



# **ZIRH ÇELİĞİNİN KAYNAK SONRASI MEKANİK VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**2024  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Serkan KEÇE**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Hayriye ERTEK EMRE**

**ZIRH ÇELİĞİNİN KAYNAK SONRASI MEKANİK VE BALİSTİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Serkan KEÇE**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Hayriye ERTEK EMRE**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2024**

Serkan KEÇE tarafından hazırlanan “ZİRH ÇELİĞİNİN KAYNAK SONRASI MEKANİK VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hayriye ERTEK EMRE .....  
Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 10/06/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Prof. Dr. Ramazan KAÇAR (KBÜ) .....

Üye : Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU (GÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Hayriye ERTEK EMRE (KBÜ) .....

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

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Serkan KEÇE

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **ZIRH ÇELİĞİNİN KAYNAK SONRASI MEKANİK VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Serkan KEÇE**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Hayriye ERTEK EMRE**

**Haziran 2024, 129 sayfa**

Zırh çelik malzemeleri, silahlı saldırılardan ve/veya herhangi bir mayın/EYP patlamalarından korunmak için üretilmiştir. Ayrıca HHA (Yüksek Sertlik Zırh Çeliği) kalite zırh çelikleri yüksek sertliğe sahip ve balistik olarak sağlam bir yapı göstermeleri bu çeliklere üstünlük kazandırmaktadır. Zırh çeliklerinin kaynaklı birleştirmelerinde ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) ve kaynak metali bölgesindeki değişimler bu bölgelerin mekanik özelliklerini ve balistik performansını etkilemektedir. Zırh çeliklerinin kaynağında uygun kaynak yöntemini seçmek ve optimum ısı girdisini sağlamak bu istenilen özelliklerin muhafazası bakımından oldukça önemlidir. Ayrıca, kaynak sonrası oluşan ve istenmeyen artık (kalıntı) gerilmeler, kaynak sonrası ısı işlemler (PWHT) yoluyla hafifletilebilir. Bu çalışmada, Bisalloy HHA 500 serisi zırh çelikleri otomatize edilmiş gazaltı kaynak (GMAW) yöntemiyle ön deneysel testlerle optimize edilmiş kaynak parametrelerinde birleştirilmişlerdir. Birleştirme işleminden sonra plakalara tahribatsız muayene yöntemlerinden gözle muayene, sıvı penetrant

uygulaması ve x-ray kırınımı yöntemi ile radyografik muayene uygulamaları yapılarak kaynak bölgesinde hata olup olmadığı kontrol edilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla tahribatlı muayene yöntemlerinden çentik darbe, çekme ve eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak dikişlerine enine ve dikine mikrosertlik analizleri yapılmıştır. Kaynaklı bağlantıların mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilerek, mekanik testler sonrası oluşan kırık yüzey incelemeleri de SEM-EDS analizleri ile incelenmiştir. Son olarak, kaynaklı birleştirmelerin balistik testleri gerçekleştirilerek balistik performansları değerlendirilmiştir. Ayrıca, kaynaklı bağlantılar iki gruba ayrılarak bir gruba kaynak sonrası ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Böylece ısıtılmanın birleştirmenin mekanik özelliklerine ve balistik performansına olan etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu Bisalloy HHA 500 zırh çeliklerinin başarılı bir şekilde birleştirildiği, kaynak dikişi boyunca kaynak hatalarına rastlanılmadığı, ayrıca kaynaklı birleştirme mukavemetinin kabul edilebilir aralıklarda olduğu ancak sünekliğinin düştüğü tespit edilmiştir. Kaynaklı birleştirmelere uygulanan balistik testler başarılı sonuçlanmıştır. Kaynak sonrası ısıtılma işlemi bağı olarak şekillendirilebilirlik ve çentik darbe dayanımı iyileşmiştir. Balistik test sonuçlarına göre çok büyük bir farklılık oluşturmamakla birlikte testlerde kullanılan ve yüksek namlu enerjisine sahip 7,62x51 NATO Ball (Ball M80) mermi hasarı haricinde tüm ısıtılmalı birleştirme testleri başarılı sonuç vermiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Bisalloy HHA 500 zırh çeliği, Mekanik özellikler, PWHT, Balistik özellikler.

**Bilim Kodu :** 91511

## **ABSTRACT**

**Master Thesis**

### **INSPECTION OF MECHANICAL AND BALLISTIC PROPERTIES OF ARMOR STEEL AFTER WELDING**

**Serkan KEÇE**

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

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Hayriye ERTEK EMRE**

**June 2024, 129 pages**

Armor steel materials are produced to protect against armed attacks and/or any mine/IED explosions. In addition, HHA (High Hardness Armor Steel) quality armor steels have high hardness and ballistically robust structure, which gives these steels superiority. In welded joints of armor steels, changes in the heat affected zone (ITAB) and weld metal zone affect the mechanical properties and ballistic performance of these zones. In welding of armor steels, it is very important to choose the appropriate welding method and to provide optimum heat input in order to maintain these desired properties. In addition, undesirable residual stresses after welding can be alleviated by post-weld heat treatment (PWHT). In this study, Bisalloy HHA 500 series armor steels were joined by automated gas metal arc welding (GMAW) at welding parameters optimized by preliminary experimental tests. After the joining process, the plates were checked for defects in the weld area by visual inspection, liquid penetrant application and radiographic inspection with x-ray diffraction method. In order to determine the

mechanical properties of the welded joints, notch impact, tensile and bending tests were performed by destructive testing methods. Transverse and vertical microhardness analyzes were performed on the weld seams. The microstructure of the welded joints were examined and the fracture surface examinations after the mechanical tests were also examined by SEM-EDS analysis. Finally, ballistic tests of the welded joints were performed to evaluate their ballistic performance. In addition, the welded joints were divided into two groups and one group was heat treated after welding. Thus, the effect of heat treatment on the mechanical properties and ballistic performance of the joint was tried to be determined. As a result of the experimental studies, it was determined that Bisalloy HHA 500 armor steels were successfully joined, no welding defects were observed along the weld seam, and the welded joint strength was within acceptable ranges, but the ductility decreased. Ballistic tests applied to the welded joints were successful. Formability and notch impact strength improved due to post-weld heat treatment. Although there was no significant difference in the ballistic test results, all heat-treated joint tests were successful except for the damage caused by the 7.62x51 NATO Ball (Ball M80) bullet with high muzzle energy.

**Key Word** : Bisalloy HHA 500 armor steel, Mechanical properties, PWHT, Ballistic properties.

**Science Code** : 91511



## TEŞEKKÜR

Bu Yüksek Lisans Tezi çalışmasının başlangıcından sonuna kadar bilgi ve tecrübesinden yararlandığım, desteğini ve samimiyetini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Hayriye ERTEK EMRE'ye sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimim süresince bilgilerini, desteğini ve hoşgörüsünü esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ramazan KAÇAR'a en içten minnet ve teşekkürlerimi sunarım. Değerli katkı ve yardımlarından dolayı KBÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Sayın Doktor Öğretim Üyesi Samet NOHUTÇU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarına katkı ve desteklerinden dolayı 2k Welding Teknoloji Makine İmalat Mühendislik Taahhüt Sanayi ve Tic. Ltd. Şti. sahibi Kadir BEYENAL'a, YOL-BAK Yol Bakım ve Kar Mücadele Araçları San. Tic. A.Ş. firmasından Tuğba BUHAR ve Tayfun TAHTACI'ya, FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. firmasından Derhat Batuhan GÜNER, Murat GÜRLEYİK ve Merday DALCI'ya, OTOKAR Otomotiv ve Savunma Sistemleri A.Ş. firmasından Kadir ELİTOK, İzzet ÇOKAL ve Hakan CANPOLAT'a, PARS Kalite Kontrol Müh. San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasından Mert TAMER'e, UMT Kontrol Müh. ve Gözetim Tic. Ltd. Şti. firmasından Hamit ALIÇ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar ve Projeler Koordinatörlüğü KBÜBAP-23-YL-111 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Değerli desteklerinden dolayı Karabük Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Beni bugünlere kadar en iyi şekilde yetiştiren ve maddi, manevi desteğini esirgemeyen kıymetli anneme ve babama tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xxi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	7
ZIRH ÇELİKLERİ VE ZIRH ÇELİĞİNİN KAYNAĞI .....	7
2.1. ZIRH ÇELİKLERİ .....	7
2.2. DİĞER ZIRH MALZEMELERİ .....	13
2.2.1. Kompozitler Zırhlar .....	13
2.2.1.1. Hafif Kompozit Zırh .....	14
2.2.1.2. Seramik Zırh .....	15
2.3. KAYNAK TEKNOLOJİSİ .....	15
2.3.1. Metal Kaynağı .....	16
2.3.1.1. Eritme Kaynağı Usuller .....	16
2.3.2. MIG/MAG (Gazaltı) Kaynağı .....	17
2.3.2.1. MIG/MAG Kaynağında Kullanılan Koruyucu Gazlar .....	17
2.3.2.2. MIG/MAG Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri .....	18
2.3.3 Kaynak Sırasında Isı Dağılımı ve Etkileri .....	19
2.4. ZIRH ÇELİĞİNİN KAYNAĞI .....	20
2.5. ZIRH ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEMİ .....	24
2.5.1. Gerilim Giderme Isıl İşlemi .....	27

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3 .....	29
BALİSTİK BİLİMİ VE BALİSTİK TESTLER .....	29
3.1. BALİSTİK BİLİMİ .....	29
3.1.1. İç Balistik.....	29
3.1.2. Dış Balistik .....	30
3.1.3. Terminal (Hasar) Balistik .....	30
3.1.4. Tehdit Tipleri ve Penetrasyon.....	30
3.1.4.1. Tehdit Tipleri .....	31
3.1.4.2. Katı Cisimlerde Penetrasyon ve Perforasyon .....	33
3.2. BALİSTİK TESTLER.....	37
3.2.1. Zırhın Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	37
3.2.2. Balistik Koruma Standartları ve Testleri .....	38
3.2.2.1. Balistik Koruma Standartları .....	38
3.2.2.2. Balistik Koruma Testleri.....	39
 BÖLÜM 4 .....	 44
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	44
4.1. DENEYDE KULLANILAN MALZEMELER ve KAYNAK MAKİNESİ ..	44
4.1.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği.....	44
4.1.2. Koruyucu Gaz .....	45
4.1.3. İlave Dolgu Kaynak Metali .....	45
4.1.4. Kaynak Makinesi .....	46
4.1.5. Kaynak Isı Girdisi Hesabı.....	49
4.1.6. Kaynak İşlemi.....	51
4.2. KAYNAK SONRASI GERİLİM GİDERME ISIL İŞLEMİ.....	56
4.3. TAHRİBATSIZ VE TAHRİBATLI TESTLER .....	56
4.3.1. Tahribatsız Testler .....	57
4.3.1.1. Gözle (Görsel) Muayene .....	57
4.3.1.2. Sıvı Penetrant Muayene .....	57
4.3.1.3. Radyografik Muayene (RT-Radiographic Examination).....	58
4.3.2. Tahribatlı (Mekanik ve Balistik) Testler .....	58
4.3.2.1. Çekme Deneyi Numunesinin Hazırlığı ve Deneyi.....	58

4.3.2.2. Üç Nokta Eğme Deneyi Numunesinin Hazırlığı ve Deneyi .....	60
4.3.2.3. Çentik (Charpy) Darbe Deneyi Numunesinin Hazırlığı ve Deneyi	61
4.3.2.4. Sertlik Ölçümü .....	62
4.3.2.5. Metalografik Numune Hazırlığı ve İncelemeleri .....	63
4.3.2.6. Balistik Deneyler ve Uygulanışı .....	64
BÖLÜM 5 .....	68
DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ .....	68
5.1. TAHRİBATSIZ MUAYENE SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	68
5.1.1. Gözle (Görsel) Muayene Sonuçları .....	68
5.1.2. Sıvı Penetrant Muayene Sonuçları.....	69
5.1.3. Radyografik Muayene Sonuçları .....	69
5.2. ÇEKME DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ.....	70
5.2.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Çekme Testi Sonucu .....	70
5.2.2. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmelerinin Çekme Testi Sonucu.....	72
5.2.3. Kaynak Sonrası Isıl İşlem Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Birleştirmelerinin Çekme Testi Sonucu .....	74
5.2.4. Çekme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	75
5.2.5. Çekme Testi Sonucunda Oluşan Kopma Bölgelerinin Kırık Yüzeylerinin İncelenmesi.....	77
5.2.5.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Çekme Sonrası Kırık Yüzey SEM İncelemeleri.....	78
5.2.5.2. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmesi Çekme Sonrası Kırık Yüzey SEM İncelemeleri.....	79
5.2.5.3. Kaynak Sonrası Isıl İşlem Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh Çelik Birleştirmesi Çekme Sonrası Kırık Yüzey SEM İncelemeleri.....	81
5.3. ÇENTİK DARBE DENEYİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ..	83
5.3.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Çentik Darbe Testi Sonucu ve Değerlendirmesi .....	83
5.3.2. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmelerinin Çentik Darbe Testi Sonucu ve Değerlendirmesi .....	85

5.3.3. Kaynak Sonrası Isıl İşlemi Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Birleştirmelerinin Çentik Darbe Testi Sonucu ve Değerlendirmesi.....	87
5.3.4. Çentik Darbe Testi Sonuçlarının Genel Değerlendirilmesi .....	88
5.4. EĞME DENEYİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ .....	89
5.4.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmelerinin Eğme Testi Sonucu.....	89
5.4.2. Kaynak Sonrası Isıl İşlem Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliğini Birleştirmelerinin Eğme Testi Sonucu .....	91
5.4.3. Eğme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	92
5.5. SERTLİK ÖLÇÜM DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ .	93
5.5.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmelerinin Sertlik Ölçüm Sonucu.....	93
5.5.2. Kaynak Sonrası Isıl İşlem Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Birleştirmelerinin Sertlik Ölçüm Sonucu.....	95
5.5.3. Sertlik Ölçüm Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	97
5.6. MİKROYAPI GÖRÜNTÜLERİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ .....	98
5.6.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmelerinin Mikroyapı İncelemeleri .....	98
5.6.2. Kaynak Sonrası Isıl İşlem Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Birleştirmelerinin Mikroyapı İncelemeleri.....	102
5.6.3. Mikroyapı Görüntülerinin İnceleme Sonuçlarının Değerlendirilmesi..	104
5.7. BALİSTİK TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	106
5.7.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmelerinin Balistik Test İncelemeleri.....	106
5.7.2. Kaynak Sonrası Isıl İşlem Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Birleştirmelerinin Balistik Test İncelemeleri .....	109
5.7.3. Balistik Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	112
BÖLÜM 6 .....	115
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	115
KAYNAKLAR .....	120
ÖZGEÇMİŞ .....	129

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Gazaltı kaynak prensibi.....	17
Şekil 2.2. Kaynak işleminde sıcaklık gradyentinin yönü.....	19
Şekil 2.3. Karbür yapıcı elementlerin temperleme sıcaklıklarında sertliğe etkileri... 25	
Şekil 2.4. Zırh çeliklerine plastik şekil verme sonrasında uygulanan ısıtıl işlem adımları .....	26
Şekil 3.1. Balistiğin aşamaları.....	29
Şekil 3.2. Mühimmat bölümleri .....	31
Şekil 3.3. Hafif silah mühimmat örnekleri.....	32
Şekil 3.4. 5,56 mmx45 SS109 piyade mühimmatı.....	32
Şekil 3.5. 7,62 mmx51, zırh delici mühimmat.....	33
Şekil 3.6. Darbe almış bir plakadaki hata türleri.....	34
Şekil 3.7. Balistik test düzeneği .....	39
Şekil 3.8. V50 grafiksel gösterimi .....	40
Şekil 3.9. NATO STANAG 4569 Seviye 1 prosedürü atış açıları.....	42
Şekil 4.1. 2k Welding firmasına ait kolon-bom sistemli otomatize edilmiş kaynak makinesi. ....	47
Şekil 4.2. EWM marka Phoenix 452 Puls MM RC gazaltı kaynak makinesi (soldaki) ve Abicor Binzel marka xFume model duman emme sistemi (sağdaki). 48	
Şekil 4.3. Kaynak torç mekanizması.....	49
Şekil 4.4. Tel sürme ünitesi.....	49
Şekil 4.5. Kaynak pozisyonu.....	51
Şekil 4.6. Kaynak işlemi öncesinde torcun pozisyonlanması. ....	52

## Sayfa

Şekil 4.7. Kaynak banyosunun takibini sağlayan bilgisayar ekranı.....	53
Şekil 4.8. Kaynak parametrelerinin girildiği ve takip edildiği bilgisayar ekranı.....	53
Şekil 4.9. Kaynak paso gösterimi.....	54
Şekil 4.10. Kaynatılmış numune plaka.....	55
Şekil 4.11. Plaka-1 (Bisalloy HHA 500-Bisalloy HHA 500) kaynak (üst).....	55
Şekil 4.12. Plaka-1 (Bisalloy HHA 500-Bisalloy HHA 500) kaynak (alt).....	55
Şekil 4.13. Gerilim giderme tavlaması.....	56
Şekil 4.14. Penetrant testinde kullanılan sıvılar.....	57
Şekil 4.15. Radyografik muayane yöntemi ve testte kullanılan gama radyografi cihazı (Exertus Dual 120).....	58
Şekil 4.16. Çekme testi için deney numunelerinin hazırlanması.....	59
Şekil 4.17. UTC-4870 model çekme test cihazı.....	59
Şekil 4.18. Eğme testi için deney numunelerinin hazırlanması.....	60
Şekil 4.19. Zwick/Roell Z600 model 600 kN kapasiteli eğme test cihazı.....	61
Şekil 4.20. Charpy çentik darbe testi için deney numunelerinin hazırlanması.....	61
Şekil 4.21. Zwick/Roell Rkp450 marka/model çentik darbe test cihazı.....	62
Şekil 4.22. Metalografik incelemelerde kullanılan Nikon Epiphot 200 marka optik mikroskop.....	63
Şekil 4.23. Zeiss Ultra Plus marka SEM cihazı.....	64
Şekil 4.24. NATO STANAG 4569 Seviye 1 kinetik enerji mühimmatları.....	65
Şekil 4.25. 1-Namlu ve atış poligonu, 2-Hız ölçüm cihazı, 3-Atış komuta sistemi... 65	
Şekil 4.26. Şahit plaka yerleşimi.....	66
Şekil 4.27. Hedef sehpasına bağlanmış numune plakaya lazer ile nişan alınması....	66
Şekil 5.1. Geliştirici (developer) uygulanmış kaynaklı plaka.....	69
Şekil 5.2. Negatoskop (ışıklı film okuma cihazı) cihazı ile film kontrolü.....	70

## **Sayfa**

Şekil 5.3. Dijital radyografik muayene cihazı ile yapılan film kontrolü.....	70
Şekil 5.4. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait çekme testi sonucu grafiği. ....	71
Şekil 5.5. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait çekme testi sonucunda oluşan kopma bölgesi. ....	71
Şekil 5.6. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerine ait çekme testi sonucu grafiği.....	73
Şekil 5.7. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerine ait çekme testi sonucunda oluşan kopma bölgesi.....	73
Şekil 5.8. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmelerine ait çekme testi sonucu grafiği. ....	74
Şekil 5.9. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerine ait çekme testi sonucunda oluşan kopma bölgesi. ....	75
Şekil 5.10. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği, Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme ve kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait ortalama çekme testi sonucu grafiği. ....	76
Şekil 5.11. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çekme testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü, a) 1000x b) 5000x. ....	78
Şekil 5.12. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çekme test numunesinin kırık yüzeyinden alınan EDS sonucu. ....	79
Şekil 5.13. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunesi çekme testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü, a) 1000x b) 5000x.....	80
Şekil 5.14. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme çekme test numunesinin kırık yüzeyinden alınan EDS sonucu. ....	80
Şekil 5.15. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesi çekme testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü, a) 1000x b) 5000x.....	82
Şekil 5.16. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çekme test numunesinin kırık yüzeyinden alınan EDS sonucu. ....	82



## Sayfa

Şekil 5.17. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çentik darbe testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü a) 200x, b) 5000x. ....	84
Şekil 5.18. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çentik darbe testi numunesinin kırık yüzeyinden alınan EDS sonucu.....	84
Şekil 5.19. Bisalloy HHA 500 kaynaklı birleştirme çentik darbe testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü a) 200x, b)5000x.....	86
Şekil 5.20. Bisalloy HHA 500 kaynaklı birleştirme çentik darbe testi numunesinin kırık yüzeyinden alınan EDS sonucu. ....	86
Şekil 5.21. Kaynak sonrası ısıtıl işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çentik darbe testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü, a) 200x, b)5000x. ....	87
Şekil 5.22. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çentik darbe testi numunesinin kırık yüzeyinden alınan EDS sonucu. ....	88
Şekil 5.23. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunelerine ait eğme testi sonucu grafiği. ....	90
Şekil 5.24. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunelerine ait eğme testi sonucu çatlama bölgesi.....	90
Şekil 5.25. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmelerine ait eğme testi sonucu grafiği. ....	92
Şekil 5.26. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait eğme testi sonucu çatlama bölgesi. ....	92
Şekil 5.27. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunesi kaynak merkez hattı boyunca alınan sertlik ölçüm sonuçları .....	94
Şekil 5.28. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunesi kaynak boyunca alınan sertlik ölçüm sonuçları.....	94
Şekil 5.29. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesi kaynak merkez hattı boyunca alınan sertlik ölçüm sonuçları. 96	
Şekil 5.30. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesi kaynak boyunca alınan sertlik ölçüm sonuçları.....	96

## Sayfa

- Şekil 5.31. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme ve kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynak merkez hattı boyunca alınan sertlik ölçüm sonuçları. .... 97
- Şekil 5.32. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme ve kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynak boyunca alınan sertlik ölçüm sonuçları. .... 98
- Şekil 5.33. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmesi, a) Kaynak metal-ITAB geçiş, b) Kaynak metal üst bölgesi, c) Kaynak metal orta bölgesi, d) kaynak metal makro görüntüsü, e) ITAB-ana malzeme geçiş bölgesi, f) ana malzeme, g) ITAB. .... 99
- Şekil 5.34. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmesi, a ve b) Kaynak metal c) ITAB (Kaynak metal bitişiği), d) ITAB (ITAB-ana malzemeye geçiş bölgesi) e) Ana malzeme ..... 100
- Şekil 5.35. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmesi, kaynak metal EDS analiz sonucu. .... 101
- Şekil 5.36. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmesi, a) Kaynak metal üst bölgesi, b) Kaynak metal-ITAB geçiş, c) Kaynak metal orta bölgesi, d) kaynak metal makro görüntüsü, e) ITAB- ana malzeme geçiş bölgesi, f) ana malzeme, g) ITAB. .... 102
- Şekil 5.37. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmesi, a ve b) Kaynak metal c) ITAB (Kaynak metal bitişiği), d) ITAB (ITAB-ana malzemeye geçiş bölgesi) e) Ana malzeme. .... 103
- Şekil 5.38. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmesi, kaynak metal EDS analiz sonucu. .... 104
- Şekil 5.39. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme plakasının atış yüzeyinin (ön/üst) balistik test sonrası görüntüsü a) 7.62x51 NATO Ball (Ball M80), b) 5.56x45 NATO SS109, c) 5.56x45 M193. .... 107
- Şekil 5.40. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme plakasının arka yüzeyi balistik test sonrası görüntüsü. .... 107

**Sayfa**

- Şekil 5.41. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği plakasının atış yüzeyinin (ön/üst) balistik test sonrası görüntüsü a) 7,62x51 NATO Ball (Ball M80), b) 5,56x45 NATO SS109, c) 5,56x45 M193. .... 110
- Şekil 5.42. Kaynak sonrası ısıl işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği plakasının arka yüzeyinin (alt) balistik test sonrası görüntüsü. .... 110

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonları .....	7
Çizelge 2.2. Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan bazı alüminyum alaşımlı malzemelerin özellikleri.....	10
Çizelge 2.3. Ti-6Al-4V alaşımı için balistik özellikler .....	11
Çizelge 2.4. Magnezyum alaşımlar için balistik sonuçlar.....	11
Çizelge 2.5. Bisalloy alaşımlarının mekanik özellikleri ve zırh çeliğinin kalitesine ait eş değer askeri standartlar .....	12
Çizelge 2.6. Hafif kompozit zırh malzemelerine kullanılan elyaf tipleri ve özellikleri .....	15
Çizelge 3.1. 5,56 mmx45 SS109 piyade mühimmatı özellikleri.....	32
Çizelge 3.2. 7,62 mmx51 mühimmatı özellikleri.....	33
Çizelge 3.3. Penetrasyon türleri .....	36
Çizelge 3.4. Balistik koruyucu ürünlerin testlerinde kullanılan standartlar.....	38
Çizelge 3.5. NATO STANAG 4569 AEP-55 test standardı .....	43
Çizelge 4.1. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu. ....	44
Çizelge 4.2. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin karbon eş değeri.....	44
Çizelge 4.3. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin Brinell sertlik değeri. ....	44
Çizelge 4.4. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin çekme özellikleri.....	45
Çizelge 4.5. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin charpy çentik darbe özellikleri.....	45
Çizelge 4.6. HB212 koruyucu gazın kimyasal kompozisyonu. ....	45
Çizelge 4.7. ER 110 SG ilave dolgu kaynak metalinin kimyasal kompozisyonu.....	46
Çizelge 4.8. ER 110 SG ilave dolgu kaynak metalinin mekanik özellikleri.....	46

## Sayfa

Çizelge 4.9. TMD5X5KOLON-BOM hareketli platforma sahip kolon-bom sistemli otomatize edilmiş kaynak makinesi özellikleri. ....	47
Çizelge 4.10. EWM marka Phoenix 452 Puls MM RC kaynak makinesi özellikleri.	48
Çizelge 4.11. Kaynak işleminde izin verilen ısı girdisi (kJ/mm).....	50
Çizelge 4.12. Kaynak yöntemlerinin enerji verimlilik faktörleri.....	51
Çizelge 4.13. Otomatize edilmiş gazaltı kaynak parametreleri ve ısı girdisi hesabı..	54
Çizelge 5.1. Görsel muayene sonuçları.....	68
Çizelge 5.2. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait çekme testi sonucu. ....	71
Çizelge 5.3. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerine ait çekme testi sonucu.....	72
Çizelge 5.4. Kaynak sonrası ısıl işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmelerine ait çekme testi sonucu. ....	74
Çizelge 5.5. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait çentik darbe testi verileri. ....	83
Çizelge 5.6. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerine ait çentik darbe testi verileri.....	85
Çizelge 5.7. Kaynak sonrası ısıl işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait çentik darbe testi verileri. ....	87
Çizelge 5.8. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunelerine ait eğme testi verileri.....	90
Çizelge 5.9. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış HHA 500 zırh çeliği birleştirmelerine ait eğme testi verileri.....	91
Çizelge 5.10. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme balistik test sonuçları. ....	108
Çizelge 5.11. Kaynak sonrası ısıl işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği balistik test sonuçları.....	111

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$C_{eş}$	: karbon eşdeğerliliği
Ag	: gümüş
C	: karbon
Fe	: demir
Al	: alüminyum
Ar	: argon
Au	: altın
S	: kükürt
P	: fosfor
Cu	: bakır
H <sub>2</sub>	: hidrojen
CO <sub>2</sub>	: karbondioksit
O <sub>2</sub>	: oksijen
He	: helyum
Mo	: molibden
Ni	: nikel
$\theta$	: kutupsal açı
$\sigma$	: normal gerilme
$\sigma_c$	: tek eksenli basınç dayanımı
Fe <sub>3</sub> C	: demir karbürsementit

## KISALTMALAR

AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Test ve Malzeme Topluluğu)
NATO	: North Atlantic Treaty Organization (Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü)
AP	: Armor Piercing (Zırh delici mühimmat)
AWS	: American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu)
DIN	: Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
EN	: European Norm (Avrupa Normu)
IIW	: International Institute of Welding (Uluslararası Kaynak Enstitüsü)
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
TS	: Türk Standardı
MIL	: Military (Askeri Standart)
HB	: Hardness Brinell (Brinell Sertlik)
RHA	: Rolled Homogeneous Armor (Haddelenmiş Homojen Zırh)
HHA	: High Hardness Armor (Yüksek Sertlikte Zırh)
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
FCAW	: Flux Cored Arc Welding (Özlü Elektrot Ark Kaynağı)
GMAW	: Gas Metal Arc Welding (Gaz Metal Ark Kaynağı)
MMAW	: Manual Metal Arc Welding (Elle Metal Ark Kaynağı)
SMAW	: Shielded Metal Arc Welding (Elektrik Metal Ark Kaynağı)
SAW	: Submerged Arc Welding (Tozaltı Ark Kaynağı)
LAHW	: Lase-Arc Hybrid Welding (Lazer-Ark Hibrit Kaynağı)
PWHT	: Post Weld Heat Treatment (Kaynak Sonrası Isıl İşlem)
AR-GE	: Araştırma ve Geliştirme
EBCHM	: Electron Beam Cold Hearth Melting (Elektron Işımı Soğuk Ocakta Eritme)
HACC	: Hydrogen Assisted Cold Cracking (Hidrojen Destekli Soğuk Çatlama)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Dünyada askeri teknoloji çalışmalarına verilen önemin artması ile birçok ülke savunma sanayisine yönelik yaptığı ar-ge çalışmaları kapsamında hem ordularının askeri gücünü geliştirirken hem de dost ülkeler ile ihracat anlaşmaları yaparak maddi kaynak getirisi oluşturduklarından savunma sanayi projelerini gün geçtikçe arttırmaktadır. Buna bağlı olarak ateşli silahların gelişimi ile koruma ihtiyacının karşılanması için yüksek koruma seviyelerine sahip balistik koruyucu malzemelerde bilim insanları tarafından geliştirilmektedir [1].

Özellikle askeri araçlar (tanklar, zırhlı personel taşıyıcıları, zırhlı muharebe araçları, zırhlı keşif araçları, obüsler, taktik tekerlekli zırhlı araçlar vb.) için zırhlar hayati önem taşımaktadır. Askeri zırhlı araçlar, maruz kalacakları bütün ateşli tehditlere karşı en yüksek balistik mukavvemeti göstermeli ve dışardan gelecek tehditlere karşı geliştirilmiş uluslararası standartlara göre en iyi balistik koruma seviyelerini sağlamalıdır. Askeri zırhlı araçlar, küçük kalibredeki mühimmatlara karşı, mekanik olarak iyi bir seviyede direnç göstermeli, mühimmata maruz kaldığında çatlama yapmamalı ve zırhı delip geçmemelidir [2].

Zırh çelikleri, genellikle menevişleme (temperleme) ısıl işlem yöntemi kullanılarak MIL-A-46100 ve MIL-A-12560 askeri standartlarına göre üretilmektedirler. Bu standartlara uygun olarak imal edilmiş zırh çelikleri, 7,62 - 12,7 - 14,5 ve 20 mm kalibresindeki mühimmatlara karşı balistik dayanım sağlarlar [1-4]. Zırh çelikler malzemelerinden beklenen balistik koruma seviyelerinin temin edilebilmesi için askeri uygulamalardaki zırhlı araçların tasarım aşamasında üretim yöntemleri belirlenmeli, gelişmiş test ve doğrulama metotları ile istenen koruma seviyeleri sağlanmalıdır [3, 4].



Zırh özelliğine sahip çelikler, herhangi bir mayın/EYP patlamalarından veya silahlı saldırılardan korunmak için üretilirler. Ayrıca, HHA zırh çelikleri yüksek sertliğe ve sağlamlığa sahip olmaları nedeniyle mükemmel bir balistik dayanım özellikleri vardır. HHA çelikleri söz konusu olduğunda, ana alaşım elementleri Cr, Ni, Mo'dir [5]. Zırh çeliklerinin kaynaklı bağlantılarında kaynak metali ve ITAB'daki değişimler bu bölgelerin balistik özelliklerini etkilemektedir. Zırh çeliklerinin kaynağında doğru kaynak yöntemini ve optimum ısı girdisini sağlamak balistik performanslarının bu istenilen özelliklerin muhafazası bakımından oldukça önemlidir [6].

Zırhlı araçların imalat işleminde kullanılan kaynak yöntemleri, bu çelik malzemelerin metalurjik olarak iç yapılarını bozmamalıdır. Ayrıca kaynak işlemi uygulanmış zırh çeliklerinin kaynak bölgeleri mayın patlamaları, ağır silah darbeleri gibi balistik özelliklere karşı ve taktik askeri araçların farklı engebeli arazilerdeki hareket kabiliyetine karşı zırh çeliklerinin yorulma dirençlerinin yüksek olması gerekmektedir [6, 7]. Bu yüzden zırh çeliklerinin üretim işleminde termomekanik olarak haddeleme ve uygun ısı işlem metodlarının uygulanmasıyla zırh çeliğinin mekanik olarak özellikleri geliştirilmiştir. Bu gelişmeler ile zırh çeliğinin sertliği 400-500 HBW sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Zırh çeliğindeki artan sertlikle beraber tokluk düşüşünü azaltmak için ise ikincil bir metalurjik işlemler yardımıyla S ve P elementlerinin seviyeleri daha düşük oranlara çekilmesi sağlanmıştır [7, 8]. Ayrıca S ve P elementleri kaynaklı birleştirmeler içinde istenmeyen iki elementtir. Bu iki element kaynaklı birleştirmenin fiziksel metalürjisini de olumsuz olarak etkilemektedir [8-10]. Kaynaklı imalat yönteminde kullanılan zırh çeliğinin karbon eş değerliği, hidrojen miktarı ve artık gerilmeleri gibi metalurjik özelliklerinin düşük miktarda olması arzu edilmektedir [11, 12]. Zırh çeliklerinin kaynağında ön tav sıcaklığı kullanılan malzemenin kalınlığına göre belirlenmelidir [13, 14]. Kaynaklı bölgenin mekanik özelliklerini etkileyen diğer bir değişken ise kaynak ilave dolgu metalidir. Kaynak işleminde kullanılan ilave dolgu metali, içeriğinde bulunan alaşım elementleri ve ısı işlem vaziyetine göre kaynak dikişlerini oluşturur. Zırh çeliklerinde kaynak sonrası soğuk çatlak (hidrojen çatlağı) problemi oluşma ihtimali mevcuttur. Bu yüzden ön tav sıcaklığı ve ilave dolgu metali seçimi önemlidir. [14].

Yüksek sertlikteki zırh çeliklerinin kaynağında, ITAB’da sertlik kayıplarını önlemek için dikkatle kontrol edilen kaynak prosedürleri gerektirir [15, 16]. Isı girdisi, gaz korumalı metal ark kaynağında ergime bölgesindeki tokluk özelliği ile ilişkili çok önemli bir faktördür [17, 18].

Askeri araçlarda kullanılan zırh çeliklerinin kaynaklı birleştirme yöntemleri arasında kullanılan en yaygın iki yöntem: Elektrik Ark Kaynağı (SMAW) ve/veya Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAW) dır [19, 20]. GMAW kaynak uygulaması, SWAW kaynak yöntemine göre daha yüksek bir yığıma hızına sahiptir [21]. GMAW kaynak yönteminde, ilave tel sürekli olarak kaynak bölgesine gönderilir ve sık sık durma gerçekleşmez. Sonuç olarak, GMAW kaynak uygulaması, SMAW'a kaynak yöntemine kıyasla daha üstün bir kaynak uygulama verimliliğine sahiptir [22]. Darbeli (pulsed) GMAW işlemi zırh çeliğinin kaynağında, geleneksel GMAW yöntemine göre daha yüksek verimlilik sağlar [19-22].

Yapılan literatür taramalarında ise, HHA zırh çeliklerinin kaynaklı imalatında kullanılan kaynak yöntemlerinden, SMAW kaynağı [23, 24], Özlü Telle Ark Kaynağı (FCAW) [25], GMAW kaynağı [26] veya Lazer-Ark Hibrit Kaynağı (LAHW) [27] ile ilgili çalışmalara rastlanılmıştır.

Su verilmiş ve temperlenmiş (Q&T) olarak üretilen zırh çelikleri, tokluk, geliştirilmiş mukavemet/ağırlık oranı ve yüksek sertlik ile birlikte üstün mekanik özelliklere sahip olup, nispeten iyi kaynaklanabilir özellikte malzemelerdir [28]. Bu nitelikler zırh çeliklerini, yükleme koşullarının karmaşık olduğu ve büyük bir hızla uygulandığı balistik mermiler ve/veya patlamalarla karşılaşıldığında yaşanan şok yükleme gibi uygulamalarda, geleneksel malzemeler ile mukayese edildiğinde üstünlük arz eder [29, 30].

Bu alaşımların kaynaklanabilirliği her ne kadar iyi olsada, kaynak sonrası oluşan mikroyapısal değişim sonucu, ITAB’ın yumuşamasından dolayı malzeme sürünme ve yorulma özelliklerinin azalması nedeniyle kaynaklı yapının performansını olumsuz etkilemektedir [31-33].

İlave olarak, Q&T zırh çeliği kaynaklarının hidrojen çatlama riskine yatkınlığı da bilinmektedir. Özellikle de hidrojen destekli soğuk çatlama (HACC) bu kaynaklar için önemli bir problemdir. Bunun nedeni kaynak metalinin hidrojen çözünürlüğündeki değişimler ve kaynağın çatlama hassasiyetini belirleyen faktör olarak soğutma koşulları önemlidir [14,34]. Ayrıca, HACC oluşumu da kaynaklı yapının maruz kaldığı artık (kalıntı) gerilmelere bağlıdır [35, 36]. Kaynak bölgesinde kalıntı gerilmelerin oluşumu, kaynak sırasında yapının maruz kaldığı kaynak işlemi ve soğutma/ısıtma oranlarına bağlı olarak faz değişimleri nedeniyle kaçınılmazdır [37-39]. Bu nedenle, yapıdaki kalıntı gerilmelerin anlaşılması ve ardından bu gerilmelerin giderilmesi, karmaşık yükleme koşullarına sıklıkla maruz kaldıkları için Q&T zırh çeliklerinin kaynaklı bağlantılarında temel öneme sahiptir. Örneğin, çekme artık gerilmeleri Q&T zırh çeliklerinin yapısal bütünlüğünü harici yorulma varlığında tehlikeye atmakta veya askeri/zırh uygulamalarında yaygın olarak görüldüğü gibi sürünme yükleme koşullarını olumsuz etkilemektedir [40, 41]. Kaynak sonrası oluşan ve istenmeyen artık gerilmeler, kaynak sonrası ısıtma işlemleri (PWHT) yoluyla hafifletilebilir. PWHT martenzitik temperleme ile kaynaklı yapının mekanik özelliklerini iyileştirmek, deforme olabilirliğin geri kazanılması ve yapının yük taşıma kapasitesinin iyileştirilmesine yardımcı olur [42, 43]. Bu nedenlerle PWHT'nin zırh çelik kaynaklı birleştirmelerdeki kalıntı gerilmelerin azaltılması ile mekanik özelliklerine ve balistik performansı üzerindeki etkinliğinin araştırılması gerekmektedir.

Sonuç olarak, bir çelik malzemenin kusursuz ve çatlama riski oluşturmayacak şekilde ark kaynağı gerçekleştirilmesi için kullanılan bu malzemenin, kaynak öncesi ve kaynak sonrasında yapılacak ısıtma işlemlerinin önceden belirlenmesi gerekmektedir. Çelik malzemelerin kaynak kabiliyetine etki eden etkenler: kullanılan malzemenin kimyasal kompozisyonu ve karbon eş değeri ( $C_{eş}$ ), kaynaklı birleştirme metodu, ön tav sıcaklığı, fiziksel ve metalurjik özellikler, kaynağın geometrisi, ilave dolgu metali ve çeşidi, ısı girdisi ve kaynaktan sonra uygulanacak ısıtma işlem yöntemleridir [44].

Bu çalışmada yüksek sertlikteki MIL-A-46100 standardına göre üretilmiş olan Bisalloy HHA 500 zırh çeliği V kaynak ağzı açılarak, PA pozisyonunda, ilave tel kullanılarak otomatize edilmiş gazaltı kaynak (GMAW) yöntemi ile birleştirilmiştir.

Birleştirmede kullanılan kaynak parametrelerinin optimum koşulları sağlaması amacıyla literatür taraması ve ön deneysel çalışmalarla en uygun kaynak parametresi belirlenerek birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. İlaveten, kaynak sonrası birleştirmelere kaynak sonrası ısıl işlem (PWHT) uygulanmıştır. Kaynak iřlemē sonrasında numuneler 650 °C sıcaklıkta 1 saat bekletilerek ardından havada soğutulmuştur. Kaynaklı birleştirmeler iki gruba ayrılarak hem temin edildiği şekliyle birleştirilmiş numunelerin hem de kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış numunelerin hem mekanik özellikleri hemde balistik performanslarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, kaynak sonrası birleştirmelerin mekanik özellikleri ve mikroyapı ilişkileri kurularak incelenmiştir. Mekanik özellik incelemelerinin yanında ayrıca balistik olarak atışlı testler de gerçekleştirilerek test numunelerinin balistik performansları incelenmiştir.

Aynı kaynak parametrelerinde imal edilen numuneler standartların gerektirdiği sayıda çekme, eğme, çentik darbe testi, ayrıca mikroyapı ve sertlik ölçümleri için ayrı ayrı hazırlanmıştır. Bu numunelerden elde edilen mikroyapı görüntüleri, mikro sertlik testleri, çentik darbe, eğme ve çekme testlerinin sonuçları arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Balistik testler üzerinde değerlendirmeler yapılarak numunelere NATO standardının STANAG 4569 Seviye 1 kinetik enerjili mühimmatları ile standartta belirtilen hızlarda atışlar yapılarak numune üzerindeki penetrasyon incelemesi yapılmıştır. Balistik testler ile kaynak metali ve ITAB'ın balistik direncinin görölməsi ve balistik literatüründe zayıf bölge olarak tanımlanan kaynak bölgesindeki balistik penetrasyon incelenmiştir. Bu sonuçlar ışığında, önceden belirlenmiş kaynak parametreleri esas alınarak gerçekleştirilen kaynak birleştirmelerinden sonra gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmış ve ısıl işlem uygulanmamış birleştirmeler üzerinden, optimum mekanik özellikleri ve balistik performansı sağlayan konfigürasyonunun belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu tez çalışması, altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmanın giriş kısmına yer verilmiş olup bu bölümde çalışmanın konu ve kapsamı, amacı ve hedefleri ortaya konularak çalışmanın bölümlerine yer verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde sırasıyla zırh çeliklerinin yanı sıra diğer zırh malzemeleri, kaynak teknolojisi ve zırh çeliğinin kaynağı hakkında literatür bilgisi

verilmiştir. Ayrıca bu bölümde kaynak sonrası uygulanan ısıtım yöntemlerinden gerilim giderme ısıtım işlemi ile bilgiler ve kaynak sonrası zırh çeliklerinin ısıtım işlemleri hakkında bilgiler paylaşılmıştır.

