

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**MAG KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN BİR ZİRH SACININ
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selma KASAL

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

MAYIS 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**MAG KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN BİR ZIRH SACININ
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Selma KASAL
(521181012)**

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU

MAYIS 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF AN ARMOR
SHEET WELDED BY MAG TECHNIQUE**

M.Sc. THESIS

**Selma KASAL
(521181012)**

Department of Materials Science and Engineering

Materials Science and Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU

MAY 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 521181012 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Selma KASAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “MAG KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN BİR ZIRH SACININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erdem ATAR
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **05 Mayıs 2024**
Savunma Tarihi : **31 Mayıs 2024**





Anneme ve Babama,



ÖNSÖZ

Değerli Hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na, kaynak ve ekipman destekleri için OTOKAR Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş. firmasına özellikle de OTOKAR Kalite ekibine teşekkür ederim.

Son olarak eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan değerli babam, annem, ablalarım ve kardeşime de sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2024

Selma KASAL
(Metalurji ve Malzeme Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxv
1. ZİRH ÇELİĞİ	1
1.1 Ultra Yüksek Sertlikte Zırh Çeliği (UHHA)	1
1.2 Çok Yüksek Sertlikte Zırh Çeliği (VHHA)	2
1.3 Yüksek Sertlikte Zırh Çeliği (HHA)	2
1.4 Haddelenmiş Homojen Zırh Çeliği (RHA).....	2
2. ZİRH SACI KAYNAĞINDA YAYGIN OLARAK KULLANILAN	
YÖNTEMLER	5
2.1 Korumalı Metal Ark Kaynağı (SMAW).....	5
2.2 Özlü Ark Kaynağı (FCAW)	6
2.3 Gaz Tungsten Ark Kaynağı (GTAW).....	6
2.4 Elektron Işın Kaynağı (EBW)	7
2.5 Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAW).....	8
3. ZİRH SACI KAYNAĞINDA YAYGIN OLARAK KULLANILAN DOLGU	
MALZEMELERİ.....	9
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	11
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	13
5.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması	13
5.2 Kaynak İşlemi.....	14
5.3 Kaynaklı Parçalarda Yapılan Testler ve Analizler	16
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	19
6.1 Mikroyapı Kontrolü ve Sertlik Testi Sonucu.....	19
6.2 Mekanik Test Sonuçları	21
6.2.1 Çekme testi sonucu	21
6.2.2 Çentik darbe testi sonucu.....	22
6.2.3 Eğme testi sonucu	23
6.2.4 Yorulma testi sonucu	24
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	27
KAYNAKLAR	29
EKLER.....	31
ÖZGEÇMİŞ.....	37



KISALTMALAR

ASS	: Austenitic Stainless Steel
CE	: Carbon Equivalent
EBW	: Electron Beam Welding
EDS	: Energy Dispersive Spectrometry
FCAW	: Flux Cored Arc Welding
GMAW	: Gas Metal Arc Welding
GTAW	: Gas Tungsten Arc Welding
HAZ	: Heat Affected Zone
HHA	: High Hardness Armor
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
LHF	: Low Hydrogen Ferritic Steel
MAG	: Metal Active Gas
RHA	: Rolled Homogeneous Armor
SDSS	: Super Duplex Stainless Steel
SMAW	: Shielded Metal Arc Welding
TIG	: Tungsten Inert Gas
UHHA	: Ultra High Hardness Armor
VHHA	: Very High Hardness Armor



SEMBOLER

°C : Celsius

MPa : Megapascal





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Zırh sacının kimyasal kompozisyonu [3].	3
Çizelge 5.1 : Bu çalışmada incelenen zırh sacının nominal kimyasal kompozisyonu (% ağı.) [18].	13
Çizelge 5.2 : Kaynak işlemi parametreleri.	15
Çizelge 5.3 : Östenitik paslanmaz çelik elektrodun kimyasal kompozisyonu [19]..	15
Çizelge 5.4 : Östenitik paslanmaz çelik elektrodun mekanik özellikleri [19].	15
Çizelge 5.5 : Su jeti kesiminde hedeflenen test numunesi boyutları.	17
Çizelge 6.1 : Tarama bölgelerine göre sertlik sonuçları.	21
Çizelge 6.2 : Çekme testi sonuçları.	21
Çizelge 6.3 : Çentik darbe testi sonuçları.	22
Çizelge 6.4 : Eğme testi sonuçları.	23
Çizelge 6.5 : Yorulma testi sonuçları.	24



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Korumalı metal ark kaynağı şematik gösterimi [2].....	5
Şekil 2.2 : Özlü ark kaynağı şematik gösterimi [2].	6
Şekil 2.3 : Gaz tungsten ark kaynağı şematik gösterimi [2].....	7
Şekil 2.4 : Elektron ışın kaynağı şematik gösterimi [2].....	8
Şekil 2.5 : Gaz metal ark kaynağı şematik gösterimi [2].....	8
Şekil 5.1 : a) Lazer tezgahında plaka kesimi. b) CNC tezgahında kaynak ağzı hazırlığı.....	13
Şekil 5.2 : X alın kaynağı için hazırlanmış kaynak ağzı geometrisi.....	14
Şekil 5.3 : Kaynak hazırlığı tamamlanmış plaka.	14
Şekil 5.4 : Kaynak paso sıralaması.	15
Şekil 5.5 : Filmin kaynak dikişine yerleştirilmesi.	16
Şekil 5.6 : Su jeti ile kesim sonrası kaynaklı plaka.	16
Şekil 5.7 : Çekme testi numunesi boyutları.	17
Şekil 5.8 : Eğme testi numunesi boyutları.	18
Şekil 5.9 : Çentik darbe testi numunesi boyutları.....	18
Şekil 5.10 : Yorulma testi numunesi boyutları.	18
Şekil 6.1 : Homojen haddelenmiş zırh sacı mikroyapısı 1000X büyütme.	19
Şekil 6.2 : Sertlik ölçüm taraması bölgeleri.....	19
Şekil 6.3 : Sertlik tarama sonuçları. a) Doğrudan kaynaklı numune. b) Ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune.	20
Şekil 6.4 : Maksimum sertlik tespit edilen bölgelerin mikroyapı görüntüsü 500X büyütme. a) Doğrudan kaynaklı numune. b) Ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune.....	21
Şekil 6.5 : Çekme testi numuneleri. a) Test sonrası çekme testi numuneleri. b) Test sonrası doğrudan kaynaklı numune. c) Test sonrası ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune.....	22
Şekil 6.6 : Darbe testi numuneleri. a) Test öncesi V çentikli numuneler. b) Test sonrası doğrudan kaynaklı numune. c) Test sonrası ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune.....	23
Şekil 6.7 : Eğme testi numuneleri. a) Test sonrası doğrudan kaynaklı numune. b) Test sonrası ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune.	24
Şekil 6.8 : Doğrudan kaynaklı numune kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü. a) Çatlak ilerleme bölgesi. b) Nihai kırılma bölgesi.	25
Şekil 6.9 : Ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü. a) Çatlak ilerleme bölgesi. b) Nihai kırılma bölgesi.	25
Şekil A.1 : Kaynaklı plaka radyografik muayene sonucu.	32
Şekil A.2 : Ön ısıtma sonrası kaynaklanan plaka radyografik muayene sonucu.....	32
Şekil B.1 : Doğrudan kaynaklı numune ITAB mikroyapı incelemesi.....	33
Şekil B.2 : Ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune ITAB mikroyapı incelemesi. ...	34
Şekil C.1 : Doğrudan kaynaklı numunelerin EDS sonuçları. a) 2.6 No'lu numune. b) 2.10 No'lu numune.....	35

Şekil C.2 : Ön ısıtma sonrası kaynaklanan numunelerin EDS sonuçları. a) 6.8 No’lu numune. b) 6.9 No’lu numune.....**35**



MAG KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN BİR ZIRH SACININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Zırh çelikleri ana muharebe tankları, zırhlı personel taşıyıcılar gibi araçlarda ilave zırh ve yapısal zırh olarak kullanılmaktadır. Bu çelikler kontrollü ısıtma, haddeme, ısıt işlem prosesleri uygulanarak istenen özelliklerde (işlenebilirlik, süneklik, sertlik, tokluk vb.) üretilir. Böylece yüksek deformasyon kapasitesi ve darbe direnci sayesinde balistik koruma özelliğine sahip olurlar.

Zırh çelikleri genellikle sertlik değerine göre sınıflandırılır. Zırh çeliği sınıflarına örnek olarak ultra yüksek sertlikte, çok yüksek sertlikte, yüksek sertlikte, orta sertlikte ve haddelenmiş homojen yapıda çelikler verilebilir. Zırh çeliklerine delme, frezeleme, testere ile kesme ve su jeti ile kesme mekanik operasyonları uygulanabilir. Lazerle kesme, delme, pahlama operasyonlarının yanında oksijenle kesme işlemi de zırh çeliklerinde kullanılan termal operasyonlara örnektir.

Zırh çelikleri korumalı metal ark kaynağı, özlü ark kaynağı, gaz tungsten ark kaynağı, gaz metal ark kaynağı, elektron ışın kaynağı gibi yöntemler kullanılarak kaynaklanabilirler. Zırh çeliklerinin yüksek karbon içeriği istenilen sertlik özelliklerini sağlarken kaynaklanabilirliği olumsuz yönde etkiler. Gaz metal ark kaynağı, korumalı metal ark kaynağı gibi kaynak yöntemleri ve östenitik paslanmaz çelik, düşük hidrojen ferritik çelik, dubleks paslanmaz çelik gibi dolgu malzemeleri (elektrotlar) ile daha başarılı kaynak yapılabilme imkanı vardır.

Kaynak sonrası tahribatsız ve tahribatlı muayeneler yapılarak kaynak kalitesinin standartlara ve müşteri taleplerine uygunluğu kontrol edilir. TS EN ISO 15614-1 standardında belirtildiği gibi görsel muayene, sıvı penetrant testi, radyografik muayene, manyetik parçacıkla muayene ve ultrasonik muayene tahribatsız muayenelere örnek verilebilir. Bağlantı geometrisine bağlı olarak kullanılabilecek tahribatlı muayene yöntemleri ise enine çekme testi, eğme testi, makro değerlendirme, darbe testi ve sertlik testidir.

Bu çalışmada ana muharebe tankları, zırhlı personel taşıyıcılar gibi araçlarda kullanılan şok ve patlama dalgalarına karşı maksimum direnç sunan, nispeten düşük sertlikte, yüksek tokluğa sahip homojen haddelenmiş zırh çeliğinin kaynak özellikleri incelenmiştir. Çalışmada kaynak uygulanmış zırh çeliği plakalarında kaynak bölgesinin yapısal ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Deneyisel çalışmalar için 25,9 mm kalınlığındaki homojen haddelenmiş zırh çeliği sacı lazer tezgahında 200 mm genişliğinde 600 mm uzunluğunda plakalar haline getirilmiştir. Bu plakaların kaynak ağzı açılacak olan lazerle kesilmiş kenarları penetrant testi ile kontrol edilmiş ve kusur tespit edilen bölgeler taş ile temizlenmiştir. Bu işlem sonrası CNC tezgahında X formunda kaynak ağzı açılmıştır. Kaynak ağzı, kaynak dikişi sacın hadde yönüne paralel olacak şekilde açılmıştır.

Kaynak otomatik kaynak makinesi kullanılarak gaz metal ark kaynağı yöntemlerinden olan MAG kaynak yöntemi ile % 5 CO₂, %5 O, % 90 Ar karışım gaz ortamında yapılmıştır. Plakalar, X kaynak ağzının alt tarafı 4 paso üst tarafı 4 paso olmak üzere toplam 8 pasoda kaynaklanmıştır. Bir yüzeyin kaynağı 4 paso ile tamamlandıktan sonra diğer yüzeye başlanmadan önce kök bölgesi penetrant testi ile kontrol edilmiştir. Kaynak işleminde östenitik paslanmaz çelik elektrot kullanılmıştır. Kaynak işlemi kaynak ağzına ön ısıtma uygulamadan ve ön ısıtma uygulayarak (doğrudan kaynak ve ön ısıtma sonrası kaynak olarak adlandırılmıştır) gerçekleştirilmiştir. Ön ısıtma işlemi üfleç ile gerçekleştirilmiş ve ön ısıtma sıcaklığı 200 °C civarında tutulmuştur. Ön ısıtma uygulanmış yüzeyin kaynağı 4 paso ile tamamlandıktan sonra diğer yüzeyde de 200 °C sıcaklık hedeflenerek ön ısıtma işlemi yapılmıştır.

Kaynak işlemi sonrasında kaynak bölgesine tahribatsız muayene yöntemleri uygulanmıştır. Bu kapsamda görsel muayene TS EN ISO 17637 standardına uygun olarak yapılmıştır. Penetrant testi EN 3452-1 standardına uygun olarak Tip II C metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Radyografik muayene ise TS EN ISO 17636-1 standardına göre X-Ray metodu kullanılarak yapılmıştır. Kaynaklarda tahribatsız muayeneler EN 5817 standardı B kalite seviyesine göre değerlendirilmiş ve bu çalışma kapsamında yapılan kaynaklarda herhangi bir hata veya süreksizliğe rastlanmamıştır.

Kaynaklı plakalar su jeti mekanik operasyonu ile ISO 15614-1:2017 standardına göre sertlik, yorulma, çekme, eğme, çentik ve mikroyapı numuneleri hazırlamak üzere kesilmiştir.

Mikroyapı numuneleri standart metalografik yöntemlere göre hazırlandıktan sonra mikroskobik incelemeler için dağlanmışır. Dağlama işleminde zırh sacı için %3 Nital çözeltisi, östenitik paslanmaz çelik elektrot için ise V2A çözeltisi kullanılmıştır.

