T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARDOX 450 ve S355J2C+N ÇELİKLERİNİN GAZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİ ile BİRLEŞTİRİLMESİNİN MİKROYAPI ve MEKANİK ÖZELLİKLER BAKIMINDAN İNCELENMESİ

ATAKAN BARIŞ ÖZTURAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gürkan İRSEL

EDİRNE – 2022

ATAKAN BARIŞ ÖZTURAN'ın hazırladığı "**HARDOX 450 ve S355J2C+N ÇELİKLERİNİN GAZALTI ARK KAYNAK YÖNTEMİ ile BİRLEŞTİRİLMESİNİN MİKROYAPI ve MEKANİK ÖZELLİKLER BAKIMINDAN İNCELENMESİ**" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir **Yüksek lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri İmza

Prof. Dr. Yılmaz ÇAN ……

Doç. Dr. Ümit HÜNER ……

Dr. Öğr. Üyesi Gürkan İRSEL ……

Tez Savunma Tarihi: ...../……/……

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Gürkan İRSEL ….……..……

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

.... / .... / ....

Atakan Barış ÖZTURAN

Yüksek Lisans Tezi

Hardox 450 ve S355J2C+N çeliklerinin gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı ve mekanik özellikler bakımından incelenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu tez, Hardox 450 ve EN 10025 S355J2C+N çeliklerinin gazaltı ark kaynak (GMAW) yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı ve mekanik özellikler bakımından araştırılmasını bildirmektedir. Bu kapsamda iki farklı üstün özelliğe sahip metal ve kaynak telinin birleşimi ile oluşan kaynak merkezi, ısıdan etkilenen iki esas metalin mikroyapıları incelenmiş ve mekanik özelliklere etkileri araştırılmıştır. Deneyler, Vickers mikrosertlik (HV 0.1), eğilme, Charpy V-Notch darbe, aşınma, çekme gibi mekanik testler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optik incelemede, optik mikroskop (OM), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM), enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDX), X-ray difraksiyonu (XRD) analizleri uygulanmıştır. Optik incelemede S355J2C+N ana metalin ortalama tane boyutu 18 ± 6 µm, Hardox 450 ana metalin ortalama tane boyutu ise 9.2 ± 6 µm olarak ölçülmüştür. Gazaltı ark kaynak işleminden sonra Hardox 450 ısı tesiri altında kalan bölgesinde (ITAB) 4.4 ± 1 µm'ye 26 ± 4 µm uzunluğunda iğnemsi yapılar ve 11.8 ± 3 µm boyutunda taneler yer almaktadır. S355J2C+N ITAB bölgesinde 13 ± 3 µm ve yer yer 9.2 ± 3 µm boyutunda kompleks bir tane boyutu dağılımı mevcuttur. Kaynak merkezinde ise heterojen bir yapı oluşmuştur. Vickers mikrosertlik değerleri, Hardox 450'den S355J2C+N metaline doğru gidildikçe azaldı. En yüksek sertlik değeri Hardox 450 ana metalde ölçülmüştür ve 311 ± 8 HV'dir. S355J2C+N ana metalin sertliği yaklaşık 217 ± 8 HV iken kaynak merkezinin sertliği yaklaşık 249 ± 8 HV olarak ölçülmüştür. Mekanik dayanım analizi, esas metallerin akma dayanımlarının S355J2C+N ve Hardox 450 için sırasıyla 513 ± 8

MPa ve 1464 ± 8 MPa olduğunu, gazaltı ark kaynağının boyuna yönünden çıkarılan numunenin en yüksek çekme dayanımının 899 ± 8 MPa olduğunu, enine yönden çıkarılan numunenin en yüksek çekme dayanımı ise 699 ± 7 MPa olduğunu ve S355J2C+N malzemesinden koptuğunu gösterdi. Dinamik bir test cihazı kullanılarak Hardox 450, S355J2C+N ve kaynaklı bölgeye aşınma testi yapıldı. Eğme testinde, S355J2C+N ve Hardox 450 çeliklerinin maksimum eğme kuvvetlerinin sırasıyla 15.67 ± 2 ve 43.24 ± 4 kN, boyuna ve enine yönünden kesilen kaynaklı numunelerin eğme kuvvetlerinin sırasıyla 22.06 ± 2 ve 19.65 ± 2 kN olduğu tespit edildi. Mikroyapı analizleri için kapsamlı ve günümüz teknolojisi ile gerçekleştirilen analizler mikroyapı ile ilgili tüm detayları sundu. Gazaltı ark kaynağı iki farklı metalin birleşiminde mukavemet, sızdırmazlık ve tokluk gibi iyi özellikler sağladı ve bu kaynak yöntemi bu iki farklı metalin başarılı biçimde birleştirilmesi için uygundur. Böylece kompleks sistemler için bu farklı özellikteki iki metalin başarılı biçimde birleştirilebildiği tespit edildi.

Yıl : 2022
Sayfa Sayısı : 70
Anahtar Kelimeler : Farklı metallerin kaynağı, Mikroyapı, Mekanik özellikler, Gazaltı ark kaynağı, Hardox 450, S355J2C+N

Master's Thesis

Investigation of joining Hardox 450 and S355J2C+N steels with gas metal arc welding in terms of microstructure and mechanical properties

Trakya University Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

This thesis presents the investigation of the joining of Hardox 450 and EN 10025 S355J2C+N steels by the gas metal arc welding (GMAW) method in terms of microstructure and mechanical properties. In this context, the welding center formed by the combination of two different superior metals and welding wire, the microstructures of the two heat-affected base metals zone were examined and their effects on the mechanical properties were investigated. Experiments were carried out using mechanical tests such as Vickers microhardness (HV 0.1), bending, Charpy V-Notch impact, wear, tensile tests. In optical investigation, optical microscope (OM), field emission scanning electron microscope (FESEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX), X-ray diffraction (XRD) analyzes were applied. In optical investigation, the average grain size of S355J2C+N base metal was 18 ± 6 μm, and the grain size of Hardox 450 base metal was 9.2 ± 6 μm. After the gas metal arc welding process, there are acicular structures of 4.4 ± 1 μm by 26 ± 4 μm in length and grains of 11.8 ± 3 μm in the heat affected zone (HAZ) of Hardox 450. There is a complex grain size distribution of 13 ± 3 μm and 9.2 ± 3 μm in places in the S355J2C+N HAZ. A heterogeneous structure was formed in the welding center. Vickers microhardness values decreased from Hardox 450 to S355J2C+N metal. The highest hardness value was measured in Hardox 450 base metal and was 311 ± 8 HV. The hardness of the S355J2C+N base metal was approximately 217 ± 8 HV, while the hardness of the weld center was measured as approximately 249 ± 8 HV. Mechanical stress analysis revealed that the yield strengths of base metals were 513 ± 8 MPa and 1464 ± 8 MPa for

S355J2C+N and Hardox 450, respectively, the highest tensile strength of the sample extracted from the longitudinal direction of the gas metal arc welding was 899 ± 8 MPa, the highest tensile strength of the sample extracted from the transverse direction was the highest. its tensile strength was 699 ± 7 MPa and showed that it fractured from the S355J2C+N material. Wear test of Hardox 450, S355J2C+N and welded area was performed using a dynamic tester. In the bending test, it was determined that the bending forces of the the maximum forces obtained in the bending tests of S355J2C+N and Hardox 450 steel were 15.67 ± 2 ve 43.24 ± 4 kN while the maximum forces obtained in the bending tests of the welded samples cut from the longitudinal and transverse directions of the gas metal arc welding were 22.06 ± 2 ve 19.65 ± 2 kN, respectively. Comprehensive analyzes for microstructure analyzes carried out with today's technology provided all the details about microstructure. Gas metal arc welding provided good properties such as strength, impermeability and toughness at the junction of two dissimilar metals, and this welding method is appropriate for the successful joining of these two dissimilar metals. Thus, it has been determined that these two metals with different properties can be successfully welded for complex systems.

Year : 2022
Number of Pages : 70
Keywords : Dissimilar welding, Microstructure, Mechanical properties, Gas metal arc welding, Hardox 450, S355J2C+N

ÖNSÖZ

Makine imalat sektöründe kaynak yöntemlerinin araştırılması, farklı mekanik ve mikroyapısal özelliklere sahip malzemelerin kaynaklı birleşimleri, bu birleşimlere ait verilerin ortaya konulması endüstriyel ve bilimsel açıdan günümüzde büyük bir önem kazanmıştır. Bu çalışmada gazaltı ark kaynak yöntemi ile farklı özellikteki S355J2C+N ve Hardox 450 çeliklerinin birleştirilmesine odaklanılmıştır. Gazaltı kaynak yöntemi metodolojisi, farklı iki malzemenin karakteristik özellikleri ve kullanım alanları, bu iki farklı iki malzemenin birleşiminin sağlayacağı katkılar, kaynak birleşiminin mikroyapısı ve mekanik özellikleri ortaya konmuştur. Farklı üstün özelliklere sahip metallerin kaynaklı birleşimlerinin araştırılmasının endüstriye ve bilime katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Öncelikle danışmanlığımı üstlenen, tecrübeleriyle bana fikir veren, beni yönlendiren ve desteğini sunan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Gürkan İRSEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tezin hazırlanmasındaki desteğinden dolayı Edirne Makine Ar-Ge Mühendislik Danışmanlık Ltd. Şti. ve Metalurji ve Malzeme Müh. Betül Nur GÜZEY'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışması için malzeme temini, kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesi ve metalurjik testlerde gösterdikleri destekler için İnan Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ne teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni destekleyen canım anneme, babama ve ablama minnet ve şükranlarımı sunarım.

