Transfer Kaynağı (CMT) yöntemleri ile kaynak edilebilirliği araştırılmış ve elde edilen sonuçlar analiz edilerek birbirleri ile kıyaslanmıştır. Kaynak işlemleri robotik sistemli kaynak makineleri ile gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında, ARMOX 500T zırh çeliği birleşim bölgesinde ESAB OK Autrod 16.95 ilave dolgu teli kullanarak farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi sonucunda oluşan metalurjik ve mekanik özellikler araştırıldı. Kaynak bölgesi ve kaynaktan etkilenen bölgede (ITAB) oluşan içyapı özelliklerini ve difüzyon durumunu metalografik olarak gözlemlemek için, optik mikroskop ile SEM görüntüleri incelenmiş ve kaynak sonrası oluşan kimyasal dağılımı analiz etmek için EDS analizi yapılmıştır. X-ışını Radyografik Muayene ile kaynak hataları olarak adlandırılan çatlak, gözenek, gaz boşluğu vb. olumsuzluklar test edilmiştir. Kaynak yöntemlerinin mekanik özelliklere etkilerini belirlemek amacı ile kaynaklı numunelere vickers sertlik, çekme, eğme ve çentik darbe testleri uygulanmıştır.

Optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelendiğinde HPAK parametre 1 ve 2’de ve GMAK kaynak yöntemlerinde ana malzeme ve kaynak metali arasında difüzyon oluşmuştur. CMT kaynak yönteminde yeterli difüzyon olmadığı görülmüştür. HPAK ve GMAK yöntemlerinin çekme dayanımı CMT kaynak yönteminden yüksek çıkmıştır. Çekme sonrası kırılma yüzeyi fraktografisinin SEM görüntüsünde, HPAK parametre 1 ve 2 ve CMT yöntemlerinde kırılmanın sünek olarak gerçekleştiği görülmektedir. GMAK ile birleştirilen numunenin kırılma yüzeyi incelendiğinde HPAK’a göre sünekliliğinin daha düşük olduğu görülmüştür. HPAK ve GMAK yöntemlerinde en yüksek sertlik değeri kaynak bölgesinde ölçülmüştür. CMT kaynak bölgesi sertliği ise ana malzemeye yakın değerde olduğu görülmüştür. Eğme deneyi sonucu kırılma tüm malzemelerde ısı tesiri altındaki bölgede gerçekleşmiştir. Darbe tokluğunun sıcaklık değişimiyle düştüğü görülmüştür. Savunma sanayinde kullanılan ARMOX 500T zırh çeliğini her üç kaynak yöntemi ile deneysel olarak birleştirme gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Zırh Çeliği, ARMOX 500T Zırh Çeliği, Hibrit Plazma Ark Kaynağı, Gaz Metal Ark Kaynağı, Soğuk Metal Transfer Kaynağı.

Sayfa Adedi : 128

Danışman : Dr. Öğretim Üyesi Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI

INVESTIGATION OF WELDABILITY OF ARMOX 500T ARMOR STEEL WITH  
HYBRID PLASMA ARC WELDING (HPAW), GAS METAL ARC WELDING  
(GMAW) AND COLD METAL TRANSFER WELDING (CMT) METHODS  
(M. Sc. Thesis)

Cihan YÜKSEL

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

January 2019

ABSTRACT

ARMOX 500T armor steel, which is used as an armor material in defense industry, was investigated with Hybrid Plasma Arc Welding (HPAW), Gas Metal Arc Welding (GMAW) and Cold Metal Transfer Welding (CMT) methods and the results were analyzed and compared with each other. Welding operations were carried out with robotic system welding machines.

In this thesis, metallurgical and mechanical properties of ARMOX 500T armor steel joining together with different welding methods by using ESAB OK Autrod 16.95 additional filler wire were investigated. In order to observe the metallurgical features and diffusion status of the source region and source affected area (ITAB), SEM images were examined by optical microscope and EDS analysis was performed to analyze the chemical distribution after welding. X-ray Radiographic Inspection with welding defects called crack, pore, gas gap etc. negativity has been tested. To determine the effects of welding methods on mechanical properties, vickers hardness, tensile, bending and notch impact tests were applied to the welded samples.

When the optical microscope and SEM images were examined, diffusion between the main material and the weld metal was observed in HPAW parameters 1 and 2 and GMAW welding methods. There was not enough diffusion in CMT welding method. The tensile strength of HPAW and GMAW methods was higher than the CMT welding method. In SEM image of fracture surface fractography after pulling, it is seen that fracture in HPAW parameters 1 and 2 and CMT methods is observed ductile. When the fracture surface of GMAW was examined, it was observed that its ductility was lower than HPAW. In HPAW and GMAW methods, the highest hardness value was measured at the welding zone. CMT weld zone hardness was found to be close to the main material. As a result of the bending test was performed in all materials under the heat effect area. It was observed that the impact toughness decreased with temperature change. ARMOX 500T armor steel used in the defense industry was experimentally combined with all three welding methods.

Key Words : Armor Steel, ARMOX 500T Armor Steel, Hybrid Plasma Arc Welding,  
Gas Metal Arc Welding, Cold Metal Transfer Welding.

Page Number : 128

Supervisor : Assist. Prof.Dr. Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konusunun belirlenmesinde, araştırılması ve yazımı sırasında sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Dr.Öğr. Üyesi Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI “İskenderun Teknik Üniversitesi” sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmanın çeşitli aşamalarında deneyimleri bizle paylaşan Dr.Öğr. Üyesi Ali GÜNEN “İskenderun Teknik Üniversitesi”, laboratuvar imkânları ve deneyimlerini bizle paylaşan Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kaynak Teknoloji Biriminden Öğr.Gör.Dr. Koray YURTIŞIK ve diğer hocalarımıza ayrıca Fronius İstanbul Kaynak Teknolojisi grubuna sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez Savunma Sınavı jüri üyeleri Prof.Dr. Bilge DEMİR “Karabük Üniversitesi” ve Doç.Dr. Selçuk MISTIKOĞLU “İskenderun Teknik Üniversitesi” ve tez çalışmaları sırasında tüm bölüm olanaklarından yararlanmamı sağlayan Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığı’ na ve isimlerini burada zikredemediğim ama yardımlarını esirgememiş herkese sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak lisansüstü çalışmalarım sırasında bana hiçbir zaman desteğini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
2. ARMOX 500T ZIRH ÇELİĞİNİN FARKLI KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI .....	7
2.1. Çelikler.....	7
2.1.1. Zırh çelikleri.....	8
2.1.2. Zırh çeliklerinin özellikleri .....	12
2.1.3. Zırh çeliklerinin üretimi ve uygulanan ısı işlem .....	13
2.1.4. Dünya ve Türkiye’de zırh teknolojisi alanındaki gelişmeler .....	15
2.2. Kaynak .....	16
2.2.1. Kaynak sırasında ısı dağılımı .....	18
2.2.2. Kaynak yapısı ve bölgelerinin tanımlanması .....	18
2.3. Koruyucu Gaz Kaynağı .....	21
2.3.1. Plazma kaynağı .....	23
2.3.2. Hibrit plazma ark kaynağı (HPAK) .....	27

2.3.3. Gaz metal ark kaynağı (GMAK).....	33
2.3.4. Soğuk metal transfer kaynağı (CMT) .....	37
2.4. Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti .....	41
2.5. Materyal .....	45
2.6. Kaynak Yöntemleri ve Kaynak Parametreleri .....	46
2.7. Deney Numunelerinin Hazırlanışı .....	49
2.7.1. Metalografik numune hazırlama ve inceleme işlemleri .....	50
2.7.2. Uygulanan mekanik deneyler .....	52
3. ARAŞTIRMA BULGULARI .....	56
3.1. X-ışını Radyografik Muayene .....	56
3.2. Metalografik İncelemeler .....	57
3.2.1. Numunelerin makroyapı görünümü .....	57
3.2.2. Optik mikroyapı analizi .....	59
3.2.3. Kaynaklı numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görünüm ve bölgesel kimyasal analizleri (EDS) .....	65
3.3. Sertlik Ölçme Deneyi .....	86
3.4. Çekme Deneyi .....	88
3.4.1. Çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri üzerinde fraktografik taramalı elektron mikroskobu (SEM) görünümü .....	90
3.5. Üç Nokta Eğme Deneyi .....	98
3.6. Darbe Çentik Deneyi .....	99
4. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	101
KAYNAKLAR .....	103
ÖZGEÇMİŞ .....	111

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. ARMOX 500T zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu .....	46
Çizelge 2.2. ARMOX 500T zırh çeliğinin mekanik özellikleri.....	46
Çizelge 2.3. Hibrit plazma ark kaynağı parametre değerleri .....	48
Çizelge 2.4. Gaz metal ark kaynağı parametre değerleri .....	48
Çizelge 2.5. Soğuk metal transfer kaynağı parametre değerleri .....	48
Çizelge 2.6. Esab OK Autrod 16.95 telin kimyasal analizi .....	48
Çizelge 2.7. Esab OK Autrod 16.95 telin mekanik özellikleri .....	49
Çizelge 3.1. Çekme sonrası oluşan kopma dayanımı ve yüzde uzama oranı.....	88
Çizelge 3.2. Kaynak yöntemlerine ait eğme deneyi .....	98
Çizelge 3.3. 20 °C’de ARMOX 500T zırh çeliği ve kaynaklı birleştirmelerin çentik darbe dayanımı.....	99
Çizelge 3.4. -50 °C’de ARMOX 500T zırh çeliği ve kaynaklı birleştirmeler çentik darbe dayanımı.....	100

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kaynak yöntemleri.....	17
Şekil 2.2. Kaynak sırasında oluşan ısı dağılımı .....	18
Şekil 2.3. Koruyucu gaz kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması.....	22
Şekil 3.1. HPAK-1, HPAK-2, GMAK ve CMT kaynak yöntemlerine ait sertlik dağılım grafiği.....	87





## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Tanklarda kullanılan tabakalı zırh malzemeleri .....	10
Resim 2.2. ARMOX serisi zırh çeliğın mermilere karşı gösterdiği balistik dayanımlar.....	11
Resim 2.3. ARMOX serisi zırh çeliğının yıllar içerisindeki kalınlık değişimi.....	12
Resim 2.4. Kaynak bölgesinin tanımlanması.....	19
Resim 2.5. Kaynak bölgesinin tane yapısı .....	20
Resim 2.6. Isı tesiri altında kalan bölge (ITAB).....	21
Resim 2.7. TIG kaynağı ve Plazma ark kaynağı karşılaştırılması .....	25
Resim 2.8. Hibrit plazma – gaz metal ark sistemi, SuperMIG .....	29
Resim 2.9. Gaz metal ark kaynağı, Hibrit plazma ark kaynağı, Plazma ark kaynağı ile birleştirilen numunelerin karşılaştırılması .....	30
Resim 2.10. Hibrit plazma ark kaynağı torç kısmı .....	32
Resim 2.11. Hibrit plazma ark kaynak makinesi ünitesi .....	32
Resim 2.12. Hibrit plazma ark kaynağı parametre belirleme çalışması .....	33
Resim 2.13. Hibrit plazma ark kaynağı deney çalışması .....	33
Resim 2.14. Gaz metal ark kaynak yönteminde ark bölgesi.....	34
Resim 2.15. Gaz metal ark kaynak donanım blok şeması .....	36
Resim 2.16. Soğuk metal transfer kaynak makinesi .....	38
Resim 2.17. Robotik ve manuel uygulamalarda CMT sistem konfigürasyonu .....	39
Resim 2.18. Soğuk metal kaynak yöntemi aşamaları (a–d).....	40
Resim 2.19. Soğuk metal kaynak yönteminin milisaniye zaman diliminde akışı .....	40
Resim 2.20. ARL spektral analiz cihazı.....	46
Resim 2.21. HPAK ve GMAK kaynağı plaka bağlama aparatı.....	47
Resim 2.22. CMT kaynağı plaka bağlama aparatı.....	47

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.23. Kaynak sonrası metalurjik ve mekanik deney numunelerinin hazırlanması .....	49
Resim 2.24. Struers Citopress-30 sıcak bakalite alma cihazı .....	51
Resim 2.25. Struers Tegrami-25 zımpara makinesi.....	51
Resim 2.26. Nikon Epiphot 200 optik mikroskop .....	52
Resim 2.27. Jeol Jsm-6510 taramalı elektron mikroskobu .....	52
Resim 2.28. Sertlik tarama bölgeleri.....	53
Resim 2.29. Zwick Roell sertlik ölçme cihazı .....	53
Resim 2.30. Alşa çekme cihazı.....	54
Resim 2.31. Eğme şematiği ve Hualong eğme cihazı.....	55
Resim 2.32. Schütz Licht darbe cihazı.....	55
Resim 3.1. Kaynaklı numunelerin X-ışını radyografik muayene sonuçları a)HPAK Parametre-1 b) HPAK Parametre-2 c)GMAK d)CMT.....	56
Resim 3.2. Numunelerin makroyapı görünümü a)HPAK parametre-1 b) HPAK parametre-2 c)GMAK d)CMT.....	58
Resim 3.3. HPAK parametre-1 optik mikroyapı fotoğrafı a) Ana malzeme b) Ana malzeme-ITAB c) ITAB- Kaynak geçiş d) Kaynak bölgesi.....	60
Resim 3.4. HPAK parametre-2 optik mikroyapı fotoğrafı a) Ana malzeme b) Ana malzeme-ITAB c) ITAB- Kaynak geçiş d) Kaynak bölgesi.....	61
Resim 3.5. GMAK optik mikroyapı fotoğrafı a) Ana malzeme b) Ana malzeme- ITAB c) ITAB- Kaynak geçiş d) Kaynak bölgesi .....	62
Resim 3.6. CMT optik mikroyapı fotoğrafı, a) Ana malzeme b) Ana malzeme- ITAB c) ITAB- Kaynak geçiş d) Kaynak bölgesi .....	63
Resim 3.7. Kaynak sonrası SEM incelemeleri yapılan bölgelerin gösterilişi.....	65
Resim 3.8. HPAK parametre-1 kaynak SEM görünümü ve EDS analizi.....	66
Resim 3.9. HPAK parametre-1 kaynak+ITAB SEM görünümü ve EDS analizi .....	67
Resim 3.10. HPAK parametre-1 ITAB SEM görünümü ve EDS analizi .....	68
Resim 3.11. HPAK parametre-1 ana malzeme+ITAB SEM görünümü .....	69

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.12. HPAK parametre-1 ana malzeme SEM görünümü ve EDS analizi .....	70
Resim 3.13. HPAK parametre-2 kaynak SEM görünümü ve EDS analizi.....	71
Resim 3.14. HPAK parametre-2 kaynak+ITAB SEM görünümü .....	73
Resim 3.15. HPAK parametre-2 ITAB SEM görünümü .....	74
Resim 3.16. HPAK parametre-2 ana malzeme+ITAB SEM görünümü.....	75
Resim 3.17. HPAK parametre-2 ana malzeme SEM görünümü ve EDS analizi .....	76
Resim 3.18. GMAK kaynak SEM görünümü ve EDS analizi.....	77
Resim 3.19. GMAK kaynak+ITAB SEM görünümü .....	78
Resim 3.20. GMAK ITAB SEM görünümü ve EDS analizi .....	79
Resim 3.21. GMAK ana malzeme+ITAB SEM görünümü.....	80
Resim 3.22. GMAK ana malzeme SEM görünümü ve EDS analizi .....	81
Resim 3.23. CMT kaynak SEM görünümü ve EDS analizi .....	82
Resim 3.24. CMT kaynak+ITAB SEM görünümü.....	83
Resim 3.25. CMT ITAB SEM görünümü ve EDS analizi.....	84
Resim 3.26. CMT ana malzeme+ITAB SEM görünümü .....	85
Resim 3.27. CMT ana malzeme SEM görünümü ve EDS analizi.....	86
Resim 3.28. Çekme sonrası kaynak yöntemlerine ait kırılma görüntüleri.....	89
Resim 3.29. Çekme sonrası kırık yüzey fraktografik görüntü bölgeleri.....	90
Resim 3.30. HPAK-1 kırılma yüzeyi fraktografik yüzey görüntüsü .....	91
Resim 3.31. HPAK-2 kırılma yüzeyi fraktografik yüzey görüntüsü .....	93
Resim 3.32. GMAK kırılma yüzeyi fraktografik yüzey görüntüsü .....	95
Resim 3.33. CMT kırılma yüzeyi fraktografik yüzey görüntüsü.....	97

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

%	Yüzde
°C	Santigrat Derece
Al	Alüminyum
B	Bor
B <sub>4</sub> C	Bor Karbür
C	Karbon
Cr	Krom
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Krom Karbür
Cu	Bakır
Fe	Demir
Fe <sub>3</sub> C	Birleşik Sementit
Mm	Milimetre
Mn	Krom
Mo	Molibden
N	Newton
Ni	Nikel
Nm	Newton metre
P	Fosfor
S	Kükürt
Si	Silisyum

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

A	Amper
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
Ar	Argon
CMT	Soğuk Metal Transfer Kaynağı (Cold Metal Transfer)
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
Dk	Dakika
EDS	Enerji Dağılımlı Spektrometresi
EN	Avrupa Standardı
FSW	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
GMAK	Gaz Metal Ark Kaynağı

<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrojen
<b>HB</b>	Brinel Sertliği
<b>HCL</b>	Hidroklorik asit
<b>HPAK</b>	Hibrit Plazma-Gaz Metal Ark Kaynağı
<b>HRC</b>	Rockwell C Sertliği
<b>HV</b>	Vickers Sertliği
<b>IIW</b>	Uluslararası Kaynak Enstitüsü
<b>ITAB</b>	Isı Tesiri Altındaki Bölge
<b>Lt</b>	Litre
<b>MAG</b>	Metal Aktif Gaz
<b>MIG</b>	Metal İnert Gaz
<b>MIL</b>	Amerikan Askeri Standardı
<b>Mm</b>	Milimetre
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>N</b>	Newton
<b>N<sub>2</sub></b>	Azot
<b>O<sub>2</sub></b>	Oksijen
<b>PAW</b>	Plazma Ark Kaynağı
<b>SEM</b>	Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>Sn</b>	Saniye
<b>TS</b>	Türk Standartları
<b>V</b>	Voltaj
<b>WC</b>	Tungsten Karbür
<b>δ</b>	Delta Ferrite
<b>µm</b>	Mikrometre

## 1. GİRİŞ

İlk çağlardan bu yana yapılan savaşlarda askerler ve araçlar saldırıların direkt etkilerine karşı kendilerini koruma amacı ile çeşitli malzemeleri kendilerine zırh olarak kullanmışlardır. Tarihte tehdit unsuru oluşturan güçlerin elindeki silahlardan daha güçlü zırh teknolojisine sahip askeri kuvvetler muharebe sahasında her zaman daha başarı sağlamaktadır. Oluşan tehditlerin tahrip edici gücünün, gelişen teknoloji ile birlikte artarak yükselmesine karşı bu duruma paralel olarak zırh koruma çalışmaları da sürekli gelişim ve koruma düzeylerini en üst seviyede tutmaya çalışmışlardır. Geçmiş çağlarda ok saldırısına karşı dayanan ahşap bir kalkan yeterliyken, şuan yüksek kalınlıktaki çelik blokları delme kabiliyetine sahip güçte anti-zırh mühimmatlarına karşı koruma sağlayan ve ağırlıklarının da kontrol edilebileceği zırh sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Zırh kullanarak yapılacak tasarımlarda, zırhın aşağıdaki özellikleri göre seçilmesi gerekmektedir:

- ✚ Balistik olarak hasar oluşturucu darbelere karşı ve penetrasyon sürecinde yüksek mukavemet göstermesi.
- ✚ Seri üretim ve kolay imal edilebilirlik özellikleri içermesi (kesme, kaynak edilebilirlik, şekil verilebilirlik vb.)
- ✚ Yüksek yorulma süresine sahip olarak uzun yıllar kullanabilmesi.
- ✚ Manevra sırasında zırh yüzeylerinde oluşan çekme ve gerilme kuvvetlerini absorbe etmesi ve deformasyona uğramaması gerekmektedir.

Zırhın balistik dayanım testlerinde, yüksek koruma düzeyi sağlamanın ardından zırhlar ile yapılacak tasarımlara geçilmektedir. Zırh üretimi sonrası bir bütün olarak farklı geometride tasarlanacak yapılar için zırhların birbirleri ile birleştirilme ihtiyaçları oluşmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda birleşim bölgelerinin en az deformasyona uğrayarak kullanılabilmesi amacıyla mekanik veya metalurjik özelliklerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonrası, ilk zırh üretilmesi ile birlikte karbon içeren çeliğin birleştirilme işleminde çıkan problemlerden dolayı perçinle birleştirme gerçekleştirilmiştir. Zamanla yüksek balistik koruma sağlayan dolgu telli kaynak metotları geliştirilmiştir. Birleşim bölgelerinin ana malzemelere kıyasla düşük mekanik özellikler içermesi ile birlikte balistik olarak malzeme dayanımlarını ve bundan dolayı oluşacak güvenlik

sorunlarını ön plana çıkarmaktadır. Yüksek dayanım özelliklerine sahip zırhın delinme ve delicinin ilerlemesi ve/veya patlama ile birlikte oluşan parçalanarak hasarlanma durumuna karşı yüksek dayanım göstergesi olan iyi bir mukavemet değerine ve sünekliğe sahip olması gerekmektedir.

Zırh çeliklerinin, kaynaklı birleştirme sonrası kaynak bölgesinde mikroyapı ve mekanik özelliklerde değişimler olmaktadır. Kaynaklı bölgede ve kaynağa komşu bölgede (ITAB), balistik dayanımları artırma çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalarda farklı kaynak yöntemleri, kaynak dolgu malzemeleri, kaynak ağız tasarımları ve ısıl işlem prosesleri uygulanarak ana malzeme, kaynak ve ITAB bölgesinde kaynak sonrası oluşabilecek, farklı mukavemet özelliklerini iyileştirme ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır.

Karagöz ve Atapek (2009), MIL A 12560 ve MIL A 46100 zırh özeliğine benzer özellikteki kimyasal ve mekanik yapıya sahip zırh çeliğinin balistik performansı üzerine çalışma gerçekleştirmişler. Anadolu döküm tesislerinde döküm gerçekleştirilerek üretilen çelik Erdemir A.Ş'de sıcak haddeleme işlemi yapıldıktan sonra 7. Bakım merkezinde ısıl işlem prosesleri uygulanmış ve homojen yapıda zırh çeliği üretildikten sonra FNNS savunma sistemlerinde balistik testler uygulamışlar. Alaşımın yönteminin çeliklerinin metalurjik ve fiziksel özelliklere etkisi üzerine yapılan bilimsel çalışma ile geliştirilen zırh çeliğini, bazik örtülü östenitik paslanmaz çelik elektrot ile birleştirmişlerdir. Kaynak bölgesinde östenitik yapının gereği olarak 200-250 HV sertlik değerleri ölçülmüş iken kaynak dikişine yakın bölgelerde 350-400 HV sertlikleri raporlamışlardır. Kaynak işlemi sonucunda malzeme mekanik özelliklerinin bir miktar düşebileceğini belirtmişler.

Zengin (2010), Armour 500 zırh çeliğine elektrik kaynak yöntemi ile Panzercord-Mn elektrodu kullanılarak dört farklı sıcaklık parametresinde ön tav uygulayarak birleştirme işlemi gerçekleştirmiş. Birleştirme bölgesinde değişen ön tav sıcaklığından dolayı oluşan mikroyapı ve mekanik özellikleri incelemiştir. Kaynak bölgesi sertliğinin her dört deneyde kullanılan sabit parametre ve değişen ön tav sıcaklığında ana malzeme sertlik değerinin yarı sertliğinde 250 HB değerinde olduğu ve kaynaklı birleştirme sonucu mekanik özelliklerinde ana malzemeye göre önemli bir düşüş gösterdiği ön tav sıcaklığının mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olmadığını belirtmiştir.



Kara (2012), Ramor 500 zırh çeliğini MIG kaynak yöntemi ile 307Si kaynak teli koruyucu gaz olarak argon + % 5 CO<sub>2</sub>, argon + % 10 CO<sub>2</sub> ve argon + % 15 CO<sub>2</sub> kullanarak Y, X ve y şeklindeki kaynak ağızları kullanarak birleştirmiştir. Kaynaklı birleştirme sonrası, kaynak bölgesinde çatlak oluşumu gözlememişler. Çalışma sonucu sertlik değerinde kaynak metalinin sertliğinin diğer çalışmalarda olduğu gibi ana malzemededen daha düşük çıktığı belirlenmiştir. Bütün numunelerin iri taneli bölgelerinin sertlik değeri kaynak metali bölgesi sertliğinden yüksek çıkmıştır. Bu durumu iri taneli bölgede karbür çökmesi ve martenzit oluşumu meydana gelirken kaynak metalinde elektrottan gelen ve karbür oluşturmeyen Ni içeriğine bağlamışlardır. En yüksek mekanik özelliklerin X kaynak ağızı ile iki pasolu kaynaklarda elde edilmiş. Bu durumun sebebinin ise iki pasoda birleştirmenin tek pasolu birleşime göre daha yavaş soğuma etkisini meydana getirmesinden dolayı bununca kaynak bölgesinde metalurjik yapıya olumlu etki ettiği görülmüş ve kaynak mukavemetinin yalnız metalurjik tasarımla değil mekanik tasarımın de önemini olduğunu söylemişlerdir.

Kara ve Korkut (2012b), ARMOX 500 T zırh çeliğini MIG kaynak yöntemi ile 307 Si kaynak teli kullanarak kaynatmış, kaynak sonrası kalıntı gerilimleri giderme amacıyla uygulanan ısı işlemin metalurjik ve mekanik özelliklere etkisi analiz edilmiştir. Kaynak esnasında oluşan ısı etkisi ile kaynak metali bölgesi sertliğinin ana malzemededen ve ITAB bölgesinden düşük olduğu belirtilmiştir. Isıl işlem sonucunda özellikle kaynak metali ve ITAB'da düzensiz soğuma sonucu oluşan kusurların kısmen azaltılması sonucu darbe enerjilerinde artış tespit edildiğini belirlemişler.

Balacrishnan, Balasubramanian ve Reddy (2013), zırh çeliklerinin çok pasolu kaynaklarında kullanılan östenit telden dolayı balistik performanslarının oldukça düşük olduğunu belirtmişlerdir. Balistik dayanımı arttırmak amacıyla çok katmanlı yapı oluşturmak amacı ile örtülü elektrot ile X kaynak ağızı ile kaynatılan dolgulardan orta katmanı (orta 3. dolgu) plazma yöntemi ile WC sert dolgulu katman oluşturulup balistik performanslarının iyileştirildiğini belirtmişlerdir. Çok katmanlı kaynağın, sertlik yapısında elde ettikleri orta katmanda sert üst katmanlarda nispeten daha sünek katman yapısından dolayı numunelerin yüksek enerjiyi absorbe etme davranışını sergilediği ve bu durumun delicinin penetrasyon hızını yavaşlatarak darbe enerjisini katmanlı olarak azaltıldığı belirtilmiştir.

Atabaki, Ma, Yang ve Kovacevic (2014), yüksek mukavemetli çeliklerin balistik test standartlarına göre yumuşak ITAB bölgesinin kaynak merkezinden 15,9 mm'den küçük olabilmesi için lazer hibrit ark kaynağı yöntemi ile farklı kaynak geometrilerin (alın, x ve Y) etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda kaynak ağızı geometrisinin ve lazer ışını ile gaz metal ark kaynağı içindeki tel ucu mesafesinin artırılması ile ısıdan etkilenen bölgenin ve yumuşayan bölgenin genişliğinin azaltılmasının mümkün olduğunu belirtmişlerdir. ITAB bölgesinin sertlik değerinin 390-550 HV kabul edilebilir bir aralıkta olduğu ve herhangi bir sıcak ya da soğuk çatlak olmadığı ve işlem sonucunda ilave bir ısıl işleme gerek olmadığı belirtilmiştir.

Barényi (2014), plazma, lazer ve su jeti ile kestiği Armox 500T çeliği numunelerini MAG kaynağı ile Thermanit X ve DT-SG 600 F dolgu telleri ile birleştirmişler. Birleştirme sonucundan kaynak bölgesi sertliğinin ana malzeme sertliğinden oldukça düşük, iri taneli bölgenin ise sertlik değerinin çok yüksek olduğunu raporlamıştır. Numunelerin akma ve çekme dayanımlarının %40 ile %60 değerlerine kadar düştüğü ve bu kaynak yönteminin uygun olmadığı sonucuna varmıştır.

Janicki (2014), disk lazer kaynağındaki işlem parametrelerinin Armox 500 T zırh çeliğinin kaynağındaki kaynak kalitesi ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Araştırma sonucunda 6,4 mm kadar tek pasoda prozitesiz ve çatlaksız kaynak bağlantılarının elde edildiğini belirtmiştir. Elde edilen kaynak bağlantılarında kaynak metali ve ana metal sertliklerinin aynı sertlik değerlerinde olduğu ancak ITAB bölgesinin kaynağa yakın olan bölgenin sertliğinin ana metalden daha yüksek olduğu ana metal kısmında ise sertliğin ana metale göre %40 daha düşük olduğunu belirtmiştir. Çekme dayanımı ve darbe çentik değerlerinde ana malzemeye göre sırasıyla %15 ve %30-%50 azalma olduğunu tespit etmiştir. Çalışmada dikkat çeken husus ise ısı girdisi artışı ile çekme dayanımlarında düşük miktarda azalma meydana gelirken, ısı girdisinin azalması durumunda ise darbe tokluğunun ise daha fazla düştüğünü belirtmişlerdir.

Merzalı (2013), TEMSA'dan temin edilen ve kaynak yöntemi belirsiz hazır kaynaklı malzemeler, MIL A 46100 standardındaki kaynaklı zırh çeliğinin ısıl işlem parametrelerinden nasıl etkilendikleri incelenmiştir. Isıl işlemsiz numunede Kaynak metali sertliği 197 HV ısıl işlem görmüş numunede ise 217 HV ana malzemenin sertliği ise (510 HV), çekme değerleri ana malzemeye göre azalmış olup, ısıl işlemsiz numune ısıl işlemlili

numuneyle kıyaslandığında daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğunu gözlemlemiştir. Isıl işlem görmüş numunede kopma noktası kaynaklı birleştirmenin merkezinde olduğunu tespit etmiştir. Isıl işlem uygulaması yapılan numunede mukavemet değerinin düşük çıktığı belirlenmiştir. Çalışmanın olumlu kısmı ısıl işlem sonucunda numunenin sertliğinden taviz vermeksizin tokluk değerlerinin artması olarak belirtilmiştir.

Kurt (2015), farklı kaynak ağızı açısı ve geometrilerde hazırladığı MIL A 46100 zırh çeliğini MIG kaynak yönteminde 307Si kaynak teli ile değişik açılar ve geometrilerde birleştirmişlerdir. Ardında numuneler üzerinde; mikro yapı analizi, sertlik testi ve çekme testi yapılarak ısı girdisinin mekanik özelliklere etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Kaynak metalinin sertliği diğer çalışmalarda olduğu gibi ana malzemenin daha düşük çıkmıştır. Yapılan çekme testlerinde tüm numunelerin kaynak bölgesinden koptuğu görülmüştür. Bunun sebebinin, kullanılan kaynak metalinin mukavemet değerlerinin ana metalden daha düşük olduğunu söylemişler.

El-Batahgy, Miura, Ueji ve Fujii (2016), zırh çeliklerinin ergitme kaynakları ile mekanik özelliklerinde önemli ölçüde azalma meydana gelmesinden dolayı katı hal kaynak tekniklerinden olan sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile 2,2 mm kalınlığındaki zırh çeliğini birleştirmişlerdir. Optimum birleştirme parametresinin 600 rpm dönme hızı ve 600 mm/dak kaynak hızlarında elde etmişlerdir. Kaynak metalinin bölgesi sertliğinin ana metal sertliğine yakın olduğu ancak ITAB bölgesinde sertlikte bir azalma olduğu bunun da çekme dayanımlarının ana metalin %75 oranında olmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Ergitme kaynaklarında bu oran % 50 olduğundan FSW kaynak yönteminin iyi bir alternatif olduğunu belirtmişlerdir. Ancak kaynaklı numunelerin % uzama değerleri (%20) oldukça düşük olduğunu düşünmektedirler. Bununla zırh çeliklerinin manevra kabiliyetini sınırlayacağını belirtmişlerdir.

Taşkaya, Yıldız ve Gür (2018), Zırh çeliği olan Ramor 500 tozaltı kaynak yöntemi ile Si 307 teli kullanarak birleştirmişlerdir. Kaynak işlemi sonrası kaynak metalinin en yüksek sertliği sahip iken kaynak metalinin çizgisinin bitişiğindeki bölgenin ise en düşük sertlik değerine sahip olduğu belirtmişlerdir. Sertlik ile ilgili önemli belirttikleri diğer bir husus ise kaynak işlemi sonrası ana malzemenin sertlik değerinde de bir azalma olmasıdır. Bu durum tozaltı kaynağının yüksek ısı girdisi sebebiyle ITAB bölgesinin çok geniş olmasına bu durumda mekanik özelliklerde önemli düşüşe neden olacağı düşünülmüştür. Ayrıca zırh çeliklerinin

penetrasyon testlerinde yumuşayan bölgenin kaynak metalinden sonrasının maksimum 15,9 mm olması gerektiğini söylemişler. Kaynaklı birleştirmelerin radyografik görüntülerinde herhangi bir kaynak hatası gözlemlenmemiş ve makro ya da mikro çatlığa rastlamadıklarını belirtmişler.

Saxena, Kumaraswamy, Reddy ve Madhu (2018), ArmoX 500T çeliğini çok pasolu örtülü elektrot kaynağı ile östenitik paslanmaz çelik ve düşük hidrojenli ferritik bir elektrot kullanarak birleştirmişlerdir. Kaynak işlemi sonrası mekanik özellikleri çekme ve çentik darbe testleri ile birbirleriyle kıyaslamışlar. Çekme dayanımı bakımından ferritik elektrodun 700 MPa östenitik tel kullanımında ise 515 MPa bir çekme dayanımı elde edildiği ve işlemsiz numuneye göre (1680 MPa) daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Çentik darbe testleri bakımından ise östenitik telin ana malzemeden %20 daha fazla ferritik telin ise %12 daha az tokluk sağladığını belirtmişlerdir. Östenitik elektrodun darbe dayanımı gereken yerlerde ferritik elektrodun ise çekme dayanımlarının önemli olduğu uygulamalarda kullanımını önermişlerdir.

Fei ve diğerleri (2018) , zırh çeliklerinin çok pasolu ve ilave dolgu elektrot kullanılan ergitmeli kaynaklarda önemli ölçüde var olan mekanik özelliklerde azalma problemlerin üstesinden gelmek amacıyla, 9 mm kalınlığındaki zırh çeliği plakalarını ilave tel ve kaynak ağzı açmaksızın anahtar deliği TIG kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Çekme dayanımı bakımından ana metalin %65 değerine ulaşıldığı ve geleneksel ark kaynaklarındaki %50 değerinin daha üstünde olduğundan zırh çeliklerinin kaynağında bir alternatif olabileceğini belirtmişlerdir. Ancak makale incelendiğinde, yüzde uzama değerlerinin ana metale göre 1/3 oranında olduğu ve darbe çentik enerjisi ile ilgili herhangi bir değerlendirmenin yapılmamış olması dikkat çekmektedir.

Yapılan deneysel çalışmada, savunma sanayi alanında önemli bir yeri olan ARMOX 500T Zırh Çeliği üzerinde Hibrit Plazma Ark Kaynağı (HPAK), Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAK) ve Soğuk Metal Transfer Kaynağı (CMT) yöntemleri ile plakaların kaynaklı birleşimleri sonucunda, kaynak bölgesi ile ana malzeme arasında oluşan mekanik ve metalurjik özellikler araştırılmıştır.

## 2. ARMOX 500T ZIRH ÇELİĞİNİN FARKLI KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

### 2.1. Çelikler

Çelik elde edebilmesi amacıyla asal olamayan karakterli demirin doğada saf olarak bulunmaması ve bileşik olarak doğada bulunduğundan dolayı çelik elde edebilmek için saflaştırma işlemi yapılır. İstenen kalitede çelik elde edilebilmesi için ark ocağında ergitme yöntemi veya yüksek fırında sıvı pik elde edip daha sonra çelikhane kısmında alaşımla işlemi yapılmaktadır.

Yüksek fırın prosesi uygulanarak sıvı ham demir elde etmek için, demir cevheri içeren hammaddeler (cevher, pelet, sinter gibi) ve oluşacak oksitli yapıyı ayrıştırmak cüruf yapıcı malzemeler (kireçtaşı, dolomit, mangan, kuvarsit gibi), ve ergitme işlemi için gerekli ısı enerjisini etmek amacı için karbon içerikli hammaddeler (kok, pulvarize kömür, katran, fuel oil gibi) şarj için gerekli girdi malzemeleridir. Yüksek fırın çalışma sistematğinde hava sürekli ve ters akım prensibi ile yüksek fırın içerisine üflenmektedir. Şarj malzemeleri denilen hammaddeleri (kok, sinter, pelet ve cevher) belirli ergime süreçleri içerisinde yukarıdan aşağıya doğru fırın içerisinde oluşan sürekli ergime sistematğine paralel olarak belirli aralıktaki zaman periyotları içerisinde aşağı iner, aşağıdan yukarı doğru üflenen sıcak havanın oluşturduğu ısı enerjisi kok, pulvarize kömür, katran vb. redüklenmesi sonucunda açığa çıkan enerji ısısı yukarı doğru çıkararak Fe tenörlü ve cüruf yapıcı malzemeleri eritir. Uygulanan prosesler sonucu çıktı olarak pik demir, cüruf, gaz ve tozlar elde edilir.

Yüksek fırında ham demir üretiminden sonra elde edilen sıvı pik çelikhane konvertörde hurda şarjı yapılarak bazik oksijen fırınlarında karbon indirgemesi yapıldıktan sonra kimyasal kompozisyonu ayarlanarak istenen kalite standartlarında üretilmesi için işleme alınır. İstenilen kalitede kimyasal alaşımlama yapılan çelik kütük ve slab olarak dökülerek istenilen geometri ve kalınlıkta haddelenir ve sonrasında belirlenen ısıl işlem prosesi uygulanarak homojen yapıda zırh çeliği eldesi sağlanmış olur.

Çeliklerin sınıflandırılması (GSI SLV ve ODTU KTM, 2013: 2.04-17,18,19):

1-Ana kalite özelliklerine göre;

Temel Çelikler	: Metalik olmayan kalıntılar nedeniyle azalan saflık
Kaliteli çelikler	: % 0.045'den daha düşük P, S ve temel çeliklere göre daha saflık derecesi
Özel çelikler	: % 0.035'den daha düşük P, S ve temel çeliklere göre daha yüksek saflık derecesi

2- Garanti özellikleri göre;

Kimyasal yapısına göre	: Alaşımız yapıdaki çelikler Düşük alaşımlı yapıdaki çelikler Yüksek alaşımlı yapıdaki çelikler
Akma ve çekme dayanımına göre	: Yapı çelikleri akma sınırına göre İnce taneli yapı çelikleri akma dayanımına göre Çelik boru çekme dayanım veya akma sınırına göre
Isıl işlem uygulanma durumuna göre	: Semantasyon uygulanan çelikler İslah edilen çelikler Takım çeliği
Kullanım alanlarına göre	: İnce plaka Beton çelikleri Otomat çelikleri Soğuk ortamda tok olan çelikler Yüksek sıcaklık dayanımlı çelikler Korozyon direnci olan çelikler Isıya diren gösteren çelikler

Bu çalışmada kullanılan ARMOX 500T zırh çeliği ince tane yapısı ve özel kalite bir çeliktir. Yüksek mukavemet ve sertliğe değerlerine sahip çelik alaşım elementlerinin ısıl işleme yatkınlığı sebebi ile sertleştirilme yapılmaktadır. Yapılan termo-mekanik işlemler ve haddeleme sonucu zırh çeliklerinden istenen homojen yapı elde edilmektedir.

### 2.1.1. Zırh çelikleri

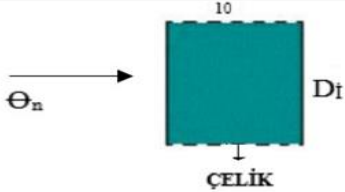
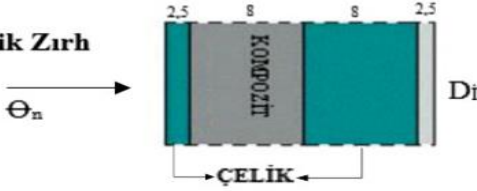
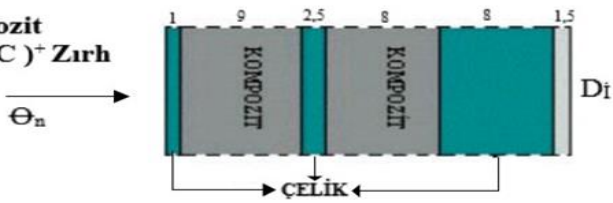
Balistik koruma amacı ile üretilen çelik zırhlar, çarpan mermileri bertaraf etmeleri yanı sıra zaman içerisinde geliştirilerek çok katmanlı patlamalara karşı da yüksek dayanım göstermektedirler (Bayar, 2008:59). Çeliklere uygulanan termo-mekanik işlemler ve alaşımlama ile yüksek dayanım göstergeleri olan mukavemet, tokluk ve sertlikleri kontrol

altına alınarak elde edilen değerler üzerinde modifikasyonlar yapılabilir. Alışım, ısı ve mekanik işlem uygulanan çelikler, malzeme bilimindeki gelişmeler doğrultusunda daha ince yapılarda daha yüksek balistik dayanım elde edilmesini sağlamıştır (SSAB, 2018). Zırh çelikleri, balistik koruma için özel olarak tasarlanmış çelik kalite ailesindedir. Balistik ve patlayıcı tehditleri hafifletmek için gerekli olan yüksek mukavemet, sertlik ve orta süneklik ile karakterize edilirler (Fras, Roth ve Mohr, 2018).

Geniş kullanımından dolayı çelik zırh malzemeler, diğer tüm zırhların değerlendirilmesi ve geliştirilmesinde karşılaştırma standartı olarak kullanılmaktadır. Çeliğin başlıca dezavantajı, ağır zırh yapılarına neden olan yüksek yoğunluğudur. Metalurjik araştırma, süper-temiz çelik üretmek için yapılan işlemlerin sonucunda, çeliğin mukavemet ve sünekliliğinin artmasını sağladığını, bunlara bağlı olarak da balistik özelliklerin de geliştiğini göstermiştir. Çok sert yüzeyli çelik plakalar, mermileri saptırma, deforme etmede ve kırmada etkilidirler. Birbirine kuvvetli ve zayıf şekilde bağlanmış sert bir ön plaka ile tok bir destek plakasını içeren ikili (dual) sert plakalar; Bir mermiyi iki aşamada bertaraf etmekle (mermiyi kırma ve şarapnellerin enerjisini absorbe etme şeklinde) etkilidirler (Karagöz ve Atapek, 2007).

Zırhlı araçlar değişik engebelerde ve düz alanda hızlı manevra ve korunma kabiliyeti için; aracın hafif olması, vurulma durumunda delinmemesi veya kolay onarılması istenmektedir. Bu etkenleri sağlamak için zırh çelikleri üzerine çok katmanlı kompozitlerin geliştirilmesine dair çalışmalarda bulunmaktadır. Aşağıdaki Resim 2.1'de çok katmanlı zırhlı araçların tasarımında kullanılan zırh katman yapısı gösterilmiştir.



TANK DUVARLARI		MODEL
<p><b>10 cm Çelik Zırh</b></p> 	M - 48	
<p><b>20 cm Kompozit Seramik Zırh</b></p> 	M - 60 ve T - 72	
<p><b>30 cm Kompozit Seramik (B<sub>4</sub>C)<sup>+</sup> Zırh</b></p> 	LEOPARD - II ve T - 80	

\*B<sub>4</sub>C : Bor Karbür

Resim 2.1. Tanklarda kullanılan tabakalı zırh malzemeleri (Bayar, 2008: 60)

Zırh teknolojisindeki değişimler ve koruma düzeylerinin geliştirilmesindeki amaç, değişen silah teknolojisi ve mühimmatların verdikleri zarara karşı oluşturulmak istenen balistik korunma dayanımının en üst düzeyde tutulması gerekliliğindedir. Balistik tahrip edicinin hedefe çarpmasıyla başlayan penetrasyon sürecinde, hasarlanma karakterizasyonunda tahrip edicinin yıpratıcı etkisi, hedefe ait mekanik dayanım özelliklerinin daha yüksek olması ile üst düzey koruma sağlanmış olur (Karagöz ve Atapek, 2007).

Malzeme bilimi mühendisliği, nanoteknoloji ve özellikle nanomalzemeler ile kademeli zırh çalışmaları yaparak ön katmanları geliştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır (Klimpel, Kik, Górká, Czuprynski ve Hajduk, 2009). Yeni zırh geliştirme ve balistik denemeler, zırh dinamik tepkisi üzerinde materyal yapısının karakterini anlamak için yoğun bir araştırma ve geliştirmeye ihtiyaç duyulmaktadır (Klimpel, Luksa ve Burda, 2010).

Artan savaşlar ışığında, zırhlı personel taşıyıcı koruma seviyesindeki gelişmeleri değerlendirme için sayısal teknikler ve analizler önem görmüştür. Bu sayısal tekniklerde doğal olarak, çarpma kuvvetli ve stres-geriniminin tepkisini ölçmek için yüksek stresler altında malzeme özellikleri değerlendirilmektedir (Saleh ve diğerleri, 2018).

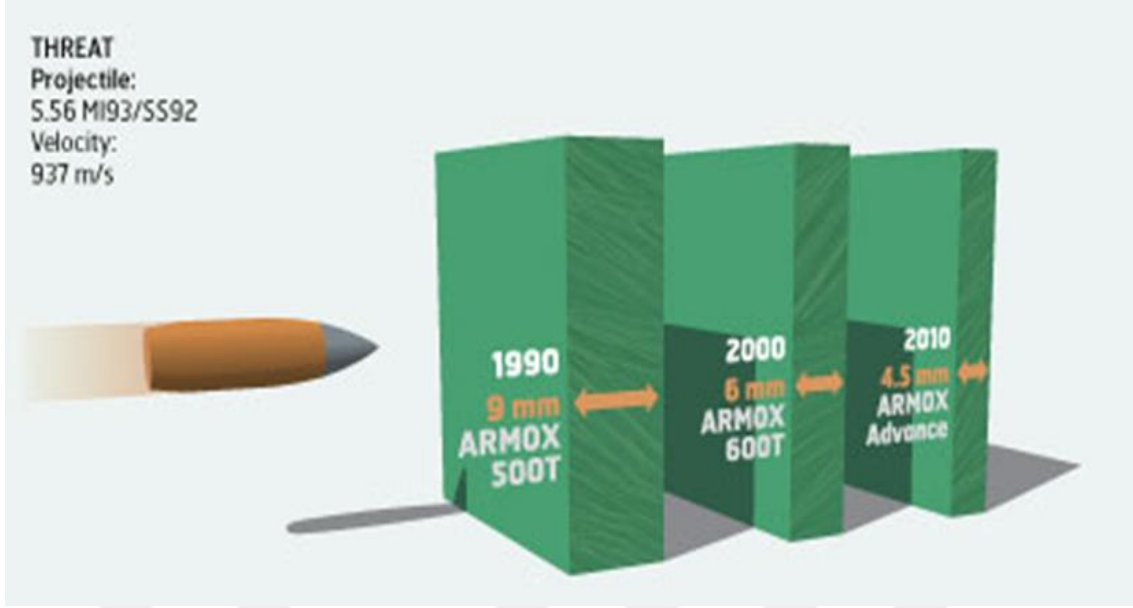
### ARMOX 500T zırh çeliği

Bu çalışmada kullanılan, zırh çeliğinin menşei İsveç'tir. Yüksek tokluk özelliği ve yüksek sertlikte zırh olan ARMOX 500T binaların korunması, araç zırhlama gibi uygulamada kullanım için, nominal 500 HBW sertliğe sahip dünyanın en tok koruma levhasıdır. Üst düzey sertlik/tokluk dengesi sayesinde penetrasyon ve patlama koruması sağlar. Araç tasarımcılarına daha hafif tasarımlar ile koruma sağlar. ARMOX 500T sahip olduğu özelliklerinden dolayı ilave ısıl işleme ihtiyaç duymayacak şekilde üretilmiştir (SSAB, 2018).