Sertlik ölçümleri zımparalanıp dağlanan numunelerin kaynak bölgesinin üst, orta ve alt bölgelerinde ana metal, ısı tesiri altındaki bölgeyi ve kaynak dikişini kapsayacak şekilde 10 kg yük ile Vickers sertlik yöntemine göre yapılmıştır.

Çekme testi numuneleri TS EN ISO 4136:2022 standardına göre, eğme testi numuneleri TS EN ISO 5173 standardına göre, çentik darbe testi numuneleri TS EN ISO 148-1 standardına göre hazırlanmıştır.

Yapısal ve mekanik incelemelerde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Çalışmaya konu olan çelik temperlenmiş martenzitik mikroyapıya sahip olup ön ısıtma işlemi martenzitik mikroyapıda kayda değer bir değişikliğe neden olmamıştır.

Hem doğrudan kaynaklı hem de ön ısıtma sonrası kaynaklanan numunede maksimum sertlik değeri ITAB bölgesinden elde edilmiştir. Ön ısıtma işleminin ana metal, ITAB ve kaynak dikişi bölgelerindeki sertlik değerlerine belirgin bir etkisi olmamıştır.

Çekme testi kaynaklı, doğrudan kaynaklı ve ön ısıtma sonrası kaynaklanan numunelere yapılmıştır. Doğrudan kaynaklı ve ön ısıtmalı numunelerde yapılan çekme testleri sonucunda kopma kaynak dikişinden gerçekleşmiştir. Test sonucuna göre kaynaklı zırh çeliği akma mukavemetinin (838 MPa) kaynaklı numunede 550 ve 553 MPa'a, ön ısıtmalı numunede ise 548 ve 551 MPa'a düştüğü tespit edilirken; çekme mukavemetinin (928 MPa) ise kaynaklı numunede 814 ve 764 MPa'a, ön ısıtmalı numunede 779 ve 791 MPa'a düştüğü tespit edilmiştir.

Doğrudan kaynaklı ve ön ısıtma sonrası kaynaklanan numuneler eğme testine tabi tutulmuştur. Kaynaklı numunelerin 2 adedinde, ön ısıtmalı numunelerin 1 adedinde kaynak dikişinde kırılma gerçekleşmiştir.

Kaynak dikişinde V tipi çentik oluşturularak hazırlanan numuneler oda sıcaklığında çentik darbe testine tabi tutulmuştur. Test sonucuna göre absorbe edilen darbe enerjisi kaynaklı numunede 108, 110 ve 106 J iken ön ısıtılmalı numunede ise 117, 117 ve 113 J olarak ölçülmüştür.

Dönel eğmeli yorulma cihazında 450 MPa gerilme genliği ($R = -1$) altında ve 30 Hz frekansta yapılan yorulma deneyinde kaynaklı numuneler $5,6 \times 10^4$ ve $6,2 \times 10^4$ çevrim sayılarında ön ısıtılmalı numuneler ise $13,3 \times 10^4$ ve $64,4 \times 10^4$ çevrim sayılarında kırılmıştır. Kırılmalar kaynak dikişinde gerçekleşmiş olmasına rağmen uygulanan ön ısıtma işlemi yorulma ömründe kayda değer bir artış sağlamıştır.

Sonuç olarak; Zırh çeliğine uygulanan kaynak işlemi öncesinde yapılan 200 °C'lik ön ısıtmanın ön ısıtma uygulanmayan koşula göre sertlik ve mukavemeti değiştirmedığı ancak yorulma ömründe kayda değer bir artış sağladığı belirlenmiştir.





INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF AN ARMOR SHEET WELDED BY MAG TECHNIQUE

SUMMARY

Armour steels are used as reinforcement and/or structural armour components in vehicles such as main battle tanks, armoured personnel carriers. These steels are produced with the desired properties (machinability, ductility, hardness, toughness, etc.) by applying controlled heating, rolling and heat treatment processes. Thus, they have superior ballistic protection thanks to their high deformation capacity and impact resistance.

Armour steels are generally classified according to their hardness. Examples of armour steel classification are ultra-high hardness, very high hardness, high hardness, medium hardness and rolled homogeneous structure steels. Mechanical operations such as drilling, milling, sawing and water jet cutting can be applied to armour steels. In addition to laser cutting, drilling and chamfering operations, oxygen cutting can be given as an example for thermal operations used in armour steels.

Armour steels can be welded using methods such as shielded metal arc welding, flux cored arc welding, gas tungsten arc welding, gas metal arc welding, electron beam welding. While the high carbon content of armour steels provides the desired hardness properties, it affects the weldability negatively. Successful welding via gas metal arc welding and shielded metal arc welding techniques can be done by using austenitic stainless steel, low hydrogen ferritic steel and duplex stainless steel electrodes.

After welding, non-destructive and destructive examinations should be carried out to check that the weld quality complies with the standards and customer demands. In TS EN ISO 15614-1 standard, visual inspection, liquid penetrant test, radiographic examination, magnetic particle inspection and ultrasonic examination are examples of non-destructive examinations. Destructive testing methods that can be used depending on the joint geometry are transverse tensile test, bending test, macroscopic investigation, impact test and hardness test.

In this study, the welding properties of homogeneous rolled armour steel with relatively low hardness and high toughness, which offers maximum resistance to shock and blast waves used in vehicles such as main battle tanks and armoured personnel carriers, were investigated. In the study, the structural and mechanical properties of the weld zone in welded armour steel plates were focused.

For the experimental studies, 25,9 mm thick homogeneous rolled armour steel sheet was cut into 200 mm wide and 600 mm long plates on a laser machine. The laser-cut edges of these plates to be welded were checked by penetrant test and the defects were removed with grinder. After this process, an X-shaped welding groove was opened on the CNC machine. The welding groove was opened in such a way that the weld seam was parallel to the rolling direction of the sheet.

Welding was performed by MAG welding method, which is one of the gas metal arc welding methods, using an automatic welding machine in 5 % CO₂, 5 % O, 90 % Ar mixture gas environment. The plates were welded in a total of 8 passes, 4 passes on the lower side and 4 passes on the upper side of the X welding groove. After the welding of one surface was completed with 4 passes, the root zone was checked by penetrant test before starting the other surface. Austenitic stainless steel electrode was used in the welding process. The welding process was carried out with and without preheating. The preheating process was carried out by blowtorch and the preheating temperature was kept around 200 °C for both surfaces.

After the welding process, non-destructive tests were applied to the welding zone. In this context, visual inspection was performed in compliance with TS EN ISO 17637 standard. Penetrant test was carried out using Type II C method in accordance with EN 3452-1 standard. Radiographic examination was effected using X-Ray method according to TS EN ISO 17636-1 standard. Non-destructive testing of welds was evaluated based on EN 5817 standard B quality level and no defects or discontinuities were found in the welds.

The welded plates were cut by water jet mechanical operation to prepare hardness, fatigue, tensile, bending and microstructure test specimens according to ISO 15614-1:2017.

Microstructure specimens were prepared based on standard metallographic methods and then etched for microscopic examination. In the etching process, 3 % Nital solution was used for the armour plate and V2A solution was used for the austenitic stainless steel electrode.

Hardness measurements were carried out in the upper, middle and lower parts of the weld zone of the specimens with a load of 10 kg by using a Vickers hardness tester.

Tensile test specimens, flexure test specimens and impact test specimens were prepared according to TS EN ISO 4136:2022, TS EN ISO 5173, TS EN ISO 148-1 standards respectively.

The results obtained in structural and mechanical investigations are summarised below.

The examined steel has got tempered martensitic microstructure. The applied preheating process did not cause a remarkable change in the microstructure.

The maximum hardness value was obtained at the HAZ in both direct and preheated welded steels.

Tensile tests were carried out on as received, direct and preheated welded specimens. As a result of the tensile tests performed on direct and preheated welded specimens, the rupture occurred at the weld seam. The yield strengths of as received (1 sample), direct (2 sample) and preheated (2 sample) welded specimen were determined as 838 MPa, 550 MPa, 553 MPa, 548 MPa and 551 MPa, respectively. The lower yield strength values obtained from the welded specimens was due to the accumulation of deformation in the austenitic weld seam.

Direct and preheated welded specimens were subjected to bending test. For the direct welding condition 2 out of 4 specimens were broken at weld seam. In the case of preheated weld condition 1 out of 4 specimen were broken at the same location.

Impact test were conducted on the sample specimens after forming a V type notch at the weld seem. The impact energy values were quantified as 108, 110 and 106 J for the direct welded and 117, 117 and 113 J for the preheated welded specimen. There was no significant improvement in impact strength with preheating.

In the fatigue test performed under 450MPa stress amplitude ($R = -1$) and a frequency of 30 Hz in a rotational bending fatigue machine, the direct welded specimens were fractured after $5,6 \times 10^4$ and $6,2 \times 10^4$ cycles. For the preheated welded specimens number of the cycles the failure was $13,3 \times 10^4$ and $64,4 \times 10^4$ cycles. Although the fractures took place in the weld seam, the preheating treatment provided a remarkable increase in fatigue life.

It is finally concluded that, the application of preheating at 200 °C did not cause remarkable change in the mechanical properties except the fatigue resistance. Preheating provided more than 5 times increases in fatigue life.





1. ZIRH ÇELİĞİ

Zırh delinme ve parçalanma gibi çeşitli savaş alanı tehditlerine karşı optimize edilmiş performans sağlamak için gereklidir [1]. Zırh çelikleri yüksek mukavemet, tokluk ve sertlik özellikleri gösteren düşük karbonlu çeliklerdir. Cr, Mo, Ni, Mn alaşım elementlerini içerirler. Muharabe araçlarında mermilerin kütlesi ve darbe hızı ile oluşan kinetik enerjiye karşı koruma sağlarlar. Zırh çeliklerinin yüksek sertlikte olması balistik performansı iyileştirirken karbon miktarı ve karbon eşdeğerindeki (CE) artış kaynak bölgesinde iç gerilmeyi artırarak kaynak kabiliyetini azaltır. Kaynaklanabilirlik özelliği düşük karbonlu çelikler için mükemmel, orta karbonlu çelikler için iyi ila orta, yüksek karbonlu çelikler için zayıftır [2]. MIL-DTL-12560K standardında kalınlığa göre karbon eşdeğeri (CE) tanımlanmıştır. CE ağırlıkça kalınlığı 50,8 mm az olan levhalar için %0,80'ten az olmalıdır [3]. Karbon eşdeğeri ASTM A6/A6M standardına göre denklem 1.1'de belirtildiği gibi hesaplanır.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1.1)$$

Zırh sacının balistik performansı malzeme sertliğinin yanı sıra mermiye, zırh kalınlığına ve zırh sağlamlığına bağlıdır. Zırhın tek başına yapısal zırh ya da ilave zırh olarak kullanılacak olması optimum zırh seçimi için kriterdir [1].

Yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve yüksek sertlikleri nedeniyle su verilmiş ve temperlenmiş çelikler askeri araçların yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır [5].

Yaygın olarak kullanılan zırh çeliklerine ultra yüksek sertlikte, çok yüksek sertlikte, yüksek sertlikte ve haddelenmiş homojen yapıda çelikler örnek olarak verilebilir. Bu zırh çeliklerinin tabi oldukları standartlar sırası ile MIL-DTL-32332, MIL-DTL-46186A, MIL-DTL-46100E ve MIL-DTL-12560K'dır.

1.1 Ultra Yüksek Sertlikte Zırh Çeliği (UHHA)

Tasarım optimizasyonu ve malzeme mühendisliğindeki çalışmalar ile zırhlı savaş araçlarında ağırlık azaltılabilir. Bu konudaki çalışmalarda malzeme kullanımı ve

maliyet azaltımının yanında yüksek arazi bölgesindeki hareketlilik artırılarak yapısal verimlilik sağlanır. Ana muharebe tanklarında hareket kabiliyetini ve taşınabilirliği azaltan 60 tonun üzerinde haddelenmiş homojen zırh sacı kullanılmaktadır. Bu durum 600 BHN sertliğine ve 2100 MPa çekme mukavemetine sahip ultra yüksek sert zırh çeliğinin geliştirilmesine neden olmuştur. Mukavemet ve tokluklarını kimyasal bileşim ve ısıtıl işlem üzerindeki kontrol sayesinde elde eden UHHA çelikleri gaz metal ark kaynağı ve korumalı metal ark kaynağı gibi kaynak yöntemleri kullanılarak zırhlı savaş araçları üretilir [6]. 650 HBW sertlikteki çelikler ise ilave zırh olarak kullanır ve tavizsiz balistik direnç performansı sağlarlar [7].

1.2 Çok Yüksek Sertlikte Zırh Çeliği (VHHA)

Çok hafif ila orta ağırlıktaki araç yapıları, ilave zırh, barınaklar gibi hafif zırh uygulamalarına yönelik çok yüksek sertlikte bir koruma çeliğidir. Atölye uygulamasının ultra yüksek sertlikte bir zırhın kullanımına izin vermediği ve yüksek sertlikte bir zırhın ağırlığının kabul edilmediği çalışmalarda kullanılır [8].

1.3 Yüksek Sertlikte Zırh Çeliği (HHA)

Yüksek sertlikte zırh sacı muharebe tanklarında ilave zırh veya tanklara takılan zırh modüllerinin bileşeni olarak kullanılabilir [9]. Zırh ağırlığı savaş araçları için kısıtlayıcı bir faktör olmuştur. Çelik zırhın balistik özelliği ısıtıl işlem uygulamaları ve yeni alaşım tasarımları ile iyileştirilebilir. Bu yaklaşım ile haddelenmiş homojen zırh sacına karşı yüksek sertlikte zırh sacı elde edilmiştir. Belirli bir balistik koruma seviyesinde yüksek sertlikte zırh sacı haddelenmiş homojen zırh sacı ile kıyaslandığında ağırlık yaklaşık %20 azalır [10]. Yüksek sertlik zırh saclarının gerilmeli korozyon çatlamasına karşı hassasiyeti tuzlu su ortamında fazladır [1].