Deneysel nitelikli bu çalışma, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Birimi (TÜBAP) tarafından 2021 / 152 numaralı proje ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT vi
ÖNSÖZ viii
İÇİNDEKİLER ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xi
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ xvi
1. BÖLÜM 1
GİRİŞ 1
1.1. Metallerin Kaynağı 2
1.2. Kaynak Yöntemleri ve Gazaltı Ark Kaynağı Yöntemi 3
1.3. Farklı Metallerin Kaynağı 4
1.4. Farklı Metallerin Kaynağında Mekanik ve Mikro Özellikler 5
2. BÖLÜM 8
LİTERATÜR TARAMASI 8
3. BÖLÜM 13
MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM 13
4. BÖLÜM 28
SONUÇLAR 28

4.1. Mekanik Testler 28
4.1.1. Mikrosertlik 28
4.1.2. Çekme Deneyi 30
4.1.3. Eğme Testleri 31
4.1.4. Charpy Darbe Testleri 33
4.1.5. Aşınma Deneyi 35
4.2. Metalografik Deneyler 35
4.2.1. Optik Görüntüler 35
4.2.2. FESEM ve EDX Analizi 39
4.2.3. XRD Analizi 41
5. BÖLÜM 44
TARTIŞMA 44
6. BÖLÜM 48
SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 48
KAYNAKLAR 50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	Alfa
γ	Gama
θ	Theta
µm	Mikrometre
°C	Santigrat Derece
A	Amper
V	Volt
Ar	Argon
C	Karbon
CO_2	Karbondioksit
Cr	Krom
Cu	Bakır
Fe	Demir
HB	Brinel Sertliği
HV	Vickers Sertliği
OM	Optik Mikroskop
Mg	Magnezyum
Mo	Molibden
Mn	Mangan
kN	Kilo Newton

MPa	Mega Pascal
Nb	Niyobyum
Ni	Nikel
S	Kükürt
Si	Silisyum

Kısaltmalar

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
AWS	Amerikan Kaynakçılık Derneği
ISO	Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu
EN	Avrupa Standartları
FESEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
GMAW	Gazaltı Ark Kaynağı
ITAB	Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
MAG	Metal Aktif Gaz
MIG	Metal İnert Gaz
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TS	Türk Standartları
TIG	Tungsten İnert Gaz
XRD	X-Işınları Difraktometresi
EDX	Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. S355J2C+N ve Hardox 450 plakalar. 15

Şekil 3.2. Hardox 450 ve S355J2C+N çeliklerine V kaynak ağzı açma işlemi. 16

Şekil 3.3. S355J2C+N ve Hardox 450 saclara ön tavlama işlemi. 16

Şekil 3.4. S355J2C+N ve Hardox 450 sacların gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesi. 17

Şekil 3.5. S355J2C+N ve Hardox 450 sacların SG3 elektrot ile kaynaklı birleşimi. 17

Şekil 3.6. Numune kesim şematik gösterimi. 18

Şekil 3.7. Tel erezyon yöntemi ile numunelerin kesim arayüzü (Charmilles, Robofil 440). 19

Şekil 3.8. Tel erezyon yöntemi ile numunelerin kesim işlemi. 19

Şekil 3.9. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş enine eğme ve çekme numuneleri. 20

Şekil 3.10. Kaynaklı bir plakadan boyuna ve enine test plakalarının kesilmesi. 20

Şekil 3.11. Boyuna çekme ve eğme numunelerinin kesilmesi. 20

Şekil 3.12. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş eğme ve çekme numuneleri. 21

Şekil 3.13. Tel erezyon ile kesilmiş Hardox 450 ve S355J2C+N malzemeleri. 21

Şekil 3.14. Tokluk numunelerinin kaynak merkezinden kesilmesi. 21

Şekil 3.15. Optik inceleme ve mekanik deney numuneleri. 22

Şekil 3.16. Tel erezyon ile kesilmiş eğme numuneleri. 22

Şekil 3.17. Kaynaklı çekme numunelerinin kesitleri. 23

Şekil 3.18. Çekme deney cihazı (INSTRON 5889 L3619). 23

Şekil 3.19. Eğme deney cihazı (Zwick/Roell Z600 Universal Tester). 24

Şekil 3.20. Charpy deney cihazı (Zwick/Roell RKP 450). 24

Şekil 3.21. Spektrometre cihazı ile ölçüm (Spectrotest TXC35 model portatif metal analiz cihazı). 24

Şekil 3.22. Zımparalama ve parlatma işlemi, bakalite alınmış kaynak kesitleri. 25

Şekil 3.23. Vickers sertlik ölçme. 26

Şekil 3.24. 0.5 mm aralık ile yatay, 0.3 mm aralık ile dikey sertlik ölçümü (Sertlik ölçüm grafiğinde belirtilen konumlar bu görsellerden takip edilebilir). 26

Şekil 3.25. Mikrosertlik cihazı ve sertlik ölçüm şeması. 26

Şekil 3.26. Aşınma deney cihazı (UTS Tribometer T10). 27

Şekil 4.1. Enine kaynaklı numunenin yatay sertlik ölçümü (HV0.1) (Ölçüm konumu Şekil 3.24'te görülebilir). 29

Şekil 4.2. Enine kaynaklı numunenin dikey sertlik ölçümü (HV0.1) (Ölçüm konumu Şekil 3.24'te görülebilir). 29

Şekil 4.3. Kaynaklı ve ana metallerin çekme testi numuneleri. 30

Şekil 4.4. Kaynak kesiti makro görünümü. 31

Şekil 4.5. Eğme testinden sonra kep ve kök görüntüleri a-b) S355J2C+N malzemesi, c-d) Hardox 450, e-f) Boyuna kaynak birleşimi g-h) Enine kaynak birleşimi. 32

Şekil 4.6. Kuvvet (kN) – Yer değiştirme (mm) eğme grafiği. 33

Şekil 4.7. Charpy çentik darbe deneyi sonuçları a) Hardox 450 b) S355J2C+N c) Hardox 450 ITAB d) S355J2C+N ITAB e) Enine kaynaklı numune f) Boyuna kaynaklı numune. 34

Şekil 4.8. Hardox 450 ana metalinin a) 20X ve b) 50X büyütmede optik görüntüsü. 35

Şekil 4.9. Hardox 450 çeliğinin a) 20X ve b) 50X büyütmede geçiş bölgesi ve c) 20X ve d) 50X büyütmede ısı tesiri altında kalan bölgenin optik görüntüsü. 36

Şekil 4.10. Kaynaklanmış malzemelerin kaynak merkezi a) 20X ve b) 50X büyütmede optik görüntüsü. 37

Şekil 4.11. S355J2C+N çeliğinin a) 20X ve b) 50X büyütmede ısı tesiri altında kalan bölgenin ve c) 20X ve d) 50X büyütmede geçiş bölgesinin optik görüntüsü. 38

Şekil 4.12. S355J2C+N ana metalin a) 20X ve b) 50X büyütmede optik görüntüsü. 38

Şekil 4.13. 250X, 1.00KX ve 2.00KX büyütmede FESEM görüntüleri a) Hardox 450 ana metali b) Kaynaklı bölge c) S355J2C+N ana metali. 39

Şekil 4.14. EDX karakterizasyonu yapılan bölgeler a) 1 numaralı bölge Hardox 450 b) 2 numaralı bölge Kaynak bölgesi c) 3 numaralı bölge S355J2C+N çeliği. 40

Şekil 4.15. Hardox 450 çeliğinin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi sonuçları. 40

Şekil 4.16. Kaynak metali enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi sonuçları. 41

Şekil 4.17. S355J2C+N çeliğinin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi sonuçları. 41

Şekil 4.18. MAG kaynak merkezinin XRD pattern sonucu.....42

Şekil 4.19. Hardox 450 çeliğinin XRD pattern sonucu. 43

Şekil 4.20. S355J2C+N çeliğinin XRD pattern sonucu. 43

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. İki ana malzemenin ağırlıkça kimyasal bileşimi (wt%). 14

Çizelge 3.2. İki ana malzemenin mekanik özellikleri. 14

Çizelge 3.3. Kaynak parametreleri. 15

Çizelge 4.1. Her numune için nihai çekme dayanımı, akma dayanımı ve kırılmaya kadar % uzama değerleri. 31

Çizelge 4.2. Eğme deneyi sonuçları. 32

Çizelge 4.3. Charpy V-Notch darbe deneyi sonuçları. 34

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Kaynak iki ya da daha fazla malzemenin ısı ya da basınç etkisi ile eritilmesi ve birleştirilmesini içeren önemli bir üretim yöntemidir (Cheng vd., 2021). Çelik, alüminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımları, nikel ve alaşımları, titanyum ve alaşımları, zirkonyum ve alaşımları, dökme demir gibi malzemelerin birleştirilmesinde kaynak yöntemi kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte günümüz imalat sektöründe yaygın olarak elektrik ark kaynağı, gazaltı ark kaynağı, oksi asetilen kaynağı, elektrik direnç ark kaynağı, enerji ışın kaynağı (lazer kaynağı) ve tozaltı kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Bu kaynak yöntemleri ile genellikle aynı malzemeler birleştirilmektedir. Ancak günümüzde havacılık, savunma, petrol, kimya, iş makineleri imalat sektörü gibi birçok endüstride farklı özellikte malzemelerin kaynağı gereksinim haline gelmiştir. Yüksek mukavemet, aşınma, korozyon direnci, sertlik ve gibi mekanik özelliklere, işlenebilirlik kabiliyetine ihtiyaç duyulan alanlarda iki farklı çeliğin birlikte kullanımı avantaj sağlamaktadır (Adar, 2019).