Resim 2.2. ARMOX serisi zırh çeliğinin mermilere karşı gösterdiği balistik dayanımlar (SSAB, 2018)

Özellikle son dönemlerde farklı termal işlem teknolojileri, farklı alaşımları kompozisyonlayarak zırh çeliği üretimi savunma sanayi alanı için önemlidir. Bor katkılı zırh üretilmesi çalışmaları bu alanda farklı alaşımla kompozisyon örneğidir (Karagöz ve Atapek, 2007). Kimyasal alaşımlama ve ısıl işlem teknolojisindeki gelişmeler sonucu yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde, zaman içerisinde zırh çeliklerinin kalınlıkların azaltılmasına rağmen daha yüksek dayanım gösterdiği ve bunun da tasarım aşamasında malzemenin daha hafif olmasına rağmen daha yüksek balistik özelliklere ulaşıldığı bilinmektedir. Resim 2.3'de ARMOX 500T zırh çeliğinin yıllar içerisinde gelişimi ile daha yüksek balistik dayanım göstermesine karşılık malzeme kalınlığındaki değişim resmi gösterilmiştir.



Resim 2.3. ARMOX serisi zırh çeliğinin yıllar içerisindeki kalınlık değişimi (SSAB, 2018)

### 2.1.2. Zırh çeliklerinin özellikleri

Malzeme bilimi, zırh uygulamalarında savunma sanayi için ihtiyaç duyulan üst koruma seviyesinde malzemeler için temel oluşturmaktadır. Zırh malzemeleri konusundaki araştırmalar performans ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla; mevcut malzemelerin geliştirilmesi, kimyasal ve fiziksel olarak yeni malzemelerin üretimi, farklı malzemelerin tabakalı yapıda bir arada kullanılması, oluşturulacak yeni mikroyapılar ile birlikte kompozit yapıların tasarlanması gibi önemli alanları kapsamaktadır (Karagöz ve Atapek, 2007). Geleneksel zırh çeliği kalınlıkların gelişen tehditler karşısında artması, kolay şekillenebilmesi ve kaynaklanabilme özelliklerine sahip Haddelenmiş Homojen Zırh (Rolled Homogeneous Armor) çeliğinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

Zırhlı çelikleri, patlayıcı ve değişik mermilerin art arda patlama sonucu oluşturduğu çoklu darbeler ve bu darbelerin meydana getireceği hasarlanma mekanizmalarının oluşturduğu çatlak oluşumu, malzemenin parçalanması ve kopmasına karşı direnç göstermek zorundadır. Yüksek tokluk ile ulaşabilecek bu dayanımların malzemenin her bölgesinde aynı dayanımı göstermesi ile mümkün olabilmektedir. Buda oluşturulacak yapının tüm bölgelerinde aynı tokluk ve sertlik değerlerini gösterecek bir homojenlik ile mümkündür (Balakrishnan, Balasubramanian ve Reddy, 2012).

Zırh çeliği üretimi ve sonrasında balistik dayanım belirleme çalışmalarında, yüksek hız etkisi ve penetrasyon problemleri arasında büyük deformasyon, erozyon ve yüksek gerilme oranına bağlı doğrusal olmayan malzeme davranışı ve parçalanma yer alır. Bu nedenle, penetrasyon süreci mekanik davranışını modelleme yöntemi geliştirilmeye çalışılmaktadır. Çalışmacılar, gerçekte deneysel ve analitik yaklaşımlar kullanılarak kırılma, bozulma, artık gerilmeler ve sürtünme ısınması dahil olmak üzere çoklu fiziksel olayların tümünü yakalayamazlar, bundan dolayı, sayısal simülasyon modelleri balistik penetrasyon sürecini geliştirme çalışmaları için gerekli bir araç haline gelmiştir (Kılıç ve Ekici, 2013).

### 2.1.3. Zırh çeliklerinin üretimi ve uygulanan ısı işlem

Savunma alanında koruma amacı için geliştirilen askeri ve sivil alanlarda gerekli platformlarda delici özellikte silah ve patlayıcıların oluşturduğu tehditlerden korunmak amacıyla zırh koruyucu malzemeleri olarak kullanılan çelik, titanyum ve alüminyum alaşımları, seramik yapıda, cam ve elyaf takviyeleri veya bunların kendi içinde birleştirilerek oluşturulmuş kompozit yapıdaki malzemeler kullanılmaktadır. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen zırh seramikleri ve bazı kompozit malzemeler kullanılarak zırhlı araçlarda çok katmanlı güvenlik yöntemleri geliştirilmektedir. Savunma amacına yönelik ve en kolay şekilde üretilebilirlikten dolayı yaygın zırh malzemesi olarak çelik tercih edilmektedir. Çelik malzemelerin tercih edilme sebebi, çeliklerdeki yüksek malzeme özelliklerinin göstergesi olan yüksek dayanım, tokluk ve birleştirilebilirlik gibi malzeme özellikleridir (Kara ve Korkut, 2012a).

Zırh çelikleri kompozisyon açısından alaşımlı çelik grubu içerisine girerler. Zırh çelikleri metalurjik olarak incelendiğinde ise martenzitik yapı gözlemlendiği ve ıslah çelikleri kategorisinde olduğu bilinmektedir. Zırh malzemelerinin yüksek derecede patlama ve parçalayıcı karakterde zırh delici ve tahrip edicilere karşı yüksek dayanımlı homojen bir mikroyapı özelliğine sahip olmaları gerekir. Hadde tezgahlarında istenilen boyutsal ölçülerde şekil verilen zırh çeliği sırasıyla östenitleştirme, su verme (özel koşullarda soğutma) ve temperleme ısı işlem prosesleri uygulanarak istenilen metalurjik ve mekanik özelliklere ulaştırılabilir. Uygulanan termo-mekanik işlemler çeliklerin zırh malzemesi olarak tercih edilmesi ve geniş kullanım alanlarında tercih edilmesini sağlamıştır (Şahintürk, Tozlu, Utku ve Pamuk, 2005).

Yapılan ısıtma işlemleri yalnız karbon içeren çeliklerin temperlenip su verilerek soğutulması sonrası martenzit içerisindeki karbon (C) ve demir (Fe) birleşerek sementit ( $Fe_3C$ ) çökmesini oluşturduğu ve bu sebepten dolayı çökme sürecinde martenzitin ferrite dönüşmesiyle sertlik değerinde azalma görülür. Çeliğin birleşiminde olan yüksek karbür yapıcı elementlerin yüksek sıcaklık değerlerinde karbon ile birleşerek farklı özellikte karbür birleşmelerine ( $MC$ ,  $M_2C$ ,  $M_7C_3$  vb.) oluşmalarına sebep olurlar. Sertlik artırma amacı ile uygulanan bu tür özel ısıtma işlem prosesi sonucunda oluşan artan sertliğe ikincil sertlik adı verilmektedir. Bu oluşan farklı karakteristikte sertlik artışı karmaşık bir çökelti sertleşmesi mekanizmasıyla oluşmaktadır. Bu sertlik artışı ile oluşan sertlik mekanizmasına OSTWALD olgunlaşması mekanizması denilir (Karagöz ve Atabek, 2007).

Zırh çeliklerinde sertleştirme işlemleri için öngörülen sıcaklık olan 900-950 °C aralığında yapılan östenitleştirme işlemi sonucunda matrisin gerekli karbon ve karbür oluşturuca alaşım elementleri ile doyum sağlanarak su verme işlemi ile soğutma işlemi gerçekleştirilir. Su verme işlemi sonrası oluşan mikroyapıdaki latta tipi martenzitik standart bileşimlerde ortalama 600 °C’ de temperleme işlemine tabi tutulur. Çeliklerin ısıtma işlemi ile özelliklerinin iyileştirilmesi ve istenilen dayanım özellikleri elde edildikten sonra tasarlanacak geometrilerde ayarlanabilmesi diğer zırh malzemelerinden daha kullanışlı kılınmaktadır (Karagöz ve Atabek, 2007). Süregelen çalışmalar martenzitik zırhın temperleme süresi, faz dönüşümleri (Saleh ve diğerleri, 2018) ve çeşitli termal işlemler ışığında balistik performansını değerlendirmeyi ve geliştirmeyi amaçlamaktadır (Jena, Senthil ve Kumar, 2016).

Isıtma işlemi, çeliklerde istenilen mekanik ve metalurjik özellikleri geliştirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Isıtma işlemiyle üretilen tüm mikro yapılar, martenzit yapıdaki çelikler en yüksek mukavemeti oluşturur. Martenzitik dönüşüm ile ilişkili büyük iç stresler oluşması nedeniyle martenzitik fazı geliştirilmeleri ve kullanımı nadirdir. Temperleme işlemi, darbe enerjisinin emilimini arttırmak için gereklidir çeliklere uygulanan temperleme işlemi sünekliği ve tokluğu artırır. Sıcaklık ve zaman parametreleri temperleme işleminin belirleyicisi çeliğin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Temperleme sıcaklığının çeliğin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini anlamak için çok önemli çalışmalar yapılmıştır (Němeček, Mužík ve Mišek, 2012). ARMOX 500T, savunma uygulamaları için ideal olan mukavemet, sertlik ve darbe dayanımı arasında

iyi bir denge sağlayan temperlenmiş martenzitik bir mikroyapı sergilemektedir (Saleh ve diğerleri, 2018).

#### **2.1.4. DÜNYA VE TÜRKİYE’DE ZIRH TEKNOLOJİSİ ALANINDAKİ GELİŞMELER**

Hâlihazırda Türkiye’de ticari olarak zırh çeliği üretimi yapan bir firma bulunmamaktadır. Uluslararası balistik testlerden geçen ve kullanılan tüm zırh malzemeleri başta İsveç, Fransa ve Almanya vb. ülkelerden ithal edilmektedir. Türkiye’de Ar-Ge çalışmaları devam eden firmaların olmasına rağmen üretim aşamasına geçememişlerdir. ABD, Fransa, Almanya, İsrail, İsveç, İngiltere ve Rusya gibi zırh gelişimine önem veren ülkeler anti-zırh mermileri üretimi konusunda da, belirgin şekilde, yoğun alaşım yeteneğini ellerinde bulundurmaktadırlar. Uygulama açısından malzeme teknolojileri; İleri, metalik malzemeler, seramik malzemeler, polimerik malzemeler ve kompozit malzemeler şeklinde sınıflandırılabilir. Çalışmalar; fiziksel metalürji, katı-hal fiziği, kimya, delme mekaniği, balistik testler, yüzey bilimi ve malzeme analizi gibi özel uzmanlık alanları içine alan disiplinler arası bir sahada yürütölmektedir. (Bayar, 2008: 64,65).

Zırhlı malzemeler kullanılarak yapılacak tasarımlar, değişik türdeki silahlar ve bunlara ait mühimmat tiplerine karşı balistik darbe davranışının değerlendirilmesi gerektiğinden karmaşık bir çalışmadır. Seramik, çelik, alüminyum, titanyum, zayıflatılmış uranyum ve kompozit vb. yaygın olarak kullanılan değişik zırh yapım malzemelerinin ve bunların kombinasyonları üretim yöntemleri, bulunabilirlikleri, maliyetleri, çevresel etkileri ile fiziksel, kimyasal ve balistik özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak gittikçe önem kazanmaktadır.

Ülkemizin coğrafik olarak stratejik bir bölgede yer alması nedeniyle, zırh çeliği kullanımı açısından önemli bir potansiyel söz konusudur. Şuan Kara Kuvvetleri Komutanlığı’na bağlı Ana Bakım Merkez Komutanlıkları ile askeri alanlarda faaliyet gösteren FNSS, Otokar ve Hema gibi özel sektöre ait kuruluşlarda OBÜS, ZMA ve benzeri zırhlı araçların üretiminde belirli miktarda zırh çeliği kullanılmaktadır. Türk Silahlı Kuvvetlerinin gündeminde olan ve Savunma Sanayi Müsteşarlığınca yürütölen/yürütölecek Hava Savunma Topu, Alçak İrtifa Hava Savunma Aracı, Yerli Tank ve Yerli Gemi Projeleri kapsamında önemli miktarlarda zırh çeliği kullanımı söz konusu olacaktır (Bayar, 2008: 66).

Zırhlı malzemelerde, aynı veya iki farklı malzemeyi birleştirme sonrasında birleşim bölgelerinin mekanik özelliklerinin ana malzeme ile farklı olması ve birleşim bölgelerini ana malzemeye yakın veya daha üstün yapı elde edilebilmesi konusunda çalışmaların yapılması gerekmektedir. Savunma amacı ile kullanılan malzemelerde gerekli balistik testler yapılarak geçerlilik elde edilen malzemeler ve bunlar ile oluşturulan tasarımlar önem kazanmaktadır.

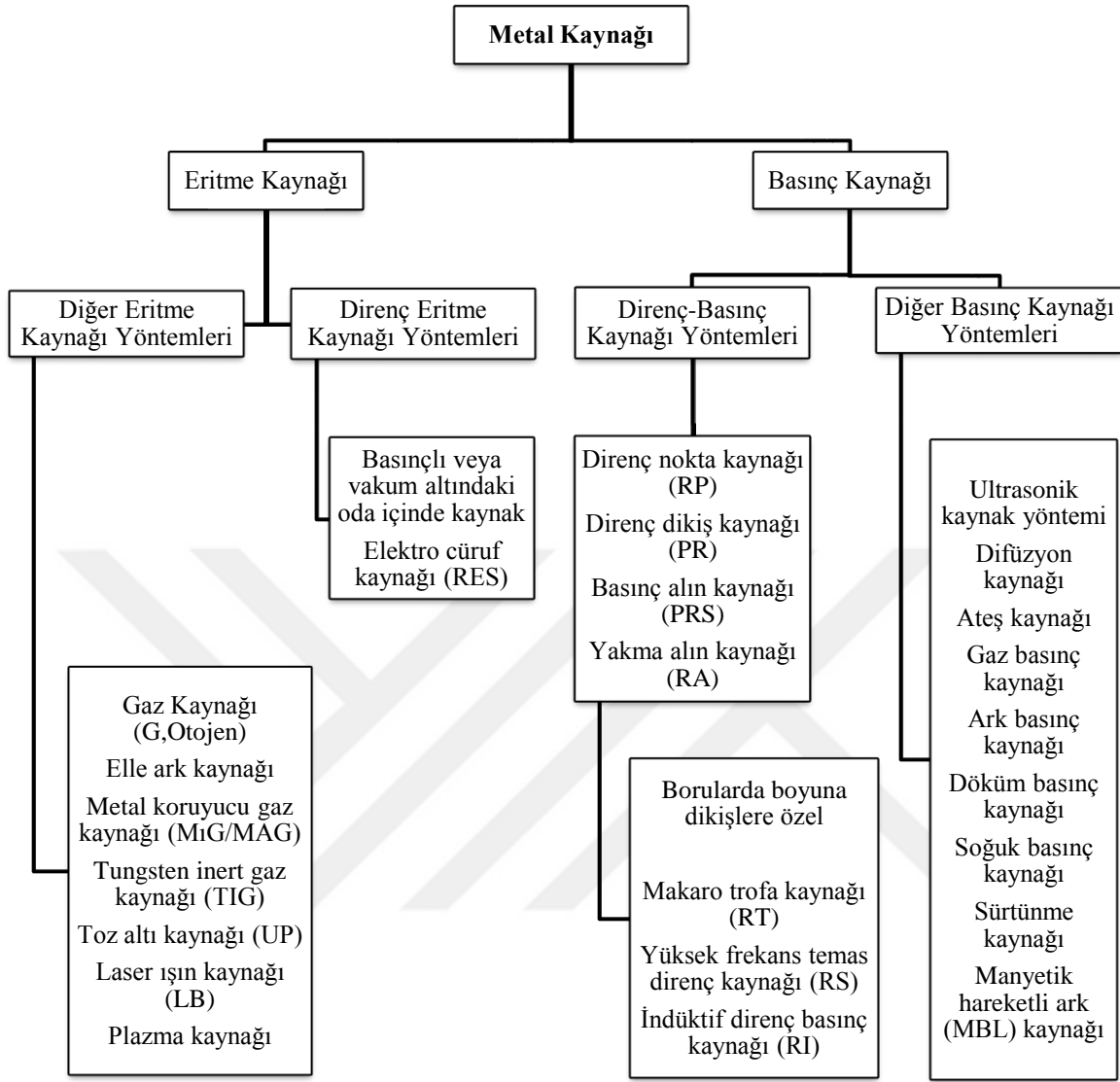
## **2.2. Kaynak**

İki veya daha fazla metalik veya termo-plastik malzemenin ısı enerjisi ve/veya basınç uygulaması altında, ilave tel kullanarak veya kullanmaksızın yapılan birleştirme ve dolgu işlemidir. Kaynak işlemleri başlıca ergitmeli ve katı hal kaynak türleri olarak iki gruba ayrılır.

**Katı Hal Kaynağı:** Birleştirilecek her iki yüzey üzerine gerekli kuvvet uygulayarak plastik deformasyon oluşturularak malzemenin kaynaklanması işlemidir. Genellikle dolgu malzemesi kullanılmaz. Birleştirme yüzeyleri malzeme özellikleri göz önüne alınarak ısıtılabilir.

**Ergitme Kaynağı:** Birleştirilecek yüzeylerin, bir ısı kaynağı kullanılarak ergitilmesi ve ilave metal kullanarak veya kullanmaksızın birbirlerinden sökülemeyecek şekilde birleştirilmesi işlemidir.



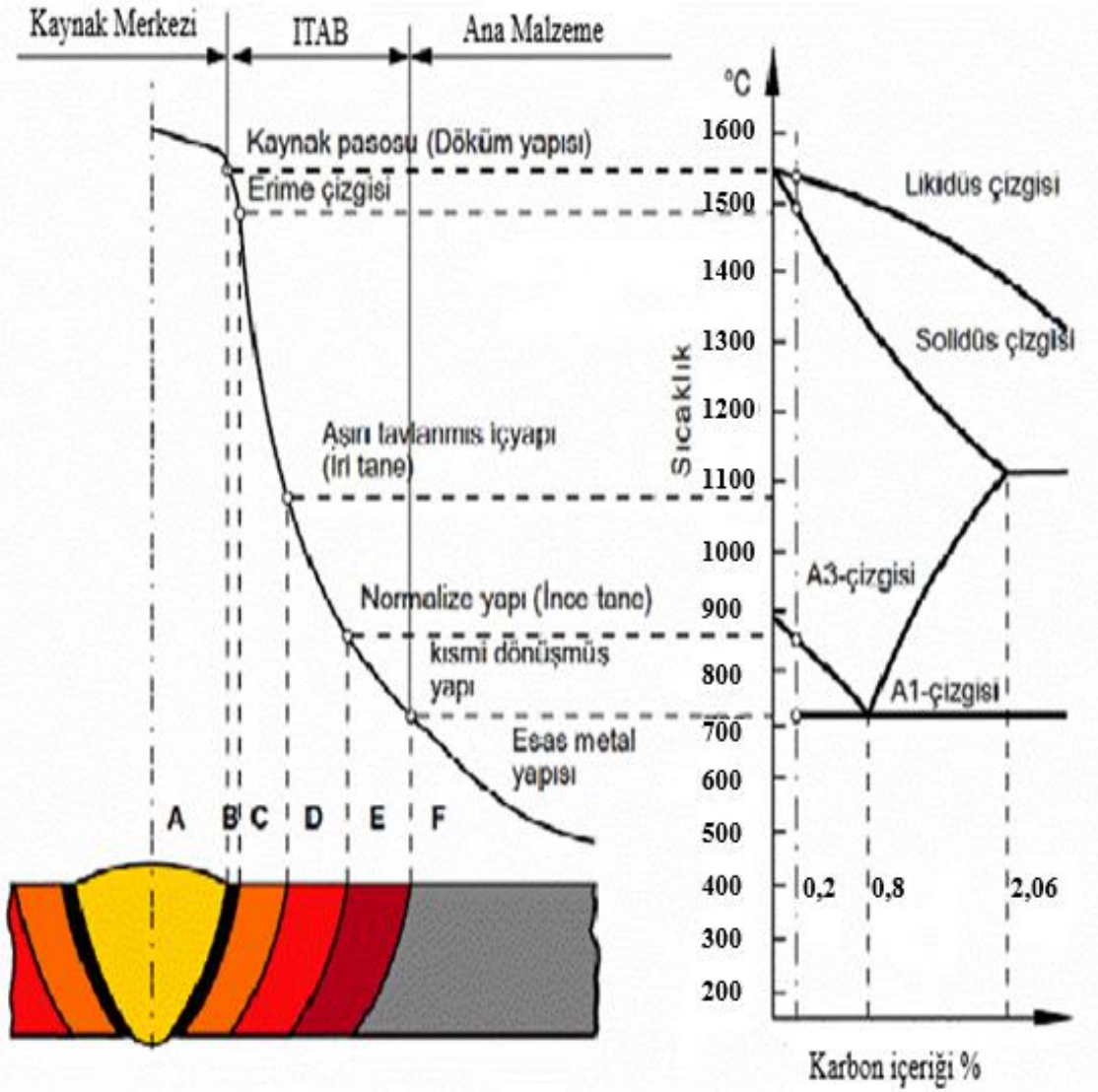


Şekil 2.1. Kaynak yöntemleri (GSI SLV ve ODTU KTM, 2013: 1.01-5)

Malzeme biliminde birleştirme alanında yapılan çalışmalarda, bir kısım araştırmacılar metalurjik olarak tatmin edici bağlantıların elde edilmesi için birleştirme parametrelerinin optimizasyonunu geliştirirken, geleneksel ark yöntemiyle veya yeni metal alaşımlarının konvansiyonel yöntemler ile birleştirilmesi için önemli olan üretim sürecinin sürekliliği ve yeni teknolojiler geliştirmekle de ilgilenmişlerdir. Kaynak işlemi, kaynak yapılan bölgede sızdırmazlık ve mukavemetin gerekli olduğu bir birleştirme tekniğidir. Kaynak bölgesinde oluşturulacak ısı, erime sıcaklığının altında veya üstünde olan malzemenin sıcaklığını yükseltmek için ayarlanır. Malzemenin kaynaştırılıp kaynağın başarısı veya başarısızlığı aranmadan sıcaklık, birleştirilecek malzemeler arasındaki difüzyon mekanizmalarını aktive etmek için yeterli olmalıdır. Difüzyon derecesi, kaynak ile lehimleme ve diğer sızdırmazlık birleştirme süreçleri arasındaki farkı yaratır (Yurtışık, 2013).

### 2.2.1. Kaynak sırasında ısı dağılımı

Kaynaklı birleştirme işleminin sonucunda birleşim bölgesine oluşan yeni mekanik ve metalurjik özellikler, dikiş kenarlarının ısıdan etkilenme seviyesi ve kaynak metalinin eritme sonrası yeniden kristalleşmesi türü ile belirlenmektedir.

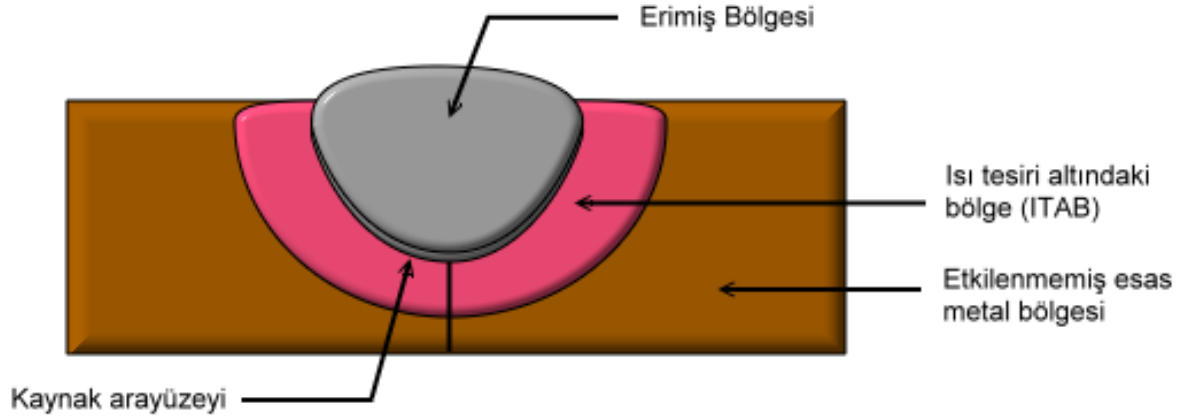


Şekil 2.2. Kaynak sırasında oluşan ısı dağılımı (GSI SLV ve ODTU KTM, 2013: 2.05-6,7)

### 2.2.2. Kaynak yapısı ve bölgelerinin tanımlanması

Kaynaklı birleştirme sonrası kaynak edilen malzeme ve kaynak bölgesi arasında heterojen olarak tanımlanacak üç bölge oluşur (GSI SLV ve ODTU KTM, 2013: 2.05-6,7).

- 1- Kaynak bölgesi
- 2- Erime çizgisi (kaynak metali ile ana malzeme arasındaki birleşme düzlemidir)
- 3- Isı tesiri altındaki bölge (ITAB)



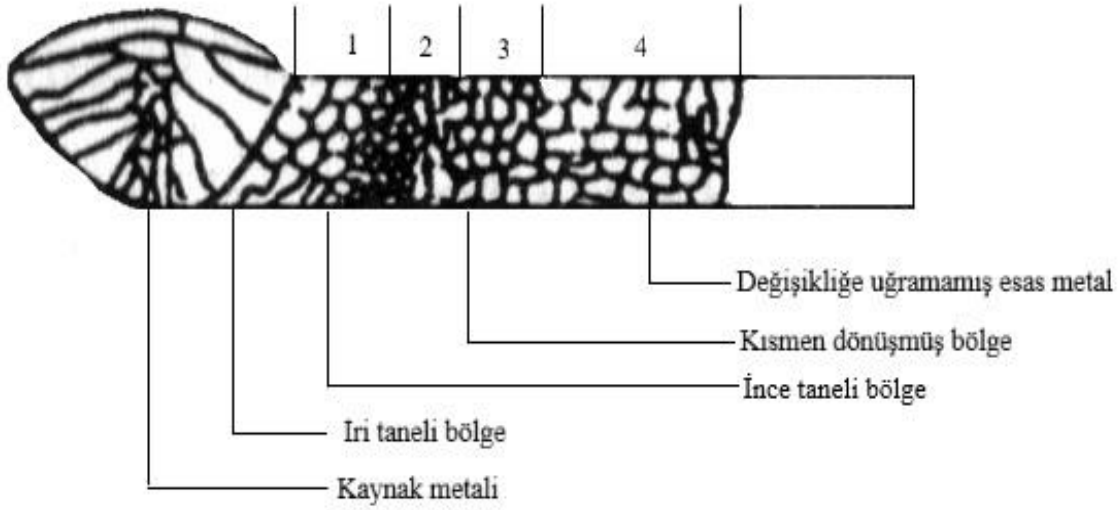
Resim 2.4. Kaynak bölgesinin tanımlanması (GSI SLV ve ODTU KTM, 2013: 2.05-1)

Ergitme işlemi sırasında kaynak ile ana malzemenin etkileşimi sonucu birleşim bölgesinde meydana gelen olaylar (GSI SLV ve ODTU KTM, 2013: 2.05-1,2,3);

- İlave malzemenin eritilerek kaynak metaline geçişi, ana malzemenin eritilmesi kaynak metalinin ana malzemeye birleşmesi.
- Kaynak damlasının, fiziksel ve kimyasal olarak etkilenmesi (hidrojen çözümlenmesi, alaşım elementlerinin yanması).
- Kaynak bölgesinde meydana gelen hal değişimleri (kaynak bölgesi, sıvı-katı ve erime çizgisi, katı-sıvı-katı değişimleri yaşanması).
- Kaynak metalinde, erime çizgisinde ve ısıdan etkilen bölgede soğuma hızından oluşan içyapı değişimlerinden oluşmaktadır.

### 1. Kaynak bölgesi

Kaynaklı birleştirme işleminde birleştirilen malzemelerin erime derecesinin üzerinde bir sıcaklığa ulaşılan bölgedir. Bu bölgede sıcaklık yüksek seviyededir. Eritme için gerekli sıcaklık değeri oluşturmak için gerekli ısı ana malzemeyi de etkilemektedir. Bu durumda ana malzemenin metalurjik ve mekanik özelliklerinin değişmesine yol açmaktadır. Aşağıdaki Resim 2.5’de kaynak sonrası oluşan bölgenin tane yapısındaki değişken alanları görülmektedir.



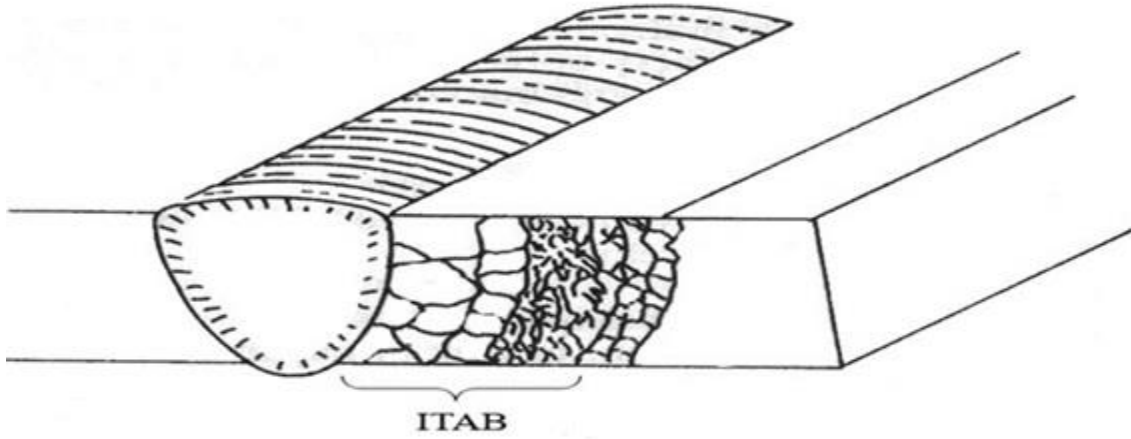
Resim 2.5. Kaynak bölgesinin tane yapısı (GSI SLV ve ODTU KTM, 2013: 2.05-1)

## 2. Ergime çizgisi

Ana malzeme ile kaynak bölgesini birbirine bağlayan bölgedir. Bu bölgede kaynağın ana malzemeye difüzyonu gerçekleşir. Ergime çizgisi, kaynak ile ana malzemeye geçişinde sonrası oluşan soğuma sonrası düzensiz kimyasal yapı ve soğuma süresinden dolayı iri taneli bölge oluşur.

## 3. Isı tesiri altında kalan bölge (ITAB)

Isıdan etkilenmiş bölge için demir-karbon denge diyagramında oluşan koşullar tam anlamı ile düzenli gerçekleşmesi mümkün değildir. Bu bölgede kaynak işlemi sırasında; hızlı ısınma, kısa bekleme süreleri ve hızlı soğuma gibi farklı yapılar oluşturacak evrelerden oluşmaktadır. Bu olaylar sonucunda ITAB bölgesinde dengesizlik söz konusudur.

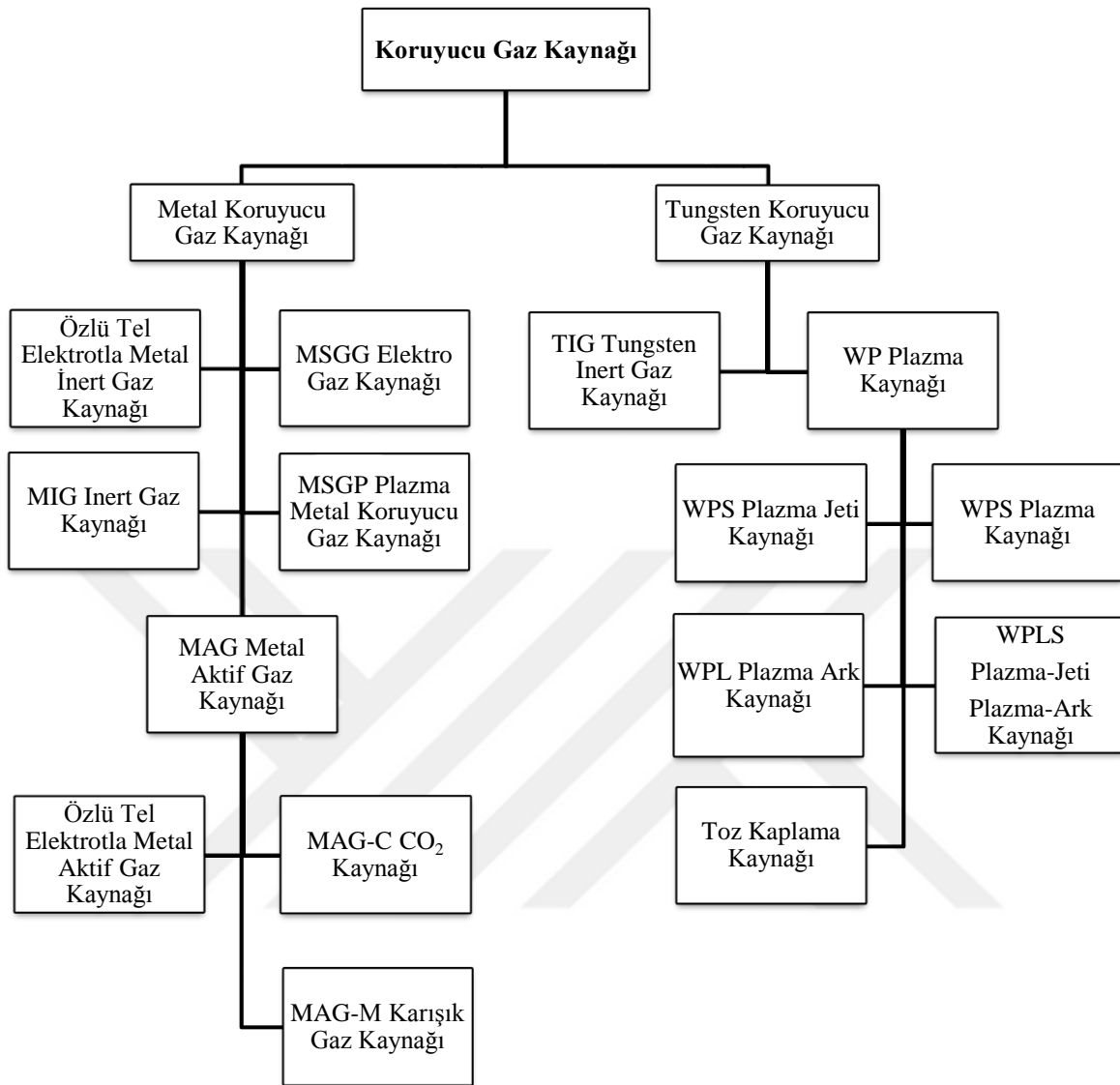


Resim 2.6. Isı tesiri altında kalan bölge (ITAB) (GSI SLV ve ODTU KTM, 2013:1 )

Kaynak bölgesinde zamana bağlı sıcaklık değişimleri oluşması ve kaynak işleminin malzemeyi deforme eden bir uygulama olarak kabul edildiğinden ana malzeme için bir ısı işlem deformasyonu teşkil eder. Bu nedenle ana malzemenin ısıdan etkilenmiş bölgesinde sertlik ve tokluk gibi mekanik özellikleri değiştiren az ya da çok miktarda içyapı değişimleri gerçekleşir. Buna bağlı olarak, ısı değişimleri sonucu oluşan bu bölge karakterizasyon bakımından ana malzeme ve kaynak malzemesinden farklı bir yapı oluşturur.

### 2.3. Koruyucu Gaz Kaynağı

Koruyucu gaz kaynağı (gaz altı kaynağı), eriyen kaynak ilave metali veya eritilmeyen bir elektrot kullanan ve kaynak banyosunu atmosferden korumak için koruyucu bir gazdan faydalanan tüm kaynak yöntemlerini kapsar (GSI SLV ve ODTU KTM, 2013: 1.06-1).



Şekil 2.3. Koruyucu gaz kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması (GSI SLV ve ODTU KTM, 2013: 1.06-1)

Koruyucu gazlar arkin oluşturulduğu plazmayı taşıyıcı gazlardır. Ark sırasında gerçekleşen olayların, malzeme geçişlerini, dikiş kalite ve görüntüsünü kaynağın nüfuziyete etkisini ve sıçramaları koruyucu gaz etkiler bu nedenle kaynakta önemli bir etkiye sahiptir (GSI SLV ve ODTU KTM, 2013: 1.06-1).

Aktif koruyucu gazlar, ark içerisinde dolgu malzemesi ve ana malzemeye kimyasal ve fiziksel olarak etkileşim içerisindedirler. Asal koruyucu gazlar, kaynak sırasında malzeme ile reaksiyon oluşturmeyen gazlardır. Koruyucu gaz yöntemlerinde, eriyen ve erimeyen elektrot kullanılması, koruyucu gazın cinsi (aktif veya asal) ve kullanılan ark türü gibi teknikler uygulanmaktadır. Kaynak banyosuna havadan girecek ve kaynak kalitesini

etkileyen zararlı gazlardan korur. Kaynak bölgesinde bu gazlardan oluşan reaksiyonlarda ise fiziksel, ısıl(termal) ve metalurjik açıdan kaynak bölgesine etkileri olur. Bu reaksiyonlar gaz çeşidine göre asal, oksitleyici, reaksiyon zayıflatıcı ve indirgeyici olabilir. Koruyucu gazların kaynak sırasında oluşturduğu ısı iletkenlikleri, dikiş kalitesini, kaynak banyosu sıcaklığını, gazın kaynak banyosundan uzaklaşmasını ve kaynak hızını etkiler. Uygun korucu gazların kaynak bölgesindeki reaksiyonlara etkisi ise kaynak hızı ve nüfuziyeti arttırma yönünde olmaktadır (GSI SLV ve ODTU KTM, 2013: 1.06-4,5,6).

### **2.3.1. Plazma kaynağı**

Plazma terimi, iyonlaşmış gaz kütlesi demektir. Plazma oluşturmak için kullanılan gazın, pozitif iyonları ile negatif yüklü elektronlarına ayrışması için yeteri yükseklikte bir sıcaklıkta ısıtılması gerekmektedir. Elektron ayrışmasını gerçekleştirmek için bir enerjiye ihtiyaç vardır ve kaynak işleminde gerekli olan bu enerji ark üzerinden sağlanır. Ark sütununun merkezinde var olan gaz, oluşan sıcaklık değerlerinde ayrışarak plazmanın oluşması sağlanmış olur. Gaz, arkın oluşturduğu sütundan aşağı doğru akar iken nötr atomlar oluşturmak amacıyla yeniden birleşmeye çalışır bu sırada ortama ısı enerjisi verilir. Ark oluşumu bakır alaşımlı nozul deliği tarafından bir ark sütunu oluşturmak için yüksek oranda sıkıştırılır. Plazma gazının bir kısmının iyonlaştırılması yoluyla plazma oluşturulmuş olur (Sakarya, 2018).

Plazma ark kaynağı, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır örneğin hava taşıtlarının hassas parçaları ve füze kabuğu bu yöntem ile kaynaklıdır. Sonuç olarak kaynak kalitesi çok önemlidir (Wang, Goldak, Tchernov ve Downey, 2009). Kaynak kalitesi, kaynak mekanik özelliklerini belirleyen kaynak havuzu özellikleriyle karakterize edilmektedir. Plazma ark kaynağı, erimiş havuzun içinde bir anahtar deliği elde etmek için oldukça dar bir ark kullanır. Bu nedenle, plazma ark kaynağı işleminin işlem verimliliği, geleneksel gaz tungsten ark kaynağı işlemine kıyasla çok daha yüksektir. Plazma ark kaynak işleminde, anahtar deliği stabilitesi, ısı transferi ve akışkan akış davranışı, proses algılama ve kontrol yöntemleri, kaynak prosesin daha iyi uygulanabilmesi ve kaynak kalitesinin sağlanması için önemlidir (Das ve diğerleri, 2018).

Yüksek enerji yoğunluğu olan bir kaynak işlemi olarak, önemli ölçüde daraltılmış bir alana yayılan anahtar deliği plazması kaynak havuzunun içine girmiş bir anahtar deliği

oluşturulabilmesi mümkündür (Zhang ve Ma, 2001; Hsiao, Tarnng ve Huang, 2007; Liu, Wua, Jia ve Zhanga, 2017). Plazma ark kaynağı, kaynak havuzu ve anahtar deliği davranışları kaynak işlemi stabilitesini ve kaynak bağlantı kalitesini belirlemek için temel faktörlerdir. Kaynak havuzu ve anahtar deliği davranışları, kaynak akımı, kaynak hızı, plazma gazı akış hızı, vb. gibi kaynak işlemi parametrelerine ve birleştirilecek olan ana metalin fiziksel özelliklerine bağlı değildir (Martikainen ve Moisio, 1993; Martikainen, 1995). Anahtar deliği şeklini ve boyutunu ölçmek ve bunları kullanılacak malzeme uygun parametre olarak ilişkilendirmek büyük önem taşır (Liu, Wu ve Chen, 2012). Proses stabilitesini ana hatlarıyla işlemek için, plazma kaynağında proses içi kontrolü, kaynak parametrelerinin ve kaynak bloğu ve anahtar deliği davranışlarının korelasyonuna esas teşkil eder. Bu amaçla, kaynak havuzu ve anahtar deliği davranışlarının gerçek zamanlı ölçümü bir önkoşuldur. Bunun için plazma ark ve kaynak havuzu arasındaki çok karmaşık yapıların anlaşılması gerekmektedir (Liu, Wu ve Gao, 2013).

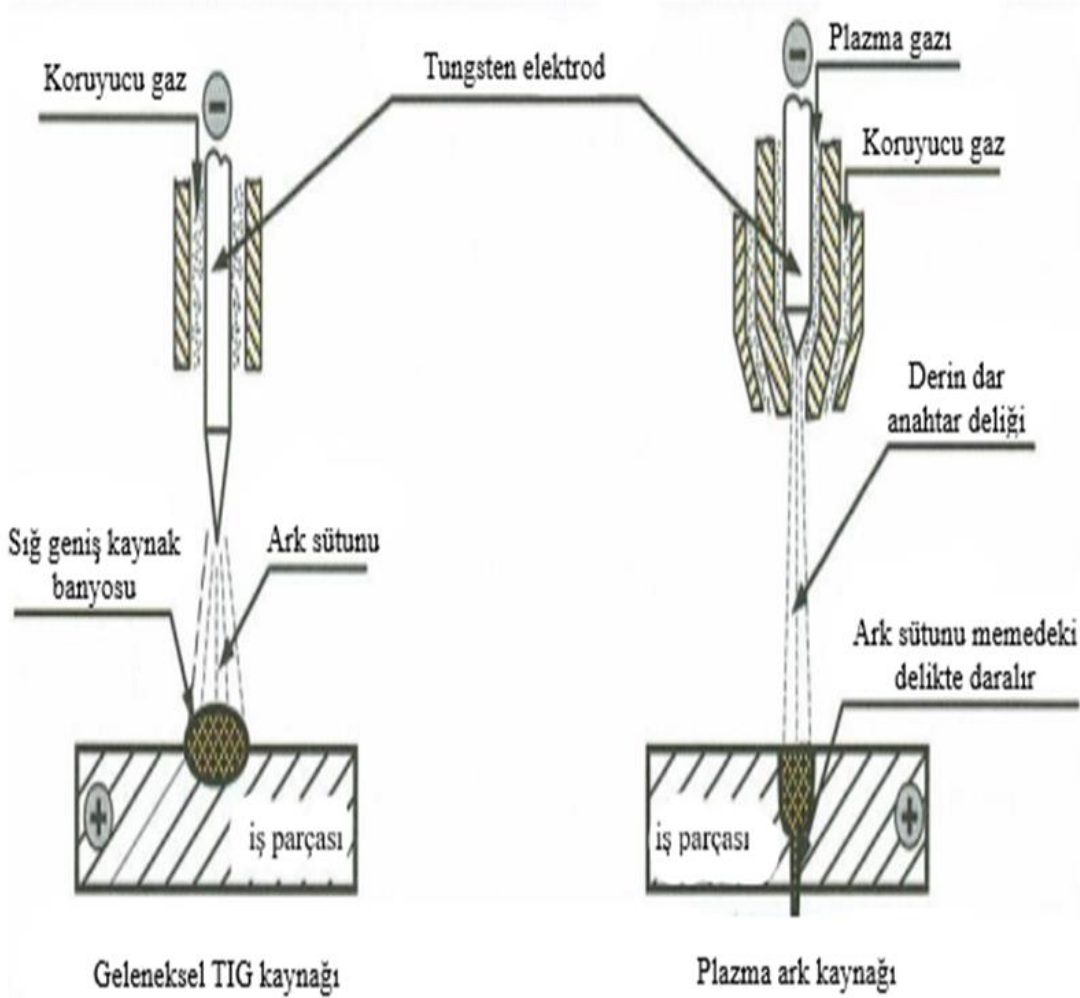
Anahtar deliği plazma ark kaynağı, derin nüfuzlu kaynak yöntemleri ve sıradan ark kaynak teknolojilerinden daha üstündür. Enerji, tüm malzemeye kontrolsüz şekilde ısının transfer edilmesinden ziyade, anahtar deliği içindeki sıcak plazma arkı ile alt kısımlara kadar homojen ve kontrollü şekilde transfer edilir. Bu nedenle, bu termo-fiziksel süreci göstermek için bir evrimsel anahtar deliği modu ısı transfer modeli geliştirilmiştir (Li, Feng, Zhang ve Wu, 2018).

Plazma arkı oluşumu için, TIG kaynak yönteminin temel alınarak bunun geliştirilmesi sonucunda elde edilmiştir. Bu yöntemde TIG kaynağının konik şeklindeki arkı farklı modernizasyonlar ile büzülebilmesinin sağlamak amacıyla silindirik ince yapıda tasarlanmıştır. Plazma ark üflecinin, ucunda küçük bir deliği bulunan meme ve bu memenin merkezinde bulunan ergimeyen tungsten elektrottan oluşturulmuştur (Sakarya, 2018).