1.4 Haddelenmiş Homojen Zırh Çeliği (RHA)

Haddelenmiş homojen zırh çeliği düşük maliyet, yüksek güvenilirlik, üretim altyapısının kullanılabilirliği, imalat kolaylığı ve yapısal malzeme olarak eş zamanlı kullanımı avantajları sayesinde birinci sınıf konumunu korumakta ve dünya çapında çoğu tankta standart zırh olarak kullanılmaktadır. MIL-DTL-12560 standardına göre sınıf 2 dövme zırh plakası, tanksavar kara mayınların, el bombalarının, patlayan

mermilerin ve diğer patlama üreten silahlarının neden olduğu yüksek oranda şok yükleme koşullarına maksimum direncin gerekli olduğu alanlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır [3]. Çeliklerde temperlemeyi içeren ısıtıl işlem ile temperlenmiş martensitik mikroyapı sağlanır. Mikro alaşımlama, kalıntı şekil kontrolü, termomekanik işlem ve tane inceltme metodları kullanılarak malzemenin sertlik değeri artarken yeterli tokluğu korur [9]. Zırh sacına uygulanacak kaynak işleminde yapıda herhangi bir mikroyapısal değişiklik kabul edilemez fakat kaynak sırasında ısıdan etkilenmiş bölgede termal döngüler nedeniyle mikroyapı değişikliği oluşur. Isı döngü değişikliklerinin sayısı ve niteliği malzemenin karakteristiğini etkilediği için ısıdan etkilenen bölgede yumuşama veya katılaşma ya da hidrojen gevrekliği gibi istenmeyen etkiler oluşabilir. Optimize edilmiş ısı girdisi ve az sayıda kaynak geçişi olan kaynak yöntemleri kullanılarak sacın özellikleri korunabilir [11]. MIL-DTL-12560K standardında belirtilen zırh sacı kimyasal kompozisyon içeriği Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1 : Zırh sacının kimyasal kompozisyonu [3].

Element	Beyan Edilen Kimya için Maksimum Limit (Ağırlık %)	Gelecekteki Üretim Grupları İçin İzin Verilen Aralık (Ağırlık %)
C	0,27 (50,8 mm e kadar)	±0,05
Mn	≤	±0,15
	>	±0,20
P	0,020 ¹	— ⁴
s	0,010 ¹	— ⁴
Si	Gerekli değil, Eğer kullanılacaksa :	
	< 0,60	± 0,10
	> 0,60 to < 1,00	± 0,15
	> 1,00	± 0,20
Ni	Gerekli değil ³	±0,25
Cr	< 1,25 ^{3/}	±0,15
	> 1,25	±0,25
Mo	< 0,20 ³	±0,035
	> 0,20	±0,075

Çizelge 1.1 (devam) : Zırh sacının kimyasal kompozisyonu [3].

Element	Beyan Edilen Kimya için Maksimum Limit (Ağırlık %)	Gelecekteki Üretim Grupları İçin İzin Verilen Aralık (Ağırlık %)
V	Gerekli değil ³	±0,05
Nb	Gerekli değil ³	± 0,05
B	— ²	— ⁴
Cu	0,25 ³	— ⁴
N	0,03 ³	— ⁴
Ti	0,10 ³	— ⁴
Al	0,10 ³	— ⁴
Pb	0,01 ³	— ⁴
Sn	0,02 ³	— ⁴

1/ Fosfor ve kükürt toplamı ağırlıkça % 0,020'yi geçmeyecektir.

2/ Alaşımda bor miktarı belirtildiğinde ısı analizi ile belirlenen içeriği yüzde 0,003'ü geçemez.

3/ Bir elementin miktarı yüzde 0,02'den az olduğunda analiz [< ağırlıkça % 0,02] olarak rapor edilebilir.

4/ Gelecekteki partiler için izin verilen değerlerde herhangi bir sınırlama yoktur; ancak değerler maksimum sınır olarak listelenen değerleri aşamaz.

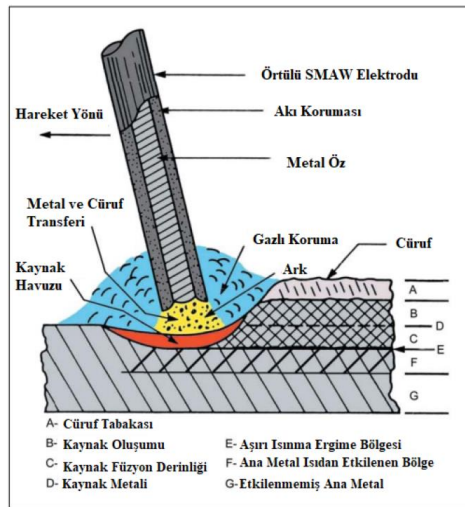
5/ Değerler yüzde toleranslar değil, gerçek tolerans sınırlarıdır.

6/ Tabloda yer almayan ancak kasıtlı olarak eklenen unsurlar rapor edilecektir.

2. ZIRH SACI KAYNAĞINDA YAYGIN OLARAK KULLANILAN YÖNTEMLER

2.1 Korumalı Metal Ark Kaynağı (SMAW)

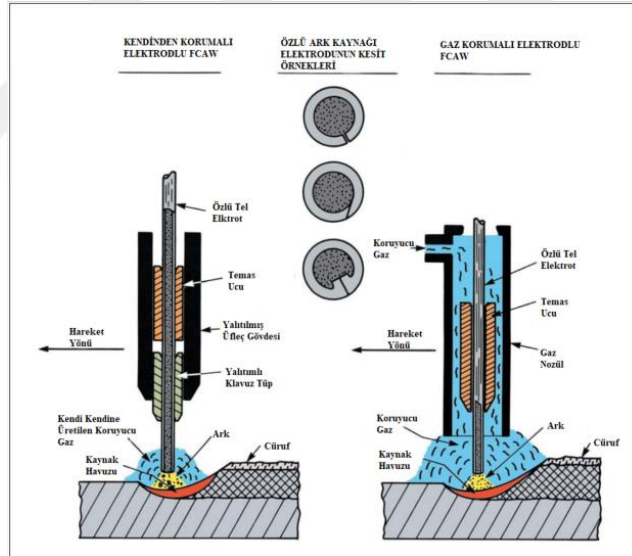
Korumalı metal ark kaynağı halk dilinde örtülü kaynak ya da ark kaynağı olarak tanımlanır, örtülü elektrot ile kaynak havuzu arasında ark kullanılarak yapılır. Kaynak işlemi basınç uygulamadan gerçekleştirilir. Elektrot florürler, karbonatlar, oksitler, metal alaşımları ve selüloz gibi toz halindeki malzemelerin ekstrüde edildiği bir tel çekirdekten ve etrafında eşmerkezli bir silikat bağlayıcı karışımından oluşur. Güç kaynağının bir ucu elektrot tutucuya diğer ucu iş parçasına bağlanır. Arkın oluşturduğu ısı ile yakın bölgedeki ana metal, elektrodun metal çekirdeği ve kaplaması erir. Ark ısı ile tüketilen kaplama ark stabilizasyonu sağlayarak çalışma performansını iyileştirir; koruyucu buhar üretir; deoksidan vb. temizleyicilerle kaynağı temizler ve oluşturduğu cüruf ile sıcak kaynak metali üzerinde fiziksel bir koruma sağlar. Kaplamadaki metal tozları, tel çekirdek ve erimiş ana metal kaynağı oluşturur. Ekipman olarak güç kaynağı, elektrik kabloları, elektrot tutucu ve iş parçası uç kelepçesi kullanılır. Ekipmanın basitliği, düşük maliyet, kapalı alanda uygulama imkanı gibi avantajlara sahiptir. İşlem sırasında kişisel koruyucu ekipmanlar kullanılmalıdır [2].



Şekil 2.1 : Korumalı metal ark kaynağı şematik gösterimi [2].

2.2 Özlü Ark Kaynağı (FCAW)

Özlü ark kaynağında elektrot boru şeklindedir ve akı içeren bir çekirdeğe sahiptir. Elektrot çekirdeğindeki akı, korumalı metal ark elektrodu üzerindeki kaplamayla aynı işlevleri görerek oksit gidericiler, temizleyiciler, cüruf ve buhar oluşturunucı bileşenler içerir ve arkı stabilize eder. Dışarıdan ilave gaz gerekmeden elektrottan gelen koruyucu gazlar ile kaynak yapılır [2]. Akım yoğunluğu belirli bir elektrot boyutu ve akımıyla gaz metal ark kaynağında kullanılan elektrotlara göre daha yüksektir. Akı özlü elektrotlar katı yerine boru şeklinde olması ve akı çekirdeğinin metalden daha az yoğunluğa ve akım taşıma kapasitesine sahip olması nedeniyle akım yoğunluğu artar. Cüruf bileşenleri atmosferden korumaya destek olur fakat kaynak metali haline gelmez bu nedenle işlem verimliliği gaz metal ark kaynağına göre düşüktür [2]. Korumalı metal ark kaynağı ile kıyaslandığında üretkenlik potansiyeli yüksek akım yoğunluğu ve elektrotları sık sık değiştirmek için durmaya gerek olmaması nedeniyle yüksektir. Karoserilerden, inşaat yapı elemanlarına kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir [2].

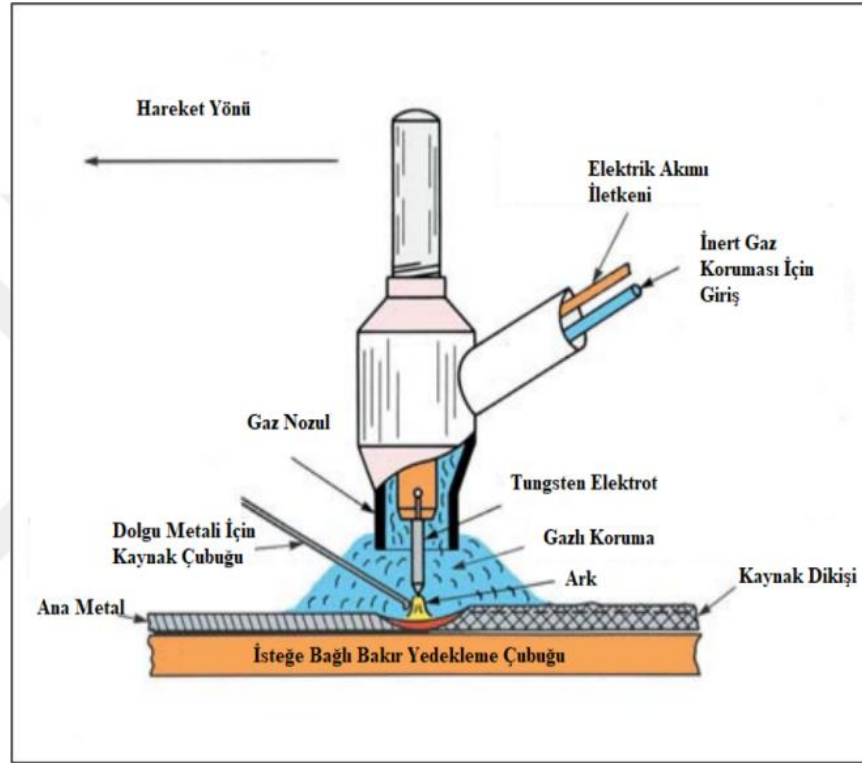


Şekil 2.2 : Özlü ark kaynağı şematik gösterimi [2].

2.3 Gaz Tungsten Ark Kaynağı (GTAW)

TIG kaynağı olarak adlandırılan gaz tungsten ark kaynağı işleminde tüketilmeyen tungsten elektrodu kullanılır. Bu yöntem tüm kaynak pozisyonlarında, kaynaklanabilen bütün demir ve demir dışı alaşımları birleştirmek için kullanılan çok yönlü bir ark işlemidir. Çok ince malzemelere dolgu metali kullanılarak veya kullanılmadan kaynak yapılması mümkündür. Kullanılan koruyucu gaz genellikle

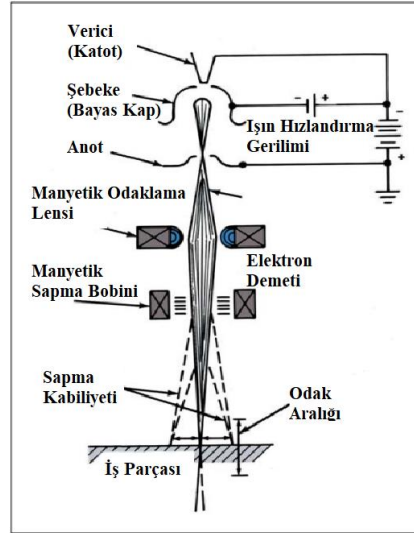
kimyasal reaksiyonlara katılmaz, inerttir. Koruyucu gaz olarak argon, helyum ve karışımları kullanılabilir. Bu gazlar ortam atmosferinin yerini alarak zararlı reaksiyonları önler. Reaktif olmayan bir atmosferde kaynak işlemi yapılmasına olanak sağlayan inert gazlar faydalı reaksiyonları da inhibe edebilir. Bu durumu iyileştirebilmek için inert gazlarla hidrojen ve nitrojen gibi reaktif gazlar karıştırılabilir. Tungsten elektrot içerdiği toryum oksit sayesinde erimeden yüksek akım taşıma kapasitesine sahip olur [2].



Şekil 2.3 : Gaz tungsten ark kaynağı şematik gösterimi [2].