Birçok endüstride aşınma önemli bir hasar kriteridir. Makine parçalarının aşınma sebebiyle orijinal boyutlarının değişmesi sistemlerin işlevsellik ve verimliliklerini azaltmaktadır (Frydman, Konat ve Pekalski, 2008). Bu çalışmada odaklanılan malzemelerden bir tanesi olan HARDOX®, SSAB (Svenskt Stal AB) firması tarafından aşınmaya maruz sistemler ve parçalar için geliştirilmiş bir martenzitik çeliktir. Bu çelik brinell sertlik değerine göre Hardox 400, 450, 500, 550, 600 olarak sınıflara ayrılmıştır. Artan kod numarası daha yüksek sertlik, aşınma direnci, çekme mukavemeti anlamına gelirken aynı zamanda süneklik, tokluk ve kaynaklanabilirliğin azalması anlamına da gelir (Uzunali, 2015). Bu çalışmada ele alınan Hardox 450, piyasadaki diğer yüksek dayanımlı yapısal çeliklere göre aşınma bakımından daha

dirençlidir. Hardox çeliği bu yüksek aşınma özelliği yanında iyi bir tokluğa da sahiptir. Bu yüksek tokluk sayesinde düşük sıcaklıklarda oluşan aşırı zorlanmalardan etkilenmez (Yilmaz, 2010). Yüksek mekanik özelliklere sahip Hardox 450 uygun bileşim ve optimize edilmiş özel bir üretim prosesinin ürünüdür (Uluocak, 2008). Yüksek mukavemet ve yüksek aşınma direnci ile zorlu çalışma koşullarında (iş makinelerinde, kırıcı, ekskavatör) genellikle Hardox çeliği tercih edilmektedir (LAZIĆ, Arsic ve Prokic-cvetkovic, 2019, Mindivan, 2013).

Bu çalışmada Hardox 450 ile kaynaklı birleşimi gerçekleştirilen S355J2C+N çeliği genel amaçlı yapı endüstrisindeki makineler, inşaat endüstrisindeki makineler, inşaat bileşenleri, otomobiller, büyük çaplı borular, iş makineleri vb. birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. S355J2C+N çeliği geniş teknik kullanım yelpazesine katkıda bulunur ve iyi kaynak özelliklerine sahiptir. İhtiyaca ve ürün yelpazesine bağlı olarak ham veya normalize halde ticari olarak elde edilebilmektedir. J2 notasyonu içeren kaliteler "+ N" ilave notasyonu ile üretilir. "+ N" ilave notasyonunda üretim şekli, normalizeli veya normalize eşdeğer haddeleme şeklinde olduğunu ifade etmektedir. S355J2C+N çeliğindeki C notasyonu malzemenin soğuk şekillendirilme olasılığının varlığını göstermektedir. S355JR serisinde karbon miktarı %0.24 iken S355J2C+N çeliğinde %0.20-0.22 arasında değişmektedir (Grubu, 2017, Yıldırım, 2018). Bu çalışmada kaynaklı birleşimi araştırılan S355J2C+N ve Hardox 450 ∼%1.6 oranında Mn içermektedir.

1.1. Metallerin Kaynağı

Kaynak; metalik malzemelerin ısı, basınç veya her ikisinin etkisi altında bir ilave malzeme kullanmadan ya da kullanılarak gerçekleştirilen bir birleştirme işlemidir (Bodude ve Momohjimoh, 2015). Kaynak genellikle tek bir parça halinde üretilmesi mümkün olmayan veya birleştirerek üretmenin daha kolay, daha hızlı ve daha ekonomik olduğu durumlarda, diğer birleştirme yöntemlerinin yeterli olmadığı durumlarda tercih edilmektedir. Kaynak işleminde birleştirilmek istenen malzemelerin kaynak bölgeleri ısı ile sıvı (eriyik) duruma getirilmektedir. Kaynak birleşimindeki eriyik banyosu esas metal ya da metaller ve ilave kaynak telinden oluşmaktadır. Bu ergitme esaslı kaynak uygulamalarında kaynak banyosunun atmosfer ile temasının kesilmesi ve böylece

korunması gerekmektedir. Kaynak işleminde; ısı kaynağı, dolgu malzemesi ve kaynak bölgesinin atmosferden korunması birleşim başarısında doğrudan etkilidir.

Kaynak ile birleştirme işleminde meydana gelen yüksek ısının ve soğumanın malzeme geometrik özelliklerine (çekme, çarpılma, kalıntı gerilme vb.), mekanik özelliklere ve mikroyapısal özelliklere etkisi vardır (Bayock, Kah, Mvola ve Layus, 2019). Kaynak işleminde bir erime ve katılaşma olayı sonucunda yeni bir metalurjik yapı oluşmaktadır. Ayrıca kaynak ile oluşturulan birleşimin atmosfer ile temas eden yüzeyinde kimyasal reaksiyonlar ve korozyon meydana gelmektedir (Gençdoğan, 2020). Isının etkisiyle meydana gelen mikroyapısal ve kimyasal reaksiyonlar birleşimin mekanik özelliklerini etkilemektedir (Bodude ve Momohjimoh, 2015). Bu bağlamda kaynak işlemi sırasında oluşan yüksek ısının malzemeler ve birleşim bölgesinde negatif etkileri kaçınılmazdır.

Çelik malzemelerin kaynak edilebilirlikleri öncelikle içerdikleri karbon miktarı ile ilişkilidir. Genel olarak kaynaklanabilirlik, düşük karbonlu çelik için çok iyi (karbon seviyesi $\leq$ %0.15), yumuşak çelik için iyi (karbon seviyesi %0.15 ila %0.30), orta karbonlu çelik için orta (karbon seviyesi %0.30 ila %0.50) ve yüksek karbonlu çelik için zor ve ek işlemler gerektirebilir (karbon seviyesi %0.50 ila %1.00) (Adar, 2019). Kaynaklanabilirlik normalde artan karbon içeriği ile azaldığından, karbon içeriği %0.30'a ulaşan çelikler için ön ısıtma, ısı girdisini kontrol etme ve kaynak sonrası ısıl işlem gibi özel önlemler gerekir. Karbon içeriğine ek olarak, diğer alaşım elementlerinin varlığı da kaynaklanabilirlik üzerinde etkilidir (Uzunali, 2015). Mn elementi kaynak kabiliyetine pozitif katkı sağlayan bir elementtir.

1.2. Kaynak Yöntemleri ve Gazaltı Ark Kaynağı Yöntemi

Endüstride yaygın olarak elektrik ark kaynağı, gazaltı ark kaynağı, oksi asetilen kaynağı, elektrik direnç ark kaynağı, enerji ışın kaynağı (lazer kaynağı) ve tozaltı kaynak yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kaynak yöntemlerinin temel ortak özelliği elektrik akımı ile oluşturulan ark ile kaynak bölgesinde oluşturulan ısı ile dar bir alanda ergitme işleminin gerçekleştirilmesidir (Weman, 2012). Kaynak işleminde ilave metalin kaynak bölgesine sevk edilmesi ve kaynak bölgesinin atmosferik ortamdan yalıtılması kaynak başarı ve verimini doğrudan etkilemektedir.

Gazaltı ark kaynağı yönteminde özel bir torç kullanılmaktadır. Bu torç hem inert gaz hem de kaynak için gerekli ilave telin kaynak işlem merkezine sevk edilmesini sağlamaktadır. Torcun tetiklemesi ile kaynak teli bir sargıdan besleme tertibatıyla kaynak bölgesine doğru sabit hızda sevk edilir. Bu kaplamasız tel ile aynı anda yine torcun tetiklemesi ile bir basınçlı tüpten inert gaz kaynak bölgesine aynı anda sevk edilir. Tel ile kaynak metali arasında oluşan ark ile kaynak işlemi gerçekleştirilir. Gazaltı ark kaynak prosesi kullanılan gaz veya gaz karışımlarına göre adlandırılmaktadır. Bu çalışmada metal aktif gaz (MAG) kaynağı kullanılmıştır (Uluocak, 2008).

Gazaltı ark kaynağı yüksek hızlı ve ekonomik bir prosestir. Karbondioksit ya da karışım gaz, işlemdeki aktif koruyucu gazlardır. Ergimiş metalin atmosferdeki bileşiklerle reaksiyona girmesini önlemek için kalkan görevi görmektedir. Gazaltı ark kaynağı çoğunlukla, bağlantının sağlamlığını ve sertliğini sağlamanın önemli olduğu sistemlerde uygulanmaktadır (Yıldırım, 2018). Otomotiv, gemi ve inşaat makinelerinin imalat, kaplama ve kaynağına yönelik uygulamalarla en yaygın kullanılan kaynak işlemidir (Gençdoğan, 2020). Günümüzde en yaygın kullanılan ve en basit kaynak sistemine sahip olan elektrik ark kaynak yöntemine göre gazaltı ark kaynak yöntemi şu üstün özelliklere sahiptir; Metal ve alaşımların kaynağında kullanılabilmektedir, sınırlı elektrot uzunluğu problemi olamadığından sürekli kaynak gerçekleştirilebilmektedir, metal yığma hızı oldukça yüksektir, kaynak bölgesinde kaynak sonrası temizlenmesi gereken bir cüruf tabakası bırakmamasıdır (Adar, 2019) .