Üçüncü bölümde ise balistik bilimi ve balistik testler hakkında konulara detaylı olarak yer verilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde deneysel yöntemlerin tanıtılması, deneyde kullanılan malzemeler ve kaynak parametreleri ile kaynak sonrası uygulanan ısıtım işlem ve deneysel test yöntemleri hakkında bilgilere yer verilmiştir. Bu kısımda öncelikle kaynaklı bağlantılara tahribatlı testler öncesi, tahribatsız muayene yöntemlerinden görsel muayene, sıvı penetrant muayene ve radyografik muayene uygulanmıştır. Ardından, birleştirmelere ana malzeme, ITAB ve kaynak metalini kapsayacak şekilde detaylı mikroyapı incelemeleri yapılarak, enine ve dikine kesitli sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla tahribatlı muayene yöntemlerinden çekme, eğme ve çentik darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme ve çentik darbe testi sonrasında kırık yüzey yapıları SEM ve EDS analiz yöntemi ile detaylı olarak incelenmiştir.

Çalışmanın beşinci ve altıncı bölümlerinde ise sırasıyla deneysel sonuçların paylaşımı ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Son bölümde, genel sonuçlar ve öneriler sırasıyla paylaşılmıştır.

## BÖLÜM 2

### ZIRH ÇELİKLERİ VE ZIRH ÇELİĞİNİN KAYNAĞI

#### 2.1. ZIRH ÇELİKLERİ

Zırh çelikleri, düşük karbonlu alaşımlı çelik grubu sınıfında olup, temel olarak alaşım elementleri Cr, Ni, Mo ve Mn'dır. Çizelge 2.1'de Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Ordu Standardı (MIL SPEC-Military Spec) prosedürüne göre üretilen ve en çok bilinen zırh çeliği kalitelerinin malzeme kimyasal kompozisyonları verilmiştir [3, 4, 45].

Çizelge 2.1. Zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonları [3, 4, 45].

Element	Kimyasal Bileşim (%)		
	MIL-A-12560	MIL-A-46100	MIL-A-46177
<b>C</b>	0,18-0,28	0,22-0,32	0,18-0,28
<b>Mn</b>	1,10-1,60	0,70-1,00	1,10-1,60
<b>P</b>	0,015	0,010	0,025
<b>S</b>	0,015	0,010	0,015
<b>Si</b>	0,20-0,40	0,35-0,50	0,20-0,40
<b>Cr</b>	1,20-1,60	0,40-0,70	-
<b>Ni</b>	2,00-3,40	0,80-1,30	-
<b>Mo</b>	0,40-0,55	0,50-0,65	0,40-0,55

En çok bilinen zırh çeliği kalitesi MIL-A-12560 standardına uygun olarak üretilmiş olan zırh çeliğidir ve “haddelenmiş homojen zırh çeliği (RHA)” olarak ifade edilirler. MIL-A-46100 kalitedeki çelikler ise, MIL-A-12560 standardına göre üretilen RHA çeliklerinden daha yüksek sertliğe sahip olan zırh çeliğidir ve “yüksek sertlikte zırh çeliği (HHA)” olarak ifade edilirler [46-48].

Zırh çelikleri genellikle düşük karbon (karbon değeri %0,30'dan az) ihtiva etmektedirler. Karbon element içeriğinin düşük olması hem üretim kolaylığı sağlarken hem de bununda yanında ayrıca iyi kaynaklanabilirlik ve iyi bir darbe dayanımı gibi özelliklerin de elde edilmesine olanak sağlamaktadır [49].

Metal zırhlar, kinetik enerjili (KE mühimmatı) tehditlere karşı yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahiptir. Gelen darbenin etkisini azaltmak için malzemenin tokluk özelliği devreye girmektedir. Metal zırhlarda dayanım için yüksek sertlik ile mukavemet özellikleri önemli olmakla birlikte tersinir özellik olarak kabul edilen tokluk değeri de önemli bir özelliktir [4].

Kullanılan zırh çelikleri üretilen askeri ürünler için istenilen mekanik özelliklerin sağlanması için çeşitli ısıl işlem yöntemlerine tabi tutulurlar. Yapısal olarak görevini yerine getirmesi için zırh çeliklerine genel olarak iki tip ısıl işlem yöntemi uygulanmaktadır. Bu zırh çelikleri, homojen zırh çelikleri ve homojen olmayan zırh çelikleri olmak üzere ikiye ayrılırlar. Homojen olan zırh çelikleri, tamamen ısıl işlem prosesine tabi tutulurlar. Bunun amacı kinetik enerjili olmayan mühimmatların darbe etkisini karşılamaktır. 25 mm et kalınlığına sahip malzemelerin sertliği genellikle 321-375 HBW arasında değişmektedir [3]. Homojen olmayan zırh çelik malzemeleri kinetik enerjili mühimmatların hedefi delip geçme özelliğine karşı, malzemenin yüzeylerine sertleştirme işlemi uygulanmasıdır. Malzemenin dış yüzeyi sertleştirilmiş olduğundan, kaynak işlemi esnasında daha fazla tedbir gerektirir. Homojen olmayan zırh çeliği malzemelerinin sertliği 477-534 HBW arasında değişmektedir [4].

Balistik darbelere karşı direncin sağlanması ancak yüksek toklukla sağlanabilir. Bu sebepten dolayı zırh çeliği malzemeleri yüksek bir darbe tokluğa sahip olmalıdır. Uygulamada, imalat işleminin zorluklarını daha düşük seviyede tutmak için uygun metalürjik özellik koşullarının sağlanması gerekmektedir. Arzu edilen mekanik özelliklerden olan sertlik ve mukavemet ancak orta karbonlu çelik malzeme tercih edilmesiyle gerçekleştirilir. Bu tercihte karbon elementi, kaynaklanabilirlik isteği yönünde sınırlanmıştır. Sonuç olarak, zırh çeliğine yapılan temperleme ve sertleştirme ısıl işlem yöntemleriyle çeliğin mukavemet ve tokluk özellikleri dengelenmiş olur. Bu

dengelemede en belirleyici rol ise östenitleştirme işleminde karbon ve karbür oluşturuca alaşım elementlerinin doyum sağlaması ile temperleme işleminde sıcaklık ve zaman değişimine bağlı olarak oluşan karbürün çökmesi ve çökelti büyümesi olarak adlandırılan Ostwald olgunlaşmasıdır [48].

Dövme çelik zırh malzemeleri çok uzun zaman önce tarihte yerini almış ve I. Dünya Savaşının ilk zamanlarındaki tank araçlarında çok fazla kullanılmıştır. Haddelenmiş çelik zırh malzemeleri ise II. Dünya Savaşında kullanılmaya başlanmıştır. RHA çelikleri, 1970 yıllarında yaygın olarak kullanılmış ve diğer çelik türlerine göre kaynak yapılabirlik özelliği, daha yüksek rijitlik ve tokluk gibi birçok önemli avantajlar sağlamıştır. Günümüzde de RHA çelikleri aracın gövde yapısında ve temel zırh tasarımlarında en geniş kullanım alanına sahip zırh malzemesidir. Genellikle nüfuziyet derinliği (depth of penetration) testinde zırh malzemelerinin ölçütü olarak kullanılır. Zırh çeliği teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte, 500 HB gibi yüksek sertlikteki çeliklerin ortaya çıkmasının yanı sıra son zamanlarda ultra yüksek sertlikteki çeliklerinin (600+ HB) üretimi de gerçekleştirilmektedir [50]. Bu sertliği geliştirilen çeliklerin balistik özelliğinin arttırmasıyla birlikte, maalesef zırh çeliğinin kaynaklanabilirlik ve tokluk özellikleride azalmıştır. Yüksek sertlikteki çeliklerin üretim yapılabirliği daha zor ve daha kırılğan bir yapıya sahiptirler. Malzemede yüksek gerilme oranlarına ulaşıldığında malzemenin çatlaması olasılığıda artar. Bu nedenle, yapısal olarak yük taşıma işlevi görmeleri veya patlama durumunda yüksek basınç dalgalarına karşı direnç sağlamaları beklenmediği için, sert ve kırılğan özellikteki çelik malzemeler, tasarımsal olarak eklemeli zırh sistemleri için daha uygun bir seçenektir. Aracın eklemeli zırh sistemleri yapısında kullanılan çelik malzemelerde şekillendirilebilirlik veya kaynak yapılabirlik özelliği genellikle beklenmez. Yüksek veya ultra yüksek sertlikteki zırh çelikleri için ek zırh sistemleri genelde RHA, alüminyum malzeme veya kompozit zırh destek malzemeleri gibi daha sünek malzemelerle kombine edilerek yeni bir zırh sistemi tasarımı oluşturulur. Zırh sisteminde zırhın yapısını oluşturan farklı malzemeler olduğu için böylece mermi darbesi zırh sisteminin kalınlığı boyunca farklı malzeme özellikleri gösterir. Yüksek sertlikteki malzemeler tipik olarak, merminin ucunu kırmak için zırh sisteminin önüne (çarpma yüzeyi), daha sünek yapıdaki malzemeler ise (alüminyum, kompozit vb.)



geriye kalan enerjiyi emerek parçaları tutması amacıyla çarpma yüzeyindeki ilk plakanın arkasına yerleştirilir [51].

Zırh çeliği malzemesine alternatif olarak en fazla kabul görmüş malzeme ise alüminyumdur. Alüminyum zırh malzemesi ağırlık oranına göre, çelik malzeme karşısında daha yüksek bir balistik verimliliğe sahiptir. Ayrıca alüminyum alaşımlı zırhlar düşük yoğunlukları ( $2,7\text{g/cm}^3$ ) nedeniyle çelik ve titanyuma göre ağırlık avantajı da sağlarlar [52]. Alüminyum malzemeler kara araçlarında uzun yıllardır kullanılmaktadır. Genellikle, kaynaklanabilirlik ve yük taşıma gibi gereksinimlerinin zor koşullu olmadığı ilave zırh sistemlerinde kullanılırlar. Fakat, parçacık ve şarapnel tehditlerine karşı etkin koruma sağlarlarken zırh delici (AP-Armor Piercing Ammunition) mühimmatlara karşı etkin değildirler. Alüminyumun süneklik özelliği mayın patlamalarında hayatta kalabilme kabiliyetinde büyük bir avantaj sağlar. Kalın kesitler kullanıldığında diğer metalik zırhlara göre daha yüksek yapısal rijitlik sağlarlar. Anizotropik yapıları nedeniyle farklı yönlerde farklı performans gösterirler [53]. Çizelge 2.2’de zırhlı muharebe araçlarında kullanılan bazı alüminyum alaşımları verilmiştir.

Çizelge 2.2. Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan bazı alüminyum alaşımlı malzemelerin özellikleri [48].

Alaşım zırh sınıfı	Gerilim (MPa)	Gerilme, UTS (MPa)	Uzama (%)
AA 5083-H131	(%0,2) 285	345	10
AA 5059-H131	(%0,2) 360	405	9
AA 7017-T6	(%0,2) 385	445	11
AA 7039-T6	(%0,2) 375	435	11

ABD menşeli 3. nesil bir muharebe aracı olan M1 Abrams savaş tankı olmak üzere zırh malzemesi kullanımında titanyum malzemesi gittikçe artmaktadır. Titanyum malzemesi yüksek yapısal dayanım/ağırlık oranı, çok iyi çoklu vuruş koruma özelliği ve mükemmel bir korozyon direnci özellikleri sayesinde RHA malzemelere göre gelişmiş bir balistik kabiliyet sunar. Titanyum zırhı düşük yoğunluk ( $4,45\text{ g/cm}^3$ ), yüksek mukavemet (900-1300 MPa UTS) ve yüksek tokluğa sahiptir. 300-350 HB yüksek sertliğe sahiptir. Balistik kalitedeki formu Ti-6Al-4V alaşımı olarak bilinir. En

büyük dezavantajı ise maliyettir. Maliyet olarak çelik zırhların 10-20 katıdır [54]. Çizelge 2.3’ de bazı Ti-6Al-4V alaşımlarının balistik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. Ti-6Al-4V alaşımı için balistik özellikler [54].

Alaşım	Kalınlık (mm)	Alan yoğunluğu (kg/m <sup>2</sup> )	Tehdit	Balistik limit (m/s)
EBCHM Ti-6Al-4V	25,4	111,3	20-mm FSP	1016
EBCHM Ti-6Al-4V	38,8	172,7	20-mm FSP	1493
EBCHM Ti-6Al-4V	64,0	284,8	30-mm APDS	932

Magnezyum alaşımlı zırh çeliklerinin alaşımsız hali zayıf ve kırılğan olduğundan mühendislik uygulamalarında alaşımlı hali kullanılmaktadır (Çizelge 2.4). 1,7-1,9 g/cm<sup>3</sup> düşük yoğunluğa sahip olup, bazı alaşımları zırh derecesindeki alüminyum alaşımları ile (5083-H32) yarışır [55].

Çizelge 2.4. Magnezyum alaşımlar için balistik sonuçlar [55].

Alaşım	Kalınlık (mm)	Alan yoğunluğu (kg/m <sup>2</sup> )	Tehdit	Balistik limit (m/s)
AZ31B-O	31,5	55,8	0,30 APM2	511
AZ31B-H24	76,5	135,4	0,30 APM2	863
AZ31B-O	7,6	13,5	0,22 FSP	417
AZ31B-H24	7,8	13,8	0S22 FSP	421
AZ31B-O	31,5	55,8	0,50 FSP	639
AZ31B-H24	76,5	135,4	20-mm FSP	897

Zırhlar görev tanımları gereği, çok kısa bir zaman diliminde oldukça yüksek bir kuvvete ve etkiye maruz kalırlar. Eğer bu kuvveti karşılayıp dirençli durabilirlerse maruz kaldıkları tehdit seviyesinde bir koruma sağladıkları kanıtlanmaktadır [48].

Balistik koruması bulunan malzemelerin en önemli özelliklerinden birisi o malzemenin sertliğidir. Bir malzeme sahip olduğu sertlik özelliği sayesinde aşınma ve yıpranmaya karşı direnç oluşturur. Araçlarda kullanılan zırh malzemelerinin aynı zamanda araç gövdesi olarak da kullanıldığı göz önünde bulundurulduğunda dayanım ve esnekliğe sahip olması gerekmektedir. Seçilen malzemelerin kaynakla

birleştirilebilir olması da malzeme sürekliliği için son derece önemlidir. Ayrıca kaynak noktalarında balistik sürekliliği ve kaçak olmaması zırh performansını doğrudan etkilemektedir. Zırh malzemelerinin sert yapısı kullanılacak malzemenin şekillendirme maliyetlerini önemli ölçüde etkilemektedir [48, 51].

Bisalloy zırh çelikleri ise hafifliğin ve balistik mermilere karşı direncin gerekli olduğu askeri ve sivil uygulamalarda kullanıma uygun, su verilmiş ve temperlenmiş olarak üretilen zırh çelik plakalarıdır. Bisalloy zırh çelik kalite özellikleri Çizelge 2.5'te verilmiştir [56].

Çizelge 2.5. Bisalloy alaşımlarının mekanik özellikleri ve zırh çeliğinin kalitesine ait eş değer askeri standartlar [56].

Kalite	Kalınlık	Sertlik (Spesifikasyon)	Çekme Dayanımı (Tipik)	Eşdeğer Şartname
Bisalloy 80A	5 – 50mm	255 HB (Tipik)	860 MPa	Yok
Bisalloy RHA 300	5 – 50mm	260 – 310 HB	1000 MPa	MIL – DTL – 12560 sınıf 2
Bisalloy RHA 360	5 – 50mm	310 – 410 HB	1140 MPa	MIL – DTL – 12560 sınıf 1
Bisalloy HTA 400	5 – 50mm	370 – 430 HB	1250 MPa	Yok
Bisalloy UHT 440	5 – <30mm	420 – 470 HB	1450 MPa	MIL – DTL – 12560 sınıf 4
Bisalloy HHA 500	6 – 20mm	477 – 534 HB	1640 MPa	MIL – DTL – 46100
Bisalloy VHH 550	5,5 – 50 mm	530 – 570 HB	1850 MPa	MIL – DTL – 46186
Bisalloy UHH 600	5 – 25 mm	570 – 640 HB	2050 MPa	MIL – DTL – 32332 sınıf 1 (≤16mm)

Bu tez çalışmasında kullanılan MIL-DTL-46100 spesifikasyonuna göre üretilmiş Bisalloy marka yüksek sertlikteki HHA 500 zırh çeliği, düşük hidrojenli kaynak sarf malzemesi ile MMAW ve GMAW kaynak yöntemleri kullanılarak kolayca birleştirilebilir. Kimyasal bileşimler, zırhın yalnızca üstün balistik ve mekanik özelliklere değil aynı zamanda iyi kaynaklanabilirliğe de sahip olmasını sağlayan düşük karbon ve alaşım içerikleriyle dengelenmiştir. HHA 500 zırh çelik levhalarının yeterli şekilde kaynaklanmasını sağlamak için kaynak ve ITAB bölgesinin soğuk çatlaması riskini en aza indirmek amacıyla kaynak sırasında ortaya çıkan hidrojen seviyelerine daha fazla dikkat etmek gerekir. Ön temizlik işleminin yapılması, kaynak telinin kuruluşuna dikkat edilmesi ve kaynak sarf malzemelerinin hidrojen kontrollü kullanılmasıyla kaynak hidrojen içeriği en aza indirilebilir. Minimum 6 mm kalınlığındaki bir Bisalloy HHA 500 zırh çeliği, 44 Magnum, 12 Gauge Shotgun ve

7,62x51 NATO Ball M80 mühimmatına ve minimum 10 mm kalınlığındaki bir plaka 5,56x45 M193 karşı balistik direnç gösterebilmektedir [56, 57].

## **2.2. DİĞER ZIRH MALZEMELERİ**

Zırh sistemleri yapılarında bulundurduğu malzeme özellikleri ve tehdidi önleme özelliklerine göre gelen tehdidi parçalama eğiliminde olanlar ile gelen tehdidin enerjisini absorbe etme/emme eğiliminde olanlar olmak üzere iki başlık altında incelenebilir [51].

Tehdidin enerjisini parçalama eğiliminde olan malzemeler genellikle zırh çelikleri ve seramik gibi mukavemeti yüksek olan malzemelerdir. Bu yüksek mukavemetli malzemelerin amacı gelen tehdidin yönünü saptırmak, merminin ucunu aşındırarak parçalara ayrılmasını sağlayarak kinetik enerjiyi dağıtmaktır [48, 50].

Katmanlı yapılarda seramik malzemelerin kullanım amacı da zırh delici mermilerin ilk etkilerini azaltıp en dış katmandaki yüzeye çarptığı anda tehdidin başlık kısmını kütleştirip etkisini başka yöne yöneltmek üzere sert bir yapıda kullanılmasıdır. Bu katmanlı yapının altında ön katmandan gelen zırh/seramik parçalarını tutup absorbe edecek ve tehditten diğer kalan enerjiyi sönmüleyecek daha elastik kompozit malzemeler tercih edilir [51, 57].

Tehdit emici olan diğer malzemeler plastik deformasyona izin vererek tehdidin kinetik enerjisini absorbe eder ya da absorbe etme yönünde eğilim gösterir. Bu sayede tehdit ısı enerjisi gibi yıkıcı ya da basınç etkisi daha az olan bir enerji formuna dönüşür. Zırh sistemleri kullanım amaçlarına ve gelen tehdidin türüne göre şekillendirilir [51].

### **2.2.1. Kompozitler Zırhlar**

Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte zırh sisteminin koruma sağlamasının yanında hafif olması beklentisi de artmıştır. Zırh sistemlerinin hafifliği en az koruması kadar aranan bir özellik haline gelmiştir. Bu yüzden yeni geliştirilen zırh yapıları penetrasyona karşı direnç özelliği yüksek ve alansal olarak düşük yoğunluğa sahip olmalıdır. Bununla

birlikte zırhlı araçların ana yapısı son 100 yıldır metal olarak devam etmiştir. Değişimler sadece tehditlere karşı beka yapısını oluşturan katmanlı yapıda belirginlik göstermiştir. Günümüz teknolojisinde zırhlı sistemlerin balistik özellikleri büyük önem taşımaya karşın sistemlerin hareket kısıtlarının da minimum seviyede olması beklenmektedir. Bu sistemlerin beka özelliklerinin artmasına yönelik yapılan çalışmalar neticesinde platform ağırlıklarının artma sebebi ile hareket kısıtları ortaya çıkmaktadır. Hareket kısıtını en aza indirmek için araçlara hareket ve tahrik kabiliyeti kazandıran sistemlerin de kapasitesinin artırılması gerekmektedir. Daha güçlü bir güç grubu (motor ve şanzımandan oluşan sistem ile soğutma paketi) ve daha yüksek kapasiteli süspansiyon sistemi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu durum araca balistik koruma için gerekli olan kabiliyeti kazandırırken ek bir ağırlık getirmektedir. Ayrıca çoğu zaman kapasitelerdeki bu artışla birlikte platformların silüetlerinde artışa sebep olmaktadır. Günümüzde platformlarda hem balistik zafiyet yaratmamak hem de platform hareket kabiliyetinden taviz vermemek için balistik olarak koruması yüksek, alansal olarak yoğunluğu düşük, dolayısıyla ağırlığı düşük zırh sistemleri tercih edilmektedir. Bu nedenle balistik özellikli ancak düşük yoğunluklu kompozit zırh çözümleri alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu zırhlar genellikle mürettebatın kullandığı koruyucu elbiseler üzerinde uygulanarak hafif olmasının avantajlarından yararlanılmaktadır [46, 48, 51, 58].

#### **2.2.1.1. Hafif Kompozit Zırh**

Hafif kompozit zırh malzemeleri, yüksek bir balistik özellik göstermesi ve düşük ağırlık gereksinimlerini sağlaması nedeniyle kara araçlarında daha fazla kullanılmaktadır. Hafif kompozit zırh malzemesinde en fazla kullanılan 3 tip elyaf çeşidi vardır. Bunlar,

1. Cam elyaf
2. Aramid elyaf
3. Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) elyafıdır [51,58].

Çizelge 2.6'da hafif kompozit zırh malzemelerinde kullanılan elyaf tipleri ve özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.6. Hafif kompozit zırh malzemelerine kullanılan elyaf tipleri ve özellikleri [58].

Malzemeler	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (MPa)	Young Modülü (GPa)
E Cam	2,55	2000	80
S Cam	2,49	4750	89
Aramid	1,44	1880-2860	70-112
UHMWPE	0,97	2200-3900	62-132

### 2.2.1.2. Seramik Zırh

Seramik malzemeler, çok sert ve buna bağlı olarak kırılğan bir yapıya sahiptirler. Bu malzemeler zırh delici merminin ucunu kırma özelliğine sahip iken, yumuşak malzemelerin ise delme etkisini azaltma özelliğine sahiptirler. Zırh delici özellikteki bir mermi, kendisinden daha yumuşak bir malzemeye darbe uyguladığında deformasyon geçirmez. Böylece şeklini değıştirmeden mermi, malzemeye direk olarak nüfuz eder. Bu durum, zırh delici mermilerin etkinliğini artırırken, hedef malzemenin balistik koruma kapasitesini önemli ölçüde azaltır. Genelde zırh delici özellikte olan mermiler 60 HRC sertlik değerinden daha fazla sertleştirilmiş çelik malzemelerden veya tungsten karbür malzemedden üretilirler. Zırh delici özelliğine sahip mermiden daha güçlü olan malzemeler çoğunlukla şok ve patlama yüklemeleri karşısında çok kırılğan yapıya sahiptirler. Bu sebeple daha sert zırh delici özellikte olan mermileri durdurmak amacıyla seramik malzemeler araç gövdesinde kullanılan haddelenmiş çelik zırh sistemine dahil edilir [51].

### 2.3. KAYNAK TEKNOLOJİSİ

Kaynak, mühendislik yapılarının imalatında büyük bir öneme sahiptir. Kaynaklı yapı elemanları, en düşük maliyetle üretilmeli ve belirlenen görevleri eksiksiz yerine getirecek şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca, işletme süresince uzun ömürlü olacak şekilde güvenilir bir performans sergilemelidir. Metalik özelliklerdeki malzemelerde bir yapı elemanın kaynak işleminde, belirli bir kaynak metodunun kullanıldığı uygun bir üretim sürecinde malzemelerin kaynak işlemi ile birleştirilmesi söz konusudur.

Burada kaynak bölgesinin yerel özellikleri ve bir araya getirilen kaynaklı parçaların tüm konstrüksiyon yapısına etkileri önceden belirlenmiş bütün koşulları eksiksiz olarak sağlaması gerekir [59].

Kaynak yapılacak malzemenin türüne göre, metal ve plastik malzeme kaynağı olarak iki şekilde incelenmektedir [59].

### **2.3.1. Metal Kaynağı**

#### **2.3.1.1. Eritme Kaynağı Usuller**

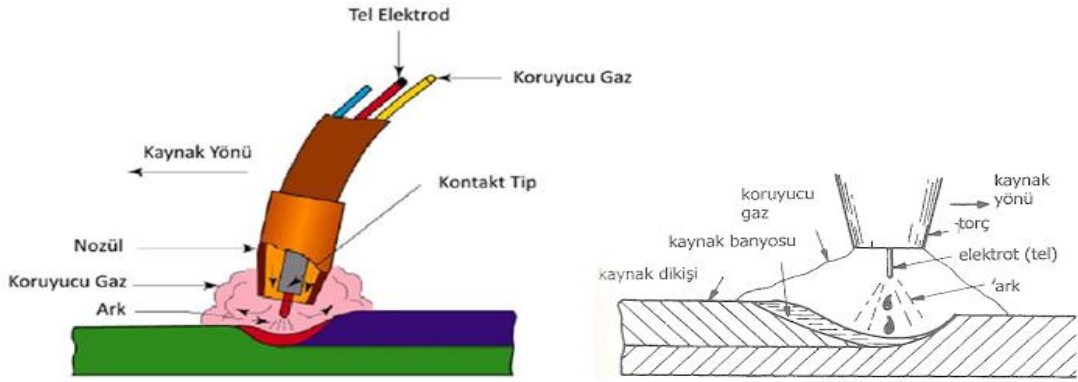
Metal malzemelerin eritme kaynağı yönteminde genellikle, aşağıdaki birleştirme usulleri kullanılır [59].

1. Döküm Ergitme Kaynağı
2. Elektrik Direnç Ergitme Kaynağı
3. Gaz Ergitme Kaynağı
4. Elektrik Ark Kaynağı
  - 4.1. Karbon Arkı İle Kaynak
  - 4.2. Metal Arkı İle Kaynak
  - 4.3. Koruyucu Gazla Kaynak (Gazaltı Kaynağı)
    - 4.3.1. TIG Kaynağı
      - 4.3.1.1. Normal TIG Kaynağı
      - 4.3.1.2. Plazma TIG Kaynağı
    - 4.3.2. MIG Kaynağı
      - 4.3.2.1. Normal MIG Kaynağı
      - 4.3.2.2. Aktif Gazla MIG Kaynağı
  - 4.4. Metal Koruyucu Altında (Yalıtılmış Elektrot İle) Kaynak
  - 4.5. Tozaltı Kaynağı
5. Elektron Işını İle Kaynak
6. Lazer Işını İle Kaynak

Bu çalışmada MIG kaynağı kullanıldığı için yalnızca bu kaynak yöntemi hakkında bilgi verilmiştir.

### 2.3.2. MIG/MAG (Gazaltı) Kaynağı

Bu kaynak yönteminde dışarıdan verilen koruyucu bir gaz ve otomatik metotla sürekli beslenen ve eriyen elektrot kullanılır (Şekil 2.1). Kaynakçı operatör tarafından kaynak makinesinin ilk ayarları yapıldıktan sonra kaynak arkının elektriksel karakteristiği ayarı bundan sonra otomatik olarak kaynak makinası tarafından sağlanmış olacaktır. Bu sebeple yarı otomatik kaynak işleminde, kaynak hızı, doğrultusu ve torcun pozisyonu kaynakçının gerçekleştirdiği elle kontrollerden ibarettir. Uygun kaynak donanımı seçildikten sonra, optimum ayarlar yapıldığında torcun akım şiddeti (elektrot besleme hızı) ve ark boyu kaynak makinesi tarafından otomatize edilmiş olarak sabit bir değerde kontrol altında tutulur [59, 60].



Şekil 2.1. Gazaltı kaynak prensibi [61].

#### 2.3.2.1. MIG/MAG Kaynağında Kullanılan Koruyucu Gazlar

MIG/MAG kaynak metodunda genellikle koruyucu gaz olarak soy gazlar (inert veya asal gazlar) ve aktif gazlar kullanılır. Argon gazı, helyum gazı ve argon-helyum gaz karışımları soy gazlar grubuna; karbondioksit gazı ve argon-oksijen gazı veya argon-helyum gaz karışımları ise aktif gazlar grubuna girer [59].

**Argon**, atmosfer ortamından damıtılarak üretilen bir soy gaz çeşididir. Argon gazı havadan üretildiği için içerisinde azot, oksijen ve su buharı gibi istenmeyen öğelerde içerir. Fakat bu duruma rağmen kaynaklı birleştirme uygulamaları için en uygun gaz çeşididir. MAG kaynak işlemlerinde Argon gazı kullanımı yüksek ark kararlılığı sağlarken düşük iletkenlik özelliğinden dolayı arkın merkezi yüksek sıcaklıkta



mevcudunu koruyarak metal damlacıklarının ark boyunca geçişi çok daha akışkan olur [62].

**Helyum**, argon gazından nispeten çok daha pahalı bir gaz çeşididir. Ender olarak atmosferden, çoğunlukla ise yeraltından çıkarılan soy gaz çeşididir. Argon gazı ile karışım sağlandığında, helyum gazı ile daha kararsız bir ark elde edilmiş olunur. Fakat, kaynak nüfuziyet oranı argon gazına göre çok yüksektir. Genelde kalın ve yüksek ısı iletkenliğe sahip malzemelerin (alüminyum, bakır vb.) kaynağında kullanılır. Helyum gazı havadan hafif bir gaz olduğundan dolayı, gerekli korumayı sağlamak için argon gazına göre kaynak banyosunda kullanım oranı daha yüksektir [62].

**Karbondioksit**, atmosferde ve yeraltından çıkarılan aktif bir gaz çeşididir. Bu aktif gazın genel olarak olumsuz özelliği ise kararsız bir ark oluşturması ve kaynakta artan sıçramalardır. Sıçramaları düşük seviyelere indirmek için genellikle ark boyu kısa ve elverdiğince sabit tutulmalıdır. Karbondioksit gaz koruması ise yapılan kaynaklarda genellikle nüfuziyet oranı yüksektir [62].

**Aktif karışımlar**, karbondioksit ve oksijen aktif gazlardır. Genellikle gazların avantajlı özelliklerini kullanmak için argon-oksijen gaz karışımı, argon-oksijen-karbondioksit gaz karışımı veya argon-karbondioksit gaz karışımları kullanılabilir. Soy gazlar her sıcaklıkta koruyucu özelliklerini gösterirken, aktif gazların ilave edilmesi ile birlikte daha kararlı bir ark oluştururlar ve kaynak banyosuna metal geçişi sağlanır. Bu gazların en önemli özelliği aktif olması ve oksitleyici özelliğinin bulunmasıdır [62, 63].

### **2.3.2.2. MIG/MAG Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri**

İlave kaynak dolgu telleri kimyasal bileşimlerine, masif (dolu) veya özlü olmalarına göre sınıflandırılırlar. Kaynak tellerinin yüzeyinde kesinlikle yağ veya nem olmamalıdır. Bu faktörler, kaynaklı birleştirmelerde istenmeyen çatlaklar ve gözenekler gibi kaynak hatalarına yol açabilir. Ayrıca, tel sarımlarının düzgün olmaması durumunda düzensiz tel beslemesi ve uygun olmayan kaynaklama olabilir. [59].

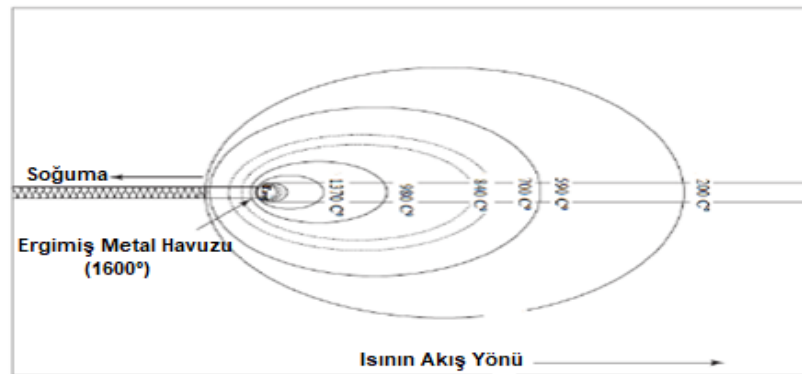
Masif teller, genelde ana malzeme ile benzer bileşime sahiptirler ve ana malzemeyi temizleyici özellikte ilave elementleri içerirler. Genellikle bu tellerin kullanım çapları 0,6-0,8-0,9-1,0-1,2-1,6 mm'dir [59].

Gaz korumalı özlü teller ise, boru şeklinde olan telin içinde dekapanı içerir. Bu toz dekapan, örtülü elektrotlardaki gibi örtülerin yaptığı benzer görevi görmektedir. Dekapan rutil veya toz granül, bazik veya isteğe göre özel özelliklerde olabilir [64].

### 2.3.3 Kaynak Sırasında Isı Dağılımı ve Etkileri

Tüm kaynak metotlarında ısı, kaynaklı bağlantının oluşturulmasını sağlayan yapının en önemli unsurudur. Kaynak işlemi esnasında oluşan ısı, kaynak dikişinden başlayarak ana malzeme üzerinde dağılmaktadır. Bu ısı dağılımı birçok farklı şekilde elde edildiği gibi, genellikle kaynaklanmış iki metalin düz akım debisi ve kontak direnci ile sağlanır. Kaynak sırasındaki ısı dağılımının etkisi kaynak metotlarından bağımsız olarak irdelenebilir. Isıl şartların etkisiyle, malzemenin kristal yapısı, mekanik özellikleri, artık gerilmeleri ve distorsiyonlar meydana gelir. Şekil 2.2'de kaynak işleminde sıcaklık gradyentinin yönü gösterilmiştir. Metal bir malzemenin mekanik olarak yapısını ısı ile etkileyen 4 ana faktör aşağıda verilmiştir [65, 66]:

1. Maksimum sıcaklık dağılımı (pik sıcaklık).
2. Kaynak metalinin ile ITAB'ın ısı dağılımı.
3. Kaynak metalinin ve ITAB'ın soğuma hızı.
4. Kaynak metalinin katılma hızı.



Şekil 2.2. Kaynak işleminde sıcaklık gradyentinin yönü [66].

## 2.4. ZIRH ÇELİĞİNİN KAYNAĞI

Zırh çelikleri, düşük alaşımlı ve yüksek mukavemetli çelik grubunda sınıflandırılır. Zırh özelliği, düşük alaşım elementleri ve ısıl işlem yöntemleriyle kazandırılmış olması karbon içeriğinin gerekli olma durumunu engel olduğu söylenemez. Bu yüzden MIL-A-46100 askeri standardına uygun olarak üretilen zırh çeliklerindeki %C içeriğinin kaynaklanabilirlik kabiliyetine etkisi, karbon eşdeğeri açısından formülasyonu aşağıda verilmiştir [4].

**Karbon eşdeğeri formülü ( $C_{eş}$ ):**

$$C_{eş} (IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (2.1)$$

Diğer çelik malzemelerine göre, zırh çeliklerinin yapısındaki bileşimlerinden dolayı kaynaklı birleştirmelerde çatlama eğilimine daha fazla eğilimlidir. Bu istenmeyen durum belirli ısıl işlem yöntemleri ile en aza indirgenebilir. Kaynak öncesi ön ısıtma yapılması, çok pasolu kaynak işlemlerinde pasolar arasında kontrollü sıcaklığın sağlanması ve kaynak sonrası ise kontrollü soğutma işlemleri yapılarak çatlama riski azaltılabilir [67].

Ön ısıtma işlemi, kaynak dikişi çevresindeki sıcaklık dağılımını genişleterek kaynak dikişinin yavaş soğumasını ve böylece iç gerilim oluşumunu, sertleşmeyi ve çarpılmayı önler. Böylelikle, ön ısıtma işlemi perlit, ferrit ve beynit oluşumu için zaman kazandırmış olur. Pasolar arasında uygulanan sıcaklık ise kaynak dikişine istenmeyen hidrojen elementi girmiş ise bu hidrojenin kaynaktan uzaklaştırılmasını sağlar ve böylece hidrojen çatlağı riskide azaltmış olur [68].

Ön ısıtma işlemi, zırh çelik malzemelerinin kaynak kabiliyetini etkileyen en önemli faktörlerdendir. Özellikle de kalın metal malzemelerde yüzeydeki sıcaklık kaybının önüne geçmek için ön ısıtma işlemi mukakkak uygulanması gereklidir. Malzemeye tatbik edilen ön ısıtma işleminde parça kalınlığının ön ısıtmaya etkisi, Daniel Seferian'ın formülüne göre belirlenir [69].

### Daniel Seferian'ın ön tavlama sıcaklığı saptama formülü:

$$T_{\text{ön tav}} = 350 \sqrt{Ce\eta (1 + 0,005d) - 0,25} \quad (d : \text{Et kalınlığı}) \quad (2.2)$$

Zırh çeliklerinin kaynağında en önemli ve dikkat edilmesi gereken unsurlardan birisi de muhakkak ki ısı girdisidir. Isı girdisini düşük tutmak için aşağıdaki formülde gösterildiği gibi amper ve voltaj değerinde düşük seviyede tutmak gereklidir. Bu yüzden optimum amper ve voltaj değeri kaynak öncesi belirlenmelidir [70].

### Isı girdisi formülü:

$$\text{ISI GİRDİSİ} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \right) = \eta \times \frac{\text{Volt} \times \text{Amper} \times 60}{\text{Kaynak Hızı} \left( \frac{\text{mm}}{\text{dk}} \right) \times 100} \quad (2.3)$$

$\eta$ : Enerji Verimlilik Faktörü

Zırh çeliği malzemelerinin kaynaklı birleştirmelerinde gazaltı ark kaynağı, elektrik ark kaynağı, tungsten soy gaz ve tozaltı ark kaynak yöntemleri gibi birçok kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Elektrik ark kaynak yöntemi en eski ve sık kullanımı olan bir yöntemdir. Fakat elektrik ark kaynak yöntemi, zırh çeliği malzemesinin kaynağında soğuk (hidrojen) çatlak riski oluşmasını sağlayan bir kaynak yöntemidir. Bunun sebebi ise ilave kaynak metali olarak kullanılan örtülü elektrodun nem alması sonucunda kaynak esnasında kaynak banyosuna giren hidrojen elementinin soğuma sonrasında genişerek kaynakta çatlak oluşturmasıdır. Elektrik ark kaynak yönteminde kullanılacak olan elektrotların seçiminde hidrojen içeriklerinin seviyeleri düşük olanları seçilmelidir. Ayrıca kaynaktan önce elektrotlar muhakkak fırınlanmak suretiyle kurutulduktan sonra kullanılmalıdır [70].

Gazaltı ark kaynak yöntemi, teknolojik ilerlemelerle birlikte otomasyona imkân veren bir kaynak metodu olduğu için gün geçtikçe imalat sektöründe kullanımını artmaktadır. Gazaltı ark kaynak yöntemlerinde kullanılan ilave metal, örtü yapısı olmadığı için kaynak banyosunun nemden daha az etkilenmesini sağlar. Ancak yine de zırh çeliklerinin gazaltı ark kaynak işlemlerinde düşük hidrojen içeriğine sahip ilave kaynak metali tercih edilmesi önemlidir [69].

Tasarımsal olarak kaynak dikişlerinin boyutlarının uzun ve doğrusal olması durumunda tozaltı ark kaynak yöntemi tercih edilebilir. Bu kaynak yöntemi ile hem daha hızlı bir kaynak dolgusu sağlarken hem de kalın et kalınlıklarının seri kaynaklarında önemli verimler elde edilirler. Yine bu kaynak yönteminde de kullanılan tozunda hidrojen içeriği muhakkak düşük olmalı ve fırınlanması hususlarına özen gösterilerek, olası çatlak oluşum riskleri en az seviyeye indirgenmelidir [70].

Kara ve Korkut [63], yaptıkları çalışmada, piyasa adı ArmoX 500T olan zırh çeliğini 307Si elektrot ve MIG (Metal Inert Gas) kaynak yöntemini kullanarak birleştirmişlerdir. Elde edilen numunelerden birine 650 °C sıcaklıkta 4 saat gerilim giderme ısıl işlemi uygulayarak mikroyapı ve mekanik özellikler açısından ısıl işlemin kaynak sonrası özelliklerine etkisini kıyaslamışlardır. Isıl işlemlili numunelerin kaynak metali bölgesinde yoğun olarak dentrit kolları ve düzensiz katılaşmadan kaynaklanan kusurlarda azalma görülmüştür. Benzer şekilde ITAB iri taneli bölgede daha düzenli ve homojen bir yapı elde etmişlerdir. Isıl işlemin tokluk ve mikroyapıya olumlu etkiler oluşturarak tokluğu arttırdığını tespit etmişlerdir [63].

Balakrishnan vd. [69], üstün balistik performansa sahip olduğu bilinen ve bu nedenle zırhlı araçların üretiminde kullanılan su verilmiş ve temperlenmiş AISI 4340 çeliği kaynaklı birleştirmesini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, kaynaklı zırh çeliklerinde, birleşim yerlerinde ısı girişinden dolayı mukavemetin daha düşük olduğu tespit edilmiştir [69].