Plazma gazı, dairesel bir yapıda iç içe geçmiş bir meme ve bu memede bulunan elektrot arasından geçer hızla delikten dışarı doğru çıkmaktadır. Dış kısımda ise kaynak koruma gazının sağlandığı diğer bir gaz nozulu bulunmaktadır. İç nozuldan gelen gaz ark tarafından ısıtılmakta ve bu ısının etkisi sonucunda genişlemeye uğrayarak yüksek hızlara ulaşarak dışarı doğru çıkmaktadır. Bu gazın debisi, ortalama olarak 0.25 ila 5 l/dak arasında değişkenlik göstermektedir. Bu değerlerin üzerinde oluşan kaynak bölgesinde arkın koruma özelliğini etkileyecek türbülansa sebep olabilmektedir. Ergime bölgesindeki oluşturulan



gaz kaynak bölgesine atmosferden gelecek tehditlere karşı korumaya yeterli gelmeyebilir. Bundan dolayı, kaynak havuzunu değişken yönlü hava akışı ve atmosferden korumak amacıyla, dış nozuldan 10 ila 30 l/dak debi aralığında koruma gazı akışı sağlanır (Sakarya, 2018).



Resim 2.7. TIG kaynağı ve Plazma ark kaynağı karşılaştırılması (Sakarya, 2018).

Plazma arkı oluşturularak yapılan kaynak yönteminde en çok iki yöntem zaman içerisinde geliştirilip geniş yelpazede çalışma imkanı sağlanmaktadır. Geliştirilen teknikler: ergitme tekniği (melt-in mode) ve anahtar deliği (key hole) tekniğidir (Sakarya, 2018).

Ergitme tekniği (melt-in mode):

Yüksek akım şiddetindeki değerlerine ulaşılarak (15-400 amper) yapılan kaynak işlemlerinde genellikle ergitme tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. Ergitme tekniği

kullanarak gerçekleştirilen kaynaklı bileştirmede kaynak dikişi TIG kaynak yöntemine benzer özellikleri içermektedir. Yüksek mukavemette kaynak kalitesine ulaşmak amacıyla gerçekleştirilen mekanize çalışmalarda, TIG kaynak yöntemine tercih edilebilir. Arkın sürekli olarak kararlı ilerlediği ve yüksek akım şiddetlilerinin olduğu çalışmalarda nüfuziyetli kaynak yapıları elde edebilmek ve kaynak esnasında ark kontrol altında tutularak kaynak için belirlenen süre azaltılmaktadır. İlave dolgu metali, malzeme kalınlığına bağlı kullanılabilir. Yapılan çalışmalar kapsamında, boruların kaynağı ve yüzey kaplaması yapılmış çelik plakalarda ergitme tekniği uygulanarak oluşturulan kaynak dikişlerinin kapak pasosunun oluşturulması biçimindedir (Sakarya, 2018).

Anahtar deliği tekniği (keyhole mode):

Anahtar deliği tekniği oluşturularak yapılan plazma kaynak yönteminde, kaynak yapılacak malzemede yüksek nüfuziyete ulaşabilmek için, 100 amperin üzerinde olan büyük akım şiddetlerinde plazma gaz miktarı artırılır ise torçtan çıkan plazma jeti kaynak ağzındaki kaynak metalini yana doğru itecek basınca ulaşarak çalışma plakasında bir delik açar. Kaynak torcuna dikiş yönünde hareket verildiğinden, sıvı kaynak metali yanlara doğru sıkıştırılarak, deliğin (anahtar deliği) arkasına akar ve bu alanda tekrar birleşme sağlanır. Anahtar deliği tekniğinin diğer yöntemlere kıyasla en önemli üstünlüğü ise kalın malzemelerde kaynak işlemini tek pasoda gerçekleştirilebilmeye olanak sağlamasıdır. Anahtar deliği tekniği kullanılarak yapılan kaynak bölgesinde tam nüfuziyet, dikiş kökünün homojen oluşması ve kontrolü ısı girdisi ile oluşması beklenen, daha az çarpılma ve çok yüksek kaynak hızlarına ulaşılabilme imkanı sağlamaktadır (Sakarya, 2018).

Kaynaklı üretim alanlarını uzay endüstrisi, havacılık ve nükleer endüstrileri gibi riskli alanlarda çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek dayanımlı birleştirmeler, güvenilirlik ve ekonomiklik açısından kabul edilen yöntem olmuştur. Diğer kaynak yöntemleri birleştirilen metal ve alaşımları, plazma ark kaynak yönteminde yüksek yorulma koşullarında daha güvenilir kaynaklı birleştirme dikişi elde edilirler (Katı, Bölükbaşı ve Ozan, 2018).

Plazma ark kaynak yöntemi diğer ergitme kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında yüksek sıcaklık, yüksek enerji girdisi, düşük termal girdi ve düşük üretim maliyeti gibi avantajlara sahiptir (Kılıç, 2008).

### 2.3.2. Hibrit plazma ark kaynağı (HPAK)

Hibrit Plazma-gaz metal ark kaynağı veya SuperMIG olarak da adlandırılmaktadır. Uluslararası Kaynak Enstitüsü (International Institute of Welding–IIW) “hibrit kaynağı” iki veya daha çok kaynak yönteminin birleştirilerek bir tek kaynak uygulaması olarak tanımlaması şeklinde ifade edilmektedir. HPAK yöntemi, plazma kaynağı ve gaz metal ark kaynağının konveksiyonel olarak birleştirilmesi sonucunda elde edilen bir yöntemdir. Hibrit Plazma Ark Kaynağı (Hybrid Plasma Arc Welding), plazma arkının geliştirilmesi ile elde edilmiş anahtar deliği tekniğini kullanarak oluşturulmuş kaynak havuzunun içerisine gaz-altı ark kaynak yönteminin bir faktörü olan dolgu ilavesini kullanarak oluşturulan ve bundan dolayı hibrit plazma/gaz-altı ark kaynağı olarak bilinen bir teknolojidir (Yurtışık, 2018).

Hibrit plazma ark kaynağı (HPAK), derin penetrasyon yeteneğine plazma ark kaynağından hemde tek bir torçtan gaz metal ark kaynağının metal biriktirme yeteneği özelliğine sahiptir. HPAK, kaynak yapıldığında daha az dolgu ve enerji sarfiyatı ve kaynaklı yapılarda daha az bozulma ve geleneksel tekniklerden daha az artık gerilme görülmektedir. Bununla birlikte, kaynak yöntemlerinin tasarımı üstün özelliklerini korumak için malzemelere, özellikle yüksek alaşımlı malzemelerde iyi fiziksel ve kimyasal özellikler sağlayacak uygun bir mikroyapı elde etmek için hala önemlidir (Yurtışık, 2013).

Plazma-MIG hibrit kaynağında, yüksek kaynak verimliliği, daha derine nüfuz etme ve kaliteli kaynak görünüşü elde edilir (Ono ve diğerleri, 2009; Detao ve diğerleri, 2017). Plazma ve MIG kaynağının sadece sinerjistik bir etkisi olmayan, aynı zamanda yüksek bir kaynak verimliliğine sahip olan özellikle alaşımlı malzemelerde kullanılan yöntemdir. Koaksiyel yapı plazma ve MIG arkı, ısı kaynaklarıdır. Koaksiyel yapı tekniğinin hibrit kaynağı damlacıkların geçişini ve damlacıklardan ısının kaynak metalinin en alt kısımlarına kadar iletilmesini kolaylaştırabildiğini göstermiştir (Detao ve diğerleri, 2017). Tel ve MIG arkının plazma arkı tarafından çevrildiği görülmektedir (Bai, Gao ve Qiu, 2010).

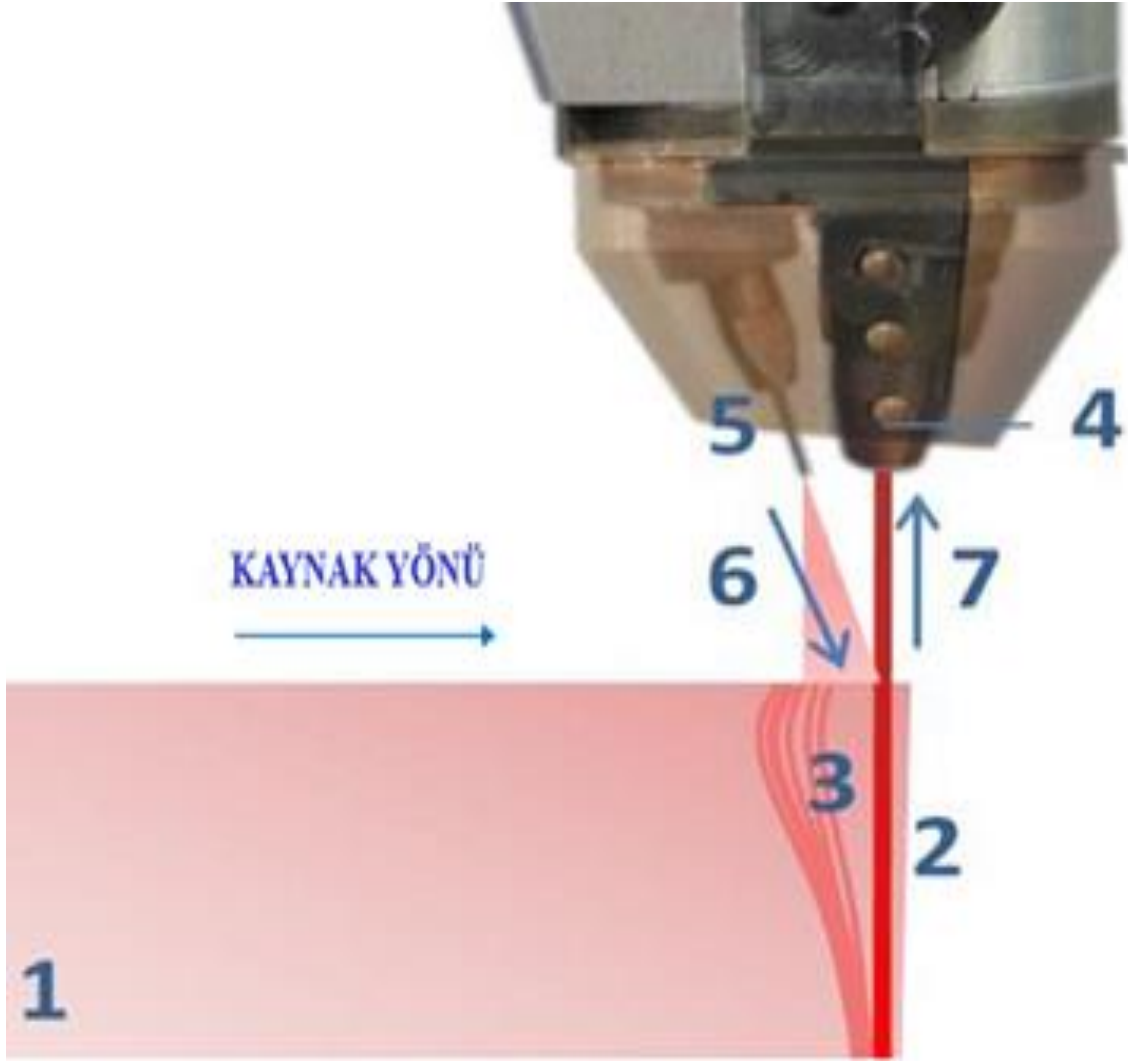
Yüksek enerji yoğunluğu ve güçlü bir ark kuvvetiyle, plazma arkı kaynak yöntemleri içinde en verimli kaynak teknolojilerinden biridir. Çok yüksek sıcaklığa sahip plazma arkı, anında erimiş havuza neden olur ve çok kısa sürelerde malzemedeki erimiş bir havuz oluşturur. Daha sonra sıvı metal buharlaşır ve anahtar deliği ortaya çıkar, kaynak işlemi büyük ölçüde

hızlandırır. Son olarak, ark havuzu ortamdaki hava tarafından soğutulur ve kaynak kordonlarını oluşturur (Caia ve diğerleri, 2018).

Anahtar deliği sistemini modellemek önemlidir, çünkü hem anahtar deliği oluşumu hem de kaynak havuzu gelişimi birbirinden ayrı değildir. Plazma bölgesinde oluşan enerjinin kontrollü şekilde oluşturulması ve uygulanabilirliği için çalışmalar yapılmıştır (Li, Feng, Li, Zhang ve Wu, 2016). Bu çalışmalarda; Zhang ve Zhang, 1999; anahtar deliği görüntüsü ve kaynak havuzunu, Jia, Wu ve Zhang, 2009; stabil anahtar deliği için algılama ve kontrol sistemini geliştirmişler. Liu ve diğerleri, 2012; Liu ve diğerleri, 2013; ise anahtar deliği geometrisinin etkisini sürekli ve yüksek kalitede plazma ark kaynağı sürecini analiz etmişler. Kaynak havuzu şekli, havuzdaki akış modellerini ve anahtar deliğinin şeklini önceden belirlemek ve iş parçası üzerinde oluşacak sıcaklık sürecini hesaplamak için farklı sayısal modellemeler geliştirilmiştir (Hsu ve Robinsky, 1988; Nehad, 1995).

Hibrit plazma ark kaynak yönteminde plazmanın dar alanda ısıl etkileşim sonucunda geleneksel kaynak yöntemlerine kıyasla, ITAB bölgesinin dar olması, düşük kalıntı gerilmeler ve çarpılmaların alanını da sınırlar. İlave telin dolgu etkisi, daha derin nüfuziyet ve dar alanda kaynak yapılma ve kaynak esnasında çarpılma gerilmeleri oluşmaması hibrit plazma ark kaynak yönteminin sağlayacağı avantajlardır (Gao, Zeng, Yan ve Hu, 2008; Tolungüç ve diğerleri, 2011; Atabaki ve diğerleri, 2014).

Tek pasoda kalın parçaların kaynak edilmesi, çok pasolu kaynakta görülen heterojen katılaşma ve düşük sıcaklık faz dönüşümleri ile oluşan ısıl değişmelerin malzeme mekanik davranışlarına olumsuz etkisini azaltmaktadır. HPAK sürecindeki kaynak penetrasyon etkisi ve daha dar alanda kaynak bölgesi oluşumundan dolayı daha yüksek kalınlıklardaki parçaların kaynağında da alternatif bir kaynak yöntemi olmaktadır (Tolungüç ve diğerleri, 2011). Resim 2.8'de HPAK yöntemi tasarım sistemi görülmektedir.

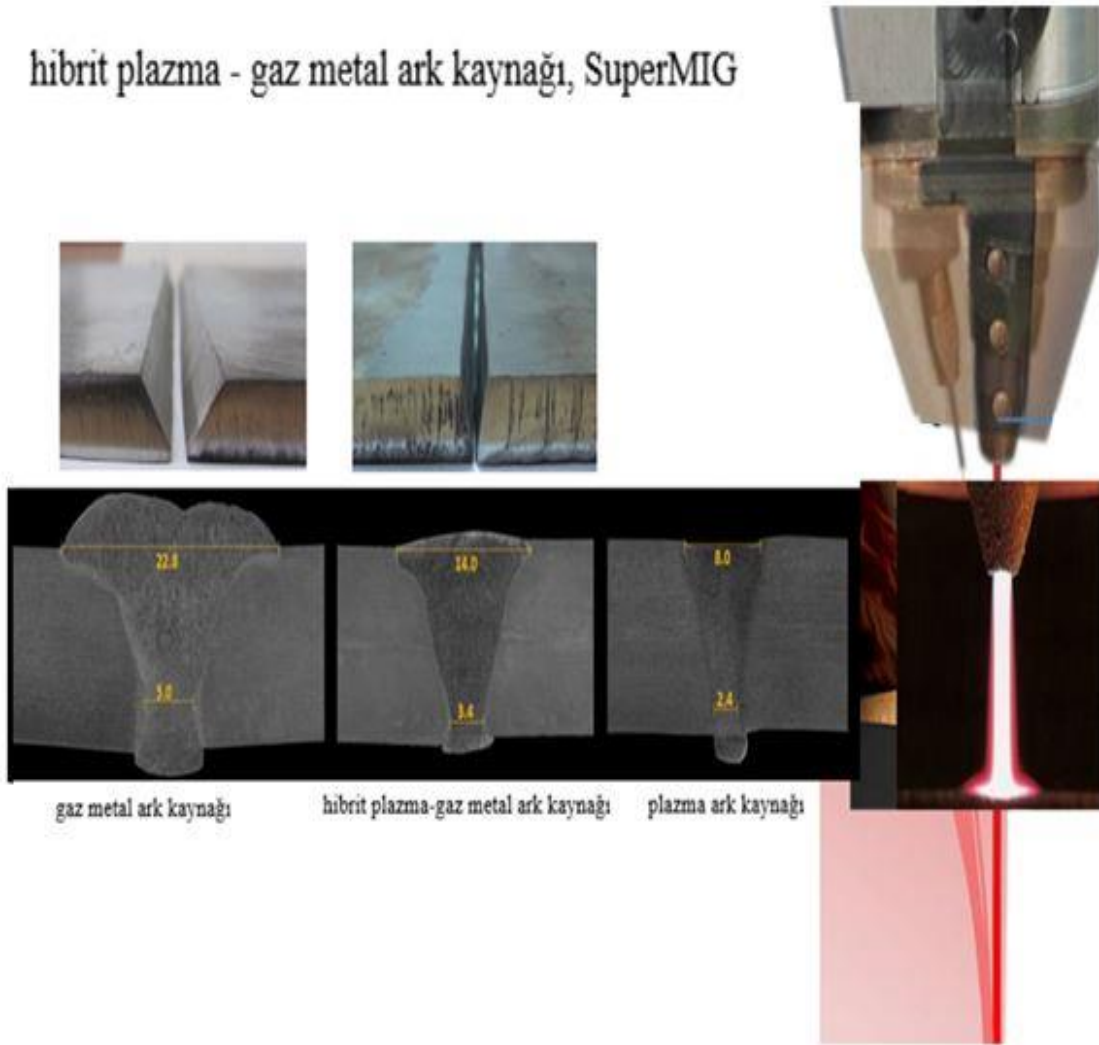


Resim 2.8. Hibrit plazma – gaz metal ark sistemi, SuperMIG (Yurtışık, 2013)

- 1-İş Parçası (Work Piece)
- 2-Plazma Jet (Plazma Jet)
- 3-Erimiş Metal (Metal Vapor Column and Surrounding Molten Metal)
- 4-Orifis Memesi ve Tungsten Elektrot (Orifice Nozzle and Tungsten Electrode)
- 5-Tel Besleme Elektrotu (Consumable Wire Electode)
- 6-Tel Akım Yönü (Wire-Arc Current Direction)
- 7-Plazma Ark Akım Yönü (Plasma –Arc Current Direction)

Resim 2.9’da ark kaynağı, hibrit plazma-gaz metal ark kaynağı ve plazma ark kaynağının kullanılması karşılaştırılmış kaynak bölgesindeki oluşacak yapının, birleştirme kaynaklarında görülen ısı tesiri altında (ITAB) kalan bölgenin genişliği, birleşimden kaynaklanan dolgu malzemesi veya ana metaldeki ergime nüfuziyetinin kontrolleri üzerinde çalışma yapılmıştır. Kaynak esnasında iş parçası üzerinde önde olan ve sürekli bu şekilde ilerleyen plazma arkının parçaya ön ısıtma işlemi uygulaması gibi tavlama yaptığı

ve ergime oluşumunun gerçekleşmesi sebebiyle toz-altı ve gaz-altı ark kaynaklarında görülen tipik kaynak hacimsel hatalar gözlenmemektedir. Bundan dolayı yüksek kalınlıkta ve yüksek alaşımlı metallerde proses gereği kaynak öncesi ön ısıtma ve kaynak sırasında ek ısıtma gerekliliklerinin azalması ve daha dar alanda derin nüfuziyet sağlanmıştır. Kalın iş parçalarında kaynak ağzı açılması ve kaynak sonrası ek ısıl işlem gereksinimini ortadan kaldırılması ve daha kaliteli kaynaklı birleştirmeler gerçekleştirilmiştir (Yurtışık, 2018).



Resim 2.9. Gaz metal ark kaynağı, Hibrit plazma ark kaynağı, Plazma ark kaynağı yöntemleri kullanılarak malzemelerin karşılaştırılması (ODTÜ KTTMM, 2018)

Süper-MIG, kaynak yönteminin geleneksel, ışın kaynağı ve diğer ileri ark yöntemlerine göre üstünlükleri ise (Yurtışık, 2018) :

- Toz altı ve gaz altı ark kaynağı yöntemlerine kıyasla yüksek kalınlıkta malzemelerde yüksek kaynak hızına ulaşılabilmektedir.
- Toz altı ark kaynak yöntemlerine göre farklı pozisyonlarda kaynak yapılabilme nedeniyle farklı pozisyonlarda uygulanma avantajı sunmaktadır.
- Geleneksel ark kaynağı yöntemine göre daha yüksek nüfuziyet, dar ve belirli kalınlıklara kadar kaynak ağzı açmadan birleştirilme yapılması ve daha düşük dolgu teli ilavesi gereksinimi.
- Geleneksel ark kaynak yöntemlerine kıyasla çapaksız temiz kaynak ve dikiş görüntüsü.
- Elektron ışın ve lazer kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında geniş aralıklarda kaynak ağzı hazırlığı ve ön-imalat toleransları ile çalışabilme olanağı (lazer kaynağı için yaklaşık 0,2 mm, hibrit lazer ark için yaklaşık 1,5 mm olan alın açıklığı değeri, hibrit plazma ark kaynağı için yaklaşık 3 mm'dir).
- Lazer ve elektron ışın kaynak yöntemlerine göre daha düşük kurulum ve işletme maliyetleri birlikte yüksek verimlikte kaynaklı birleştirmelerin sağlanması.
- Lazer ve elektron ışın kaynak yöntemlerinin tersine kurulma ve işletme açısından yenilikçi uygulamalarda kolay adapte olunabilirlik, özelleşmiş imalat ortamları ve özel operatörler gerekmemesi.

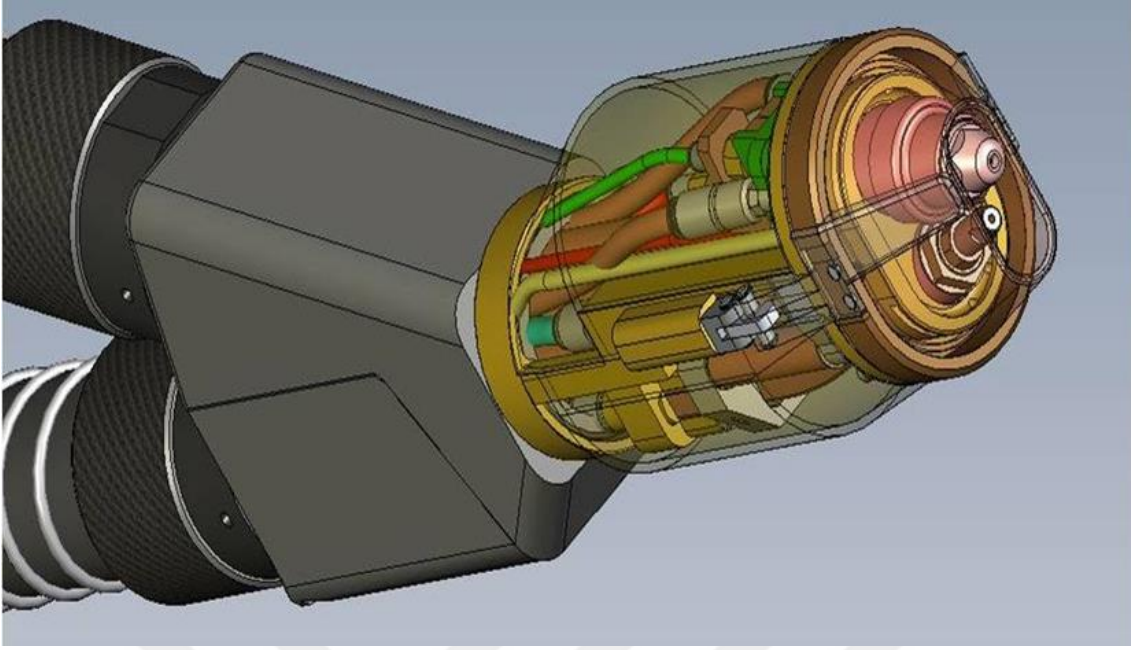
Orta Doğu Teknik Üniversitesinde bulunan, Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız Muayene Araştırma/Uygulama Merkezi, KTTMM bünyesinde Ağustos 2010'da devreye alınmış olup Hibrit Kaynak Teknolojileri Laboratuvarı'nda, hibrit plazma ark kaynak tekniği üzerinde deneysel olarak çalışmalar başlamıştır (Yurtışık, 2018).

#### HPAK donanım ve çalışma prensibi

Hibrit Plazma Ark Kaynağı (Hybrid Plasma Arc Welding, HPAK), plazma arkı yöntemi ve gaz-altı ark kaynak yönteminin birleştirilmesi ile oluşan bir tekniktir. Plazma arkının, keyhole (anahtar deliği) yöntemini kullanarak oluşturulan kaynak havuzunun içerisine gaz-altı ark kaynak yönteminin ilave telle dolgu işlemi yapılarak gerçekleşmesi sonucunda kaynak dikişinin oluşturulduğu bir yöntemdir. Süper-MIG ya da hibrit plazma/gaz-altı ark kaynağı teknolojisi diye bilinmektedir (Yurtışık, 2013).

Tungsten elektrot, doğru akım elektrodu negatif, DCEN veya diğer bir deyişle düz polarite DCSP ile çalışır, buna karşılık dolgu tel elektrodu, doğru akım elektrodu pozitif, DCEP veya başka bir deyişle ters polarite DCRP'de çalışır. Farklı polaritelere sahip olan iki oluşum, birbirlerine karşı manyetik bir kuvvet uygular, bu da özellikle arkı oluşturan yapıya doğru ikincil ark yönünde bir sapmaya neden olur. Bu eğilimi nötralize etmek ve birincil arkı kaynak havuzunun ön tarafına doğru tutmak için iki ark arasında bir manyetik alan eklenir (Tolungüç ve diğerleri, 2011).





Resim 2.10. Hibrit plazma ark kaynağı torç kısmı (ODTÜ KTTMM, 2018)



Resim 2.11. Hibrit plazma ark kaynak makinesi ünitesi (ODTÜ KTTMM, 2018)





Resim 2.12. Hibrit plazma ark kaynağı parametre belirleme çalışması



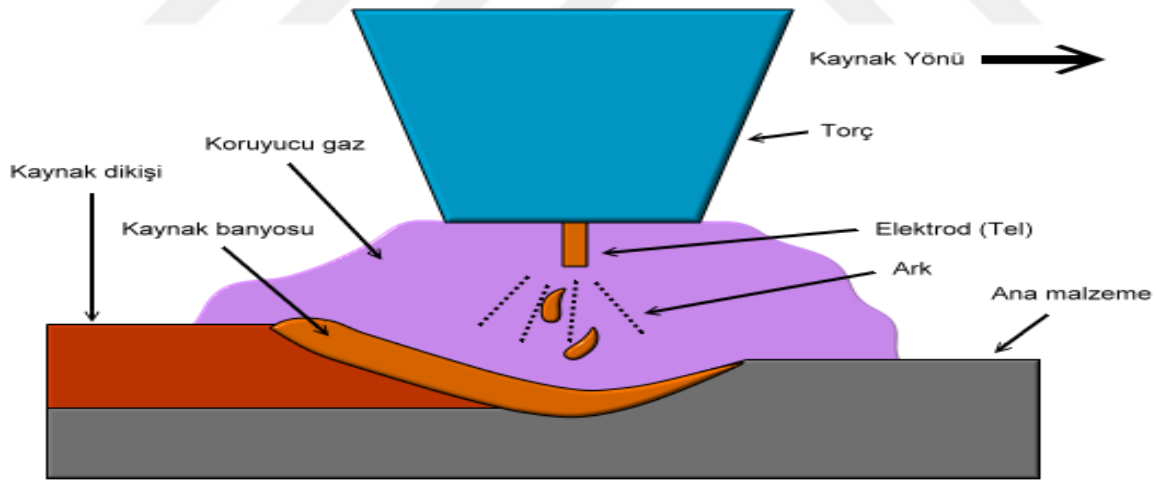
Resim 2.13. Hibrit plazma ark kaynağı deney alışması

### 2.3.3. Gaz metal ark kaynağı (GMAK)

Metal koruyucu gaz kaynağı ergitme için gerekli ısı enerjisi, sürekli besleme yapılan eriyen tel ile kaynak banyosu arasında oluşan ark iletim yolu ile kaynak banyosunu doldurması

prensibi ile çalışır. Sonsuz ve eriyen tel elektrotla koruyucu gaz atmosferi altında gerçekleştirilen bir ark kaynağı yöntemidir. MIG ve MAG kaynağı olarak bilinmektedir.

Gaz metal ark kaynağı (GMAK) prosesi, birçok endüstriyel operasyonda önemli bir bileşendir. GMAK metal transfer modlarının kontrol edilmesine yönelik araştırmadır. Yüksek kaliteli kaynak prosedürleri için gereklidir. GMAK kaynak parametreleri, kaynak bağlantısının kalitesini, üretkenliğini ve maliyetini etkileyen en önemli faktörlerdir (Kim, Son, Kim, Kim ve Kim, 2003). GMAK, erimiş metali çevreleyen hava ile kimyasal reaksiyonları sınırlandırmak için argon (Ar), karbondioksit (CO<sub>2</sub>) veya bunların bir karışımını kullanır. Koruyucu gaz ayrıca elektrik akımının, iş parçası ve elektrot arasındaki ark içinde akması için bir ortam sağlar. Metalurjik çalışmalarda, koruyucu koşullar zayıfsa ark içerisinde hava akışının oluşması kaynak havuzuna veya damlacık kirliliğine yol açtığını göstermişlerdir. Havadaki O<sub>2</sub> ve N gibi istenmeyen elementler kaynak havuzu içerisine girerek ve sıvı metalin içerdiği alaşım elementlerine etki eder ve kaynak esnasında istenmeyen dikişlere, sıçramalara ve değişik mikroyapılara neden olur (Bitharas, McPherson, McGhie, Roy ve Moorea, 2017).



Resim 2.14. Gaz metal ark kaynak yönteminde ark bölgesi (Tülbentçi, 1990: 6)

Arkın etrafında bulunan ve atmosferden kaynak havuzunu koruyan hava ile soğumanın yerini alan gaz tabakası oluşan arkın dış yüzünü de soğutur. Kaynak esnasında oluşan arkın dış yüzeyindeki ısı düşer bu bölgedeki akım iplikçikleri yok olur buna karşın arkın iç bölgesindeki akım iplikçiklerinde bir artış olur. Kaynak birleştirme işlemini etkileyen en önemli faktör kaynak sırasında oluşan sıcaklığın dağılımı karşısında ana metalin gösterdiği davranış değişimidir (Karadeniz, Özserağ ve Yıldız, 2007).

GMAK kaynak parametreleri kaynak dikiş kalitesini, sürekliliğini ve maliyetini etkiler. Bu parametreler ark kaynağı akımı, ark voltajı, kaynak hızı, torç açısı, serbest tel uzunluğu, nozul mesafesi, kaynak pozisyonu ile yönünü ve son olarak gaz akış hızından oluşur (Karadeniz ve diğerleri, 2007). GMAK kaynak yönteminde, kaynak akımı arttığında penetrasyon derinliğinin arttığını, ancak gerilimin düşmesiyle penetrasyonun azaldığını ve en az değere ulaşana kadar, ark ilerleme hızının azaldığı zaman penetrasyonun arttığını gözlemlenmiştir (Sathiya ve Jaleel, 2010). GMAK kaynağında elektrot polaritesi, çap ve genişliğin, ark voltajının, kaynak akımının, hareket hızının ve kaynak birikim alanı üzerinden kaynak hızı ve akışı etkiler (Kim ve diğerleri, 2003; Ibrahim, Mohamat, Amir ve Ghalib, 2012).

Kaynak yöntemlerinde kaynak edilen malzeme bölgesinin erime ve solidüsüne yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılması gerekmektedir. Solidüs sıcaklığına yakın sıcaklığa çıkarılan malzemenin bu sıcaklıkta erimesi ve tekrar soğuma evrensinde metalde içyapı değişimleri meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklıkta ana metal, kaynak metali ve ortam atmosferi arasında gerçekleşen etkileşim sonucu kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmektedir (Türkkan, 2008).

Malzemelerin erime derecesine üstüne çıkarılarak yapılan tüm kaynak yöntemleri temel olarak bir döküm işlemini prensibini içerir. Birleştirilecek malzeme, elektrik arkı ve gaz alevinin oluşturduğu yüksek sıcaklıktan dolayı erir ve iki malzemenin birbiri içerisine sıvı halde karışmasını sağlar. Daha sonra soğuma ile birlikte katılaşmaya başlayan malzemede yeni mikroyapılar oluşmaktadır. Bu işlem esnasında, kaynak ile birleştirilen malzemelerin kaynak dikişine yakın bölgelerinde, malzeme ergime sıcaklığından oda sıcaklık ısısına ulaşana kadar geçen zamanda, değişik sıcaklıklardan etkilenen bölgeler oluşmaktadır. Kaynak bağlantı bölgesinin de bulunduğu ve kaynak sırasında oluşan ısıdan dolayı etkilenen (ITAB) bölgelerin tümü de kaynak bölgeleri olarak adlandırılmaktadır (Tülbentçi, 1990: 85).

#### GMAK donanım ve çalışma prensibi

GMAK yöntemi kullanarak yapılan birleştirme için gerekli olan ısı enerjisi, iş parçası ve eriyen tel elektrot arasında oluşan elektrik arkı ile sağlanmaktadır. Elektrik arkı ile gerçekleşen ergime olayları karmaşık bir sistematik ve arkin etkisi ile oluşan fiziksel yapılar



durumdan çıkmıştır ve iyon haline geçmektedir, pozitif yüklenmiştir bu yükten dolayı hızlı bir şekilde katoda (eksi kutup) doğru gider ve gittiği bölgenin ısınmasına neden olur ortaya çıkan ısı enerjisi ergime ve sonrası buharlaşma sürecinin sürekliliğini sağlar (Tülbentçi, 1990: 50).

Elektron ve iyonların elektrik alanı içerisinde gerçekleşen hareketleri bir ark sütunu oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan bu ark sütununa plazma adı verilir. Burada var olan iyonların çok az kısmı ise kullanılan koruyucu gazdan gelmektedir ve metal atomları içermektedir. Koruyucu gaz atomlarının bu iyonlaşma olayında aktif olmamalarına rağmen, koruyucu gaz türü ve bileşim oranlarının, kaynak dikişinin biçimine ve ark içinde kaynak metalinin taşınabilmesi etki eder (Tülbentçi, 1990: 51).

Kaynak yönteminde kullanılan elektrotlar tel halinde makaraya sarılmış olarak kaynak makinasına takılmaktadır. Telin üretim aşamasında, ilave alaşımları ve soğutma evrelerinde istenilen yapıda olması telin seçiminde ana malzeme mekanik ve kimyasal özellikleri göz önüne alınarak karar verilmektedir. Malzeme bilimindeki gelişmeler, alaşımla ve kaplama tekniklerinin, kaynak metalinin mekanik dayanım değerlerini yükseltmek, kimyasal birleşim yapılarını geliştirmek amacıyla çeliklerin kaynağında kullanılmak üzere özlü veya kenetli elektrot olarak adlandırılan özel elektrotlar geliştirilmiştir. Bunlar yumuşak çelik yapıdan ince bir şeridin, dekapan ve ferroaliyaj kullanılarak kıvrılıp tel formuna getirilerek üretilmiştir. Tel olarak yalnız üretilebilmesi zor olan, farklı alaşımdaki bileşikler dahi kolaylıkla elektrot haline getirilebilmekte ve daha geniş kullanım alanları olacak spektrumlarda elektrot üretimi gerçekleştirilebilmektedir (Tülbentçi, 1990: 192).

#### **2.3.4. Soğuk metal transfer kaynağı (CMT)**

Soğuk metal transfer kaynağı, düşük ısı girdisi ile malzemelerin birleştirilmesini sağlayan gaz altı kaynak yöntemidir. Proses uygulaması, çok düşük ısılarda malzemeyi birleştirme esnasında oluşan ITAB bölgesinin en az hasarlanması üzerine yapılan bir çalışmadır. Özellikle düşük erime derecesine sahip malzemelerin (Al, Al-Çelik vs.) birleştirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. 1991 yılında çelikle alüminyuma birleştirilmeye yönelik ilk gelişme, CMT sürecine arka plan çalışmasına başlamıştır. Geleneksel gaz metal arkında standart olan, sadece beslenmenin aksine telin çekilerek beslenmesidir (Eder, 2010).



Resim 2.16. Soğuk metal transfer kaynak makinesi (Ünal, 2016)

Daha kolay kaynak yapmak ve daha iyi kaynak yapısı oluşturmak için bu üreticiye rekabet avantajı sağlamaktadır. Soğuk Metal Transfer (CMT) kaynağı üreticinin daha düşük ısı girdisi sağladığını iddia ettiği bir yöntemdir (Magowan, 2017).

CMT yöntemi uygulamasının sağladığı avantaj ise bazı kaynak yöntemlerinin sürekli ısı girdisi ile oluşan çarpılma, sıçırantı ve kaynak yüzey sorunlarını en aza indirdiği bir yöntemdir. MIG/MAG kaynak yöntemi ile karşılaştırıldığında yöntem soğuk bir birleştirme yöntemi olarak bilinir (Ünal, 2016).

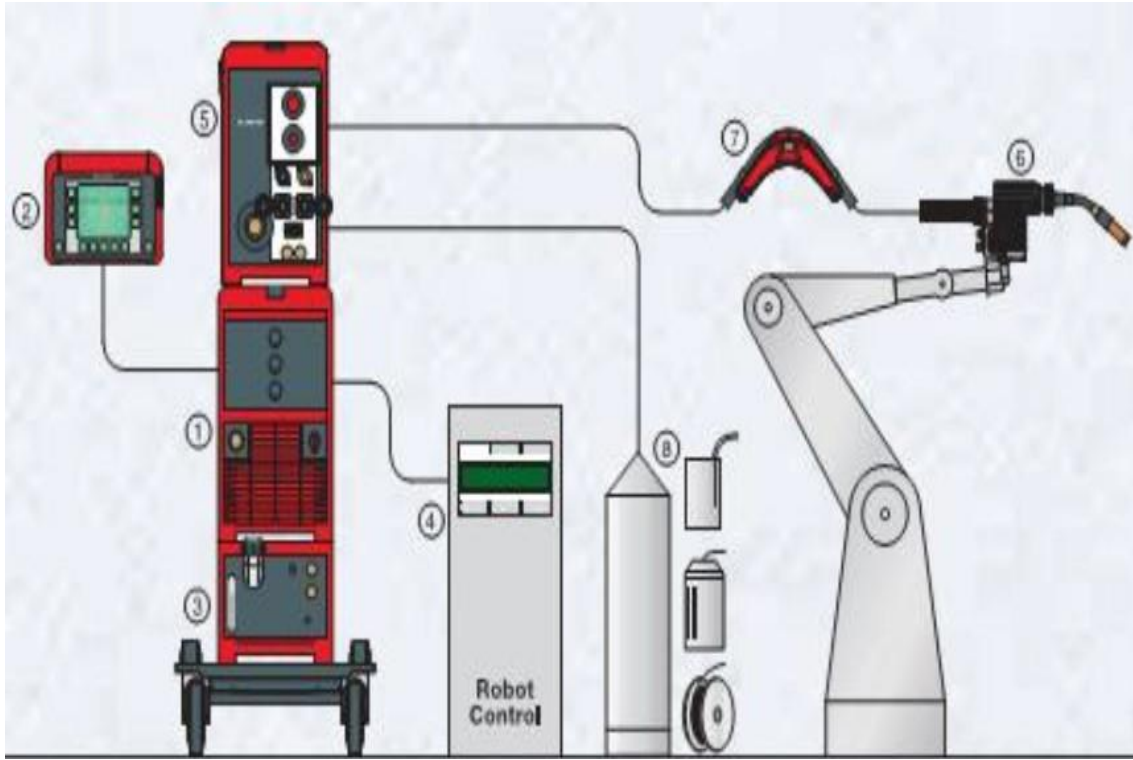
#### CMT donanım ve çalışma prensibi

CMT yöntemi ısı girdisinin çok düşük olduğu bir gaz altı kaynak yöntemi olarak tanımlanabilir. CMT kaynağı ile enerji girdisi %30 oranında azaltılmıştır. Bu da kaynakta düşük çarpılma ve yüksek hassasiyet kazandırır. Geleneksel yöntemlerde tel, kısa devre



oluşturuncaya kadar ileri yönde hareket ettirilir, bu esnada kaynak akımı yükselir ve ark oluşturulabilmesi için kısa devrenin tekrar açık devre olmasını sağlar.

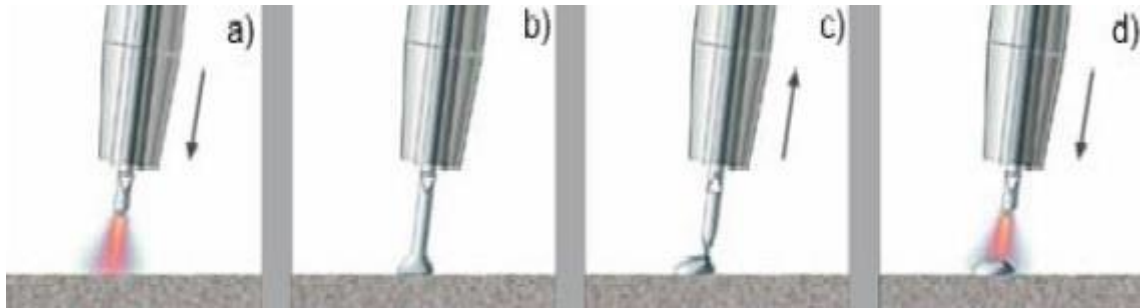
CMT yönteminde ise, ergiyen elektrot damlacıklarının elektrottan ayrılma metodu üzerine geliştirilmiş yeni bir kaynak teknolojidir. Bu yöntemde 70 hertzlik osilasyon sistemi kullanılarak tel beslemesi gerçekleşir ve iş parçasına doğru dolgu teli itilir ve geri çekilirken bir dizi sıcak-soğuk-sıcak-soğuk çevrim oluşması sağlanır. Bu hareket sayesinde geleneksel yöntemlerde daha yüksek akım çekilmesi ve sürekli tel besleme sonucu oluşan yüksek ısı girdisi ve sıçrıntı CMT yönteminde elimine edilmiştir (Ünal, 2016).



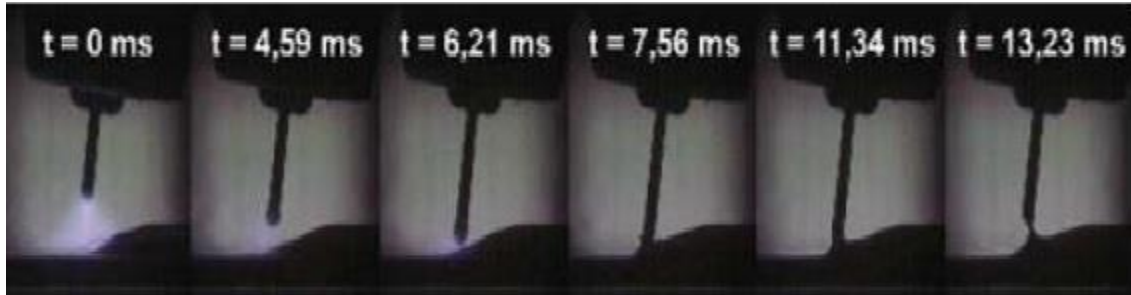
Resim 2.17. Robotik ve manuel uygulamalarda CMT sistem konfigürasyonu (Ünal, 2016)

- 1) TPS 3200/4000/5000 CMT güç kaynağı.
- 2) RCU 5000 uzaktan kumanda ünitesi.
- 3) FK 4000 soğutma ünitesi.
- 4) Robot ara yüzü.
- 5) VR 7000 CMT tel besleyici.
- 6) Robot.
- 7) Tel tamponu.
- 8) Tel desteği.
- 9) TransPuls sinerjik 2700 CMT güç kaynağı.
- 10) Su soğutmalı CMT uygulaması için geliştirilmiş torç.

CMT yöntemi geleneksel MIG/MAG kaynağına göre daha kararlı ark sağlar ve eksiksiz proses regülasyonu sunar. Sıcak ve soğğun sürekli değişimi prensibi ile uygulanan bu teknikte ark yanma fazına geçtiğinde dolgu malzemesi kaynak banyosuna hareket ettirilir (Resim 2.18a, sıcak yöntem). İlave dolgu malzemesinin kaynak banyosuna daldırılması ile ark sönümlenir ve kaynak akım değeri azalır (Resim 2.18b, soğuk yöntem). Telin saniyenin doksanda biri süresinde geriye doğru hareket etmesi, bununda kısa devre süreci olması damlacık transferine yardımcı olur. (Resim 2.18c, soğuk yöntem). Telin hareket ettiği yön tersine çevrilerek ve yöneme yeniden başlanmaktadır (Resim 2.18d, sıcak yöntem). Resim 2.19’de ise yöntemin akışı milisaniye zaman diliminde görölmektedir (Ünal, 2016).



Resim 2.18. Soğuk metal kaynak yöntemi aşamaları (a-d) (Ünal, 2016)



Resim 2.19. Soğuk metal kaynak yönteminin milisaniye zaman diliminde akışı (Eder, 2010)

Geleneksel MIG/MAG yöntemi ile CMT yöntemini birbirinden ayıran üç temel özellik vardır. Bunlardan ilki, entegre tel hareketidir yani tel beslemesi doğrudan kaynak yönteminin içindedir. Dijital proses regülasyon sistemi bir kısa devre oluşumunu algılayarak ve teli saniyede 90 defaya kadar geri çeker damlacık transferi oluşmasına sağlar. Geleneksel yöntemlerde tel besleme hızı sabittir ya da önceden belirlenen zaman cetveline göre değişmektedir. CMT yönteminde telin beslenme hızı ve yönü kısa devrenin oluşumu ve açık hale gelmesi ile kontrol edilir. Tel hareketi için önceden ayarlanmış bir zaman



çizelgesi bulunmamaktadır. Bu yöntemde tel hareketi ile kaynak havuzu arasında doğrudan bir etkileşim olduğu görülmektedir. Bundan dolayı tel hareketi tam olarak kısa devrenin oluşumuna bağlı olduğu için telin ortalama osilasyon frekansı üzerinde durulmaktadır. Yaklaşık olarak bu değer 70 Hertz civarındadır (Ünal, 2016).

CMT yönteminin ikinci karakteristik özelliği ise, metal transferinin akımdan bağımsız olmasıdır geleneksel yöntemlerinde ise bu transfer akım gücü ile sağlanır. CMT yönteminde akımın kısa devreyi açık hale getirmekle herhangi bir ilgisi bulunmamaktadır. Metal transferinin oluşması telin geri çekilmesi ve kaynak banyosunun yüzey gerilim ile gerçekleşir. Bundan dolayı kısa devre akım değeri çok düşük tutularak metal geçecek olan ısı girdisinin çok düşük seviyede etki etmesi sağlanmış olur. Son olarak tel hareketi ile metal transferinin gerçekleşmesi sonucunda CMT yönteminin karakteristik yapısı oluşturulmuş olur (Ünal, 2016).