1.3. Farklı Metallerin Kaynağı

Farklı metallerin kaynağı farklı alaşımlara sahip malzemelerin kaynak yoluyla birleştirilmesi işlemini ifade eder. Günümüzde farklı üstün karakteristik özelliklere sahip malzemelerin kaynak yöntemi ile birleştirilmesi zaman, maliyet, üretkenlik ve katma değer bakımından endüstriyel bir optimizasyon ve çok yönlü bir bilimsel araştırma konusudur (Czupryński, Musztyfaga-staszuk, Szymura ve Monica, 2020). İki farklı malzemenin birlikte uygulama gereksinimi temelde dayanım, maliyet ve işlenebilirlik özelliklerini içerir. Farklı metalleri endüstriyel olarak uygulanabilir biçimde bir araya getirmek bu bağlantının mekanik özellikleri kadar mikroyapısının da araştırılmasını gerektirmektedir (Taraphdar vd., 2021). Metalleri birleştirmenin en iyi

yolunu seçmeden önce dolgu malzemesi ve her iki metalin de değerlendirilmesi gerekir. İki farklı metalin birleştirilebilir olması temelde erime noktası, termal genleşme oranları, elektrostatik özellikler ve karbon eşdeğerleri gözetilerek değerlendirilir. Çeliğin bileşimindeki alaşım elementlerinin oluşturduğu sertliğe eş sertliği veren karbon miktarına karbon eşdeğeri denir. Kaynak birleşiminin özelliklerini iki ana metal ve ek elektrot malzemesinin oluşturduğu eriyik banyosunun soğuması sırasında oluşan mikroyapı belirlemektedir. Soğuma hızının katılaşan birleşimin mikroyapısı üzerinde önemli etkileri vardır (Muthupandi, Bala Srinivasan, Seshadri ve Sundaresan, 2003). Farklı üstün özelliklere sahip metallerin kaynak yöntemi ile birleştirilmesi kompleks sistemlerin üretimi için günümüzde gereksinim haline gelmiştir.

1.4. Farklı Metallerin Kaynağında Mekanik ve Mikro Özellikler

Farklı özellikte iki metalin kaynağında, iki metal ve ek olarak ilave tel eritilerek bir kaynak banyosu oluşturulur. Bu nedenle bu üç farklı metalin erime sıcaklıklarının birbiriyle aynı ya da benzer olması gereklidir (Konat, Zemlik, Jasiński ve Grygier, 2021). Bu eriyik haldeki kaynak banyosu (sıvı metal) soğuduğunda katılaşır. Bu katılaşan metal kaynak birleşiminin temel özelliklerini barındırır. Bu kaynak merkezine belirli yakınlıkta bulunan iki esas metalde, kaynak sebebiyle oluşan sıcaklığın etkileri görülür. Kaynak işlemi sırasında meydana gelen bu mekanik ve mikroyapısal değişiklikler uluslararası standart deneyler ve teknolojik test cihazları ile gerçekleştirilmektedir.

Kaynak birleşim ile ilgili araştırmalar için kaynaklanmış plaklardan numuneler kesilmektedir. Tel erezyon yöntemi karmaşık parçaları ve sert malzemeleri kesmek için kullanılabilir ve en popüler kesme proseslerinden biridir. Tel erezyon yönteminde elektrotlar iyonize kanalın yakınında yoğun bir yerel ısınma ve yüksek güç yoğunluğu gerçekleştirir (Ming vd, 2021)**.** Yüksek güç yoğunluğu, malzemenin kesilmesi istenilen kısmının her iki elektrottan erime ve buharlaşma sebebiyle aşınmasına neden olur. Tel erezyon kesme yöntemi, mekanik ve geometrik özellikleri ne olursa olsun bütün iletken malzemeleri kesebilir (Ming vd., 2021). Takım elektrotu olan tel, bir makaradan beslenmekte ve kesilmek istenen iş parçası boyunca hareket etmektedir. İşlem anında uygulama voltajına bağlı olarak, yalıtkan bir sıvı içerisinde (su, gazyağı veya diğer

hidrokarbonlar) bulunan iş parçası ve tel arasında kıvılcımlar meydana getirilmekte, talaş kaldırma her bir kıvılcımdaki enerji miktarına bağlı olarak değişmektedir

Günümüzde cisimlerin mekanik özelliklerini araştırmada standart olarak gerçekleştirilen mekanik analizler vardır. Çekme deneyi mekanik karakterizasyon deneylerinin başında gelmektedir. Kesiti belirli olan bir cisim sabit bir hızda çekilir, bu sırada kuvvet ve deplasman ölçümü yapılır. Plastik, elastik davranış ve cismin dayanımı tespit edilir. Eğme deneyinde, belirli mesafede konumlandırılmış iki alt mandrel ve üstte bir mandrel ile kuvvet uygulanır. Eğme işlemi için belirlenmiş açıya (veya deplasmana) ulaşana dek sabit hızda basma işlemi uygulanır ve datalar kaydedilir. Bu test malzemenin sünekliğini veya kırılmaya karşı direncini belirlemek için gerçekleştirilmektedir (Korkmaz, Çetin, Adar ve Orak, 2020). Kaynaklı birleşimlerde kaynağın esas metallere göre sünekliğini ve eğilme durumunda deformasyon biçimini tespit etmekte önemli sonuçlar vermektedir. Charpy darbe testinde, darbe yükü altında standart bir çentikli numune kırılırken emilen enerji ölçülmektedir. Ne kadar fazla enerji absorbe edilirse, malzeme o kadar yüksek tokluk değerine sahip olur (Hurt ve Schrock, 2016, Tümer ve Yılmaz, 2016). Vickers sertlik ölçümünde malzeme parçası üzerine, tabanı kare olan piramit şeklindeki bir uç belirli bir yük altında batırılır ve yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegen uzunlukları ölçülür. Bu ölçüm değeri (köşegenler) kullanılarak Vickers sertlik değeri elde edilir.

Metallerde optik inceleme makroyapı ve mikroyapı inceleme olarak ikiye ayrılabilir. Makroyapı incelemeleri, çıplak gözle veya düşük büyütmelerle metal mikroskobu yardımıyla (5x ve 10x seviyelerinde büyütmede) yapılan incelemelerdir. Kaynak geometrisi, nüfuziyet, çatlaklar ve diğer kaynak hataları bu yöntemle belirlenebilirken mikroyapı incelemeleri, çıplak gözle görülemeyecek ve yüksek büyütmelerle (20x ve 3,000x seviyelerinde büyütmede) yapılan incelemelerdir (Yıldırım, 2018).

Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM), malzemelerin mikroyapı görüntüsünü yakalamak için kullanılan ileri bir teknolojidir. FESEM analizi malzemelerin mikroyapısını karakterize etme ve kaynaklı bölgenin mikroyapısının değişimini değerlendirmede yardımcı olma yeteneğine sahiptir. FESEM tipik olarak yüksek vakumda gerçekleştirilir. Bunun sebebi gaz molekülleri elektron demetini ve

görüntüleme için kullanılan yayılan ikincil ve geri saçılan elektronları bozma eğilimi göstermesindendir. Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM), neredeyse sınırsız alan derinliği ile 10x ila 300,000x büyütmelerde topografik, morfolojik ve mikroyapı hakkında temel bilgileri sağlar. FESEM, Energy Dispersive X-ray Spektroskopisi yardımıyla kontaminasyon noktalarını inceleme yeteneğine sahiptir (El-Eskandarany, 2020).

XRD, malzemelerin kristalografik özelliklerinin (kristal veya amorf) ve var olan fazlarının belirlenmesi için kullanılan bir hasarsız analiz tekniğidir. X-Ray difraksiyonu (XRD), araştırma ve endüstride yaygın olarak kullanılan güçlü bir araçtır. XRD genellikle malzemelerdeki katı çözeltilerin karakterizasyonu, kristalin boyutu ve şekli, kristal oryantasyonu, farklı seviyelerde iç elastik şekil değişimleri/gerilmeler, sıcaklığın etkisi, yakın yüzey karakterizasyonunu tespit etmekte kullanılmaktadır. Katı numunelerin ve kaynaklı birleşimlerin X-ray difraksiyonu (XRD) analizi ile malzemede mevcut olan fazlar veya çökeltiler belirlenebilir. XRD analizi, bir X-ışını Cu Kα radyasyon kaynağı (λ = 1.5406 Å) ile yapılır. Tarama adımı boyutu, toplama süresi, aralık, X-ışını tüpü voltajı ve akımı gibi farklı parametreler, numunenin gereksinim analizine göre sabitlenmelidir. XRD modeli için standart veri tabanı (JCPDS veri tabanı), metal numunelerinde çok çeşitli kristalin fazlar için faz tanımlaması için kullanılır (Mindivan, 2013, Aktaş, Toprak, Çalık ve Tekgüler, 2020). Bu çalışmada XRD analizi Hardox 450 ve S355J2C+N ana metallerine ve kaynaklı birleşime yapıldı.