Soy vd. [70], yaptıkları çalışmada gazaltı metal ark kaynağı yöntemini kullanarak ark kaynak parametrelerini belirlemiştir. Bu çalışmada, gaz korumalı metal ark kaynağı yöntemi için belirlenen kaynak parametreleri ayrıntılı olarak incelenmiş ve sonuç olarak en uygun kaynak parametreleri ve limitleri denklem ve tablo şeklinde verilmiştir. Belirlenen kaynak parametreleri, seçilen kaynak tekniği, materyalin kalınlığı ve kaynak pozisyonu için kaynak simülatörü geliştirilmiştir ve bir bilgisayar programında kullanılmıştır. Bu parametreler ekrandan tablolar halinde takip edilebilmiştir [70].

Ahmad ve Bakar [71], ise yaptıkları çalışmada, gazaltı metal ark kaynağı ile birleştirilmiş ve sonrasında ısıl işlem uygulanmış olan AA6061 numunesindeki mekanik özellikler ve mikroyapıları araştırmışlardır. Hazırlanan numuneler taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir. Sonuç olarak ısıl işlem uygulanan ve uygulanmayan numuneler karşılaştırılmıştır. Isıl işlem sayesinde numunelerin çekme, sertlik ve akma değerlerinde gözle görülür miktarda artış olduğunu tespit etmişlerdir [71].

Kara ve Korkut [72], yaptıkları diğer bir çalışmada Ramor 500 zırh çeliği malzemesini MIG kaynak yöntemi ile farklı kaynak ağız geometrilerinde birleştirerek bu geometriler için metalürjik ve mekanik özellikleri karşılaştırmışlardır [72].

Alipooramirabad vd. [27], yaptıkları diğer bir çalışmada Bisalloy 80 zırh çeliğini gaz metal ark kaynak yöntemi ve ER 110 SG tel ile birleştirerek kaynak sonrası ısıl işlem (PWHT) uygulamışlardır. 600 °C'de 1 saat ısıl işlem uygulaması sonrası kaynaklı bağlantıların kalıntı gerilimlerinin azaldığını rapor etmişlerdir. Uygulanan PWHT, sonrası ana malzeme, ITAB ve kaynak metalinde mikroyapısal değişikliklere yol açtığı belirtilmiştir [27].

Akça ve Karaaslan [73], yaptıkları çalışmada önceden ön tav uygulanmış ve uygulanmamış tek paso ile kaynak edilen MIL-A-11356F zırh çeliğini incelemiştir. Çalışmada numunelerin mekanik özellikleri, sertlik değerleri ve mikroyapı özellikleri değerlendirilmiş ön tavin ITAB bölgesinde ortaya çıkardığı etkiler incelenmiştir. Sonuç olarak ön tavin; sertliğin hem kaynak metaline hem esas metal hem de ITAB boyunca homojen dağılmasını sağladığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise ön tav sonrası soğumanın yavaş gerçekleşmesinden dolayı olduğu açıklanmıştır [73].

Robledo vd. [74] ise, MIL-A-46100 standardına uygun olarak üretilen zırh çeliğini gazaltı metal ark kaynak yöntemi ile askeri standartlara uygun olarak birleştirmiş ve yeni bir kaynak prosedürü geliştirmişlerdir. Çalışmalarında gazaltı metal ark kaynağı ile kıyaslamışlardır. Sonuçlara göre, yeni geliştirilen prosedürde daha önceki yöntemlere göre daha dar bir ITAB oluştuğuna dikkat çekmişlerdir. Bunun yanı sıra, yeni geliştirilen prosedürle gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmeden alınan V çentikli

charpy test numuneleri ile yapılan çentik darbe testleri sonucunda daha yüksek tokluk değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Çıkan sonuçlar, bu yeni prosedürün MIL-A-46100 zırh çeliğinin kaynağı için uygun bir alternatif olduğunu göstermiştir [74].

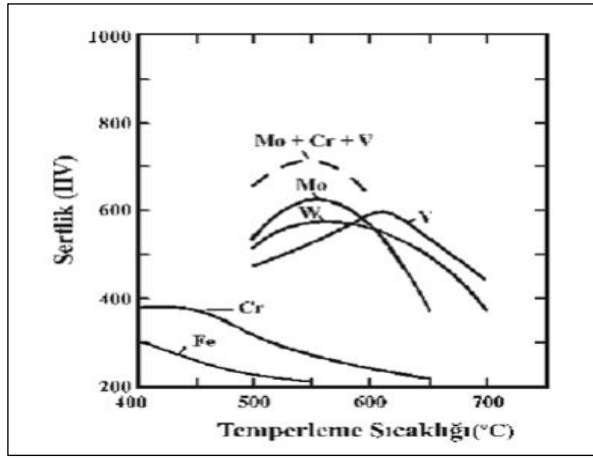
Magudeeswaran vd. [75], yaptıkları çalışmada östenitik paslanmaz çelik elektrot ile düşük hidrojenli ferritik çelik elektrotunu karşılaştırmışlardır. Çalışmada esas metal olarak su verilmiş ve temperlenmiş AISI 4340 çeliği kullanılmıştır. Kaynak yöntemleri olarak gazaltı ark kaynağı ve özlü telli ark kaynağı tercih edilmiştir. DIN 50113 standardına göre çentikli ve çentiksiz olmak üzere iki adet yorulma test numunesi hazırlanmıştır. Numunelerin mikrosertlikleri ölçülmüş ve mikroyapıları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, düşük hidrojenli ferritik çelik sarf malzemeleri kullanılarak üretilen birleştirmelerin, geleneksel östenitik paslanmaz çelik sarf malzemeleri kullanılarak üretilen birleştirmelere göre %13 daha iyi yorulma performansı gösterdiği rapor etmişlerdir. Bunun yanında koruyucu gaz ark kaynağı kullanılarak üretilen kaynaklı birleştirmelerin, özlü tel ark kaynağı ile üretilen kaynaklı birleştirmeye göre %6 daha fazla yorulma ömrü sağladığını tespit etmişlerdir [75].

DeneySEL analiz yöntemiyle yürütülen bu tez çalışmasında kullanılan zırh çeliğinin seçilmesindeki amaç; askeri savunma sanayisinde kullanılan zırh çeliklerinin MIG/MAG gazaltı kaynak metodu ile kaynaklanabilirliği ve bu kaynak bölgesinin balistik olarak incelenmesi sonucunda üretim yapacak savunma sanayi firmalarının tasarım yöntemlerine bilgi girdisi sağlamaktır.

## **2.5. ZIRH ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEMİ**

Zırh çeliği malzemeleri martenzitik yapıya sahip olduklarından dolayı su verme ısı işlemleri sonrası yapılan temperleme işlemi ile balistik olarak optimum mekanik özelliklerini elde ederler. Sade karbonlu çeliklerin menevişlenmesi işleminde, su verme ısı işleminden sonra martenzit yapı içerisinde bulunan C elementi Fe elementi ile birleşerek sementit fazının çökmesini sağlar. Böylece martenzit fazının ferrit fazına dönüşmesiyle birlikte sertlik düşüşü gerçekleşmiş olur. Fakat çeliğin içerisinde bulunan karbür yapıcı olan alaşım elementleri, karbon elementi ile değişik temperleme sıcaklıklarında bile karbür çökmesine sebep olurlar. Bu sebeple malzemelerde ikincil

olarak sertlik artışı görülmektedir. Çökelti sertleşmesi ile oluşan sertlikteki artış ciddi bir karmaşık bir yapıdadır. Şekil 2.3'te karbür yapıcı elementlerin temper sıcaklıklarına göre oluşturduğu sertlik ilişkisi grafiği gösterilmiştir. Görüldüğü gibi yüksek temper sıcaklıklarında bile oluşan kararlı karbürler, krom, molibden ve vanadyum element içeriği olan çelik malzemelerin başlangıçtaki sertliğini daha da yükseltebilmektedir. Grafiktende anlaşıldığı gibi zırh çeliklerinde molibden ve krom elementleri öncelikli olarak tercih edilen elementlerdendir [1, 2].



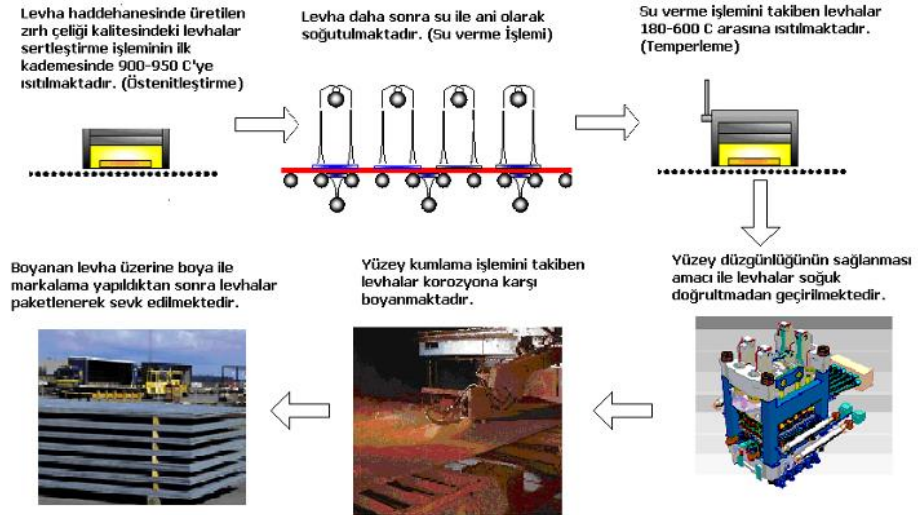
Şekil 2.3. Karbür yapıcı elementlerin temperleme sıcaklıklarında sertliğe etkileri [76]. Zırh çeliklerinde östenitleştirme işlemi, çelik matris için gerekli olan karbon elementi ve hemde yapısında bulunan karbür oluşturucu alaşım elementleri ile doyum sağlamak için 900-950°C sıcaklıklarda gerçekleştirilir, ardından su verme işlemi uygulanır. Su verme işlemi sonrasında ortaya çıkan mikroyapı yüksek miktarda dislokasyon içeren lath (dilimli) tipi martenzitik yapının oluşumu sonrası aşırı yükselmiş olan sertliğin giderilmesi ve gerekli olan tokluk özelliğinin kazandırılması için zırh çeliği menevişleme işlemine tabii olur [72]. Zırh çeliklerinin üretiminde istenen özellikler doğrultusunda metalurjik ve fiziksel esaslar doğrultusunda iki ana faktör bulunmaktadır. İlk olarak istenen mukavemet özelliği, alaşımlama (katı ergiyik sertleşmesi) yöntemi ile sağlanır. Üretim aşamasında mekanik deformasyon ile ve daha sonra gerçekleştirilecek sertleştirme (östenitleştirme ve su verme) ve temperleme işlemi sonucunda çelik matriksin karbür yapıcı alaşım elementleri ve karbon ile zenginleştirilmesi deformasyon sertleşmesi ile de ince tane karakteristiği elde edilir. Sonuç olarak temperleme işleminde uygulanan sıcaklık ve zaman profili, öncelikle özel alaşım karbürlerinin çökmesi ile istenen mukavemet ve tokluk kombinasyonunu



belirlenmiş olur. Metalik olmayan kalıntılar ve kalıntı modifikasyonu, tokluk özelliği açısından son derece önemlidir [72, 77, 78].

İkincil sertlik, sertleştirme işleminde östenit fazının içerdiği C miktarı ve diğer alaşım elementleriyle birlikte yaptığı doyum seviyesine bağlıdır. Zırh çelik malzemelerin darbe direnci ile orantılı olarak balistik davranışlarını belirleyen temperleme ısıl işlemlerinin anlatılabilmesi için öncelikli olarak yapı içerisinde çökelmiş olan ve çok ince seviyede yapıda olan ikincil sertlik çökeltilerinin bu yapı içerisinde sergiledikleri ve büyük öneme sahip dağılımları, şekli, boyutu ve miktarının belirlenmesi gerekir [69, 70].

Zırh çelik malzemelerin balistik uygulamalarda kullanılmasını sağlayan mukavemet ve tokluk dengesi, şekillendirme işlemi sonrasında uygulanan ısıl işlem yöntemleriyle elde edilir. Şekil 2.4'te gösterilen sıcak haddeleme sonrası sac levhalara yapılan ısıl işlem sıralaması, bu çeliklerin balistik performanslarını optimize etmede önemli bir rol oynar. Zırh olarak kullanılan bu çeliklerin balistik uygulamalarda kullanılabilmesi için gerekli mukavemet ve tokluk kombinasyonu, şekillendirme sonrası uygulanan özel ısıl işlem yöntemleriyle elde edilir [79].



Şekil 2.4. Zırh çeliklerine plastik şekil verme sonrasında uygulanan ısıl işlem adımları [79].

Yüksek sertlik özelliğine sahip HHA zırh olarak tanımlanan bu kalitedeki çeliklerde sertlik değerleri 500 HB'ye ve çekme dayanım değerleri ise 1800 N/mm<sup>2</sup>'ye kadar çıkmaktadır. Zırh çeliklerinin imalatında genellikle ergitme, alaşımlama, sürekli döküm, sıcak haddeleme ve ısıl işlem gibi üretim adımları izlenir. Başlangıçta bazik oksijen konvertöründe ergitilmiş olan şarj ocağına, Cr, Ni, Mo gibi temel alaşım elementleri eklenerek alaşımlandırılır. Daha sonra sürekli döküm metoduyla bu alaşımlı malzeme levha haline getirilir. Sonra istenen boyutlara getirmek için malzeme sıcak olarak haddeleme işleminden geçer. Haddeleme işleminden sonra istenen mukavemet ve tokluk özellik ilişkisinin elde edilmesine yönelik olarak üretilen sac levha malzemeler östenitleştirme, su verme ve temperleme işlemlerinden oluşan bir ısıl işleme tabii tutularak istenen zırh kalitesindeki son ürün haline getirilmiş olurlar [48, 49].

### **2.5.1. Gerilim Giderme Isıl işlemi**

Termal ve mekanik işlemler sırasında elde edilmiş olan çelik malzeme ve donanımların niteliklerini kötüleştirebilen artık gerilmeler oluşabilir. Artık gerilmeler, ısıl işlem veya üretim işlemi sırasında distorsiyon, çatlama veya serviste dizayn gerilmeleri altında hasara neden olabilir. Artık gerilmelerin bir oluşum sebebi ise östenitlemeden sonra büyük kesitlerin soğutulmasıdır. Atmosfer ortamında soğutma sırasında, büyük bir kesitin yüzeyi merkezinden daha önce ferrit ve sementite dönüşebilir. Son olarak, malzemenin merkezi dönüştüğü zaman, ferrit oluşumuyla birlikte hacim artışı, daha önce soğumuş ve zaten dönüşmüş olan yüzey tarafından zorlanmaya çalışır. Böylece, malzemenin yüzeyi basmada iken merkezi çekmededir. Martenzit oluşturmak için yapılan su verilme işlemide benzer bir etki yapar, fakat artık gerilme problemi bu yöntemde daha fazladır. Hatta küçük kesitli malzemelerde bile meydana gelebilir. Bu martenzit oluşumuna izin vermek için daha düşük soğutma hızlarında sertleşebilir çeliklerin neden alaşımladığının asıl cevabıdır. Martenzitik çelikler, her zaman artık gerilmeyi azaltan, süneklik ve tokluğu artıran bir işlem olan temperleme işlemine tabi tutulurlar. Kaynak, artık çekme gerilmeleri meydana getiren bir işlemdir. Kaynak metali katılışp büzüldükçe, bitişik olan ana metal tarafından zorlanır. Bu yüzden kaynaklı parçalarda sık sık kaynak sonrasında gerilim giderme ısıl işlemleri uygulanır [80].

Gerilim giderme ısıl işleminde işlem sıcaklığı, herhangi bir yapı dönüşümü olmayacak şekilde 723 °C'nin altındaki bir sıcaklık tercih edilir. Genellikle tercih edilen sıcaklık aralığı 550-650 °C arasındadır. 650 °C'nin üzerinde uygulanan sıcaklıklar, tufallaşmanın artmasına neden olduğundan dolayı pek fazla tercih edilmez. Islah işlemi uygulanmış parçalarda, yüksek sıcaklıkta uygulanan menevişten dolayı gerilim giderme işlemi kendiliğinden olmuş olur. Karmaşık yapıları parçalarda normal tavlama işleminden sonra, atmosferde hızlı soğuma sonucunda oluşan gerilmeleri azaltmak amacıyla gerilim giderme ısıl işlemi tatbik edilebilir. Ayrıca, kaynaklanmış parçalarda kaynak işlemi sonrasında gerilmelerin azaltılması için uygulanır. Büyük parçalarda kaynağın çevresi üfleç, elektrot veya benzeri cihazlarla lokal olarak ısıtıldığında büyük gerilmeler meydana gelir. Böyle bir durumda, yavaş ve dengeli bir şekilde malzemenin bütünü veya lokal bir biçimde homojen olarak ısıtılmalıdır. Böylece gerilme çatlakları önlenmiş olur. Hızlı ve yeterli olmayan ısıtma işleminde, çatlama ya da plastik şekil değişimi oluşabilir. Tavlama işleminden sonra, yeni bir kalıcı gerilmelere sebep olmaması için yavaş soğutma yapılması gerekmektedir [81].

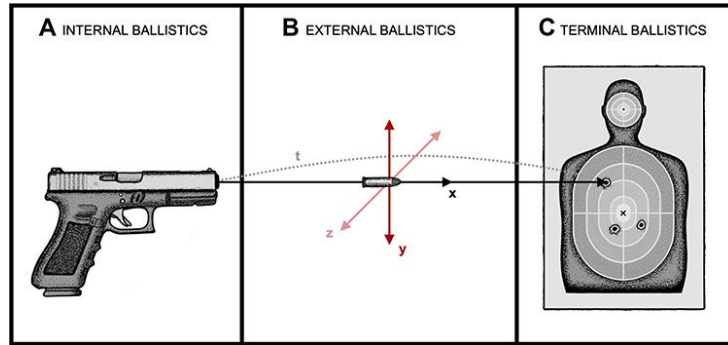
## BÖLÜM 3

### BALİSTİK BİLİMİ VE BALİSTİK TESTLER

#### 3.1. BALİSTİK BİLİMİ

Balistik, ateşli silahlarda merminin barut gazının oluşturduğu basınç sayesinde fırlayıp hedefe ulaşmaya kadar ki hareketini inceleyen bilim dalına denir. Mermi namludan çıktıktan sonra hedefe ulaşana kadar ki geçirdiği kısa sürede aslında birçok karmaşık olay gerçekleşmekte ve bu olayların tamamı balistik olarak adlandırılmaktadır. Balistik bilimi 3 ayrı bölümde incelenebilir [82]. Şekil 3.1’de balistiğin aşamaları gösterilmiştir.

- 1) İç Balistik (Internal Ballistics)
- 2) Dış Balistik (External Ballistics)
- 3) Terminal (Hasar) Balistik (Terminal Ballistics)



Şekil 3.1. Balistiğin aşamaları [83].

##### 3.1.1. İç Balistik

İç balistik, namlunun içinde gerçekleşen olayları inceleyen balistik bilimidir. Mermi içerisindeki barutun yanma türünü, elde edilen basınç miktarını, namlu boyunca mermi

hızını inceler ve barut haznesinin boyutlarını hesaplar. Üretilecek bir silah için barut-basınç eğrisi oluşturulduktan sonra, silah imalat metotlarında göz önünde bulundurularak her bir noktaya hesap edilen ve gelmesi gereken basınç miktarını karşılayabilecek cidar et kalınlıkları hesaplanabilir [84]. Haznede bulunan barut basınç yardımı ile itilir ve sıkıştırma sonucunda haznede yanma başlar. Basınç miktarı gittikçe artar ve bununla birlikte yanma da belirgin bir şekilde artar. Mermi atış basıncı ilk baştaki değerine ulaşmaya kadar bu artış devam eder. Mermi atış basıncı, mühimmatın ileriye doğru hareket edebilmesi için gerekli olan basınç değerini ifade eder. Mermi silah namlusu boyunca hareket eder ve artan gaz miktarı için yeterli boşluk elde edilmiş olur. Böylelikle basınç artışında da düşüş sağlanır. Boşluk artışı ile sağlanan basınç düşüşü yanan baruttan elde edilen basınç artışına eşit olduğunda basınç en yüksek değerine ulaşmış olur. Daha sonra silah namlusunda bulunan basınç giderek azalır. Bu sırada barutun tamamı yandıktan sonra bile ivmelenme devam eder. Fakat, namlu çıkışındaki ivme artışı zamanla azalmaya başlar [85].

### **3.1.2. Dış Balistik**

Dış balistik, mermi silah namlusundan çıktıktan sonra havadaki hareketini ve uçuş sırasında sergilediği davranışını ve merminin ateşli silahtan ayrılmasından sonra ve hedefe ulaşmasından önce geçen süreyi inceleyen balistik bilimidir. Burada ifade edilen mermi kelimesi hedefe atılan veya fırlatılan herhangi rijit bir nesne olarak tanımlanabilir. Mermi veya mühimmat; füzeleri, silah mermilerini veya uçaktan atılan bombaların vs. hepsini kapsamaktadır [86].

### **3.1.3. Terminal (Hasar) Balistik**

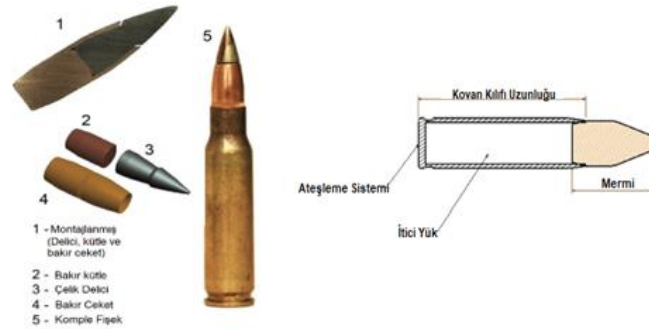
Terminal balistik, silah ile atılan mühimmatın hedef üzerindeki etkisini veyahut hedefin mühimmat üzerindeki etkisini inceler. Ayrıca hedef darbe dinamiği konusu da terminal balistiğin kapsamına girer. [86].

### **3.1.4. Tehdit Tipleri ve Penetrasyon**

Zırhlı araç veya sistemlerin güvenliğini sağlayıp, araç içerisinde bulunan mürettebatın güvenli bir şekilde gidecekleri bölgeye intikal edebilmeleri için tehdit tiplerinin araç veya sistem yapılarına nüfuzunu ve zırhlı araca ne gibi hasarlar verdiği analiz edilmesi gerekmektedir. Araç veya sistem üzerinde bulunan zırh sistemleri tehditleri belirli bir seviyeye kadar durdurabilmektedir. Daha yüksek tahrip etme etkisi olan mühimmatlar araç veya sistemin içine nüfuz edebilmektedir. Mühimmatın zırh üzerinde ne kadar nüfuz ettiği penetrasyon ile ifade edilir. Penetrasyon, zırh sistemleri test metotları ile kalifiye edilirken performans ölçütü olarak kullanılmaktadır. Penetrasyon araç yapısı, malzeme, bu malzemelerin araç yapısına bağlandığı açılı değerleri, hedef delicinin malzemesi, şekli, hızı ve ağırlığından etkilenmektedir [87].

### 3.1.4.1. Tehdit Tipleri

Mühimmatlar genellikle merminin çapı ve kovan kılıf uzunluğu ile tanımlanır. Örnek olarak 7,62 mm×51 olarak tanımlanan mühimmat, 7,62 mm kalibrelik (çap) ve 51 mm kovan kılıfı uzunluğu ile ifade edilir. Şekil 3.2’de mühimmatın bölümleri örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Mühimmat bölümleri [88].

Şekil 3.3’te en sık kullanılan hafif silah mühimmatlarının görselleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Hafif silah mühimmat örnekleri [89].

En yaygın olarak kullanılan mühimmatlardan biri olan 5,56 mmx45 piyade mühimmatı Şekil 3.4’te gösterilmiş ve mühimmat bilgileri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

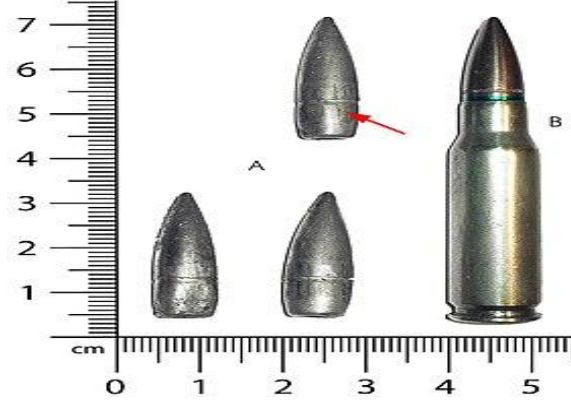


Şekil 3.4. 5,56 mmx45 SS109 piyade mühimmatı [90].

Çizelge 3.1. 5,56 mmx45 SS109 piyade mühimmatı özellikleri [90, 91].

<b>Fişek Özelliği</b>	Normal/İzli/Büzmeli
<b>Fişek Boyu</b>	54,7 mm / 57,4 mm / 56 mm
<b>Fişek Ağırlığı</b>	12,2 g / 12,5 g / 7 g
<b>Hız</b>	914±12,2 m/s - 880±12 m/s
<b>Mermi Malzemesi</b>	Tombak, Çelik Çekirdek ve Kurşun Çekirdek
<b>Mayon Tipi</b>	M27 Mayon
<b>Barut</b>	Küresel Barut
<b>Kullanıldığı Silah</b>	MPT-55, M16A2, HK33E, MINIMI, FNC, Beretta vs.
<b>Mermi Ağırlığı</b>	4 g / 4.134 g
<b>Zırh Delme</b>	230 metre mesafede 3,5 mm kalınlıktaki çelik plakayı tamamen delmektedir.

Zırh delmek için özellikle kullanılan 7,62mmx51 mühimmatı Şekil 3.5'te gösterilmiş ve mühimmat bilgileri Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.5. 7,62 mmx51, zırh delici mühimmat [92].

Çizelge 3.2. 7,62 mmx51 mühimmatı özellikleri [91, 92].

<b>Fişek Özelliği</b>	Zırh Delici, İzli, Subsonic
<b>Fişek Boyu</b>	71 mm / 71 mm / 71 mm / 66,9mm
<b>Fişek Ağırlığı</b>	24g / 24g / 24g / 25g
<b>Hız</b>	840m/s / 840m/s / 840m/s/305m/s
<b>Mermi Malzemesi</b>	Tombak Kurşun Çekirdek
<b>Mayon Tipi</b>	M13 Mayon
<b>Barut</b>	Küresel barut/Tek bazlı yaprak barut
<b>Kullanıldığı Silah</b>	MPT-76, JMK BORA-12, G3, FAL, MG3, L7A2, M60
<b>Mermi Ağırlığı</b>	9,65g / 9,45g / 9,2 g / 13g
<b>Zırh Delme</b>	91 metre mesafede 10 mm kalınlıktaki çelik plakayı tamamen delmektedir

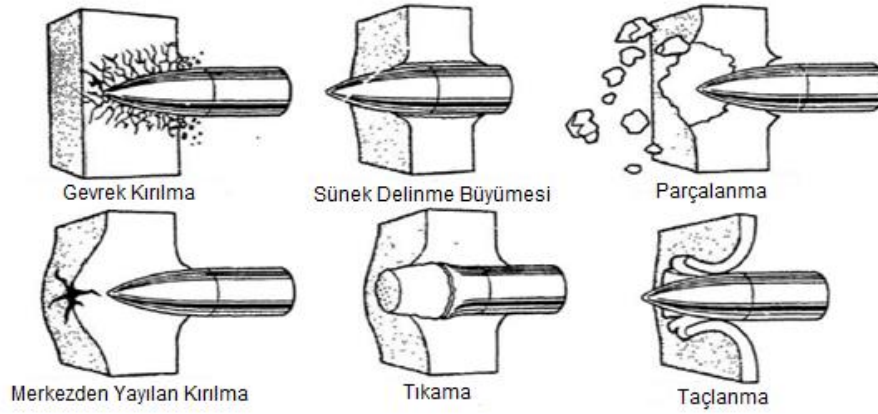
### 3.1.4.2. Katı Cisimlerde Penetrasyon ve Perforasyon

Balistikte penetrasyon, fırlatılan mühimmatın hedefe nüfuz etmesi olarak tanımlanabilir. Perforasyon ise fırlatılan mühimmatın hedefi tam olarak delmesidir. Mühimmatın fırlatılması ile birkaç mili saniye içinde penetrasyon veya perforasyon gerçekleşir. Sonuç olarak fırlatılan mühimmat ve hedef deformasyona uğramış olur. Hedefe vuran mermi kuvvetli basınç dalgaları ile her iki cisme de yayılır. Eğer çarpma hızı yeterince yüksekse, hacmi genişlemiş olan dalgalar, mühimmatın serbest



yüzeyinden ve hedefin merkezinden içe doğru yayılır. Bu durumda yüksek çekme gerilmeye sahip bir bölge oluşabilir. Meydana gelen bu gerilme bölgesi hedef malzemesinde kırılmaya veya çatlamaya sebep olabilir. Merminin merkezinde gözenekler veyahut diğer hatalar var ise kırılma etkisi daha da artar [93].

Farklı değişken koşullara bağlı olarak darbe alan malzemeler hasar görebilirler. Bunlar genellikle malzeme özellikleri, merminin şekli, darbe hızı, hedefin sabitlenmesi veya desteklenme yöntemi, mermi veya hedefin değişken boyutlarıdır. Şekil 3.6’da orta ve ince kalınlıktaki hedeflerde en sık görülen hata türleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Darbe almış bir plakadaki hata türleri (Rosenberg ve Dekel 2012’den değiştirilerek alınmıştır) [94].

Sonlu kalınlığa sahip bir plakanın arka yüzeyinden patlama veya yoğun bir darbe sonrası parçalanması, yaygın bir hata modudur. Bu durum özellikle çekmeye göre basmaya daha dayanıklı olan malzemelerde gözlemlenebilir [93, 94].

### Penetrasyon Türleri

Zırhın performansının ölçüm yöntemi olarak penetrasyon kullanılmaktadır. Ölçüm yönteminde görsel muayene metodu kullanılarak değerlendirme yapılmaktadır. Bir hedefe nüfuz eden mermi malzemeyi hasara uğratacak karmaşık bir gerilme durumuna yol açar. Belli başlı malzeme hasar mekanizmaları aşağıda açıklanmıştır [95]:

**Sünek delik oluşumu:** Sivri uçlu kinetik enerjili mermilere maruz kalan tek parçalı yapısal zırhlar veya zırh sistemlerinde görülür. Sivri uçlu ya da keskin şekilli mermiler plastik deformasyonla zırh içinde delik şeklinde etki eder ve deplasman oluştururlar. Hedefteki zırhta malzeme kaybı olmamakla birlikte mermi çok az miktarda deforme olabilir.

**Tapalanma:** Kör (blunt) mermilere maruz kalan tek parçalı yapısal zırhlar ve zırh sistemlerinde görülür. Düşük enerjili absorbe mekanizmasıdır. Tapalanma mekanizması hedef malzemenin kesme özellikleri tarafından kontrol edilir.

**Katmanlara ayrılma (delaminasyon):** Ortotropik katılarda, katmanlı zırhlarda ve tabakalı yapılarda gözlemlenir. Merminin uç kısmına bakılmaksızın kör mermilerin penetre olduğu zırh malzemelerinde görülür. Delaminasyona iki temel enerji absorb etme işlemi eşik eder. Düzlem dışı arka elemanların plastik deformasyonunu ihtiva eden membran genişmesi ve eğer varsa tabaka içi çekme hasarı ve/veya tabakalar arası kayma hasarını içeren tabakalar arası hasar.

**Plaka tipi kırılma:** Ortotropik katılarda, katmanlı zırh malzemelerinde görülür. Yüksek hızda mermilere maruz kalan hedeflerin arka yüzeylerinin kabarması olarak görülür. Bu mekanizmanın görülmesi zırh sisteminin balistik limitini önemli ölçüde azaltır. Hafif alaşımların balistik bozulmasında çok yaygındır.













**Ufalanma:** Bu hasar mekanizması camlar, seramikler ve beton yığınları gibi kırılğan malzemelerde gözlemlenir. Kırılğan malzemeler dinamik olarak yüklendiğinde ufalanmaya neden olan sıralı mikroyapısal olaylar gözlenir.

**Konik hasar:** Bu tipteki kalınlık boyunca görülen kırılma camlar, seramikler, çok yüksek sertlikteki çelikler ve polikarbonatlar gibi polimerlerde gözlenir. Kırılğan bir malzeme yüzeyi kör ya da köreltilmiş bir mermiye maruz kaldığında, lokal bir çekme gerilmesi altında yeni başlamış bir çatlak temas yüzeyinde başlayan konik şekilli bir kırık oluşturur. Sonrasında merminin ivmesiyle malzeme içinde aşağı doğru yayılır.

**Radyal çatlama:** Kırılğan katılar tek bir mermi tarafından darbeye maruz kaldığında çeşitli kırılma durumları gerçekleşir.

Literatürde yer alan farklı tip penetrasyon türleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Tablodaki nüfuziyet görsel detaylarında nüfuziyetin çeşidine göre zırh sisteminin kabulü veya ret işlemi yapılmaktadır.

Çizelge 3.3. Penetrasyon türleri [96].

#	Nüfuziyet	Kabul/Ret	Kabul/Ret Kriteri
1		Kabul	Zırh üzerinde iz yok
2		Kabul	Ön tarafta derin görünme arkada iz yok
3		Kabul	Arka yüzeyde az kabarma
4		Kabul	Arka yüzeyde çatlama olmayan kabarma
5		Kabul	Arka yüzeyde ışık geçirmeyen kabarma ve çatlama
6		Ret	Işık geçiren çatlama
7		Kabul	Parça kopması dolayısıyla oluşan çatlak
8		Ret	Parça kopması
9		Ret	Delinme
10		Ret	Tam delinme (Mermi çapından küçük)
11		Ret	Tam delinme
12		Ret	Zırh arka yüzeyinde parça ayrılması

## 3.2. BALİSTİK TESTLER

### 3.2.1. Zırhın Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi

Silah sistemleri üzerinde yapılan çalışmalarda çoğunlukla mühimmat veya merminin belirlenmiş bir noktadan ileride bulunan bir hedefe fırlatılması üzerine yürütülmektedir. Böylelikle yüksek enerjiye sahip barut ve barutun yanması sonucu oluşacak basınca mukavvim bir silah namlusu ile mümkün olabilmektedir. Hafif mühimmat silahlarından başlayıp ağır silahlara kadar bütün silah tiplerindeki sistemlerde bulunan namlu, silah sistemindeki en kritik ve önemli parçalarından biri olup bu parçanın tasarımı ve üretimi oldukça karışık bir sürece sahiptir. Günümüzde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarında silahların geliştirilmesine yönelik en önemli çalışmalardan biri de silah namlusunun ağırlık olarak daha hafif ve mukavvim olarak daha dayanıklı üretilmesi üzerinedir [82].

Silah sistemindeki namlunun temel amacı, en yüksek hızla mermiyi hedefe çarpmasını sağlayacak şekilde fırlatarak hedefi imha etmek veya hedefe en ağır zararı vermektir. Mermi gerisindeki namlu içinde oluşan yüksek basınca bağlı olarak mermiyi maksimum hızla fırlatacak kuvvet değişkenlik göstermektedir. Silah sistemindeki en önemli balistik parametrelerden biri de namluda oluşan basınç değeridir. Namlu içinde oluşan basınç dağılımını ve en yüksek basıncın olduğu bölgenin bilinmesi ile namlunun dayanım hesabı yapılmaktadır. Yapılacak bu mukavemet hesaplarıyla tasarım çalışmalarında namlunun optimum et kalınlığının hesaplanması ile namlunun hafifletilmesi hedeflenmektedir. Hem de basınç dağılımının tespit edilmesi ile namlu içinde oluşan aşınmaların ve namlunun ömrünün tespiti yapılabilmektedir. Mermi üzerine gelen yüklerin tespit edilmesiyle de merminin ve barutun tasarımı, silah sistemindeki önemli parametrelerinden olan geri tepme kuvveti ve mesafesinin hesabı gibi birçok önemli parametrenin belirlenmesine imkân sağlamaktadır. Diğer önemli bir parametre ise merminin namlu içindeki hızının dağılımı ve namludan ilk çıkış hızıdır. Merminin namludan ilk çıkış hızının bilinmesi ile silah sisteminin menzilinin tespit edilmektedir. Bunun sonucunda atış cetveli elde edilir ve uçuş zamanı hesaplanabilir. İlaveten, çarpma hızının hesaplanması ile namlu ömrünün tespiti, mermi geometrisinin tasarlanması, hedefteki delme kuvvetinin hesaplanabilmesi,

kullanılacak barut miktarının hesaplanması ve fişek kovan tasarımının yapılabilmesi gibi kritik olan birçok tasarım öğelerinin belirlenebilmesi de merminin namludan ilk çıkış hızının bilinmesiyle olabilmektedir [82, 96].

Askeri uygulamalarda zırh çeliklerinin kullanılabilmesi için kullanılacak zırh çeliğinin balistik özelliklerinin önceden tespit edilmesi önemlidir. Balistik olarak dayanıklılığının tespit edilmesinde, genellikle iki yöntem kullanılarak test edilmektedir. Balistik sınırın, yani merminin durdurulabildiği maksimum hızın (V) veya  $V_{50}$  değerinin tespit edilmesidir [48, 49].  $V_{50}$  değerinin belirlenmesi ile ilgili test aşağıdaki başlık maddesinde anlatılmıştır.

### 3.2.2. Balistik Koruma Standartları ve Testleri

#### 3.2.2.1. Balistik Koruma Standartları

Balistik koruyuculuğu tespit etmek için dünyada birçok standart kullanılmaktadır. Genellikle NIJ (The US National Institute of Justice) ve HOSDB (UK Home Office Scientific Development Branch) dünyaki balistik ile ilgilenen kişiler tarafından kabul edilen standartlardır. Bunun dışında ayrıca NATO tarafından da birçok askeri standartlar geliştirilmiştir. Çizelge 3.4'te balistik koruyucu özelliğe sahip ürünlerin testleri için kullanılan bazı örnek standartlar verilmiştir [97].

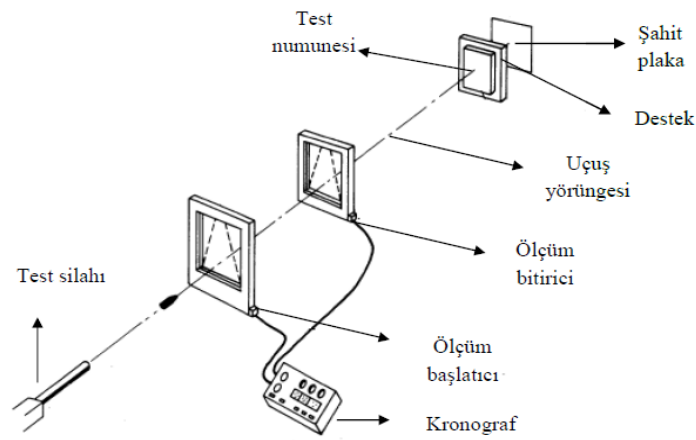
Çizelge 3.4. Balistik koruyucu ürünlerin testlerinde kullanılan standartlar [97].

Standart No	Standart Adı
TS 11164	Balistik koruyucu vücut zırhı
TS 13349	Askerî zırhlar - V50 balistik hız deneyi
MIL-A-46103	Light Weight, Ceramic Faced Composite Armor Procedure Requirements
MIL-B-44053 A	Fragmentation Protective Body Armor, Vest Ground Troops
MIL-STD-662 F	Balistic Test for Armor
NIJ-STD-0101.04	Balistic Resistance of Personnel Body Armor
NIJ-STD-0101.06	Balistic Resistance of Personnel Body Armor
NIJ-STD-0108.04	Balistic Resistance of Protective Materials
STANAG 2920	Balistic Test Method for Personnel Armor
UK/SC/4697	The Balistic Testing of Fragment Protective Personnel Armors
UL 752	Balistic Resistance Equipment

Personel vücut zırhlarının ateşli silahlara karşı balistik koruması için yapılan test ve deney yöntemleri, TS 11164 nolu ve TS 13349 nolu standartlarda tarif edilmektedir. [98, 99]. Ayrıca NIJ (Ulusal Adalet Enstitüsü) standardında belirtilen değerler, hafif silahlara karşı koruyucu zırhların balistik performansının ölçümünde referans olarak kullanılmaktadır [100]. Yaygın olarak kullanılmakta olan NIJ-0101.04 ve NIJ-0101.06 standartlarında malzemenin hangi koruma seviyesi içerisinde test edileceği ve ne kadar koruma sağlayacağı gibi bilgilere ayrıntılı olarak yer verilmektedir [101-103]. NIJ-0101.04 standardının temel amacı, asgari olarak performans şartlarını ve silah ateşine karşı insan vücudunu korumayı amaçlayan personel vücut zırh malzemelerinin balistik performansının tespiti için uygulanacak test yöntemlerini anlatmaktadır [100].

### 3.2.2.2. Balistik Koruma Testleri

Balistik testler, üretilmiş olan her zırh levhasına sahip katile üzerinde gerçekleştirilmesi zorunludur. Balistik test yapılmadan önce ve test sonrasında birçok kontrol kriterleri söz konusudur. Şekil 3.7'de gösterilen test düzeneğinin kalibrasyonu, kullanılacak mühimmatın ve zırh plakalarının teknik ve üretici bilgilerinin kaydedilmesini ve test düzeneğinin atışlar için hazır hale getirilmesini içerir. Ardından gerçekleştirilen atışlar, elektronik cihazlar tarafından ölçülen hız değerleri ve zırh çeliği malzemesi üzerinde açılan deliklerin çap ve derinlik bilgileriyle birlikte analiz edilerek malzemenin balistik performansı karakterize edilir.

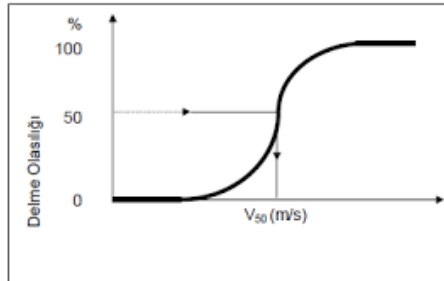


Şekil 3.7. Balistik test düzeneği [104].