2.4 Elektron Işın Kaynağı (EBW)

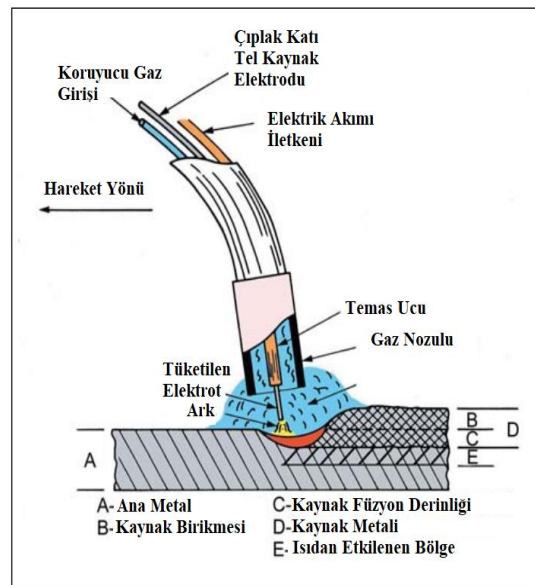
Elektron ışın kaynağında yüksek hızlı elektronlar yoğun bir ısıtma kaynağı sağlamak için ışın haline getirilerek birleştirme işlemi gerçekleştirilir. Kaynak işleminde genellikle kullanılan ana ekipmanlar; güç kaynağı, elektron ışın tabancası, vakum odası, kontrolör ve görüntüleme sistemidir. Işık hızının % 30 ila % 70'ine kadar hızlandırılan elektronlar elektriksel olarak uyarılmış, negatif yüklü katottan dağılır ve ışın pozitif yüklü anot tarafından şekillendirilir. Işın manyetik odaklama bobini ile kaynağa odaklanır ve çok küçük olabileceği için kurulum ve kenar hazırlığının hassas olması gerekir. İşlemde vakum kullanılırsa oksidasyona karşı etkili koruma sağlanır [2].



Şekil 2.4 : Elektron ışın kaynağı şematik gösterimi [2].

2.5 Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAW)

Gaz metal ark kaynağı metal ark, tüketilebilir bir elektrot ve dışarıdan eklenen koruyucu gaz kullanımını içerir. MIG veya tel besleme kaynağı olarak da adlandırılabilir. Bu işlem farklı ark modları, elektrotlar ve koruyucu gazlar ile demirli ve demirsiz birçok metali kaynaklarken kullanılır. Koruyucu gaz olarak karbondioksit, argon ve karbondioksit karışımı veya farklı gazlarla karıştırılmış karbondioksit kullanılabilir ve genellikle tamamen inert değildir. Argona % 5'e kadar oksijen ilavesi ile daha düzgün ark performansı, daha az sıçrama ve kaynağın ana metale daha fazla yayılması ve yapışması mümkün olabilir [2].



Şekil 2.5 : Gaz metal ark kaynağı şematik gösterimi [2].

3. ZIRH SACI KAYNAĞINDA YAYGIN OLARAK KULLANILAN DOLGU MALZEMELERİ

Zırh sacında kullanılan dolgu malzemelerine örnek olarak östenitik paslanmaz çelikler, yüksek nikel çelikleri, süper dubleks paslanmaz çelikler ve düşük hidrojenli ferritik çelikler verilebilir. Su verilmiş ve temperlenmiş çelikler, kaynak sonrası ısıdan etkilenen bölgede yumuşamaya ve hidrojen kaynaklı çatlamaya eğilimlidir. Bu problemin kaynağı atmosferden ve elektrotlardan gelen hidrojen ve termal kaynak döngüsüdür [12]. Elektrot seçimi ve kaplamasının soğuk çatlamayı önlemek için dikkate alınması kritiktir. Ni bazlı elektrotlar balistik performans gibi diğer önemli özellikleri karşılamalıdır. ASS, LHF ve SDSS elektrotlar ise balistik olarak kanıtlanmıştır [6]. Eşit miktarda ferrit ve östenit üretebilen ve mukavemet özelliklerini geliştirebilen geliştirilmiş Cr_{eq}/Ni_{eq} oranına sahip süper dubleks paslanmaz çelik elektrotlar yapısal özelliklerin iyileştirilmesinde kullanılabilir [6]. Su verilmiş ve temperlenmiş çeliklerinin kaynağında hidrojenin neden olduğu çatlamayı önlemek için östenitik fazda daha yüksek hidrojen çözünürlüğüne sahip olan östenitik paslanmaz çelik ve yüksek nikelli çelik kaynak sarf malzemeleri kullanılmaktadır [13]. Termal gerilimin azaltılması, karbonun östenitik paslanmaz çelik elektroduna doğru taşınması ve zırh çeliği kaynağında gerekli olan minimum darbe dayanımının (-40 °C'de 15 J) elde edilmesi nedeniyle östenitik paslanmaz çelik elektrotlar dikkate alınır [12]. Fakat östenitik paslanmaz çelik elektrotlar kaynak bölgesinde östenit ve delta ferrit çift yönlü mikroyapısı nedeniyle bağlantı verimliliğini büyük ölçüde azaltır [14]. Kaynakta östenitik paslanmaz çelik ve yüksek nikelli çelik sarf malzemelerin paslanmaz çelik olmayan bir ana metal için kullanımının pahalı olması nedeniyle alternatif elektrot olarak düşük maliyetli bir sarf malzemesi olan düşük hidrojenli ferritik çelikler kullanılır. Düşük hidrojen ferritik çelik elektrot malzemesi ile üretilen zırh sınıfı su verilmiş ve temperlenmiş çelik bağlantılar kaynaklardaki tercihli ferrit mikroyapısı sayesinde hidrojen kaynaklı çatlamaya karşı dirençli olmasının yanında üstün bağlantı verimliliği sergilemektedir [14].



4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Magudeeswaran vd. (2014) yaptıkları çalışmada su verilmiş ve temperlenmiş zırh çeliklerinin bağlantılarını östenitik paslanmaz çelik ve düşük hidrojenli ferritik çelik elektrot malzemeleri kullanarak korumalı metal ark kaynağı ve özlü ark kaynağı metodları ile üretmiş farklı elektrotların ve farklı kaynak yöntemlerinin yorulma çatlağı büyüme hızına etkisini araştırmıştır. Düşük hidrojenli ferritik çelik elektrot kullanımının yorulma çatlağı büyüme direncini arttırmada faydalı olduğu tespit edilmiştir. Korumalı metal ark kaynağı ile üretilen bağlantıların özlü ark kaynağı ile üretilen bağlantılara göre üstün yorulma çatlağı büyüme direnci sunduğu aktarılmıştır. Sonuç olarak su verilmiş ve temperlenmiş zırh çeliklerinin kaynağında tercih edilen kaynak metali mikroyapısının yanında yüksek çekme mukavemeti, daha fazla kaynak metali sertliği ve üstün yorulma çatlağı büyüme direnci gösterdiği için düşük hidrojenli ferritik çelik elektrot kullanımı önerilmiştir [5].

Cabrilo ve Geric (2018) zırh sacını östenitik paslanmaz çelik elektrot kullanarak gaz metal ark kaynağı metodu ile birleştirirerek kaynak metali, ITAB ve ana metal bölgesinde kırılma mekaniği ve darbe özelliğini incelemiştir. Kaynak metalinin en yüksek kırılma tokluğuna ana metalin ise en düşük kırılma tokluğuna sahip olduğu tespit edilmiştir [15].

Cabrilo vd. (2019) zırh çeliğinin östenitik paslanmaz çelik elektrot ile gaz metal ark kaynağı yöntemine göre kaynaklandığı çalışmalarında kırılma mekaniği ve yorulma çatlağı oluşumunu incelemiştir. Çalışmada kaynak metali ve ITAB bölgesinin güvenli bölge olduğu ana metal bölgesinin ise en çok dikkat edilmesi gereken bölge olduğu sonucuna varılmıştır [16].

Balaguru vd. (2020) ultra yüksek sertlikte zırh sacı kaynağında farklı Cr_{eq}/Ni_{eq} sahip östenitik paslanmaz çelik elektrotlarını korumalı metal ark kaynağı metodu ile üretmişler ve çelik bağlantıların darbe tokluk özelliklerini incelemiştir. Kaynak metalindeki ferrit sayısı artışının bağlantı darbe tokluğunu azalttığı tespit edilmiştir [17].

Kumar vd. (2022) östenitik paslanmaz çelik, süper dubleks paslanmaz çelik ve düşük hidrojenli ferritik çelik elektrotlarının korumalı metal ark kaynağı ile birleştirilen ultra yüksek sertlikte zırh çeliği bağlantılarının mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Düşük hidrojenli ferritik çelik bağlantısı en yüksek mukavemeti göstermiş olup östenitik paslanmaz çelik ile üretilen bağlantılar üstün süneklik ve darbe dayanıklılığı göstermiştir. Çalışmaya göre çekme ve çentik çekme mukavemetinin yanında kaynak metali sertliği de seyreltimiş kaynak metalinin Cr_{eq}/Ni_{eq} oranı ile doğru orantılıdır. Süneklik özelliği ise Cr_{eq}/Ni_{eq} oranı ile ters orantılı ilişki göstermiştir [6].



5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneyisel çalışmada MIL-DTL-12560 class 2 standardına göre üretilmiş 25,9 mm kalınlığında haddelenmiş homojen zırh çeliği kullanılmıştır. Nominal kimyasal bileşimi Çizelge 5.1’de verilen bu çeliğe sıcak haddeleme sonrasında su verilmiş ve çelik temperlenmiştir.

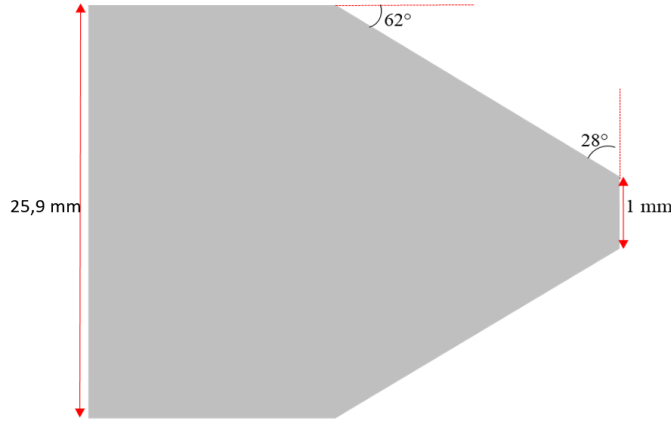
25,9 mm kalınlığındaki levhadan Şekil 5.1 a)’da verilen lazer tezgahında 600 mm uzunluk 200 mm genişlikte plakalar kesilmiştir. Kesim sonrası kaynak ağzı açılacak kenarlara penetrant testi yapılmıştır. Kusur tespit edilen kenarlar taşla düzeltilmiş ve penetrant testi tekrarlanmıştır. Kaynak ağzı CNC tezgahında Şekil 5.1 b)’ de görüldüğü gibi Şekil 5.2’de belirtilen geometriye göre hazırlanmıştır.

Çizelge 5.1 : Bu çalışmada incelenen zırh sacının nominal kimyasal kompozisyonu (% ağırlık) [18].

C	Mn	Ni	Cr	Mo	V
0,27	1,2	1,8	1,5	0,6	0,1



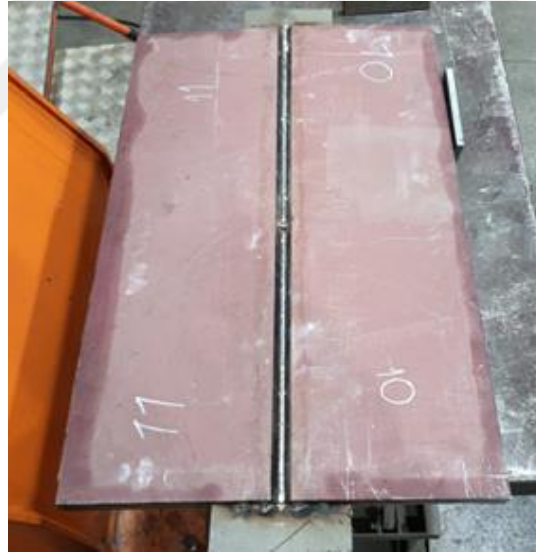
Şekil 5.1 : a) Lazer tezgahında plaka kesimi. b) CNC tezgahında kaynak ağzı hazırlığı.



Şekil 5.2 : X alın kaynağı için hazırlanmış kaynak ağzı geometrisi.

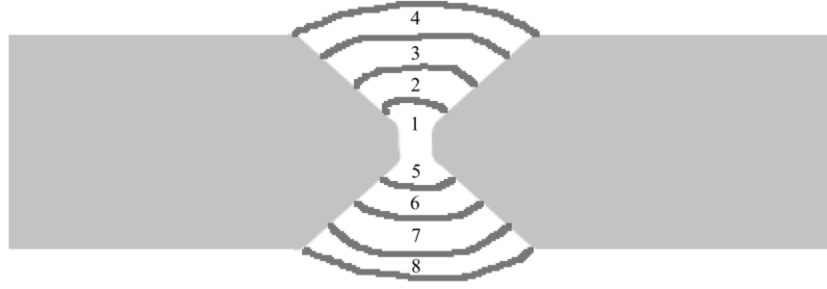
5.2 Kaynak İşlemi

Test plakalarına kaynak öncesi Şekil 5.3'te görüldüğü gibi başlangıç bitiş plakası kaynatılmış ve plakalar altına kaynak dikişine denk gelecek şekilde seramik altlık yerleştirilmiştir.



Şekil 5.3 : Kaynak hazırlığı tamamlanmış plaka.

Lazer kesim ile 200x600 mm boyutlarına getirilmiş olan plakalar X alın kaynağı metodu ile kaynak ağzı, kaynak dikişi sacın hadde yönüne paralel olacak şekilde otomatik kaynak makinesi kullanılarak kaynaklanmıştır. Kaynak işlemi gaz metal ark kaynağı yöntemine göre % 5 CO₂, % 5 O, % 90 Ar karışım gaz kullanılarak yapılmıştır. Kaynak işlemi X kaynak ağzının alt tarafı 4 paso üst tarafı 4 paso olmak üzere Şekil 5.4'te gösterildiği gibi toplam 8 pasoda tamamlanmıştır. Kaynak işlem parametreleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.4 : Kaynak paso sıralaması.