Bu özgün araştırma tez çalışmasının amacı farklı mekanik ve mikroyapı özelliklerine sahip S355J2C+N ve Hardox 450 malzemelerinin kaynak edilebilirliğini, bu birleşim ile elde edilen yapının mekanik ve mikroyapısal özelliklerini sunmaktadır. Deneysel araştırmalar için Hardox 450 ve S355J2C+N malzemelerden test plakaları hazırlanmış ve kaynaklanmıştır. Kaynak işlemi gazaltı ark kaynak yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra test numuneleri bu plakalardan kesilmiştir. Kaynak birleşimi ve iki ana metalde ısı tesiri altındaki bölgeler mikroyapısal ve mekanik özellikler açısından incelenmiştir. Optik mikroskop, FESEM, XRD, çekme, eğme, mikrosertlik ve Charpy darbe testleri gibi metalografik ve mekanik testler kullanılarak deneyler yapılmış ve kaynak birleşimine ait özellikler detaylı biçimde sunulmuştur.

2. BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

Farklı metallerin kaynağı günümüzde uzay ve havacılık, gıda endüstrisi, basınçlı kaplar, otomotiv ve iş makineleri üretiminde önemli bir tasarım parametresi haline gelmiştir. Kaynakla birleştirilmiş bir sistem ya da parçada iki farklı metalin üstün özelliklerini daha ekonomik biçimde birlikte sunabilmek endüstriyel rekabet ve müşteri memnuniyeti bakımından birçok avantaj sağlamaktadır. Farklı metallerin kaynağı ile ilgili birçok bilimsel araştırma ve endüstriyel uygulama mevcuttur.

Farklı metallerin kaynağı ile ilgili çalışmalara göz atarsak; Uluocak (2008) yapmış olduğu çalışmada, 5 mm kalınlığında Hardox 450 çeliklerinin MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmesi sonucu çeliğin mekanik davranışlarını ve ısı tesiri altında kalan bölgenin mekanik ve mikroyapısal değişimlerini incelemiştir. Kaynaklı Hardox 450 çeliğinin akma dayanımını 426 MPa olarak ölçmüş ve kopmanın ısıdan etkilenen bölgeden olduğunu gözlemlemiştir. Hardox 450 çeliğinin mikrosertlik ölçümlerinde ise ana metalin 490 HV, kaynak metalinin 420 HV ve ITAB'ın 460 HV olduğunu ölçmüştür. Optik mikroskop incelemelerinde ise kaynak bölgesinde daha kaba tanelere ve kaynak bölgesinden uzaklaştıkça, ısı etkisinin azalması sebebiyle daha ince tanelerin oluştuğunu gözlemlemiştir.

Adar (2019), yapmış olduğu çalışmada Hardox 500 ile S355 çeliklerinin robotik ark kaynak yöntemi kullanarak farklı parametrelerle kaynaklanabilirliğini araştırmıştır. Kaynaklı numunelerin birleşim kabiliyetlerini mekanik testlerle (çekme ve sertlik ölçüm) belirlemiştir. Deney sonuçları analiz edilmiş ve SEM-OM görüntüleri ile doğrulamıştır. Sonuç olarak Hardox 500 ve S355 çeliklerinin en uygun şekilde 200 A ve 27.8 V kaynak parametreleri ile kaynaklanabileceğini tespit etmişlerdir.

Korkmaz vd. (2020), yapmış oldukları çalışmada, Hardox 500 ve S355 çeliğinin GMAW (Gaz Metal Ark Kaynağı) yöntemi ile farklı akım ve gerilim parametreleri kullanılarak kaynaklanabilirliği araştırmışlardır. İki farklı çelik alaşımının kaynaklanabilirliği çekme testi, mikrosertlik ölçümü, SEM ve mikroyapı görüntüleme teknikleri ile incelenmiştir. Kaynaklı numunelere çekme testleri uygulanmış ve belirlenen girdi parametrelerine göre numunelerin kritik noktaları ve deformasyon özellikleri değerlendirilmiştir. Numunelerin mikrosertlik değerleri Vickers (HV) sertlik ölçüm yöntemi ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Hardox 500 ve S355 malzemesinin düşük akım ve voltaj değerlerinde kaynak kabiliyetinin düşük olduğu ve sertlik dağılımının düzensiz olduğu tespit edilmiştir. Yüksek akım ve yüksek gerilim değerlerinde çekme eğrilerinin daha kararlı davranış sergilediği ve homojen bir sertlik dağılımının meydana geldiğini belirlemişlerdir.

Celasun (2012), yapmış olduğu çalışmada 14 mm kalınlığında S355J2 kalite çelik kullanmıştır. S355J2 çeliğini 780 °C sıcaklıkta 60 dakika tavlayıp suda soğutularak martenzit ve ferritten oluşan çift-fazlı çelik elde etmiştir. Uygulanan ısıl işlem sonrasında elde edilen 780 S malzemeler ve ısıl işlem görmemiş S355J2 genel yapı çeliği S1 ve S2Mo tozaltı kaynak telleri ile kaynatılmış ve uygulanan çekme testleri sonucu, ısıl işlemle elde edilen 780 S numunelerin S2Mo tozaltı kaynak teli ile kaynatılan numunelerden daha yüksek dayanımlı olduğunu belirlemiştir.

Bilen (2016), modern kaynak yöntemleri arasında yer alan PTA (Plazma Transferli Ark) kaynak yöntemiyle Hardox 400 çeliği ve AISI 304 Paslanmaz çeliği farklı kaynak parametreleri ile kaynak yapmıştır. Çalışmada kaynak sonrası numunelerin tahribatlı muayenesi ve tahribatsız muayenesi yapılmıştır ve sonuç olarak kaynaklı bağlantıların birleşme ara yüzeyinden alınan mikroyapı görüntülerinde sırasıyla kaynak dikişi ve ısı tesiri altında kalan bölgeden ana malzemeye doğru ilerledikçe mikroyapı karakteristiklerinde değişimler olduğunu bulmuştur.

Yılmaz (2017), AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik malzemeleri lazer kaynağı ile küt alın kaynak tarzında ve yatay pozisyonda iki taraflı olarak birleştirmiştir. Gerçekleştirilen çekme deneylerinde akma dayanımı 316 ± 20 MPa, çekme dayanımı 673 ± 3 MPa olarak elde etmiştir. Lazer kaynağı ile birleştirilen aynı çeliklerin çekme deneylerinde ise 295 ± 15 MPa, çekme dayanımı 481 ± 6 MPa ve % uzama değeri ise

%12 ± 4 olarak elde etmiştir. Elde edilen değerlere bakıldığında Akma dayanımında %7, çekme dayanımında %29 ve % uzama değerlerinde ise %84 oranında azalma tespit etmiştir.

Huang, Yang, Lu ve Bin (2016), yapmış oldukları çalışmada 8 mm kalınlığında S355JR çeliği ile 316L paslanmaz çeliği gaz tungsten ark kaynağı ile 3.2 mm çaplı A022 dolgu elektrotu kullanarak kaynaklamış ve farklı kaynak ağızlarının (V, X, K) mikroyapının karakterizasyonu, mekanik özellikleri, benzer olmayan eklemin korozyon davranışlarını ve termal analizini araştırmışlardır. Farklı kaynak ağızlarına rağmen boyuna artık gerilmenin dağılım eğiliminin benzer olduğu, gerilim büyüklüğünün biraz farklı olduğunu, boyuna artık gerilmenin oluk bağlantılarındaki fark üzerinde çok az etkisi olduğunu görmüşlerdir. V kaynak ağzındaki enine artık gerilmenin tepe değeri, K kaynak ağzındakinden %40.1 daha büyük olduğunu ölçmüşler ve kaynak ağızlarının farklı çeliklerde kaynak verimini etkilediğini görmüşlerdir.

Kaçar, Emre, İşineri ve Najafigharehtapeh (2018), yapmış oldukları çalışmada aşınmaya dirençli Hardoks 400 ve östenitik paslanmaz çelik AISI 304 çiftinin elektrik ark kaynağı ve gazaltı ark kaynağı yöntemleri ile birleştirilebilirliğini incelemiş, farklı kaynak yöntemlerinin birleşmenin mekanik özelliklerine ve yapısına etkisini araştırmışlardır. HARDOKS 400–AISI 304 çelik çifti birleştirilmiştir. Farklı cins çelik birleştirmesinin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini belirlemişlerdir. Elde edilen bulgulara göre genel olarak değerlendirildiğinde gazaltı ark kaynağı yöntemi ile birleştirilmiş numunelerin dayanımlarının elektrik ark kaynağı yöntemi ile birleştirilen numunelerden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Gupta, Sharma, Kumar ve Thakur (2020), yapmış oldukları çalışmada yüksek aşınma değerine sahip 20 mm kalınlığında Hardox 400 çelik levhaları üç ferritik dolgu elektrotu (E8018, E9018 VE E11018) kullanılarak kaynaklayarak kaynak metali mukavemetini ve tokluğunu incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda kaynaklı bağlantının maksimum bağlantı verimliliğinin ve darbe tokluğunun seçilen elektrotlar arasında E11018 elektrotu ile elde edildiğini görmüşlerdir.