## Balistik Limit $V_{50}$ Testi

Hedefe vuruşun incelenmesinde karşılaşılan problemlerden birisi de bir cismin hasara uğramadan mukavvim sağlayabileceği mermi hızının tespit edilmesidir. Tespit edilen bu hız ise "balistik limit" veya "balistik çarpma hızı" olarak tanımlanır [102]. Kritik hız değeri  $V_{50}$ , %50 olasılıkla durdurulduğu hız olarak ya da mühimmatın hedefe dik konumda çarpması sonucunda hedefin %50 ihtimalle delinme veya delinmeme olasılığını gösteren hız olarak ifade edilmektedir [103-105]. Böylece mühimmat  $V_{50}$  hızında ise zırh plakasının delinme ihtimali ise %50 olarak hesaba dahil edilir.  $V_{50}$  değerinden daha düşük hızlarda olan malzemede kısmi delinme meydana gelirken,  $V_{50}$  değerinden daha yüksek hızlar ise malzemede tam bir delinme meydana gelir [104].

Şekil 3.8’de  $V_{50}$  hızının grafiksel olarak tanımı gösterilmiştir.  $V_{50}$  hızı, MIL-STD-662F standardına uygun olarak gerçekleştirilmektedir. NATO standartlarına göre yapılan testler, mühimmatın deney numunesine  $V_{50}$  hızı olduğu kabul edilen hızlarda atış yapılmasıyla belirlenir [106].



Şekil 3.8.  $V_{50}$  grafiksel gösterimi [105].

**Tam delinme (tam penetrasyon “perforasyon”):** Zırh plakasının plakadan kopan parçacıklar ve mermi tarafından tamamen delinmesidir [106].

**Kısmi delinme (kısmi penetrasyon):** Zırh plakasının kalınlık boyunca delinme olmamasıdır [106].

$V_{50}$  hızını tespiti için balistik plakaya en az dört atış yapılmalıdır. Değerlendirmeye alınan dört atıştan, ikisi numuneyi delmesi gerekirken, diğer ikisinin de balistik plakayı

delmeyen hız değerlerinde olması gerekmektedir. Bununla birlikte, bu dört adet atışın hız dağılımı, merminin çarpma hızı ile balistik plakayı en yüksek hızda delen ve merminin çarpma hızı ile balistik plakayı delmeyen en düşük hız arasındaki farkın 18,29 m/s hız değerini geçmemelidir. Test sonucunda, dört adet atış sonucunda ölçülen mermi çarpma hızlarının aritmetik ortalaması alınır. Tespit edilen değer, balistik zırh plakasının  $V_{50}$  balistik hız sınır değerini verir [106].

$V_{50}$  balistik hız sınır değeri, malzemenin sertliği ile doğrudan ilişkilidir. 2010 yılında Karagöz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada çeliğin standart zırh çeliklerine benzer mekanik özelliğe ve mikroyapıya sahip olduğunu tespit etmişlerdir [107]. Yaptıkları bu çalışmada MIL-A-12560 standardı kapsamında yapılan testlerde kullandıkları zırh çeliği numunesinin eş değere sahip sertlikte karşılık gelen  $V_{50}$  balistik limit değerlerini incelemişlerdir. Teste tabi olan malzemenin test standardından daha yüksek bir balistik limit gösterdiği belirlenmiştir [107].

### **STANAG 2920 Testi**

STANAG (Standardization Agreement) 2920 standardında, NATO standardına göre geliştirilmiş olan personel zırhları için balistik test yöntemlerini açıklanmaktadır. Test sırasında tek tip mühimmat kullanılıyor olması nedeniyle, balistik koruyucu ürünlerin birbirleriyle karşılaştırılması da mümkündür. US-MIL-P-46593'te tanımlanan dokümanda parçalanma taklit edici mühimmatlar (Fragment Simulating Projectiles) serisinden birisi kullanılmaktadır. Genelde 5,385 kalibrelik, 1,102 gramlık mermiler tercih edilirler. Test edilecek numune test öncesinde,  $20 \pm 2$  °C ve  $\%65 \pm 5$  bağıl nem içeren çevre ortam koşullarında şartlandırılması gerekmektedir. Test esnasında, balistik koruyucu malzemeye en az 6 adet mermi atılır ve bu mermilerin hızları ölçülür. Balistik hız sınırının hesaplanmasında balistik malzemenin normalden 5 dereceden fazla sapan mermiler hesaplamaya dahil edilmemektedir. Her atış, atış yapılan noktalar veya deformasyonun olduğu noktalardan en az 30 mm uzaklıkta olması gerekmektedir. Hedefi delip geçen veya hedefin arkasında yırtılmaya neden olan mühimmatlar balistik koruyucu malzemeyi tamamıyla delmiş sayılırlar. Bu standartta, mermi atış hızları ayarlanırken aşağı ve yukarı hız metodu (up anddown method) kullanılmaktadır. İlk mermi ile zırh yapısının  $V_{50}$  balistik hız sınırı değerinde hız

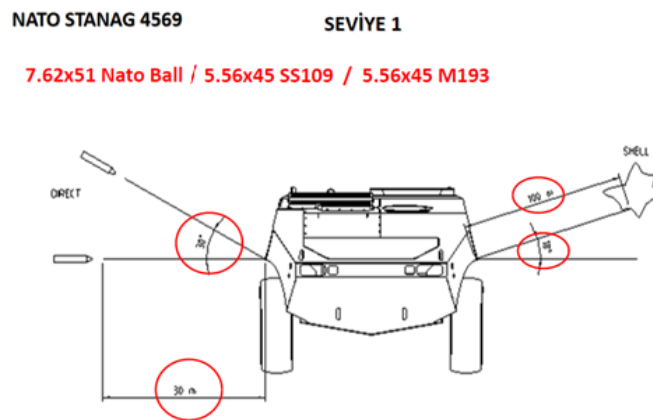


kazandırılır. İlk atış yapılan mermi zırh yüzeyinde tam bir delme oluşturursa, ikinci mermi ilk mermiye göre 30 m/s daha yavaş olacak şekilde atılmalıdır. Eğer ilk mermi zırh yüzeyinde kısmi bir delme yaparsa, ikinci mermi ise ilk mermiye göre 30 m/s daha hızlı olacak şekilde atılmalıdır. Zırhı delen ilk atışlar tamamlandıktan sonra, diğer atışlar merminin hızları 15 m/s aşağı veya yukarı olacak şekilde gerçekleştirilmelidir.  $V_{50}$  balistik sınır hızını elde etmek için standarda uygun bir şekilde atışlar devam eder. Belirli bir sayıdaki atıştan sonra, elde edilen altı hız değeri hesaba katılır: üç tanesi tam delinme olduğu en düşük hızlardan, diğer üç tanesi ise kısmi delinme olduğu en yüksek hızlardan seçilir. Kısmi delinme ve tam delinme grupları arasındaki en yüksek ve en düşük hız değerleri arasındaki fark 40 m/s'yi geçmemelidir. Düzgün vuruşlardan elde edilen ortalama değer kullanılarak  $V_{50}$  balistik sınır hızı hesaplanır [103].

### STANAG 4569 Testi

NATO STANAG 4569 AEP-55, "Lojistik ve Hafif Zırhlı Araçlarda Bulunanlara Yönelik Koruma Seviyeleri" standartlarını kapsayan bir NATO standardizasyon anlaşmasıdır. Bu standart kinetik enerjiden toplardan ve EYP patlamalarından kaynaklanan saldırıları kapsar.

Şekil 3.9'da seviye 1 prosedürüne göre atış mesafesi ve atış açıları gösterilmiş ve Çizelge 3.5'te NATO STANAG 4569 standardının tehdit seviyeleri, mühimmatların özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.9. NATO STANAG 4569 Seviye 1 prosedürü atış açıları [108].

Çizelge 3.5. NATO STANAG 4569 AEP-55 test standardı [108].

Tehdit Seviyesi	Silah Tipi	Kalibre	Malzeme	Ağırlık (g)	Mesafe (m)	Hız (m/s)	İstikamet Açısı	Kinetik Enerji (J)
1	Tüfek	7,62x51 NATO Ball M80	Çelik ve kurşun çekirdek, bakır ceket	9,5	30	833±20	360°	3295,97
		5,56x45 NATO SS109	Çelik ve kurşun çekirdek, bakır ceket	4,00		900±20	360°	1620
		5,56x45 M193	Kurşun çekirdek, bakır ceket	3,56		937±20	360°	1562,78
	Top-Ağır Silah (Artillery)	20 mm FSP (Opsiyonel)	-		100	-	360°	-
2	Piyade Tüfeği (Infantry Rifle)	7,62x39 API BZ	Çelik çekirdek	7,77	30	695±20	360°	1876,55
	Top-Ağır Silah (Artillery)	20 mm FSP (Opsiyonel)	-	-	80	-	360°	-
3	Keskin Nişancı Tüfeği (Sniper Rifle)	7,62x51 AP (WC Core)	Tungsten alaşım çekirdek	8,4	30	930±20	360°	3632,58
		7,62x54R B32 API (Dragunov)	Çelik çekirdek	10		854±20	360°	3646,58
	Top-Ağır Silah (Artillery)	20 mm FSP (Opsiyonel)	-		60	-	360°	-
4	Ağır Makinalı Silah (Heavy Machine Gun)	14,5x114 AP/B32	Çelik çekirdek	63,4	200	911±20	360°	26308,50
	Top-Ağır Silah (Artillery)	20 mm FSP	-	-	25	960	360°	-
5	Otomatik (Automatic Cannon)	25 mm APDS-TM-791	Tungsten alaşım çekirdek	121,5	500	1258±20	±30°	96140,76
		25 mmx137 APFSDS-T PMB 090	Tungsten alaşım çekirdek	130	500	1336	±30°	116018,24
	Top-Ağır Silah (Artillery)	20 mm FSP	-	-	25	960	360°	-
6	Otomatik (Automatic Cannon)	30 mmx165 AP-T	Çelik çekirdek	400	500	810	±30°	131220,00
		30 mmx173 APFSDS-T	Tungsten alaşım çekirdek	227	500	N/A	±30°	232096,15
	Top-Ağır Silah (Artillery)	20 mm FSP	-	-	10	1250	360°	-

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 4.1. DENEYDE KULLANILAN MALZEMELER ve KAYNAK MAKİNESİ

##### 4.1.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği

Bu tez çalışmamızda Bisalloy Steels Pty. Ltd. firmasının üretmiş olduğu 9 mm HHA 500 serisi zırh çeliği malzemesi kullanılmıştır. Bisalloy HHA 500 çeliğinin kimyasal bileşimleri spektral analiz gerçekleştirilerek Çizelge 4.1’de verilmiştir. Deneyde kullanılan malzeme kimyasal kompozisyonu MIL-A-46100 gerekliliklerine uygundur. Çizelge 4.2’de plaka kalınlığı ve karbon eş değeri katalog değerleri verilmiştir. Ayrıca, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’te sırasıyla Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait sertlik, çekme ve darbe çentik değerleri katalog değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu.

Element (%)	C	P	Mn	Si	S	Ni	Cr	Mo	B	Fe
HHA500	0,30	0,025	0,77	0,49	0,004	0,48	1,19	0,21	0,012	Kalan

Çizelge 4.2. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin karbon eş değeri.

Çelik Sınıfı	Plaka Kalınlığı	Karbon Eş Değeri (IIW)
HHA 500	8 - 100	0,62

Çizelge 4.3. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin Brinell sertlik değeri.

Kalınlık (mm)	Spesifikasyon Sertliği	Tipik Sertlik
6,0-25,0	477-534 HB	500 HB

Çizelge 4.4. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin çekme özellikleri.

Tipik Değer	
0.2% Dayanıklılık Stresi	1400 MPa
Gerilme Direnci	1640 MPa
% Uzama (Elongation in 50mm G.L.)	% 14

Çizelge 4.5. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin charpy çentik darbe özellikleri.

Kalınlık (mm)	Test Numunesi (mm)	Test Sıcaklığı	Min. Enerji (Enine)	Min. Enerji (Boylamasına)
6,0 -<9,5	10x5	-20 °C	8 J	10 J
12	10x10	+20 °C	35,6 J	51,6 J

#### 4.1.2. Koruyucu Gaz

Kaynak işlemi esnasında kullanılan koruyucu gaz, HABAŞ A.Ş. tarafından üretilmiştir. Kullanılan gazın ticari adı HB212'dir. HB212, kalın kesitli alaşımsız, karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin gazaltı kaynağında, koruyucu gaz olarak kullanılmaktadır. 1,5-12 mm kesitli malzemelerin robotlu kaynak işleminde kullanım için idealdir. Bu gaz ile güzel bir kaynak dikiş görüntüsü ve mükemmel bir yüzey elde edilebilmektedir. Bu karışım gazın kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. HB212 koruyucu gazın kimyasal kompozisyonu.

Kimyasal Gazın Ticari Adı	Ar	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
HB212	%86	%12	%2

#### 4.1.3. İlave Dolgu Kaynak Metali

Otomatize edilmiş kaynak makinesinde kullanılan ER 110 SG (Mn4Ni2CrMo) kodlu ilave kaynak teli yüksek dayanımlı gazaltı kaynak telidir. Bu çalışmada 1,2 mm çapında tel kullanılmıştır. İlave telin yapısında bulunan elementlerin kimyasal bileşimleri Çizelge 4.7'de ve mekanik özellikleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. ER 110 SG ilave dolgu kaynak metalinin kimyasal kompozisyonu.

C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	Cu	Fe
0,09	0,75	1,7	0,5	2,0	0,3	0,2	Kalan

Çizelge 4.8. ER 110 SG ilave dolgu kaynak metalinin mekanik özellikleri.

Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Çentik Dayanımı (ISO-V/-30°C)	Uzama (Lo=5do) (%)
Min. 690	Min. 760	Min. 47 J	19

ER 110 SG dolgu metali içerisinde %1,7 Mn ve %2,0 Ni elementleri bulunmaktadır. Mn elementi, C elementi gibi çelik yapısında yer alır ve bu element çeliğin mukavemetini artırır. Mn elementinin en önemli özelliği ise kükürtle MnS bileşiği yapar ve sıcak kırılmalığa neden olan FeS (demir kükürt) bileşiği oluşumunu engeller. Yapıda mikro alaşım elementlerinin varlığı, yüksek bir mekanik dayanımın yanı sıra yüksek süneklilik ve çatlama direnci, düşük sıcaklıklarda ise yüksek darbe dayanımı gösterir.

#### 4.1.4. Kaynak Makinesi

Kaynak işlemi için 2k Welding Ltd. Şti.'ne ait TMD5X5KOLON-BOM kodlu hareketli platforma sahip otomatize edilmiş kaynak makinesi ve kaynak işlemi için bu platformda bulunan EWM marka AG Phoneix 452 Plus MM RC tip MIG/MAG gazaltı kaynak makinesi kullanılmıştır. Otomatize edilmiş kaynak makinesi Şekil 4.1'de gösterilmiş ve özellikleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.1. 2k Welding firmasına ait kolon-bom sistemli otomatize edilmiş kaynak makinesi.

Çizelge 4.9. TMD5X5KOLON-BOM hareketli platforma sahip kolon-bom sistemli otomatize edilmiş kaynak makinesi özellikleri.

<b>Üretici Firma</b>	2k Welding Ltd. Şti.
<b>Ürün Kodu</b>	125523-1
<b>Bom Yüksekliği (A)</b>	4790 mm
<b>Bom Uzunluğu (B)</b>	5370 mm
<b>Toplam Yükseklik (C)</b>	6145 mm
<b>Genişlik (D)</b>	7465 mm
<b>Kolon Hızı (mm/dk)</b>	0,23-2,33
<b>Bom Hızı (mm/dk)</b>	0,185-1,85
<b>Ray Hızı (mm/dk)</b>	0,2-2,00
<b>Bom Taşıma Kapasitesi</b>	200 kg

Otomatize edilmiş kaynak sisteminde kullanılan EWM marka Phoenix 452 puls MM RC tip ve 090-005469-00502 item numaralı kaynak makinesi çok prosesli otomatik uygulamalar için optimize edilmiş bir MIG/MAG darbeleri kaynak makinesidir. Gaz soğutmalı ve isteğe bağlı olarak su soğutmalı sistem kullanımı sağlayabilir. Kaynak makinesi özellikleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te kaynak makinesi aksamaları gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. EWM marka Phoenix 452 Puls MM RC kaynak makinesi özellikleri.

<b>Akım Aralığı</b>	5-450 A
<b>Voltaj Aralığı</b>	14,3-36,5 V
<b>Açık Devre Voltajı</b>	80 V
<b>Şebeke Voltajı</b>	400 V
<b>Şebeke Frekansı</b>	50 Hz / 60 Hz
<b>Önerilen Jeneratör Gücü</b>	29,1 kVA
<b>Koruma Sınıfı</b>	IP23
<b>Makine Ebatları</b>	780x375x625 mm



Şekil 4.2. EWM marka Phoenix 452 Puls MM RC gazaltı kaynak makinesi (soldaki) ve Abicor Binzel marka xFume model duman emme sistemi (sağdaki).



Şekil 4.3. Kaynak torç mekanizması.



Şekil 4.4. Tel sürme ünitesi.

#### 4.1.5. Kaynak Isı Girdisi Hesabı

Bisalloy HHA 500 zırh çeliği geleneksel düşük hidrojen kaynak yöntemlerinden herhangi biri kullanılarak kolaylıkla kaynak yapılabilir. Alaşım elementlerinin (Mn, Cr, Mo, B) eklenmesiyle birleştirilen düşük karbon içerikleri, daha yüksek mukavemet, sertlik ve darbe dayanıklılık avantajlarına ilave olarak iyi kaynaklanabilirlik sağlar. Bu çeliğin ideal şekilde kaynaklanmasını sağlamak için aşağıdakiler gereklidir.



Sertleşmeyi en aza indirmek ve kaynağın ITAB'daki özelliklerini korumak için hidrojen seviyeleri, ön ısıtma sıcaklıkları ve ark enerjisi girdileri konusunda daha dikkatli olunmalıdır.

ITAB'ın uygun bir hızda soğumasını ve doğru sertlik ve mikroyapının elde edilmesini sağlamak için hem ön ısıtma hemde ısı girdisindeki sınırlamalar gereklidir. Çok yavaş bir soğutma hızı, yumuşak bir ITAB'a ve dolayısıyla çekme ve kırılma tokluğu özelliklerinin kaybına neden olabilir. Çok hızlı bir soğutma hızı, süneklik kaybına neden olabilecek sert bir ITAB üretir.

#### Isı girdisi formülü:

$$\text{ISI GİRDİSİ} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \right) = \eta \times \frac{\text{Volt} \times \text{Amper} \times 60}{\text{Kaynak Hızı} \left( \frac{\text{mm}}{\text{dk}} \right) \times 100} \quad (4.1)$$

$\eta$ : Enerji Verimlilik Faktörü

Kaynak prosesinde izin verilen ısı girdisi (kJ/mm) Çizelge 4.11'de verilmiştir. [109].

Çizelge 4.11. Kaynak işleminde izin verilen ısı girdisi (kJ/mm) [109].

Kaynak Prosesi	Birleşimde Maksimum Plaka Kalınlığı $\leq 40$
MMAW	1,25-2,50
GMAW	1,00-2,50
FCAW	0,80-2,50
SAW	1,00-2,50

**Not:** Yapısal kalitelerde 12 mm'ye kadar kalınlıklar için, belirli uygulamalarda maksimum ark enerjisinin maksimum 1,5 kJ/mm ile sınırlandırılması gerekebilir.

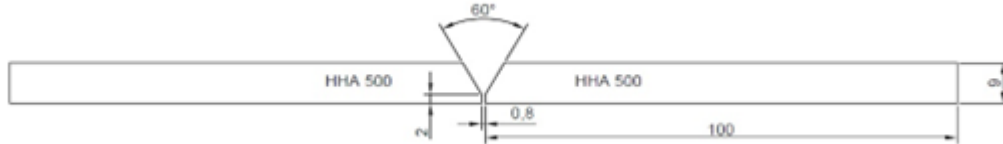
Soğutma, belirli bir plaka kalınlığı ve bağlantı konfigürasyonu için ön ısıtma ve ısı girişi arasındaki denge ile kontrol edilir. Kaynak yöntemlerinin enerji verimlilik faktörü Çizelge 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Kaynak yöntemlerinin enerji verimlilik faktörleri [109].

Kaynak Yöntemi	Enerji Verimlilik Faktörü( $\eta$ )
Elektrik Ark Kaynağı	0,8
Tozaltı Kaynağı	1,0
MAG Gazaltı Kaynağı	0,8
MIG Gazaltı Kaynağı	0,8
Gazaltı Özlü Tel Kaynağı	0,8
TIG Kaynağı	0,6

#### 4.1.6. Kaynak İşlemi

Hadde yönü dikkate alınarak 100x500 mm ebatlarında hazırlanan Bisalloy HHA 500 zırh çeliği levhalarına yarım V kaynak ağızı açılmış ve daha sonra kaynak öncesi ön temizlik işlemi yapılmıştır. Daha sonra iki plaka Şekil 4.5'teki şematik resimde gösterildiği gibi kaynak ağızları birbirine bakacak şekilde arada 0,8 mm boşluk bırakılarak PA pozisyonunda plakanın başına ve sonuna punta atılarak birbirine tutturulmuştur.



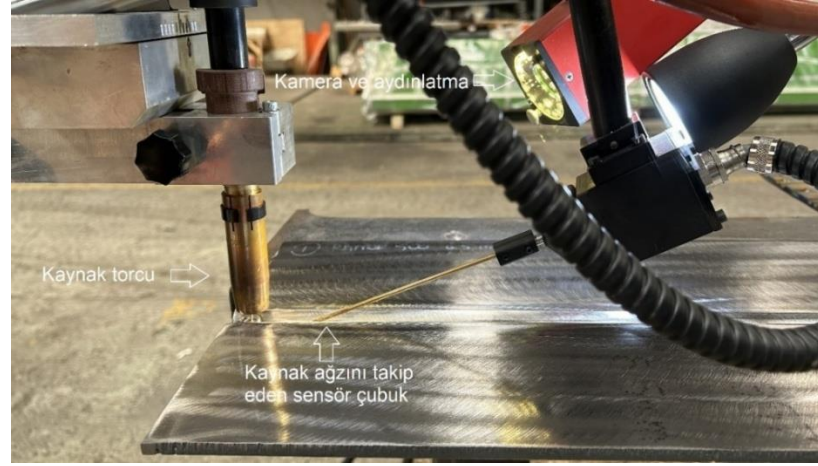
Şekil 4.5. Kaynak pozisyonu.

Kaynak işlemine başlamadan önce hazırlanan parçalar düz bir zemine ve kaynak yapılacak bölgenin başlangıç ve bitişine punta atılarak kaynatılmıştır. Mümkün olduğunca iki parçanın birbirine olan mesafesine dikkat edilerek düz zemine sabitlenmesi sağlanmıştır. Bu sabitleme işleminin amacı, malzemeye kaynak işlemi yapılırken yüksek ısı girdisi ile malzemenin çarpılmasına sebep olacak ve bu çarpılmadan dolayı malzemede distorsiyon oluşturacaktır. Bu oluşacak distorsiyon sonraki deneyler için problem yaratacağından amaç bu istenmeye çarpılmayı önlemektir.

Kaynağa başlamadan önce plakanın kaynak ağız yüzeyleri zımpara takılı bir avuç taşlama makinesi yardımıyla ön temizlik işlemine tabii tutulmuştur. Bu temizliğin amacı kaynak metali ile ilave kaynak teli arasında ark oluşumunu kolaylaştırarak, kaynak banyosunu yabancı maddelerden korumaktır.

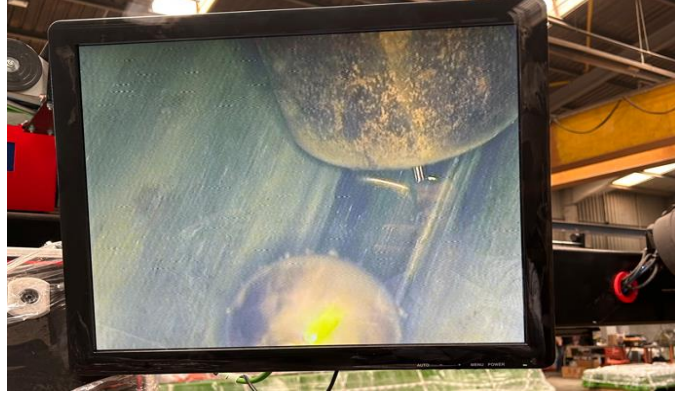
Otomatize edilmiş kaynak makinesinin tercih nedeni, kaynak işlemi sırasında kaynak parametrelerinin sabit tutulması ve buna bağlı olarak kaynak işlemi sırasında rijitliğin sağlanmasıdır.

Kaynak işlemi, Şekil 4.6'da gösterilen kaynak ağızını takip ederek kaynak pozisyonlanmasını sağlayan ve ucunda sensör bulunan bir çubuk aparat bulunmaktadır. Bu aparat pozisyonlamayı takip ederek kaynak ağızına muntazam bir şekilde kaynak dikişinin oluşmasını sağlar. Ayrıca kaynak torcu, kaynak banyosuna gaz koruması sağlayarak ilave kaynak metalinin ana metal ile ark oluşmasını sağlamaktadır.

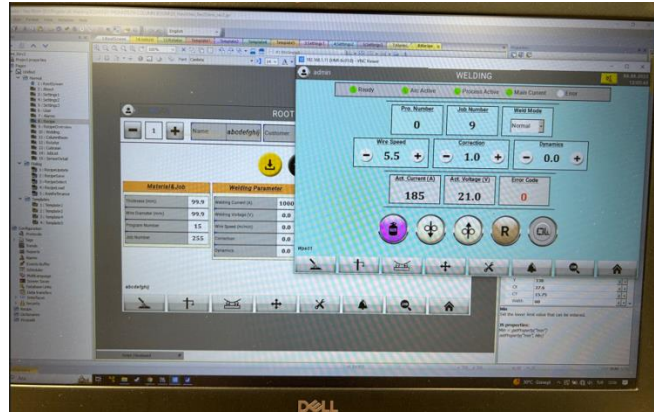


Şekil 4.6. Kaynak işlemi öncesinde torcun pozisyonlanması.

Kaynak işlemi esnasında kaynak banyosunun bilgisayar ekranında izlenmesini sağlayan yüksek çözünürlüklü bir kamera ve aydınlatma sistemi mevcuttur. Bu kamera sayesinde kaynak gözlüğü kullanmadan Şekil 4.7'de gösterilen bu ekran ile kaynak banyosunun takip edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.7. Kaynak banyosunun takibini sağlayan bilgisayar ekranı.



Şekil 4.8. Kaynak parametrelerinin girildiği ve takip edildiği bilgisayar ekranı.

Deneysel çalışmalar kapsamında öncelikle ön denemeler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilerek optimum voltaj, amper ve kaynak hızı gibi kaynak parametreleri belirlenmiştir.

Daha sonra deneysel çalışmalarda kullanılacak sac levhalar ortam sıcaklığında PA pozisyonunda alın-alına birleştirme yapılması için hazır hale getirilmiştir. Ön deneysel çalışmalar sonucunda belirlenen ve Çizelge 4.13'te verilmiş kaynak parametreleri otomasyon sistemindeki bilgisayara girilerek ilave metal kullanılarak otomatize edilmiş MIG kaynağı ile Şekil 4.9'da gösterildiği gibi birleştirilmiştir. Çizelge 4.13'te paylaşılan ısı girdisi (4.1) paylaşılan denklemle hesaplama yapılmış ve kaynak esnasındaki ısı girdisinin uygun aralıklarda olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kaynak

işlemi yapılırken bilgisayar vasıtasıyla torca salgı hareketi yaptırılarak kaynak genişliği ayarlanmıştır.

Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra her numune plakanın üzerine kaynak parametreleri markalanmıştır.

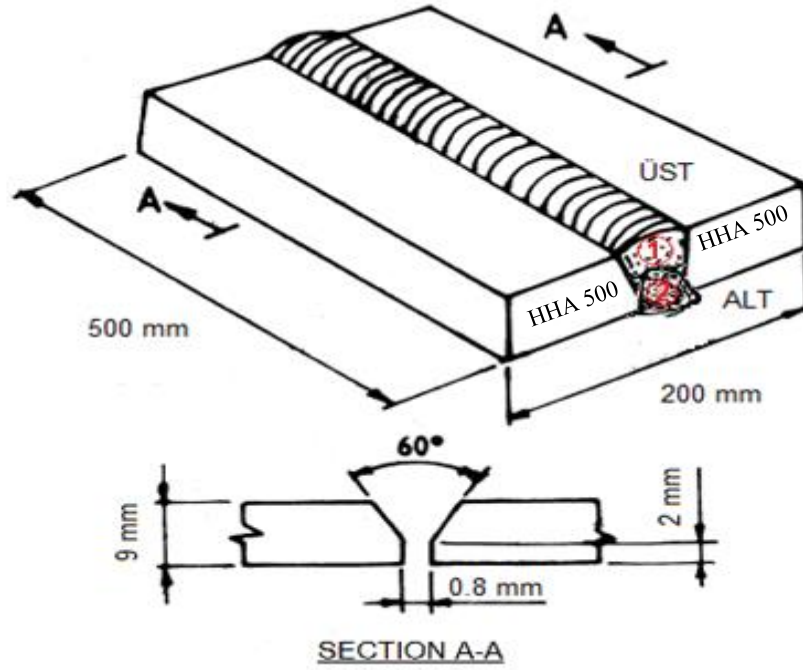
Çizelge 4.13. Otomatize edilmiş gazaltı kaynak parametreleri ve ısı girdisi hesabı.

Numune Tanımı	Gerilim (V)	Akım (A)	Tel Hızı (m/dk)	Kaynak Hızı (cm/dk)	Isı Girdisi (kj/mm)
Plaka-1 Üst	21	190	5,5	22	0,871
Plaka-1 Alt			6,0		0,871
Plaka-2 Üst			5,5		0,871
Plaka-2 Alt			6,0		0,871
Plaka-3 Üst			5,5		0,871
Plaka-3 Alt			6,0		0,871
Plaka-4 Üst			5,5		0,871
Plaka-4 Alt			6,0		0,871

Parçanın üst yüzeyi 1 paso ile kaynatıldıktan sonra alt kısım spiral taşlama makinesi ile kaynak alttan yarılmış ve ardından temizlik işlemi yapıldıktan sonra plakanın alt yüzeyi 1 paso kaynatılarak Şekil 4.10'da gösterildiği gibi toplamda 2 paso ile kaynak işlemi tamamlanmıştır.

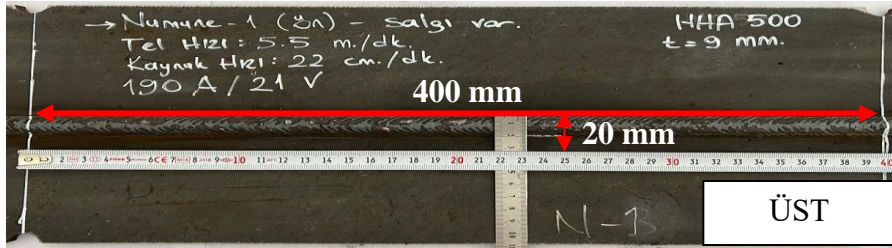


Şekil 4.9. Kaynak paso gösterimi.



Şekil 4.10. Kaynatılmış numune plaka.

Örnek olarak, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de Plaka-1 Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait kaynaklı birleştirmelerin üst ve alt kaynak resimleri gösterilmiştir.



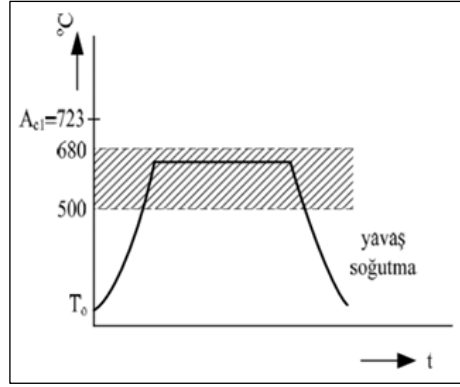
Şekil 4.11. Plaka-1 (Bisalloy HHA 500-Bisalloy HHA 500) kaynak (üst).



Şekil 4.12. Plaka-1 (Bisalloy HHA 500-Bisalloy HHA 500) kaynak (alt).

## 4.2. KAYNAK SONRASI GERİLİM GİDERME ISIL İŞLEMİ

Homojen olmayan ısıtma-soğutma işlemleri (döküm, kaynak, sertleştirme) sırasında parça içerisinde artık iç gerilmeler oluşabilir. Bu yüzden, kaynak işlemi sırasında doğan iç gerilmeleri azaltmak amacıyla gerilim giderme ısıl işlemi uygulanır. Kaynak sonrası oluşan artık iç gerilmelerin giderilmemesi durumunda, kaynaklı parçalarda zamanla çarpılma ve deformasyon meydana gelebilir. Ayrıca artık iç gerilmeler kaynaklı parçaların çalışması sırasındaki performanslarını da olumsuz olarak etki edebilir. Şekil 4.13'te çelikler için gerilim giderme ısıl işlem grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Gerilim giderme tavlaması [110].

Kaynak sonrası malzemede ve kaynak bölgesinde oluşan gerilmeleri en aza indirmek için Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi'nde bulunan Protherm Furnaces marka fırında 650 °C'de 1 saat bekletilerek gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmıştır. Kaynaklı levhalar fırından çıkartılarak havada soğutulmuştur. Bu işlem çekme testi, eğme testi, darbe çentik testi, mikroyapı görüntü alınacak numunelere ve balistik test yapılacak 1 plakaya uygulanmıştır. Burada uygulanan ısıl işlemin amacı ısıl işlem uygulanmamış ve gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmış numunelerin mekanik ve balistik testler üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasıdır.

## 4.3. TAHRİBATSIZ VE TAHRİBATLI TESTLER

100x500 mm iki numune plaka kaynatıldıktan sonra 200x500 mm'lik numune plakalar oluşturulmuştur. Tahribatlı ve tahribatsız testlerde numune plakanın başından ve

sonundan 50'şer mm pay bırakılarak ortada kalan 400 mm uzunluğundaki alan testlere tabii tutulmuştur.

#### 4.3.1. Tahribatsız Testler

##### 4.3.1.1. Gözle (Görsel) Muayene

Gözle muayene numune plakaların yüzeylerindeki kalite durumunun (boyut sapmaları, süreksizlikler ve form hatalarının yüzey durumu vb.) göz ile veya optik cihazlar yardımıyla incelenmesi ve değerlendirilmesidir. TS EN ISO 17637 standardına göre 500 lüks aydınlatma kaynağı ile kaynak dikişleri görsel olarak kontrol edilir.

##### 4.3.1.2. Sıvı Penetrant Muayene

Yüzeydeki hataları tespit etmek için kullanılan tahribatsız bir muayene yöntemidir. Hatalar, muayene yüzeyine açık olmalıdır. Bu sebepten dolayı yüzey altında kalan veya herhangi bir nedenle yüzeye açıklığı bulunmayan hatalar bu yöntem ile tespit edilemez. Bu muayene yöntemi TS EN 571-1, TS EN 571-2 ve diğer EN, ASTM, ISO standartlarına göre yapılmaktadır. Sıvı penetrant testinde Şekil 4.14'te gösterilen Beta BT-68 Penetrant Sprey, Beta BT-69 Cleaner (Temizleyici) Sprey (penetrant kaldırıcı ve temizleyici sprej) ve Beta BT-70 Developer (Geliştirici) Sprej (penetrant muayene için geliştirici sprej) kullanılmıştır.



Şekil 4.14. Penetrant testinde kullanılan sıvılar.



### 4.3.1.3. Radyografik Muayene (RT-Radiographic Examination)

Bu tahribatsız muayene yöntemi radyasyon demeti (gamma ışınları, x-ışınları ve radyoizotop) kaynaklarını içerir. Bu yöntem malzeme içindeki veya kaynak bölgesinde bulunan iç çatlakların ve diğer hata türlerinin tespit edilmesinde kullanılmaktadır [111]. Muayene edilecek malzemenin yoğunluk farkları aracılığıyla hatalar tespit edilir. [112]. Çalışmada PARS Kalite Kontrol Müh. San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından Exertus Dual 120 marka radyografik test cihazı ile kaynaklı parçaların röntgenleri çekilmiştir (Şekil 4.15).



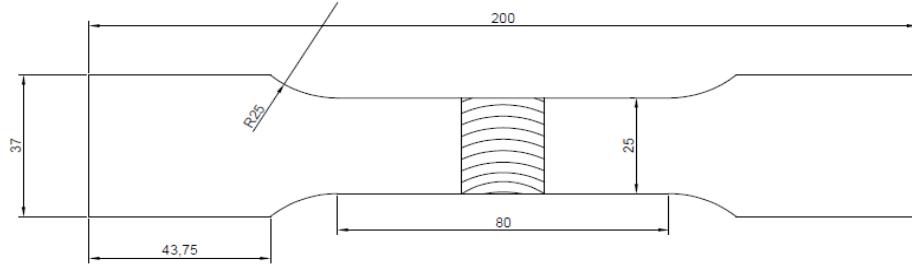
Şekil 4.15. Radyografik muayene yöntemi ve testte kullanılan gama radyografi cihazı (Exertus Dual 120).

Ayrıca parçalar UMT Kalite Kontrol Müh. ve Gözetim Tic. Ltd. Şti. firmasında dijital radyografik muayene cihazı vasıtasıyla tekrardan kontrol edilmiş ve röntgen görüntüleri dijital ortama aktarılmıştır.

### 4.3.2. Tahribatlı (Mekanik ve Balistik) Testler

#### 4.3.2.1. Çekme Deneyi Numunesinin Hazırlığı ve Deneyi

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan ve temel tahribatlı testlerden olan çekme deneyi için, kaynaklı çekme deney numuneleri TS EN ISO 4136, kaynaklı numuneler ise TS EN ISO 6892-1 standardına göre hazırlanmıştır. Şekil 4.16'da çekme deney numunesinin şematik resmi gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Çekme testi için deney numunelerinin hazırlanması.

Çekme deneyi, UMT Kalite Kontrol Müh. ve Gözetim Tic. Ltd. Şti. bünyesinde bulunan 600 kN kapasiteli UTEST marka UTC-4870 model çekme testi cihazında 10 mm/dk. çekme hızında olacak şekilde boyuna doğrultuda çekme testi uygulanmıştır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. UTC-4870 model çekme test cihazı.

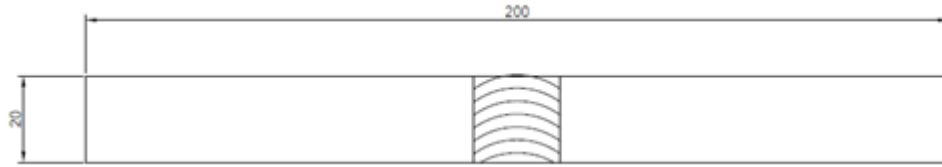
Kaynaklı birleştirmelerin, ITAB ve kaynak bölgesi zamanla servis şartlarında maruz kalınan gerilmeler sebebiyle çekmeye zorlanabilirler. Ana malzeme ve kaynaklı test numunelerinin çekme dayanımını belirlemek için boyutları ve uygulama biçimi deneysel metot bölümünde anlatılan deney numunelerine çekme testi uygulanmıştır. Numunelerin çekme dayanım sonuçları alt bölümlerde verilmiştir. Ayrıca daha sonra

test numunelerinin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

#### 4.3.2.2. Üç Nokta Eğme Deneyi Numunesinin Hazırlığı ve Deneyi

Deneylede kullanılan zırh çeliği ana malzemelerin ve kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan diğer önemli bir test olan eğme testi için, işlem parametrelerine göre kaynaklı ve kaynaklız deney numuneleri TS EN ISO 5173 ve TS EN ISO 7438 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Şekil 4.18’de eğme deney numunelerinin şematik resmi gösterilmiştir.

Eğme testi ile malzeme orta noktadan deforme edilerek iç bükey bir yüzey veya eğme sonucunda bir kırılma meydana gelmeden bükülme oluşturur. Malzemenin süneklik göstergesi veya kırılmaya karşı direncini tespit etmek için bu test metodu gerçekleştirilir.



Şekil 4.18. Eğme testi için deney numunelerinin hazırlanması.

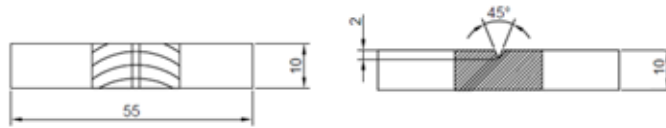
Eğme deneyi, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi (MARGEM) Laboratuvarı bünyesinde bulunan 600 kN yük uygulayabilme kapasitesine sahip Zwick/Roell Z600 marka/model eğme test cihazında 2 mm/dk. basma hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Zwick/Roell Z600 model 600 kN kapasiteli eğme test cihazı.

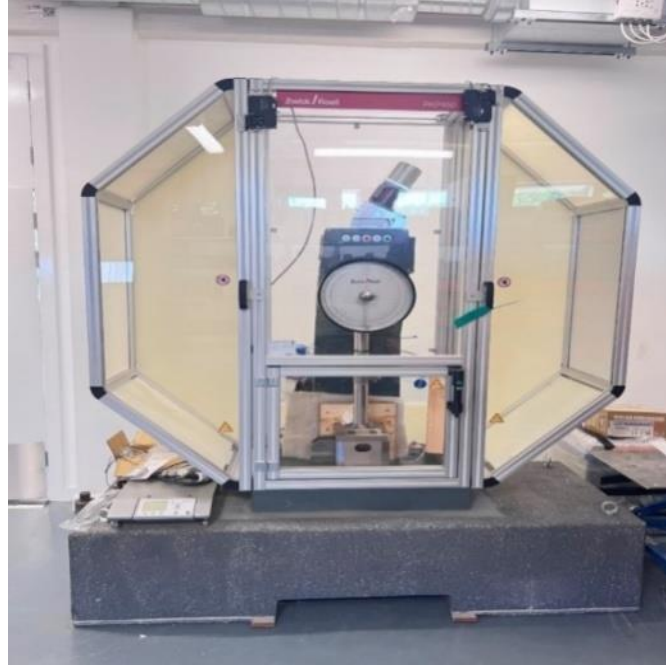
#### 4.3.2.3. Çentik (Charpy) Darbe Deneyi Numunesinin Hazırlığı ve Deneyi

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan testlerden olan çentik darbe deneyi için, işlem parametrelerine göre TS EN ISO 148-1 standardına uygun olarak numuneler hazırlanmıştır. Şekil 4.20’de çentik darbe deney numunelerinin şematik resmi gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Charpy çentik darbe testi için deney numunelerinin hazırlanması.