Kaynak işleminde kullanılan 1,2 mm çapındaki östenitik paslanmaz çelik elektrodun (ilave kaynak teli) nominal kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri sırası ile Çizelge 5.3 ve 5.4’te verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Kaynak işlemi parametreleri.

Test	Voltaj (V)	Akım (A)	Süre (s)	Kaynak Mesafesi (mm)
Kaynaklı	25-27	250-270	136	615
Ön Isıtmalı	25-27	250-270	137	612

Çizelge 5.3 : Östenitik paslanmaz çelik elektrodun kimyasal kompozisyonu [19].

C	Mn	Ni	Cr	Si
0,08	7,00	9,00	10,00	0,80

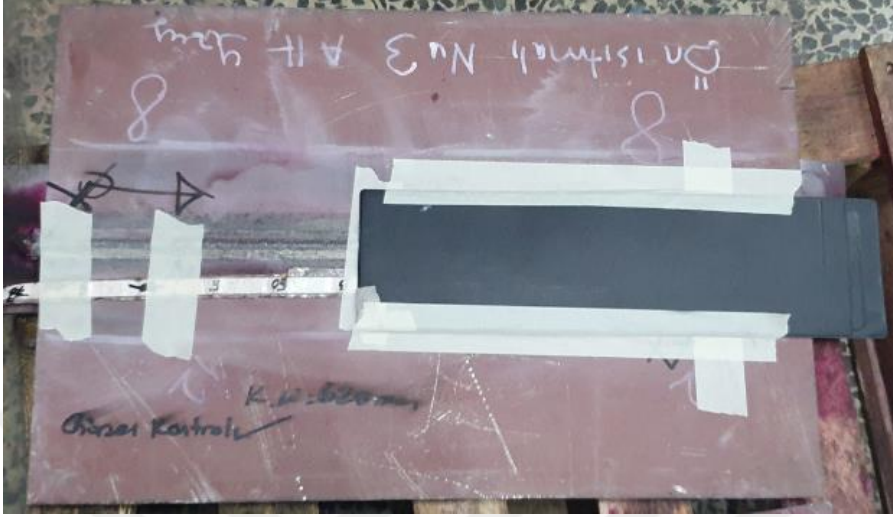
Çizelge 5.4 : Östenitik paslanmaz çelik elektrodun mekanik özellikleri [19].

Akma Mukavemeti Rp 0.2 % (MPa)	Çekme Mukavemeti Rm (MPa)	Kopma Uzaması A (%)
370	600	35

Bir grup plakaya kaynak öncesi 200 °C sıcaklık hedeflenerek üfleç ile ısıtma işlemi uygulanmıştır. Sıcaklık değeri lazer infrared termometre ile ölçülmüştür. Ön ısıtma sonrası plakalar yukarıda açıklandığı gibi kaynaklanmıştır.

Kaynak sonrası kaynak kalitesinin spesifikasyonları karşılayıp karşılamadığını tespit etmek ve olası kaynak kusurlarını araştırmak için kaynak dikişlerine görsel, sıvı penetrant ve radyografik tahribatsız muayene yöntemleri uygulanmıştır. Görsel muayene TS EN ISO 17637 standardına uygun olarak tamamlanmıştır. Penetrant testi EN 3452-1 standardı Tip II C metoduna göre gerçekleştirilmiştir. Radyografik muayene ise TS EN ISO 17636-1 standardına göre X-Ray metodu kullanılarak yapılmıştır. Radyografik muayenede filmler Şekil 5.5’te verildiği gibi kaynak dikişine yerleştirilmiştir. Test 4 mA akım, 250 kV voltaj parametrelerine göre gerçekleştirilmiş

olup görüntüler Ek 1’de paylaşılmıştır. Yapılan tahribatsız muayeneler EN 5817 standardı B kalite seviyesine göre değerlendirilmiş olup herhangi bir hata veya süreksizliğe rastlanmamıştır.



Şekil 5.5 : Filmin kaynak dikişine yerleştirilmesi.

5.3 Kaynaklı Parçalarda Yapılan Testler ve Analizler

Doğrudan kaynaklı ve ön ısıtma sonrası kaynak yapılan plakalar su jeti ile ISO 15614-1: 2017 stardadında alın bağlantısı için belirtilen test numune yerleri dikkate alınarak Şekil 5.6’da görüldüğü gibi yapılacak mekanik testler ve metalografik incelemelere göre Çizelgede 5.5’teki boyutlara kesilmiştir. Kesilen parçalar kaynak başından kaynak sonuna doğru sıralama yapılarak numaralandırılmıştır (2.1, 2.2-2.26).



Şekil 5.6 : Su jeti ile kesim sonrası kaynaklı plaka.

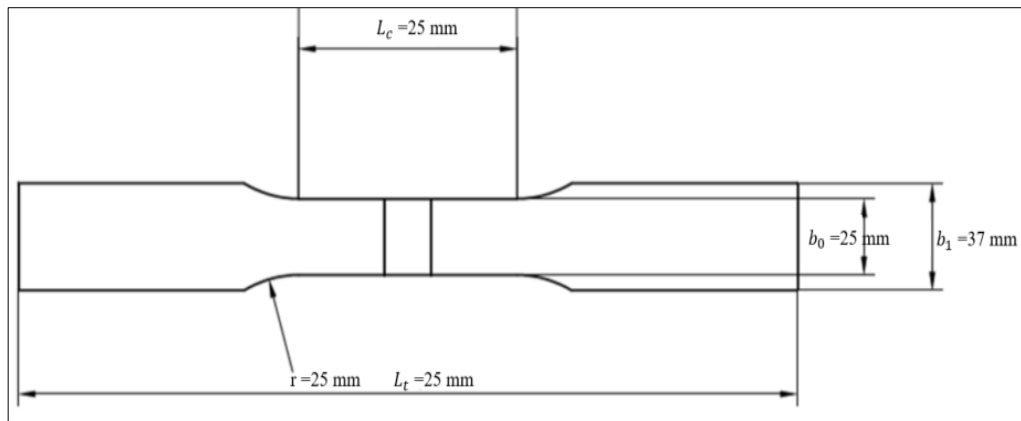
Çizelge 5.5 : Su jeti kesiminde hedeflenen test numunesi boyutları.

Test	Numune Numarası	Boy (mm)	Genişlik (mm)
Eğme	2.2, 2.3, 2.25, 2.26	340	16
Çekme	2.4, 2.24	340	45
Çentik	2.12-2.23	123	16
Yorulma	2.6-2.11	123	20
Mikro 1	2.5	103	10
Mikro 2	2.1	103	16

Mikroyapı numuneleri Şekil 5.6'da gösterilen kaynaklı plaka için 2.5 numaralı, ön ısıtma sonrası kaynak uygulanan plaka için 6.5 numaralı parçadan hazırlanmıştır. Numuneler standart metalografik yöntemlerle hazırlanıp % 3 nital ile dağlandıktan sonra parçaların kaynak bölgelerinde optik mikroskop ile incelemeler yapılmıştır.

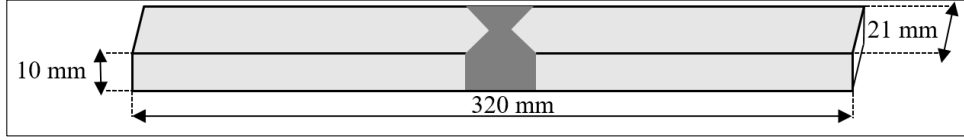
Sertlik testi numuneleri Şekil 5.6'da gösterilen kaynaklı plaka için 2.1, ön ısıtma sonrası kaynak uygulanan plaka için 6.1 numaralı parçadan hazırlanmıştır. Mikroyapı numuneleri ile aynı yöntemlerle hazırlanan sertlik ölçüm numunelerinin kaynak bölgesinde 10 kg yük altında Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılarak sertlik taraması yapılmıştır.

Çekme testi numuneleri Şekil 5.5'te gösterilen kaynaklı plaka için 2.4 ve 2.24, ön ısıtma sonrası kaynak uygulanan plaka için 6.4 ve 6.24 numaralı numunelerden TS EN ISO 4136:2022 standardına göre hazırlanmıştır. Şekil 5.7'de verilen boyutlara işlenmiş numuneler Zwick marka universal test cihazı kullanılarak DIN EN ISO 6892-1 standardına göre çekme testine tabi tutulmuştur.



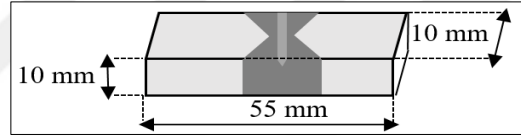
Şekil 5.7 : Çekme testi numunesi boyutları.

Eğme testi numuneleri Şekil 5.5’de gösterilen kaynaklı plaka için 2.2, 2.3, 2.25, 2.26 numaralı numunelerden, ön ısıtma sonrası kaynak uygulanan plaka için 6.2, 6.3, 6.25, 6.26 numaralı numunelerden hazırlanmıştır. Şekil 5.8’de verilen boyutlara işlenen numuneler oda sıcaklığında 3 noktalı eğme testine tabi tutulmuştur. Eğme testi 0.1 mm/s (2.2, 2.26, 6.2, 6.26) ve 0.007 mm/s (2.3, 2.25, 6.3, 6.25) hızda olmak üzere 2 farklı hızda yapılmıştır.



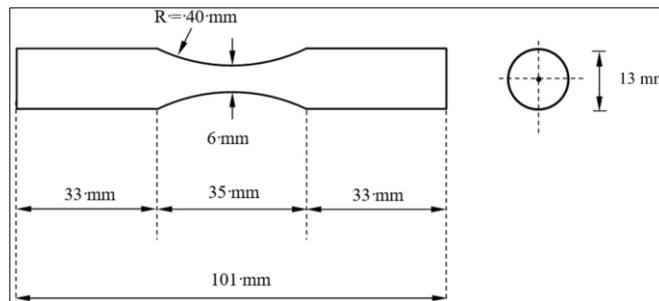
Şekil 5.8 : Eğme testi numunesi boyutları.

Çentik darbe testi numuneleri Şekil 5.5’te gösterilen kaynaklı plaka için 2.12-2.14, ön ısıtma sonrası kaynak uygulanan plaka için 6.12-6.14 numaralı numunelerden Şekil 5.9’daki ölçülere göre hazırlanmıştır. Kaynak dikişi merkezine V tipi çentik açılan numuneler EN ISO 9016 standardına göre test edilmiştir.



Şekil 5.9 : Çentik darbe testi numunesi boyutları.

Yorulma testi numuneleri Şekil 5.5’te gösterilen kaynaklı plaka için 2.6-2.11, ön ısıtma sonrası kaynak uygulanan plaka için 6.6-6.11 numaralı numunelerden Şekil 5.10’daki ölçülere göre yuvarlak kesitli olarak hazırlanmıştır. Yorulma testi dönel eğmeli yorulma cihazında 450 MPa gerilme altında ve 30 Hz deney frekansında BS ISO 1143:2010 standardına göre yapılmıştır.



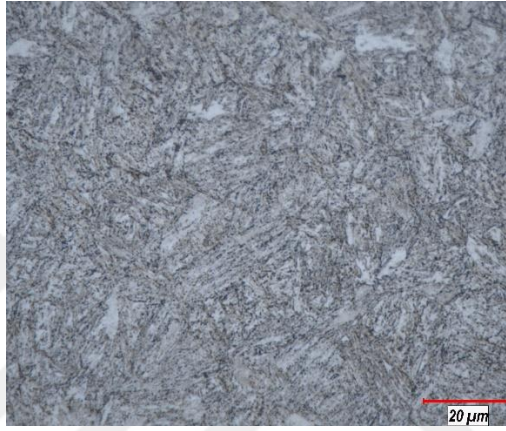
Şekil 5.10 : Yorulma testi numunesi boyutları.

Mekanik testlerin yapıldığı numuneler hazırlanırken kaynaklı numunelerde kaynak dikişinin numunelerin orta kısmında kalmasına özen gösterilmiştir.

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

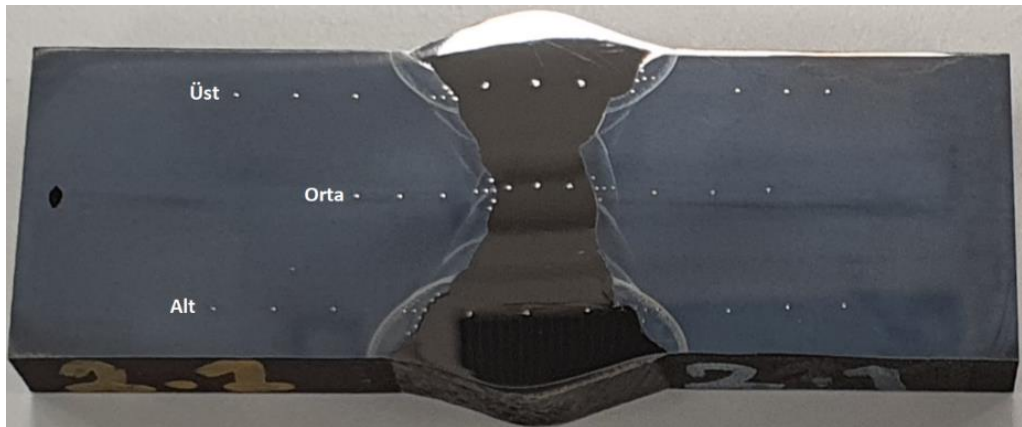
6.1 Mikroyapı Kontrolü ve Sertlik Testi Sonucu

İşlem görmemiş plakadan alınan zırh sacının temperlenmiş martenzitik mikroyapı görüntüsü Şekil 6.1’de verilmiştir. Zırh sacının sertliği 298 HV10 olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.1 : Homojen haddelenmiş zırh sacı mikroyapısı 1000X büyütme.