Al-Khafaji (2020), yapmış olduğu çalışmada 200 × 100 mm S355J2C+N çelik plakalarını iki farklı kalınlıkta, metal inert gaz (MIG) kaynağı ve korumalı metal ark kaynağı (SMAW) yöntemleri ile birleştirmiştir. 10 mm plakada V-45° ile 7.7 mm

kaynak ağzı açılarak, 4 mm plaka alın alına kaynatılarak birleştirilmiştir. Deney sonunda farklı kalınlıklar, akımlar ve kaynak geçiş sayıları üzerindeki kaynak yöntemlerinin açısal bozulma miktarının gerilim oluşumu ve sertlik üzerindeki etkilerini gözden geçirmiştir. Her iki kaynak yönteminde de gerilim ve sertlik değerlerinin oluşumunda kaynak sebepli açısal bozulmanın doğru orantılı olduğu görülmüştür.

Teker ve Gençdoğan (2020), birbirinden farklı kimyasal ve mekanik özelliklere sahip 10 mm kalınlığındaki AISI 430 ve Hardox 450 çelikleri, çift taraflı TIG (Tungsten inert gas) kaynak yöntemi ile ilave tel ve oluk kullanılmadan tek geçişte başarıyla birleştirerek kaynak bölgesinin OM, SEM, EDX, EBSD analizlerini değerlendirdiler. ITAB-AISI 430'da biber benzeri krom karbürler ve tane sınırı karbürleri, ITAB-Hardox 450'de iğnemsi ferrit, widmanstatten ferrit ve martenzit görmüşlerdir.

Savaş (2021), yapmış olduğu çalışmada, 4 mm kalınlığındaki Hardox 400 çeliği, AISI 304L paslanmaz çeliği ve St52 tipi çeliği MIG kaynağı ile kaynak edilmesi sonucunda mekanik davranışları incelemiştir. Kaynak işleminde $ArCO_2$ koruyucu gazı ve Si307 tipi paslanmaz kaynak teli kullanılmıştır. Kaynaklı plakalardan numune hazırlama işleminde tel erezyon yöntemi kullanılmıştır.

Okay, Najafi, Emre ve Kaçar (2015), S235JR–Hardox 400 çelik çiftini elektrik ark kaynak yöntemiyle birleştirmiş ve farklı cins çeliklerin birleştirmesinin mekanik ve mikroyapı değişimini inceleyerek, mikroyapı ve mekanik özellik ilişkisini mikrosertlik, çekme, üç nokta eğme ve darbe çentik testi, SEM analizi yardımı ile belirlemişlerdir. En yüksek sertlik değerini Hardox 400 çeliğinde ölçmüşler ve Hardox 400 malzemesinin ısı tesiri altında kalan bölgesinin tarafının sertliği ana malzemeden düşük ancak kaynak metalinden daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Birleştirmenin S235JR çeliğinin ITAB'nin kaba taneli bölgesinin sertliği S235JR çeliğinden daha düşük bulmuşlardır. Hardox 400 çeliğinden kaynak metaline doğru sertlik azalmasının sebebini kaynak termal çevriminin etkisiyle yapısal dönüşüme dayandırmışlardır.

Czupryński vd., (2020), S355J0 ve aşınma dayanımlı çelik Hardox 450 Manual Metal Arc (MMA) ve MAG kaynak yöntemlerini kullanarak birleştirilmişlerdir. S355J0'ın akma dayanımını 365 MPa ve Hardox'un dayanımını ise 1210 MPa bulmuşlardır. Metal aktif gaz kaynağı ile V şeklinde açılmış kaynak ağzını 5 pasoda birleştirmişlerdir. Maksimum yüzey sertliklerini Hardox 450 için 468 HV ve S355J0

için 188 HV tespit etmişlerdir. Bu sertlik değeri kaynak merkezinde ise 212 HV'dir. Hardox 450 ve S355J0 malzemelerinin kaynağı başarılı bir biçimde gerçekleştirilmiştir.

Gökdaş (2018), St37 ve OPTİM700MC malzeme çiftlerini bir ergitme kaynak yöntemi olan plazma ark kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve kaynak kabiliyetini araştırmıştır. Çalışmada çeliklerin farklı kombinasyonlarını birleştirip hazırlanan kaynaklı numuneler tahribatlı ve tahribatsız muayeneler olmak üzere analiz yöntemleriyle değerlendirmiştir. Radyografi testi sonuçlarına göre, 110 A ile birleştirilen numunenin kaynak dikişinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiş olup, test standartları gereği en iyi birleştirmenin bu amper değerinde sağlandığını tespit etmiştir.

Uzunali (2015), sahip oldukları yüksek karbon eşdeğeri sebebiyle Hardox 450 ve Optim700MC çeliklerini MAG kaynak yöntemiyle birleştirmiş ve kaynak sonrası numunelere ısıl işlem uygulamıştır. Kaynak işleminden önce numunelerin mekanik ve kimyasal özelliklerini doğrulamak için kimyasal kompozisyon analizi, mekanik testler, sertlik testleri ve mikroskobik inceleme yapılmıştır. Kaynak metali sertlik değerlerinin ısıl işlemlerle değişim göstermediğini ve yalnızca Hardox 450 ısı tesiri altında kalan bölgesinin sertliğinde artış gösterdiğini tespit etmiştir. Metalurjik incelemelerinde ise kaynak sonrası ITAB'da oluşan tane irileşmesinin meydana geldiğini tespit etmiştir.

3. BÖLÜM

MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM

Bu çalışmada yüksek aşınma direncine sahip Hardox 450 ve düşük karbonlu genel yapı çeliği S355J2C+N'nin (0.20 wt% C) alfa ferrit ve az miktarda Fe_3C içeren gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleşimi günümüz teknolojik laboratuvar testleri ile araştırıldı. Kaynak işleminde Askaynak AWS A5.18:ER70S-6 kodlu 1.2 mm çaplı kaynak teli kullanıldı. Hardox 450 ve S355J2C+N ana malzemeleri ve kaynak teli kimyasal bileşimleri ağırlıkça (wt%) Çizelge 3.1'de verilmiştir. Ana metaller ve kaynak telinin mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. 8 mm et kalınlığında S355J2+N ve Hardox 450 malzemelerden kaynak ile birleştirilmek üzere 300 × 55 × 8 mm, 300 × 40 × 8 mm, 500 × 150 × 8 mm, 250 × 150 × 8 mm, 300 × 250 × 8 mm boyutlarda plakalar hazırlandı (Şekil 3.1). Kaynaklanacak plakaların birleşim çizgilerine V-45°'lik açı ile 5 mm kaynak ağzı açıldı, 2 mm kök mesafesi bırakıldı (Şekil 3.2). Plakalara kaynak işlemi öncesinde 150-190° arası sıcaklıkta ön tavlama işlemi gerçekleştirildi (Lazıć, Arsic, Prokic-cvetkovic, 2019). Kaynak işlemi için ön tavlama sıcaklığı Bosch marka UniversalTemp model 0-500 ℃ termometre ile ölçüldü. Birleştirilecek iki plakanın altına bakır bir levha konumlandırıldı (Şekil 3.3). Kaynak Çizelge 3.3'te gösterilen kaynak parametreleri ile QINEO STEP 600 C marka kaynak makinesi ve (CORGON 82 Ar + %18 CO_2) gaz kullanılarak 4 pasoda gerçekleştirildi (Şekil 3.4. ve Şekil 3.5.). Kaynaklı plakalar oda sıcaklığında (21 °C) soğutuldu. Bu soğuma 300 × 40 × 8 mm plakada yaklaşık 80 dk sürdü. Bu çalışmada numuneler enine ve boyuna yönde hazırlanmıştır. Bu levhalardan test numunelerinin kesilmesi şematik olarak Şekil 3.6'da görülmektedir. Mekanik ve mikroyapı inceleme numuneleri mekanik özelliklerin ve metalurjik yapının sıcaklıktan etkilenmemesi için tel erezyon yöntemi kullanılarak hazırlandı. Charmilles marka, Robofil 440 model ile 4 mm / dk hız ile saf su ve 0.25

mm pirinç tel ile kesildi (Uzunali, 2015, Uzunali ve Cuvalci, 2015, Çaydaş ve Hasçalık, 2006) (Şekil 3.7 - Şekil 3.17). Kesilmiş numunelerin kaynakları Delta SEIKI 1050 Mitsubishi interface marka CNC ile temizlendi. Çekme testleri ASTM A370 standardına göre INSTRON 5889 L3619 cihazı ile 5 mm/dk çekme hızında üçer adet tekrarlı olarak esas metaller, enine ve boyuna kaynaklı numuneler için gerçekleştirildi (Şekil 3.18). Kaynaklı bağlantıların eğme testleri TS EN ISO/IEC 17025:2017'ye göre yapılmıştır. Test, Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Derneği (ILAC) tarafından AB-905-T kayıt numaralı laboratuvarda TURKAK'ta yapılmıştır. 6 farklı numune için 3'er tekrarlı eğme deneyi deneyi tel erezyon ile kesilmiş ana metaller, enine ve boyuna kaynaklı numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Deney, 21.1 °C oda sıcaklığında, TS EN ISO 5173 standardı 60 mm / dk aralığı 58 mm test hızında Zwick/Roell Z600 test cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.19). Charpy V-çentik darbe testi ISO 9016'ya göre $55 \times 10 \times 6$ mm^3 boyutlarında test numuneleri ile (Marka: Zwick/Roell RKP 450) oda sıcaklığı, -20 C de ve -40 C de gerçekleştirildi. Deney 5 farklı konum için: 2 ana metal, 2 ITAB ve kaynak merkezi için gerçekleştirildi (Şekil 3.20).