Ark boylarının algılanabilmesi ve ayarlanma süreci mekanik olarak gerçekleştiğinden ark, sürekli karalıdır. CMT uygulaması her pozisyonda uygulanabilir. Telin geri besleme sonucu kısa devre esansında damlacık transferi gerçekleşir. Oluşan kısa devre kontrollü ve düşük akımdadır. Metal transferi soğuk ve çapaksız olarak gerçekleşir (Rosado, Almeida, Pires, Miranda ve Quintino, 2008).

#### **2.4. Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti**

Homojen yapıya sahip zırh malzemesinin, balistik olarak delinme ve delicinin ilerleme dayanıma karşı tüm malzemede eşit direnci sağlayabilmesi için yüksek mukavemet ve sertliğe sahip olması gerekmektedir. Zırhların tasarım ve kullanılabilirliği açısından farklı yapı ve geometrilerin birbirleri ile birleştirilmesi gerekmektedir. Zırh çelikleri kullanılarak yapılacak birleştirme işlemlerindeki farklı geometrideki tasarımlarda, malzemenin en önemli noktası olan ve zırhın koruma alanını kritik olarak etkileyen birleştirme bölgeleridir. Uygulanan birleştirme tekniğinin koruma düzeyini test etmek için balistik dayanım değerleri ölçülmektedir. Bu birleştirme tekniklerinin başında kaynak yöntemleri gelmektedir. Kaynak işlemi sonrasında kaynaklı bölgenin balistik özelliklerinin ana malzemeye mümkün mertebe yakın veya daha iyi olması istenir. Bu durum ise malzemenin kaynak kabiliyeti ile açıklanır.

Kaynak edilebilme kabiliyeti için, metal ve alaşımları birleştirme uygulamalarında istisna bazı yöntemler hariç bütün kaynak usullerinde kaynak bölgesi ergime sıcaklığına kadar ısıtılmalıdır. Yüksek sıcaklıklarda malzemelerin ısıtılma sebebiyle kaynak bölgelerinde ve kaynağa komşu bölgede (ITAB), metalurjik ve mekanik özelliklerde değişimler gözlemlenmektedir. Genel ve bazı özel malzemelerin kaynakla birleştirilmesi için hiçbir zorluk olmamasına rağmen, sorunsuz güvenli bir kaynak kalitesinin elde edilebilmesi için kaynak tekniğinin ve özel prosedürlerin uygulanması gereklidir (Kaynak yöntemi, uygun parametre değeri, ilave tel, koruyucu gaz türü vb.). Bu durumlar malzemenin kaynak kabiliyeti için oluşturulması gereken şartlar olarak belirlenmektedir (Anık, 1991: 18, 19).

Zırh çeliklerinin birleştirilme kaynağında ise üretici firmaların deneysel olarak belirlediği ferritik ya da östenitik tel tercih edilmektedir. Kaynak malzemedeki deformasyonsal sorunlara yol açtığı için farklı yapıdaki teller farklı kaynak teknikleri ile uygulanarak en yüksek düzeyde balistik dayanımlara ulaşma çalışmaları sürdürülmektedir. Ferritik yapıda kaynak teli kullanılması durumunda ön tavlama işlemi gereklidir. Bu tavlama sıcaklığı ise plaka kalınlığına göre 75 – 200 °C arasında seçilmelidir. Ayrıca ferrit oranının kaynak bölgesinde artması sonucu sıcak çatlak riski oluşmaktadır. Östenitik yapıdaki kaynak teli kullanımı durumunda ise malzeme oda sıcaklığında kaynak edilmeli, parça kalınlığının 30 mm geçmesi durumunda ise malzeme 100 – 150 °C'lik ön tav işlemine tabi tutulmalıdır (Kara, 2012).

Öte yandan kaynaklı bölgenin mekanik özelliklerin yüksek olması istenir. Çünkü ana malzeme mekanik özelliklerinin kaynak sırasında oluşan sıcaklık değişimlerinden etkilenmemesi zırh çeliğinin yüksek balistik performansı sergilemesini sağlar. Bundan dolayı kaynak işlemi sonucunda tane yapısının en az etkilenmesi ile ana malzemeye yakın mekanik özellikler elde edilmiş olur. Ergitmeli kaynaklarda kaynak işlemi sırasındaki ısıdan etkilenen ana malzeme ile kaynak metali arasında oluşan ve literatürde “ısı tesiri altında kalan bölge” (ITAB) olarak adlandırılan bir bölge oluşur (Lisiecki, 2013; Janicki, 2013; Grajcar, Rózanski, Kaminska ve Grzegorzcyk, 2014; Köse ve Kaçar, 2016).

Bu bölgede kaynak işlemi ile meydana gelen bazı alaşım elementlerini yanması, koruyucu gazdaki safsızlıklar, kullanılan ilave tel kimyasal bileşiminin ana malzeme ile birebir olamaması vb. etkenler malzemenin mekanik özellikleri önemli ölçüde düşmesine yol açar.

Bu da malzemenin mekanik özelliklerinin belirtilen standarttan daha düşük olmasına neden olmaktadır.

Zırh çelikleri için en önemli konulardan biriside hafif veya ağır taşıtlarda koruma bölgelerini oluştururken bu bölgelerin hem manevra kabiliyeti için hafif olarak tasarlanması hem de kaynaklı bölgelerinin yorulma direncinin yüksek olması gerekmektedir. Bunun için bölgelerin sertlik yapılarında değişimler göz önünde bulundurulur. Yüksek sertlikteki zırh çeliklerinde ( $HB > 500$ ) gerilmeli korozyon davranışı gözlemlenebilir. Gerinimli bölgelerin korozif ortama maruz kalması ile birlikte korozyon sorunu başlayarak bölgenin hasarlanması ve yüksek mukavemet özelliklerini kaybetmesine yol açabilir (Kara, 2012).

Bundan dolayı kaynak işlemi esnasında malzemede meydana gelecek sertlik artışlarından kaçınılmalıdır. Farklı kaynak yöntemleri ve/veya ilave teller ile farklı mikroyapı ve mekanik özellikler elde edilmektedir (Maweja ve Stumpf, 2006; Kılıç ve diğerleri, 2014). Kaynak işleminden kaynaklanan heterojenite sebebi ile ana malzeme, kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölge (ITAB) birbirinden ayrı mekanik özellikler sergilemektedir. Bu durum da dinamik gerilme-zorlama durumlarında kaynak bölgelerinin hasarlanmasına yol açmaktadır (Radaj, Sonsinob ve Fladeb, 1998).

Zırh çelikleri, balistik deliciler ve patlamalar gibi birçok tehdide karşı dayanım gösterirler. Aynı zamanda yapısal olarak bütünlük ve manevra kabiliyetleri için ağırlık olarak istenilen özellikte olmalıdır (Falkenreck, Kromm ve Böllinghaus, 2017). Yeni zırh malzemesi ve tasarımları geliştirmeye yönelik araştırmalar sürmektedir (Schuldies ve Nageswaran, 2010; Yue, Feng ve Lippold, 2013), fakat yüksek mukavemetli zırh çeliği hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Çeliklerin özellikleri, düşük karbon içeriği ve alaşımlama katkıları ile iyileştirilebilir. Normal kaynaklanabilir çelik ile zırh çeliği kaynak özellikleri karşılaştırılabilir ve iyi bir kaynak edilebilirlik oluşturulabilir (Czyryca, 1993). Kaynak işlemi esnasında, dönüşüm sıcaklığını aşan sıcaklıklar nedeniyle tasarlanan mikroyapıyı ve mekanik özelliklerde farklılıklar görülebilmektedir. Matris fazları östenit haline dönüşür ve ısıtma sırasında çökelir ve/veya çözülür (Liu, 1992).

Kaynak sonrası çoğu söndürülmüş ve temperlenmiş zırh çelikleri, büyük sertleşme ve yumuşatma ile homojen olmayan ısıdan etkilenen bölgeyi (ITAB) oluşturur (Hanhold, Babu ve Cola, 2013). Yumuşatılmış bölgede düşük sünme ve yorulma özellikleri ile birlikte düşük

balistik performans görülmektedir (Reddy ve Mohandas, 1996). Patlama sırasında yumuşatılmış bölgenin balistik davranış üzerindeki etkisi nihayet açıklığa kavuşturulmamıştır, ancak performansı değiştirmektedir. Düşük karbon içeriği veya ısı girdisi gibi yumuşatmayı önlemek için olası çözümler, zırh çelikleri için geçerli olmayabilir (Hanhold ve diğerleri, 2013). Kaynaklı bağlantı tüm yapının mukavemetini belirleyici etkiye sahiptir. Kaynak bölgesi çeşitli yüklemeler karşısında yorumla davranışı sergilerler ve bu bölgelerde yorulma hataları gözlemlenir. Bundan dolayı kaynak, bileştirilen malzemelerin yorulma ömrünü azaltmada önemli bir faktördür (Teng, Fung ve Chang, 2003).

Kaynakların başarısızlık analizinde, yorulma hasarları en önemli faktör olarak göstermiştir. Kaynak metalinin yorulma özellikleri iyi olsa da, kaynakların fazlalığı, cüruf içermesi ve eksik nüfuziyetin neden olduğu bölgelerde ani bir değişiklik olduğunda ve kaynaklı eklemlerde yorulma çatlamaşının neredeyse kaynak bölgesinin % 70'inde sorunlar meydana gelebilir (Taylor, Barrett ve Lucano, 2002). Geometrik tasarım, kaynak işlemi, dolgu malzemesi, ısı girdisi, mekanik kaynak geçişleri vs., kaynak bölgesinde mikroyapı ve mekanik özellikleri etkiler. Bu etkileşim ısıdan etkilenen bölgede (ITAB) ve ana malzemede kalıntı gerilmeler oluşturmaktadır (Magudeeswaran, Balasubramanian ve Reddy, 2014).

Kaynak metali kimyasal bileşiminin heterojenliğinin, özellikle kalın kesitlerin çok pasolu kaynaklarda, esas olarak daha sonraki kaynak geçişlerinin termal döngüler üzerindeki tekrarlayan etkisinden dolayı ana metalden metalurjik ve mekanik olarak farklı kaynak bağlantısı özellikleri sergilediği gözlemlenmiştir. Kaynak derzlerinin mekanik özelliklerinde en önemli değişiklikler, kalıntı gerilmeler, mikroyapı farklılıkları ve korozyon direnci vb. olumsuz gelişmelerden kaynaklanır (Devakumaran, Ananthapadmanaban ve Ghosh, 2015).

Yüksek sertlikteki zırh çeliği kaynağında, ısıdan etkilenen bölge sertlik düşüşünü ve hidrojen etkisi ile oluşacak soğuk çatlamaşmayı önlemek için kaynak yöntem seçimi ve uygulanacak prosedürler konusunda hassas olunmalıdır (Cabrilo, Geric, Jovanovic ve Vukic, 2018). Malzeme sertliği, kaynak bölgesinde oluşan sıcaklık değişimleri durumuna bağlıdır. Isıdan etkilenen bölgedeki (ITAB) yumuşama miktarını kontrol etmenin anahtarı, kaynak alanına yakın bir yüksek tepe sıcaklık derecesinde muhafaza etmektir (Madhusudhan ve Mohandas, 1996). Isıdan etkilenen bölgenin mikroyapısı kaynak işleminin ve ilave telin kimyasal bileşimi ve kaynak yönteminden sonrası soğutma hızının bir fonksiyonudur. Isıdan

etkilenen bölgenin (ITAB) mikroyapısı, sertlik değerlerini ve kaynak bağlantılarının balistik performansını etkilemektedir (Kuzmikova, 2013).

Östenitik çelik dolgu malzemeleri ve düşük hidrojenli ferritik dolgu malzemeleri gibi kullanılan uygun dolgu malzemelerinden ötürü, kaynak malzemesinin mekanik özellikleri özellikle sertlik, ana metal ile karşılaştırıldığında sertliğin düştüğü görülmektedir. Yüksek sertlik bölgelerinde balistik performansın daha iyi olduğu bilinmektedir (Fei ve diğerleri, 2018). Kaynak metali bölgesinde sertliğin artması için, bir ya da daha fazla karbür ya da tungsten karbürden yapılmış sert bir ara tabakanın, östenitik veya ferritik telden kaynak metalinin kökünden geçişini ve çökelmelerin sağlandığı sertleştirme tekniği geliştirilmektedir (Pramanick ve diğerleri, 2016).

## **2.5. Materyal**

Bu çalışmada, savunma ve güvenlik amaçlı kullanılan zırh malzemeleri sınıfından, Zırh çeliği ARMOX 500T deneylerde kullanılmak üzere SSAB firması Türkiye distribütöründen temin edilmiştir. Bu sac levhalar 250x95x4 mm boyutlarında olacak şekilde plazma ile kesilmiş plazma kesimi sonucu ısıdan etkilenen bölgelerin kaldırılması amacı ile satıh taşlama tezgâhında taşlama işlemleri gerçekleştirilmiş ve CMT yöntemi için V kaynak ağzı açılarak deneylere hazır hale getirilmiştir. Resim 2.20'de gösterilen ARL (Applied research laboratories) marka spektral analiz cihazında sonucu elde edilen kimyasal kompozisyon değerleri Çizelge 2.1.'de, firma tarafından katalogunda verilen mekanik özellikleri ise Çizelge 2.2.'de verilmiştir.



Resim 2.20. ARL spektral analiz cihazı

Çizelge 2.1. ARMOX 500T zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Alaşım elementleri	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	B
Spektral Analiz Sonuçları (%)	0,28	0,27	0,86	0,005	0,001	0,49	0,90	0,357	0,053	0,0015

Çizelge 2.2. ARMOX 500T zırh çeliğinin mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	Sertlik Değeri (HB)	Darbe Dayanımı (Joule)	Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (%)
Değerler	480-540	25 (-40 °C)	1250	1450-1750	8

## 2.6. Kaynak Yöntemleri ve Kaynak Parametreleri

Bu çalışmada, kaynak yöntemlerinin ARMOX 500T çeliğinin mekanik özelliklerine etkisini incelemek amacı ile üç farklı kaynak yöntemi ile belirli parametrelerde kaynak işlemi uygulanmıştır. Uygulanan kaynak yöntemleri Hibrit plazma ark kaynağı (HPAK), Gaz metal ark kaynağı (GMAK) ve Soğuk metal transfer kaynağı (CMT) yöntemleridir.

Kaynak işlemi sırasında herhangi bir çarpılmaya meydan vermemek için hazır hale getirilen 250x95x4 mm boyutundaki parçalar sabitleyici kaynak aparatı ile sabitlenerek kaynak ünitelerine bağlanmıştır. Kaynak işlemleri sonrası kaynaklı malzemelerde herhangi bir çarpılma durumu gözlemlenmemiştir.



Resim 2.21. HPAK ve GMAK kaynağı plaka bağlama aparatı



Resim 2.22. CMT kaynağı plaka bağlama aparatı

Optimum kaynak parametrelerinin eldesi için tüm yöntemler için 16 adet numune üzerinde öncü çalışmalar yapılmıştır. Öncü çalışmalar sonucunda tez çalışmasında her bir kaynak yönteminde kullanılacak kaynak parametre değerleri kaynak yöntemlerine göre Çizelge 2.3-2.4-2.5.sırası ile verilmiştir.

Çizelge 2.3. Hibrit plazma ark kaynağı parametre değerleri

Yöntem	Plazma Arkı (A)	Kaynak Gerilimi (V)	Tel Sürme Hızı (m/dk)	Gaz Metal Arkı (A)	Kaynak Hızı (cm/dk)	Gaz Akış Debisi (lt/dk)	Gaz Karışımı (%)	Tel Elektrot Çapı (mm)	Nozul Meme Çapı (mm)
HPAK Parametre -1	170	29	10	300	80	15	% 5 CO <sub>2</sub> + % 95 Ar	1,2	3,2
HPAK Parametre -2	160	29,5	10,5	270	120	15	% 5 CO <sub>2</sub> + % 95 Ar	1,2	2,4

Çizelge 2.4. Gaz metal ark kaynağı parametre değerleri

Yöntem	Gaz Metal Arkı (A)	Kaynak Gerilimi (V)	Tel Sürme Hızı (m/dk)	-	Kaynak Hızı (cm/dk)	Gaz Akış Debisi (lt/dk)	Gaz Karışımı (%)	Tel Elektrot Çapı (mm)	Nozul Meme Çapı (mm)
GMAK	300	29	10	-	80	15	% 5 CO <sub>2</sub> + % 95 Ar	1,2	3,2

Çizelge 2.5. Soğuk metal transfer kaynağı parametre değerleri

Yöntem	Gaz Metal Arkı (A)	Kaynak Gerilimi (V)	Tel Sürme Hızı (m/dk)	-	Kaynak Hızı (cm/dk)	Gaz Akış Debisi (lt/dk)	Gaz Karışımı (%)	Tel Elektrot Çapı (mm)	Nozul Meme Çapı (mm)
CMT	223	14,2	10	-	40	15	% 2,5 CO <sub>2</sub> + %97,5 Ar	1,2	1,2

Kaynak işlemi esnasında kaynağın mekanik özelliklerine üzerinde önemli bir etkiye sahip olan tel seçimi literatür çalışmaları ve öncü deneyler sonucunda Çizelge 2.6-2.7’de kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri verilen Esab OK Autrod 16.95, Östenitik (% 18 Cr - % 8 Ni - % 7 Mn) ilave kaynak teli seçilmiştir. Endüstri genelinde östenitik, manganez, işlenebilen çeliklerin yanı sıra zırh ve ısıya dirençli çeliklerin birleştirilmesi gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılır (ESAB, 2018).

Çizelge 2.6. Esab OK Autrod 16.95 telin kimyasal analizi

Alaşım elementleri	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Standart analiz (max %)	0,08	0,9	7.0	-	-	18,7	8,1	0,20	0,10





Tahribatsız muayene yöntemi olarak EN ISO 17636-1:2013 Şekil 1 ve Şekil 8 film çekme tekniğine standartına göre radyografik test, mikroyapı analizi, Sem-EDS analizi uygulanmıştır. Tahribatlı muayene yöntem olarak ise sertlik testi, çekme testi, üç nokta eğme testi ve darbe çentik testi uygulanmıştır. Uygulanan test standartları; Sertlik testi, TS EN ISO 9015-1, Çekme testi, kaynaklı numuneler için TS EN ISO 6892-1, kaynaklı numuneler için TS EN ISO 4136 standartında göre yapılmıştır. Üç nokta eğme testi, TS EN ISO 5173 standartında uygun olarak yapılmıştır. Darbe çentik testi, TS EN ISO 148-1 standartında göre yapılmıştır.

### **2.7.1. Metalografik numune hazırlama ve inceleme işlemleri**

#### Radyografik muayene

Mekanik testler öncesinde kaynak bağlantılarında herhangi bir çatlak, gözenek, gaz boşluğu vb. kaynak hatalarının olup olmadığını kontrol etmek amacı ile 250x190x4 mm ebatlarındaki tüm kaynak numuneleri görsel ve radyografik muayene testlerine tabi tutulmuştur. Radyografik muayene X-ışınlarında; Işın kaynağı Ir-992, aktivite 35 Ci, poz süresi 1dakika, Penetrametre 10 FEEN, Film ışın kaynağı mesafesi 114-400 mm, odak boyutu 3x2,5 mm olarak uygulanmıştır. Kaynak geçerliliği alan numuneler daha sonra metalografik ve mekanik işlemlere tabi tutulmuştur.

#### Metalografik incelemeler

Bakalite alma işlemi Resim 2.24'de gösterilen Struers Citopress-30 marka cihazda sıcak bakalite alınmıştır. Resim 2.25'da gösterilen Struers Tegami-25 marka zımpara makinesinde 180-320-400-600-800-1000-1200-1500 mesh'lik SiC karbür zımparalar ile pürüzsüz yüzey elde etmek için zımparalanmış ardından 3µm'lik elmas pasta ile parlatılmıştır. Parlatma işlemi sonrası numuneler VIELLA (1gr Pikrik Asit + 5 ml HCl + 100 ml Etanol karışımı) dağlayıcı ile 5-7 sn. aralığında dağlanmıştır.



Resim 2.24. Struers Citopress-30 sıcak bakalite alma cihazı



Resim 2.25. Struers Tegrami-25 zımpara makinesi

Dağlanan numunelerin optik görüntüleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) görüntüleri ve analizleri incelenmiştir. Mikroyapı görüntüsü Resim 2.26'de gösterilen Nikon Epiphot 200 marka optik mikroskobu ile SEM-EDS sonuçları ise Resim 2.27'da Jeol Jsm-6510 (taramalı elektron mikroskobu) analiz cihazında alınmıştır.



Resim 2.26. Nikon Epiphot 200 optik mikroskop



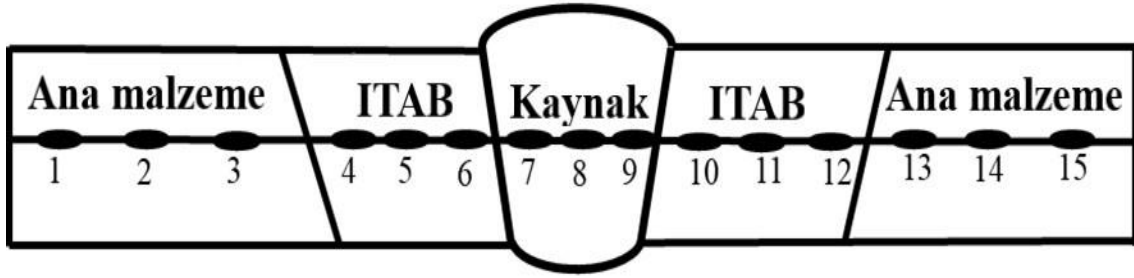
Resim 2.27. Jeol Jsm-6510 taramalı elektron mikroskobu

### 2.7.2. Uygulanan mekanik deneyler

3 farklı yöntem ile birleştirilen ArmoX 500T çeliğinin mekanik özelliklerini belirlemek için TS EN ISO standartlarında sertlik ölçme, çekme, üç nokta eğme ve darbe çentik deneyleri uygulanmıştır.

### Sertlik ölçme deneyi

Sertlik işlemi TS EN ISO 9015-1 deney standartlarına göre yapılmıştır.15 farklı noktadan yapılan mikro sertlik taraması Ana malzeme, haz bölgesi (ITAB) ve kaynak bölgesinden ölçülmüştür. Sertlik tarama bölgeleri Resim 2.28’de gösterilmiştir.



Resim 2.28. Sertlik tarama bölgeleri

Metalografik olarak hazırlanmış numunelerin sertlik ölçümü Özbal A.Ş’de bulunan Zwick Roell marka universal HV10, HRC ve HBW skalalarında ölçüm yapan mikro sertlik ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Laboratuvar ortam koşulları sıcaklık 23 °C, nem ise 39 g/m<sup>3</sup>’dür. Resim 2.29’da sertlik ölçümlerinin gerçekleştirildiği cihaz gösterilmiştir.



Resim 2.29. Zwick Roell sertlik ölçme cihazı

### Çekme deneyi

Ana malzeme çekme deneyi, TS EN ISO 6892-1 ve kaynaklı numuneler çekme deneyi, TS EN ISO 4136 standardına göre. Resim 2.30'da Özbal A.Ş'de laboratuvarında bulunan 1000 KN kapasiteli Alşa marka çekme testi cihazında laboratuvar koşulları sıcaklık 24 °C , nem ise 40 g/m<sup>3</sup> ortamda gerçekleştirildi.

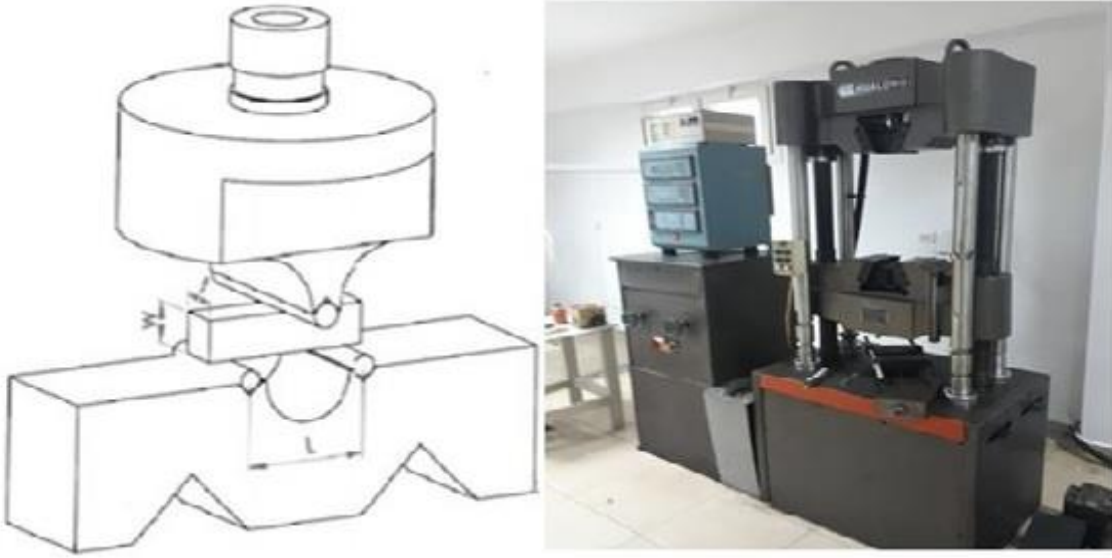


Resim 2.30. Alşa çekme cihazı

### Üç nokta eğme deneyi

Farklı kaynak işlemlerinin numunelerin şekillendirilebilirliğinin etkisini belirlenmesi amacı ile TS EN ISO 5173 Standartlarında göre hazırlanan numuneler Özbal A.Ş'de 20 ton kapasiteli Hualong marka eğme testi cihazında laboratuvar koşulları sıcaklık 24 °C, nem ise 40 g/m<sup>3</sup>'dir. Mandrel çapı 18 mm, mesnetler arası mesafe 29 mm olacak şekilde hazırlanan üç nokta eğme deneyi düzeneğinde eğme 180° açısı olarak yapılmıştır. Resim 2.31'de üç nokta eğme deneyi düzeneği ve cihazı gösterilmiştir.





Resim 2.31. Eğme şematığı ve Hualong eğme cihazı

### Darbe çentik deneyi

Darbe çentik deneyleri, ARMOX 500T malzemesinin çalışabileceği ortam koşulları göz önünde bulundurularak +20 ve – 50 °C sıcaklıklarda kaynak bölgesi ve ısı tesiri altında kalan bölgelerden TS EN ISO 148-1 standartlarına göre oluşturulan numuneler ile Özbal A.Ş Schütz Licht marka 300 joule kapasiteli cihazda gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortam koşulları sıcaklık 24 °C, nem ise 40 g/m<sup>3</sup>'dir. Resim 2.32'de darbe çentik deney cihazı gösterilmiştir.

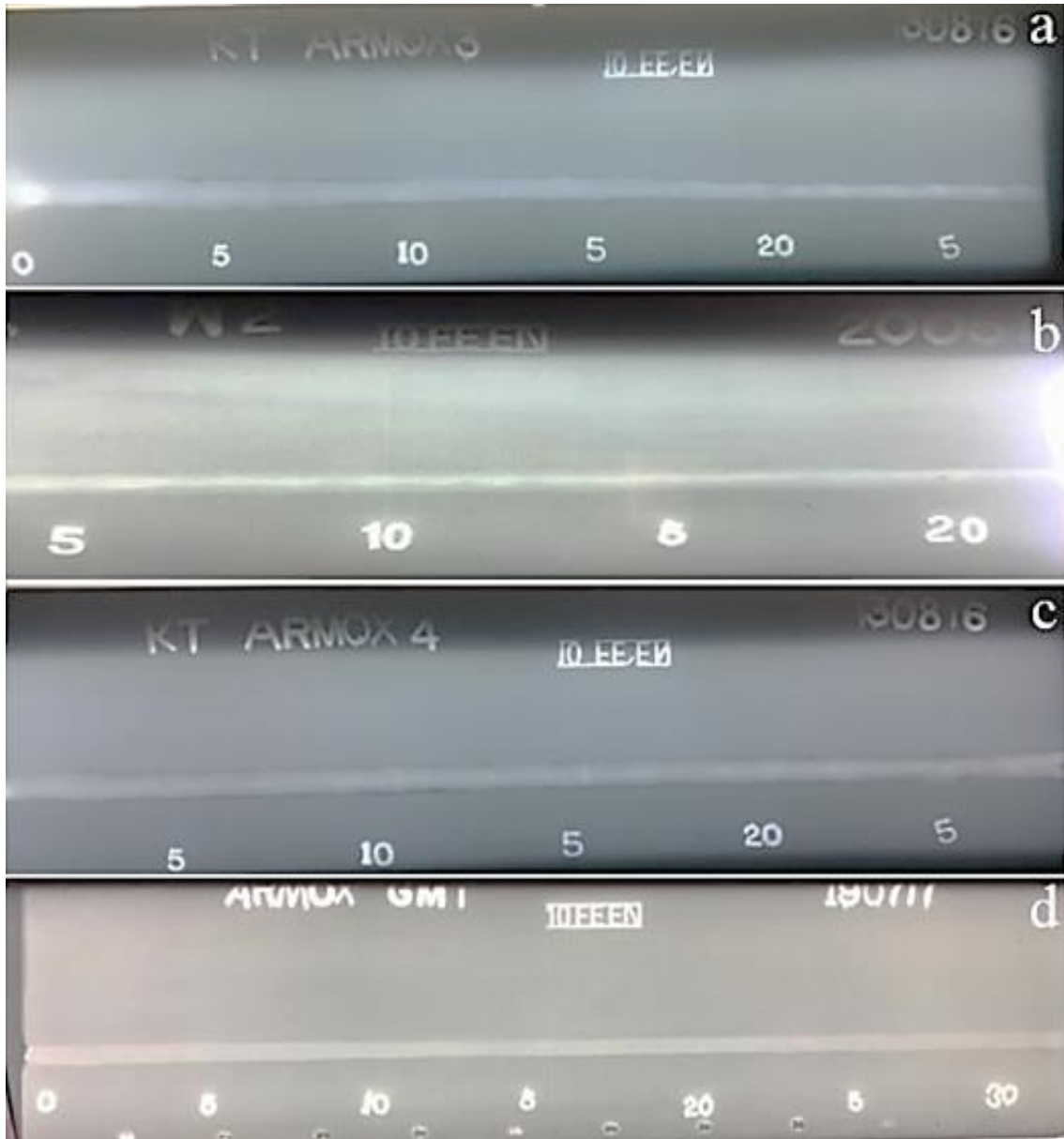


Resim 2.32. Schütz Licht darbe cihazı

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

#### 3.1. X-ışını Radyografik Muayene

Üç farklı kaynak yöntemi ile birleştirilen ARMOX 500T zırh çeliğini 250x190x4 mm ebatlarındaki tüm kaynak numuneleri görsel ve radyografik muayene testlerine tabi tutulmuş ve muayene sonucu elde edilen filmler Resim 3.1’de sunulmuştur.



Resim 3.1. Kaynaklı numunelerin X-ışını radyografik muayene sonuçları a)HPAK Parametre-1 b) HPAK Parametre-2 c) GMAK d) CMT



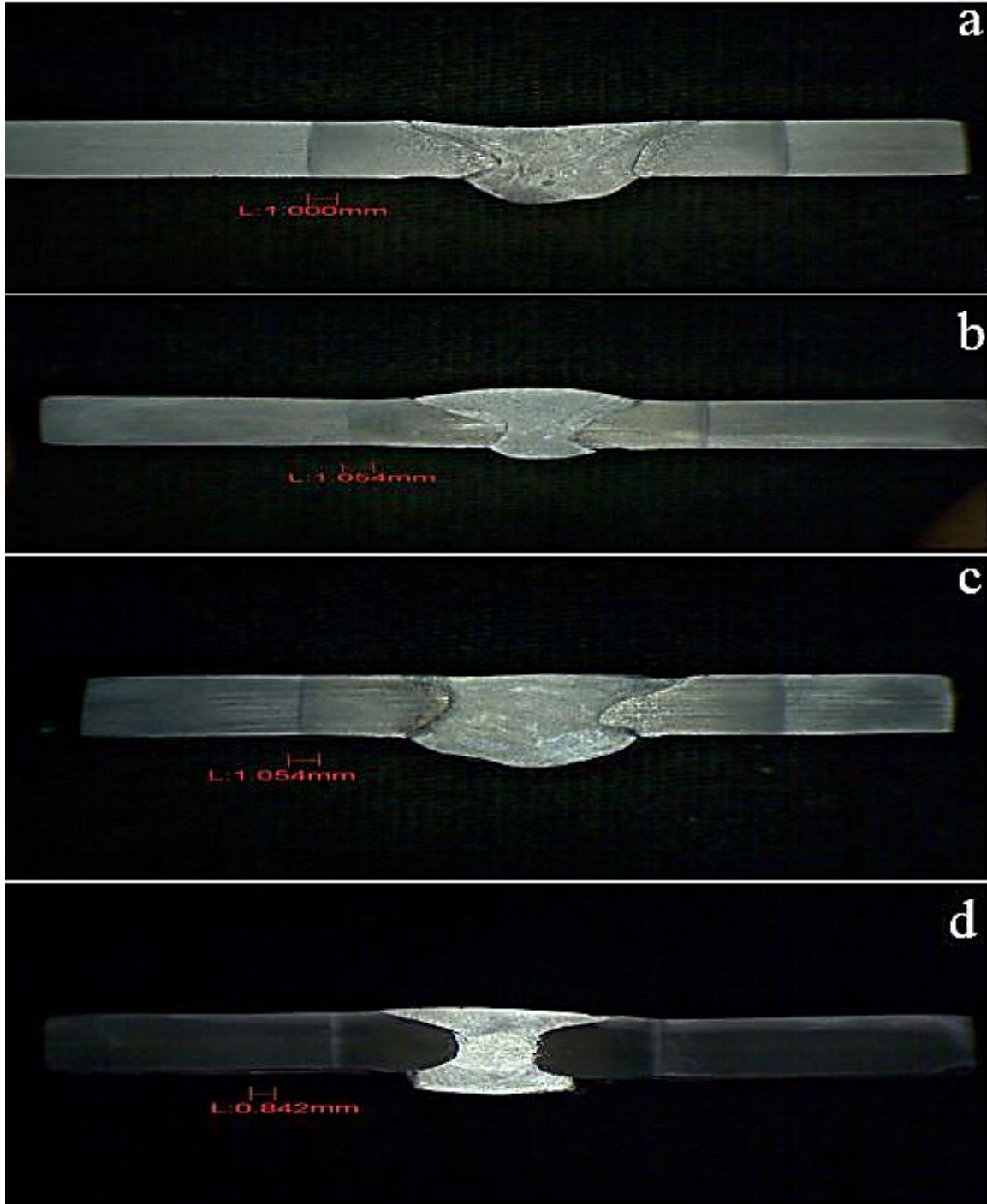
Radyografik muayene sonucunda kaynaklı bağlantılar kaynak hataları olarak adlandırılan çatlak, gözenek, gaz boşluğu vb. olumsuzluklar açısından test edilmiş olup akredite laboratuvar tarafından tüm kaynaklı numuneler geçerlilik almıştır. Bu olumsuzlukların gözlemlenmemiş olması kaynak işlemi öncesi yapılan öncü deneyler sonucunda optimum kaynak parametrelerinin elde edilmiş olmasının bir sonucudur.

### **3.2. Metalografik İncelemeler**

Üç farklı ark kaynak yöntemi ve çeşitli parametreler kullanılarak birleştirilen numunelerin ana malzeme, ITAB ve kaynak metali mikroyapılarını tespit etmek amacıyla optik mikroskop, SEM ve EDS analizleri sonucunda elde edilen veriler bu kısımda yorumlanmış ve tartışılmıştır. Kaynak birleştirme için gerekli olan ısı girdisi ile ergiyen ana malzeme ve telin soğuma sonrası oluşan ITAB bölgesi, tane yapıları, ilave telin kaynak edilmesi sonrası kaynak bölgesinde ve ana malzemede oluşan kimyasal elementler tespit edilmiştir. Bu incelemeleri makroyapı görünüm, optik mikroyapı görünüm ve taramalı elektron mikroskobu ile SEM-EDS (görünüm ve kimyasal) analizi yapılmıştır.

#### **3.2.1. Numunelerin makroyapı görünümü**

Üç farklı kaynak yöntemi ve parametreler kullanılarak kaynak edilen ve dağılan numunelerin 10X büyütme sonrası elde edilen makroyapı görüntümler Resimde 3.2'de görülmektedir.



Resim 3.2. Numunelerin makroyapı görünümü a) HPAK parametre-1 b) HPAK parametre-2 c) GMAK d) CMT

Resim 3.2’de görüldüğü üzere Hibrit plazma ark kaynağında meme nozul çapının azalması (Bkz. Çizelge 2.3) kaynak dikişinin daha dar olmasına ve kaynak görünümünün daha düzgün olmasını sağlamıştır (Resim a-b). En geniş kaynak dikişi GMAK yöntemi ile elde edilmiştir (Resim c). GMAK kaynak yönteminde 300 Amper akım ile kaynak işleminin gerçekleştirilmiş olmasının sonucudur (Bkz. Çizelge 2.4). CMT yöntemi ile ise diğer

yöntemlere göre ana malzeme ve kaynak metalinin birbiri içerisine daha az karıştığı için doğal olarak daha düzgün bir kaynak bölgesi görülmektedir (Bkz. Resim 3.6 ve 3.24). Bu durum tamamen kullanılan kaynak yöntemlerinin ısı girdileri ile doğrudan ilişkilidir. Isı girdisi yüksek olan kaynak yöntemlerinde daha yayvan ve ısı girdisi düşük olan CMT yönteminde daha toplu bir kaynak makro görünümü elde edilmiştir.

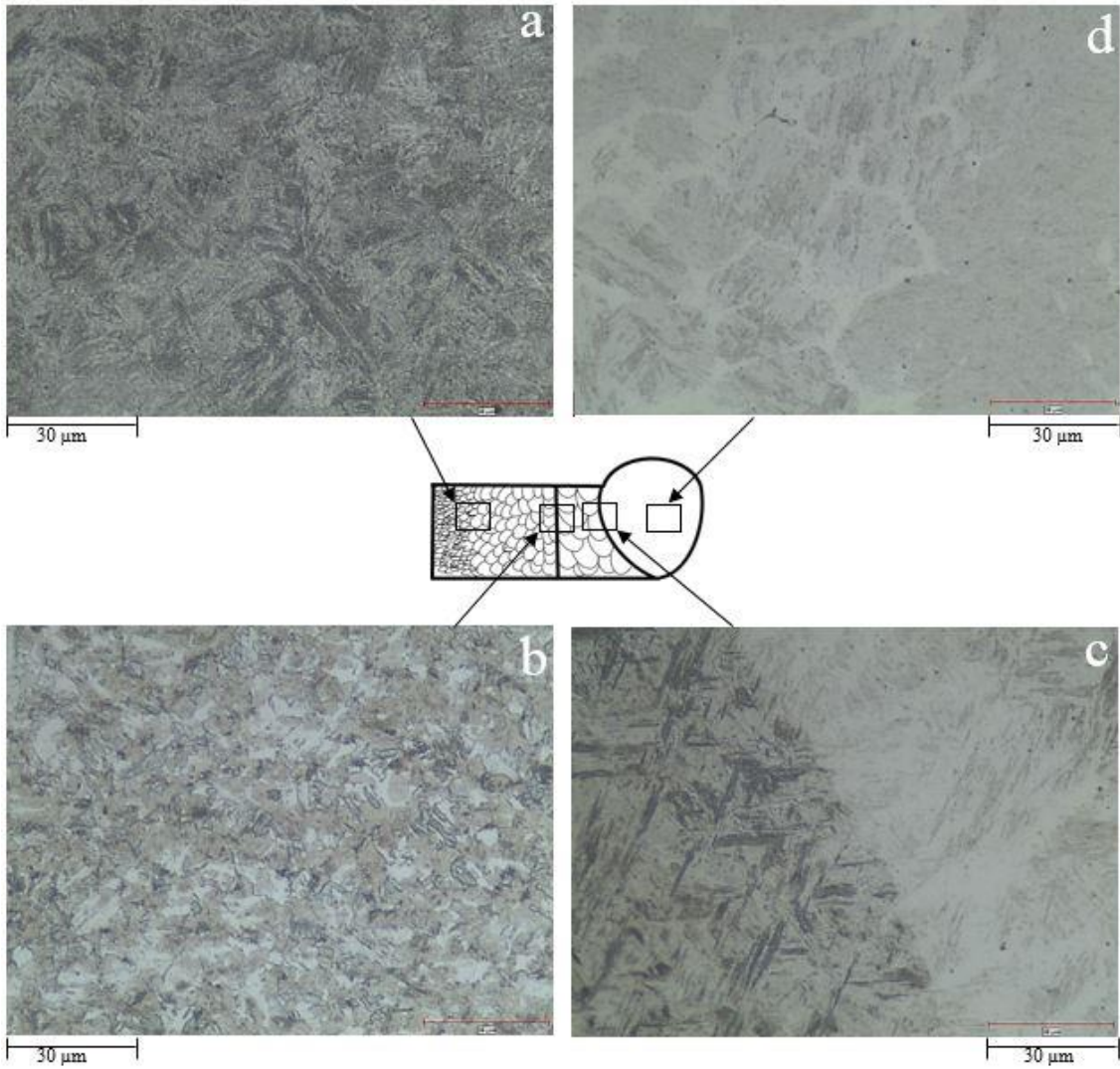
Bu durum literatürde kaynak işlemi esnasındaki ısı ve eriyen metalin akışı sıcaklık değişimlerine bağlı olarak değişimler göstermekte ve kaynak banyosundaki eriyen metalin akışı ve katılma sırasındaki ısı transferi ergimiş bölgenin nihai şeklini ve kaynak nüfuziyetini oluşturmaktadır şeklinde belirtilmiştir (Saxena ve diğerleri, 2018).

### **3.2.2. Optik mikroyapı analizi**

Üç farklı ark kaynak yöntemi ve bu yöntemlerden sadece HPAK yönteminde iki farklı parametre ile gerçekleştirilmiş olan kaynaklı birleştirmelerin optik mikroyapı analizlerinde ana malzeme, ITAB, geçiş bölgesi ve kaynak metali görünümlerine bakıldı. Kaynak bölgesi ve ana malzeme arasında sıcaklık değişimlerine bağlı olarak değişen mikroyapının karakteristiği üzerindeki değişimler incelenmiştir.

Kaynak sonrası malzeme numuneler Ana malzeme, Ana Malzeme+ITAB geçiş, ITAB+Kaynak geçiş bölgesi ve Kaynak bölgesi şeklinde dört bölgeye ayrılarak x500 büyütme optik mikroyapıları aşağıda verilmiştir. Sonuçlar, Resim 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6'de gösterilen sırasıyla, HPAK parametre-1, HPAK parametre-2, GMAK ve CMT kaynaklarına optik mikroyapı fotoğrafları olarak sıralanmıştır.

Resim 3.3'de, 170 A plazma arkı akım şiddeti, 300 A gaz metal arkı akım şiddeti, 80 cm/dak kaynak hızı ve 3,2 nozul çapı parametreleri kullanılarak HPAK yöntemiyle kaynak edilen numunelerin optik mikroyapı fotoğraflarını göstermektedir.

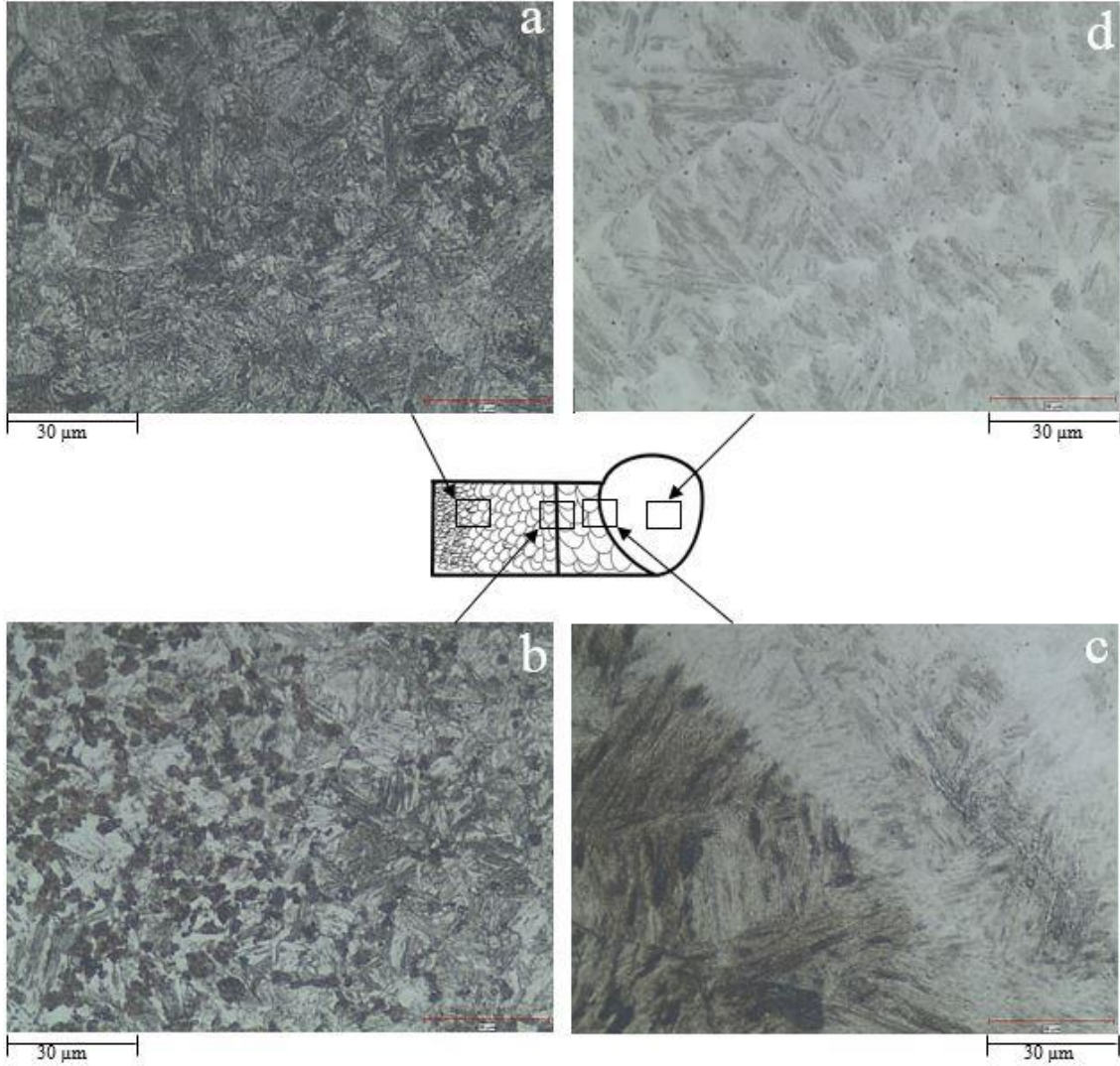


Resim 3.3. HPAK parametre-1 optik mikroyapı fotoğrafı a) Ana malzeme b) Ana malzeme-ITAB c) ITAB-Kaynak geçiş d) Kaynak bölgesi

ARMOX 500T zırh çeliğinin HPAK yöntemi parametre-1 ile birleştirilen numunelerin kaynak bölgesine ait mikroyapı görüntülerinde, Resim 3.3a'da görüldüğü üzere ITAB bölgesi dışında kalan ana malzeme mikroyapısı martenzit ve beynitten oluşmaktadır. Resim 3.3b'de Ana malzemeye yakın ITAB bölgesinin ferrit + perlit + kompleks (FeCr)<sub>3</sub>C karbür dağılımından oluştuğu görülmektedir. Kaynak metaline yakın olan ITAB bölgesi martenzit ve kalıntı ostenitten oluşmuş ve aynı zamanda tane büyümesine maruz kalmıştır (Resim 3.3c). Kaynak metalinin ITAB bölgesine yakın kısmında ana malzemenin kompozisyonundan karışımından kaynaklı martenzit + ostenitik bir yapı görülmektedir (Resim 3.3d).