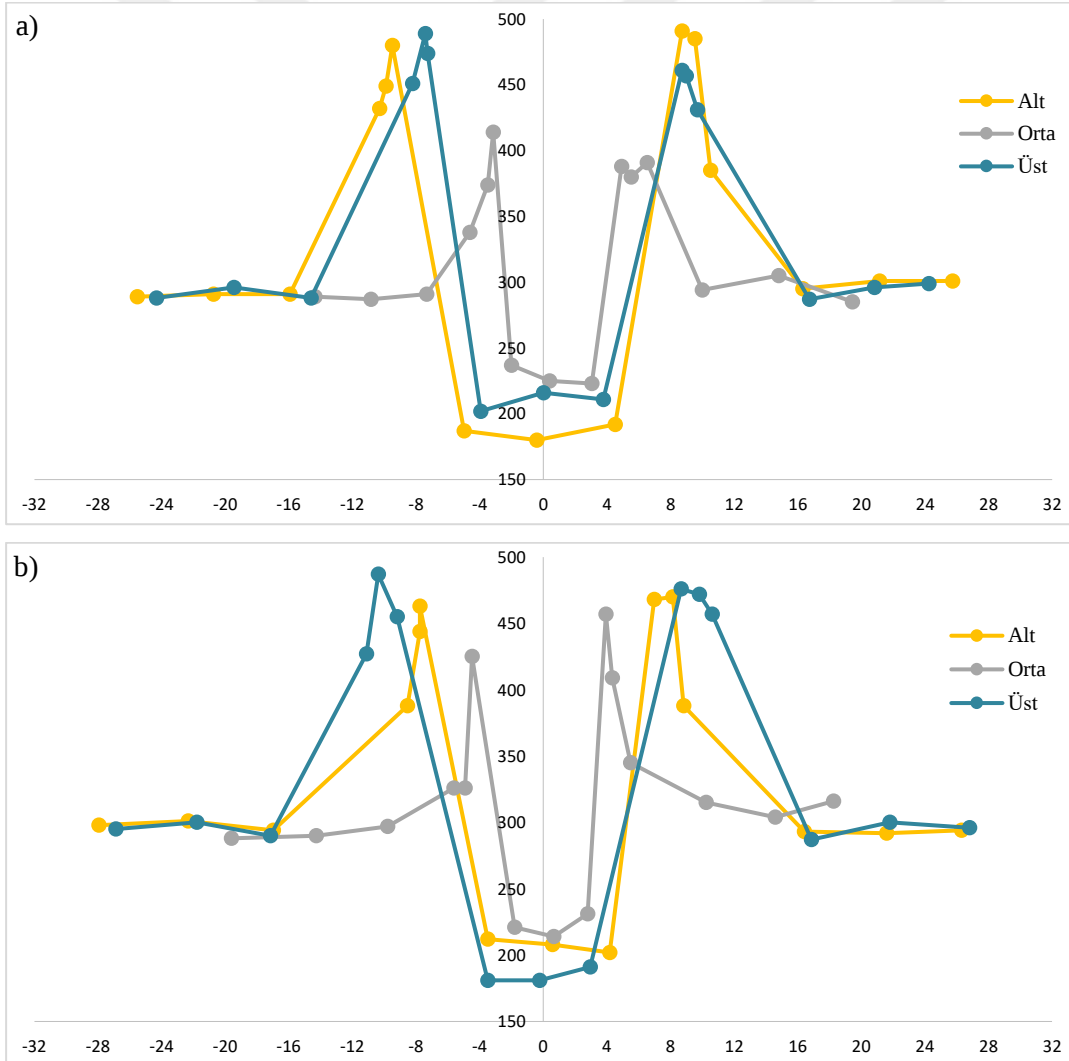
Kaynak uygulanan numunelerin kaynak bölgelerinde metalografik incelemeler yapılmıştır. Örnek olarak doğrudan kaynak yapılmış numunenin kaynak bölgesine ait genel görünüm Şekil 6.2’de verilmiştir. Kaynak dikişinin etrafında ~3 mm genişliğinde ısı tesiri altında kalan bölge mevcuttur. Doğrudan kaynaklı ve ön ısıtma sonrası kaynak yapılan numunelerin kaynak bölgesine ait optik mikroskop mikroyapı görüntüleri Ek B’de verilmiştir.



Şekil 6.2 : Sertlik ölçüm taraması bölgeleri.

Şekil 6.2’de görüldüğü gibi kaynak bölgesinin üst, orta ve alt bölgesinde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler üst ve alt bölgeler için yüzeylerden ~4 mm derinlikte yapılmıştır. Sertlik ölçüm sonuçları Şekil 6.3’te görülmektedir.

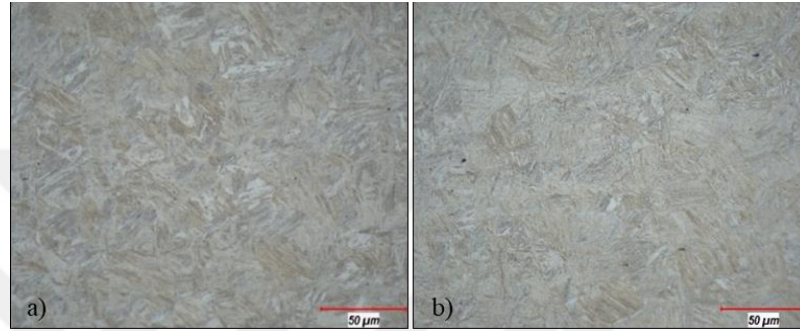
Kaynak dikişi sertliği doğrudan kaynak yapılmış numunede 180-237 HV aralığında, ön ısıtma uygulanmış numunede ise 181-231 HV aralığında ölçülmüştür. Ön ısıtma işlemi kaynak dikişi sertliğinde kayda değer bir değişime sebep olmamıştır. ITAB sertliği ise doğrudan kaynak yapılmış numunede 338-491 HV aralığında, ön ısıtma uygulanmış numunede ise 326-487 HV aralığında ölçülmüştür. 2 çalışmadan elde edilen pik ve ortalama sertlik değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. ITAB bölgesinde yapılan mikroskobik incelemelerde mikroyapının martenzitik olduğu görülmüştür. Ana metal sertliği ise her iki numunede de 300HV mertebesinde bulunmuştur.



Şekil 6.3 : Sertlik tarama sonuçları. a) Doğrudan kaynaklı numune. b) Ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune.

Çizelge 6.1 : Tarama bölgelerine göre sertlik sonuçları.

Numune Bilgisi	Bölge	Maksimum Sertlik Değeri (HV 10)	Maksimum Sertlik Değerlerinin Ortalaması (HV 10)
Doğrudan Kaynaklı	Üst	489	465
	Orta	414	
	Alt	491	
Ön Isıtmalı	Üst	487	471
	Orta	457	
	Alt	470	



Şekil 6.4 : Maksimum sertlik tespit edilen bölgelerin mikroyapı görüntüsü 500X büyütme. a) Doğrudan kaynaklı numune. b) Ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune.

6.2 Mekanik Test Sonuçları

6.2.1 Çekme testi sonucu

Kaynaksız, doğrudan kaynaklı ve ön ısıtmalı numunelerin çekme testi sonuçları Çizelge 6.2’de paylaşılmıştır. Kaynaklı numunelerin akma mukavemeti kaynaksız zırh sacına nazaran daha düşük bulunmuştur. Bu durumun kaynaklı numunelerin Şekil 6.5’te görüldüğü gibi kaynak dikişinden kopması ile ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.

Çizelge 6.2 : Çekme testi sonuçları.

Numune Bilgisi	Akma Mukavemeti (Rp 0.2)	Çekme Mukavemeti (Rm)	Kopma Uzaması	Kırılma Bölgesi
	MPa	(MPa)	(%)	-
Orjinal Zırh Sacı	838	928	21,9	-
Doğrudan Kaynaklı Üst	550	814	-	Kaynak
Doğrudan Kaynaklı Alt	553	764	-	Kaynak
Ön Isıtmalı Üst	548	779	-	Kaynak
Ön Isıtmalı Alt	551	791	-	Kaynak



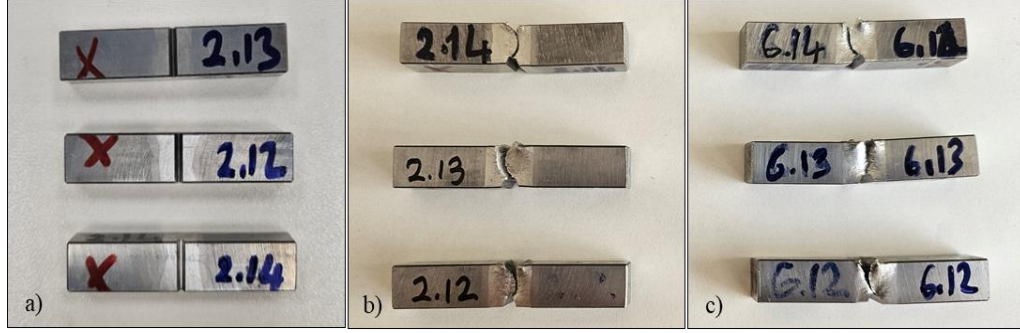
Şekil 6.5 : Çekme testi numuneleri. a) Test sonrası çekme testi numuneleri. b) Test sonrası doğrudan kaynaklı numune. c) Test sonrası ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune.

6.2.2 Çentik darbe testi sonucu

Doğrudan kaynaklı ve ön ısıtmalı numunelerin çentik darbe testi sonuçları Çizelge 6.3'te paylaşılmıştır. Bütün numuneler Şekil 6.6 b) ve c)'de görüldüğü üzere kaynak dikişinden kopmuştur. Numunelerin doğrudan kaynaklı veya ön ısıtma sonrası kaynaklı olmaları darbe direncinde dikkate değer bir farka neden olmamıştır.

Çizelge 6.3 : Çentik darbe testi sonuçları.

Numune Bilgisi	J	J/mm2	Kırılma Bölgesi
Doğrudan Kaynaklı	108	1,36	Kaynak
	110	1,39	
	106	1,33	
Ön Isıtmalı	117	1,47	Kaynak
	117	1,47	
	113	1,41	



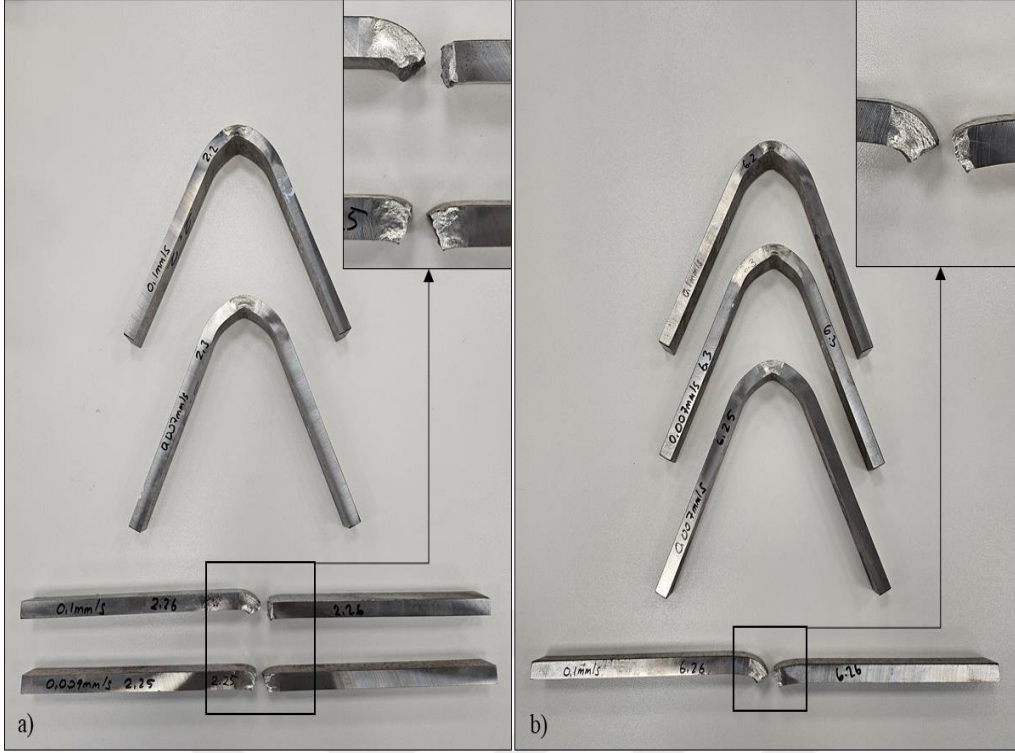
Şekil 6.6 : Darbe testi numuneleri. a) Test öncesi V çentikli numuneler. b) Test sonrası doğrudan kaynaklı numune. c) Test sonrası ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune.

6.2.3 Eğme testi sonucu

Doğrudan kaynaklı ve ön ısıtmalı numunelerin eğme testi sonuçları Çizelge 6.4'te verilmiştir. Kaynaklı numunelerin 2 adedinde, ön ısıtmalının numunelerin 1 adedinde kırılma gerçekleşmiştir. Kırılma Şekil 6.7'de görüldüğü üzere kaynak dikişinde meydana gelmiştir.

Çizelge 6.4 : Eğme testi sonuçları.