Çizelge 3.1. İki ana malzemenin ağırlıkça kimyasal bileşimi (wt%).

Malzeme	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
S355J2C+N	0.20	1.60	0.25	0.24	-	-	0.035	0.032	Kalan
Hardox 450	0.30	1.62	0.78	1.12	0.22	0.26	0.020	0.010	Kalan
ER70S-6	0.08	1.70	1.00	-	-	-	-	-	Kalan

Çizelge 3.2. İki ana malzemenin mekanik özellikleri.

Mekanik özellikler	S355J2C+N	Hardox 450	ER70S-6 kaynak teli
Akma mukavemeti (MPa)	381 ± 55	1200 ± 50	470 ± 15
Çekme mukavemeti (MPa)	595 ±55	1400 ± 50	570 ± 15
% Uzama	22 ± 3	10 ± 4	25 ± 2
Elastik modülü N/mm^2	200,000	200,000	-
Charpy V-Notch darbe tokluğu (J)	27 (-20 °C)	27 (-40 °C)	60 (-30 °C)

Çizelge 3.3. Kaynak parametreleri.

Kaynak prosesi	Gazaltı ark kaynağı
Koruyucu gaz	(CORGON 82 Ar + %18 CO_2)
Kaynak teli	ER70S-6
Kaynak akımı (A)	200
Kaynak voltajı (V)	20
Kaynak hızı (mm/min)	300

Kaynak parçasının mikroyapı incelemesi bir metal mikroskop (Marka: Olympus CX41 ışık mikroskobu) kullanılarak Hardox 450, S355J2C+N ve kaynaklı bölgeden gerçekleştirilmiştir. Spectrotest marka TXC35 model portatif metal analiz cihazı ile elementel ölçüm yapıldı (Şekil 3.21).



Şekil 3.1. S355J2C+N ve Hardox 450 plakalar.

Hardox 450 ve S355J2C+N plakalarda plazma kesme yöntemi ile kesilmiş kaynak çizgisi freze ile temizlendi ve açı verildi. Bu işlem hem plazma kesme sebebiyle ısıya maruz bırakılan birleşim hattını temizlemek hem de ilave metal için uygun bir boşluğu gerçekleştirmek için yapıldı (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Hardox 450 ve S355J2C+N çeliklerine V kaynak ağzı açma işlemi.

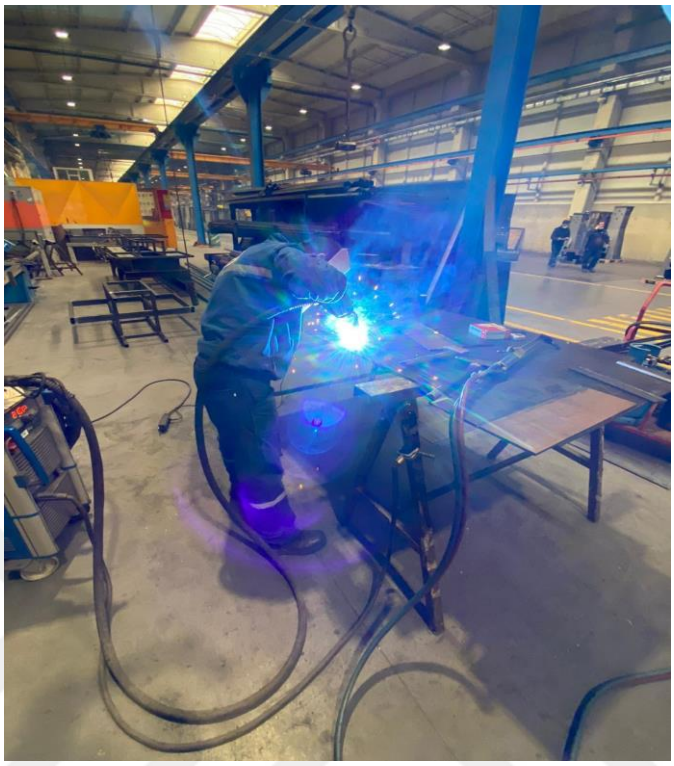
Kaynak ile birleştirilecek kaynak ağzı açılmış plakalar puntalandı. Oksijen ve yanıcı gaz karışımı ile kaynak hattında noktasal erime oluşturmadan tavlama işlemi gerçekleştirildi. Tavlanmış plakaların soğuma süreleri kaydedildi (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. S355J2C+N ve Hardox 450 saclara ön tavlama işlemi.

Kaynak işlemi Hardox sac kaynağında uzmanlaşmış 30 yıllık tecrübesi olan bir kişi tarafından manuel olarak gerçekleştirildi. Bu işlemde alın bölgesindeki mesafe, sacların sabitlenmesi ve sabit bir ilerleme hızında 4 paso kaynak işlemi gerçekleştirildi. Gaz basıncı kapalı ortam olduğundan 8 bar olarak tercih edildi (Şekil 3.4). Şekil 3.5'te

kaynağı tamamlanmış bir plakada kaynak çizgisi ve oluşturulan kaynağın başarısı net biçimde görülmektedir.

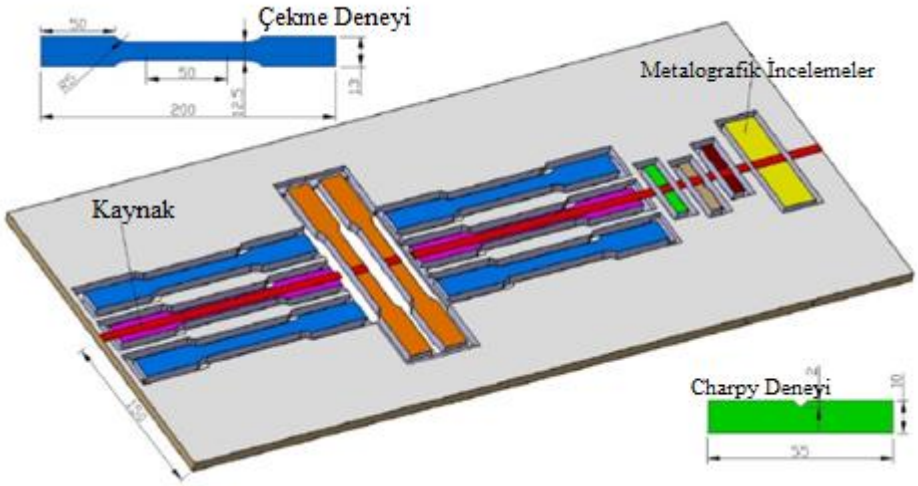


Şekil 3.4. S355J2C+N ve Hardox 450 sacların gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesi.



Şekil 3.5. S355J2C+N ve Hardox 450 sacların SG3 elektrot ile kaynaklı birleşimi.

Şekil 3.6 da test numuneleri ve kaynak bölgesinden kesim pozisyonları sunuldu. Bu çalışmada numuneler kaynak hattı boyunca temin edildi. Numune hazırlama işleminde mümkün olduğunca aynı kaynaklı levhadan farklı test numunelerinin temin edilmesi amaçlandı. Plakanın kaynak başlangıcındaki ve sonundaki 30 mm'lik kısımları test için kullanılmadı.

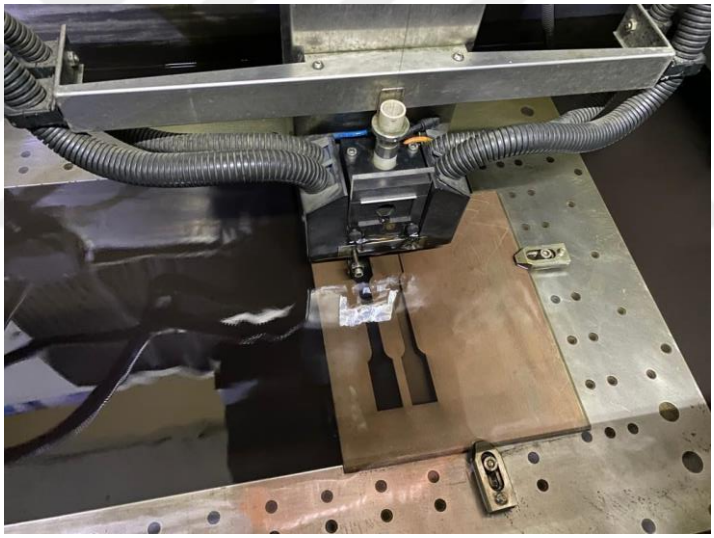


Şekil 3.6. Numune kesim şematik gösterimi.

Kaynaklı birleşimlerden numunelerin hazırlanması bu araştırmanın zorlu deneysel sürecinde önemli bir bölümü oluşturmaktadır. Numunelerin ısıdan etkilenmemesi, uygun boyutlarda kaynaklanmış plakadan temin edilmesi için tel erezyon yöntemi tercih edildi. Bu yöntemde numuneler saf su içerisinde konumlandırılmakta ve pirinç bir tel ile kesim işlemi yapılmaktadır. Tel burada bir sarf malzemesidir ve bir bobinden temin edilmektedir. Şekil 3.9-3.17 de görüleceği üzere numuneler tel erezyon yöntemi ile kesildi.