Çentik darbe deneyleri, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi (MARGEM) Laboratuvarı bünyesinde bulunan 450 Joule’lik darbe enerjisi uygulama kapasitesine sahip Zwick/Roell Rkp450 marka/model çentik darbe testi cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. Zwick/Roell Rkp450 marka/model çentik darbe test cihazı.

Kaynaklı birleştirmelerde, ITAB ve kaynak bölgesi servis şartlarında zamanla maruz kalınan gerilmeler nedeniyle kırılmaya zorlanabilirler. Özellikle gevrek kırılmaya elverişli şartlar altındaki metalik malzemelerin mekanik özellikleri hakkında fikir elde etmek için çentik darbe testi yapılır. Ana malzeme ve kaynaklı deney numunelerinin çentik darbe dayanımının tespit edilmesi için boyutları ve uygulama biçimi deneysel metot bölümünde anlatılan deney numunelerine charpy çentik darbe testi uygulanmıştır. Numunelerin çentik darbe dayanım sonuçları Bölüm 5.3. Çentik Darbe Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi başlığı altında verilmiştir. Ayrıca daha sonra test numunelerinin kırılma yüzeyleri görsel muayene yöntemi ile incelenmiştir.

#### 4.3.2.4. Sertlik Ölçümü

Çalışmada yararlanılan Bisalloy HHA 500 zırh çeliği oda sıcaklığında sertlik ölçümlerine tabii tutulmuştur. Sertlik ölçümleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Laboratuvarında bulunan QNESS Q250M Vickers sertlik ölçüm cihazında 500 gr yük uygulanarak yapılmıştır.

#### 4.3.2.5. Metalografik Numune Hazırlığı ve İncelemeleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan Bisalloy HHA 500 zırh çeliklerinin kaynaklı birleştirmelerinin mikroyapı incelemeleri için numuneler soğuk reçine ile kalıba alınmıştır. Kalıba alınan numuneler klasik numune hazırlama yöntemlerinden yararlanılarak hazırlanmıştır. Bu amaçla numuneler 250-2500 mesh SiC zımpara kâğıdı ile zımparalanmış, daha sonra 1-3 µm elmas solüsyon ile parlatma keçesinden faydalanılarak parlatılmıştır. Parlatılan numuneler, %3'lük nital solüsyon ile dağlama işlemine tabii tutulmuştur.

Dağlanan numuneler Şekil 4.22'de gösterilen Nikon Epiphot 200 model optik mikroskop ve Clemex yazılımı vasıtasıyla 5X-100X büyütmelerde incelenmiştir.



Şekil 4.22. Metalografik incelemelerde kullanılan Nikon Epiphot 200 marka optik mikroskop.

Taramalı elektron mikroskobu incelemeleri (SEM- Scanning Electron Microscope) Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü MARGEM Laboratuvarı bünyesinde bulunan Zeiss Ultra Plus marka (Şekil 4.23) taramalı elektron mikroskobu cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 4.23. Zeiss Ultra Plus marka SEM cihazı.

#### 4.3.2.6. Balistik Deneyler ve Uygulanışı

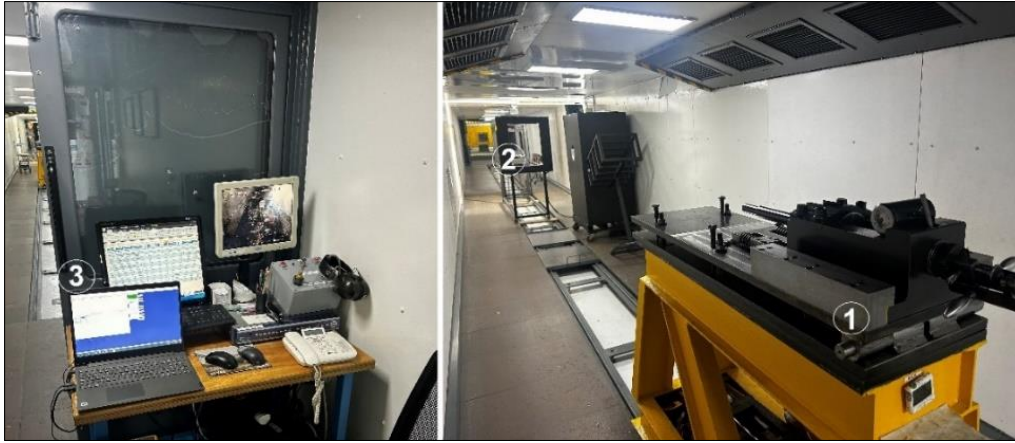
Deneysel metot bölümünde belirtildiği gibi çalışmada kullanılan Otomatize edilmiş kaynak makinesi ile plakalar kaynatılmış ve 200x500 mm ebatlarındaki 2 plaka balistik teste tabii tutulmuştur. Bu plakalardan biri olduğu gibi diğeri ise kaynak sonrası 650 °C’de 1 saat gerilim giderme ısıl işlemleri uygulanmış ve balistik testler için hazır hale getirilmiştir.

Balistik test NATO STANAG 4569 (Standardization Agreement) AEP-55 “Volume 1 Procedures for Evaluating The Protection Level of Armored Vehicles - Kinetic Energy And Artillery Threat” (Seviye 1 Zırhlı Araçların Koruma Seviyesinin Değerlendirilmesi için Prosedür - Kinetik Enerji ve Topçu Mühimmatı Tehdidi) prosedüründe belirtilen Şekil 4.24’te gösterilen Seviye 1 kinetik enerji mühimmatları ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.24. NATO STANAG 4569 Seviye 1 kinetik enerji mühimmatları.

Balistik test, Sakarya Arifiye’de bulunan OTOGAR Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş.’nin Balistik Test Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği, namlu (test silahı), hız ölçüm sistemi (kronograf) ve hedeften oluşmaktadır. Test kapalı alanda uzaktan ateşleme sistemi ile gerçekleştirilmektedir. Atış poligonundan ayrı bir alanda bilgisayarlı atış komuta sistemi ile namlu uzaktan ateşlenebilmektedir. Atış komuta odası ve atış poligonu Şekil 4.25’te gösterilmiştir.

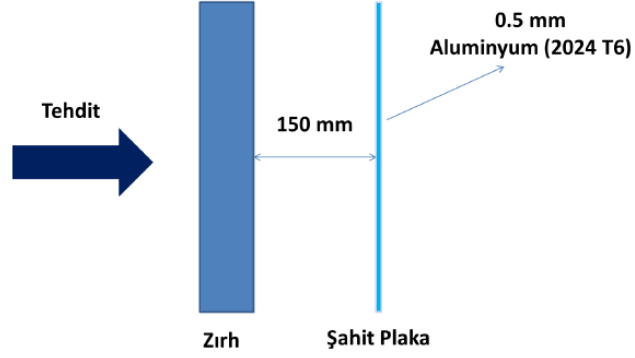


Şekil 4.25. 1-Namlu ve atış poligonu, 2-Hız ölçüm cihazı, 3-Atış komuta sistemi.

Kaynaklı plaka, hedef sehpasına işkenceler ile sıkıca tutturulmuş ve hedefin arkasına Şekil 4.26’da gösterildiği gibi 150 mm uzaklıkta atış sonrası sıçrak kontrolünün yapılması için 0,5 mm kalınlığında 2024 T6 özelliğinde alüminyum plaka yerleştirilmiştir. Sıçrak kontrolünün amacı, mühimmattan veya numune plakadan kopan parçaların hedefin arkasında bulunan herhangi bir canlıya zarar verip



vermediğini görmek içindir. Alüminyum plakada sıçrak görülmesi veya delinmesi o testin başarısız olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.26. Şahit plaka yerleşimi.

Vuruş açısı ve hedef açısı  $0^\circ$  derece olacak şekilde otomatik namlunun lazeri ile hedefte vurulacak nokta nişan alınmıştır (Şekil 4.27).



Şekil 4.27. Hedef sehpasına bağlanmış numune plakaya lazer ile nişan alınması.

Namlu enerjisi, bir mühimmatın namludan çıkış yaptığı andaki sahip olduğu kinetik enerji olarak tanımlanmaktadır. Kısaca merminin yıkıcı potansiyelini ve tahribat

gücünü ifade eder. Merminin gücünü belirlemek için kullanılır. Mermi ne kadar ağır ve hızı ne kadar yüksek ise namlu enerjisi de o kadar yüksek olur ve hedefi daha çok tahrip eder. Bir silahın ürettiği enerji (gücü); mühimmat ağırlığının, namlu çıkış hızı ile hesaplanması sonucu ortaya çıkar.

**Namlu enerjisi formülü:**

$$\text{Namlu Enerjisi} = \frac{\text{Çekirdek ağırlığı (gram)} \times V^2 (\text{m/sn})}{2 \times 1000} \quad (4.2)$$

Her atış sonrası numune ve şahit alüminyum plaka üzerinde kontroller yapılmıştır. Plakada delinme olması halinde komple deformasyon (Complete Penetration-CP) veya delinme olmaması halinde kısmi deformasyon (Partial Penetration-PP) olarak sonuç değerlendirmesi yapılmıştır. Eğer sonuç CP ise başarısız, PP ise başarılı kabul edilmektedir. Ayrıca şahit alüminyum plaka üzerinde yapılan kontrollerde eğer sıçrak izi var (Spall-S) veya sıçrak sizi yok (No Spall-NS) sonuç değerlendirilmesi yapılmıştır. Eğer sonuç S ise plaka PP bile olsa test sonucu başarısız sayılmıştır. Eğer plaka PP ve sonuç NS ise test sonucu başarılı olarak kabul edilmiştir.

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 5.1. TAHRİBATSIZ MUAYENE SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

##### 5.1.1. Gözle (Görsel) Muayene Sonuçları

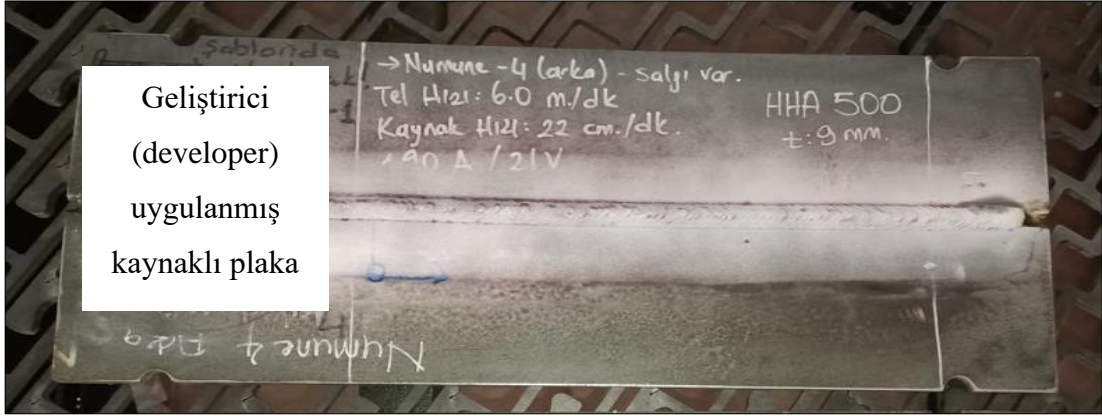
Kaynaklanmış numune plakaların yüzeylerindeki kalite durumu TS EN ISO 17637 standardına göre 500 lüks aydınlatma kaynağı ile kaynak dikişleri Çizelge 5.1’de verilen maddelere göre görsel olarak kontrol edilmiştir. Kaynak yüzeyinde yapılan kontroller neticesinde yüzeyde çatlak, gözenek, birleşme hatası, nüfuziyet eksikliği vb. hataların olmadığı ve kaynağın görsel olarak uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.1. Görsel muayene sonuçları.

#	Hatalar	Uygun	Uygun Değil	Açıklama
1	Yüzeysel çatlaklar	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
2	Görülebilir gözenekler	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
3	Görülebilir katı çözeltiler	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
4	Birleştirme hataları	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
5	Yetersiz kaynak nüfuziyeti	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
6	Çentikler	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
7	Krater çatlakları	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
8	Dikiş yükseltmeleri	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
9	Sıçrantılar	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
10	Yanarak delinme, yanma oluşu	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-

### 5.1.2. Sıvı Penetrant Muayene Sonuçları

Sıvı penetrant uygulanmış numunelere geliştirici uygulanmış ve 30 dakika beklenmiştir. 30 dakika sonra Şekil 5.1’de gösterildiği gibi yüzeyde çizgisel veya yuvarlak bir süreksizlik tespit edilmemiştir. Eğer yüzeyde çatlak veya gözenek gibi hatalar olsaydı bu hatalar sıvı penetrantı çekecek ve daha sonra geliştiricinin uygulanması ile hatalardaki sıvı penetrant gözle görülecek şekilde yüzeye doğru çıkacaktı. Bu bilgiler ışığında geliştiricinin uygulanmasından sonra kaynak bölgesinde yüzeye çıkan bir penetrant sıvısı olmadığından kaynak işleminin sıvı penetrant muayenesi sonucunda başarılı olduğu değerlendirilmiştir.

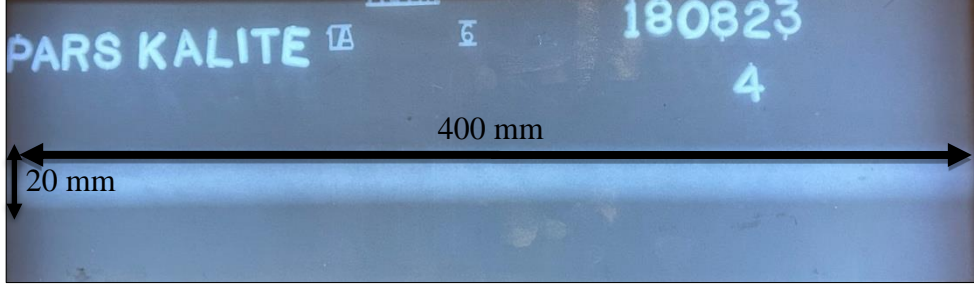


Şekil 5.1. Geliştirici (developer) uygulanmış kaynaklı plaka.

### 5.1.3. Radyografik Muayene Sonuçları

Yapılan röntgen çekimlerinden sonra filmler kontrol edilmiştir. Buna göre filmde karartı olması yoğunluk olarak ifade edilmektedir. Test edilen parçanın filminde farklı yoğunlukların olması farklı yapıların olduğunu göstermektedir. Filmde fazla radyasyon alan kısımlar daha fazla kararır. Bu kararın film yoğunluğunun yüksek olduğunu gösterir. Örneğin, malzemede olan bir boşluk film üzerinde daha koyu ve siyah olarak görülür. Buna bağlı olarak çekilmiş filmlerdeki kaynak metalinin iç görüntüsü kontrol edilerek içerisinde çatlak, boşluk ve gözenek (süreksizlikler) gibi kaynak hatalarının olmadığı değerlendirilmiştir. Kaynak işlemi, deneysel çalışmalarla optimize edilmiş kaynak parametrelerinin belirlenmesiyle ve otomatize edilmiş gazaltı

kaynak yöntemiyle gerçekleştirildiğinde insan faktörü etkisi ortadan kaldırılmış olur. Sonuç olarak, radyografik muayene sonuçlarına göre kaynakta herhangi bir hata tespit edilmemesi, kaynak işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. Şekil 5.2’de negatoskop (ışıklı film okuma cihazı) cihazı ile film kontrolü gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Negatoskop (ışıklı film okuma cihazı) cihazı ile film kontrolü.

Ayrıca plakalar dijital radyografik muayene cihazı vasıtasıyla tekrardan kontrol edilmiş ve Şekil 5.3’te gösterilen röntgen görüntüleri dijital ortama aktarılmıştır.



Şekil 5.3. Dijital radyografik muayene cihazı ile yapılan film kontrolü.

## 5.2. ÇEKME DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ

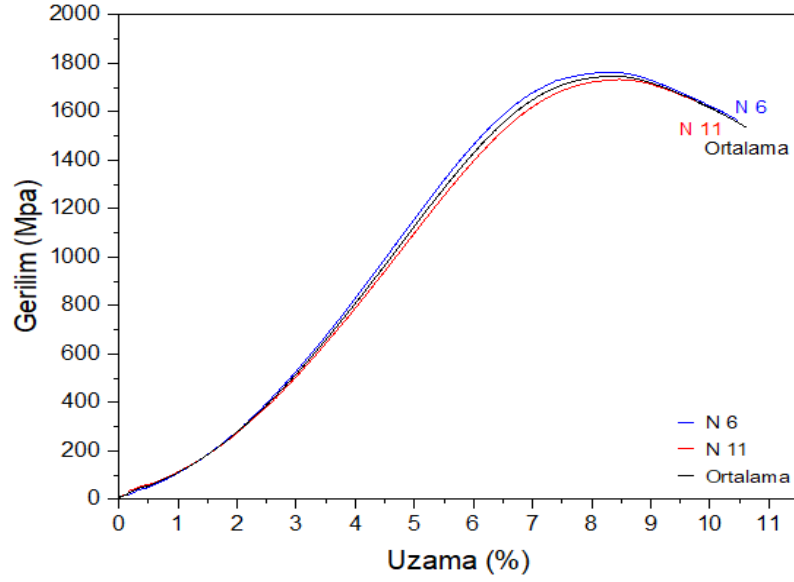
### 5.2.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Çekme Testi Sonucu

Çalışmada kullanılan, Bisalloy HHA 500 zırh çeliği test numunelerinin çekme testi sonucunda tespit edilen ortalama çekme dayanımı, akma dayanımı ve % uzama

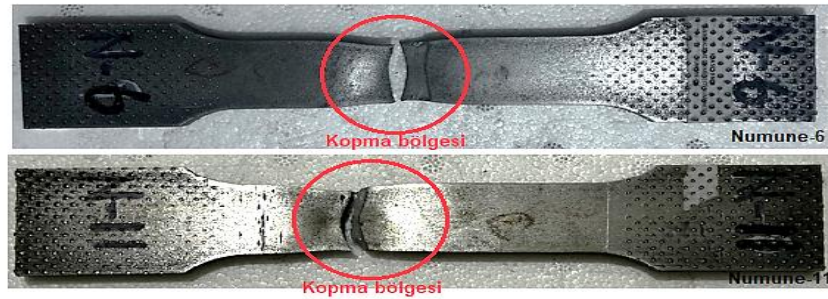
miktarları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Gerilme - % uzama grafikleri Şekil 5.4’te ve test sonucunda kopmanın olduğu bölge Şekil 5.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait çekme testi sonucu.

Numune	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Kopma Sonucu
N-6	1519	1763	10,50	-
N-11	1531	1733	10,60	-
Ortalama	1525	1747,5	10,55	-



Şekil 5.4. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait çekme testi sonucu grafiği.



Şekil 5.5. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait çekme testi sonucunda oluşan kopma bölgesi.

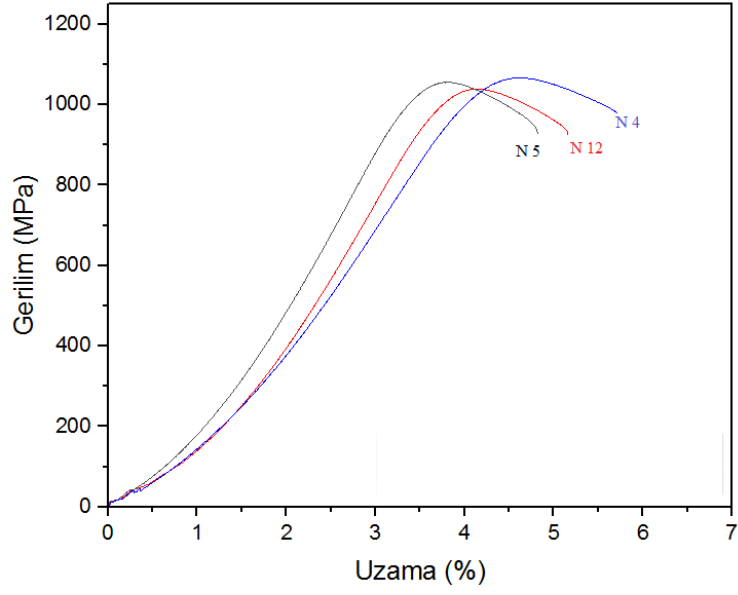
Çizelge 5.2 ve Şekil 5.4'te görüldüğü üzere; Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin ortalama akma dayanımı 1525 MPa, çekme dayanımı 1747,5 MPa ve uzama miktarı ise %10,55 olarak bulunmuştur. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin oda sıcaklığı çekme testi sonuçlarına göre akma ve çekme dayanımları ürün katalog tipik değerine yaklaşık veriler elde edilmiştir. Şekil 5.5'te gösterilen kopma görüntülerinden, numunelerde az da olsa uzama ve kesit daralması oluştuğu görülmektedir.

### 5.2.2. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmelerinin Çekme Testi Sonucu

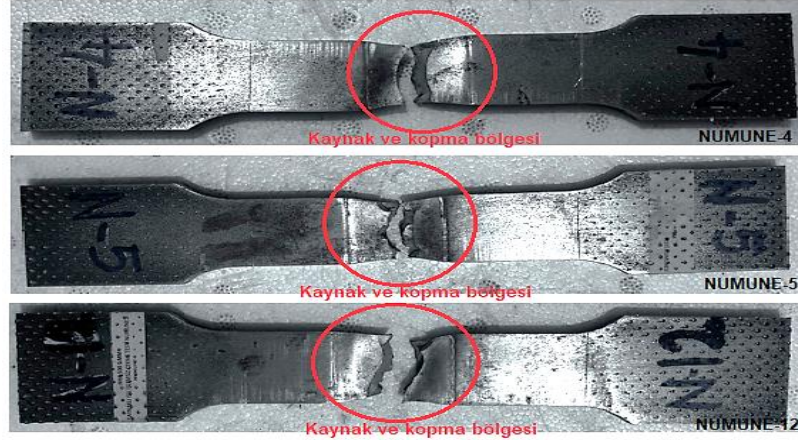
DeneySEL metot bölümünde belirtildiği gibi çalışmada kullanılan otomatize kaynak makinesi ile birleştirilmiş Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerinin çekme testi sonucunda ortalama akma, çekme dayanımı ve % uzama miktarları ve kopma bölgeleri Çizelge 5.3.'te verilmiştir. Gerilme - % uzama grafikleri Şekil 5.6'da ve deney sonucunda kopmanın oluştuğu bölge Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerine ait çekme testi sonucu.

Numune	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Kopma Sonucu
N-4	964	1067	5,70	Kaynak metali
N-5	952	1055	4,80	Kaynak metali
N-12	938	1039	6,30	Kaynak metali
Ortalama	951	1054	5,60	-



Şekil 5.6. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerine ait çekme testi sonucu grafiği.



Şekil 5.7. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerine ait çekme testi sonucunda oluşan kopma bölgesi.

Çizelge 5.3 ve Şekil 5.6 değerlendirildiğinde, kaynaklı Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin ortalama akma dayanımı 951 MPa, çekme dayanımı 1054 MPa ve uzama miktarı ise %5,60 olarak bulunmuştur. Uzama miktarı ana malzemede ortalama % 10,55 iken, kaynaklı numunede nerdeyse yarı yarıya düşüş gerçekleştirerek ortalama %5,60 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.7’den görüldüğü üzere kaynaklı Bisalloy HHA 500 deney numuneleri çekme testi sonucunda kaynak metalinden kopmuştur.

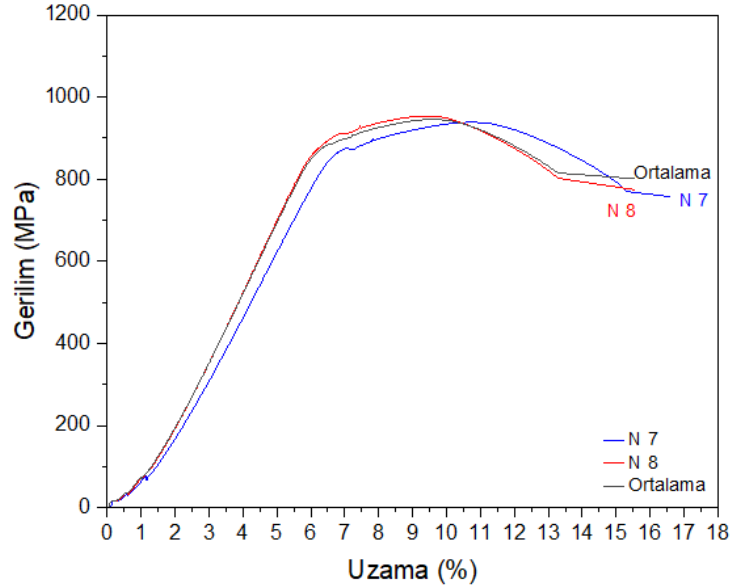


### 5.2.3. Kaynak Sonrası Isıl İşlem Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Birleştirmelerinin Çekme Testi Sonucu

Deneysel metot bölümünde belirtildiği gibi çalışmada kullanılan otomatize edilmiş kaynak makinesi ile kaynatılmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine kaynak sonrası 1 saat 650 °C’de gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmış ve çıkarılan kaynaklı deney numunelerinin çekme testi sonucunda ortalama akma, çekme dayanımı ve % uzama miktarları Çizelge 5.4’te verilmiştir. Gerilme - % uzama grafiği Şekil 5.8’de ve deney sonucunda kopmanın olduğu bölge Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Kaynak sonrası ısıl işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmelerine ait çekme testi sonucu.

Numune	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Kopma Sonucu
N-7	876	939	16,60	Kaynak metali
N-8	812	954	15,50	Kaynak metali
Ortalama	844	947	16,05	-



Şekil 5.8. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmelerine ait çekme testi sonucu grafiği.

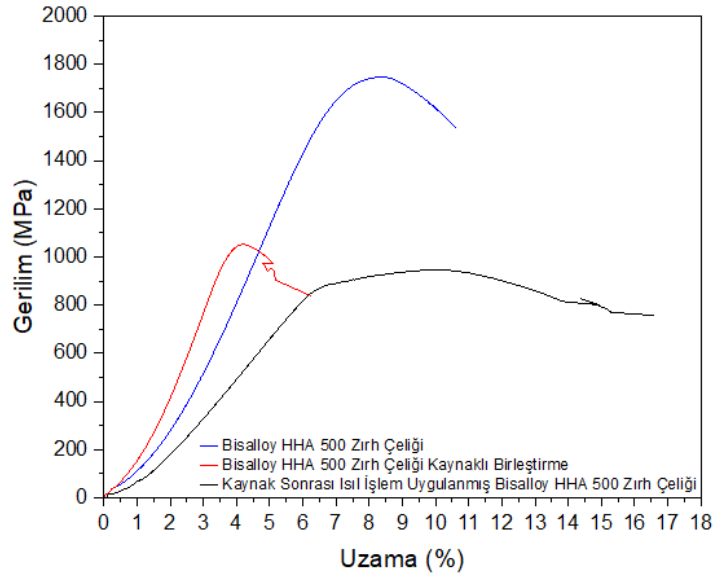


Şekil 5.9. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerine ait çekme testi sonucunda oluşan kopma bölgesi.

Çizelge 5.4 ve Şekil 5.8 değerlendirildiğinde; kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış HHA 500 zırh çeliğinin ortalama akma dayanımı 844 MPa, çekme dayanımı 947 MPa ve uzama miktarı ise %16,05 olarak bulunmuştur. Isıl işlem görmüş numuneler belirgin akma davranışı göstererek ısıtıl işlem görmemiş numunelerden farklılık göstermektedirler. Sonuçlar incelendiğinde ısıtıl işlem ile artık gerilmelerin giderilmesine ve sert fazların temperlenmesine bağlı olarak % uzama miktarının ısıtıl işlem uygulanmamış kaynaklı birleştirmelerin % uzama değerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 5.9’da görüldüğü gibi kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 malzemeler çekme testi sonrası kaynak metalinde kopma gerçekleşmiştir.

#### 5.2.4. Çekme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çalışmada kullanılan Bisalloy HHA 500 zırh çeliği ana malzeme, otomatize kaynak makinesi ile birleştirilmiş kaynaklı Bisalloy HHA 500 ve kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 birleştirmelerinin çekme testi sonucunda ortalama gerilme - % uzama grafikleri Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği, Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme ve kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait ortalama çekme testi sonucu grafiği.

Şekil 5.10'da en yüksek çekme dayanımının Bisalloy HHA 500 ana malzemenin elde edildiği, en düşük çekme dayanımının ise kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 kaynaklı birleştirmesinden elde edildiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, en yüksek % uzama değerinin ise kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 kaynaklı birleştirmesinden elde edildiği görülmektedir.

Deneyisel çalışmalarda, yukarıda Bölüm 5.2'de belirtilen Çizelge 5.3'te görüldüğü üzere; Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerinin ortalama akma dayanımı 951 MPa, çekme dayanımı 1054 MPa ve uzama miktarı ise %5,60 olarak bulunmuştur. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği ana malzemenin akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama miktarı ise sırasıyla, 1525 MPa, 1747,5 MPa ve %10,55 olarak bulunmuştur. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numuneleri çekme testi sonuçları karşılaştırıldığında, kaynak termal çevrimine bağlı olarak yapısal dönüşüm ve tane boyutunun yanı sıra ilave kaynak metali ile ana malzeme karışımından kaynaklanan seyrelmeye bağlı olarak kaynaklı bağlantıların akma dayanımı ve çekme dayanımı ana malzemeye göre daha düşük tespit edilmiştir. Uzama

miktarı ise ana malzemede ortalama %10,55 iken, kaynaklı numunede nerdeyse yarı yarıya düşüş gerçekleştirerek ortalama %5,60 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5.4'te görüldüğü üzere; kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmelerinin ortalama akma dayanımı 844 MPa, çekme dayanımı 947 MPa ve uzama miktarı ise %16,05 olarak bulunmuştur. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmeleri ile Bisalloy HHA 500 zırh çeliği temin edildiği haliyle mukavemetleri karşılaştırıldığında, kaynaklı bağlantıların akma ve çekme dayanımı Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinden daha düşük mekanik özelliklerde kopmuştur. Fakat sonuçlar incelendiğinde ısıtıl işlem ile % uzama miktarının kaynak sonrası % uzama değerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Temin edildiği şekli ile % uzama miktarı %10,55 iken, kaynak sonrası bu miktar %5,60 seviyelerine gerilemiştir. Gerilim giderme ısıtıl işlemi yapılmış numunelerinin % uzama miktarı incelendiğinde bu değer %16,05 olduğu tespit edilmiştir.

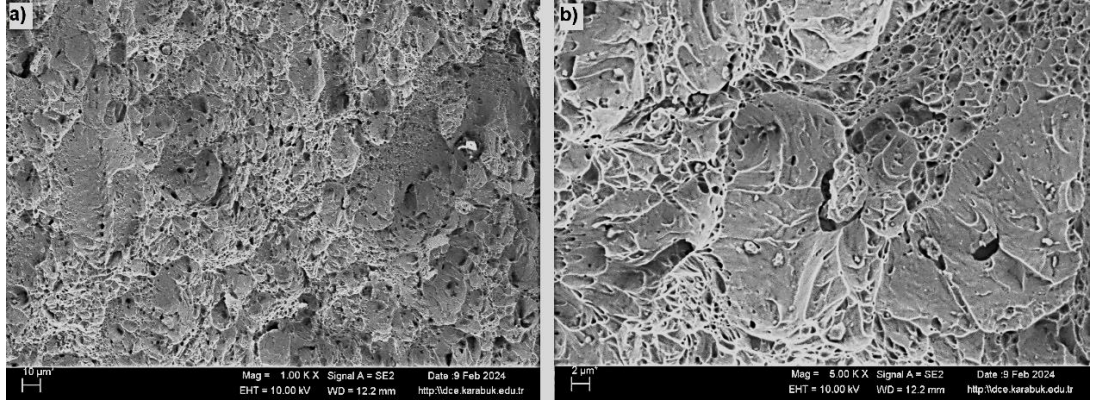
Zırh çelikleri üretilirken menevişleme işlemine tabii olduğundan, kaynak sonrası yapılan birleştirmede iç yapı değişikliği oluşturduğundan çekme sonuçları tipik değerlerden daha düşük çıkmıştır. Kaynak sonrası birleştirmelerde meydana gelen artık gerilmelerin kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanması ile giderilmesi ve sünekliğin artarak çekme testi sonrası kaynaklı birleştirmelerin % uzama değerlerinin iyileştiği belirlenmiştir. Alipooramirabad vd. [27], benzer şekilde çalışmalarında Bisalloy 80 zırh çelikleri için kaynaklı birleştirmelerine kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulamışlar ve ısıtıl işlem sonrası kaynaktaki kalıntı gerilmelerin önemli ölçüde azaldığını ve akma dayanımını %23 oranında düşürdüğünü belirtmişlerdir.

#### **5.2.5. Çekme Testi Sonucunda Oluşan Kopma Bölgelerinin Kırık Yüzeylerinin İncelenmesi**

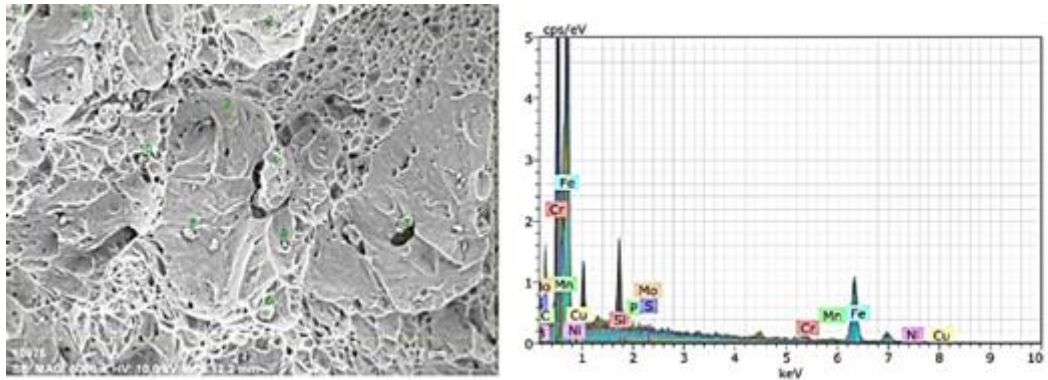
Çekme testi sonucunda elde edilen kırık yüzeylere ait SEM görüntüleri incelenmiş ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği, Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerinin ısıtıl işlemli ve ısıtıl işlemsiz numunelere ait sonuçlar sırasıyla Şekil 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 ve Şekil 5.16'da gösterilmiştir.

### 5.2.5.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Çekme Sonrası Kırık Yüzey SEM İncelemeleri

Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çekme testi numunesine ait kırık yüzeyi SEM ile detaylı bir şekilde incelenmiş ve gözlemlenen yapıların element analizleri SEM cihazına entegre IXRF model EDS ile yapılmıştır. Kırık yüzey görüntüsü Şekil 5.11’de numunenin kırılma yüzeyinden hasar başlangıcına ön ayak teşkil edecek unsurları belirlemek için yapılan EDS analizinde elde edilen bulgular Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çekme testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü, a) 1000x b) 5000x.



Mass percent (%)											
Spectrum	B	C	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
1	0.00	4.51	0.26	0.01	0.00	0.47	0.00	93.42	0.00	0.74	0.57
2	0.00	14.21	0.90	0.00	0.00	1.29	0.00	78.64	0.74	3.91	0.32
3	1.43	0.40	0.05	0.02	0.00	2.65	2.72	92.20	0.00	0.43	0.11
4	0.00	3.85	0.37	0.14	0.00	1.62	0.95	91.35	0.00	1.16	0.55
5	0.00	7.23	2.29	0.00	0.28	3.42	1.34	82.18	0.51	2.76	0.00
6	0.00	12.80	10.58	0.17	0.16	0.99	0.00	61.49	4.93	8.78	0.10
7	0.00	0.31	0.06	0.00	0.05	2.51	1.45	95.59	0.00	0.00	0.04
8	0.00	8.20	0.83	0.00	0.00	1.25	0.61	87.46	0.78	0.85	0.02
9	0.00	9.75	2.03	0.19	0.19	0.72	1.23	82.39	0.52	2.90	0.09
10	0.00	2.31	0.08	0.09	0.00	4.06	1.33	91.77	0.00	0.00	0.35
Mean value:	0.14	6.36	1.74	0.06	0.07	1.90	0.96	85.65	0.75	2.15	0.21
Sigma:	0.45	4.91	3.21	0.08	0.10	1.20	0.85	10.17	1.51	2.68	0.22
Sigma mean:	0.14	1.55	1.01	0.02	0.03	0.38	0.27	3.22	0.48	0.85	0.07

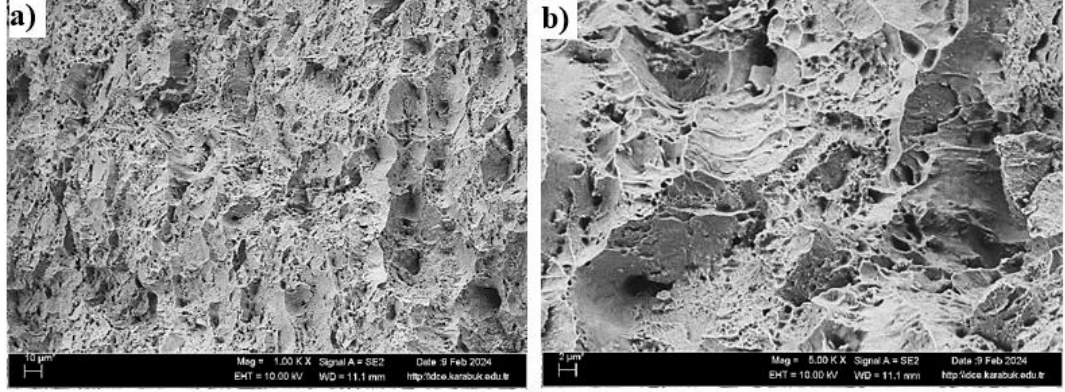
Şekil 5.12. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çekme test numunesinin kırık yüzeyinden alınan EDS sonucu.

Şekil 5.11’de gösterilen Bisalloy HHA 500 ana malzemenin çekme sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde numune yapısında bulunan sert fazlarla ilişkili olarak kırılmanın lokal olarak klivaj biçimde olduğu görülmektedir. Numune yüzeylerinden görünen parlak yüzeylerin, düzlemsel ve klivaj görüntülerin numunenin gevrek bir biçimde kırıldığına işaret etmekle birlikte, belirli bölgelerde az da olsa peteğimsi, hafif çukurcuklu (dimple) yapıların görüldüğü söylenebilir. Dolayısı ile malzemenin ağırlıklı olarak gevrek olmak üzere, yarı gevrek- yarı sünek bir formda kırılma gösterdiği söylenebilir. Şekil 5.12’deki EDS analiz sonuçları incelendiğinde numune yapısında ana malzeme kimyasal kompozisyonunda belirtilen elementler olduğu ve bu element yüzdelерinin belirgin bir değişim sergilemediği görülmektedir. Kırık yüzeyler içerisinde ince yapıda karbür çökeltileri gözlemlenmektedir. Benzer şekilde Fei vd. [109], HHA zırh çeliklerinde benzer şekilde çok ince karbür çökeltilerinin varlığını rapor etmişlerdir. Farklı çalışmalarda, benzer şekilde Q&T şeklinde üretilmiş, su verilmiş 0,17C-1,5Mn-B çeliğinde altıgen kafesli iğne şeklinde  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>4C karbürlerin varlığı tespit edilmiş ve bu karbürlerin benzeri TEM mikroskobu ile tespit edilmiştir [110,111]. Farklı bir çalışmada ise yapıda esas olarak yeterli miktarda Mo (%2,0) bulunması nedeniyle Cr ile birlikte, ince iğne şeklindeki M<sub>2</sub>C tipi karbür çökeltilerini oluşturabileceği belirtilmiştir [112].

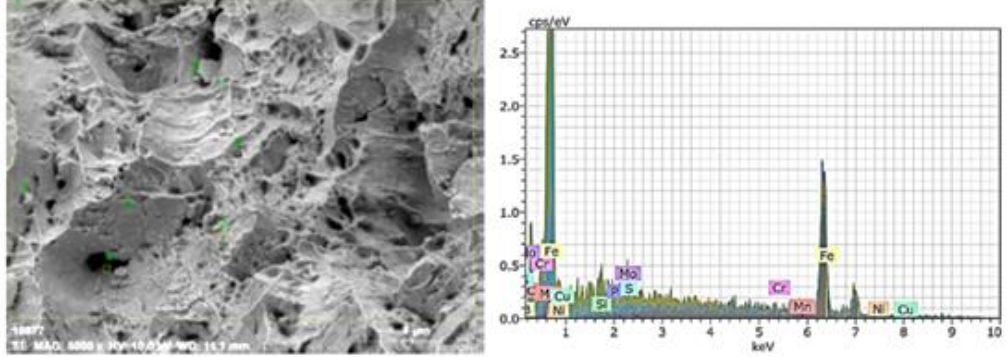
#### 5.2.5.2. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmesi Çekme Sonrası Kırık Yüzey SEM İncelemeleri

DeneySEL metot bölümünde belirtildiği gibi çalışmada kullanılan otomatize edilmiş kaynak makinesi ile kaynatılmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştime

numunesi çekme testi numunesine ait kırık yüzeyi SEM ile detaylı bir şekilde incelenmiş ve gözlemlenen çökeltilerin element analizleri SEM cihazına entegre IXRF model EDS ile yapılmıştır. Şekil 5.13'te numunenin kırılma yüzeyinden yapılan EDS analizinde elde edilen bulgular Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunesi çekme testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü, a) 1000x b) 5000x.