Numune Bilgisi	Eğme Hızı (mm/s)	Eğme Açısı	Kırılma Bölgesi
Doğrudan Kaynaklı	0.1	105°	Kırılmadı
	0.1	58°	Kaynak
	0.007	116°	Kırılmadı
	0.007	51°	Kaynak
Ön Isıtmalı	0.1	118°	Kırılmadı
	0.1	90°	Kaynak
	0.007	115°	Kırılmadı
	0.007	110°	Kırılmadı



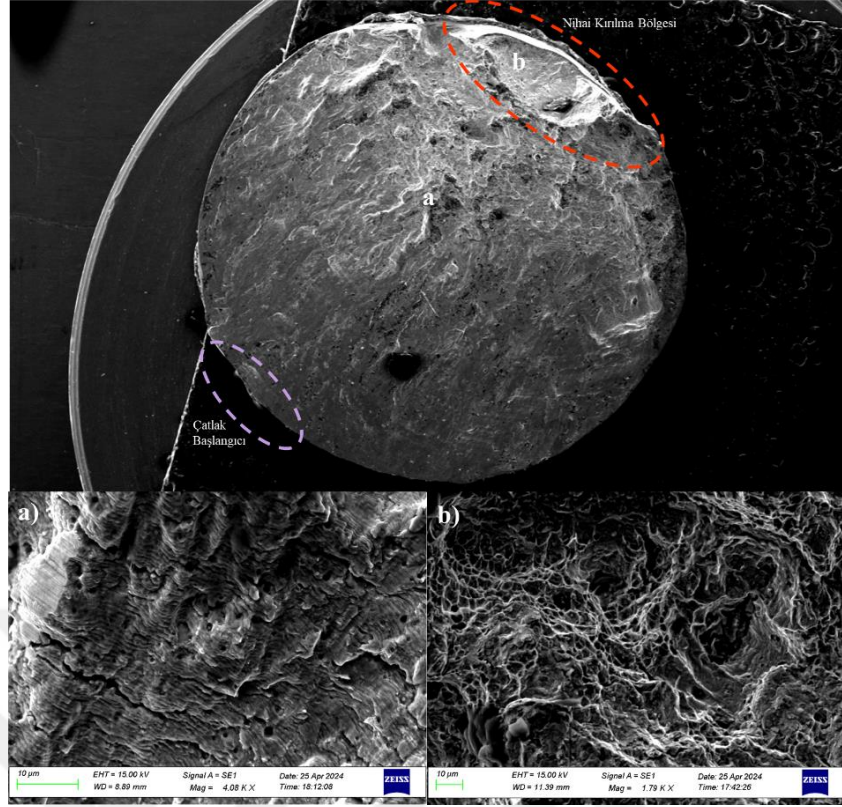
Şekil 6.7 : Eğme testi numuneleri. a) Test sonrası doğrudan kaynaklı numune. b) Test sonrası ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune.

6.2.4 Yorulma testi sonucu

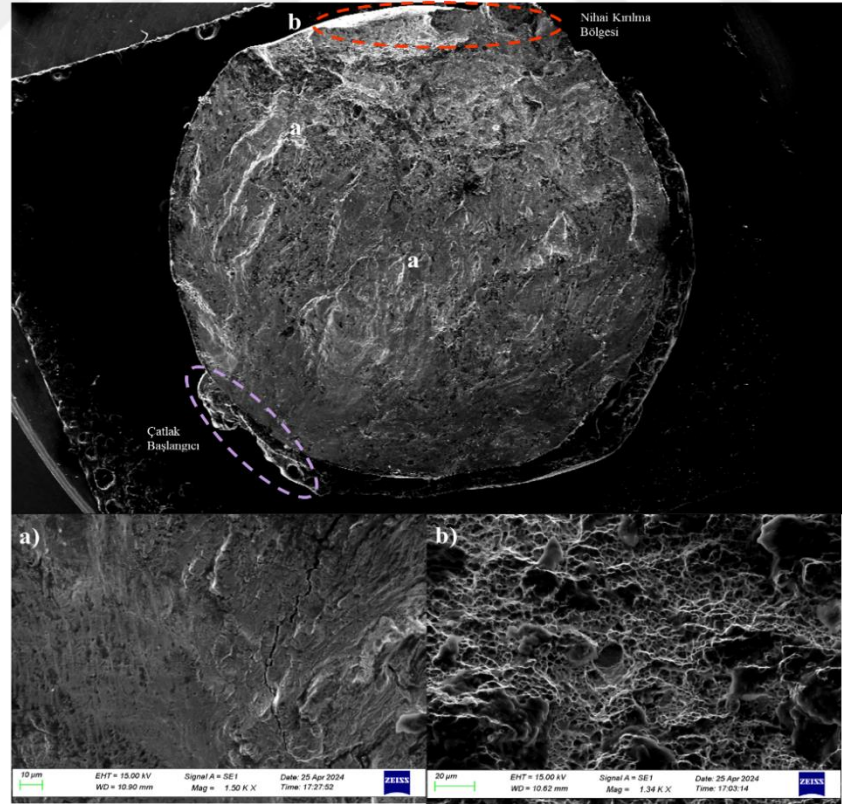
Numunelerin yorulma testlerinin yapılacağı gerilme değeri orijinal zırh sacı çekme mukavemetinin (928 MPa) yaklaşık yarısına gelecek değer olarak seçilmiştir. 450 MPa gerilme altında dönel eğmeli test cihazında yapılan yorulma testlerinde doğrudan kaynaklı ve ön ısıtmalı numunelerin kırıldıkları çevrim sayıları Çizelge 6.5'te verilmiştir. Numuneler kaynak dikişinden kırılmış olup kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da paylaşılmıştır. Kırık yüzeylerinde EDS taraması yapılmış ve kırılmanın kaynak metalinden gerçekleştiği teyit edilmiştir. Tarama sonuçları Ek C'de paylaşılmıştır. Ön ısıtmalı numunelerin kırılıncaya kadarki çevrim sayısı doğrudan kaynaklı numunelerden çok daha yüksek düzeyde bulunmuştur.

Çizelge 6.5 : Yorulma testi sonuçları.

Numune Bilgisi	Çevrim Sayısı	Kırılma Bölgesi
Doğrudan Kaynaklı	$5,6 \times 10^4$	Kaynak
Doğrudan Kaynaklı	$6,2 \times 10^4$	Kaynak
Ön Isıtmalı	$13,3 \times 10^4$	Kaynak
Ön Isıtmalı	$64,4 \times 10^4$	Kaynak



Şekil 6.8 : Doğrudan kaynaklı numune kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü. a) Çatlak ilerleme bölgesi. b) Nihai kırılma bölgesi.



Şekil 6.9 : Ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü. a) Çatlak ilerleme bölgesi. b) Nihai kırılma bölgesi.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1. Her iki çalışma için yapılan görsel, sıvı penetrant ve radyografik muayenelerde kaynak bölgesinde hata veya süreksizliğe rastlanmamıştır.
2. Kaynak öncesi ısıtma işlemi temperlenmiş martenzitik mikroyapıya sahip olan çeliğin ITAB bölgesi yapısal özelliklerinde kayda değer bir değişime neden olmamıştır.
3. Mekanik testlerde doğrudan kaynaklanan ve ön ısıtma sonrası kaynaklanan numunelerin çekme, eğme ve çentik darbe testlerinde belirgin fark tespit edilmemiş olup numuneler kaynak dikişinden kırılmıştır.
4. Yorulma testine göre ön ısıtma işleminin bağlantı ömründe 2 ve 10 kat kadar iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Daha etkili iyileştirmelerin aşağıdaki koşullarda olabileceği önerilir:
 - Doğrudan kaynaklı ve ön ısıtma sonrası kaynak yapılan numunelerde kalıntı gerilme kontrolü yapıp sonuca göre çalışma yapılabilir.
 - Farklı elektrot malzemelerde (düşük hidrojen ferritik, yüksek nikelli çelik) kaynak öncesi ön ısıtma işlemi uygulanarak mekanik özelliklerinin (çekme, çentik, eğme) iyileşme durumu araştırılabilir.
 - Kaynaklı numunelere son ısıtma işlemi yapılarak kaynak bağlantısının yorulma dayanımı araştırılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Cimpoeru, S. J.** (2016). *The mechanical metallurgy of armour steels*. erişim tarihi: 23.11.2023, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1024201.pdf>
- [2] **Jenney, C. L., & O'Brien, A. (Eds.).** (2001). *Welding handbook*. American Welding Society.
- [3] **Military, U. S.** (2013). *Armor Plate, Steel, Wrought, Homogeneous, MIL-DTL-12560K (MR)(For use in Combat-Vehicles and for Ammunition Testing)*. Aberdeen Proving Ground
- [4] **ASTM A6/A6M** (2024). *Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling*. West Conshohocken, Penn: ASTM
- [5] **Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., & Reddy, G. M.** (2014). Effect of welding processes and consumables on fatigue crack growth behaviour of armour grade quenched and tempered steel joints. *Defence Technology*, 10(1), 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2014.01.005>
- [6] **Kumar, S. N., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Rahman, A. H., & Balaguru, V.** (2022). Effect of welding consumables on shielded metal arc welded ultra high hard armour steel joints. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 31(1), 8-21. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0002>
- [7] **Url-1** <<https://industeel.arcelormittal.com/fichier/ds-protection-mars-650-en-2021/>>, erişim tarihi, 28.12.2023
- [8] **Url-2** <<https://industeel.arcelormittal.com/fichier/ds-protection-mars-550-en-2022/>>, erişim tarihi, 28.12.2023
- [9] **Singh, B. B., Sukumar, G., Senthil, P. P., Jena, P., Reddy, P., Kumar, K. S., Madhu, V., & Reddy, G.** (2017). Future Armour Materials and Technologies for Combat Platforms. *Defence Science Journal*, 67(4), 412. <https://doi.org/10.14429/dsj.67.11468>
- [10] **Madhu, V., & Bhat, T. B.** (2011). Armour Protection and Affordable Protection for Futuristic Combat Vehicles. *Defence Science Journal*, 61(4). 394–402. <https://doi.org/10.14429/dsj.61.365>
- [11] **Kumar, N., Kumar, M. U., & Kumaran, S.** (2019). The Welding Processes of Rolled Homogeneous Armour Steel. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(2S2), 361–366. <https://doi.org/10.35940/ijitee.b1056.1292s219>

- [12] **Kumar, S. N., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Rahman, A. H., & Balaguru, V.** (2022). Effect of Welding Consumables on the Ballistic Performance of Shielded Metal Arc Welded Dissimilar Armor Steel Joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(1), 162–179. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06219-9>
- [13] **Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., & Reddy, G. M.** (2018). Metallurgical characteristics of armour steel welded joints used for combat vehicle construction. *Defence Technology*, 14(5), 590-606. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.07.021>
- [14] **Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., Sathyanarayanan, S., Reddy, G. M., Moitra, A., Venugopal, S., & Sasikala, G.** (2010). Dynamic fracture toughness of armour grade quenched and tempered steel joints fabricated using low hydrogen ferritic fillers. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 17(5), 51-56. [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(10\)60099-4](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(10)60099-4)
- [15] **Cabrilo, A., & Geric, K.** (2018). Fracture mechanic and charpy impact properties of a crack in weld metal, HAZ and base metal of welded armor steel. *Procedia Structural Integrity*, 13, 2059-2064. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.208>
- [16] **Cabrilo, A., Sedmak, A., Burzic, Z., & Perkovic, S.** (2019). Fracture mechanics and fatigue crack propagation in armor steel welds. *Engineering Failure Analysis*, 106, 104155. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104155>
- [17] **Balaguru, V., Balasubramanian, V., & Sivakumar, P.** (2020). Effect of weld metal composition on impact toughness properties of shielded metal arc welded ultra-high hard armor steel joints. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 29(1), 186-194. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2020-0019>
- [18] *User guide for Mars® protection steels.* (n.d.). Industeel ArcelorMittal. Erişim: 05.01.24, <https://industeel.arcelormittal.com/fichier/user-guide-for-mars-protection-steels>
- [19] **Thermantx.** (n.d.). Kurum dokümanı. Erişim: 28 Aralık 2023