Resim 3.4'de, 160 A plazma arkı akım şiddeti, 270 A gaz metal arkı akım şiddeti, 120 cm/dak kaynak hızı ve 2,4 nozul çapı parametreleri kullanılarak HPAK yöntemiyle kaynak edilen numunelerin optik mikroyapı fotoğraflarını göstermektedir.

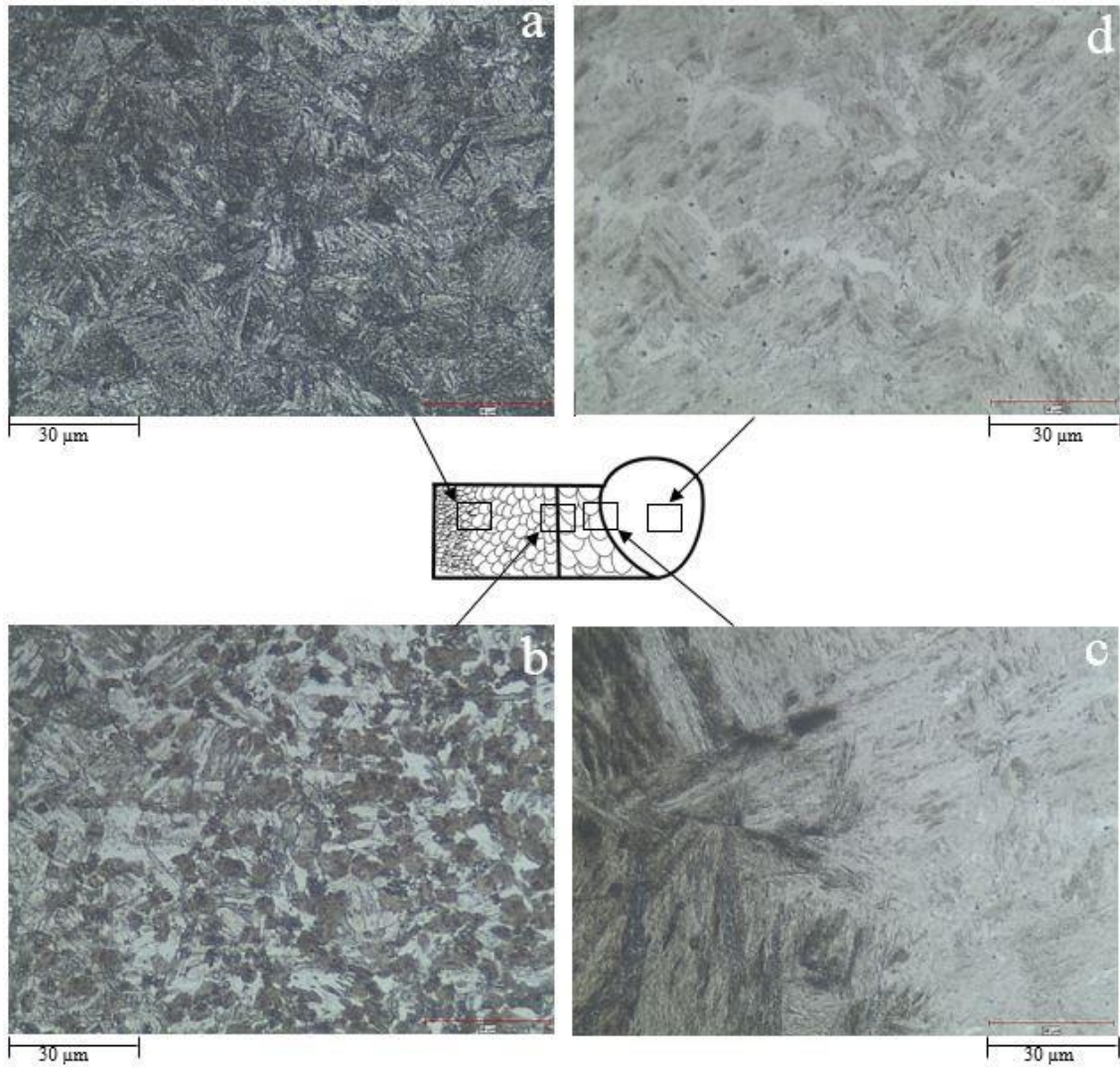


Resim 3.4. HPAK parametre-2 optik mikroyapı fotoğrafı a) Ana malzeme b) Ana malzeme-ITAB c) ITAB- Kaynak geçiş d) Kaynak bölgesi

ARMOX 500T zırh çeliğinin HPAK yöntemi parametre-2 ile birleştirilen numunelerin kaynak bölgesine ait mikroyapı görüntülerinde, Resim 3.4a'da Ana malzemenin martenzitik ve beynitik mikro yapıdan oluştuğu görülmektedir. Ana Malzeme+ITAB bölgesi mikro yapısının ise çoğunlukla martenzit yapıdan oluşmuş olmakla beraber yapı içerisinde siyah bölgeler ise kalıntı östenitten dönüşmüş olan karbürlü yapılar (Resim 3.4b). ITAB ve kaynak birleşim bölgesindeki mikro yapı görünümünde ise sınır bölgesinde ince bir tüylü beynitik yapının yanında karbür kalıntılarının oluşmuştur (Resim 3.4c). Kaynak bölgesi

ise tamamı karışık beynitik yapı ve çok az martenzitik yapıdan oluştuğu görülmektedir. Beynitik yapı içerisindeki kontrast farkı olarak gözükten kısımlar açık bölgeler üst koyu renkli bölgeler ise alt beynit yapılarıdır (Resim 3.4d).

Resim 3.5’de, 300 A gaz metal arkı akım şiddeti, 80 cm/dak kaynak hızı ve 3,2 nozul çapı parametreleri kullanılarak GMAK yöntemiyle kaynak edilen numunelerin optik mikroyapı fotoğraflarını göstermektedir.



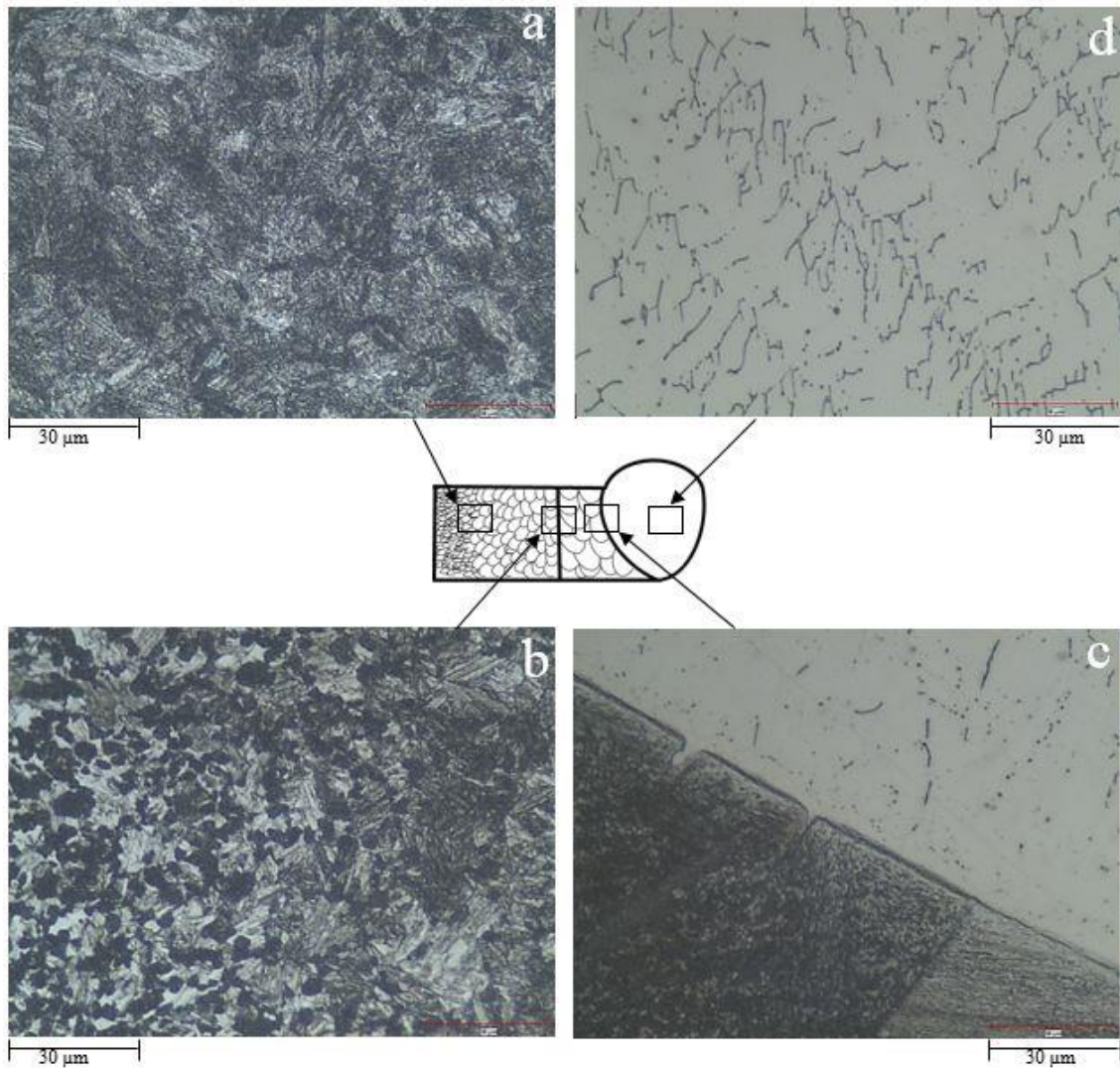
Resim 3.5. GMAK optik mikroyapı fotoğrafı a)Ana malzeme b)Ana malzeme-ITAB  
c)ITAB- Kaynak geçiş d) Kaynak bölgesi

ARMOX 500T zırh çeliğinin GMAK yöntemi ile birleştirilen numunelerin kaynak bölgesine ait mikroyapı görüntülerinde, Resim 3.5a’da ana malzeme bölgesinde beynitik ve martenzitik karakterli olmakla beraber açık bölgelerin temperleme işlemi sonucu karbon difüzyonu ile martenzit plakalarının ferrite kısmen dönüşümünün sonucu olduğu



düşünülmektedir. Ana Malzeme+ITAB bölgesi ise mikro yapısının ise çoğunlukla martenzit yapıdan oluşmuş olmakla beraber yapı içerisindeki siyah bölgeler ise ince perlitik bir yapı ile kalıntı östenitten dönüşmüş olan karbürlü yapı görünümündedir (Resim 3.5b). ITAB+ kaynak gölgesi ise martenzit ve tüylü beynit yapısından oluştuğu görülmektedir (Resim 3.5c). Resim 3.5d ise martenzitik, karışık beynit ve karbür (siyah bölgeler) karışımına sahip bir mikroyapı resmi görülmektedir. Buradaki ince karbürlü yapının GMAK kaynağı dolayısıyla hızlı soğuma neticesinde oluştuğu düşünülmektedir.

Resim 3.6'da, 223 A gaz metal arkı akım şiddeti, 40 cm/dak kaynak hızı ve 1,2 nozul çapı parametreleri kullanılarak CMT yöntemiyle kaynak edilen numunelerin optik mikroyapı fotoğraflarını göstermektedir.



Resim 3.6. CMT optik mikroyapı fotoğrafları a) Ana malzeme b) Ana malzeme-ITAB c) ITAB- Kaynak geçişi d) Kaynak bölgesi

ARMOX 500T zırh çeliğinin CMT kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin kaynak bölgesine ait mikroyapı görüntülerinde, Resim 3.6a Isıdan etkilenmeyen (ana metal) bölgenin beynitik ve martenzitik karakterli olduğu görülmektedir. Ancak önceki numunelere göre daha az miktarda ferritik veya dönüşmüş martenzitik bölgeler görülmektedir. Bu durum bu kısımlarda temperleme işleminden daha az etkilendiğini göstermektedir. Resim 3.6b' de ise Ana Malzeme + ITAB bölgesinde ise HPAK ve GMAK yöntemlerine göre siyah bölgelerin sayısında oldukça bir artış görülmektedir. Bu durum soğuk metal kaynak yönteminin karakteristiği olan düşük ısı girdisinden dolayı soğuma hızının ve buna bağlı olarak çekirdeklenme alanlarının artışına atfedilebilir. Bu bölge tane boyutu bakımından incelendiğinde ise HPAK ve GMAK ile elde edilen mikro yapılar göre soğuma hızının yüksek olmasından dolayı daha ince tanelerden ve iğnemsî bir mikro yapıdan oluştuğu görülmektedir. Yapı içerisindeki beyaz bölgeler temperlenmiş martenzit ve beynitik yapıları oluşturur iken siyah bölgeler ise C' ca zengin karbürü yapıları oluşturmaktadır. Resim 3.6c'de ise ITAB ve kaynak birleşim bölgesinin bölgesinde karbürün kafes yapısı dışına ve hatta plaka dışına itildiği beynitik yapı gibi görünmektedir. Ancak, muhtemeldir ki C' ca zengin siyah bölgeler ve çok ince dağılmış beyaz bölgeler beyniti işaret ediyor. ITAB ile kaynak metali arasında difüzyon bölgesinin çok zayıf hatta neredeyse hiç oluşmadığı görülmektedir. Bu durum çekme dayanımlarını da olumsuz etkilemiştir.

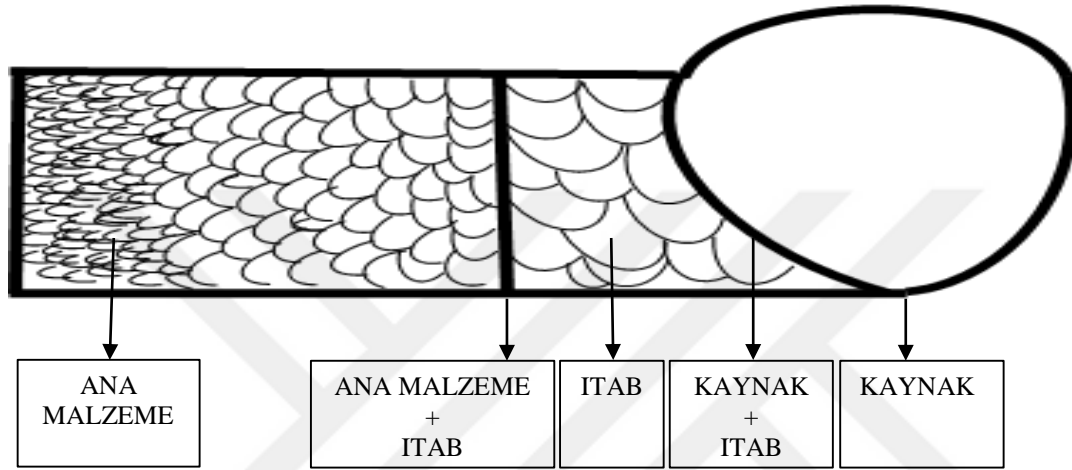
Resim 3.6d'de kaynak bölgesinde ise tipik bir alaşımlı çelik (paslanmaz gibi yüksek alaşımlı) katılaşma yapısı görülmektedir. Dendritik bir yapı ve dendritler arası bölgenin Cr ve C'ca zengin bir yapı görünümü söz konusudur. Bu bölgenin martenzitik ve kısmen  $\delta$ -ferrit fazından oluşmaktadır. Kaynak bölgesinde hızlı ısıtma ve soğuma sonucu tane büyümesi ve karışık taneli yapıların oluşmasına yol açar. Ayrıca yüksek sertlikteki martenzitik dönüşümden dolayı kaynak bölgesindeki kalıntı gerilmelerine neden olacak bu yapıda kaynak sonrası ısıl işlem önerilmektedir. (Datta, Mukerjee, Jha, Narasimhan ve Veeraraghavan, 2002).

Kullanılan kaynak yöntemlerine bağlı olarak, numunelerin maruz kaldıkları ısı girdileri birbirinden farklı olacaktır. Yüksek ısı girdisi kaynak nüfuziyetini artırsa da ITAB'ın geniş olmasına sebebiyet verdiği görülmüştür ve kaynak yöntemlerine bağlı olarak oluşan soğuma evrelerinin birbirinden farklı olması mikroyapı değişimlerine de neden olmaktadır.



### 3.2.3. Kaynaklı numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görünüm ve bölgesel kimyasal analizleri (EDS)

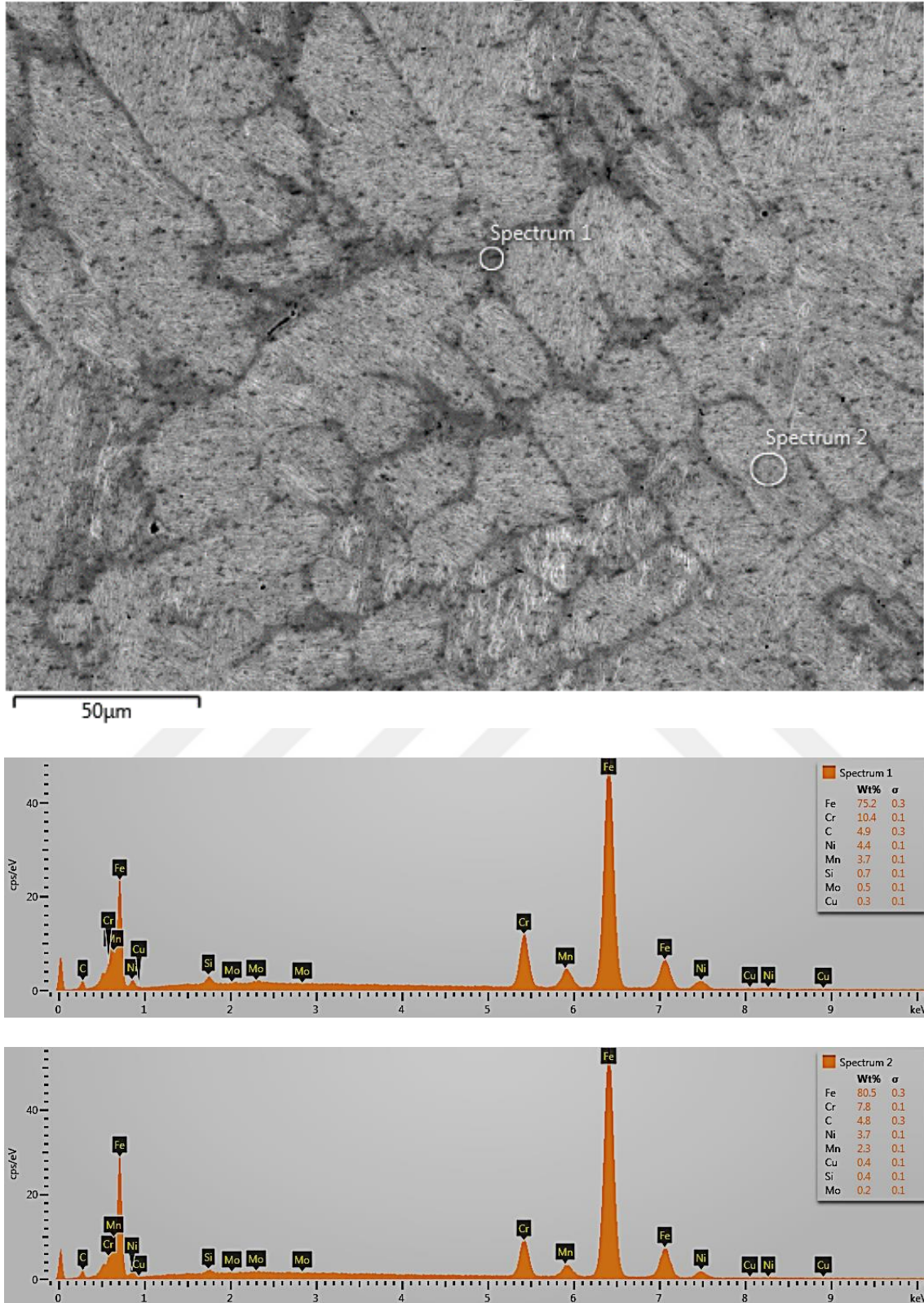
Optik incelemelerdeki yapıların daha iyi karakterize edilebilmesi için kaynaklı numuneler SEM ile incelenmiş ve farklılık arz ettiği düşünülen bölgelerden EDS analizleri alınmıştır. SEM incelemeleri Resim 3.7’de gösterildiği üzere farklı kaynak teknikleri ile birleştirilen numuneler 5 farklı bölgeye ayrılarak incelenmiştir.



Resim 3.7. Kaynak sonrası SEM incelemeleri yapılan bölgelerin gösterilişi

Kaynak yöntemleri sonrası SEM-EDS görüntüleri sırasıyla, Resim 3.8 ile 3.12 HPAK parametre-1, Resim 3.13 ile 3.17 arasında HPAK parametre-2, Resim 3.18 ile 3.22 arasında GMAK, Resim 3.23 ile 3.27 arasında CMT kaynak yöntemlerine ait SEM-EDS görüntüsü ve kimyasal analiz sonuçları verilmiştir.

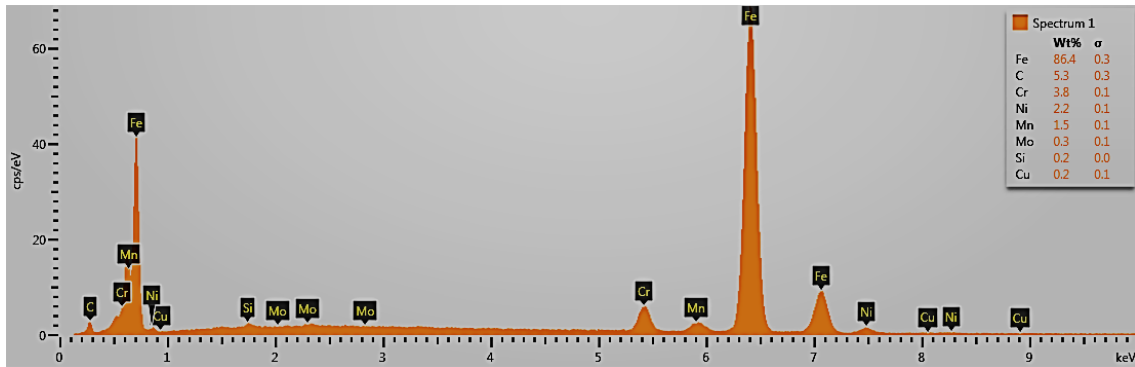
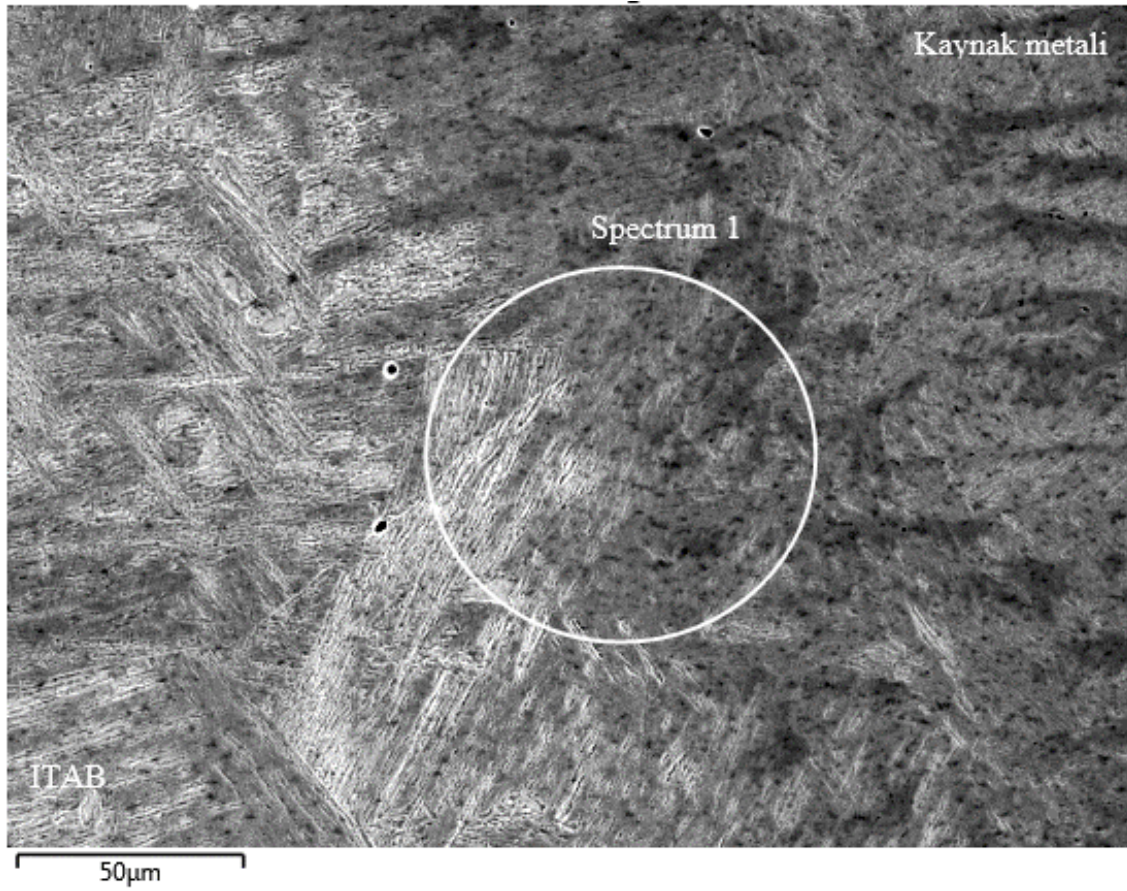
Aşağıdaki Resim 3.8’de HPAK-1 parametresi ile birleştirilmiş olan numunenin kaynak bölgesine ait SEM görünümü ve farklı görünüm arz eden iki bölgeye ait EDS analizleri verilmiştir. Kaynak işlemi sonrası kaynak bölgesinde yapılan kontrolde sıcak ve soğuk çatlak oluşumuna rastlanmamıştır. Bu da kullanılan kaynak yöntemi, parametreler, kaynak teli ve koruyucu gazın birleşim amacına yönelik beklentileri karşıladığı saptanmıştır. Kaynak bölgesindeki tane yapısının eş yönelmiş sütunsal tane yapısına benzediği görülmektedir. Alınan EDS analizlerinde tane sınırlarında (Spectrum 1) C, Cr, Ni, Mn, Si, ve Mo alaşım elementlerinin tane içine (Spectrum 2) göre daha yüksek oldukları tespit edilmiştir. Kaynak bölgesi mikroyapısının ise ferritik ve beyrit ile martenzit karışımından oluşmuştur.



Resim 3.8. HPAK parametre-1 kaynak SEM görünümü ve EDS analizi

Resim 3.9'da Kaynak+ITAB bölgesinde, kaynak metalini ana malzemenin arasında belirgin bir kaynak açıklığı çizgisi gözlemlenmemiş olup kaynak işlemi esnasında kaynak

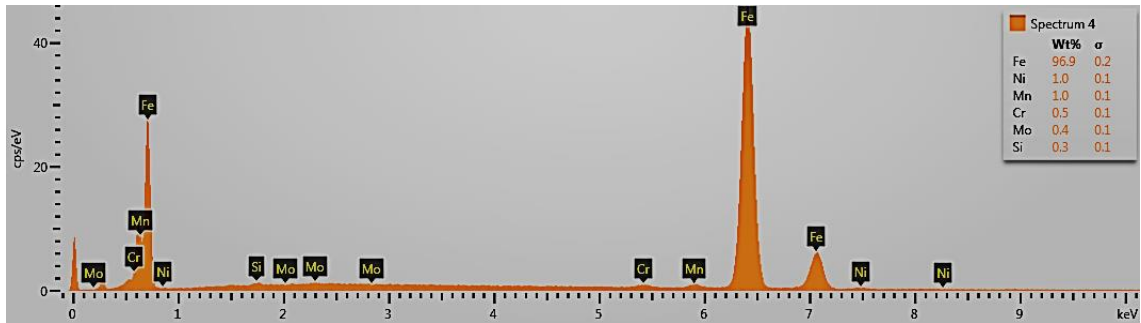
metali ile ana metalin birbiri içerisine difüze olduğu görülmüştür. Bu durum kaynak kabiliyetinin iyi olduğunu göstermektedir. Ara bölgeden alınan EDS analizinde (Spectrum 1) bu bölgedeki oluşan yeni kimyasal kompozisyon haritasında ana malzemeye östenitik kaynak telinden elementel geçiş olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak metali kısmı beynit ve martenzit karışımından oluşur iken ITAB bölgesi ise kalıntı östenitik olarak kalmış karbür ve düzensiz FeC iri taneli yapılarından oluşmuştur.



Resim 3.9. HPAK parametre-1 kaynak+ITAB SEM görünümü ve EDS analizi

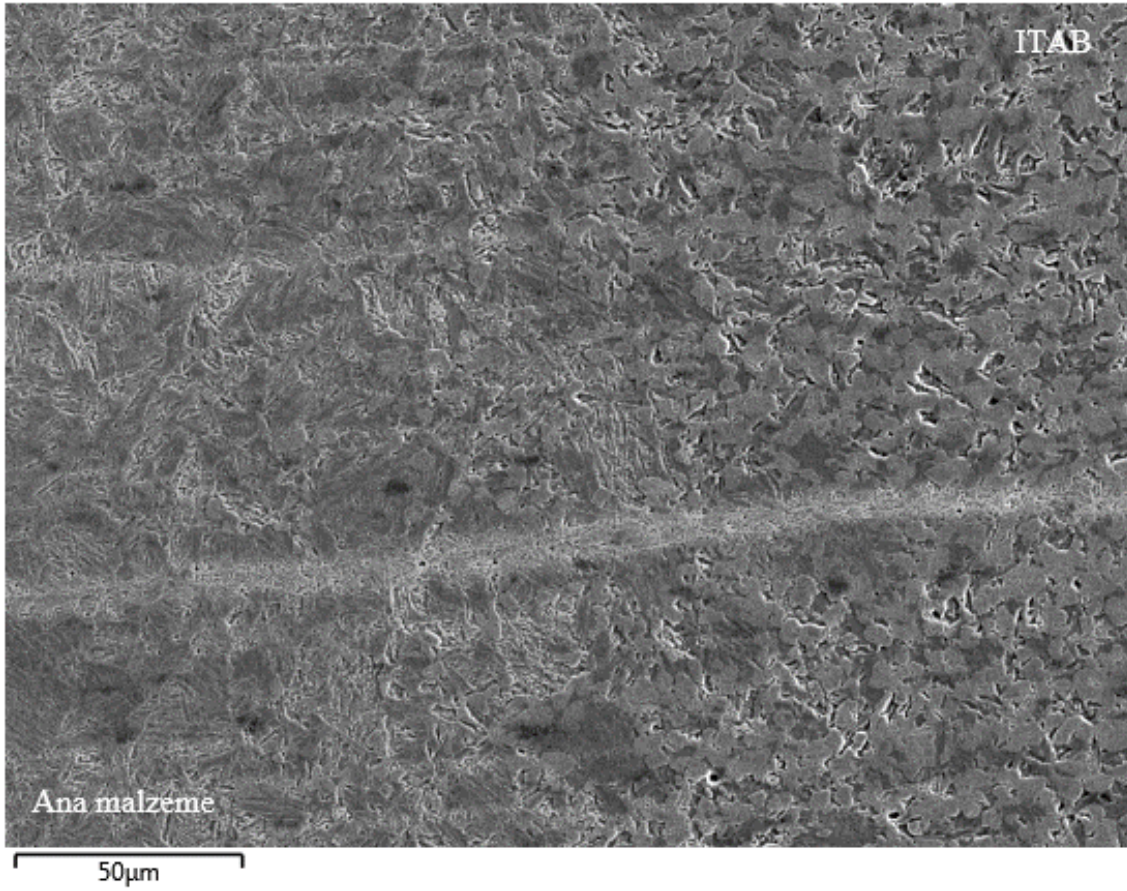


Resim 3.10'da ITAB bölgesi çoğunlukla martenzit yapıdan oluşmuş olup yapı içerisindeki siyah bölgelerin kalıntı östenit dönüşümü sonucu oluşan karburlu yapılardır. Alınan EDS analizinde kaynak metali ve kaynak metali+ITAB bölgelerine göre alaşım elementlerinin miktarı çok düşük olarak tespit edilmiştir. Kaynak işlemi sırasında yüksek ısı ve akabinde hızlı soğumadan dolayı tane yapısında büyüme meydana gelmiş olup oluşan martenzitik yapının lata tipi martenzitik yapı olduğu düşünülmektedir.



Resim 3.10. HPAK parametre-1 ITAB SEM görünümü ve EDS analizi

Resim 3.11’de Ana malzeme (ısıdan etkilenmeyen bölgede) tane yapısında herhangi bir değişiklik meydana gelmemiş olup mikroyapı resminde görüldüğü üzere yapı martenzitik ve beynitik karışımdır. Dolayısıyla zırh çeliklerinde sertleştirme amacı ile yapılan su verme ve temperleme işlemleri ile kazandırılmış olan ince tane karakterisiliği korunmuştur. Isıdan etkilenen bölgede ise (ITAB) bölgede ise düzensiz karbür yapıları ve kalıntı östenit oluşumları dikkat çekmektedir.

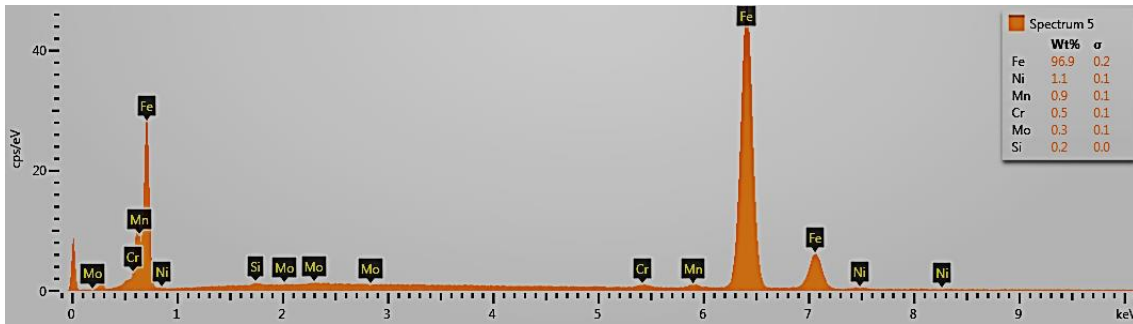


Resim 3.11. HPAK parametre-1 ana malzeme+ITAB SEM görünümü

Resim 3.12’de Ana malzeme bölgesi incelendiğinde, hızlı soğuma sonrası elde edilen ticari ARMOX 500T çeliğinin yüksek miktarda dislakasyon içeren (ani soğumadan dolayı) lata tipi martenzit yapı görülmüştür. Zırh çeliklerinde istenen fiziksel ve metalurjik özellikleri elde edilebilmesi için üretimin ilk aşaması olan ve yüksek mukavemet değerleri eldesi için gerçekleştirilen alaşımlama (katı ergiyik sertleşmesi) ile gerçekleştirilir. Daha sonraki aşamada sertleştirme amacı ile yapılan östenitleştirme ve su verme işleminden sonucunda yapılan temperleme ile çelik matriksin karbür yapıcı alaşım elementleri ve C ile doyumu, deformasyon sertleşmesi ile ince tane karakterisiliği elde edilmiş olur. Uygun temperleme

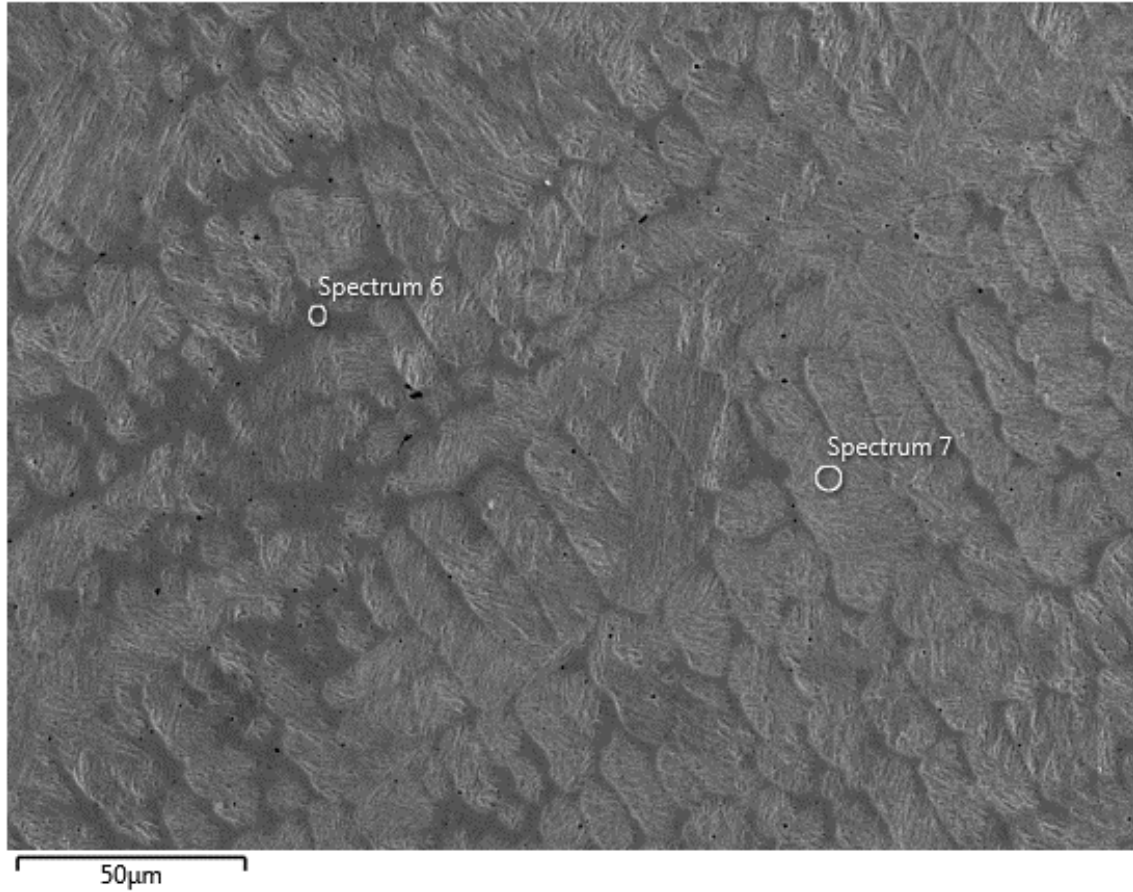


sıcaklığı ve zaman sonucunda özel karbür yapıcı alaşım elementlerinin çökmesi sonucunda istenen mukavemet ve tokluk değerleri belirlenmiş olur. Kaynak yöntemlerinde kullanılan ticari ARMOX 500T zırh çeliği yapısı (HPAK, GMAK ve CMT) ana malzeme olarak aynıdır. HPAK parametre-1, Ana malzeme bölgesine ait Spectrum 5 SEM-EDS sonucuna göre % 0,5 Cr, % 1,1 Ni, % 0,9 Mn, % 0,2 Si, % 0,3 Mo ve % 96,9 oranında Fe elementi içerdiği tespit edilmiştir. Bu kimyasal analiz değerleri ARMOX 500T zırh çeliğinin ticari kimyasal bileşimi ile birebir aynıdır.

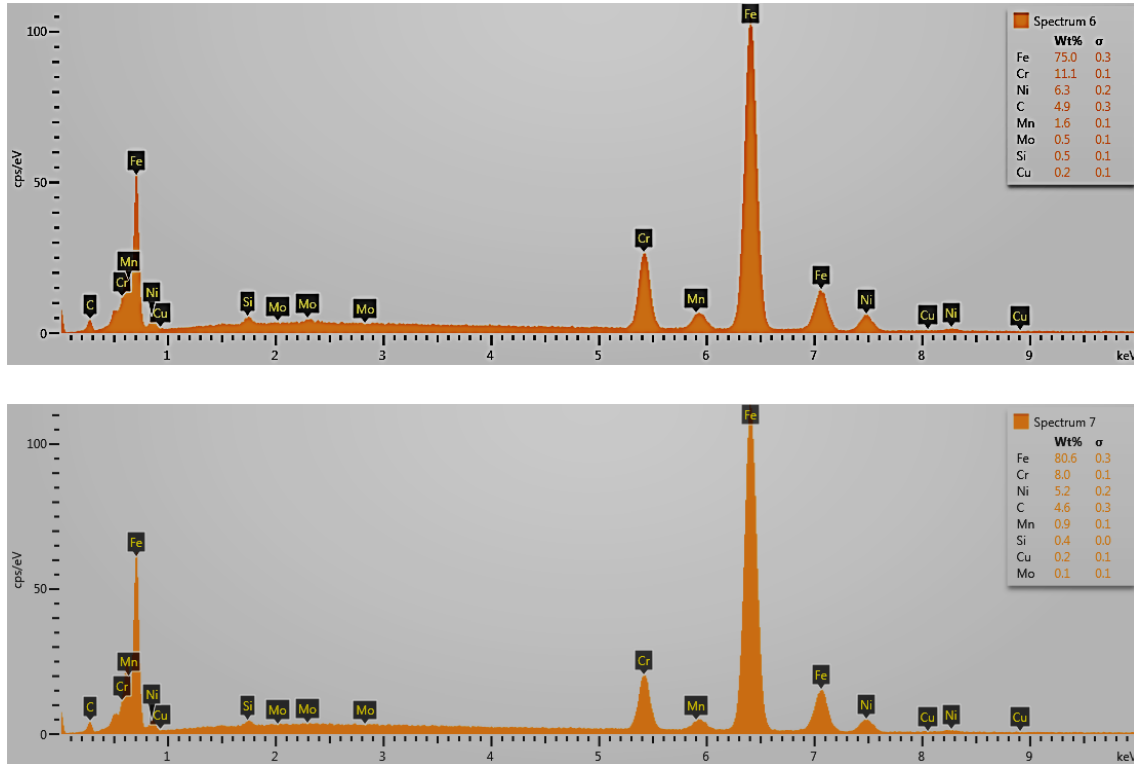


Resim 3.12. HPAK parametre-1 ana malzeme SEM görünümü ve EDS analizi

Aşağıda Resim 3.13’de HPAK-2 parametresi ile birleştirilmiş olan numunenin kaynak bölgesine ait SEM görünümü ve farklı görünüm arz eden iki bölgeye ait EDS analizleri verilmiştir. Kaynak işlemi sonrası kaynak bölgesinde sıcak ve soğuk çatlak oluşumuna rastlanmamıştır. HPAK-1’deki parametreye benzer bir yapı görünümüne sahip olmakla birlikte farklı kısmı ise tane yapısının daha küçük ve daha homojen olmasıdır. Bu durum kullanılan nozul meme çapının 3,2 mm’den 2,4 mm’ye indirilmesi ve 170 amper yerine 160 amper ile kaynak yapılması sonucu daha düşük ısı girdisinden dolayı soğumanın daha kısa sürede gerçekleşmiş olmasına atfedilebilir. EDS analizi incelendiğinde ise HPAK-1 parametresinde olduğu gibi tane sınırlarının tane içlerine göre daha yüksek oranda Cr, Ni, Mn, Si ve Mo içerdikleri tespit edilmiştir. Bu alaşım elementlerinin ticari ARMOX 500T çeliğinden yüksek olması elektrottan kaynak metaline bir geçiş olduğunu göstermiştir.