Mass percent (%)

Spectrum	B	C	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
1	1.18	4.90	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	92.99	0.80	0.00	0.34
2	0.00	0.76	0.42	0.00	0.29	0.00	2.21	90.31	0.00	0.00	0.00
3	1.64	0.34	0.12	0.02	0.00	1.47	1.24	95.16	0.00	0.00	0.00
4	0.00	1.77	0.14	0.00	0.92	0.00	3.82	92.78	0.00	0.00	0.56
5	0.20	0.33	0.21	0.00	0.08	2.33	1.95	94.90	1.28	0.00	0.00
6	0.17	0.24	0.11	0.03	0.04	2.52	1.25	95.65	0.00	0.00	0.00
Mean value:	0.53	1.39	0.27	0.01	0.22	1.05	1.75	93.63	1.24	0.00	0.15
Sigma:	0.70	1.79	0.20	0.01	0.36	1.21	1.28	2.01	0.00	0.00	0.24
Sigma mean:	0.29	1.14	0.08	0.01	0.15	0.49	0.52	0.82	0.00	0.00	0.10

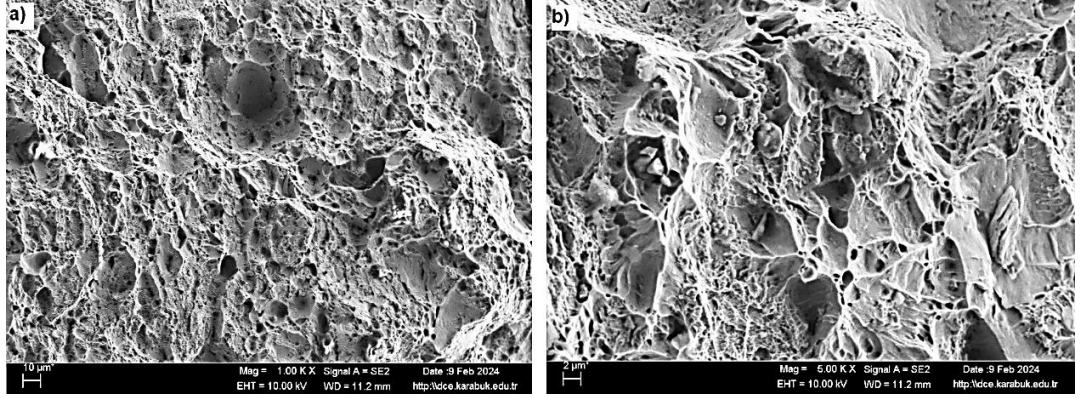
Şekil 5.14. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme çekme test numunesinin kırık yüzeyinden alınan EDS sonucu.

Şekil 5.13'te gösterilen Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme çekme sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde görünen çukurcuklu yapıların oluşumu numunenin sünek bir biçimde kırıldığını bunun yanısıra düzlemsel ve klivaj yüzeylerin oluşturduğu yarı sünek-yarı gevrek gevrek bir biçimde kırılım olduğunu göstermektedir. Numunelerde kopmaların kaynak metalinden meydana geldiği göz önünde bulundurulduğunda kaynak işlemi ile meydana gelen mikroyapı değişimi, tane boyutundaki değişim ile birlikte ana malzemeye göre azalan sertlik ile birlikte kırılmanın yarı sünek-yarı gevrek bir formda meydana geldiği görülmektedir. Şekil 5.14 incelendiğinde kırık yüzeylerde herhangi bir çökelti oluşumu vs. rastlanılmamıştır. Fei vd. [109], HHA zırh çeliklerinin GMAW kaynağı ile birleştirilmesi sonrası kaynak metalini detaylı bir şekilde SEM ve TEM analizleri ile incelemiş ve benzer şekilde herhangi bir çökelti oluşumunun tespit edilmediğini rapor etmişlerdir. Bisalloy HHA 500 ana malzeme kırık yüzeyinden alınan kimyasal kompozisyonla mukayese edildiğinde genel olarak, kullanılan ilave tel içeriğine bağlı olarak da Ni ve Mn miktarında az miktar artış tespit edilmiştir.

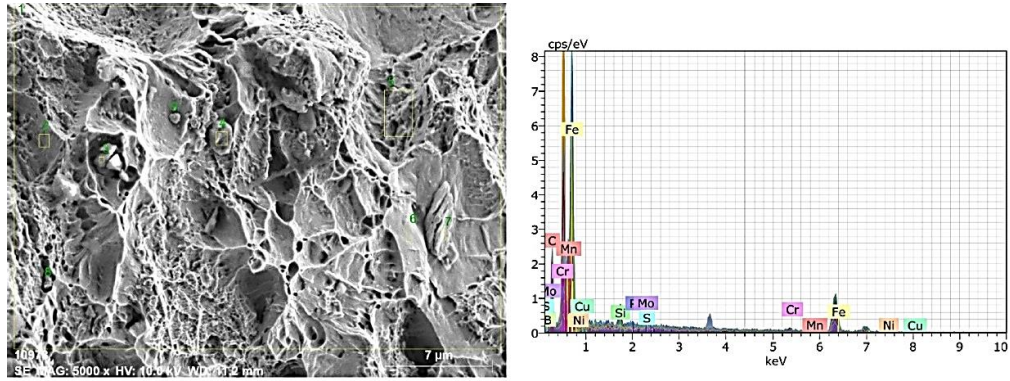
### **5.2.5.3. Kaynak Sonrası Isıl İşlem Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh Çelik Birleştirmesi Çekme Sonrası Kırık Yüzey SEM İncelemeleri**

Deneysel metot bölümünde belirtildiği gibi çalışmada kullanılan otomatize edilmiş kaynak makinesi ile kaynatılmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine kaynak sonrası gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmış çekme testi numunesine ait kırık yüzeyi SEM ile detaylı bir şekilde incelenmiş ve gözlemlenen çökeltilerin element analizleri SEM cihazına entegre IXRF model EDS ile yapılmıştır. Kırık yüzey görüntüsü Şekil 5.15'te numunenin kırılma yüzeyinden hasar başlangıcına ön ayak teşkil edilecek unsurları belirlemek için yapılan EDS analizinde elde edilen bulgular Şekil 5.16'da gösterilmiştir.





Şekil 5.15. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesi çekme testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü, a) 1000x b) 5000x.



Mass percent (%)											
Spectrum	B	C	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
1	0.00	18.01	0.40	0.00	0.00	0.54	0.00	78.92	0.80	0.77	0.55
2	0.00	11.01	0.30	0.32	0.22	1.63	0.18	86.33	0.00	0.00	0.00
3	0.00	42.14	0.49	0.00	0.04	0.24	1.86	53.98	0.00	0.57	0.67
4	0.00	29.77	0.48	0.00	0.35	0.00	0.00	66.33	0.00	3.07	0.00
5	0.00	19.11	0.56	0.24	0.06	2.74	0.40	73.62	1.28	1.47	0.52
6	5.47	15.40	0.29	0.24	0.06	0.63	0.40	77.13	0.00	0.37	0.00
7	1.85	7.60	0.28	0.00	0.04	0.00	0.74	89.49	0.00	0.00	0.00
8	5.98	20.55	3.12	0.00	0.00	3.59	1.14	65.58	0.00	0.00	0.03
9	0.00	20.20	0.28	0.14	0.00	1.30	0.03	77.16	0.00	0.00	0.89
Mean value:	1.48	20.42	0.69	0.10	0.09	1.19	0.53	74.28	0.23	0.69	0.30
Sigma:	2.48	10.28	0.92	0.13	0.12	1.27	0.63	10.99	0.47	1.02	0.36
Sigma mean:	0.83	3.43	0.31	0.04	0.04	0.42	0.21	3.66	0.16	0.34	0.12

Şekil 5.16. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çekme test numunesinin kırık yüzeyinden alınan EDS sonucu.

Şekil 5.15'te gösterilen kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çelik birleştirme çekme sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde görünen çukurcuklar numunenin ağırlıklı sünek olmak kaydıyla bölgesel düzlemsel ayrılmalar olmasından dolayı yarı sünek-yarı gevrek kırılma moduyla hasara uğradığını

göstermektedir. Ayrıca, Şekil 5.11b’de gösterilen Bisalloy HHA 500 ana malzemede oluşan çukurcuk genişlikleri mukayese edildiğinde kaynak sonrası ısıtılma işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 malzemede oluşan çukucukların daha ince morfolojide olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.16’da gösterilen EDS analiz sonuçlarına bakıldığında ısıtılma işlemine bağlı olarak bazı noktasal analiz bölgelerinde C miktarında belirgin bir artış olduğu tespit edilmiştir. Isıtılma işlemine bağlı olarak demir karbür oluşumu söz konusu olduğu söylenebilir.

### 5.3. ÇENTİK DARBE DENEYİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

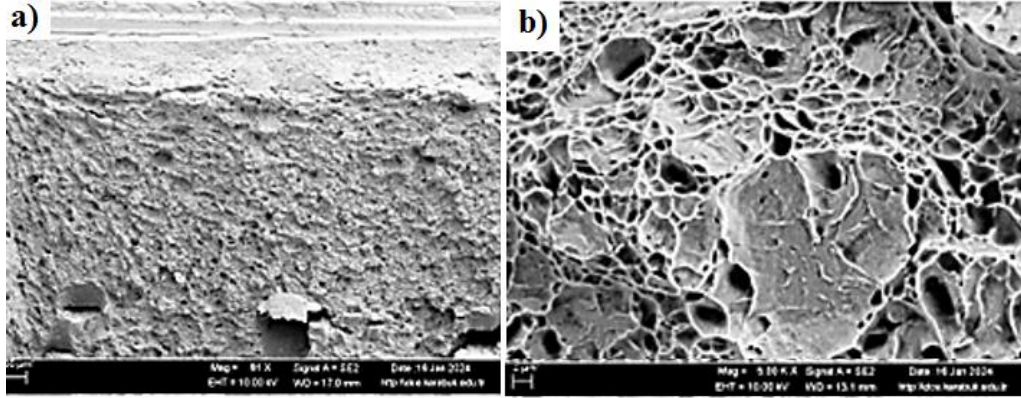
#### 5.3.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Çentik Darbe Testi Sonucu ve Değerlendirmesi

Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesinden çıkarılan çentik darbe testi sonucunda oda sıcaklığında (+20 °C) gerçekleştirilen testin darbe dayanımları Çizelge 5.5’te verilmiştir.

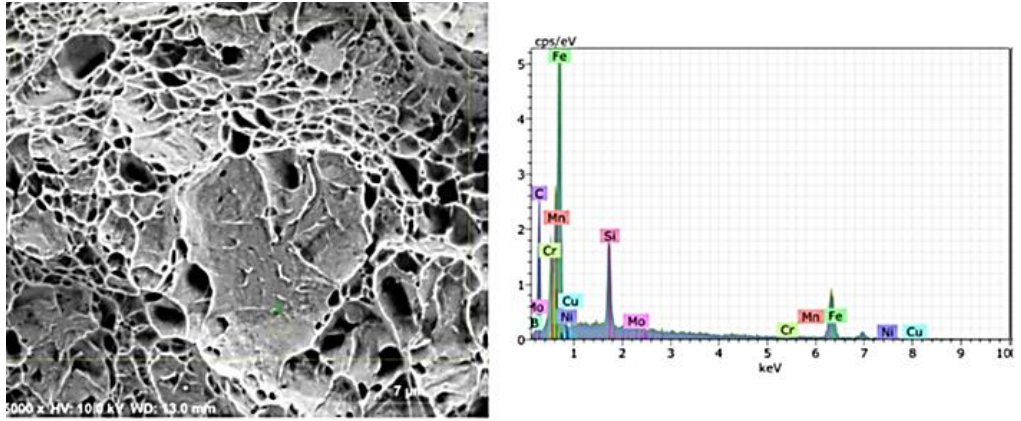
Çizelge 5.5. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait çentik darbe testi verileri.

Numune Tanımı	Charpy V-Çentikli Darbe Dayanımı (J) Oda Sıcaklığı (+20)
Numune 1	38,00
Numune 2	37,70
Ortalama	37,85

Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çentik darbe testi numunesine ait kırık yüzeyi SEM ile detaylı bir şekilde incelenmiş ve gözlemlenen çökeltilerin element analizleri SEM cihazına entegre IXRF model EDS ile yapılmıştır. Kırık yüzey görüntüsü Şekil 5.17’de numunenin kırılma yüzeyinden hasar başlangıcına ön ayak teşkil edecek unsurları belirlemek için yapılan EDS analizinde elde edilen bulgular Şekil 5.18’de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çentik darbe testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü a) 200x, b) 5000x.



Mass percent (%) Spectrum	B	C	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
1	3.16	23.72	6.20	0.15	0.00	65.72	0.00	0.63	0.43
2	5.90	12.11	3.93	0.12	0.00	76.30	0.00	1.32	0.31
3	0.00	30.01	9.07	0.55	0.00	57.72	0.61	1.78	0.26
Mean value:	3.02	21.95	6.40	0.27	0.00	66.58	0.20	1.24	0.34
Sigma:	2.95	9.08	2.58	0.24	0.00	9.32	0.35	0.58	0.09
Sigma mean:	1.71	5.24	1.49	0.14	0.00	5.38	0.20	0.33	0.05

Şekil 5.18. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çentik darbe testi numunesinin kırık yüzeyinden alınan EDS sonucu.

Bisalloy HHA 500 ana malzeme oda sıcaklığında çentik darbe dayanımı ortalama 37,85 J tespit edilmiştir. Şekil 5.17'den görüldüğü gibi Bisalloy HHA 500 malzeme, ağırlıklı olarak gevrek olacak şekilde, yarı sünek-yarı gevrek kırılma morfolojisi sergilemektedir. Petegimsi çukurcuklu yapılar numunenin yer yer sünek kırılma davranışı gösterdiğini aynı zamanda klivaj düzlemlerin de gevrek yapıda kırılma

gösterdiği belirlenmiştir. Çentik darbe sonucu elde edilen kırık yüzeyden alınan EDS analiz sonuçları değerlendirildiğinde ana malzeme kimyasal kompozisyonunda herhangi bir farklılık görülmediği analiz edilmiştir (Şekil 5.18).

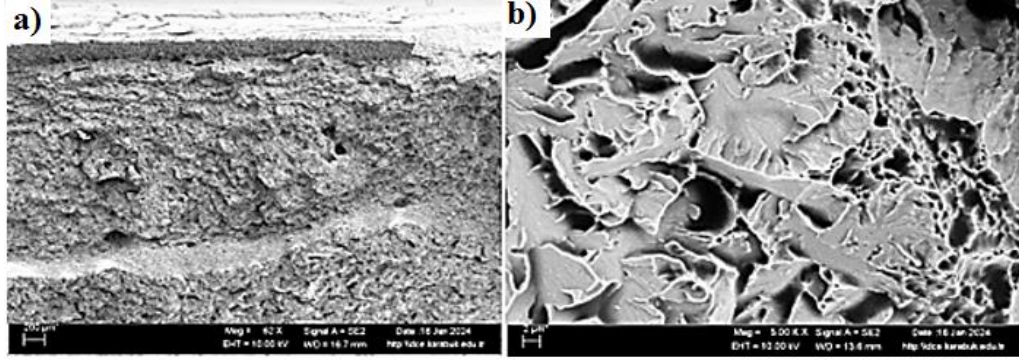
### 5.3.2. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmelerinin Çentik Darbe Testi Sonucu ve Değerlendirmesi

Deneysel metot bölümünde belirtildiği gibi çalışmada kullanılan otomatize edilmiş kaynak makinesi ile kaynaklanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunelerinden çıkarılan test numunelerinin çentik darbe testi sonucunda oda sıcaklığında (+20 °C) gerçekleştirilen testin darbe dayanımları Çizelge 5.6'da verilmiştir.

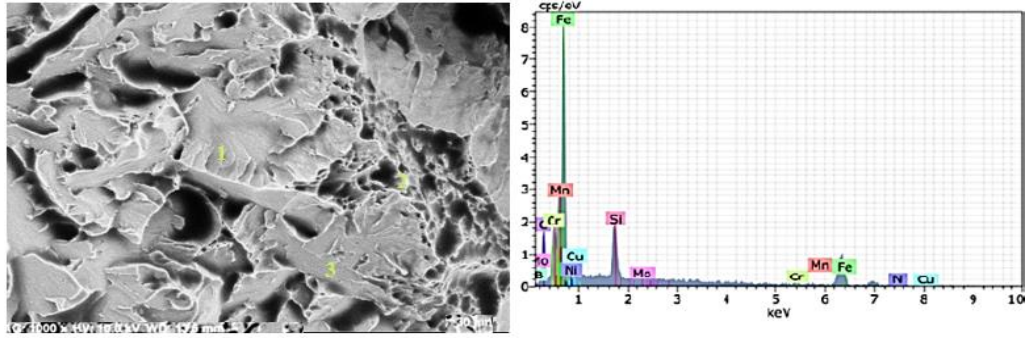
Çizelge 5.6. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerine ait çentik darbe testi verileri.

Numune Tanımı	Charpy V-Çentikli Darbe Dayanımı (J) Oda Sıcaklığı (+20)
Numune 3	105,00
Numune 4	102,40
Ortalama	103,70

Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunesinin çentik darbe testi numunesine ait kırık yüzeyi SEM ile detaylı bir şekilde incelenmiş ve gözlemlenen çökeltelerin element analizleri SEM cihazına entegre IXRF model EDS ile yapılmıştır. Kırık yüzey görüntüsü Şekil 5.19'da numunenin kırılma yüzeyinden hasar başlangıcına ön ayak teşkil edilecek unsurları belirlemek için yapılan EDS analizinde elde edilen bulgular Şekil 5.20'de gösterilmiştir.



Şekil 5.19. Bisalloy HHA 500 kaynaklı birleştirme çentik darbe testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü a) 200x, b)5000x



Mass percent (%)									
Spectrum	B	C	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
1	5.75	8.23	2.46	0.11	0.00	83.47	0.00	0.00	0.00
2	0.00	34.13	15.20	0.00	0.00	49.79	0.46	0.43	0.00
3	0.00	17.17	7.94	1.57	0.00	71.37	0.41	1.53	0.00
Mean value:	1.92	19.84	8.53	0.56	0.00	68.21	0.29	0.65	0.00
Sigma:	3.32	13.16	6.39	0.88	0.00	17.06	0.25	0.79	0.00
Sigma mean:	1.92	7.60	3.69	0.51	0.00	9.85	0.15	0.46	0.00

Şekil 5.20. Bisalloy HHA 500 kaynaklı birleştirme çentik darbe testi numunesinin kırık yüzeyinden alınan EDS sonucu.

Bisalloy HHA 500 birleştirmesi kaynak metali darbe çentik dayanımı oda sıcaklığında ortalama 103,70 J olarak belirlenmiştir. Şekil 5.19'da Bisalloy HHA 500 kaynaklı birleştirme çentik darbe sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde yüzeydeki çukurcuklu yapıların sünek bir morfoloji sergilemesi yanı sıra kaynak bölgesinden kırılma gerçekleştiğinden kaynak katılaşmasına bağlı olarak kaynak merkezine doğru katılaştıkça dendritik yapıların düzlemler şeklinde oluştuğu yarı sünek-yarı gevrek şeklinde kırıldığı görülmektedir. Şekil 5.20 kırık yüzey EDS analizi sonuçlarına göre de kaynak metali kırık yüzeyinde çökelti oluşumuna rastlanılmamıştır.

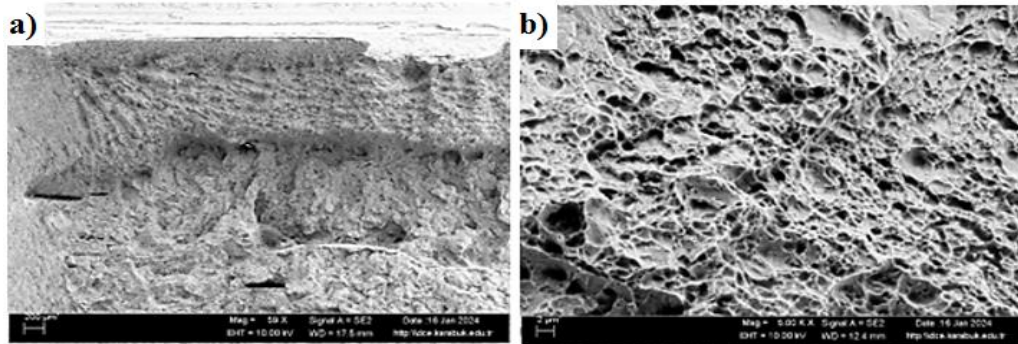
### 5.3.3. Kaynak Sonrası Isıl İşlemi Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Birleştirmelerinin Çentik Darbe Testi Sonucu ve Değerlendirmesi

Deneysel metot bölümünde belirtildiği gibi çalışmada kullanılan otomatize edilmiş kaynak makinesi ile kaynatılmış HHA 500 zırh çeliğine kaynak sonrası gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmış ve çıkarılan kaynaklı deney numunelerinin çentik darbe testi sonucunda oda sıcaklığında gerçekleştirilen testlerin darbe dayanımları Çizelge 5.7’de verilmiştir.

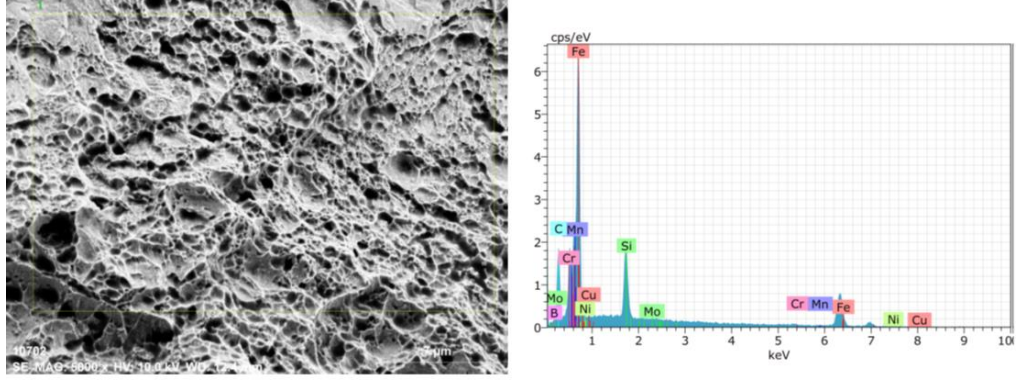
Çizelge 5.7. Kaynak sonrası ısıl işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait çentik darbe testi verileri.

Numune Tanımı	Charpy V-Çentikli Darbe Dayanımı (J) Oda Sıcaklığı (+20)
Numune 5	120,00
Numune 6	121,20
Ortalama	120,60

Kaynak sonrası ısıl işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesinin çentik darbe testi numunesine ait kırık yüzeyi SEM ile detaylı bir şekilde incelenmiş ve gözlemlenen çökeltilerin element analizleri SEM cihazına entegre IXRF model EDS ile yapılmıştır. Kırık yüzey görüntüsü Şekil 5.21’de ve kırık yüzeyden alınan EDS analizinde elde edilen bulgular Şekil 5.22’de gösterilmiştir.



Şekil 5.21. Kaynak sonrası ısıl işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çentik darbe testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü, a) 200x, b)5000x.



Mass percent (%)

Spectrum	B	C	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
1	1.09	10.16	6.80	0.39	0.00	80.29	0.13	0.06	1.08
2	0.00	26.29	13.69	0.00	0.90	56.02	1.00	0.98	1.13
3	0.00	3.03	7.63	2.44	0.97	85.64	0.00	0.00	0.29
4	0.26	9.47	2.50	2.41	2.59	81.86	0.70	0.21	0.00
5	0.00	36.78	32.14	0.54	0.46	29.99	0.00	0.00	0.09
Mean value:	0.27	17.15	12.55	1.16	0.98	66.76	0.37	0.25	0.52
Sigma:	0.47	13.93	11.66	1.17	0.98	23.64	0.46	0.42	0.55
Sigma mean:	0.21	6.23	5.21	0.53	0.44	10.57	0.20	0.19	0.24

Şekil 5.22. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği çentik darbe testi numunesinin kırık yüzeyinden alınan EDS sonucu.

Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 birleştirmesi çentik darbe testi sonrası kaynak metali darbe çentik dayanımı oda sıcaklığında ortalama 120,60 J olarak belirlenmiştir. Şekil 5.21’de Bisalloy HHA 500 kaynaklı birleştirme çentik darbe sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde kaynak sonrası ısıl işlem ile kaynak metalinde gerilimlerin giderilmesine bağlı olarak yapıda çukurcuklu (dimple) oluşumlar meydana gelerek kırılmanın ağırlıklı olarak sünek bir formda meydana geldiğini aynı zamanda yer yer görünen klivaj düzlemler ile yarı sünek-yarı gevrek bir şekilde kırıldığı görülmektedir. Şekil 5.22 kırık yüzey EDS analizi sonuçlarına göre de kaynak metali kırık yüzeyinde Fe, Cr, Mn, Ni, Mo, C ve Si ve B elementleri tespit edilmiştir.

#### 5.3.4. Çentik Darbe Testi Sonuçlarının Genel Değerlendirilmesi

Oda sıcaklığında yapılan çentik darbe testlerinde Bisalloy HHA 500 zırh çeliği ana malzemesi ortalama çentik darbe sonucu 37,85 J bulunmuştur. Kaynaklı birleştirmenin ortalama çentik darbe sonucu 103,70 J, kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış kaynaklı

numunenin ortalama çentik darbe sonucu 120,60 J olduğu tespit edilmiştir. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanması birleştirmenin çentik darbe enerjisinde %16 artış olduğu tespit edilmiştir.

Kırılma morfolojileri incelendiğinde Şekil 5.20’de kaynaklı Bisalloy HHA 500 birleştirmesi kırılma morfolojisinin yarı gevrek-yarı sünek formda ve kırılma yüzeylerinde oluşan çukurcukların seyrek oluştukları görülürken, Şekil 5.22’den görüldüğü gibi kaynak sonrası ısıl işlem ile bu çukucuklu yapıların daha fazla derin ve küçük çaplarda oluştuğu görülmektedir. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulaması malzemenin daha fazla çukurcuklu yapıda (dimple) oluşmasına neden olarak daha yüksek tokluk değerlerini doğrulamaktadır.

#### **5.4. EĞME DENEYİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Kaynaklı birleştirmelerde, kaynak bölgesi ve ITAB servis şartlarında maruz kalınan gerilmeler nedeniyle eğmeye zorlanabilirler. Ana malzeme ve kaynaklı deney numunelerinin eğme dayanımının belirlenebilmesi için boyutları ve uygulama biçimi deneysel metot bölümünde anlatılan deney numunelerine eğme testi uygulanmıştır. Numunelerin eğme dayanım sonuçları alt bölümlerde verilmiştir.

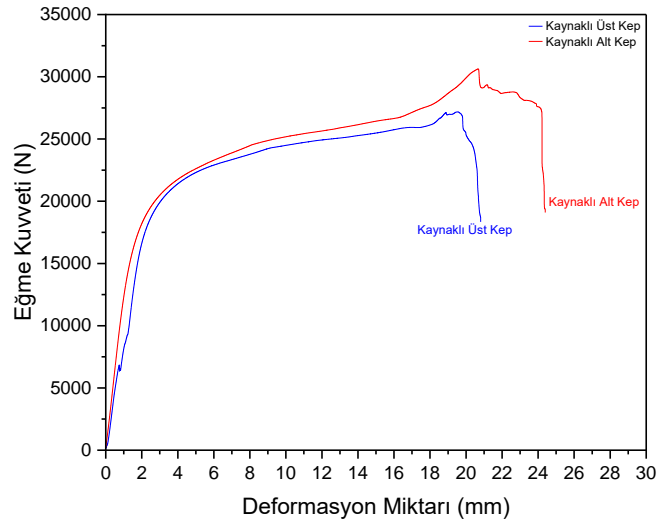
##### **5.4.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmelerinin Eğme Testi Sonucu**

Deneysel metot bölümünde belirtildiği gibi çalışmada kullanılan otomatize edilmiş kaynak makinesi ile birleştirilmiş Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinden çıkarılan kaynaklı deney numunelerinin eğme testi sonucunda eğme dayanımı Çizelge 5.8’te verilmiştir. Eğme kuvveti-deformasyon miktarı grafiği Şekil 5.23’te ve deney sonucunda eğilme sonucunda çatlamanın oluştuğu bölge Şekil 5.24’te gösterilmiştir. Eğme testinde bir adet numune için üst kepin olduğu bölgeden eğme uygulanmış, diğer numuneye ise alt kepin olduğu bölgeden eğme uygulanmıştır.



Çizelge 5.8. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunelerine ait eğme testi verileri.

Numune Tanımı	Aralık Mesafesi (mm)	Max. Bükülme Açısı (°)	$F_{max}$ (N)	dL at Fmax (mm)	a <sub>0</sub> (Kalınlık) (mm)	b <sub>0</sub> (Genişlik) (mm)	S <sub>0</sub> (Alan) (mm)
Üst Kep	72	90	27180,39	19,54126	9,29	19,50	181,1550
Alt Kep	72	90	30631,22	20,66495	9,33	19,55	182,4015
Ortalama	-	-	28905,50	20,103105	-	-	-



Şekil 5.23. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunelerine ait eğme testi sonucu grafiği.



Şekil 5.24. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunelerine ait eğme testi sonucu çatlama bölgesi.

Şekil 5.23 ve Şekil 5.24 eğme deney sonuçlarına göre Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmeleri eğme deneyleri sonucunda ITAB’da çatlak oluşumu meydana geldiği görülmüştür. Numuneler yaklaşık 90° açı ile eğilmiştir.

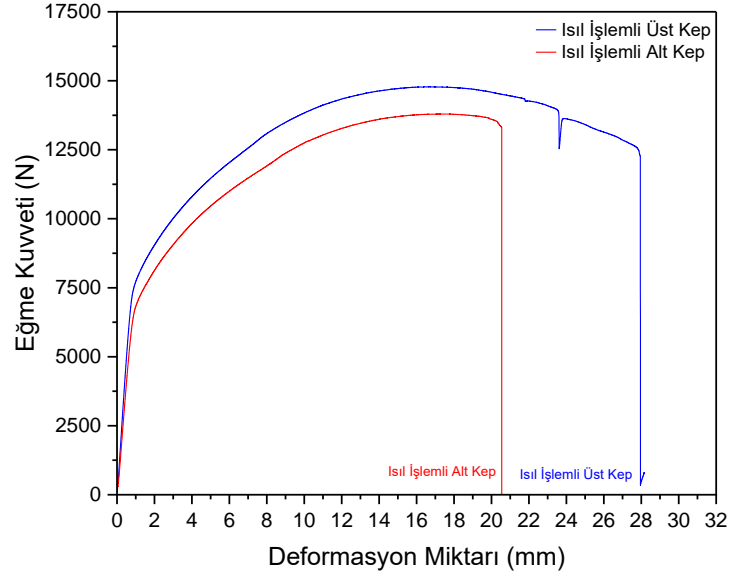
Çizelge 5.8’de görüldüğü üzere; Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numuneleri ortalama eğme kuvveti 28905,50 N bulunmuştur. Numune 90°’de eğildikten sonra çatlamıştır.

#### 5.4.2. Kaynak Sonrası Isıl İşlem Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliğini Birleştirmelerinin Eğme Testi Sonucu

Deneysel metot bölümünde belirtildiği gibi çalışmada kullanılan otomatize edilmiş kaynak makinesi ile birleştirilmiş HHA 500 zırh çeliğine kaynak sonrası gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmış ve çıkarılan kaynaklı deney numunelerinin eğme testi sonucunda eğme dayanımı Çizelge 5.9’da verilmiştir. Eğme kuvveti-deformasyon miktarı grafiği Şekil 5.25’te ve deney sonucunda eğilme sonucunda çatlamanın olduğu bölge Şekil 5.26’da gösterilmiştir. Eğme testi bir adet numune için üst kepin olduğu bölgeden eğme uygulanmış, diğer numuneye ise alt kepin olduğu bölgeden eğme uygulanmıştır.

Çizelge 5.9. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış HHA 500 zırh çeliği birleştirmelerine ait eğme testi verileri.

Numune Tanımı	Aralık Mesafesi (mm)	Max. Bükülme Açısı (°)	$F_{max}$ (N)	dL at Fmax (mm)	$a_0$ (Kalınlık) (mm)	$b_0$ (Genişlik) (mm)	$S_0$ (Alan) (mm)
Üst Kep	72	90	14777,97	16,78127	9,25	19,33	178,8025
Alt Kep	72	90	13794,43	17,46560	9,20	19,33	177,8360
Ortalama	-	-	14285,50	17,123435	-	-	-



Şekil 5.25. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmelerine ait eğme testi sonucu grafiği.



Şekil 5.26. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliğine ait eğme testi sonucu çatlama bölgesi.

Şekil 5.25 ve Şekil 5.26 eğme deney sonuçlarına göre kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmelerin eğme deneyleri sonucunda ITAB'da çatlak oluşumu meydana geldiği görülmüştür. Numuneler yaklaşık 90° açı ile eğilmiştir.

#### 5.4.3. Eğme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

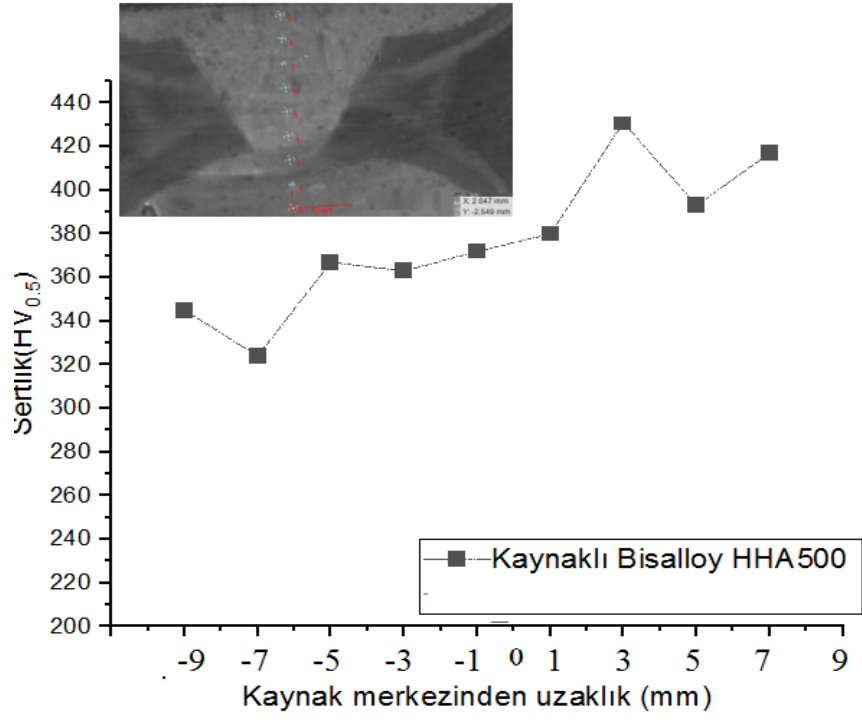
Çizelge 5.9’da görüldüğü üzere; kaynak sonrası ısıtma işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği ortalama eğme kuvveti 14285,50 N bulunmuştur. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmeleri ile karşılaştırıldığında yarı yarıya eğme kuvveti düştüğü tespit edilmiştir. Mekanik özellik olarak eğme kuvvetinin düştüğü fakat çekme testi ile bağlantı kurulduğunda % uzama miktarı artışına göre ısıtma işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesinin deformasyon miktarı oranının daha fazla olduğu görülmüş ve tam bir 90° de malzeme eğildikten sonra çatlamıştır. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmeleri ortalama eğme kuvveti 28905,50 N uygulandığında ortalama deformasyon miktarı 20,10 mm iken, ısıtma işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği ortalama eğme kuvveti 14285,50 N uygulandığından ortalama deformasyon miktarı 17,12 mm bulunmuştur. Isıtma işlemi ile mekanik olarak eğme kuvveti düşmüş fakat deformasyon miktarı %70 oranında artmıştır.

Zırh çeliklerinin üretiminde menevişleme işlemi uygulandığından, uygulanan ısıtma işlemi ile kaynak termal çevrimine bağlı olarak yapısal değişiklik ve tane boyutu değişimi olduğundan eğme testi sonucunun çekme testi sonucu ile uyumlu olduğu görülmüştür. Kaynak sonrası birleştirmelerde meydana gelen artık gerilmelerin kaynak sonrası ısıtma işlemi uygulanması ile giderilmesi ve sünekliğin artarak eğme testi sonrası kaynaklı birleştirmelerin deformasyon miktarı oranının arttığı belirlenmiştir.

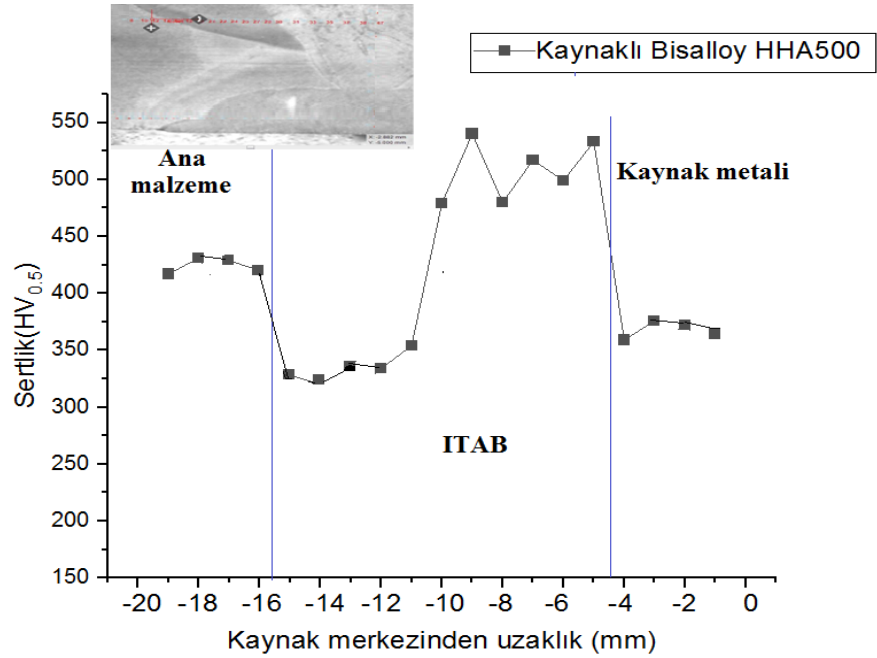
## **5.5. SERTLİK ÖLÇÜM DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

### **5.5.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmelerinin Sertlik Ölçüm Sonucu**

Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunesi için sertlik ölçümleri yapılmıştır. Şekil 5.27’de gösterildiği gibi ölçümler kaynak kalınlığı boyunca (kaynak merkez hattı) ve Şekil 5.28’de gösterildiği gibi plakanın üst yüzeyinin 3 mm altında kaynak boyunca gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.27. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunesi kaynak merkez hattı boyunca alınan sertlik ölçüm sonuçları.

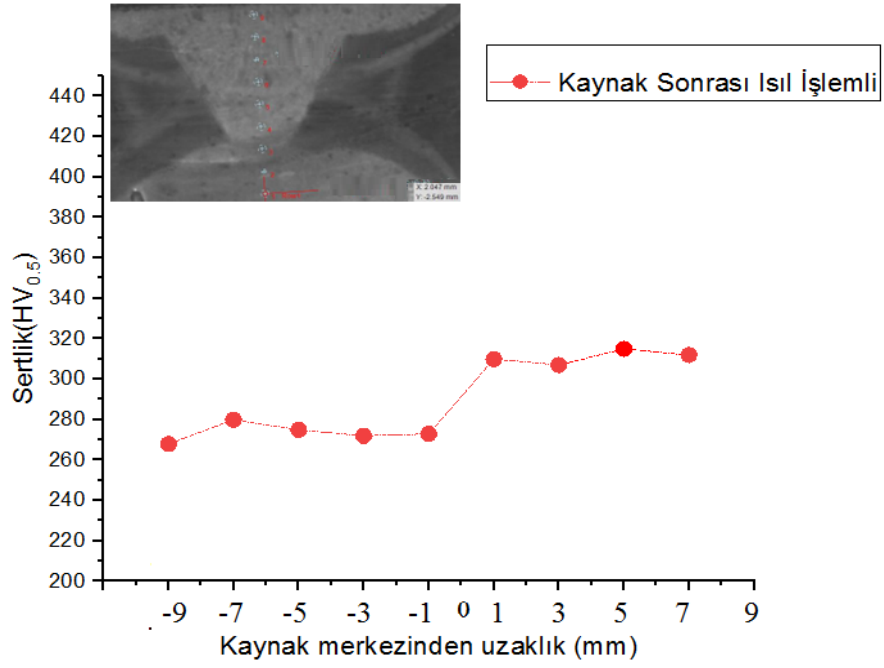


Şekil 5.28. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunesi kaynak boyunca alınan sertlik ölçüm sonuçları.

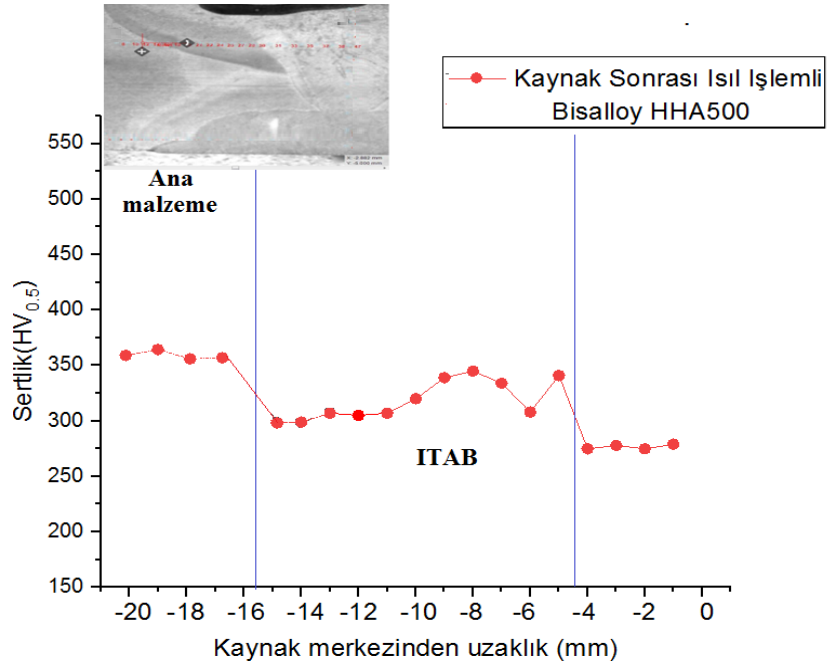
Şekil 5.27 sertlik ölçüm sonuçlarına göre kaynak metalinde aşağıdan (kök kısmından) yukarı doğru gidildikçe kaynak sertliğinde bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Bisalloy HHA 500 birleştirmelerinde kaynak metali sertliği 325 HV ile 375 HV arasında değişmektedir. Şekil 5.28'de görüldüğü gibi ana malzeme sertliği 420-450 HV arasında değişmektedir. Ana malzemeden ITAB'a doğru gidildikçe ITAB dış kısmında sertlikte bir düşüş görülmüştür, bu durum mikroyapısal değişikliklere ve tane boyutu kabalaşmasına bağlı olarak meydana geldiği düşünülmektedir. Kaynak metaline yakın bölgede meydana gelen ITAB iç kısmında ise yüksek sertlik değerleri meydana geldiği görülmektedir. ITAB'ın bu bölgesinde da kaynak metali ve ana malzemeye göre meydana gelen daha yüksek sertlik değerleri kaynak merkezine kıyasla füzyon bölgesine yakın bölgelerdeki daha yüksek sertlikteki martenzit gibi sert fazların oluşumuna atfedilebilir. Bu bölgede ITAB sertlik değerleri yaklaşık 550 HV değerine ulaşmaktadır. Kaynak metali sertliği ise ortalama 375 HV olarak belirlenmiştir.