EKLER

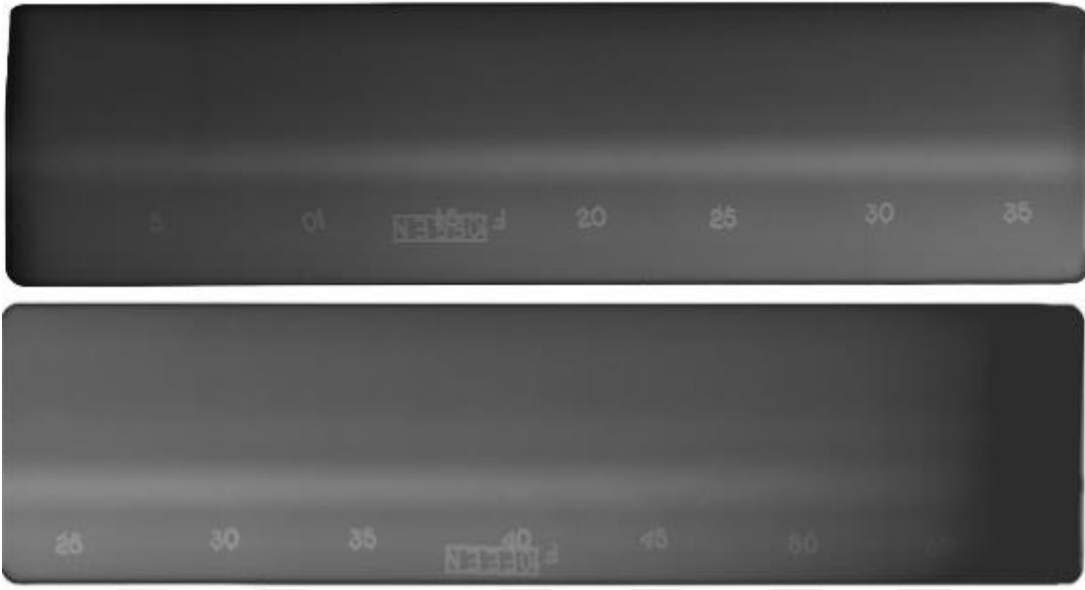
EK A : Radyografik muayene sonuçları

EK B : Mikroyapı görüntüleri

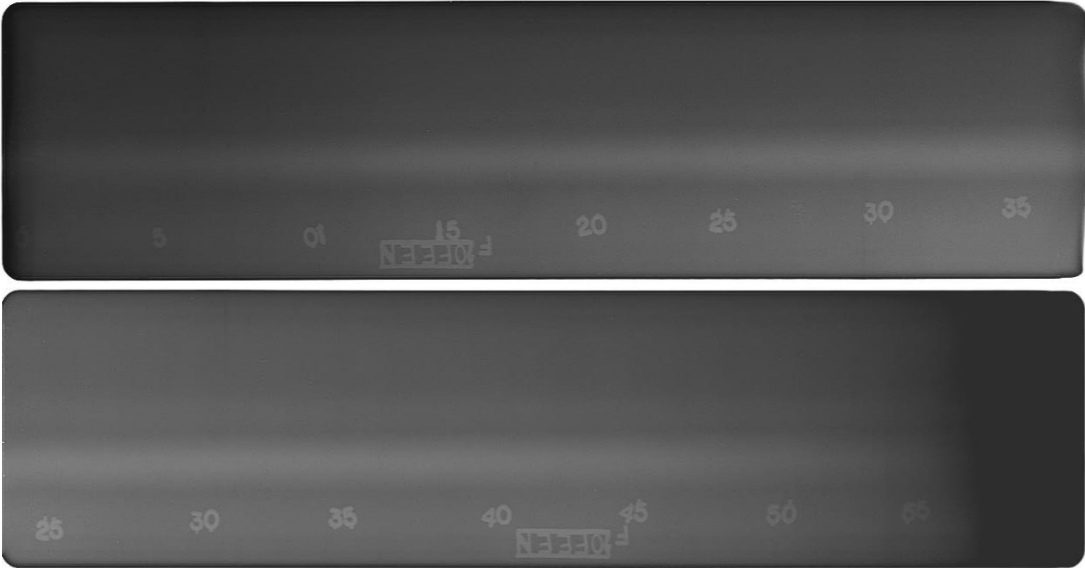
EK C : EDS Sonuçları



EK A

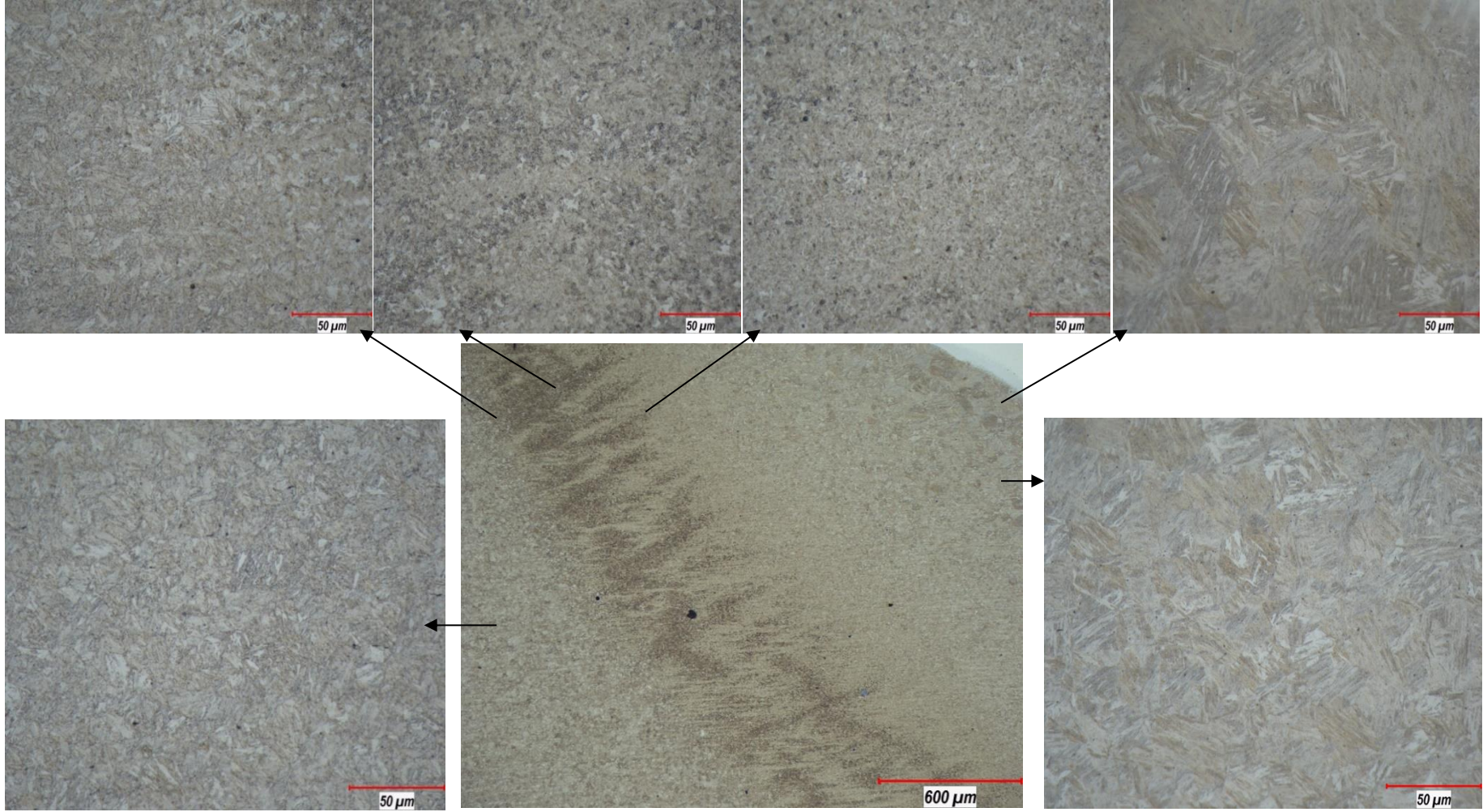


Şekil A.1 : Kaynaklı plaka radyografik muayene sonucu.

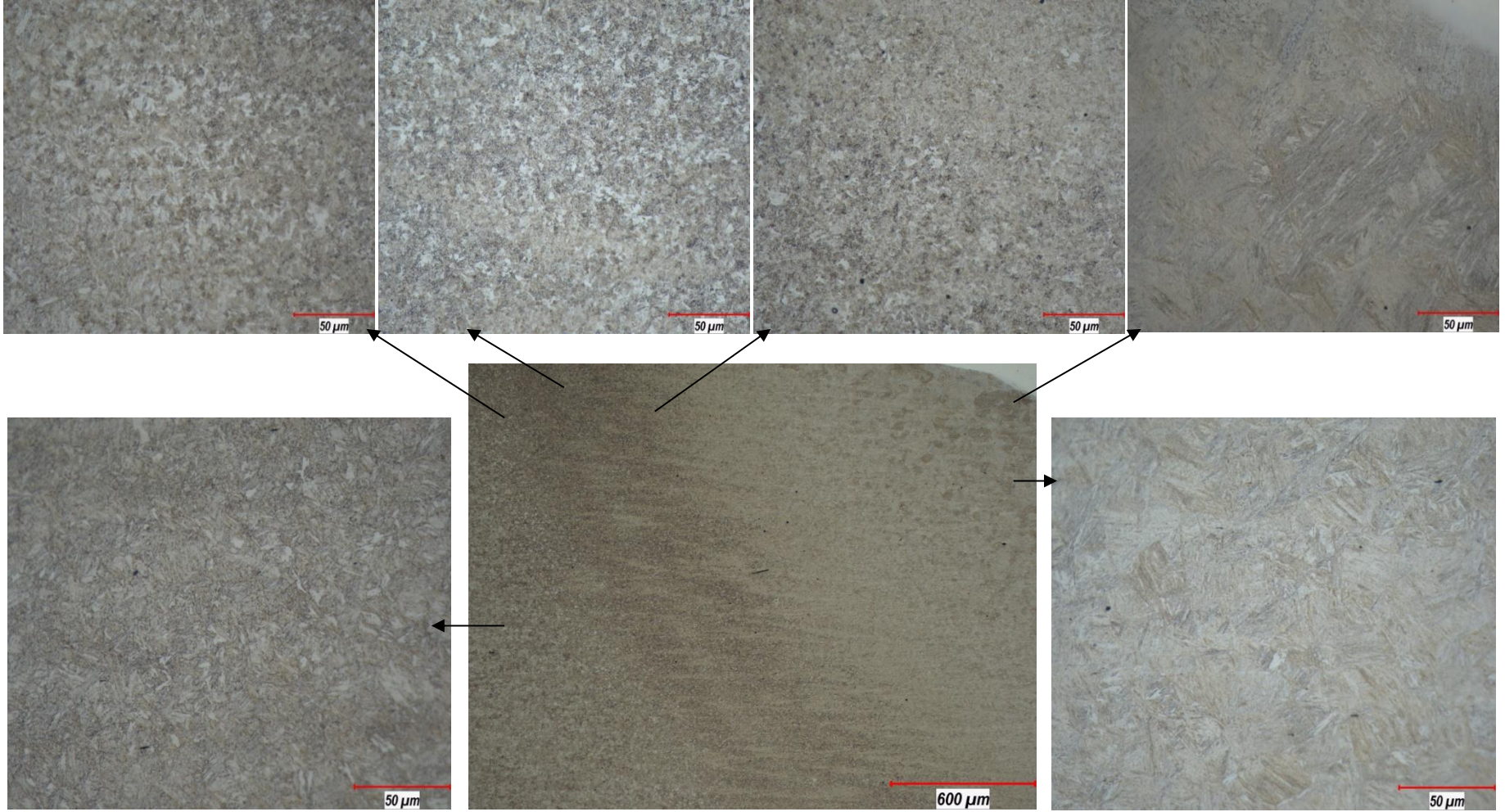


Şekil A.2 : Ön ısıtma sonrası kaynaklanan plaka radyografik muayene sonucu.

Ek B

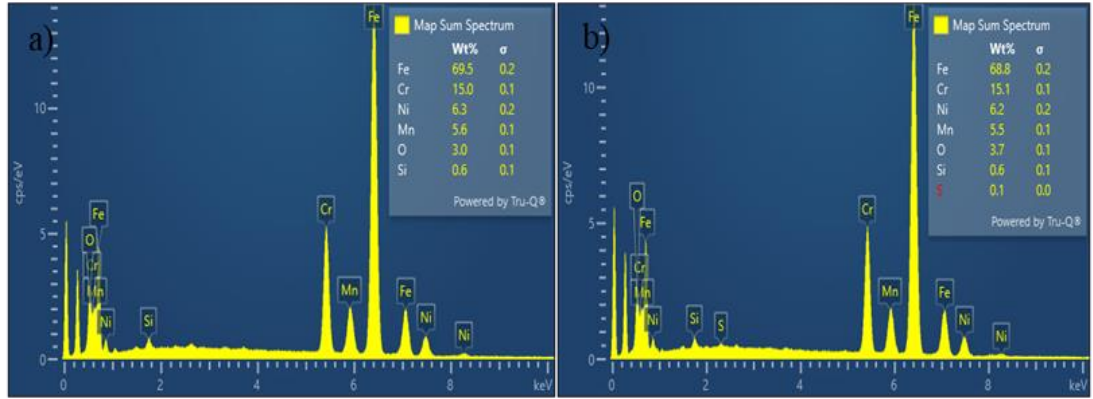


Şekil B.1 : Doğrudan kaynaklı numune ITAB mikroyapı incelemesi.

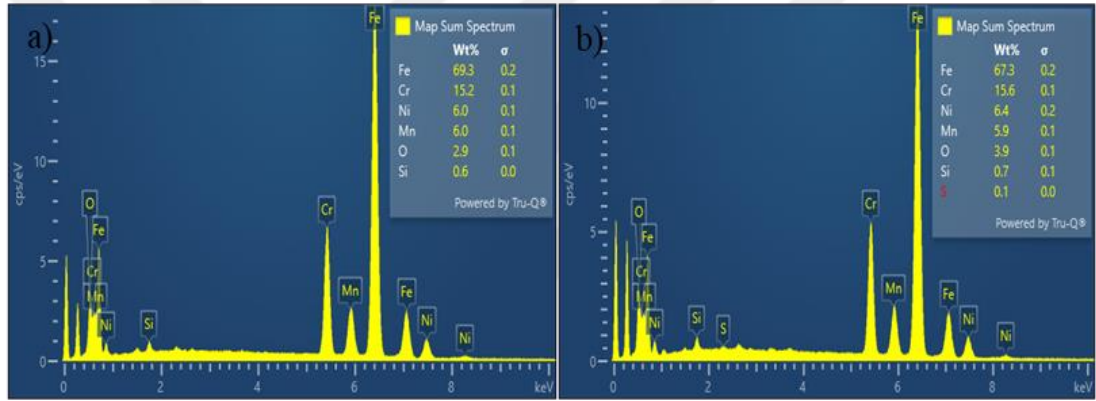


Şekil B.2 : Ön ısıtma sonrası kaynaklanan numune ITAB mikroyapı incelemesi.

Ek C



Şekil C.1 : Doğrudan kaynaklı numunelerin EDS sonuçları. a) 2.6 No'lu numune. b) 2.10 No'lu numune.



Şekil C.2 : Ön ısıtma sonrası kaynaklanan numunelerin EDS sonuçları. a) 6.8 No'lu numune. b) 6.9 No'lu numune.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Selma KASAL

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018-2021 yılları arasında Posco Assan T.S.T firmasında Kalite Mühendisi olarak çalıştı.
- 2021-2022 yılları arasında OTOKAR Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş. firmasında Montaj Kalite Mühendisi olarak çalıştı.
- 2022 yılında OTOKAR Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş. Proje Yöneticisi olarak çalışmaya devam ediyor.