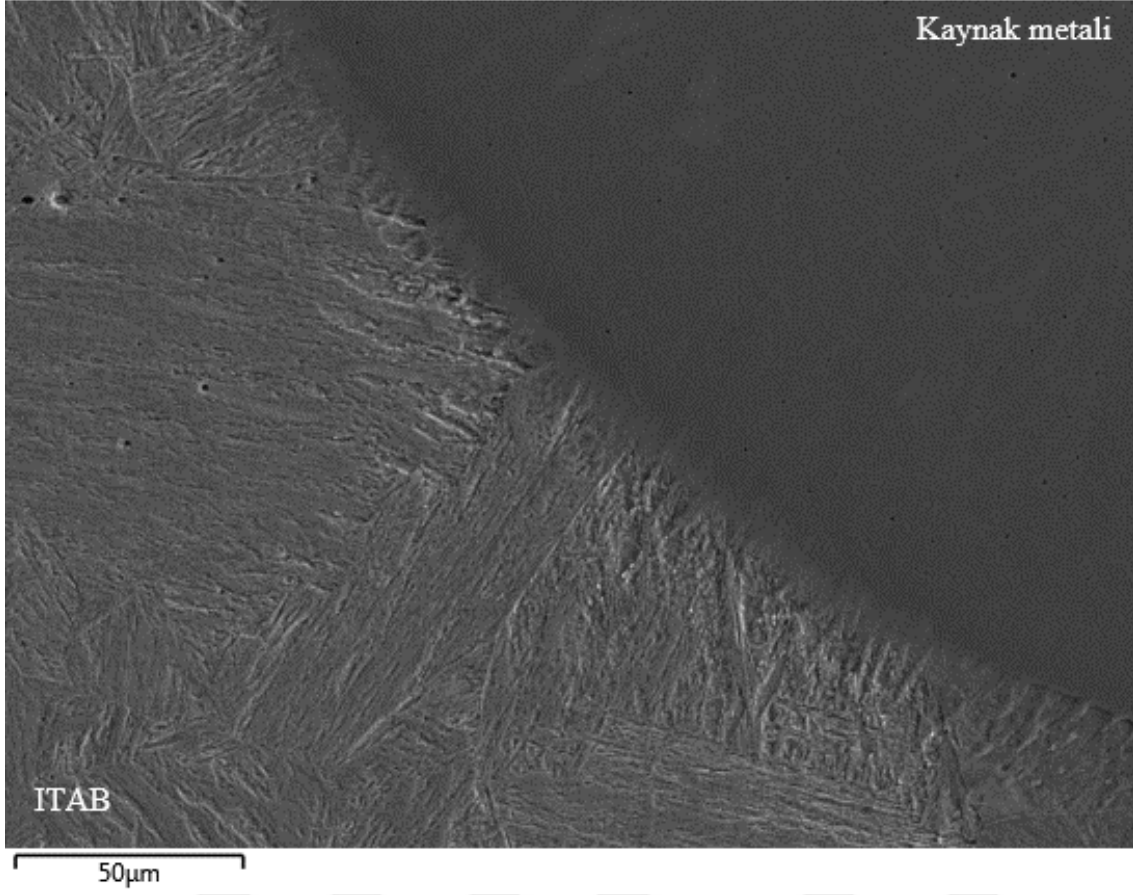
Resim 3.13. HPAK parametre-2 kaynak SEM görünümü ve EDS analizi



Resim 3.13. (devamı) HPAK parametre-2 kaynak SEM görünümü ve EDS analizi

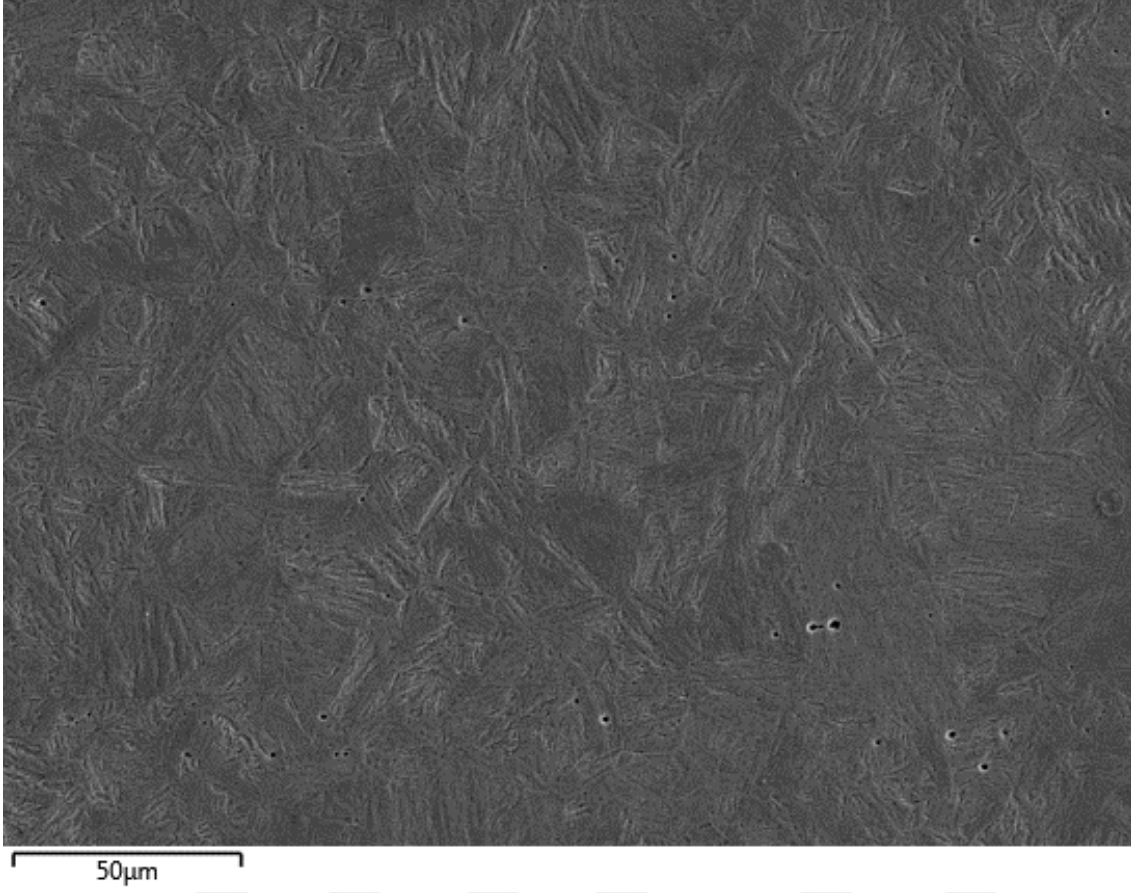
Resim 3.14’de Kaynak+ITAB bölgesinde, kaynak metalini ana malzemenin arasında belirgin bir kaynak açıklığı çizgisi gözlemlenmemiş olup kaynak işlemi esnasında kaynak metalini ana metalin birbiri içerisine difüze HPAK-1’de olduğu gibi görülmüştür. Bu durum kaynak kabiliyetinin iyi olduğunu göstermektedir. ITAB bölgesinde görülen ince uzun çizgilerin ince tüylü beynitik yapı oldukları düşünülmektedir.





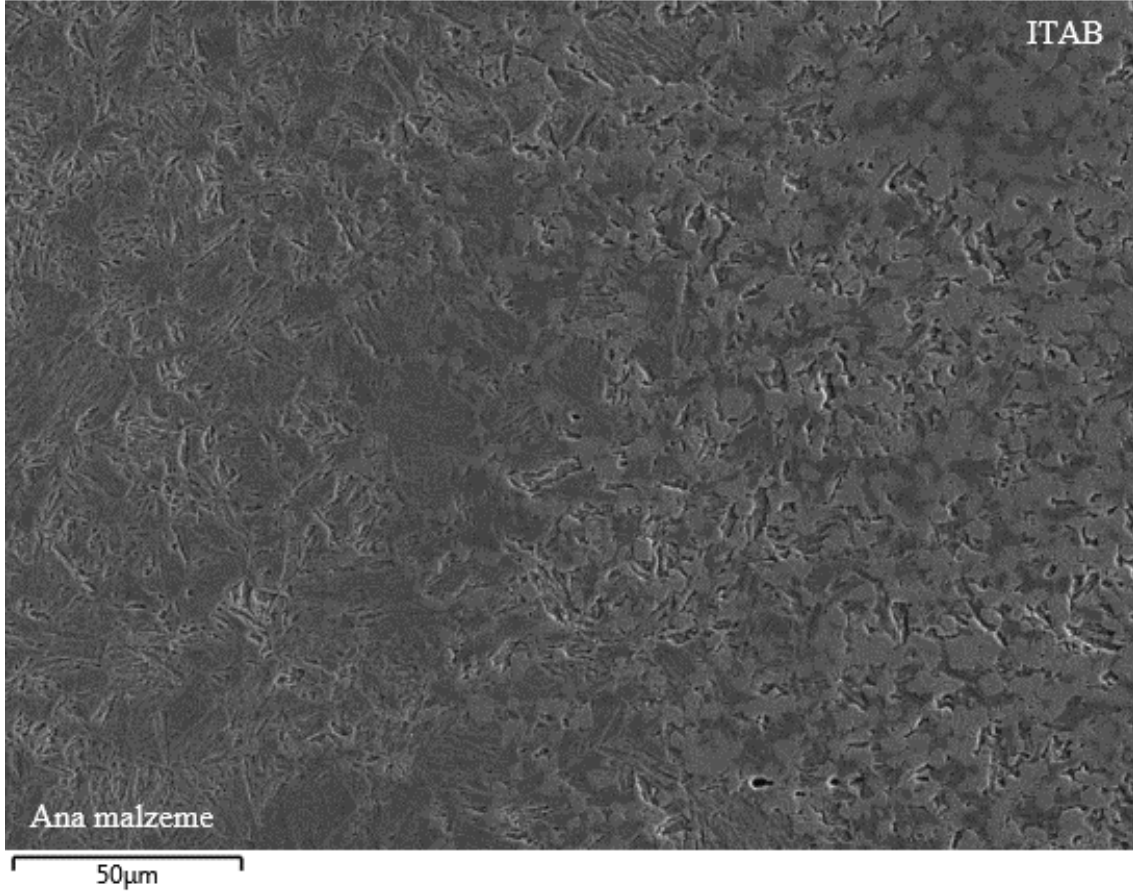
Resim 3.14. HPAK parametre-2 kaynak+ITAB SEM görünümü

Resim 3.15’de ITAB bölgesi, çoğunlukla martenzit yapıdan oluşmuş olup yapı içerisindeki siyah bölgelerin kalıntı östenit dönüşümü sonucu oluşan karburlu yapılardır. Kaynak işlemi sırasında yüksek ısı ve akabinde hızlı soğumadan dolayı tane yapısında büyüme meydana gelmiş olup oluşan martenzitik yapının lata tipi martenzitik yapı olduğu düşünülmektedir.



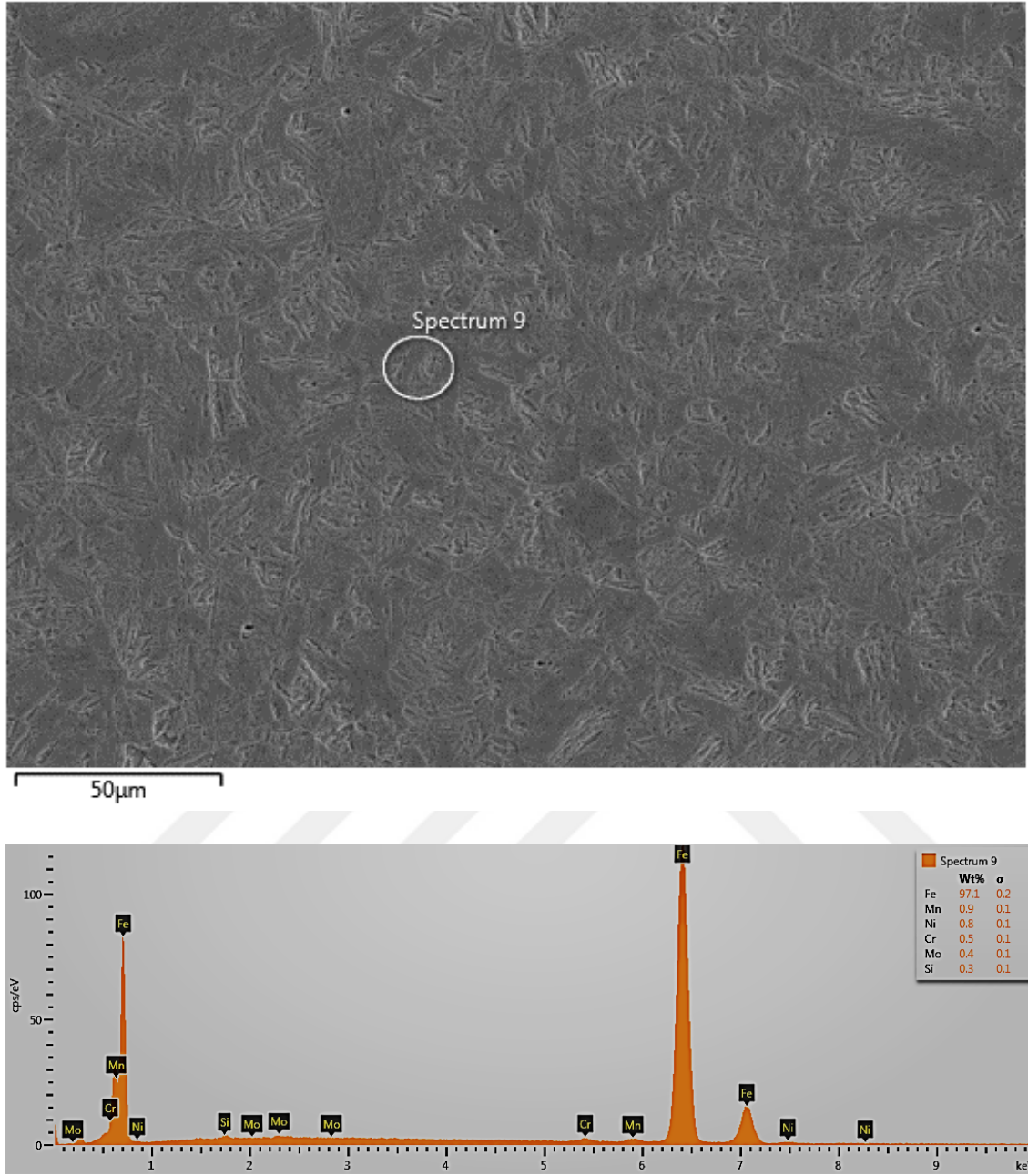
Resim 3.15. HPAK parametre-2 ITAB SEM görünümü

HPAK parametre-2, ana malzeme+ITAB bölgesi incelendiğinde, HPAK-1 'de olduğu gibi Resim 3.16'da ana malzeme (ısıdan etkilenmeyen bölgede) tane yapısında herhangi bir değişiklik meydana gelmemiş olup mikroyapı resminde görüldüğü üzere yapı martenzitik ve beynitik karışımıdır. Dolayısıyla zırh çeliklerinde sertleştirme amacı ile yapılan su verme ve temperleme işlemleri ile kazandırılmış olan ince tane karakterisiliği korunmuştur. Isıdan etkilenen bölgede ise (ITAB) bölgede ise düzensiz karbür yapıları ve kalıntı östenit oluşumları dikkat çekmektedir.



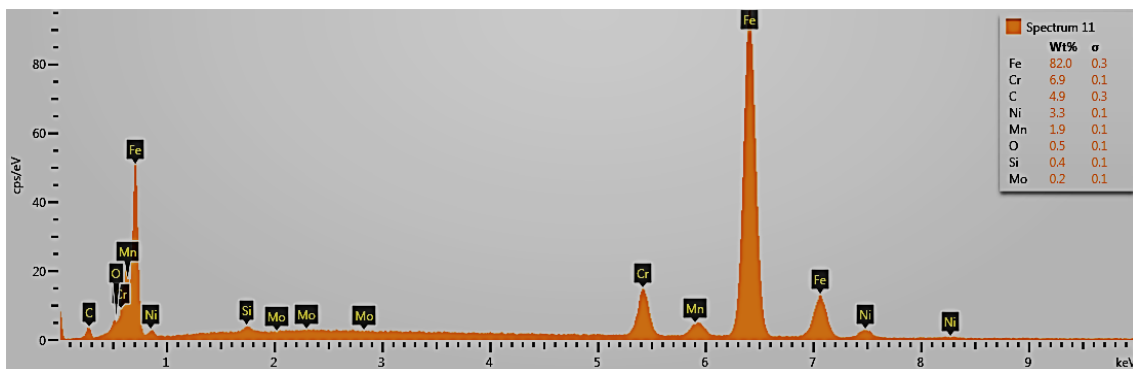
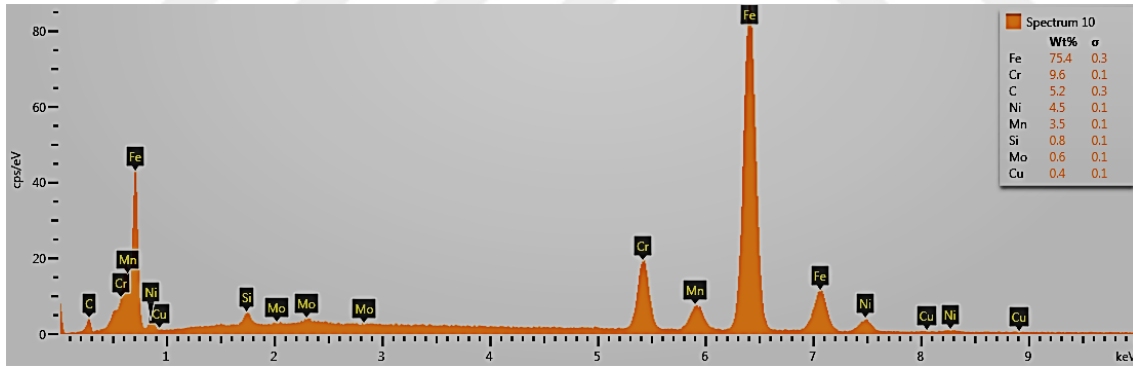
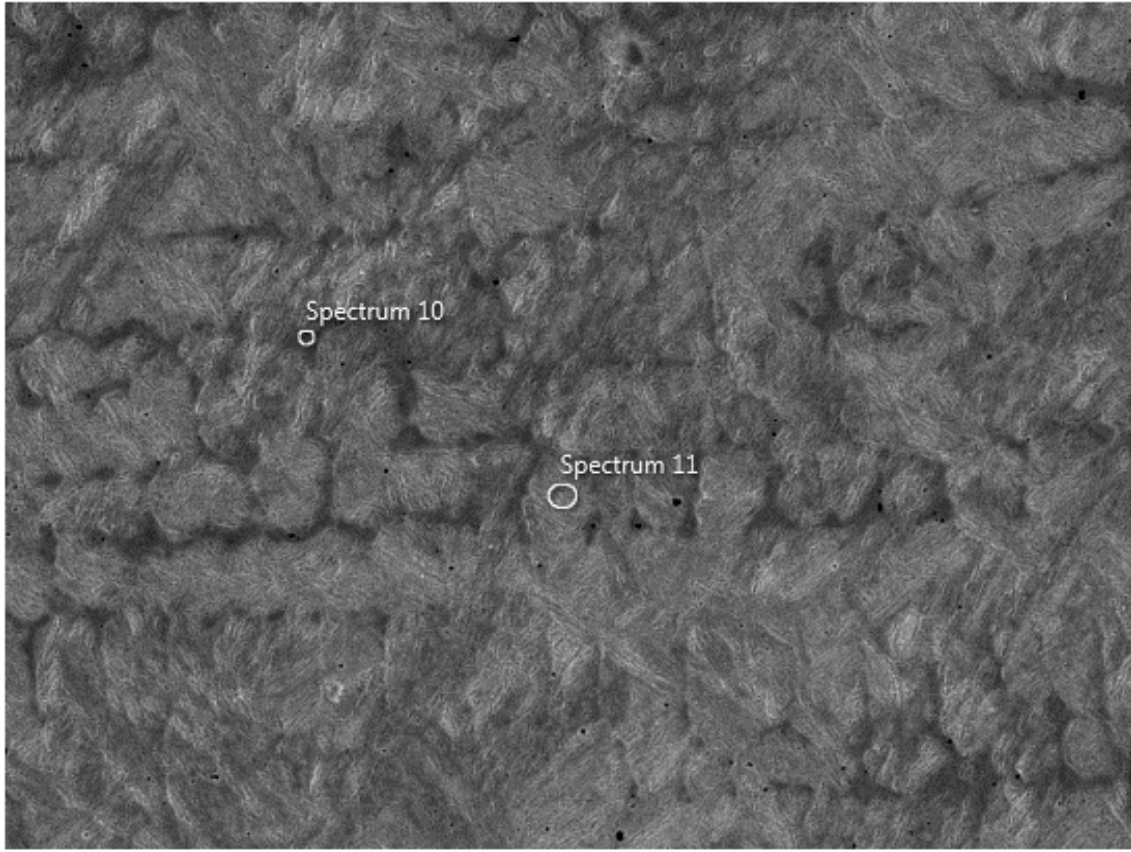
Resim 3.16. HPAK parametre-2 ana malzeme+ITAB SEM görünümü

Resim 3.17’de HPAK parametre-2, Ana malzeme bölgesi Spectrum 9’da, Ni haricinde ticari ARMOX 500T malzemesinin kimyasal bileşimini aynısı elde edilmiştir. Bu durum kaynak işlemi sırasında bu bölgenin ısıdan etkilenmediğini destekler niteliktedir.



Resim 3.17. HPAK parametre-2 ana malzeme SEM görünümü ve EDS analizi

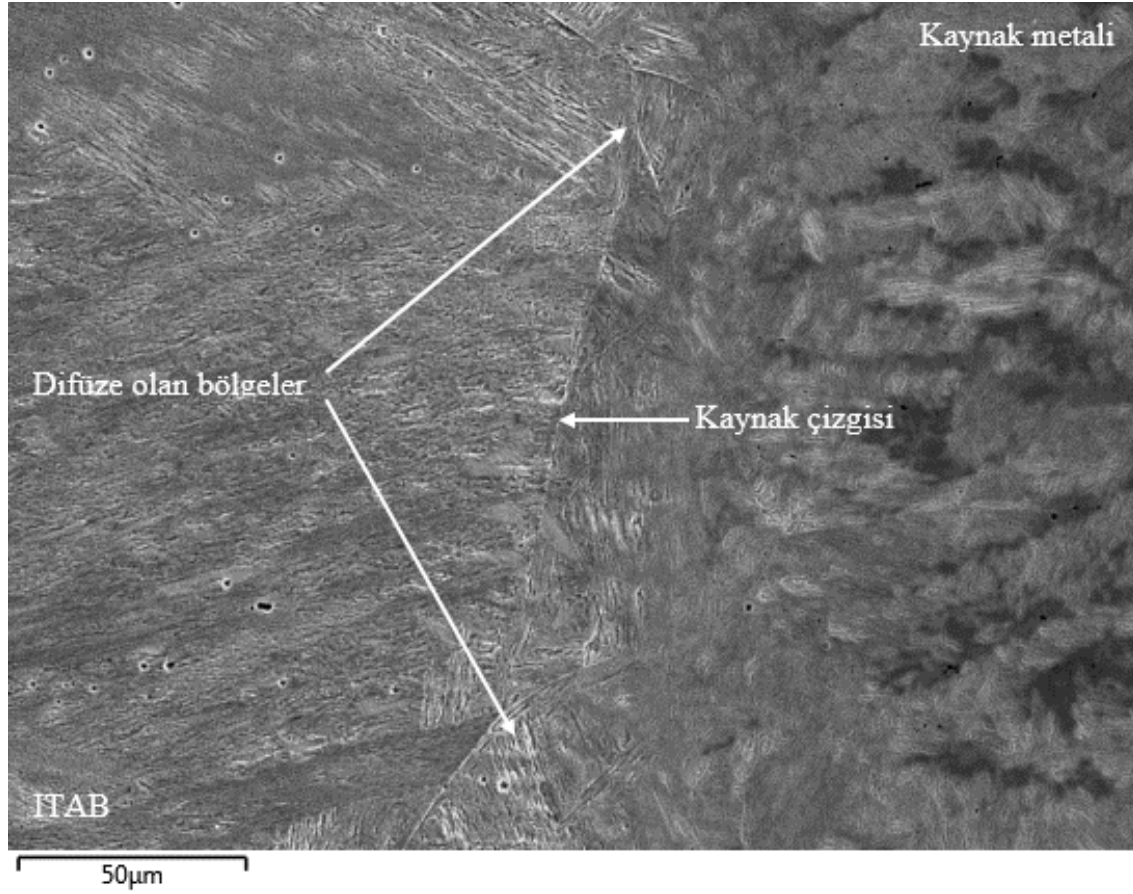
Resim 3.18’de GMAK yöntemi kaynak bölgesi incelendiğinde, kaynak bölgesinin karışık beynit martenzitik ve karbür (siyah bölgeler) bölgelerinden oluştuğu görülmektedir. Buradaki ince karburlu yapının GMAK kaynağı sebebi ile düşük ısı girdisine bağlı olarak hızlı soğumadan kaynaklı oluştuğu düşünülmektedir. HPAK parametrelerinde olduğu gibi tane sınırlarının (Spectrum 10) alaşım elementi içerikleri tane içlerine (Spectrum 11) göre daha yüksektir. Bu durum demire göre daha küçük atom boyutuna sahip alaşım elementlerinin kaynak işlemindeki ısı dolayısıyla difüzyon yollarında biriktiğini göstermektedir.



Resim 3.18. GMAK kaynak SEM görünümü ve EDS analizi



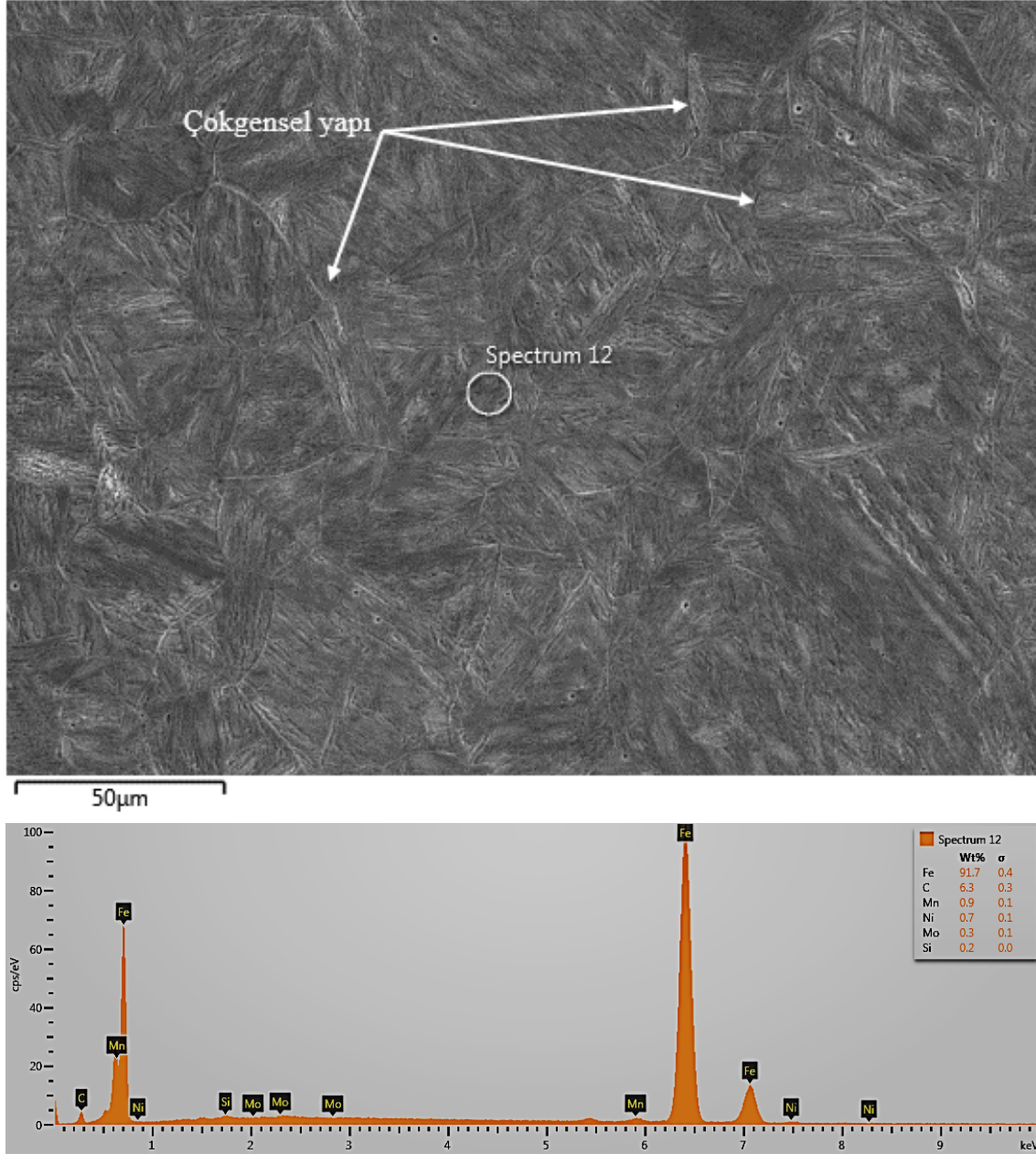
Resim 3.19’da kaynak+ITAB bölgesinde, kaynak metali ile ana malzemenin arasında kısmi bir kaynak açıklığı çizgisi gözlemlenmiş olup kaynak işlemi esnasında kaynak metali ile ana metalin birbiri içerisine bölgesel olarak (HPAK parametrelerine göre daha az) difüze olduğu görülmüştür. Bu durum kaynak kabiliyetinin HPAK’a göre daha kötü olduğunu göstermektedir. Benzer durum Kara ve Korkut (2012a), tarafından Ramor 500 zırh çeliğinin MIG kaynağında da gözlemlenmiştir. Kaynak metali kısmı beynit ve martenzit karışımından oluşur iken ITAB bölgesi ise kalıntı östenitik olarak kalmış karbür ve düzensiz FeC iri taneli yapıların yanında ince tüylü martenzit yapılar kaynak çizgisine yakın kısımlarda oluşmuştur.



Resim 3.19. GMAK kaynak+ITAB SEM görünümü

Resim 3.20’de GMAK kaynağı ITAB bölgesinden alınan Spectrum 12 incelendiğinde, martenzitik yapı ve karbür görüntüsünü destekler nitelikte yüksek oranda C oranı tespit edilmiş olup bu bölgenin karmaşık ve iri taneli ana metal yönüne doğru uzayan bir yapı gözlemlenmiştir. Ayrıca SEM fotoğrafından tane sınırlarının çokgensel bölgelere benzemektedir bu durum tanelerin birbirlerinden ayrılmasını kolaylaştırıcı bir etkiye sahip

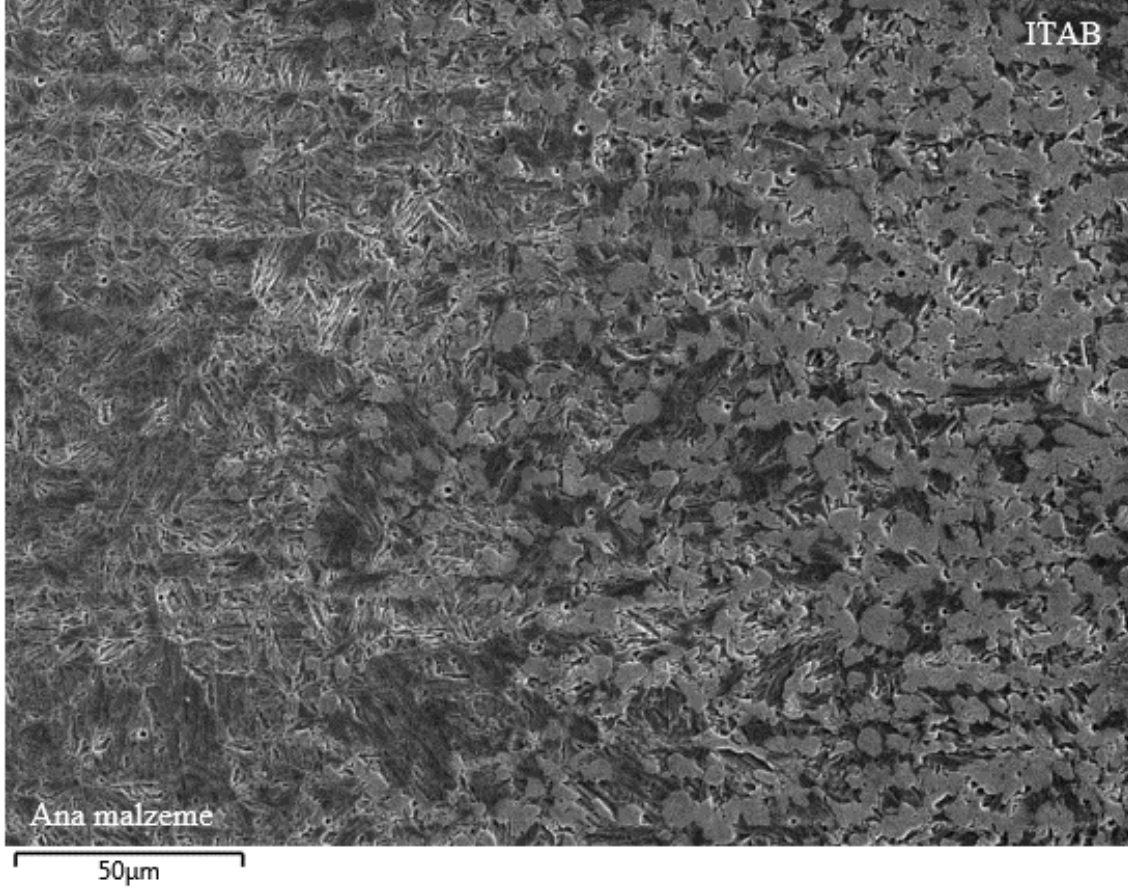
olduğundan statik ve dinamik yüklerin uygulanması durumunda meydana gelen öncü çatlakların kolay ilerlemesini imkan sağlayacaktır. Çekme deneyleri esnasında numunelerin kaynak metali bölgesi yerine bu bölgeden kopmuş olması bu tezi destekler niteliktedir.



Resim 3.20. GMAK ITAB SEM görünümü ve EDS analizi

Resim 3.21’de ana malzeme + ITAB bölgesi incelendiğinde, ana malzeme (ısıdan etkilenmeyen bölgede) tane yapısında herhangi bir değişiklik meydana gelmemiştir. ITAB kısmında ise martenzitik, karışık beynit ve ince karburlu bir yapı oluşumu söz konusudur.

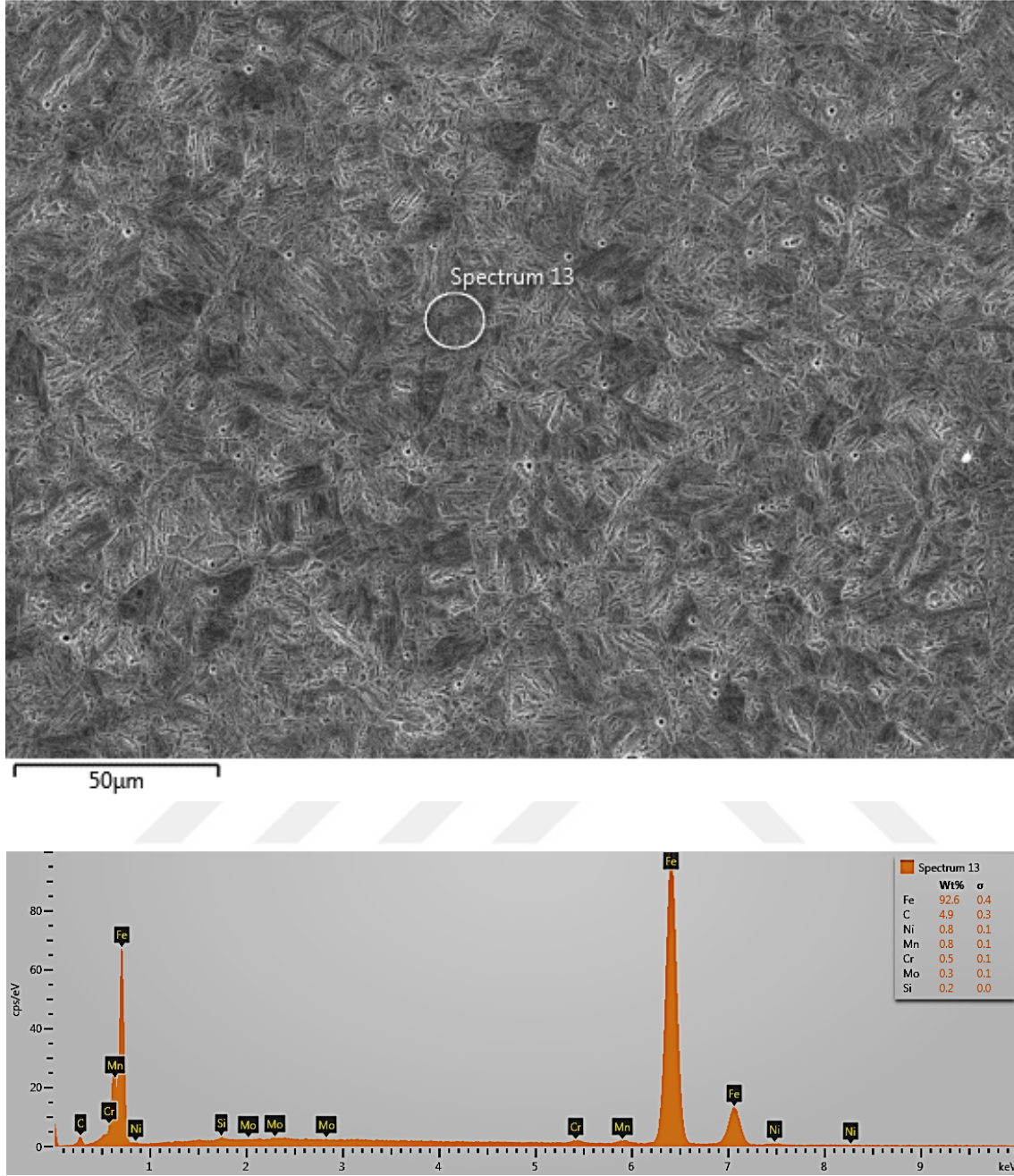
HPAK'dan farklı olarak meydana gelmiş olan düzensiz ince karbürlü yapının hızlı soğuma neticesinde oluştuğu düşünülmektedir.



Resim 3.21. GMAK ana malzeme+ITAB SEM görünümü

Resim 3.22'de GMAK kaynağı ana malzeme bölgesi incelendiğinde, kaynak işlemi sırasında bu bölgenin ısıdan etkilenmediğini HPAK'daki gibi mikroyapının bey nitelik ve martenzitik karakterde olduğu görülmektedir.

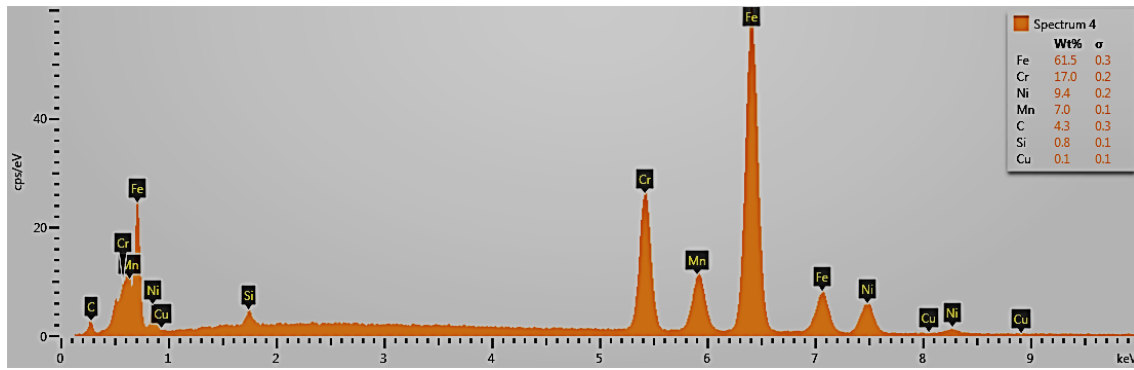
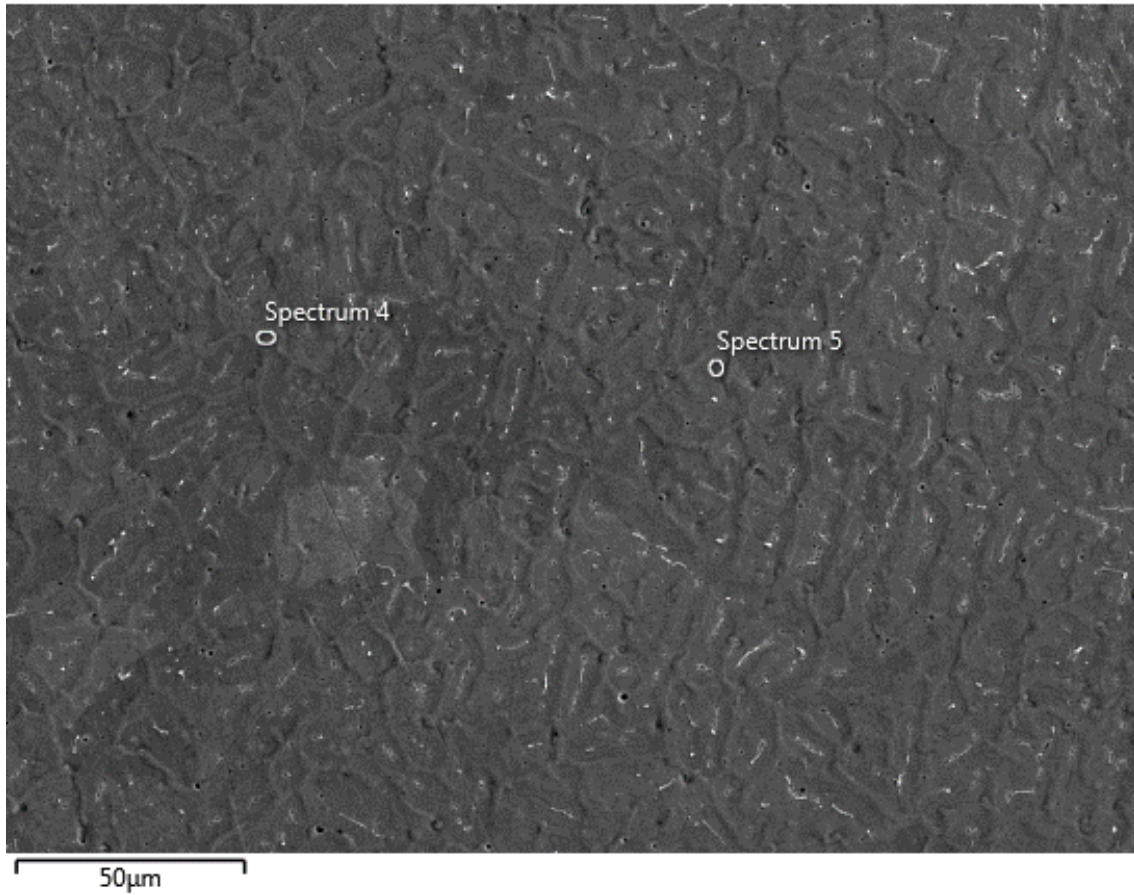




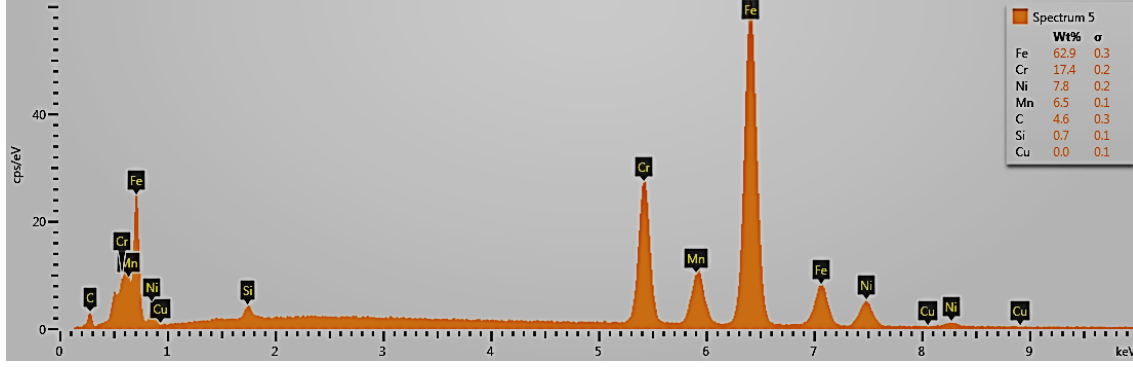
Resim 3.22. GMAK ana malzeme SEM görünümü ve EDS analizi

Resim 3.23’de CMT kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin kaynak bölgesi mikroyapısı incelendiğinde paslanmaz çeliğin katılaşma yapısını andıran dentritik yapı söz konusudur. Bu bölgeden alınan EDS analizinde Cr ve C bakımından diğer kaynak yöntemlerine göre oldukça zengin olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum bölgenin martenzitik ve kısmen  $\delta$ -ferrit fazlarında oluştuğunu işaret etmektedir. Kaynak bölgesinde hızlı ısıtma ve soğuma sonucu tanelerde büyüme meydana gelmesi ile karışık martenzitik ve  $\delta$ -ferrit yapılar oluşmuştur. Datta ve diğerleri (2002); Srinivasan, Muthupandi, Sivan ve

Dietzel (2006); Shirmohammadi, Movahedi ve Pouranvari (2017); Saxena ve diğ erleri, (2018) bu karışık yapının kaynak bölgesinde kalıntı gerilmelerine neden olduğ undan mekanik özellikleri düş üreceğ i dolayısıyla kaynak iş lemi sonrası ısıl iş lem yapılması gerektiğ ini belirtmiş lerdir.  $\delta$ -ferrit miktarı, kaynak metali kimyasal bileşiminin Cr ve Ni eş değ erleri kullanarak tahmin edilmiş tir. Cr ve Ni değ erleri sırasıyla 18,7 ve 8,1 olan ilave telin Schaeffler diyagramına dayanarak matriks yapısı yaklaşık %5 yapıda olduğ u ferritik olarak bulunmuş tur.

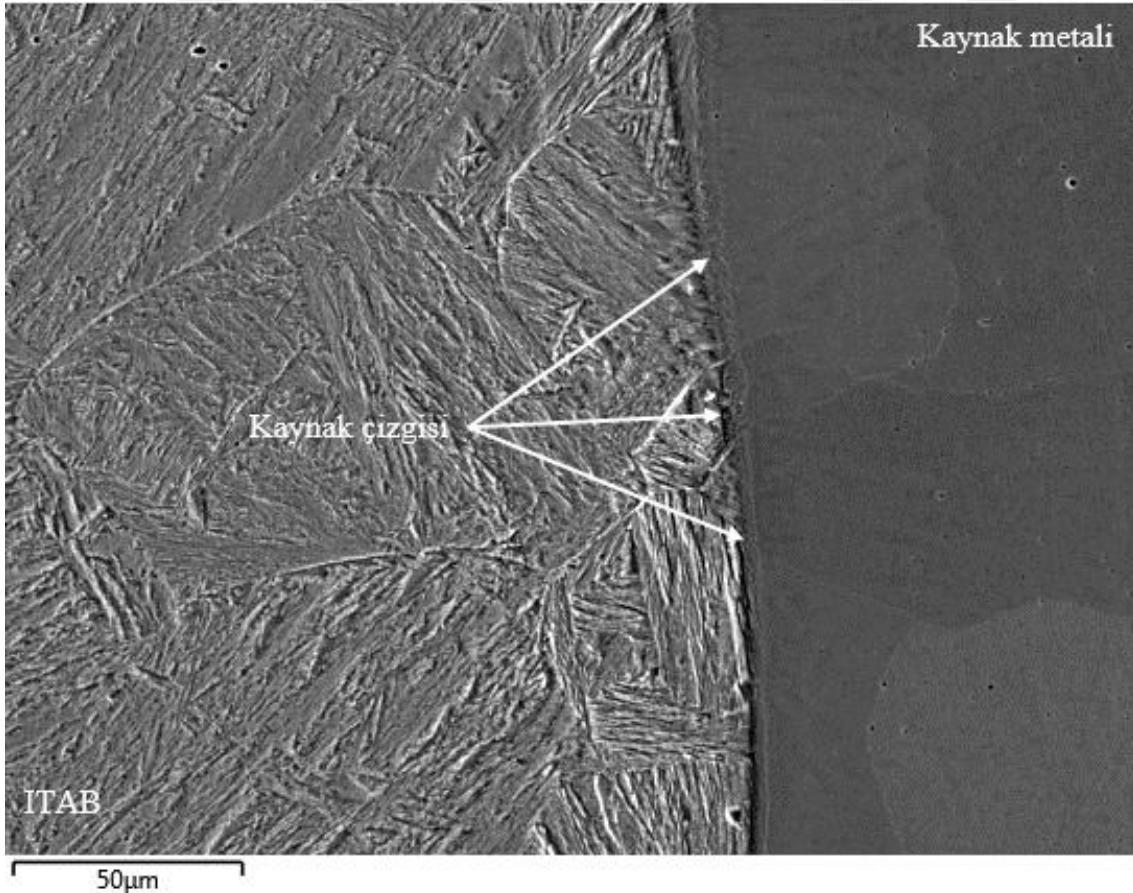


Resim 3.23. CMT kaynak SEM görünümü ve EDS analizi



Resim 3.23. (devamı) CMT kaynak SEM görünümü ve EDS analizi

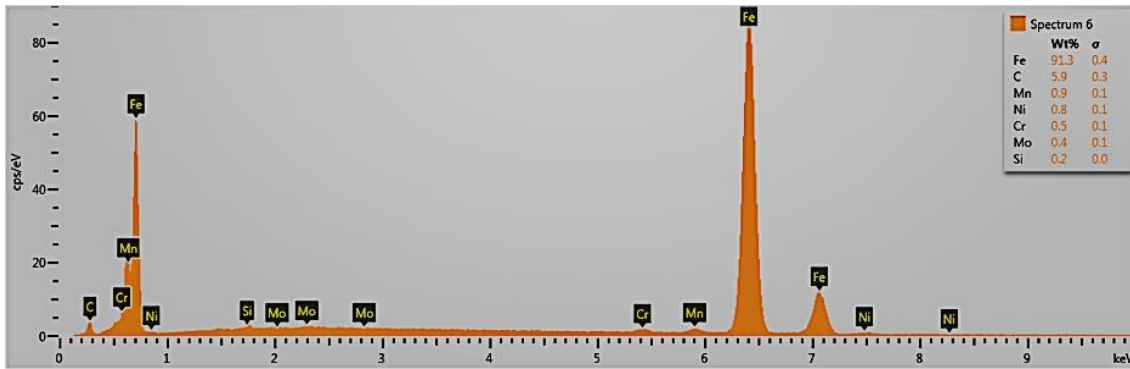
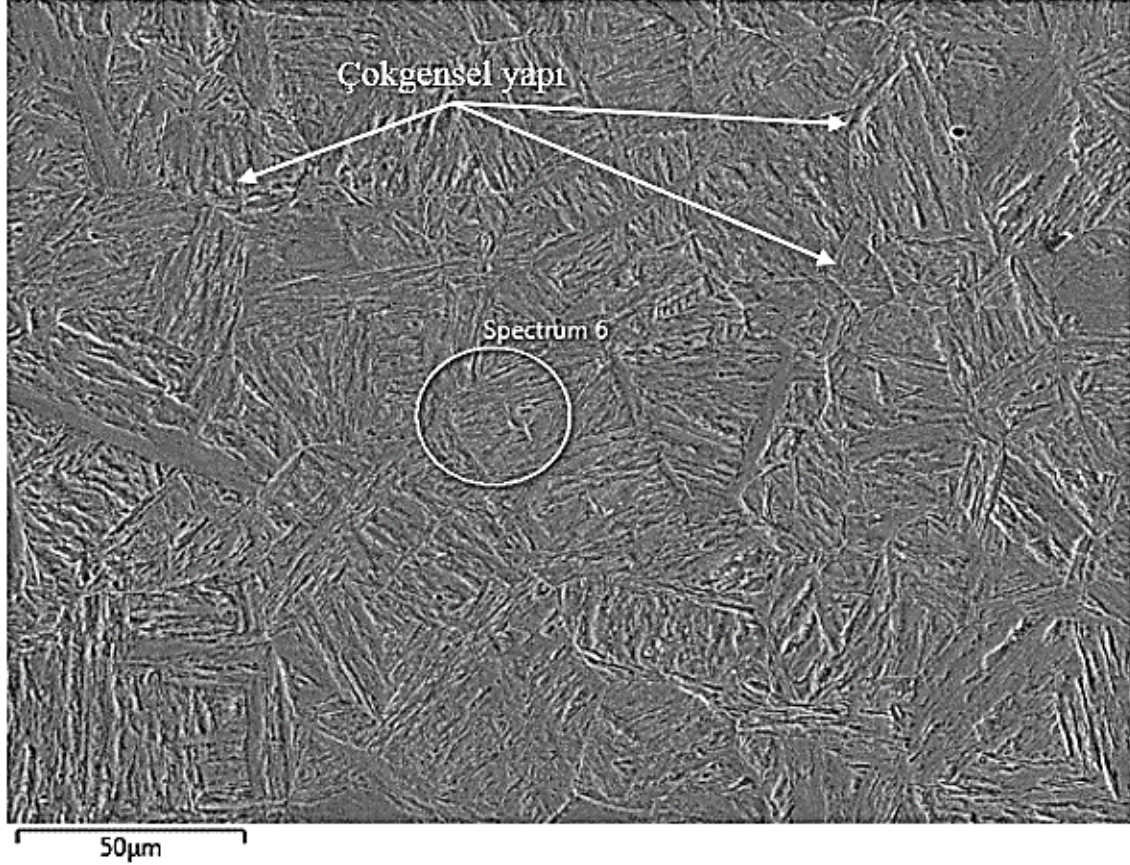
Resim 3.24'de kaynak+ITAB bölgesinde, kaynak metalini ile ana malzemenin arasında kısmi bir kaynak açıklığı çizgisi gözlemlenmiş olup kaynak işlemi esnasında kaynak metalini ile ana metalin birbiri içerisine yeteri kadar difüze olmadığı görülmüştür. Bu durum soğuk metal kaynağının karakterisiliği olan soğuk metal transferi yöntemi olması dolayısıyla ısının sürekliliğinin olmamasıdır. Ayrıca difüzyon olayının nerede ise hiç olmaması bu numunelerin çekme dayanımlarının en düşük olmasına neden olmuştur.