#### **5.5.2. Kaynak Sonrası Isıl İşlem Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Birleştirmelerinin Sertlik Ölçüm Sonucu**

Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesi için sertlik ölçümleri yapılmıştır. Şekil 5.29'da gösterildiği gibi ölçümler kaynak kalınlığı boyunca (kaynak merkez hattı) ve Şekil 5.30'da gösterildiği gibi plakanın üst yüzeyinin 3 mm altında kaynak boyunca gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.29. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesi kaynak merkez hattı boyunca alınan sertlik ölçüm sonuçları.

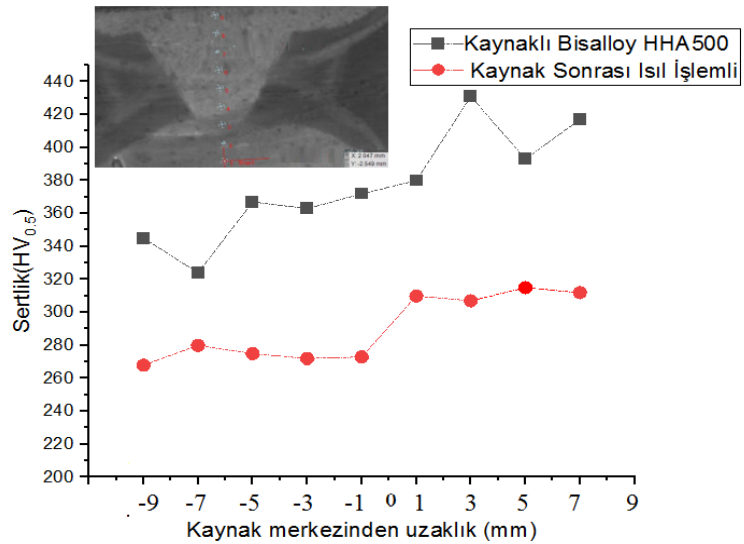


Şekil 5.30. Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesi kaynak boyunca alınan sertlik ölçüm sonuçları.

Şekil 5.29 sertlik ölçüm sonuçlarına göre kaynak metalinde aşağıdan (kök kısmından) yukarı doğru gidildikçe kaynak sertliğinde bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 birleştirmelerinde kaynak metali sertliği 260 HV ile 340 HV arasında değişmektedir. Şekil 5.30’da görüldüğü gibi ana malzeme sertliği 400-450 HV arasında değişmektedir. Ana malzemeden ITAB’a ve kaynak metalinde doğru gidildikçe sertlik değerlerinin düşüşü görülmektedir. ITAB’da en yüksek sertlik değeri 340HV olarak ölçülmüştür. ITAB ve kaynak metali sertliğindeki düşüşün nedeninin kaynak sonrası ısıl işleme bağlı olarak mikroyapısal değişimler ve kaynaktaki gerilimlerin giderilmesine bağlı olduğu düşünülmektedir.

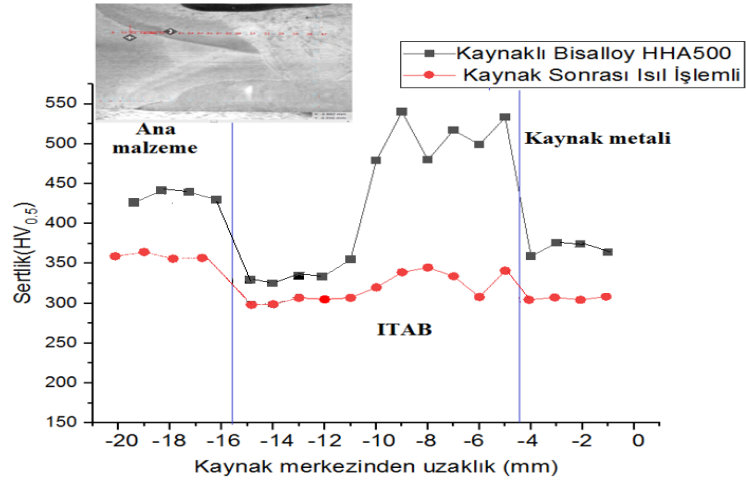
### 5.5.3. Sertlik Ölçüm Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin kaynak işlemi sonrasında ısıl işlem uygulanmış ve ısıl işlem uygulanmamış numunelerin kaynak merkez hattı boyunca ölçülen sertlik değerleri Şekil 5.31’de gösterilmiştir. Kaynak kepinin 3 mm altında ana malzeme, ITAB ve kaynak merkezini kapsayacak şekilde enine kesit doğrultusunda Şekil 5.32’de gösterilmiştir.



Şekil 5.31. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme ve kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynak merkez hattı boyunca alınan sertlik ölçüm sonuçları.





Şekil 5.32. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme ve kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynak boyunca alınan sertlik ölçüm sonuçları.

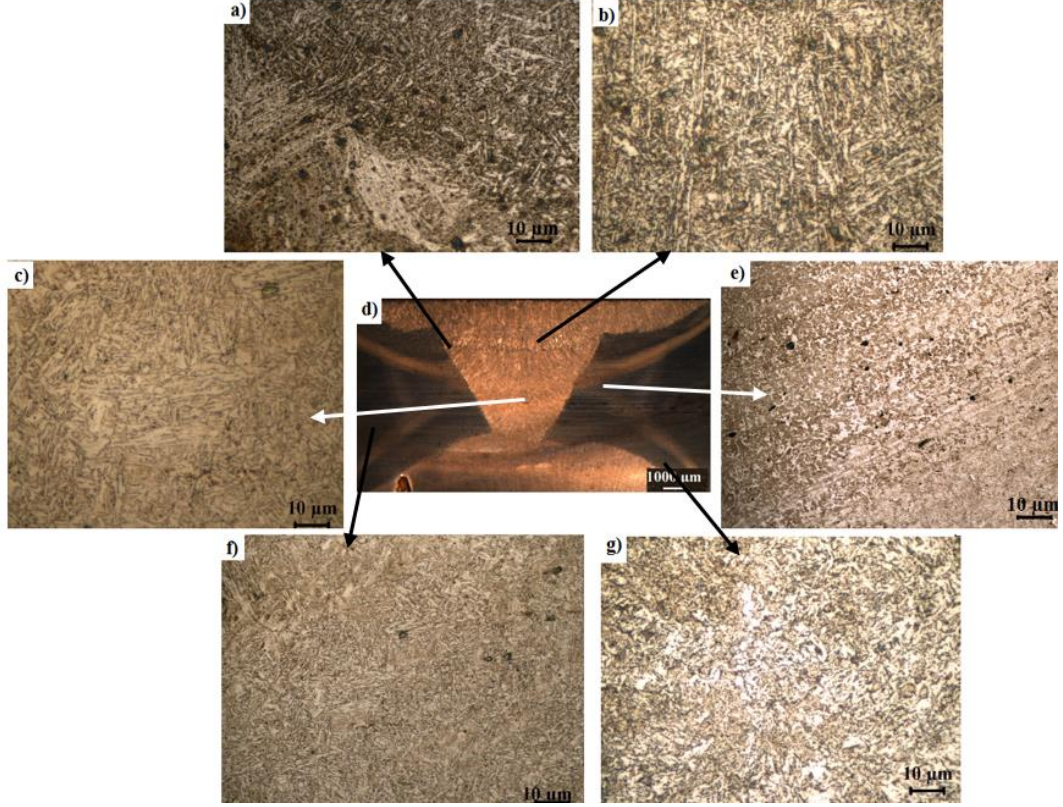
Ölçümler sonucunda özellikle Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunesinden alınan sertlik değerlerinde bazı dalgalanmalar gözlemlenmiştir. ITAB ergime bandına yakın olan bölgesinde ulaşılan sıcaklık, bekleme süresi ve soğuma şartlarına bağlı olarak daha yüksek soğuma hızının göstergesi oluşan martenzit gibi sert fazların etkisiyle yüksek sertliklerin elde edildiği düşünülmektedir.

Bisalloy HHA 500 kaynaklı birleştirmelerinin kaynak metali sertlik değeri ortalama 375 HV olarak ölçülürken, kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 birleştirmelerinin kaynak metali sertliği ortalama 310 HV olarak tespit edilmiştir. Kaynak metali ve ana metal ile karşılaştırıldığında ITAB'da daha yüksek sertlik değerleri görülürken, kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesi için daha düşük sertlik değerleri ölçülmüştür.

## 5.6. MİKROYAPI GÖRÜNTÜLERİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

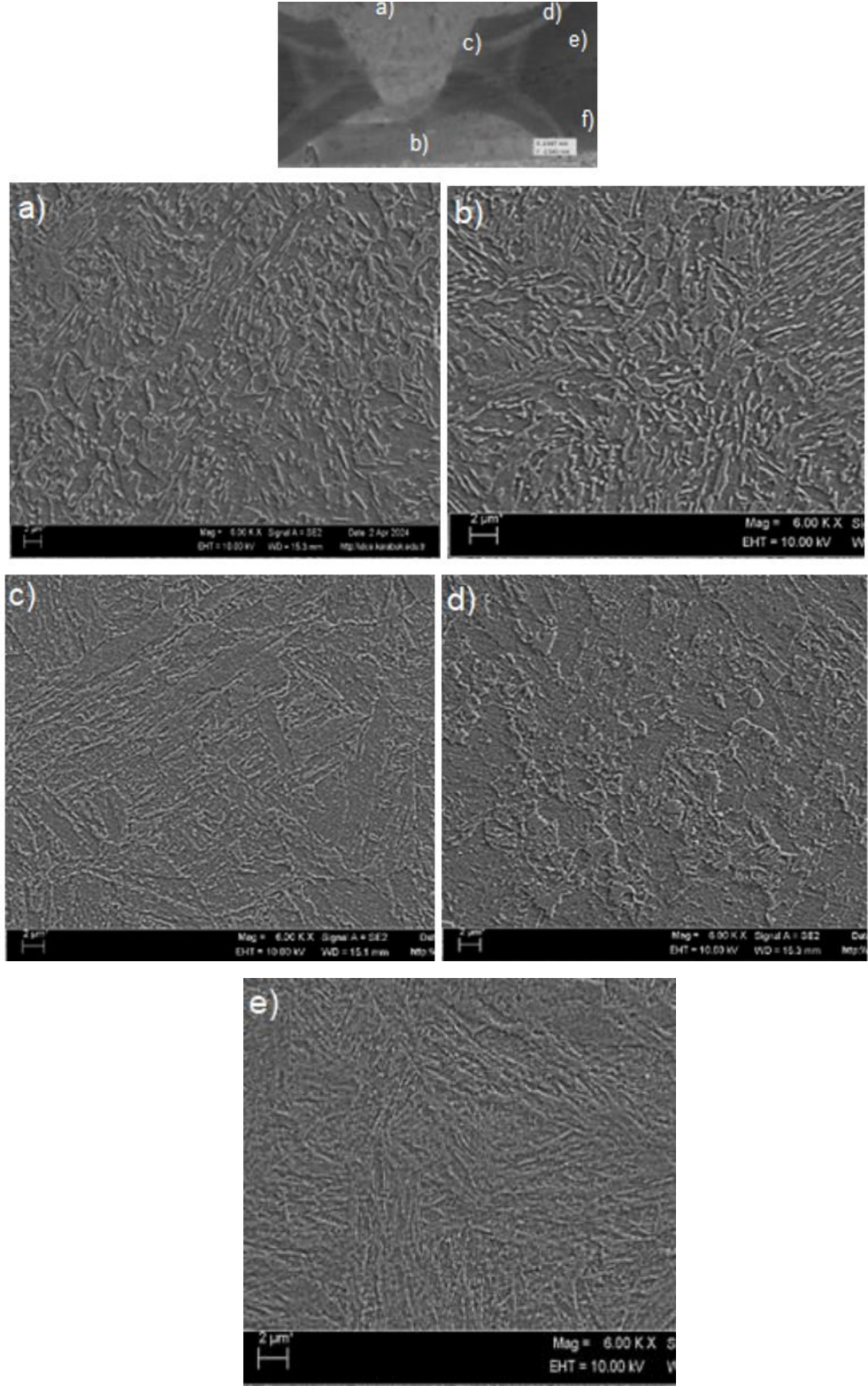
### 5.6.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmelerinin Mikroyapı İncelemeleri

Şekil 5.33'te Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirilmiş malzemenin optik mikroskop ile alınan mikroyapısı gösterilmiştir.

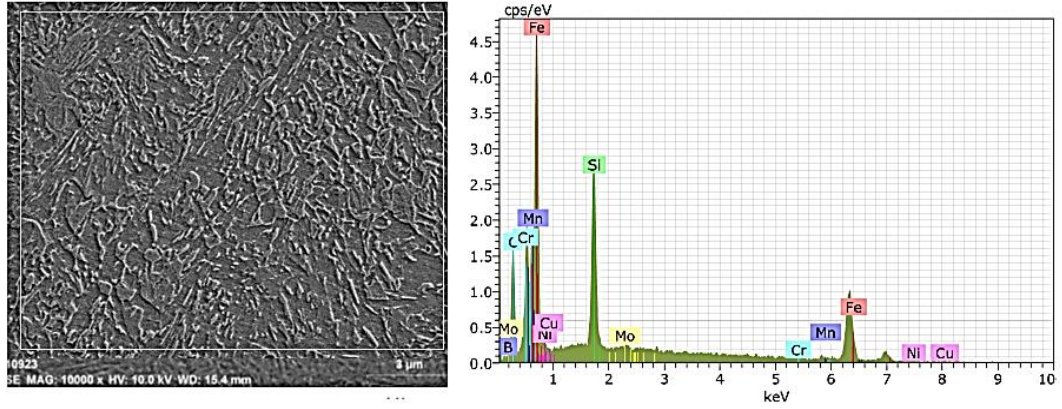


Şekil 5.33. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmesi, a) Kaynak metali-ITAB geçiş, b) Kaynak metali üst bölgesi, c) Kaynak metali orta bölgesi, d) kaynak metali makro görüntüsü, e) ITAB-ana malzeme geçiş bölgesi, f) ana malzeme, g) ITAB.

Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı numunesinin SEM ile detaylı bir şekilde mikroyapısı incelenmiştir. Kaynak metali, ITAB ve ana malzeme'nin SEM ile incelenen mikroyapı görüntüleri Şekil 5.34'te gösterilmiştir. Şekil 5.35'te ise birleştirme kaynak metali SEM görüntüsü üzerinden alınan alansal EDS analizi sonucu gösterilmiştir.



Şekil 5.34. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmesi, a ve b) Kaynak metali  
c) ITAB (Kaynak metali bitişiği), d) ITAB (ITAB-ana malzemeye geçiş  
bölgesi) e) Ana malzeme



Spectrum: 1

El AN Series	unn. [wt.%]	C norm. [wt.%]	C Atom. [at.%]	C Error (1 Sigma) [wt.%]
B 5 K-series	0.00	0.00	0.00	0.00
C 6 K-series	3.84	4.89	19.20	0.85
Si 14 K-series	0.47	0.60	1.00	0.06
Cr 24 K-series	0.92	1.17	1.06	0.11
Mn 25 K-series	0.55	0.71	0.61	0.10
Fe 26 K-series	72.30	92.06	77.74	3.47
Ni 28 L-series	0.27	0.35	0.28	0.17
Mo 42 L-series	0.18	0.23	0.12	0.05
-----				
Total:	78.53	100.00	100.00	

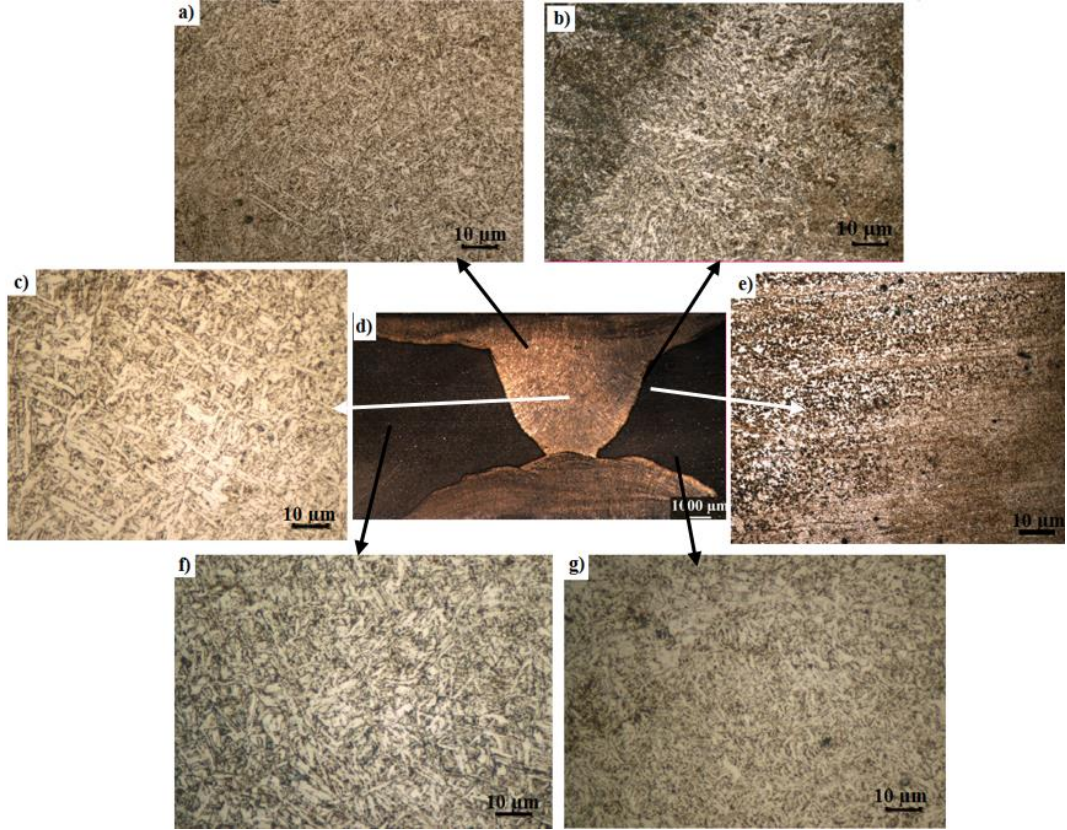
Şekil 5.35. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmesi, kaynak metali EDS analiz sonucu.

Temin edildiği şekliyle Q&T (su verilmiş ve temperlenmiş) olarak üretilen Bisalloy HHA 500 zırh çeliği mikroyapısı Şekil 5.33f optik mikroskop görüntüsü ve Şekil 5.34e SEM analizinde belirgin bir şekilde görülen martenzit çıtalarından (lath martenzit) oluşan temperlenmiş asiküler martenzitten oluşmaktadır. Benzer mikroyapılar benzer şekilde Q&T ile üretilmiş zırh çelikleri ana malzeme mikroyapıları için de rapor edilmiştir [3, 24, 108].

Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'te görüntülenen kaynaklı Bisalloy HHA 500 zırh çelikleri optik mikroskop ve SEM mikroyapıları aşağıdaki "Bölüm 5.6.3 Mikroyapı Görüntülerinin İnceleme Sonuçlarının Değerlendirilmesi" kısmında detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Şekil 5.35 Bisalloy HHA 500 zırh çelik birleştirmesi kaynak metali EDS analiz sonucuna göre, kaynak metali birleşiminde B, C, Si, Cr, Mn, Ni ve Mo alaşım elementleri belirlenmiştir.

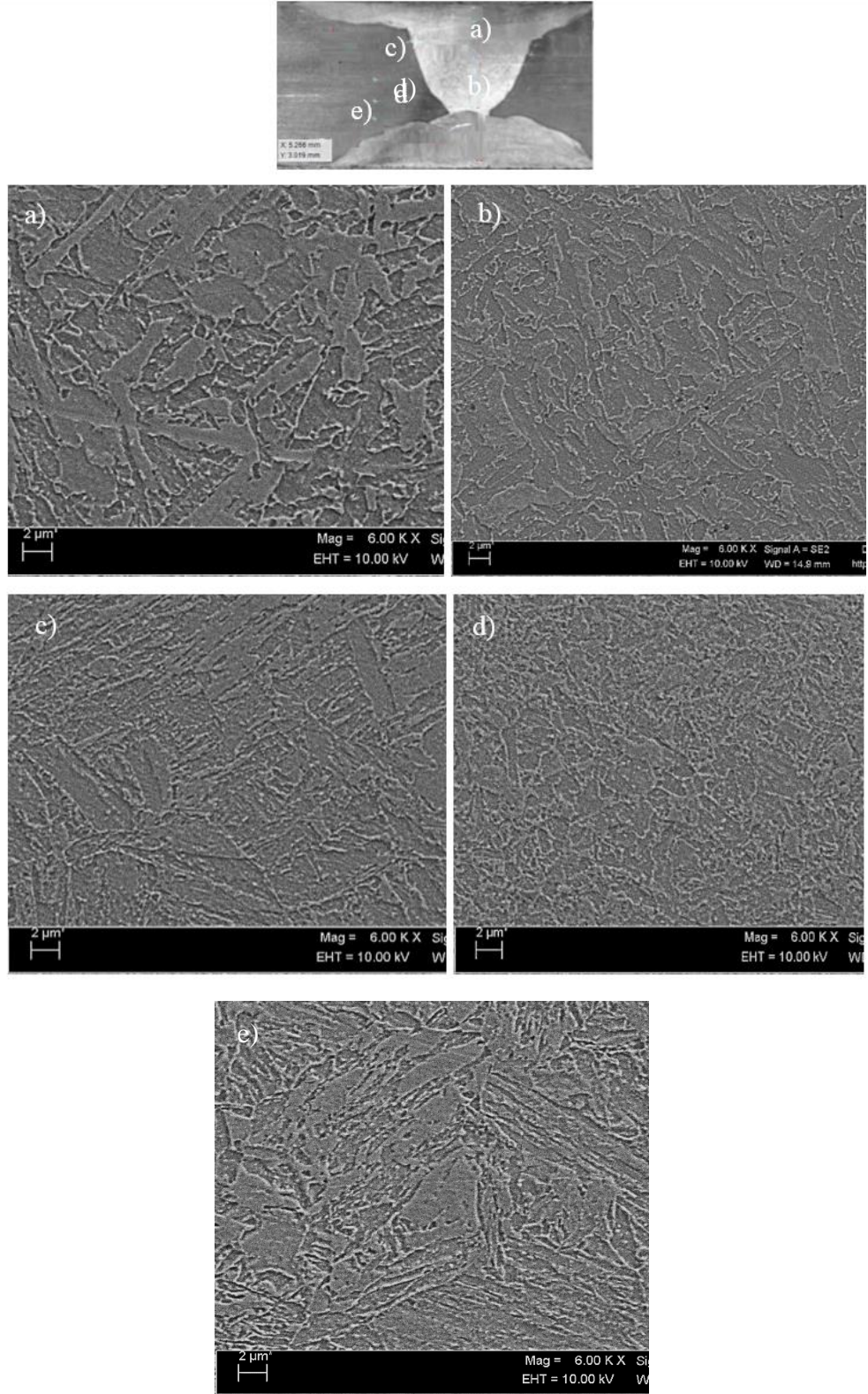
### 5.6.2. Kaynak Sonrası Isıl İşlem Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Birleştirmelerinin Mikroyapı İncelemeleri

Şekil 5.36'de kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği malzemesinin optik mikroskop ile mikroyapısı gösterilmiştir.

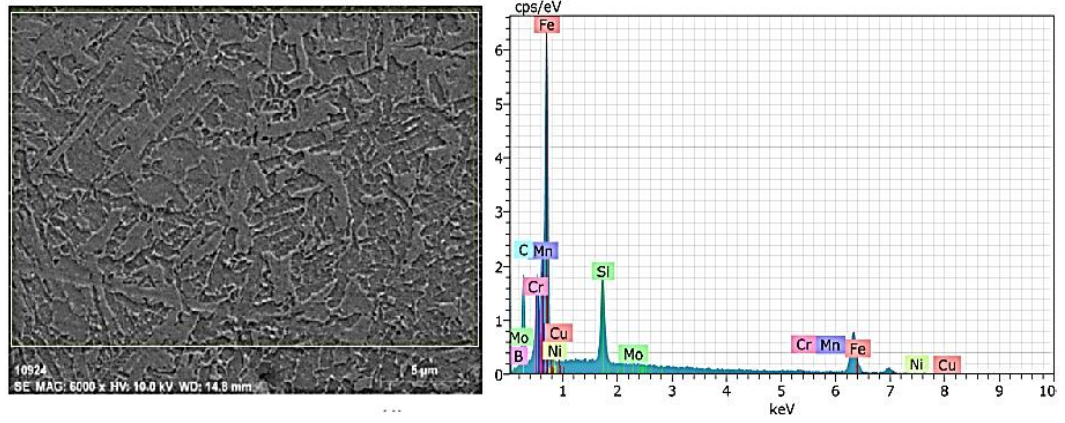


Şekil 5.36. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmesi, a) Kaynak metali üst bölgesi, b) Kaynak metali-ITAB geçiş, c) Kaynak metali orta bölgesi, d) kaynak metali makro görüntüsü, e) ITAB- ana malzeme geçiş bölgesi, f) ana malzeme, g) ITAB.

Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesinin SEM ile detaylı bir şekilde mikroyapısı incelenmiştir. Kaynak metali, ITAB ve ana malzeme'nin SEM ile incelenen mikroyapı görüntüleri Şekil 5.37'de gösterilmiştir. Şekil 5.38'da ise kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış birleştirme kaynak metali SEM görüntüsü üzerinden alınan alansal EDS analizi sonucu gösterilmiştir.



Şekil 5.37. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmesi, a ve b) Kaynak metali c) ITAB (Kaynak metali bitişiği), d) ITAB (ITAB-ana malzemeye geçiş bölgesi) e) Ana malzeme.



Spectrum: 1

El	AN	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
B	5	K-series	0.00	0.00	0.00	0.00
C	6	K-series	6.29	8.23	29.31	1.56
Si	14	K-series	0.42	0.55	0.84	0.07
Cr	24	K-series	0.51	0.66	0.55	0.11
Mn	25	K-series	0.87	1.14	0.88	0.18
Fe	26	K-series	67.35	88.14	67.52	3.66
Ni	28	L-series	0.87	1.14	0.83	0.45
Mo	42	L-series	0.10	0.14	0.06	0.05
Total:			76.41	100.00	100.00	

Şekil 5.38. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmesi, kaynak metali EDS analiz sonucu.

Şekil 5.36 ve Şekil 5.37’de görüntülenen kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çelik birleştirmeleri optik mikroskop ve SEM mikroyapıları aşağıdaki “Bölüm 5.6.3 Mikroyapı Görüntülerinin İnceleme Sonuçlarının Değerlendirilmesi” kısmında detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Şekil 5.38’de gösterilen kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış birleştirme kaynak metali alansal EDS analizi sonucuna göre, ısıl işlem öncesi kaynaklı birleştirmenin kaynak metali analizi ile mukayese edildiğinde Cr, Mo oranında az miktar azalma C, Mn ve Ni alaşım elementleri miktarında bir miktar artış belirlenmiştir.

### 5.6.3. Mikroyapı Görüntülerinin İnceleme Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bisalloy HHA 500 zırh çeliği ana malzeme mikroyapısı Şekil 5.33f’deki optik mikroskopta ve Şekil 5.34e’deki SEM görüntüsünde esas olarak ince taneli lath martenzitten oluştuğu görülmüştür. Benzer şekilde Savic ve Cabrilo [17], HHA çelikleri ana malzeme yapısında daha sert yapıdaki lath martenzitten oluştuğunu rapor

etmişlerdir [110]. Q&T olarak üretilen zırh çeliği ana malzeme mikroyapısını ince taneli martenzit (M) ve temperlenmiş troostit veya alt beynitten oluştuğunu belirtmişlerdir. Şekil 5.36f ve Şekil 5.37e’de kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmesinin Bisalloy HHA 500 ana malzeme mikroyapısı daha kaba yapıda lath martenzit içeren temperlenmiş martenzitten oluştuğu görülmektedir.

Ana malzemedan ITAB’a doğru ilerledikçe ITAB yapısında, ana malzemedan kalan martenzit ile az miktar beynit ve daha kaba tane boyutuna sahip ferritik perlitik yapılar görülmektedir (Şekil 5.33e ve Şekil 5.34d). Kaynak sırasında ITAB sıcaklığının ötektoid sıcaklığın üzerine çıkması ile perlit ve ferrit oluşumu sağladığı söylenebilir [27]. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmenin ana malzemedan ITAB’a doğru gidildikçe ITAB mikroyapısı temper martenzit, kabalaşmış beynitik ferrit çitallerından ayrıca irileşmiş poligonal ferrit taneleri ve perlit kolonilerinden oluştuğu görülmektedir (Şekil 5.36e ve Şekil 5.37d). ITAB kaynak sırasında çeşitli sıcaklıklara ve soğutma oranlarına maruz kaldığını son derece farklı mikroyapılara sahip bölgelerle karmaşık bir mikroyapıya sahiptir [111]. Sisodia vd. [112] ye göre kaynak metali ergime çizgisinin ötesinde, tane boyutu büyür ve daha iri taneler oluşurken, daha ileri ana malzemeye doğru gidildikçe çok karmaşık mikroyapıda ITAB’dan oluşur [112]. ITAB’dan ana malzemeye doğru gidildikçe tane boyutunda kademeli bir incelmeye meydana geldiği görülmektedir (Şekil 5.33e ve Şekil 5.36e). Bu durum sertlik değerleri ile de doğrulanmaktadır, sertlik ölçüm sonuçlarına göre de ana malzemedan-ITAB a doğru geçildiğinde ITAB dış kısmı (ana malzemedan-ITAB’a geçiş) sertliklerinde düşüş meydana geldiği görülmektedir.

ITAB iç kısmı, yani kaynak metali ergime bandı-ITAB geçişi için ise bu durum tam tersi olarak yüksek sertlik değerlerini kapsamaktadır. Buradaki kaynak metali-ITAB geçiş bölgesine bakıldığında, kaynak sınırı hemen bitimindeki ITAB mikroyapısında ise kabalaşmış beynitik ferrit çitallerından oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte Widmanstätten ferriti tespit edilmiştir. Şekil 5.33a’da bu geçiş mikroyapısı ve bu bölge ITAB mikroyapısı da Şekil 5.34c’de detaylı olarak görüntülenmektedir. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmelerde ise Şekil



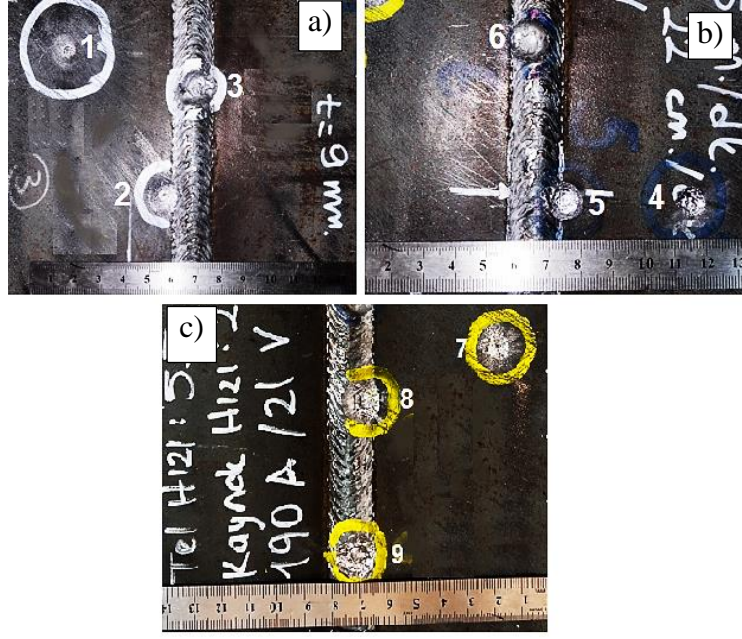
5.36b ve Şekil 5.37c’de görüntülenen mikroyapılardan büyük granüler beynitik ferrit tanelerinin ayrıca Widmanstätten ferriti yapıları görülmektedir.

Kaynak metali mikroyapısında, Widmanstätten ferriti ile birlikte esas olarak asiküler ferrit oluşumları gözlenmiştir (Şekil 5.33 a ve c ve Şekil 5.34 a ve b). Kaynak sonrası ısıl işlem sonrasında, poligonal ferrit oluşumu belirginken, asiküler ferrit hafifçe kabalaşmıştır (Şekil 5.36a ve c ve Şekil 5.37 a ve b). Benzer bir çalışmada kaynak metalinde az miktarda karışık fazlar ve siyah bir bölge varlığı bu bölgelerde karbür olabileceği rapor edilmiştir [27]. Benzer şekilde HHA zırh çeliklerinin farklı ısı girdilerinde kaynaklı birleştirilmesinde kaynak metali mikroyapısının ağırlıklı olarak poligonal ferrit yapısından oluştuğu tespit edilmiştir [3]. Magudeeswaran vd. [24] de çalışmalarında SEM, TEM ve optik mikroskop analizleri ile benzer mikroyapıların oluştuğunu rapor etmişlerdir [24]. Tomerlin vd [110] ise kaynak metali mikroyapısının üst beynit morfolojisine benzeyen alanlarla birlikte asiküler ferritten oluştuğunu belirtmiştir [110].

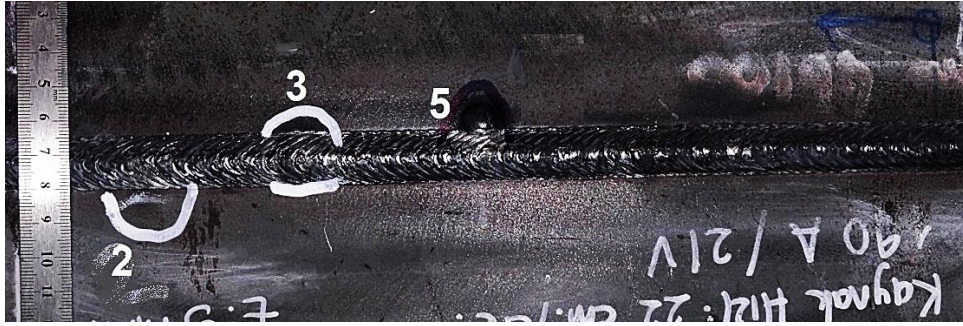
## **5.7. BALİSTİK TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

### **5.7.1. Bisalloy HHA 500 Zırh Çeliği Kaynaklı Birleştirmelerinin Balistik Test İncelemeleri**

Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunesine STANAG 4569’da belirtilen hız aralıklarında, sırasıyla 7.62x51 NATO Ball M80, 5.56x45 NATO SS109 ve 5.56x45 M193 mühimmatları ile ana malzeme, ITAB ve kaynak metaline birer atış gerçekleştirilerek zırhın delinip delinmediği ve tahrip bölgesi incelenmiştir. Sırasıyla Şekil 5.39 ve Şekil 5.40’ta Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme plakasının ön ve arka yüzeyi balistik test sonrası görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 5.39. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme plakasının atış yüzeyinin (ön/üst) balistik test sonrası görüntüsü a) 7.62x51 NATO Ball (Ball M80), b) 5.56x45 NATO SS109, c) 5.56x45 M193.



Şekil 5.40. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme plakasının arka yüzeyi balistik test sonrası görüntüsü.

Yapılan kontrollerde Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'ta gösterildiği gibi zırh plakasının atış yüzeyinde (ön/üst) delinme olmadığı, arka yüzeyi kontrol edildiğinde ise 2, 3 ve 5 numaralı atışlarda bombe oluşturduğu fakat delinme, kalkma veya ışık geçirgenliği olmadığı ve malzemenin bütünlüğünü koruduğu görülmüştür. Test detayları ve sonuçları Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme balistik test sonuçları.

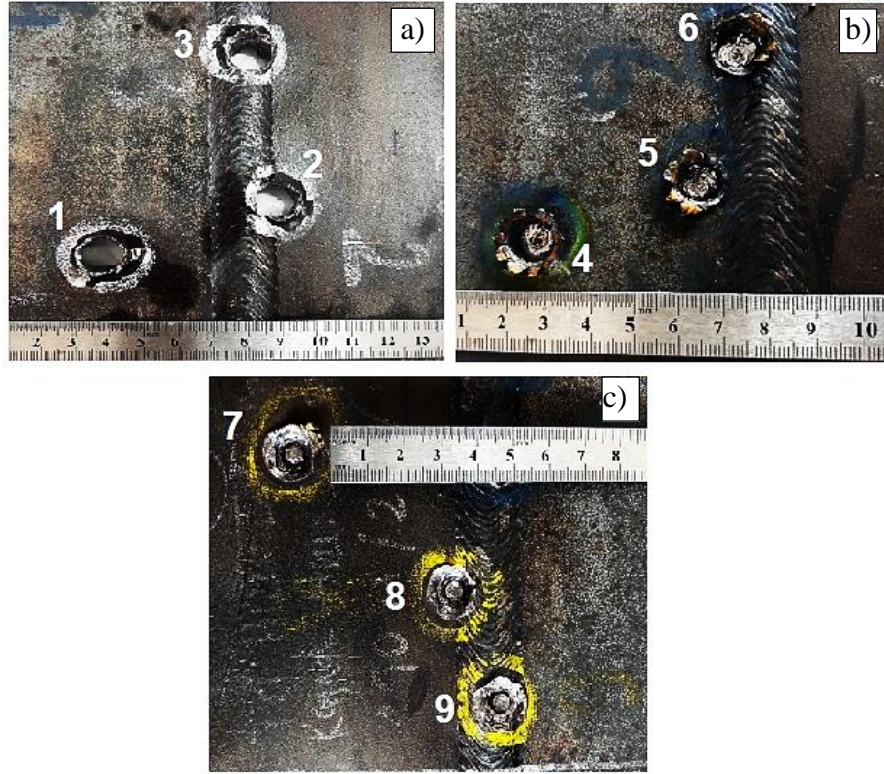
Test Tarihi		17.01.2024				Numune Ebadı		200x500 mm	
Test Yeri		OTOKAR A.Ş. Balistik Test Laboratuvarı				Numune Kalınlığı		9 mm	
Numune Özelliği		Bisalloy HHA 500 Kaynaklı Birleştirme				Numune Ağırlığı		7350 gram	
Ortam Sıcaklığı		18 °C				Ortam Nemi		% 41	
Test Standardı		NATO STANAG 4569 / AEP-55 Level I				Hedef Mesafesi		10 metre	
Atış No	Mühimmat Tipi	Barut Miktarı (grain)	Çekirdek Ağırlığı (gram)	Vuruş Açısı (°)	Hız (m/s)	Mermi Hedef Çarpma Hızı (m/s)	Namlu Enerjisi (J)	Atış Bölgesi	Sonuç (CP/PP) (S/NS)
1	7,62x51 NATO Ball (Ball M80)	42,106	9,64	0	839,39	837,41	3396	Ana Malzeme	PP / NS
2	7,62x51 NATO Ball (Ball M80)	42,106	9,64	0	815,83	813,91	3208	ITAB	PP / NS
3	7,62x51 NATO Ball (Ball M80)	42,400	9,64	0	821,15	819,17	3250	Kaynak Metali	PP / NS
4	5,56x45 NATO SS109	24,004	4,10	0	918,65	915,94	1730	Ana Malzeme	PP / NS
5	5,56x45 NATO SS109	24,002	4,10	0	914,55	911,85	1715	ITAB	PP / NS
6	5,56x45 NATO SS109	24,000	4,10	0	906,39	903,72	1684	Kaynak Metali	PP / NS
7	5,56x45 M193	25,914	3,52	0	937,29	934,07	1546	Ana Malzeme	PP / NS
8	5,56x45 M193	25,914	3,52	0	943,70	940,46	1567	ITAB	PP / NS
9	5,56x45 M193	25,910	3,52	0	937,43	934,21	1547	Kaynak Metali	PP / NS
<b>Açıklama:</b>									
CP: Complete Penetration (Komple delinme), PP: Partial Penetration (Kısmi delinme)									
S: Spall (Sıçrak var), NS: No Spall (Sıçrak yok)									

Çizelge 5.10'daki Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerinin balistik test sonrası sonuç raporlarında tüm testler için sonuç kısmı PP/NS olarak görüntülenmektedir. Plakada delinme olmaması halinde kısmi deformasyon (Partial

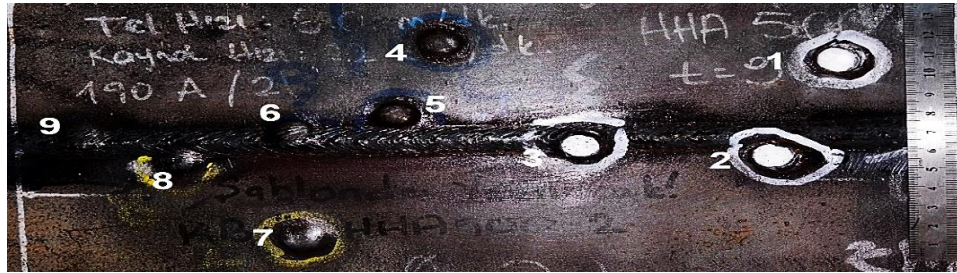
Penetration-PP) olarak sonuç değerlendirmesi yapılmıştır. Eğer sonuç CP ise başarısız, PP ise başarılı kabul edilmektedir. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerinin balistik test sonrası tüm sonuçların PP olarak başarılı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca şahit alüminyum plaka üzerinde sonuç değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuç NS (No Spall) ise test sonucu başarılı olarak kabul edilir. Dolayısıyla Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmelerinin tüm balistik testlerinin başarılı olduğu belirlenmiştir.

### **5.7.2. Kaynak Sonrası Isıl İşlem Uygulanmış Bisalloy HHA 500 Zırh eliği Birleştirmelerinin Balistik Test İncelemeleri**

Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesine STANAG 4569'da belirtilen hız aralıklarında, sırasıyla 7,62x51 NATO Ball M80, 5,56x45 NATO SS109 ve 5,56x45 M193 mühimmatları ile ana malzeme, ITAB ve kaynak metaline birer atış gerçekleştirilerek zırhın delinip delinmediği ve tahrip bölgesi incelenmiştir. şekil 5.41 ve şekil 5.42'de Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme plakasının ön ve arka yüzeyi balistik test sonrası görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 5.41. Kaynak sonrası ısıtılmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği plakasının atış yüzeyinin (ön/üst) balistik test sonrası görüntüsü a) 7,62x51 NATO Ball (Ball M80), b) 5,56x45 NATO SS109, c) 5,56x45 M193.