Resim 3.24. CMT kaynak+ITAB SEM görünümü



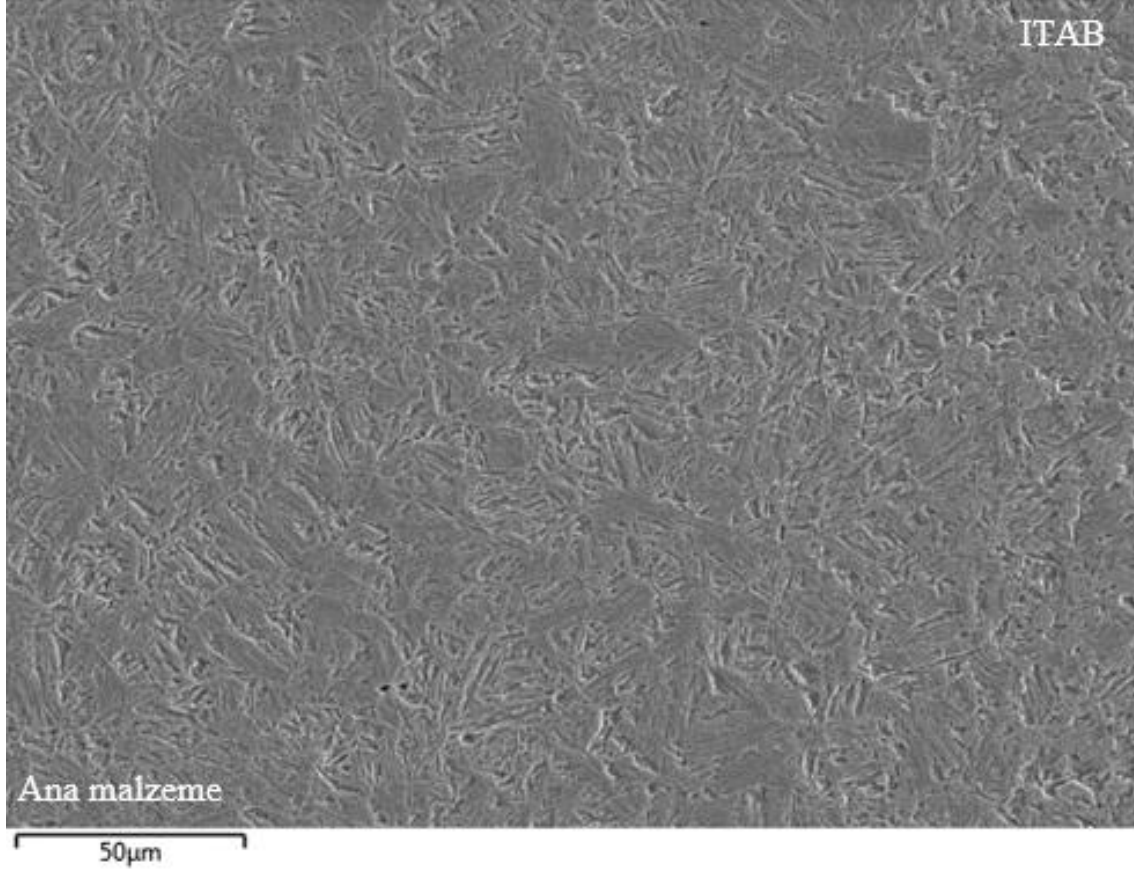
Resim 3.25’de ITAB bölgesi incelendiğinde, ITAB bölgesinin iğnemsî martenzitik bir yapı ile beynitik yapı görülmektedir. ITAB bölgesinden alınan Spectrum 6’da yüksek karbon oranı bu yapıları destekler niteliktedir. GMAK kaynağında olduğu gibi tane yapılarının çokgensel olduğu gözlemlenmiştir.



Resim 3.25. CMT ITAB SEM görünümü ve EDS analizi.

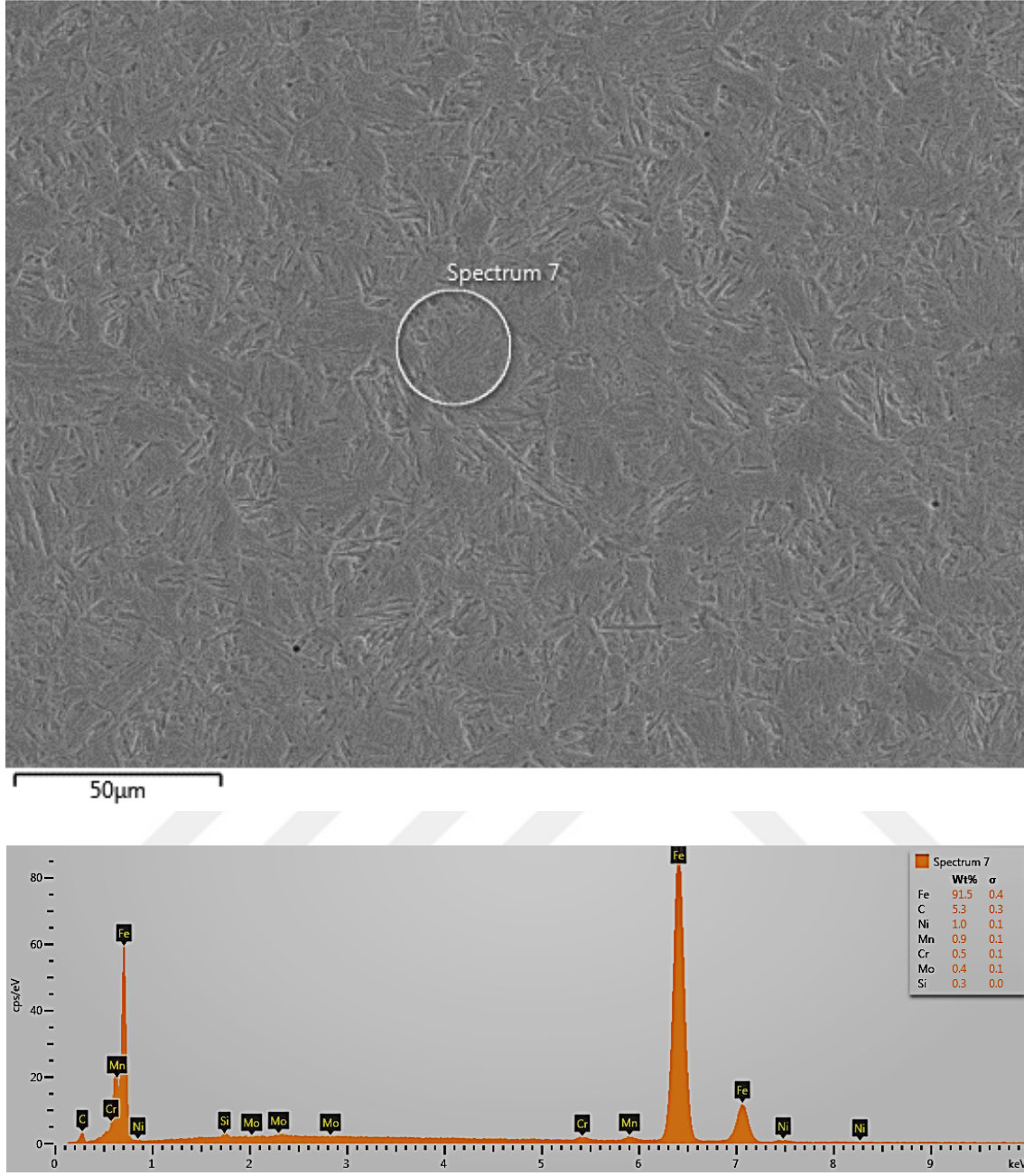
Resim 3.26. CMT ana malzeme+ITAB bölgesi SEM görüntüsü incelendiğinde, Resim 3.27’de ana malzeme bölgesi incelendiğinde, ITAB bölgesinin HPAK 1 ve 2 (Bkz. Resim

3.11,3.16) ve GMAK (Resim 3.21) kaynak yöntemlerine göre ısıdan daha az etkilendiği görülmüştür. Bu bölge neredeyse ana metal ile aynı mikroyapıya sahiptir.



Resim 3.26. CMT ana malzeme+ITAB SEM görünümü

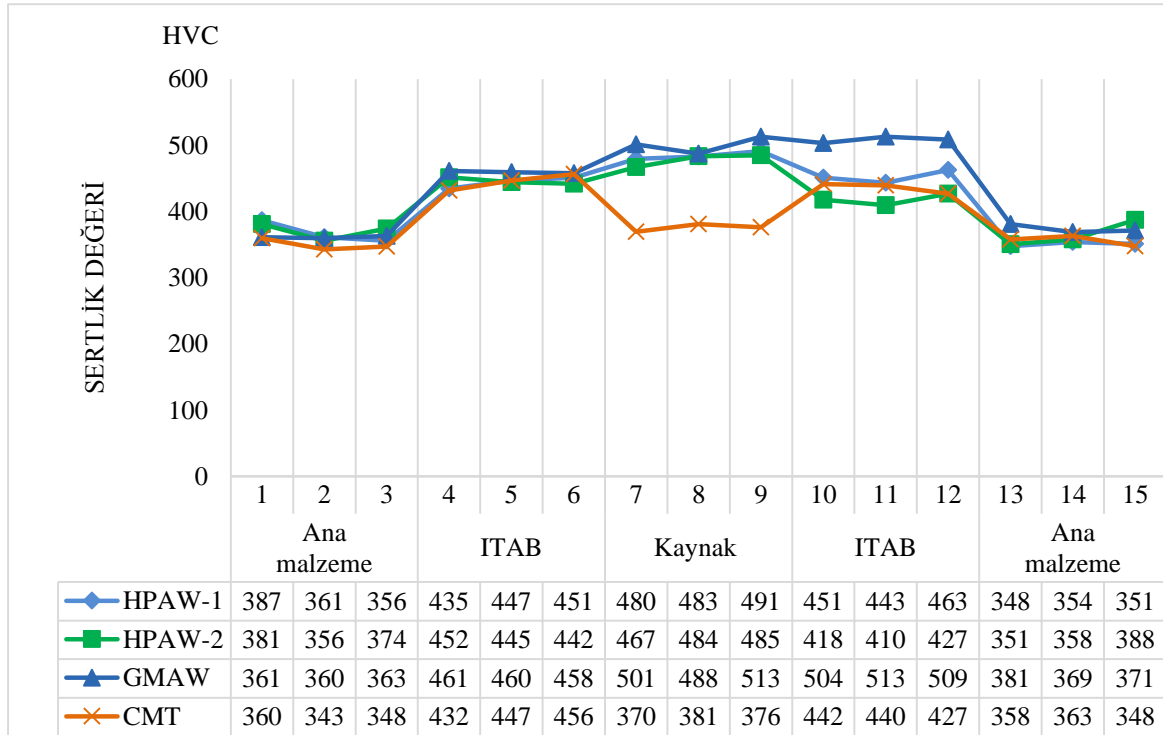
Resim 3.27 'de CMT ana malzeme bölgesi incelendiğinde, kaynak işlemi sırasında bu bölgenin ısıdan etkilenmediğini HPAK ve GMAK'daki gibi mikroyapının beynitik ve martenzitik karakterde olduğu görülmektedir.



Resim 3.27. CMT ana malzeme SEM görünümü ve EDS analizi

### 3.3. Sertlik Ölçme Deneyi

Farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilen numunelerin kesit alanlarından alınan HVC sertlik değerleri grafiği Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. HPAK-1, HPAK-2, GMAK ve CMT kaynak yöntemlerine ait sertlik dağılım grafiği

HPAK ve GMAK yöntemleri ile birleştirilen numunelerde en yüksek sertlik değeri kaynak bölgesinde elde edilmiştir. ITAB bölgesi sertliği ise ana malzemenin sertliğinden ölçülmüştür. Ancak CMT yönteminde ölçülen sertlik değeri ana malzemenin sertliğinden yüksek olmakla beraber ITAB'dan daha düşüktür. Elde edilen sertlik değerlerinin ana malzemenin sertliğinden yüksek olması kullanılan östenitik tel ile ilgilidir. Çünkü telin içeriğindeki karbür yapıcı (östenitik) elementler sayesinde ısınının yüksekliğine bağlı olarak karbür yapılarının oluştuğu düşünülmektedir. SEM resimleri üzerinden alınan EDS analizlerindeki yüksek C içerikleri karbür yapılarının varlığı bu durumu doğrular niteliktedir (Bkz. Resim 3.8, 3.13, 3.18 ve 3.23).

Literatür incelendiğinde ise Kara (2012), Ramor 500 zırh çeliklerinin MIG kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliği araştırdıkları çalışmada kaynak bölgesi sertliğinin ITAB'ın sertliğinden daha düşük olduğu bildirilmiştir. Öte yandan Merzalı (2013), MIL A 46100 zırh çeliğine yakın bir özellikte çeliğin kaynak sonrasında oluşan ısı tesiri altında kalan bölgenin (ITAB) ısıtılarak ana malzeme özelliğine yakın sertlik değerlerine ulaşmaya çalışmışlardır. Kurt (2015), farklı kaynak ağzı açısı ve geometrilerinde gerçekleştirilen kaynakların MIL A 46100 zırh çeliği mikroyapısına ve mekanik özelliklere



etkisi üzerinde yaptıkları çalışmalarda kaynak bölgesinin, ITAB ve ana malzemeye göre oldukça düşük sertlikte olduğunu belirtmişlerdir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için kaynak sonrası ısıl işlemler uygulamış ve kaynak bölgesinin sertlik değerini arttırmıştır. Ancak uygulanan ısıl işlemin zaman maliyet ve verimlilik açısından bir dezavantaj oluşturduğu unutulmamalıdır. Bizim uyguladığımız tez çalışmasında HPAK ve GMAK'da böyle bir problem ile karşılaşılmamış olması uygulanan kaynak yönteminin kaynak kabiliyetinin iyi olduğunu göstermektedir.

### 3.4. Çekme Deneyi

Kaynaklı birleştirme sonucunda ana malzeme ve kaynaklı malzemenin çekme dayanım değerleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Çekme dayanım değerlerinin belirlenmesi için her parametreden 3'er adet çekme işlemi yapılmış ve ortalama değerler alınmıştır.

Çizelge 3.1. Çekme sonrası oluşan kopma dayanımı ve yüzde uzama oranı

Yöntem	Çekme Dayanımı (N/ mm <sup>2</sup> )	Uzama ( %)
ARMOX 500T	1622	8,4
HPAK-1	1150	4
HPAK-2	1195	5
GMAK	1148	4
CMT	718	3

Çekme testi sonucunda numunelerde önceki çalışmalarda olduğu gibi belirgin bir akma noktası görülmemiştir (Merzalı, 2013 ve Kurt, 2015). Çizelge 3.1'de incelendiğinde çekme dayanımlarının ve yüzde uzama değerlerinin ana malzemeye göre azaldığı görülmüştür. Kaynak yöntemleri arasında bir karşılaştırma yapıldığında ise en iyi çekme dayanımının HPAK-2 parametresinde, en düşük çekme dayanımının ve yüzde uzama değerinin ise CMT kaynağı ile birleştirilen numunede elde edilmiştir. Bu durum mikroyapı ve SEM resimlerinde (Bkz. Resim 3.6 ve 3.24) görüldüğü üzere kaynak metali ile ana malzeme arasında difüzyonun yeterli derecede meydana gelmediğinden kaynaklanmaktadır.

Literatür incelendiğinde Kurt, Evcı, Işık ve Işık (2016), ise elektrik ark kaynağı ile farklı ağız geometrisi ile birleştirdiği 1660 MPA çekme dayanım değeri olan MIL A 46100 çeliğini kaynak sonrası çekme dayanım değerini max 773,8 MPA elde etmiştir. HPAK 1 ve 2 parametrelerinde farklı çekme ve % uzama değerleri elde edilmiş olması kaynak yöntemi seçimi olduğu kadar kaynak parametresi optimizasyonun da önemli olduğunu



göstermektedir (Bkz. Çizelge 2.3). Çekme deneyi sonrası oluşan kaynak yöntemlerine ait numunelerin kopma bölgesi görüntüleri örnekleri Resim 3.28’de verilmiştir.



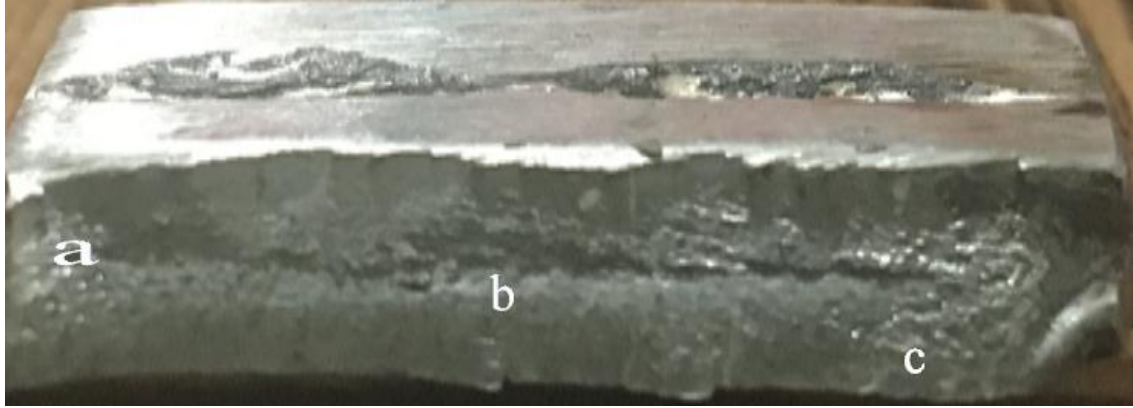
Resim 3.28. Çekme sonrası kaynak yöntemlerine ait kırılma görüntüleri

Resim 3.28 de görüldüğü üzere HPAK ve GMAK kaynak yöntemlerinde numuneler iri taneli bölgeden kopmuş iken CMT kaynak yönteminde ise kaynak bölgesinden kopmuştur. HPAK ve GMAK’daki kaynak bölgesinden kopmaması kullanılan kaynak yönteminin kaynak kabiliyetinin iyi olduğunun göstergesidir. Ayrıca HPAK ve GMAK kaynakları ile birleştirilen numunelerin sertlik testlerinde kaynaklı bölgenin sertliğinin diğer bölgelerden yüksek olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Çünkü CMT kaynağı ile birleştirilen

numunenin kaynak bölgesi sertlik değeri ITAB bölgesinden daha düşük çıkmış ve kopma kaynak metalinden gerçekleşmiştir (Bkz. Şekil 3.1).

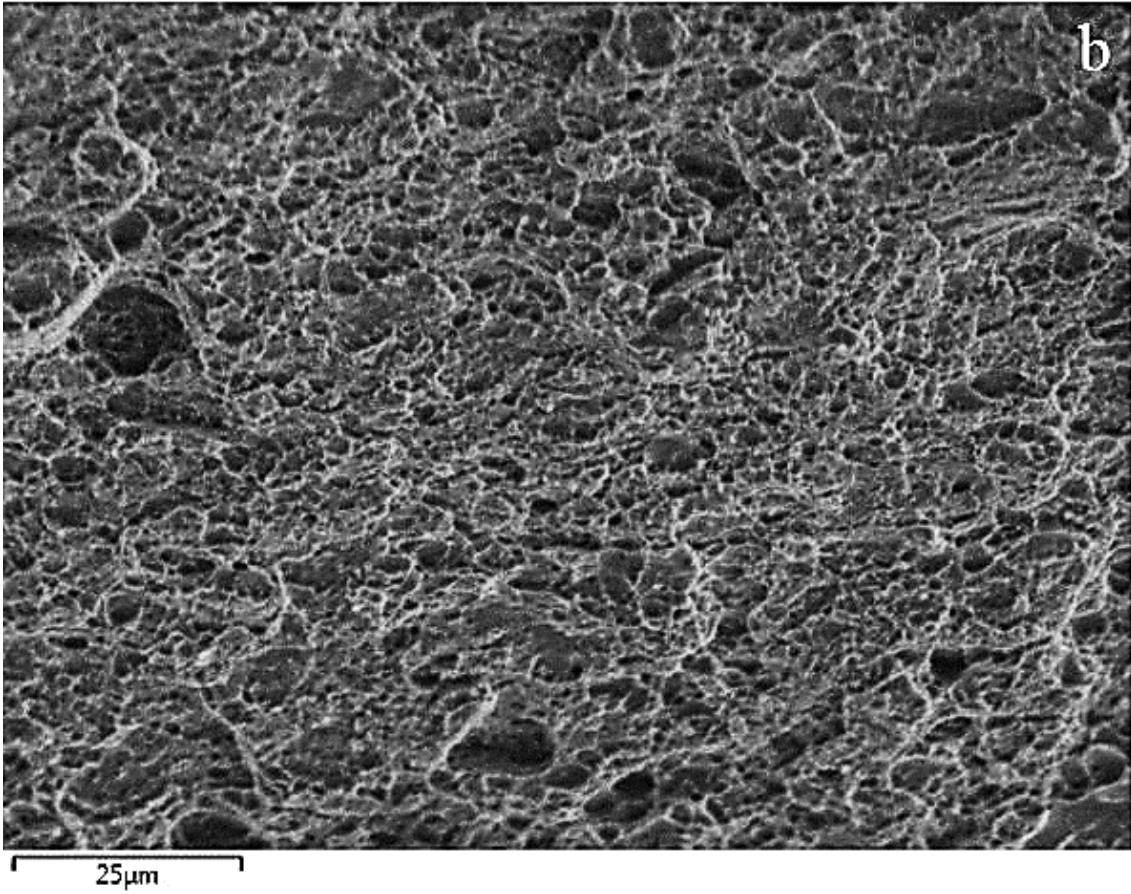
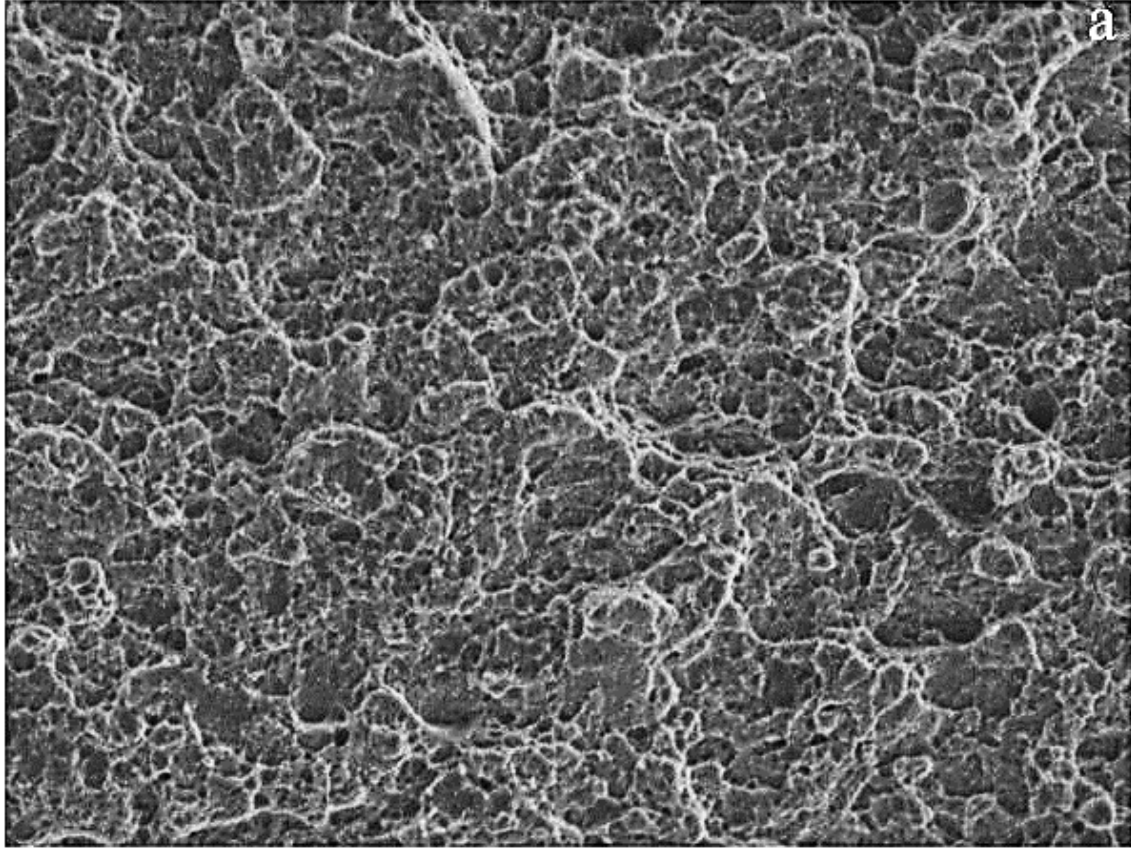
### 3.4.1. Çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri üzerinde fraktografik taramalı elektron mikroskobu (SEM) görünümü

Çekme sonrasında oluşan kırılma yüzeylerinin fraktografik SEM görüntüleri incelenmiştir. Resim 3.29'da görüldüğü üzere çekme numunelerinin kırık yüzeyleri 2 kenar ve bir orta nokta olmak üzere SEM ile incelenmiştir.

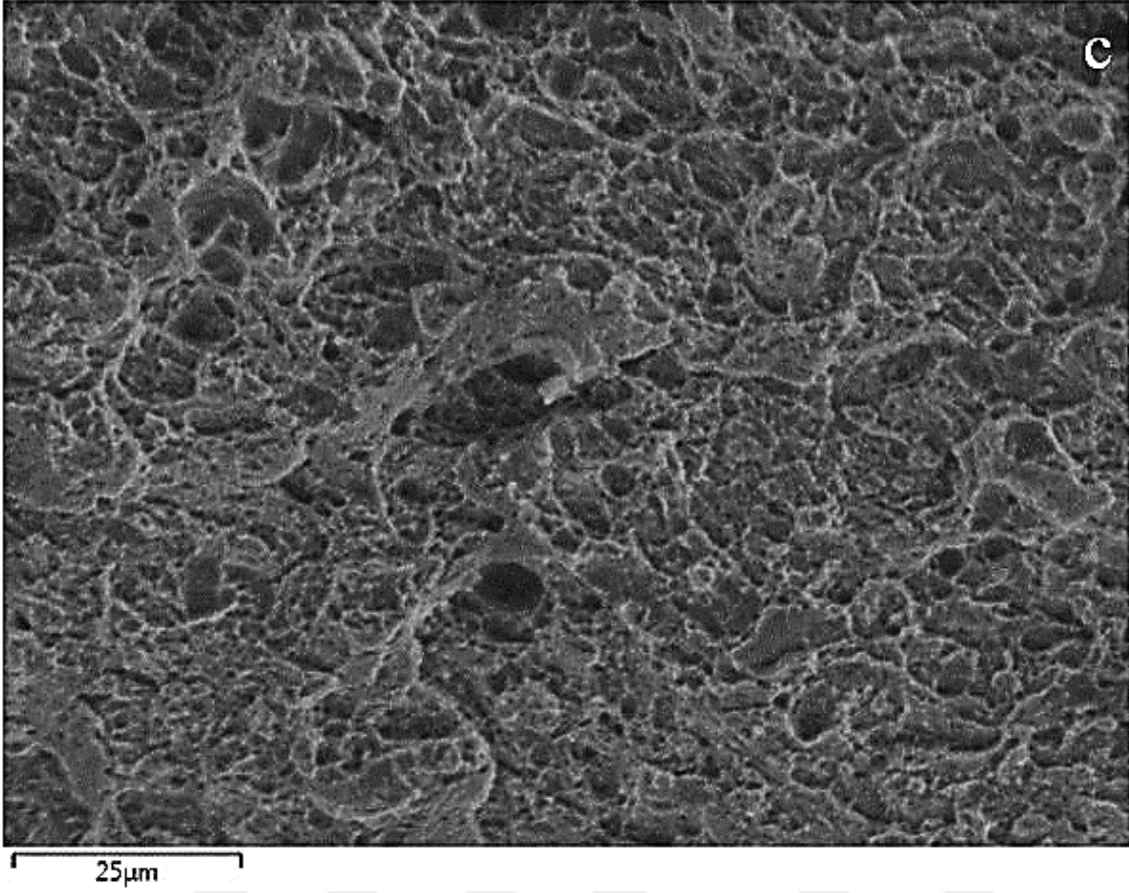


Resim 3.29. Çekme sonrası kırık yüzey fraktografik görüntü bölgeleri

Aşağıdaki Resim 3.30 ve 3.31'de HPAK ile birleştirilen numunelerin her ikisi de plastik deformasyon sonucunda kırıldığı ve kırılmanın sünek olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu kırılma yüzeyini girintili çıkıntılı olması da sünek kırılmayı göstermektedir. Kırılma mekanizması daha çok tane yüzeylerinin birbirinden kopması şeklinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu kırılma mekaniği tekniği ise taneler arası kırılma veya intergranüler kırılma olarak ifade edilmesi mümkün olmaktadır. Çekme kırığı yüzeyindeki incelemeler, sünek kırılma modunu belirten dimple desenlerini de göstermektedir (Janıckı, 2014).

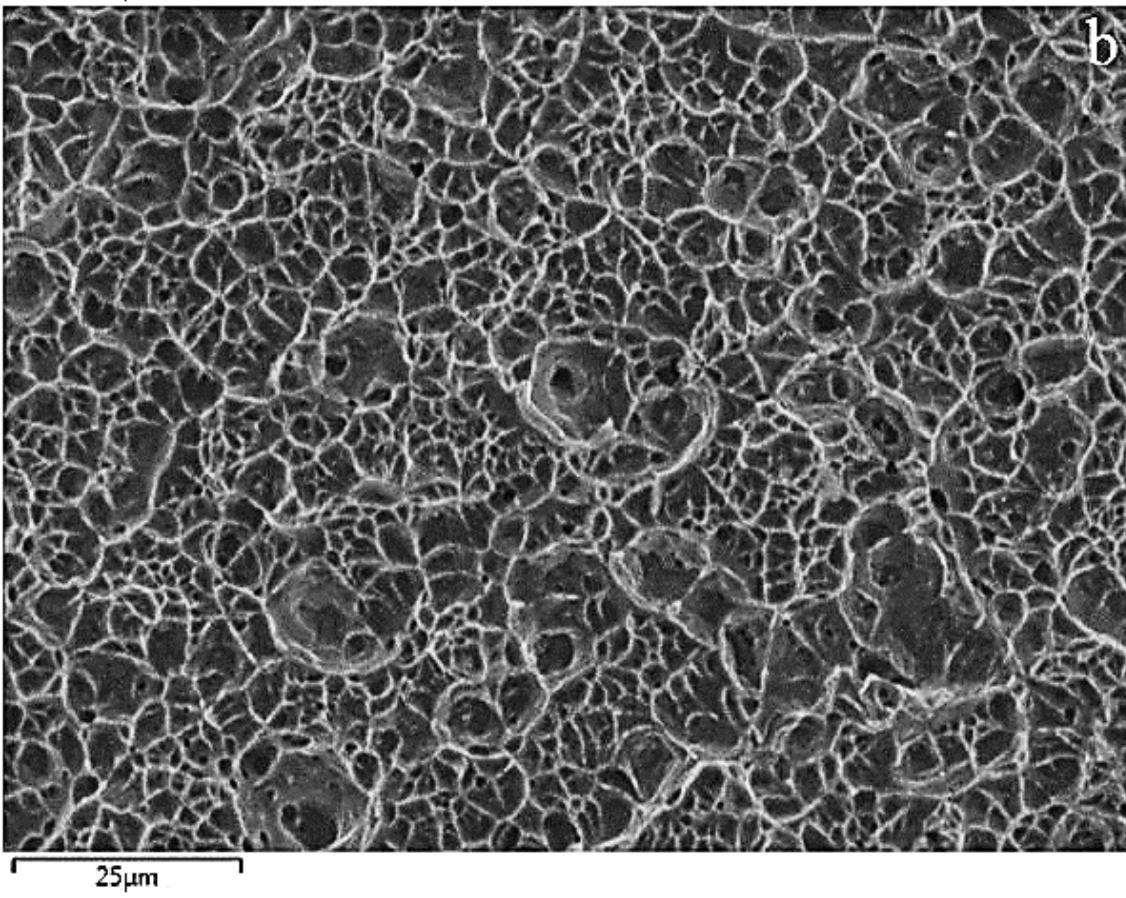
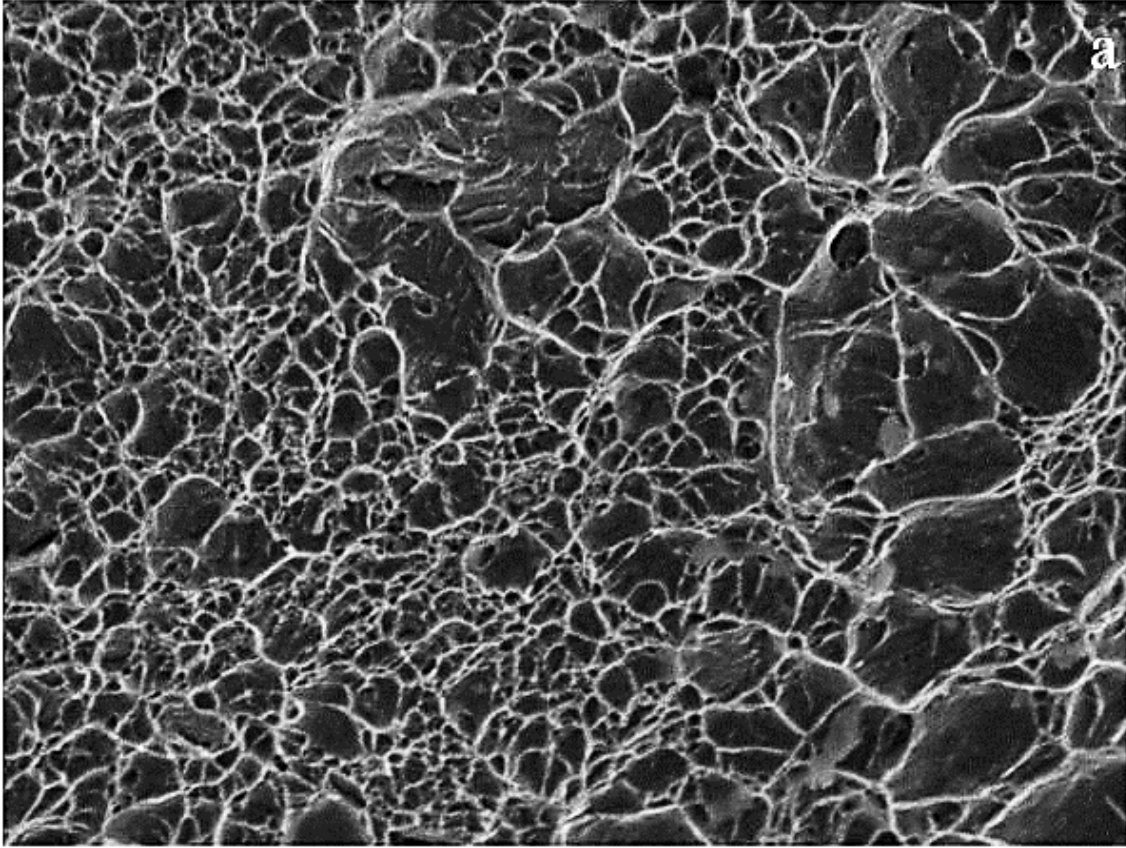


Resim 3.30. HPAK-1 kırılma yüzeyi fraktografik yüzey görüntüsü

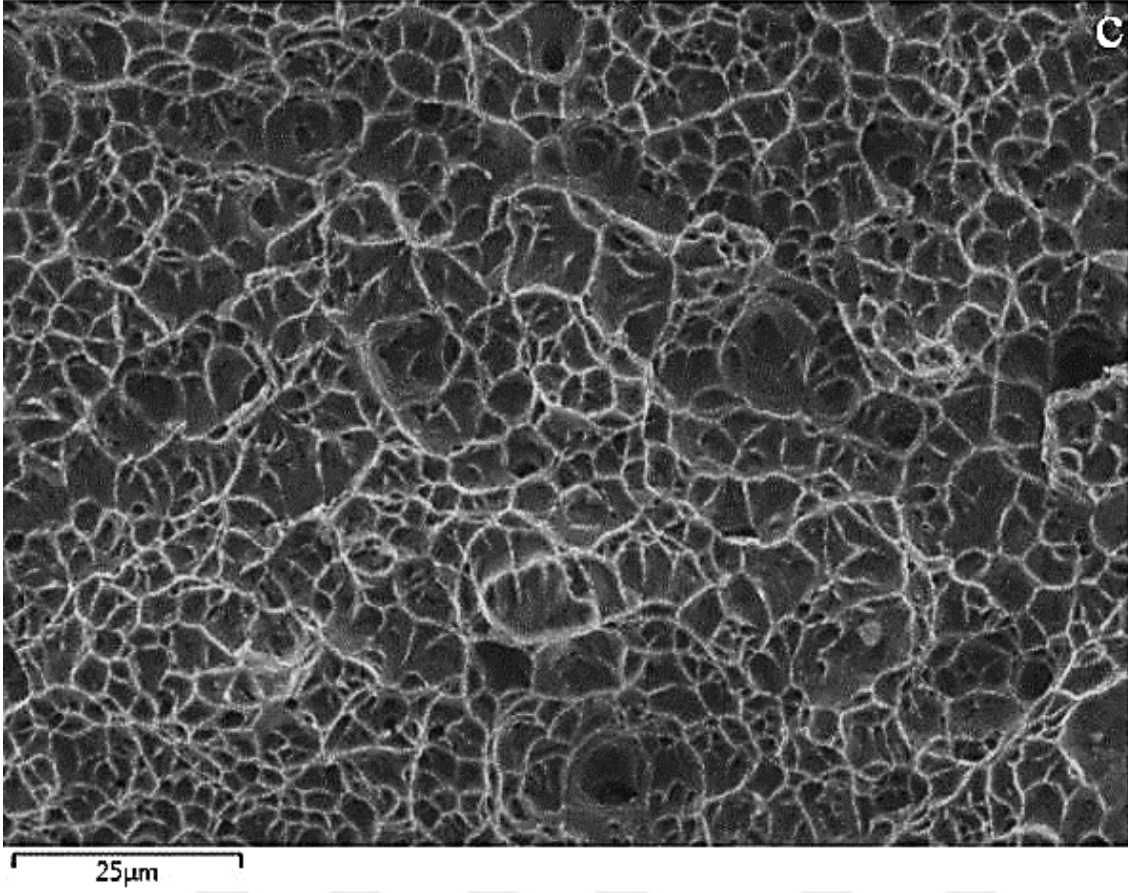


Resim 3.30. (devamı) HPAK-1 kırılma yüzeyi fraktografik yüzey görüntüsü





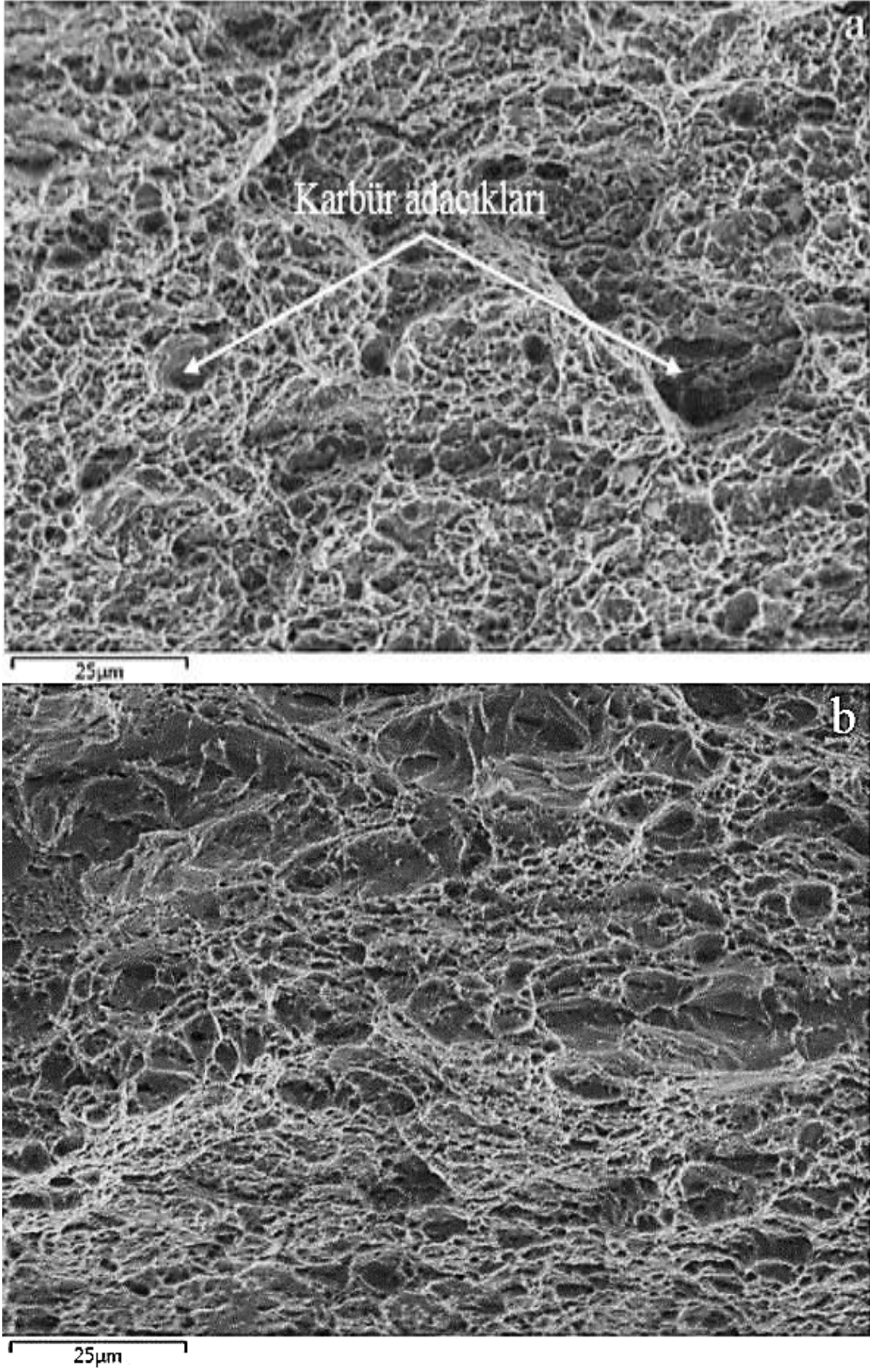
Resim 3.31. HPAK-2 kırılma yüzeyi fraktografik yüzey görüntüsü



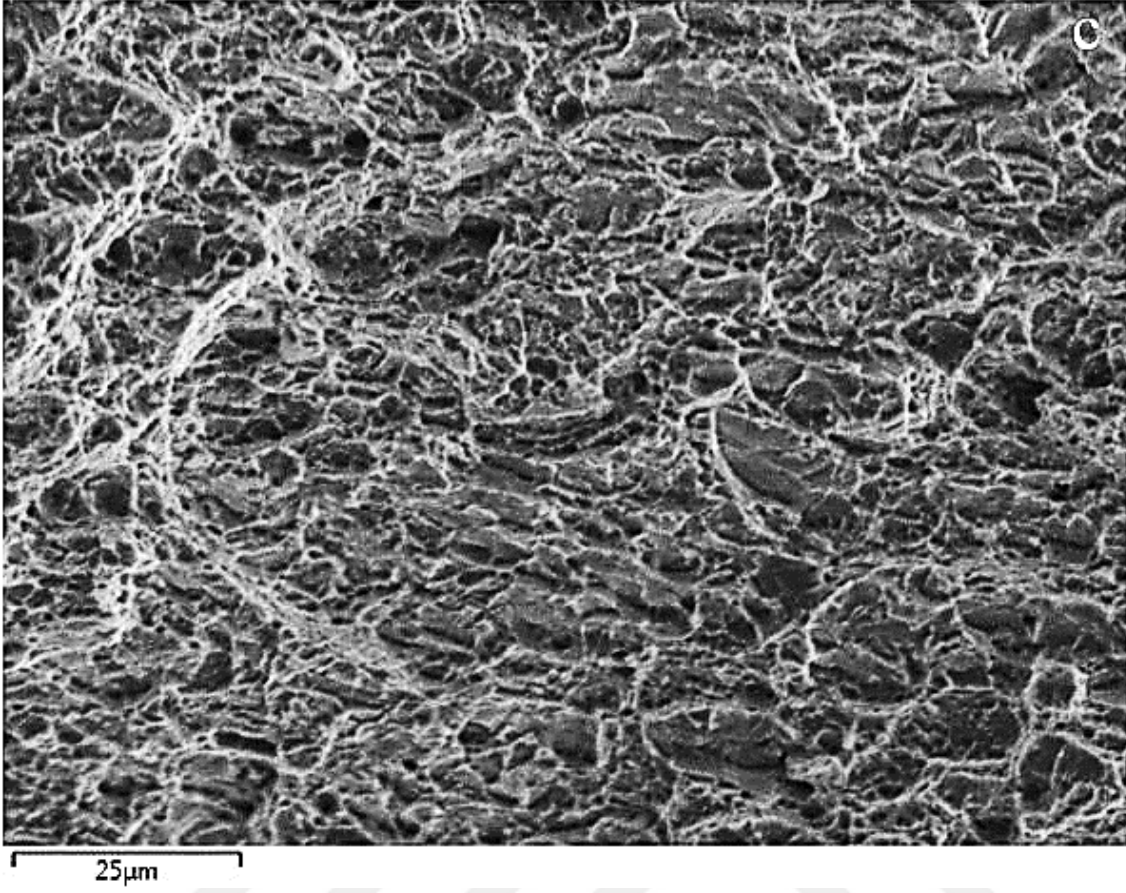
Resim 3.31. (devamı) HPAK-2 kırılma yüzeyi fraktografik yüzey görüntüsü

Aşağıdaki Resim 3.32’de GMAK ile birleştirilen numunenin kırılma yüzeyi incelendiğinde HPAK’a göre sünekliliğinin daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum taneler arasında gözüken karbür adacıkları ile desteklenmiş olup numuneden alınan sertlik değerleri de HPAK’a göre daha yüksek çıkmış olması bu tezi doğrular niteliktedir.



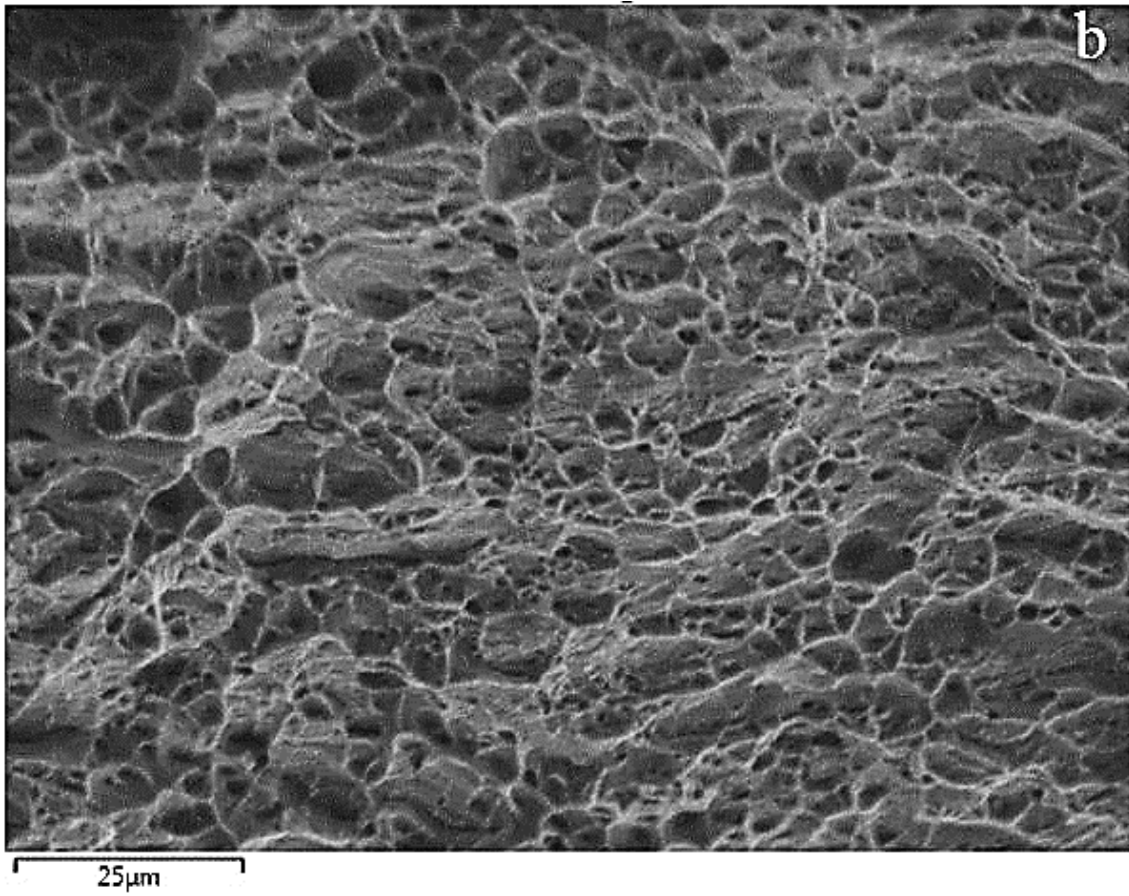
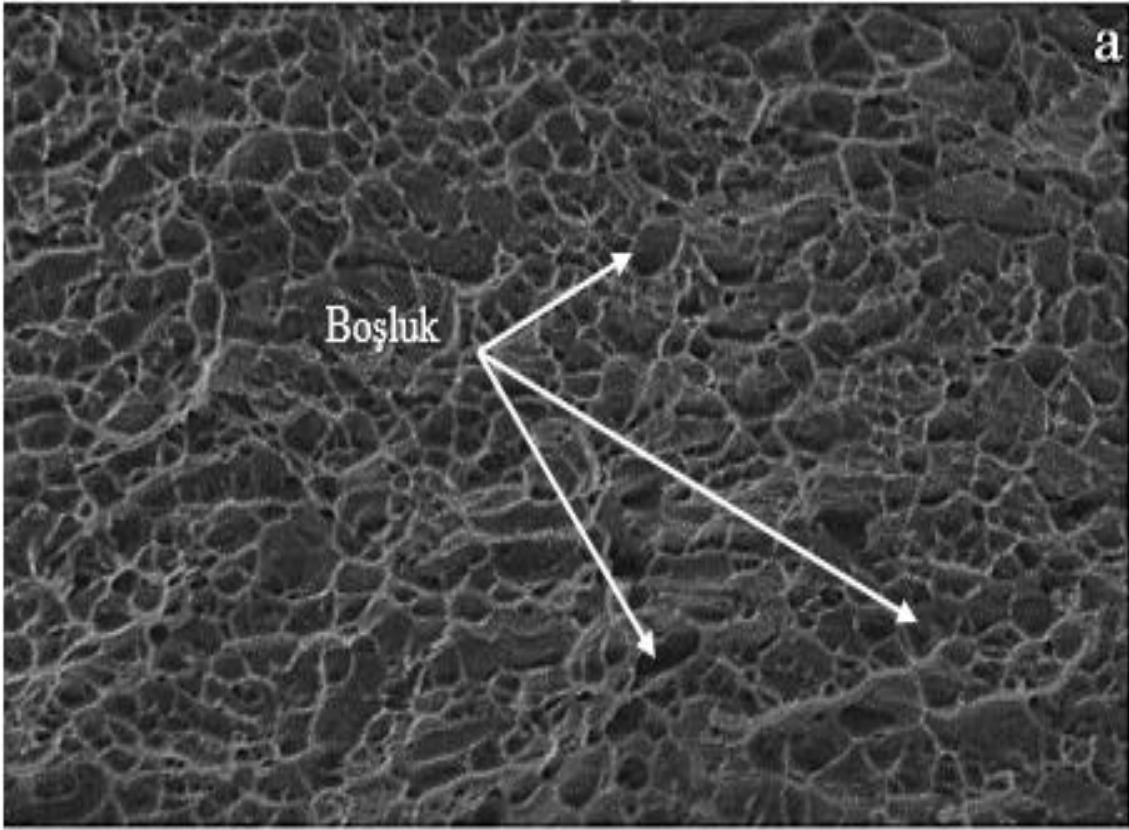


Resim 3.32. GMAK kırılma yüzeyi fraktografik yüzey görüntüsü



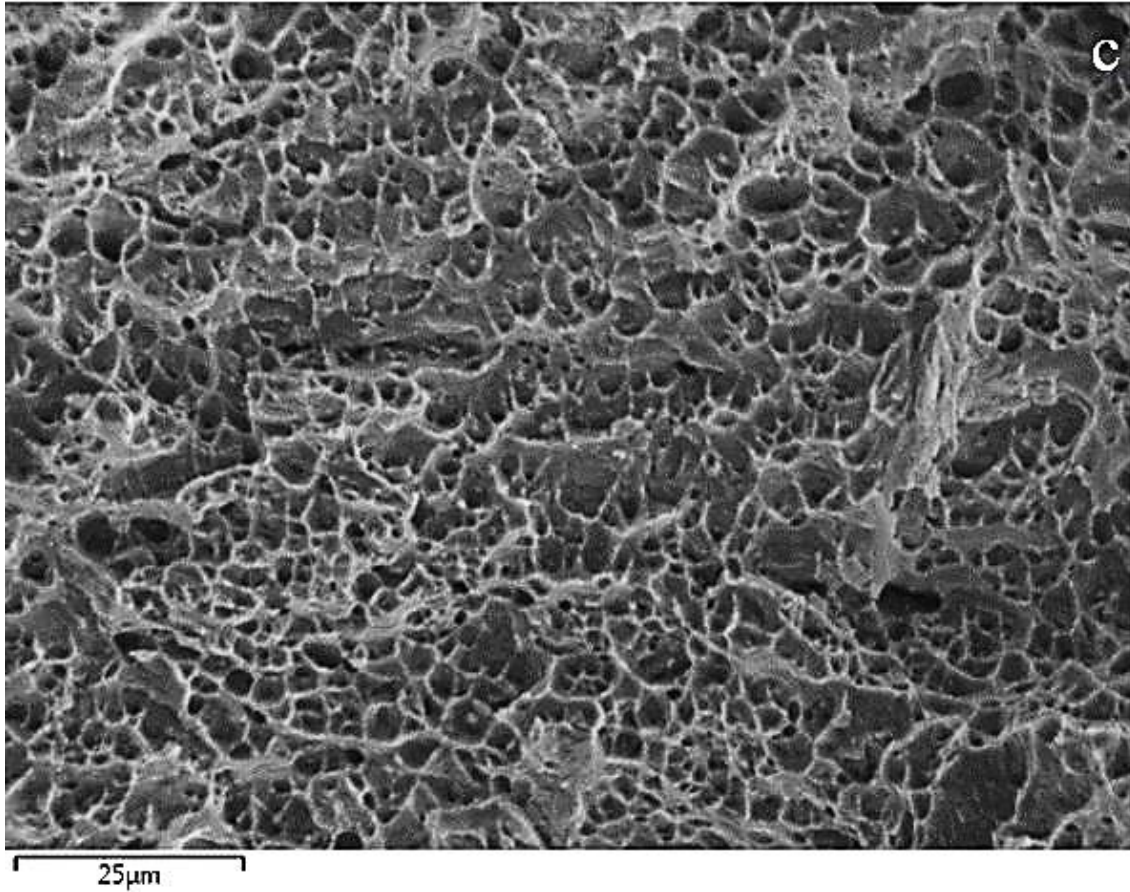
Resim 3.32. (devamı) GMAK kırılma yüzeyi fraktografik yüzey görüntüsü

Aşağıdaki Resim 3.33’de CMT ile birleştirilen numunenin kırılma yüzeyi incelendiğinde sünek kırılma şeklinde gerçekleşmiş olmakla beraber kaynak metalinde boşlukların varlığı dikkat çekmektedir. Bu durum SEM resimlerinde de gözlemlenmiş olup kaynak metali ana metal arasında difüzyon oluşmadığı görülmüştür.



Resim 3.33. CMT kırılma yüzeyi fraktografik yüzey görüntüsü





Resim 3.33. (devamı) CMT kırılma yüzeyi fraktografik yüzey görüntüsü

### 3.5. Üç Nokta Eğme Deneyi

Çizelge 3.2’de HPAK 1-2, GMAK ve CMT kaynak yöntemlerine ait çizelge de görülmekte olan deney koşullarındaki yapılan bükme deneyinde kırılma bölgesi tüm malzemelerde haz noktalarından gerçekleşmiştir. Haz bölgesinin zayıf sünekliğe sahip olduğu görülmüştür. Bükme deneyi yapılan kaynak kök ve yüz bölgelerinde herhangi bir hasar ve çatlak oluşumuna gözlenmemiştir. Bu durum ARMOX 500T zırh çeliğinin lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmesi üzerine Janicki (2014), yaptığı çalışmada zırh çeliğinin kaynaklı numunesinde eğme sonucu kırılmanın haz bölgesinden gerçekleştiğini belirtmiş ve kaynak bölgesinde herhangi bir hasarlanma oluşumuna rastlamamıştır.

Çizelge 3.2. Kaynak yöntemlerine ait eğme deneyi

Eğme	Mandrel Çapı	Mesnetler Arası Mesafe	Eğme Açısı
Kaynak yüz ve kök kısmı	18	29	180°

### 3.6. Darbe Çentik Deneyi

Çentik darbe testi için her tüm yöntemlerden kaynak bölgesi ve ITAB'dan alınan 3'er adet test numunesi alınarak çıkan sonuçların ortalaması joule cinsinden Çizelge 3.3'da 20 °C ve Çizelge 3.4'de -50 °C verilmiştir.

Darbe tokluğunun, ortam sıcaklığına ve kullanılan kaynak parametrelerine göre kaynak bölgesi ve ITAB'da değiştiği görülmüştür. HPAK ve GMAK yöntemleri ile kaynaklı numunelerin darbe tokluk değerlerinin, ana metalden daha yüksek olduğu görülmüştür. CMT kaynak yönteminde, difüzyon işleminin tam olarak gerçekleşmemesine rağmen östenitik yapıdaki telden dolayı kaynak bölgesi darbe tokluğu ana malzemeye göre daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. Bu durum Robledo, Gómez ve Barrada (2011), tarafından da GMAK yöntemi ile birleştirilen MIL A 46100 zırh çeliği kaynağında da belirtilmiş olup çıkan sonuçların zırh çeliğinin kaynağının uygun bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Saxena ve diğerleri (2018), yaptığı çalışmada östenitik yapıdaki telin darbe tokluğunda % 20 ve ferritik yapıdaki telin ise %12 azalma meydana getirdiği belirtmiş ve östenitik yapıdaki telin literatür çalışmalarında uygun olduğu görülmüştür.

Darbe tokluğunun sıcaklık ile değişimi Çizelge 3.3-3.4'de görüldüğü üzere düştüğü görülmüştür. Bu durum literatürde farklı malzemelerin ve kaynak yöntemleri ile çalışan birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir (Kwok, Fong, Cheng ve Man, 2006; Ibrahim, Ibrahim ve Khalifa, 2010; Sathiya, Aravinda, Ajith, Arivazhagan ve Haq, 2010).

Çizelge 3.3. 20 °C'de ARMOX 500T zırh çeliği ve kaynaklı birleştirmelerin çentik darbe dayanımı

Ana Malzeme ve Yöntemler	Çentik Bölgesi	Deney Ortam Sıcaklığı (°C)	Darbe Çentik Çarpma Enerjisi KV2 ( J )
Ana malzeme	Malzeme		14,7
HPAK-1	ITAB	20 °C	14
	Kaynak		14,3
HPAK-2	ITAB		13,6
	Kaynak		13,8
GMAK	ITAB		12,3
	Kaynak		12,4
CMT	ITAB		12
	Kaynak		20

Çizelge 3.4. -50 °C'de ARMOX 500T zırh çeliği ve kaynaklı birleştirmeler çentik darbe dayanımı

<b>Ana Malzeme ve Yöntemler</b>	<b>Çentik Bölgesi</b>	<b>Deney Ortam Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Darbe Çentik Çarpma Enerjisi KV2 ( J )</b>
Ana malzeme	Malzeme		14,3
HPAK-1	ITAB	-50 °C	12,1
	Kaynak		13,1
HPAK-2	ITAB		11,3
	Kaynak		12,3
GMAK	ITAB		11
	Kaynak		11,2
CMT	ITAB		10,3
	Kaynak		18,5



## 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada savunma endüstrisinden yaygın olarak kullanılan ARMOX 500T zırh çeliğinin Hibrit Plazma Ark Kaynağı (HPAK), Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAK) ve Soğuk Metal Transfer Kaynağı (CMT) yöntemleri kullanarak birleştirilmiştir. Kaynak yöntemlerinin ve parametre değerlerinin, kaynaklı birleştirme işlemi üzerinde etkisi analiz etmek ve ergime-soğuma sonrası oluşan makroyapı ve mikroyapı bölgeleri incelenmiş kaynaklı bölgelerinin, ana malzemeyle ve yöntemlerin birbirleri ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen, sertlik, çekme, eğme ve darbe çentik deneyleri sonuçları analiz edilmiştir.

Kaynaklı birleştirme yapılan numunelerin deneysel çalışmalarının sonucu ve önerileri aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

1. Kaynaklı birleştirme sonrası gözle yapılan muayenede kaynak bölgelerinde makro ve mikro kaynak çatlaklar görülmemiştir. Uygulanan kaynak yöntemi, ilave tel, koruyucu gaz oranları ve belirlenen kaynak parametre değerlerinin birleşim beklentilerini olumlu yönde karşıladığı görülmüştür. Kullanılan ilave telin hassas ve yüksek Mn içeriği zırh çelikleri kaynağında görülen kronik sorun olan sıcak çatlak oluşumunu engellemiştir.
2. HPAK-2 incelendiğinde, HPAK-1 ve GMAK yöntemine göre nozul meme çapının küçülmesi kaynak dikişi ve ITAB bölgesinin de daha dar olmasını sağlamanın yanında kaynak dikişlerinde daha güzel bir görünüm elde edilmiştir. CMT yönteminde düşük ısı girdisi ve difüzyon işleminin gerçekleşmemesi nedeni ile yayınımsız kaynak dikişi ve ITAB bölgesinde daha dar görünüm elde edilmiştir.
3. Optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde, HPAK ve GMAK yöntemlerinde ana malzeme ve kaynak bölgesi arasında difüzyon sağlandığı, CMT kaynak yönteminde ise yeterli difüzyon sağlamadığı, bunun da çekme dayanımı düşürdüğü görülmüştür.
4. HPAK ve GMAK kaynak bölgesinin mikroyapısı incelendiğinde çoğunluğu karışık beynitik bir yapı olmakla beraber az miktarda da martenzitik bir yapıdan oluşmuştur. CMT yönteminde ise kaynak bölgesinin hızlı ısıtma ve soğutma sonucu tanelerde büyüme meydana gelmesi ile oluşan karışık mikroyapı martenzitik ve kısmen  $\delta$ -ferrit fazını oluşturmuştur.  $\delta$ -ferrit fazı kaynak bölgesinde kırılma hızını arttıran bir fazdır. Literatürde bu tür yapılar için martenzitik dönüşümden dolayı kaynak bölgelerinde kalıntı gerilim gidermek için ısıl işlem gerekliliği öngörülmektedir.
5. HPAK ve GMAK yöntemlerinde, en yüksek sertlik değeri kaynak bölgesinde elde edilmiştir. Zırh çeliklerinin elektrik ark veya diğer kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi sonucunda oluşan ve büyük bir problem olan kaynak bölgesinin ana malzemeden daha düşük sertlikte olduğu veya ITAB ve kaynak bölgesi sertlik değişimlerinin sergilendiği durum sadece CMT kaynak yönteminde ölçülmüştür.
6. Çekme sonrası kırık yüzeylerin fraktografik incelemesinde HPAK ile birleştirilen numunelerin plastik deformasyon sonucunda kırıldığı ve kırılmanın sünek olarak gerçekleştiği görülmektedir kırılma yüzeyleri girinti çıkıntı şeklinde birbirinden yüzey

kopmaları yaşanmıştır. Bu kopma taneler arası kırılma veya intergranüler kırılmadır. GMAK ile birleştirilen numunelerde kırılma HPAK yöntemine göre daha sünek gerçekleşmiş SEM’de karbür adacıkları da bu kırılma durumunun oluştuğunu ve elde edilen sertliğin de yüzey analizini destekler durumdadır. CMT yönteminde kırılmanın sünek olduğu kaynak bölgesi difüzyon oluşmamış olması nedeniyle boşluklu yapılar gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesinde ergime sonucu oluşması istenen difüzyon için yeterli sıcaklık değerine ulaşılmalıdır. Bu sıcaklık değerleri de kırılma mekaniğine yön vermektedir.

7. Hibrit plazma ark kaynağının diğer yöntemlerden avantajı ise, malzemenin içyapısını ve mekanik özelliklerini belirleyen uygun soğuma hızı elde edilmesidir. Bu soğuma hızını ise hibrit plazma ark kaynak işleminde anahtar deliğinin ve dolgu metali birikiminin koaksiyel (eş eksenli) olarak uygulanmasının geleneksel çok geçişli gaz metal ark kaynaklarına kıyasla kontrollü ısı girişi ile ark geçiş süresi sağlamasıdır.
8. HPAK yönteminde yüksek hızlı plazma jetinin veya damlacık/kaynak havuzu dinamiğinin oluşturarak kaynak bölgesinde yeterli düzeyde nüfuziyet sağlanmıştır. Bu çalışmada konveksiyonel-difüzyon çalışmalarının önemi gösterilmiştir.
9. Robotik sistemde yapılan kaynaklarda manuel yapılan kaynaklara göre ark stabilizasyonun daha kararlı ve sürekliliği konusunun önemine dikkat çekilmiştir ve sadece kaynak yöntemlerinden kaynaklı olan kaynak metalinin soğuma süresi ve şeklinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi olduğu belirlenmiştir.
10. Zırh çeliklerinin kaynak bölgesi ve ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) daha iyi sonuçlar almak için yapılacak deneysel çalışmalar ve bu çalışmaların geliştirilmesi sonucunda savunma endüstrisine güçlü bir katkı sağlanmış olacaktır. Zırh çeliklerinin kaynak kabiliyeti arttırılması için farklı kaynak yöntemleri, uygun parametre değerleri, farklı alaşımlı yapıdaki ilave teller, stabil ısı girdisi sağlanması soğuma periyodunun kontrollü olması ve kaynak sonrası ısıl işlem uygulama çalışmaları önem arz etmektedir. Kaynak yöntemleriyle, birbirinden farklı kimyasal ve fiziksel özellikteki malzemelerin birleştirilmesi sonucunda oluşan, yeni metalurjik ve mekanik özellikler bu alandaki çalışmaların geliştirilmeye açık olduğunu göstermektedir.
11. Savunma amacı ile kullanılan zırhların geliştirilmesi ve birleştirilebilmesi üzerine yapılacak bilimsel çalışmaların, zırhların koruma görevini en üst düzeyde gerçekleştirebilmesine, oluşabilecek hasarlanma mekaniği sonrası zırhın koruma özelliği ve kolay onarabilirliği açısından önem arz etmektedir.

## KAYNAKLAR

- Anık, S., 1991. Kaynak Tekniği El Kitabı. Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü Gedik Eğitim Vakfı Yayını, 250 s, İstanbul.
- Atabaki, M.M., Ma, J., Yang, G., and Kovacevic, R., 2014. Hybrid Laser/Arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations. Materials and Design, Research Center for Advanced Manufacturing (RCAM), Southern Methodist University, Dallas, Texas 75205, USA.
- Bai, Y., Gao, H.M., and Qiu, L., 2010. Droplet transition for plasma-MIG welding on aluminium alloys. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 10(5):449.
- Balakrishnan, M., Balasubramanian, V., and Reddy, G.D., 2012. Effect of PTA Hardfaced Interlayer Thickness on Ballistic Performance of Shielded Metal Arc, Welded Armor Steel Welds. Journal of Materials Engineering and Performance, ASM International, 1059-9495.
- Balakrishnan, M., Balasubramanian, V., and Reddy, G.D., 2013. Effect of Hardfacing Consumables on Ballistic Performance of Q&T Steel Joints, Defence Technology 9:249-258.
- Barényi, I., 2014. Simulation of Armox steels mechanical properties degradation in haz after selected thermal cutting processes. University Review, 8(3-4):18-22.
- Bayar, M., 2008. Zırh Teknolojilerindeki Gelişmeler. T.C. M.S. B. Savunma Sanayii Müsteşarlığı Ulusal Süreli Yayın. ISSN-1307-8380 (5):1-104, Ankara.
- Bitharas, I., McPherson, N.A., McGhie, W., Roy, D., and Moorea, A.J., 2017. Visualisation and optimisation of shielding gas coverage during gas metal arc welding. Journal of Materials Processing Technology, 255:451-462.
- Cabrilo, A., Geric, K., Jovanovic, M., and Vukic, L., 2018. Weldability and Impact Energy Properties of High-Hardness Armor Steel. Journal of Materials Engineering and Performance, 27(3):1281-1295.
- Caia, J., Fenga, Y., Zhoua, J., Li, Y., Zhanga, X., and Wud, C., 2018. Numerical analysis of weld pool behaviors in plasma arc welding with the lattice Boltzmann method. International Journal of Thermal Sciences, 124,447-458.
- Czyryca, E.J., 1993. Advances in High Strength Steel Technology for Naval Hull Construction. Key Engineering Materials, Vols. 84-85, pp. 491-520.
- Das, B., Yadaiah. N., Ozah, R., Chowdhury, S., Mondal, A.K., and Muralidhar, M., 2018. A Perspective Review on Estimation of Keyhole Profile during Plasma Arc Welding Process. Materials Today, 5(2):6345-6350.
- Datta, R., Mukerjee, D., Jha, S., Narasimhan, K., and Veeraraghavan, R., 2002. Weldability characteristics of shielded metal arc welded high strength quenched and tempered plates. Journal of Materials Engineering and Performance, 11(1):5-10.

- Detao, C., Shanguo, H., Shida Z., Ziyi, L., Zhang, Y., ve Kai. W., 2017. Microstructure and corrosion resistance of Al5083 alloy Hybrid Plasma-MIG welds. *Journal of Materials Processing Technology*, S0924-0136(17): 30624-6.
- Devakumaran, K., Ananthapadmanaban, M.R., Ghosh, P.K., 2015. Variation of chemical composition of high strength low alloy steels with different groove sizes in multi-pass conventional and pulsed current gas metal arc weld depositions. *Defence Technology*, 11(2):147-156.
- Eder, T., *The CMT Process - News and Its Advantages in Industry*, SAE Technical., 2010.Fronius International GmbH, 32-0071.
- El-Batahgy, A.M., Miura, T., Ueji, R., and Fujii, H., 2016. Investigation into feasibility of FSW process for welding 1600 MPa quenched and tempered steel. *Materials Science & Engineering A*, 651:904–913.
- Falkenreck, T., Kromm, A., and Böllinghaus, T., 2017. Investigation of physically simulated weld HAZ and CCT. *International Institute of Welding*, 62(1):47-54.
- Fei, Z., Pana, Z., Cuiuria, D., Lia, H., Wua, B., Dinga, D., Sua, L., and Gazder, A.A., 2018. Investigation into the viability of K-TIG for joining armour grade quenched and tempered steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 32:482-493.
- Fras, T., Roth, C.C., and Mohr, D., 2018. Fracture of high-strength armor steel under impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 111:147-164.
- Gao, M., Zeng, X., Yan, J., Hu Q., 2008. Microstructure characteristics of laser-MIG hybrid welded mild steel. *Applied Surface Science*, 254:5715-5721.
- Grajcar, A., Rózanski, M., Kaminska, M., and Grzegorzcyk, B., 2014. Study on Non-Metallic Inclusions in Laser-Weided TRIP-Aided Nb-Microalloyed Steel. *Archives of Metallurgy and Materials*, 59(3):1163-1169.
- GSI SLV ve ODTU KTM., 2013.GSI SLV-TR Kaynak Teknoloji Test ve Mesleki Gelişim Merkezi ders notları. Ankara.
- Hanhold, B., Babu, S.S., and Cola, G., 2013. Investigation of heat affected zone softening in armour steels Part 1-Phase transformation kinetics. *Science and Technology of Welding and Joining*, 18(3):247-252.
- Hsiao, Y.F., Tarng, Y.S., and Huang, W.J., 2007. Optimization of Plasma Arc Welding Parameters by Using the Taguchi Method with the Grey Relational Analysis. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(1):51-58.
- Hsu, Y., and Rubinsky, B., 1988. Two-dimensional heat transfer study on the keyhole plasma arc welding process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 31(7):1409-1421.

- Ibrahim, I.A., Mohamat, S.A., Amir, A., and Ghalib, A., 2012. The Effect of Gas Metal Arc Welding (GMAK) processes on different welding parameters. International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors. Procedia Engineering, 41:1502-1506
- Ibrahim, O., Ibrahim, S., and Khalifa, T.A.F., 2010. Effect of aging on the toughness of austenitic and duplex stainless steel weldments. Journal of Materials Science & Technology, 26(9):810-816.
- İnternet 1: ArmoX 500T üreticisi SSAB firmasının ürün bilgilendirme kataloğu. URL: <http://www.ssab.com.tr/products/brands/armox>, Son Erişim Tarihi: 20.11.2018.
- İnternet 2: Sakarya Üniversitesi veri tabanlı olarak ulaşılan bilgi paylaşım sayfası. URL: [http://contectent.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/71097/51182/plazma\\_kayna%C4%9F%C4%B1.pdf](http://contectent.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/71097/51182/plazma_kayna%C4%9F%C4%B1.pdf), Son Erişim Tarihi: 10.05.2018.
- İnternet 3: İmalat sanayi dergisi Makinatek oluşumu dijital arşiv paylaşımı. URL: <http://makinatek.com.tr/uncategorized/yleri-ve-ekonomik-bir-kaynak-yontemi-hibrit-plazma-ark-kaynady/>, Son Erişim Tarihi:13.06.2018.
- İnternet 4: ODTÜ KTTMM version '14. Hibrit plazma-gaz metal ark kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı/prosesi, çelik ve alüminyum alaşımları çalışmaları, URL: <http://docplayer.biz.tr/713750-Hibrit-plazma-gaz-metal-ark-kaynagi-ve-surtunme-karistirma-kaynagi-prosesi-çelik-ve-aluminyum-alaşimlari-odtu-ktmm-version-14.html>, Son Erişim Tarihi: 05.01.2018.
- İnternet 5: Kaynak ekipman ve sarf malzemeleri ESAB firması ürün katalog paylaşımı, URL: <http://www.esabna.com/us/en/products/index.cfm?useaction=home.products&productsCode=410151&tab=2>, Son Erişim Tarihi: 14.04.2018
- Janicki, D., 2013. Fiber laser welding of nickel based superalloy Inconel 625. The Silesian University of Technology, The Faculty of Mechanical Engineering, Welding Department, Konarskiego Street 18A, 44-100 Gliwice, Poland.
- Janicki, D., 2014. Disk laser welding of armor steel. Archives of Metallurgy and Materials, Vol 59, Issue 4. Silesian University of Technology, welding department, 18a Konarskiego Str., 44-100 Gliwice, Poland.
- Jena, P.K., Senthil, P.P., and Kumar, K.S., 2016. Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel. Journal of Applied Research and Technology, 14(1):47-53.
- Jia, C.B., Wu, C.S., Zhang, Y.M., 2009. Sensing controlled pulse key-holing condition in plasma arc welding, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 19(2):341-346.
- Kara, S., 2012. Çelik esaslı zırh malzemesinin 307si elektrotu ile kaynak edilebilirliğinin ve mikroyapı üzerindeki etkisinin deneysel araştırılması. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

- Kara, S., ve Korkut, M.H., 2012a. Zırh çeliklerinde kaynak ağzı tasarımının metalurjik ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9(1):35-45.
- Kara, S., ve Korkut, M.H., 2012b. Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan zırh plakalarında kaynak sonrası ısıtma işleminin birleşim mukavemetine etkisinin araştırılması. *Savunma Bilgileri Dergisi*, 11(2):159-171.
- Karadeniz, E., Öz Saraç U., ve Yıldız C., 2007. The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding process. *Materials & Design*, 28(2):649-656.
- Karagöz, Ş., ve Atapek, H., 2007. Bor katkılı zırh çeliklerinin kırılma davranışı. 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı. 186-196. İstanbul.
- Karagöz, Ş., ve Atapek, H., 2009. Fiziksel metalurjik esaslar ile geliştirilen bor katkılı zırh çeliğinin kaynaklanabilirliği. 1. Uluslar Arası Kaynak Teknolojileri Konferansı. Welding Technology Society Gazi Üniversitesi, 840-849 Ankara.
- Katı, N., Bölükbaşı, M., ve Ozan, S., 2018. Inconel 718 süper alaşımın plazma ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde akım şiddetinin etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2): 595-601.
- Kılıç, M., 2008. AISI 304 paslanmaz çeliği ve 1040 çelik çifti'nin plazma kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi.
- Kılıç, N., Bedir, S., Erdik, A., Ekici, B., Taşdemirci, A., ve Gül den, M., 2014. Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile. *Materials and Design*, 63:427-438.
- Kılıç, N., ve Ekici, B., 2013. Ballistic resistance of high hardness armor steels against 7.62 mm armor piercing ammunition. *Materials and Design*, 44:35-48.
- Kim, I.S, Son, J.S., Kim, I.G., Kim, J.Y., and Kim, O.S., 2003. A study on relationship between process variables and bead penetration for robotic CO<sub>2</sub> arc welding. *Material Processing Technology*, 136(1-3):139-145.
- Klimpel, A., Kik, T., Górka, J., Czuprynski, A., and Hajduk, P., 2009. Robotized PTA surfacing of nanomaterial layers. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 37(2):644-651.
- Klimpel, A., Luksa, K., Burda, M., 2010. Structure and properties of GMA surfaced armour plates. *International Scientific Journal published monthly by the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering, Archives of Materials Science and Engineering* 43(2):109-116.
- Köse, C., ve R, Kaçar., 2016. Lazer kaynağı ile birleştirilen AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi. *Technological Applied Sciences*, 11(4):98-109.
- Kurt, S., 2015. Farklı kaynak ağzı açısı ve geometrilerinde gerçekleştirilen kaynakların MIL A 46100 zırh çeliği mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisinin deneysel ve



sayısal olarak incelenmesi. T.C. Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Enstitüsü Teknoloji Yönetimi Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.

- Kurt, S., Evcı, C., Işık, H., ve Işık, M.S., 2016. Farklı kaynak ağız açılarının 307Si elektroduyla kaynak edilmiş MIL A 46100 Zırh Çeliğinin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(1):155-162.
- Kuzmikova, L., 2013. An Investigation of the weldability of high hardness armour steels. Doctor of Philosophy thesis Faculty of Engineering. University of Wollongong Australia.
- Kwok, C.T., Fong, S.L., Cheng, F.T., and Man, H.C., 2006. Pitting and galvanic corrosion behavior of laser-welded stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 176(1-3):168-178.
- Li, Y., Feng, Y., Li, Y., Zhang, X., and Wu, C., 2016. Plasma arc and weld pool coupled modeling of transport phenomena in keyhole welding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92:628–638.
- Li, Y., Feng, Y., Zhang, X., and Wu, C., 2018. An evolutionary keyhole-mode heat transfer model in continuous plasma arc welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117:1188-1198.
- Lisiecki, A., 2013. Diode laser welding of high yield steel. Proc. Of SPIE Vol. 8703 87030S,1-11.Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Welding Department, Konarskiego 18A Street, 44-100 Gliwice, Poland.
- Liu, S.Z., 1992. Metallography of HSLA steel weldments. *Key Engineering Materials*, Vols. 69-70:1-20.
- Liu, X.F., Wua, C.S, Jia, C.B., and Zhanga, G.K., 2017. Visual sensing of the weld pool geometry from the topside view in keyhole plasma arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 26:74-83.
- Liu, Z., Wu, C.S., and Gao, J., 2013. Vision-based observation of keyhole geometry in plasma arc welding. *International Journal of Thermal Sciences*, 63:38-45.
- Liu, Z.M., Wu, C.S., and Chen, M.A., 2012. Visualizing the influence of the process parameters on the keyhole dimensions in plasma arc welding. *Measurement Science and Technology*, 23:105603 (9pp).
- Madhusudhan, R.G., and Mohandas, T., 1996. Ballistic performance of high- strength low alloy steel weldments. *Journal of Materials Processing Technology*, 57(1-2):23-30.
- Magowan, S., 2017. Effects of Cold Metal Transfer Welding on Properties of Ferritic Stainless Steels. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of Sheffield Hallam University for the degree of Doctor of Philosophy.

- Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., and Reddy, G.M., 2014. Effect of welding processes and consumables on fatigue crack growth behaviour of armour grade quenched and tempered steel joints. *Defence Technology*, 10(1):47-59
- Martikainen, J., 1995. Conditions for achieving high-quality welds in the plasma-arc keyhole welding of structural steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 52(1):68-75.
- Martikainen, J.K., and Moisio, T.J.I., 1993. Investigation of the effect of welding parameter on weld quality of plasma arc keyhole welding of structural steels. *Welding Journal*, 72(7):39-40.
- Maweja, K., and Stumpf, W., 2006. Fracture and ballistic-induced phase transformation in tempered martensitic low-carbon armour steels. *Materials Science and Engineering: A*, 432(1-2):158-169.
- Merzalı, C.E., 2013. Zırh çeliklerinde kaynak sonrası ısı tesiri altında kalan bölgenin özelliklerinin ısı işlem ile iyileştirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Nehad, A.K., 1995. Enthalpy technique for solution of stefan problems: Application to the keyhole plasma arc welding process involving moving heat source. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 22(6):779-790.
- Němeček, S., Mužík, T., and Míšek, M., 2012. Differences between laser and arc welding of HSS steels. *Sciverse Science Direct*, 39:67-74.
- Ono, K., Liu, Z., Era, T., Uezono, T., Ueyama, T., Tanaka M., ve Nakata. K., 2009. Development of a plasma MIG welding system for aluminium. *Welding International*, 23(11):805-809.
- Pramanick, A.K., Das, H., Reddy, G.M., Ghosh, M., Das, G., and Nandy S., 2016. Development and design of microstructure based coated electrode for ballistic performance of shielded metal arc welded armour steel joints. *Materials & Design*, 103:52-62.
- Radaj, D., Sonsinob, C.M., and Fladeb, D., 1998. Prediction of service fatigue strength of a welded tubular joint on the basis of the notch strain approach. *International Journal of Fatigue*, 20(6):471-480.
- Reddy, G.M., and Mohandas, T., 1996. Ballistic performance of high strength low-alloy steel weldments. *Journal of Materials Processing Technology* 57(1-2):23-30.
- Robledo, D.M., Gómez J.A.S., and Barrada, J.E.G., 2011. Development Of A Welding Procedure For MIL A 46100 Armor Steel Joints Using Gas Metal Arc Welding, 78(168):65-71
- Rosado, T., Almeida, P., Pires, I., Miranda, R., Quintino, L., 2008. Innovations in Arc Welding. Congresso De Engenharia De Moçambique, Maputo.

- Saleh, M., Kariem, M.M., Luzin, V., Toppler, K., Li, H., and Ruan, D., 2018. High strain rate deformation of ARMOX 500T and effects on texture development using neutron diffraction techniques and SHPB testing. *Materials Science & Engineering A*, 709:30-39.
- Sathiya P., and Jaleel A., 2010. Measurement of the bead profile and microstructural characterization of a CO<sub>2</sub> laser welded AISI 904L super austenitic stainless steel. *Optics & Laser Technology*, 42(6):960-968.
- Sathiya, P., Aravinda, S., Ajith, P.M., Arivazhagan, B., and Haq, A.N., 2010. Microstructural characteristics on bead on plate welding of AISI 904 L super austenitic stainless steel using Gas metal arc welding process. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(6):189-199.
- Saxena, A., Kumaraswamy, A., Reddy, G. M., and Madhu, V., 2018. Influence of welding consumables on tensile and impact properties of multi-pass SMAW ARMOX 500T steel joints vis-a-vis base metal. Defence Institute of Advanced Technology (DU), Pune 411025, Defence Metallurgical Research Laboratory, Kanchanbagh, Hyderabad 500048, India.
- Schuldies, J.J., and Nageswaran, R., 2010. Ceramic matrix composites for ballistic protection of vehicles and personnel. *Blast Protection of Civil Infrastructures and Vehicles Using Composites*. A volume in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, pp 235-243.
- Shirmohammadi, D., Movahedi, M., and Pouranvari, M., 2017. Resistance spot welding of martensitic stainless steel: effect of initial base metal microstructure on weld microstructure and mechanical performance. *Materials Science and Engineering A*, 703:154-161.
- Srinivasan, P.B., Muthupandi, V., Sivan, V., and Dietzel, W., 2006. Microstructure and corrosion behavior of shielded metal arc-welded dissimilar joints comprising duplex stainless steel and low alloy steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 15(6):758-764.
- Şahintürk, C., Tozlu, İ., Utku, Ş., ve Pamuk, U., 2005, Erdemir levha haddehanesi ve zırh çeliği üretim çalışmaları, Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Müdürlüğü.
- Taşkaya, S., Yıldız, T., ve 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.
- Taylor, D., Barrett, N., and Lucano, G., 2002. Some new methods for predicting fatigue in welded joints. *International Journal of Fatigue*, 24(5):509-518.
- Teng, T.L., Fung, C.P., and Chang, P.H., 2003. Effect of residual stresses on the fatigue of butt joints using thermal elasto-plastic and multiaxial fatigue theory. *Engineering Failure Analysis*, 10(2):131-151

- Tolungüç, B., Yurtışık, K., Tirkeş, S., Gür, C.H., Batıgün, C., Ertürk, M.T., ve Gürbüz, R., 2011. 2205 Dupleks paslanmaz çeliklerin hibrit plazma ark kaynaklı birleştirmelerinde mikro yapı dönüşümleri. *Mühendis ve Makine*, 53(624):77-82.
- Tülbentçi, K., 1990. MIG-MAG Eriyen Elektrot ile Gazaltı Kaynağı. Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü.
- Türkkan, G., 2008. Koruyucu gaz kaynağında (MIG/MAG) gaz debisinin kaynak nüfuziyeti ve kaynak hızına etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Konstrüksiyon İmalat Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- Ünal, E., 2016. CMT-MIG kaynaklı alüminyum ve çelik bağlantıların özellikleri ve optimizasyonu. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Wang, S., Goldak J., Zhou K., Tchernov S, and Downey D., 2009. Simulation on the thermal cycle of a welding process by space–time convection–diffusion finite element analysis. *International Journal of Thermal Sciences* 48(5):936-947.
- Yue, X., Feng, X., and Lippold, J.C., 2013. Strength increase in the coarsegrained heat-affected zone of a high-strength, blast-resistant steel after post-weld heat treatment. *Materials Science & Engineering A*, 585:149-154.
- Yurtışık, K., 2013. Kinetics and microstructural analysis of fatigue fracture progress in weld joints of duplex stainless steel grade 2205. A Thesis Submitted To The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University.
- Zengin, E., 2010. Farklı ön tav sıcaklıklarında kaynaklı birleştirilen zırh çeliklerinin mekanik özelliklerinin araştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Yüksek Lisans Tezi.
- Zhang, Y.M., and Ma, Y., 2001. Stochastic modelling of plasma reflection during keyhole arc welding. *Measurement Science and Technology*, 12(11):1964–75.
- Zhang, Y.M., and Zhang, B.S., 1999. Observation of the keyhole during plasma arc welding, *Welding Journal*. 78(2): 53S-58S

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YÜKSEL, Cihan  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 13.09.1985, İskenderun  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0 (542) 269 62 12  
 e-mail : cihanyuksel1@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / İleri Metalurji ve Malzeme Teknolojileri Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Afyon Kocatepe Üniversitesi / Metal Öğretmenliği	2011
Önlisans	Mustafa Kemal Üniversitesi/ Endüstriyel Elektronik	2005
Lise	Payas Endüstri Meslek Lisesi / Elektronik	2002

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-Halen	İSDEMİR A.Ş	Teknik Öğretmen

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

Yüksel, C., Bölükbaşı, Ö.S., Kanca, E., Demir, M., Günen, A.,(April 10-12 2018). Investigation of weldability of ARMOX 500T Armor steel by hybrid plasma arc welding. The Internatinonal Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology in ÇEŞME/İZMİR (IMSMATEC'18).

### Hobiler

Gezmek, spor yapmak ve parfüm koleksiyonculuğu.

## DİZİN

---

### A

Abstract · V  
Akma · 45,48  
Araştırma · 56  
Armox · 45

---

### B

Bakınız · 58,83,86,87,90

---

### C

CMT · 37, 39, 56

---

### Ç

Çekme · 53,88,89,90  
Çentik · 54,90  
Çizelge · 45,47,48,98,99

---

### D

Deneyler · 52,54,57

---

### E

EDS Analiz · 66,67,69,70,71,  
76,77,79,81,82,84,86  
Eğme · 54,98  
Erime çizgisi · 19

---

### G

Giriş · 1  
GMAK · 33,46  
Görünüm · 57,65,90

---

### H

Hibrit · 27,31,32,33,47  
HPAK · 48

---

### İ

ITAB · 20

---

### K

Kaynak yöntemleri · 17,46  
Kaynaklar · 103  
key hole · 25  
Key Words · v  
Koaksiyel · 27,102

---

### L

Literatür · 42,47,59,87,88,99,101

---

### M

Martenzitik · 13,14,15,60,61,62,  
64, 69,72,74,76,77,78,79,80,  
84,85,101  
Melt-in mode · 26

---

### O

Oksit · 7, 23,33  
Optik mikroskop · 51,57

---

### Ö

Östenit · 2,3,6,13,14,42,43,44,47,  
61,63,67,68,69,73,74,87,99  
Özet · iv  
Özgeçmiş · 111

---

### P

Plazma · 23,27,106  
Plastik deformasyon · 16,90,101

---

### R

Resimlerin listesi · xi

---

### S

Sem · 65-86,97  
Singeler ve kısaltmalar · xiv  
Sonuç ve öneriler · 101

---

### Ş

Şekil · 17,18,22

---

### T

Teşekkür · vi  
TS EN ISO · 49,50  
Transfer · 37,47

---

### Z

Zırh · 11,41





**TEKNOVERSITE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