Şekil 5.42. Kaynak sonrası ısıtılmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği plakasının arka yüzeyinin (alt) balistik test sonrası görüntüsü.

Yapılan kontrollerde Şekil 5.41 ve Şekil 5.42’de gösterildiği gibi zırh plakasının atış yüzeyinde (ön/üst) 1, 2 ve 3 numaralı atışlarda delinme olduğu tespit edilmiştir. Arka yüzeyi kontrol edildiğinde ise 4, 5, 6, 7 ve 8 numaralı atışlarda bombe oluşturduğu

fakat delinme, kalkma veya ışık geçirgenliği olmadığı ve malzemenin bütünlüğünü koruduğu görülmüştür. Test detayları ve sonuçları Çizelge 5.11’de verilmiştir.

Çizelge 5.11. Kaynak sonrası ısıl işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği balistik test sonuçları.

Test Tarihi		17.01.2024				Numune Ebadı		200x500 mm		
Test Yeri		OTOKAR A.Ş. Balistik Test Laboratuvarı				Numune Kalınlığı		9 mm		
Numune Özelliği		Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği				Numune Ağırlığı		7005 gram		
Ortam Sıcaklığı		18 °C				Ortam Nemi		% 41		
Test Standardı		NATO STANAG 4569 / AEP-55 Level I				Hedef Mesafesi		10 metre		
Atış No	Mühimmat Tipi	Barut Miktarı (grain)	Çekirdek Ağırlığı (gram)	Vuruş Açısı (°)	Hız (m/s)	Mermi		Atış Bölgesi	Açıklama	
						Hedef Çarpma Hızı (m/s)	Namlu Enerjisi (J)			
1	7,62x51 NATO Ball (Ball M80)	42,400	9,64	0	848,79	846,79	3473	Ana Malzeme	CP	
2	7,62x51 NATO Ball (Ball M80)	42,326	9,64	0	850,96	848,95	3490	ITAB	CP	
3	7,62x51 NATO Ball (Ball M80)	42,280	9,64	0	830,28	828,32	3323	Kaynak	CP	
4	5,56x45 NATO SS109	24,000	4,10	0	917,17	914,47	1724	Ana Malzeme	PP / NS	
5	5,56x45 NATO SS109	23,996	4,10	0	915,24	912,54	1717	ITAB	PP / NS	
6	5,56x45 NATO SS109	23,992	4,10	0	901,87	899,21	1667	Kaynak	PP / NS	
7	5,56x45 M193	25,912	3,52	0	953,60	950,33	1600	Ana Malzeme	PP / NS	
8	5,56x45 M193	25,908	3,52	0	950,66	947,40	1591	ITAB	PP / NS	
9	5,56x45 M193	25,906	3,52	0	977,48*	974,12	1682	Kaynak	PP / NS	
<b>Açıklama:</b>										
CP: Complete Penetration (Komple delinme), PP: Partial Penetration (Kısmi delinme)										

**S:** Spall (Sıçrak var), **NS:** No Spall (Sıçrak yok)

\*Hız yüksek ölçülmüştür. Delinme ve sıçrak görülmediği için zorlu test koşulu kabul edilmiştir. Test sonucu başarılıdır.

Çizelge 5.11’den görüldüğü gibi kaynak sonrası ısıtma işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmelerinin balistik test sonrası sonuç raporlarında 7,62x51 NATO Ball (Ball M80) mühimmat kullanılarak yapılan testler hariç diğer tüm testler için sonuç kısmı PP/NS olarak görüntülenmektedir. Yani, plakada delinme yok, kısmi deformasyon (Partial Penetration-PP) ve sıçrak izi yok (No Spall-NS) olacak şekilde balistik test sonrası sonuç değerlendirilmesinin başarılı olduğu belirlenmiştir. Atış no 1, 2 ve 3 olan 7,62x51 NATO Ball (Ball M80) mühimmat kullanılarak yapılan testler ise CP olarak başarısız kabul edilmiştir.

### **5.7.3. Balistik Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

Balistik testten sonra, standartlar [2] tarafından mermi çarpmasının neden olduğu hasarın Şekil 5.39, Şekil 5.40 ve Şekil 5.41, Şekil 5.42’te olduğu gibi görsel olarak analiz edilmesi gerekmektedir. Prensip olarak bu hasar, merminin çapına yakın bir delik ve parçalanma olmaksızın yoğun plastik deformasyon ile ilişkili olarak sünek olabilir veya nispeten daha büyük çaplı ve malzemenin sertliği nedeniyle parçalanma kanıtı olan kırılmalı bir hasar olabilir [3].

Zırh ve balistik mühendisliğinde balistik özellikler incelenirken malzemenin koruma konseptinin geliştirilmesinde kinetik enerjili tehditlerin nüfuziyet (penetrasyon) mekanizmalarının anlaşılması önemlidir. Mühimmatın ve hedefin malzeme özellikleri, mühimmatın geometrisi, çarpma hızı ve çarpma açısı nüfuziyeti etkileyen kriterlerdir. Nüfuziyet aynı zamanda mermi hızının da bir fonksiyonudur. Nispeten düşük hızlarda nüfuziyet hızın ikinci dereceden fonksiyonudur. Hız arttıkça nüfuziyetin hızla bağımlılığı azalır ve çok yüksek hızlarda nüfuziyet sabittir.

Testi gerçekleştirilen plaka yüksek mukavemetli zırh çelikleri MIL-DTL-46100 standardına uygun olarak üretilmiştir. Bu çeliklerin çalışmada gerçekleştirilen GMAW kaynağı ile birleştirilmesi sonrasında da bu standartlara uygun olduğu balistik testler sonrası Bisalloy HHA 500 ana malzeme ile benzer balistik performanslar sergilediği tespit edilmiştir.

Kaynak sonrası Bisalloy HHA 500 birleştirmelere 1 saat 650°C’de gerilim giderme işlemi uygulanarak ve ardından havada soğutularak kaynakta bulunan gerilmelerin giderilmesi amaçlanmıştır. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 birleştirmelerin 7,62x51 NATO Ball (M80) mühimmatı haricinde kullanılan diğer mühimmatlarla yapılan balistik testleri başarılı olmuştur. Ancak, 7,62x51 NATO Ball (M80) mühimmatı ile atış yapıldığında mühimmatın hızı diğer iki mühimmata göre düşük olmasına rağmen çekirdek ağırlığı yüksek olduğundan hedef üzerinde etki ettiği enerji daha yüksek olduğundan zırh çeliği ana malzeme, ITAB ve kaynak metalinde penetrasyon oluşmuştur. Fakat ısıl işlem sonucunda özellikle kaynak metali ve ITAB’da düzensiz soğuma sonucu oluşan kusurların kısmen azaltılması sonucu darbe enerjilerinde artış tespit edilmiştir.

şekil 5.39’da gösterilen Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunesine 1, 4, 6, 7, 8 ve 9 numaralı yapılan atışlar değerlendirildiğinde Çizelge 3.3’te gösterilen penetrasyon türlerine göre 2 numaralı n tarafta derin görünme arkada iz yok kabul kriterine göre değerlendirilmiştir. şekil 5.40’ta gösterilen 2, 3 ve 5 numaralı atışların Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunesi arka yüzeyi kontrol edildiğinde Çizelge 3.3’te gösterilen penetrasyon türlerine göre 3 numaralı arka yüzeyde az kabarma kabul kriterine göre değerlendirilmiştir.

şekil 5.41’de gösterilen kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesine 1, 2 ve 3 numaralı 7,62x51 NATO Ball (Ball M80) mühimmat ile yapılan atışlarda delinme olduğu ve Çizelge 3.3’te gösterilen penetrasyon türlerine göre 11 numaralı tam delinme ret kriterine göre başarısız olarak değerlendirilmiştir. şekil 5.42’de gösterilen 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 numaralı atışların ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği numunesi arka yüzeyi kontrol edildiğinde Çizelge 3.3’te gösterilen penetrasyon türlerine göre 4 numaralı arka yüzeyde çatlama olmayan kabarma kabul kriterine göre değerlendirilmiştir. 5,56x45 NATO SS109 mühimmatı ile yapılan 4, 5 ve 6 numaralı atışların atış yüzeyi incelendiğinde mühimmatın dışa doğru taçlanma yaptığı grlmştir. 5,56x45 M193 mühimmatı ile yapılan 7, 8 ve 9 numaralı atışların atış yüzeyi incelendiğinde tıkama yaptığı grlmştir.



Şekil 5.42a'da,  $V_{50}$ 'den daha yüksek mermi hızı ve darbe enerjisine maruz kalan kaynak sonrası ısıtılma işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliğindeki balistik hasarını göstermektedir. Bu şekilde, Şekil 5.43'teki ön hasar, merminin çapına yakın bir çapa sahip bir tıkanma penetrasyonu oluşumunu ortaya koymaktadır. Buna ek olarak ayrıca, ilgili distal yüzler, sünek ve kırılğan hasarın bir kombinasyonunu gösteren parçalanma ve yapraklanma belirtilerini ortaya koymaktadır. Kaynak sonrası uygulanan ısıtılma işlemi bağı olarak gerilmelerin azaltılması, mikroyapı değişimi ve sertlikteki düşüş nedeniyle 7,62x51 NATO Ball (Ball M80) mermi için kaynak sonrası uygulanan ısıtılma işlemi uygun olmadığı belirlenmiştir. Diğer mermiler kullanılarak yapılan balistik testlerin ise başarılı bir şekilde ısıtılma işlemli numunelerde de gerçekleştirildiği belirlenmiştir.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 500 HB sertliğindeki Bisalloy HHA 500 zırh çelikleri birbirine otomatize edilmiş kaynak makinesi ile MIG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirilen numunelerin bir kısmına gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmış ve numuneler üzerinde çekme, eğme, çenti darbe, sertlik testi uygulamaları yapılmış; optik ve SEM incelemeleri ile karakterize edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca bu malzemelerin balistik dirençlerinin belirlenebilmesi için balistik testler uygulanmıştır. Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinin MIG kaynak yöntemi ile birleştirildiği mekanik ve balistik özelliklere etkisinin araştırıldığı bu çalışma sonucunda;

Elde edilen bulgular sırasıyla sunulmuştur.

1. Çekme test sonuçlarına göre, Bisalloy HHA 500 zırh çeliklerinin ve kaynaklı birleştirmelerinin sırası ile ortalama çekme dayanımı 1725 MPa ve 1061 MPa, ortalama akma dayanımı 1547,5 MPa ve 958 MPa, ortalama % uzama miktarı ise %10,55 ve %5,25 olarak bulunmuştur. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmelerinin ortalama akma dayanımı 844 MPa, ortalama çekme dayanımı 947 MPa ve ortalama % uzama miktarı ise %16,05 olarak bulunmuştur. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmeleri ile kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmeleri mukavemetleri karşılaştırıldığında, kaynaklı bağlantıların akma ve çekme dayanımı Bisalloy HHA 500 zırh çeliğinden daha düşük mekanik özelliklerde kopmuştur. Fakat sonuçlar incelendiğinde ısıl işlem ile % uzama miktarının kaynak sonrası % uzama değerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Kaynak işlemi sonrasında meydana gelen artık gerilmelerin, kaynak sonrası ısıl işlem uygulanması ile

Artık gerilmelerin giderilmesi ve sünekliğin artarak kaynaklı birleştirmelerin çekme test sonucunda % uzama değerlerinin iyileştiği belirlenmiştir.

2. Bisalloy HHA 500 ana malzemenin çekme sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde kırılmanın ağırlıklı olarak gevrek morfolojide, yarı sünek-yarı gevrek bir biçimde kırılma davranış gösterdiği belirlenmiştir. EDS analiz sonuçları incelendiğinde Bisalloy HHA 500 ana malzeme çekme testi sonrası kırık yüzey yapısında üretim koşullarına bağlı oluşmuş çok ince yapıda karbür çökeltileri gözlemlenmiştir. Otomatize edilmiş GMAW kaynak makinesi ile birleştirilmiş Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirme numunesi çekme testi numunesine ait kırık yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde, kırılmaların yarı sünek-yarı gevrek olduğu görülmektedir. Kırık yüzey EDS analizleri incelendiğinde kaynak metalinden kopan numunelerin kırık yüzeylerde herhangi bir çökelti oluşumu vs. rastlanılmadığı görülmüştür. Kaynak sonrası ısıtma işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çelik birleştirmelerinin çekme testi numunesine ait kırık yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde, kırık yüzeylerde ağırlıklı olarak sünek olmakla birlikte yarı sünek-yarı gevrek bir kırılma morfolojisi sergilediği söylenebilir. Kaynak sonrası ısıtma işlemine bağlı olarak yapıda karbür çökeltilerin tekrar oluşumunun söz konusu olduğu görülmektedir.
3. Çentik darbe test sonuçlarına göre, Bisalloy HHA 500 zırh çeliği 37,85 J, Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmesi 103,7 J, kaynak sonrası ısıtma işlemi uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği ise 120,6 J değerlere sahiptir. Kaynak sonrası ısıtma işlemi uygulanması ile kaynaklı birleştirmenin çentik darbe enerjisinde %16 artış olduğu tespit edilmiştir. Kırılma morfolojileri incelendiğinde kaynaklı Bisalloy HHA 500 malzemelerin yarı gevrek-yarı sünek bir kırılma davranışı ile kırıldığı gözlenmektedir. Kaynak sonrası ısıtma işlemi uygulaması kaynak metali kırınımının daha fazla ince çaplı çukurcuklu yapıda (dimple) daha sünek ağırlıkta oluşmasına neden olarak daha yüksek tokluk değerlerini doğrulamaktadır.

4. Eğme test sonuçlarına göre, Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı birleştirmeleri ve kaynak sonrası ısıl işlem uygulanan numunelerde üç nokta eğme deneyleri sonucu kaynak metali ve ITAB'da çatlak oluşumu meydana geldiği görülmüştür. Çatlak oluşumu ile durdurulan testlerde eğmeler 90° açıda gerçekleşmiştir. Kaynak sonrası birleştirmelerde meydana gelen artık gerilmelerin kaynak sonrası ısıl işlem uygulanması ile giderilmesi ve sünekliğin artarak eğme testi sonrası kaynaklı birleştirmelerin deformasyon miktarı oranı değerlerinin iyileştiği belirlenmiştir.
5. Bisalloy HHA 500 birleştirmelerinde sertlik ölçüm sonuçlarına göre kaynak metalinde aşağıdan (kök kısmından) yukarı doğru gidildikçe kaynak sertliğinde bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Bisalloy HHA 500 ana malzeme sertliği 400-450 HV arasında değişmektedir. Ana malzemeden ITAB'a doğru gidildikçe ITAB dış kısmında sertlikte bir düşüş görülmüştür. Bu durum mikroyapısal değişikliklere ve tane boyutu kabalaşmasına bağlı olarak meydana geldiği düşünülmektedir. Kaynak metaline yakın bölgede meydana gelen ITAB iç kısmında ise yüksek sertlik değerleri meydana geldiği görülmektedir. ITAB'ın bu bölgesinde kaynak metali ve ana malzemeye göre meydana gelen daha yüksek sertlik değerleri kaynak merkezine kıyasla füzyon bölgesine yakın bölgelerdeki daha yüksek sertlikteki Widmanstätten'in varlığına atfedilebilir. Bu bölgede ITAB sertlik değerleri yaklaşık 550 HV değerine ulaşmaktadır. Kaynak metali sertliği ise ortalama 375 HV olarak belirlenmiştir. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 birleştirmelerinde sertlikte düşüş meydana geldiği belirlenmiştir. ITAB ve kaynak metali sertliğindeki düşüşün nedeninin kaynak sonrası ısıl işleme bağlı olarak mikroyapısal değişimler ve kaynaktaki gerilmelerin giderilmesine bağlı olduğu düşünülmektedir.
6. Mikroyapı çalışmaları sonuçlarına göre, temin edildiği şekliyle Q&T (su verilmiş ve temperlenmiş) olarak üretilen Bisalloy HHA 500 zırh çeliği mikroyapısı martenzit çitallerından (lath martenzit) oluşmaktadır. Ana malzemeden ITAB'a doğru ilerledikçe ITAB yapısında, ana malzemeden kalan martenzit ile az miktar beynit ve daha kaba tane boyutuna sahip ferritik perlitik

yapılar görülmektedir. Kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği birleştirmenin ana malzemedeki ITAB'a doğru gidildikçe ITAB mikroyapısının temper martenzit, kabalaşmış beynitik ferrit çitallerinden ayrıca irileşmiş poligonal ferrit taneleri ve perlit kolonilerinden oluştuğu görülmektedir. Kaynak metali mikroyapısında, Widmanstätten ferriti ile esas olarak asiküler ferrit oluşumları gözlenmiştir. Kaynak sonrası ısıl işlem sonrasında, poligonal ferrit oluşumu belirginken, asiküler ferrit hafifçe kabalaşmıştır.

7. NATO STANAG 4569 Seviye 1 mühimmatları ile yapılan atışlarda kullanılan 5,56x45 NATO SS109 ve 5,56x45 M193 mermi balistik test sonuçları tüm birleştirmeler için (kaynaklı ve kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış numuneler) başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan enerji miktarı yüksek olan 7,62x51 NATO Ball (Ball M80) mühimmatı söz konusu olduğunda, malzemenin sertliği ve mukavemeti balistik performans için önemlidir. Bu mühimmatla yapılan Bisalloy HHA 500 zırh çelik birleştirmelerinin testlerinin hepsi başarı ile sonuçlanmıştır. Ancak, kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çelik birleştirmelerinin 7,62x51 NATO Ball (Ball M80) mermi penetrasyonuna karşı dirençli olmadığı görülmüştür. Kaynak sonrası yapılan gerilim giderme ısıl işlemi bu mühimmat için balistik performansı düşürmüştür. Diğer mühimmatlarla yapılan testlerin tümü ise başarı ile sonuçlanmıştır. Kaynak metali, ITAB ve ana metal için mikrosertlik ve balistik test kantitatif sonuçları, kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmış Bisalloy HHA 500 zırh çeliği için ITAB'da ölçülen 350 HV ile en sert bölge olmasına rağmen, ana malzeme bölgesinin 1724 J ile balistik olarak en dirençli olduğunu ortaya koymuştur. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği ana metal daha yüksek sertliğini ve iyi balistik özelliklerini temperlenmiş martenzite borçluyken, kaynaklı Bisalloy HHA 500 zırh çeliği ITAB'ında baskın beynitik oluşumu nedeniyle balistik açıdan da üstün bir balistik performansa neden olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen bulgulara göre öneriler sırasıyla sunulmuştur.

1. Bu tez çalışmasındaki kaynak işleminde kullanılan ER 110 SG ilave dolgu metali düşük alaşımlı yüksek mukavemetli dolgu malzemesidir. Martenzit yapıya sahip zırh çeliğindeki balistik özellikler, östenitik kaynak ilave metali kullanıldığında kayba uğrayabilir. Çalışmada kullanılan ER 110 SG ilave tel ile birleştirilen kaynaklı bağlantıların başarılı bir şekilde gerçekleştiği ve balistik performanslarının da başarılı olduğu görülmektedir. Ancak, zırh çeliklerinde oluşabilecek soğuk çatlak (hidrojen çatlağı) problemini gidermek için östenitik yapıya sahip kaynak ilave metali kullanılması da oldukça yaygındır. Bu çalışmaya ilave olarak ileriki uygulamalarda östenitik tel ile birleştirme özellikleri incelenebilir. Bunun yanı sıra, farklı bir alternatif olarak düşük hidrojenli ferritik çelik elektrot kullanılarak kaynaklı birleştirmelerin mekanik özellikleri ve balistik performansları mukayese edilebilir.
2. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği kaynaklı plakalarına uygulanan 1 saat 650 °C sıcaklıkta gerilim giderme ısıl işlemi için uygulanan sıcaklık ve süre değerleri değiştirilerek hem mekanik özellikler hem de balistik performansa etkileri incelenebilir.
3. Bisalloy HHA 500 zırh çeliği farklı bir zırh çeliği malzemesi ile uygun bir kaynak yöntemi ile birleştirilerek hem mekanik özellikler hem de balistik performansa etkileri incelenebilir.

## KAYNAKLAR

1. MIL-A-12560H, **Military Specification: Armor Plate, Steel, Wrought, Homogeneous** (For Use In Combat-Vehicles And For Ammunition Testing), US Military: Watertown, MA, USA, 2007.
2. MIL-A-46100E, **Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness**, U.S. Military Specification, 2008.
3. Souza, E.R.S.;Weber, R.P.; Monteiro, S.N.; Oliveira, S.d.S. **Microstructure Effect of Heat Input on Ballistic Performance of Welded High Strength Armor Steel**. Materials 2021, 14, 5789. <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/19/5789> Erişim Tarihi: 26.02.2024
4. ADE, F., **Balistic Qualification of Armor Steel Weldments**, *Welding Journal*, 70, 53-58, 1991. JACOBI, H., BATINMANN, H. J., GRONSFELD, J., **New Method of Determining the Macrocleaness of Unconventionally Rolled Continuously Cast Steel**, *Stahl Eisen*, 108 (20), 54-66, 1988.
5. SANGOY, L., MEUNIER, Y., PONT, G., **Steels for Ballistic Protection**, *Israel Journal of Technology*, 24, 319-326, 1988.
6. ADE, F., **Balistic Qualification of Armor Steel Weldments**, *Welding Journal*, 70, 53-58, 1991.
7. JACOBI, H., BATINMANN, H. J., GRONSFELD, J., **New Method of Determining the Macrocleaness of Unconventionally Rolled Continuously Cast Steel**, *Stahl Eisen*, 108 (20), 54-66, 1988.
8. MATSUBARA, H., OSUKA, T., KOZASU, I., TSUKADA, K., **Optimization of Metallurgical Factors for Production of High Strength, High Toughness Steel Plate by Controlled Rolling**, *Transactions ISIJ*, 12,435-443, 1972.
9. MANGANELLO, S. J., WILSON, A. D., **Direct Quenching and its Effects on High-Strength Armor Plate**, *Int. Symp. Low Carbon Steels for the 90's*, Ed. R. Asfahani, G. Tither, The Minerals, Metals & Materials Society, 235-241, 1993.
10. MIL-STD-1185, **Military Standart Welding, High Hardness Armor**, Us Army Tank-Automotive Material Readines Command, Michigan 48090 31 December, 83-88 1979.
11. MIL-HDBK-1941, **Metal-Arc Welding of Homogeneous Armor**, Department of Defence Handbook, U.S. 1998.

12. Atapek, H., Karagöz, Ş., Yılmaz, A., ‘Zırh Çelikleri ve Geliştirilmesi’, 3. Savunma Teknolojileri Kongresi, ODTÜ-Ankara, 2006.
13. Saxena, A.; Kumaraswamy, A.; Sethi, S.; Reddy, G.M.; Madhu, V. **Microstructural characterization and high strain rate plastic flow behavior of SMAW Armox 500T steel joints from spherical indentation experiments.** J. Mater. Eng. Perform. 2018, 27, 4261–4269.
14. Saxena, A.; Kumaraswamy, A.; Reddy, G.M.; Madhu, V. **Study of tribological characteristics of multi-pass SMAW armox 500T steel joints.** J. Mater. Eng. Perform. 2018, 27, 4300–4307.
15. Reddy, G.M.; Mohandas, T.; Tagore, G.R.N. **Weldability studies of high-strength lowalloy steel using austenitic fillers.** J. Mater. Eng. Perform. 1995, 49, 213–228.
16. Cabrilo, A.; Geric, K. **Fracture mechanic and charpy impact properties of a crack in weld metal, HAZ and base metal of welded armor steel.** Procedia Struct. Int. 2018, 13, 2059–2064.
17. Savic, B.; Cabrilo, A. **Effect of Heat Input on the Ballistic Performance of Armor Steel Weldments.** Materials 2021, 14, 3617. <https://doi.org/10.3390/ma14133617>.
18. Magudeeswaran, G.; Balasubramanian, V.; Reddy, G.M.; Balasubramanian, T.S. **Effect of welding process consumables on tensile and impact properties of High Strength Quenched and Tempered steel Joints.** J. Iron Steel Res. Int. 2008, 15, 87–94.
19. Magudeeswaran, G.; Balasubramanian, V.; Reddy, G.M. **Effect of welding processes and consumables on high cycle fatigue life of high strength quenched and tempered steel joints.** Mater. Des. 2008, 29, 1821–1827.
20. Kuzmikova, L. **An investigation of the weldability of high hardness armour steel.** Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, University of Wollongong, Wollongong, Australia, 2013.
21. Teresa, F.; Christian, R.; Dirk, M. **Fatigue of high-strength armor steel under impact loading.** Int. J. Impact Eng. 2018, 11, 147–164.
22. Saxena, A.; Kumaraswamy, A.; Dwivedi, S.P.; Srivastava, A.K.; Maurya, N.K. **Experimental and computational investigation on dynamic fracture toughness (J) behavior of multi-pass SMA armor steel weldments.** Theor. Appl. Fract. Mech. 2020, 106, 102502.
23. Fan, X.; Li, Y.; Qi, Y.; Cai, X.; Wang, Z.; Ma, C. **Mechanical properties of cryogenic high manganese steel joints filled with nickel-based materials by SMAW and SAW.** Mater. Lett. 2021, 304, 130596.



24. Magudeeswaran, G.; Balasubramanian, V.; Reddy, G.M. **Metallurgical characteristics of armour steel welded joints used for combat vehicle construction.** Def. Technol. 2018, 14, 590–606.
25. Cabrilo, A.; Geric, K. **Weldability of High Hardness Armor Steel.** Adv. Mater. Res. 2016, 1138, 79–84. [CrossRef] 24. Cabrilo, A.; Sedmak, A.; Burzic, Z.; Perkovic, S. Fracture mechanics and fatigue crack propagation in armor steel welds. Eng. Fail. Anal. 2019, 106, 104155.
26. Bunaziv, I.; Wenner, S.; Ren, X.; Frostevarg, J.; Kaplan, A.F.; Akselsen, O.M. **Filler metal distribution and processing stability in laser-arc hybrid welding of thick HSLA steel.**
27. Alipooramirabad, H.; Paradowska, A.; Reid, M.; Ghomashchi, R. **Effects of PWHT on the Residual Stress and Microstructure of Bisalloy 80 Steel Welds.** Metals 2022, 12, 1569. <https://doi.org/10.3390/met12101569>.
28. Ade, F. **Ballistic Qualification of Armor Steel Weldments.** Weld. J. 1991, 70, 53–58.
29. Magudeeswaran, G.; Balasubramanian, V.; Reddy, G.M. **Hydrogen induced cold cracking studies on armour grade high strength, quenched and tempered steel weldments.** Int. J. Hydrog. Energy 2008, 33, 1897–1908.
30. Falkenreck, T.; Kromm, A.; Böllinghaus, T. **Investigation of physically simulated weld HAZ and CCT diagram of HSLA armour steel.** Weld. World 2018, 62, 47–54.
31. Hochhauser, F.; Ernst, W.; Rauch, R.; Vallant, R.; Enzinger, N. **Influence of the soft zone on the strength of welded modern HSLA steels.** Weld. World 2012, 56, 77–85.
32. Hanhold, B.; Babu, S.S.; Cola, G. **Investigation of heat affected zone softening in armour steels Part 1—Phase transformation kinetics.** Sci. Technol. Weld. Join. 2013, 18, 247–252.
33. Yurioka, N.; Suzuki, H. **Hydrogen assisted cracking in C-Mn and low alloy steel weldments.** Int. Mater. Rev. 1990, 35, 217–249.
34. Costin, W.L.; Lavigne, O.; Kotousov, A.; Ghomashchi, R.; Linton, V. **Investigation of hydrogen assisted cracking in acicular ferrite using site-specific micro-fracture tests.** Mater. Sci. Eng. A 2016, 651, 859–868.
35. Kurji, R.; Lavigne, O.; Ghomashchi, R. **Micromechanical characterisation of weld metal susceptibility to hydrogen-assisted cold cracking using instrumented indentation.** Weld. World 2016, 60, 883–897.

36. Alipooramirabad, H.; Paradowska, A.M.; Ghomashchi, R.; Kotousov, A.; Hoye, N. **Prediction of welding stresses in WIC test and its application in pipelines.** Mater. Sci. Technol. 2016, 32, 1462–1470.
37. Alipooramirabad, H.; Paradowska, A.; Lavigne, O.; Ghomashchi, R.; Reid, M. **In situ neutron diffraction measurement of strain relaxation in welds during heat treatment.** Sci. Technol. Weld. Join. 2017, 22, 484–495.
38. Alipooramirabad, H.; Paradowska, A.; Ghomashchi, R.; Reid, M. **Investigating the effects of welding process on residual stresses, microstructure and mechanical properties in HSLA steel welds.** J. Manuf. Processes 2017, 28, 70–81.
39. Kuzmikova, L. **An Investigation of the Weldability of High Hardness Armour Steels.** Ph.D. Thesis, University of Wollongong, Wollongong, Australia, 2013.
40. Jo, M.C.; Kim, S.; Suh, D.W.; Kim, H.K.; Kim, Y.J.; Sohn, S.S.; Lee, S. **Enhancement of ballistic performance enabled by transformation-induced plasticity in high-strength bainitic steel.** J. Mater. Sci. Technol. 2021, 84, 219–229.
41. Kaplan, D.; Murry, G. Thermal, **Metallurgical and Mechanical Phenomena in the Heat Affected Zone.** Metall. Mech. Weld. Process. Ind. Appl. 2008, 1, 89–131.
42. Zhao, M.S.; Chiew, S.P.; Lee, C.K. **Post weld heat treatment for high strength steel welded connections.** J. Constr. Steel Res. 2016, 122, 167–177.
43. Vural, M., Piroğlu, F., Çağlayan, Ö. B., Uzgider, E. (2003) **Yapı çeliklerinin kaynaklanabilirliği.** TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 426 - 2003/4.
44. MIL-DTL-46177C, **Detail Specification: Armor, Steel Plate and Sheet, Wrought, Homogeneous (1/8 To Less Than 1/4 Inch Thick),** 1998.
45. **“AM Rolled Armour Plate International Specification”** SSAB Öxelund, 2001.
46. MIL-A-12560H (MR), **“Armor Plate, Steel, Wrought, Homogeneous (for Use in Combat-Vehicles and for Ammunition Testing)”**, 1990.
47. Ş. Karagöz **“Zırh Çelikleri”** Zırh Teknolojileri Semineri, 2005, s.169-184.
48. H. Ş. Soykan, Z. Aslanoğlu, Y. Karakaş, **“Zırh Çeliklerinin Metalurjisi”**.
49. C. Çelik, M. Göçmen, O. Çoban, H. Baykal, U. Gürol, M. Koçak, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 28, Sayı 3, 2023.
50. B. Bitlisli, **“Zırhlı Araçlarda Kullanılan Kompozit Zırh Malzemelerinin Balistik Performanslarının İncelenmesi”** Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2019.

51. Kınıkoğlu, N. G., (2006). **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği**, Literatür Yayınları: 65, İstanbul, 499-506.
52. H. Atapek, **Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalurjik Esaslar Doğrultusunda Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu**, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006.
53. Aleris, **Defence aluminium product data sheet**, Switzerland, Aleris Switzerland GmbH, 2010.
54. Montgomery, J.S., and M.G.H. Wells, *Jom*, 53(4):29-32, 2001.
55. Jones, T. L. Et al., **Ballistic Evaluation of Magnesium Alloy AZ31B**. Aberdeen Proving Ground, MD: U.S. Army Research Laboratory, 2007b.
56. <https://www.bisalloy.com.au/product/bisalloy-armor-steel/> Erişim Tarihi: 14.03.2024
57. Bhatnagar, A. 2016. **Lightweight ballistic composites- Military and Law Enforcement Applications**. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, ISBN-10: 0-8493-9119-9.
58. Anık, S., Tülbentçi, K., “**Gazaltı kaynak tekniği, Kaynak Teknolojisi III**”, Gedik Kaynak San. Tic. A.Ş, İstanbul, 49 (1982). 59- ERYÜREK, B., Gazaltı kaynağı, As Kaynak, İstanbul (2004).
59. Uslu, S., “**Ark Kaynak Parametrelerinin Optimizasyonu**”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
60. AWS, 1991. “**Welding Processes**”, 8th Edition, USA.
61. D. Dudak, **STREX700 Çeliğinin Gazaltı Kaynak Yönteminde Mikro Yapısının İncelenmesi**, Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Denizli, 2019.
62. B. Oğuz, **Ark Kaynağı**, OERLIKON Yayını, 1989.
63. Kara S. ve Korkut M.H., “**Zırh Çeliklerinde Kaynak Ağzı Tasarımının Metalurjik ve -Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması**”, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt: 9, No: 1, (35-45), 2012.
64. Singh, R. (2012). **Physical Effect of Heat on Material During Welding, Applied Welding Engineering: Process, Codes and Standards** (Sayfa 171-174).
65. Bhadeshia, H. K. D. H. ve Honeycombe, S. R. (2006). **Steels: Microstructure and Properties**, Third Edition.
66. Weisman, G. (1981). **Welding Handbook Volume-1, America Society for Welding**, Florida.

67. Unfried, J., Garzon, C. M. ve Giraldo, J. E. (2009). **Journal of Material Processing Technology, Numerical and Experimental Analysis of Microstructure Evolution During Arc Welding in Armour Plate Steels**, (Sf 1688-1700).
68. Örenler, A., **Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2018
69. Balakrishnan M., Balasubramanian V., Madhusuhan R.G. ve Sivakumar K. **“Effect of Battering and Hardfacing on Ballistic Performance Of Shielded Metal.”**
70. Soy U, Iyibilgin O., Findik F., Oz C. ve Kıyan Y., **“Determination of Welding Parameters for Shielded Metal Arc Welding”** Scientific Research and Essays, Vol. 6(15), pp. 3153-3160, 11, 2011.
71. Ahmad R. ve Bakar M.A., **“Effect of A Post-Weld Heat Treatment On The Mechanical And Microstructure Properties Of AA6061 Joints Welded By The Gas Metal Arc Welding Cold Metal Transfer Method”** Materials and Design 32 (2011) 5120–5126.
72. Kara, S., **Çelik Esash Zırh Malzemesinin 307si Elektrotu ile Kaynak Edilebilirliğinin ve Mikroyapı Üzerindeki Etkisinin Deneysel Araştırılması**. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Elâzığ, 2012.
73. Akça C. ve Karaaslan A., **“Weldability Of Class 2 Armor Steel Using Gas Tungsten Arc Welding”**: Archives Of Materials Science And Engineering Cilt 34, No 2 sayfa 110-112 C., 2008.
74. Robledo, D.M., Gómez, J.A.A., Barrada, J.E.G., **“Development of a welding procedure for MII A 46100 armor steel joints using gas metal arc welding”**, National University Of Colombia, 168, 65-71, 2010.
75. Magudeeswaran G., Balasubramanian V. ve Madhusudhan Reddy G.” **Effect Of Welding Processes And Consumables On High Cycle Fatigue Life Of High Strength, Quenched And Tempered Steel Joints”** Materials and Design 29 1821–1827”, 2008.
76. MANGANELLO, S. J., WILSON, A. D., **Direct Quenching and its Effects on High-Strength Armor Plate**, Int. Symp. Low Carbon Steels for the 90’s, Ed. R. Asfahani, G. Tither, The Minerals, Metals & Materials Society, 235- 241, 1993.
77. Gingell, A. D. B., Bhadeshia, H. K. D. H., Jones, D. G., Mawella, K. J. A., **Carbide Precipitation in Some Secondary Hardened Steels**, J. Mater Sci. 32, 4815- 4820, 1997.
78. Thomson, R. C., **Characterization of Carbides in Steels Using Atom Probe FieldIon Microscopy**, Materials Characterization, 44 (1-2), 219-233, 2000.

79. <https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/P27.pdf>/Erişim Tarihi: 17.11.2023.
80. Ersin, R. C., **Isı Girdisinin Ve Kaynak Sonrası Gerilim Giderme Isıl İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi**, Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Gebze, 2009.
81. Krauss G., **Steels: Heat treatment and Processing Principles**, ASM, Materials Park, Ohio, 1990.
82. Işık, H., **Namlu İçerisindeki Balistik Parametrelerin Modellenmesi**, Savunma Bilimleri Dergisi, Kasım 2016, Cilt 15, Sayı 2 155-157.
83. <https://www.dovepress.com/gunshot-wounds-ballistics-pathology-and-treatment-recommendations-with-peer-reviewed-fulltext-article-ORR> / Erişim tarihi: 15.12.2023
84. Lowry E.D., **“Interior Ballistics”**, New York, Doubleday & Company, 1968.
85. Yanen, C., **Tabakalı Hibrit Kompozitlerin Bireysel Zırh Malzemesi Olarak Kullanabilirliğinin Araştırılması**, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2016.
86. Thomas J.H., **“Elements of Ordnance”**, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1938.
87. Verdi, A., Bulut, M. O., **NIJ Standardı Seviye-IV Korunmalı Zırh Bileşenlerinin İncelenmesi ve Balistik Koruma Standartları**, Teknik Bilimler Dergisi Cilt 12, Sayı 1, S. 69-81, Ocak 2022.
88. <https://www.mke.gov.tr/Urunler/Kategori/Muhimmat/12> / Erişim Tarihi: 15.03.2024
89. <https://tr.topwar.ru/139822-sovremennye-patrony-dlya-pistoleta-i-pistoleta-pulemeta.html> / Erişim Tarihi: 15.03.2024
90. [https://en.wikipedia.org/wiki/5.56%C3%9745mm\\_NATO](https://en.wikipedia.org/wiki/5.56%C3%9745mm_NATO) / Erişim Tarihi: 16.03.2024
91. Zukas, J.A. 1980. **Impact Dynamics: Theory And Experiment**. Technical report (ARBRL-TR-02271).
- 92- [https://en.wikipedia.org/wiki/7.62%C3%9751mm\\_NATO](https://en.wikipedia.org/wiki/7.62%C3%9751mm_NATO) / Erişim Tarihi: 16.03.2024
93. Rosenberg, Z., Dekel. E. 2012. **Terminal Ballistics** ISBN:978-3-642-25304-1.
94. Crouch, I.G., **The Science of Armour Materials**, Woodhead Publishing, 55-115, 2017.

95. Özgüder, O., Özbay, M., Adin, H., **Namlu İçi Balistik Davranışın Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi**, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Dergisi, Cilt:8, Sayı:3, 609-620.
96. Temiz, S., (2005), **Balistik Kumaş ve Test Yöntemleri Üzerine Bir Araştırma**, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
97. TS 11164 - **Balistik koruyucu vücut zırhı**.
98. TS 13349 - **Askerî zırhlar - V50 balistik hız deneyi**.
99. Candan, C., 2007, **Hafif Silahlara Karşı Preslenerek ve Preslenmeden Üretilen Yüksek Yoğunluklu Polietilen (UHMW-PE) Zırh Plakalarının Terminal Balistik Özelliklerinin İncelenmesi**, 8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, 7-9 Kasım 2007, İstanbul.
100. NIJ-STD-0101.04 - **Ballistic Resistance of Personal Body Armor**.
101. NIJ Standard-01.01.06 - **Ballistic Resistance of Personal Body Armor**.
102. Cerit, A.A., (2004), **Partikül ve Fiber Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitin Balistik Performansının İncelenmesi**, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
103. Standard, N. I. J., 0108.01: **Ballistic Resistant Protective materials**. US Department of Justice, National Institute of Justice, 1985.
104. Erdem, M., Türker, M., (2011), **7039 Alüminyum Alaşımının Kaynak Öncesi ve Sonrası Mekanik ve Balistik Özelliklerinin Araştırılması**, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 26, No 1, 17-26s.
105. MIL-STD-662F, "**V50 Ballistic Test For Armor**", 1997.
106. Karagöz, Ş., Atapek, Ş.H. ve Yılmaz, A., (2010), **Su Verilmiş ve Temperlenmiş Beynitik Bir Zırh Çeliğinin Balistik Davranışı: Hasar Üzerine Modelleme ve İncelemeler**, Savunma teknolojileri dergisi, Sayı: 053, 62-66s.
107. NATO AEP-55 STANAG 4569 NATO Standardization Agreement "**Protection Levels for Occupants of Logistic and Light Armored Vehicles**".
108. Saxena, A.; Kumaraswamy, A.; Reddy, G.M.; Madhu, V. **Influence of welding consumables on tensile and impact properties of multi-pass SMAW Armax 500T steel joints vis-a-vis base metal**. Def. Technol. 2018, 14, 188–195.
109. Ramana, P.V.; Reddy, G.M.; Mohandas, T. **Residual stress distribution in high strength low alloy steel weldments**. *Ind. J. Non Dest. Test Eval.* 2007, 6, 33–40.

110. Tomerlin, D., Marić, D., Kozak, D., Samardžić, I.; **Post-Weld Heat Treatment of S690QL1 Steel Welded Joints: Influence on Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stress.** *Materials* 2023, 14, 3617. <https://doi.org/10.3390/met13050999>.
111. Błacha, S., Wegłowski, M.S., Dymek, S., Kopu'scia'nski, M., 2016. **Microstructural characterization and mechanical properties of electron beam welded joint of high strength steel grade S690QL.** *Archives of Metallurgy and Materials* 61 (2B), 1193–1200. <https://doi.org/10.1515/amm-2016-0198>.
112. Sisodia R., Wegłowski M., Sliwinski P.; *Journal of Advanced Joining Processes* 9 (2024) 100182 **In situ localised post-weld heat treatment with electron beam welding of S690QL steel.** <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2023.100182>.

## ÖZGEÇMİŞ

Serkan KEÇE; lisans eğitimini 2015 yılında Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Mezun olduktan sonra YOL-BAK Yol Bakım ve Kar Mücadele Araçları San. Tic. A.Ş.'de sivil ve savunma sanayi projelerinde Üretim Mühendisliği ve Kalite Kontrol Yöneticisi olarak görev almıştır. Daha sonra CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri A.Ş.'de havacılık ve savunma projelerinde Uzman Kalite Mühendisliği yapmıştır. Şubat 2022'den beri kamu iştirak şirketi olan TRTEST Test ve Değerlendirme A.Ş.'de balistik testler üzerine Uzman Mühendis olarak görevine devam etmektedir.