Şekil 3.7. Tel erezyon yöntemi ile numunelerin kesim arayüzü (Charmilles, Robofil 440).



Şekil 3.8. Tel erezyon yöntemi ile numunelerin kesim işlemi.



Şekil 3.9. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş enine eğme ve çekme numuneleri.



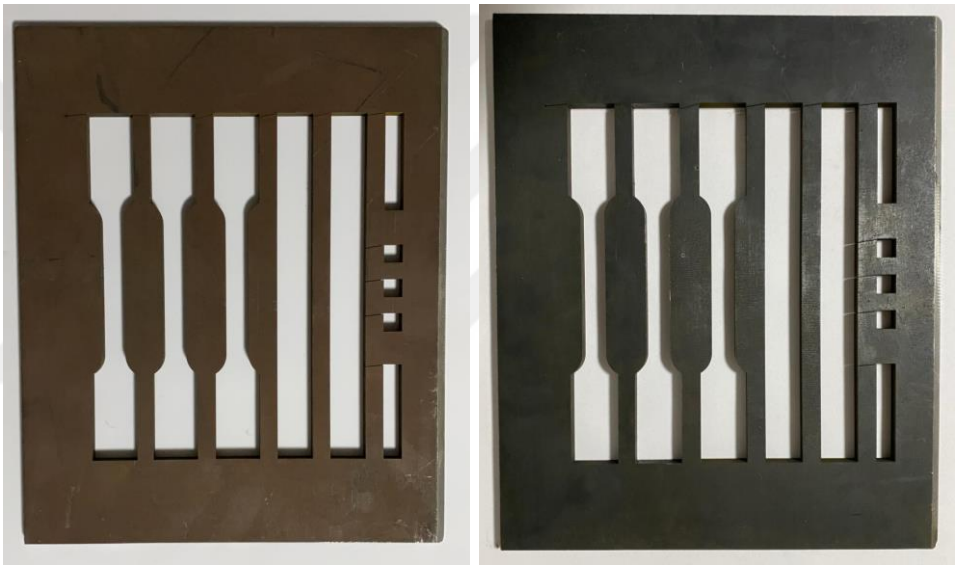
Şekil 3.10. Kaynaklı bir plakadan boyuna ve enine test plakalarının kesilmesi.



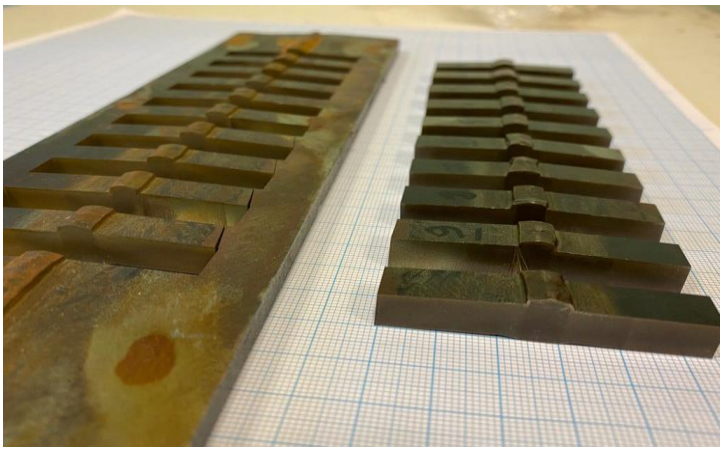
Şekil 3.11. Boyuna çekme ve eğme numunelerinin kesilmesi.



Şekil 3.12. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş eğme ve çekme numuneleri.



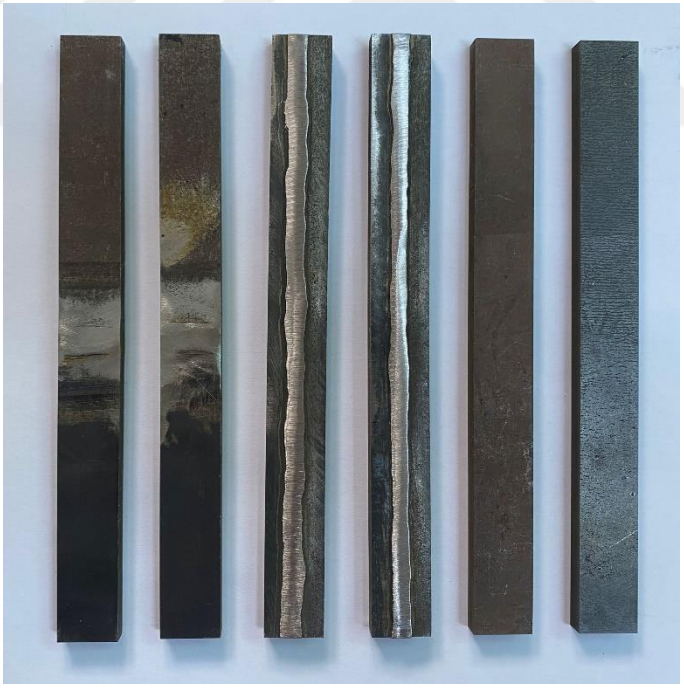
Şekil 3.13. Tel erezyon ile kesilmiş Hardox 450 ve S355J2C+N malzemeleri.



Şekil 3.14. Tokluk numunelerinin kaynak merkezinden kesilmesi.



Şekil 3.15. Optik inceleme ve mekanik deney numuneleri.



Şekil 3.16. Tel erezyon ile kesilmiş eğme numuneleri.



Şekil 3.17. Kaynaklı çekme numunelerinin kesitleri.



Şekil 3.18. Çekme deney cihazı (INSTRON 5889 L3619).



Şekil 3.19. Eğme deney cihazı (Zwick/Roell Z600 Universal Tester).



Şekil 3.20. Charpy deney cihazı (Zwick/Roell RKP 450).

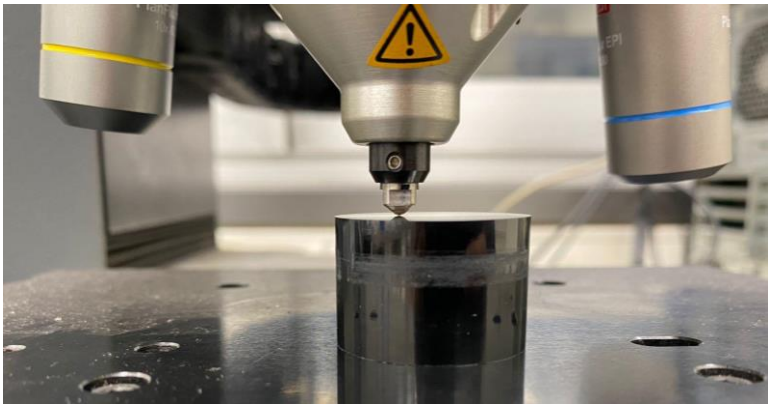


Şekil 3.21. Spektrometre cihazı ile ölçüm (Spectrotest TXC35 model portatif metal analiz cihazı).

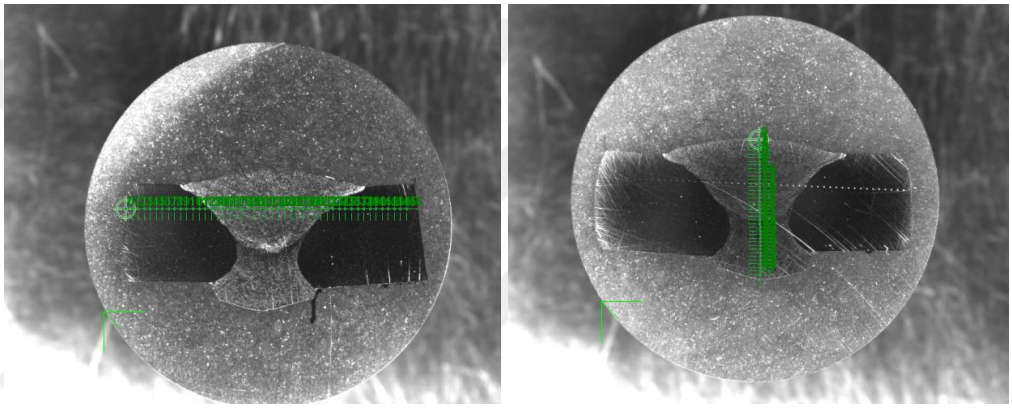
Metalurjik inceleme için Struer marka discotom-100 model elmas kesicili hassas kesme cihazı ile bakalit cihazına sığacak biçimde numuneler kesilerek Struer marka CitoPress-5 model cihaz ile bakalitlerde numuneler hazırlandı. Zımparalama işlemi Struer marka Tegramin 25 model zımparalama ve parlatma cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Öncelikle zımpara: MD-Piano 220, su ile 2:30 dakika 40 N baskı kuvveti ve 150 rpm hızda gerçekleştirildi. Yıkama yapıldı, ikinci işlemde zımpara: MD-Allegro, DiaDuo-2 9 µm ile 4:30 dakika süreyle 40N baskı kuvveti ve 150 rpm hızda parlatma yapıldı ve yıkama işlemi yapıldı. Zımpara: MD-Dac, DiaDuo-2 3µm ile 4:30 dakika 35 N baskı kuvveti ve 150 rpm hızda gerçekleştirildi. Son olarak, zımpara: MD-Nap, DiaDuo-2 1 µm 2:30 dakika 30 N baskı kuvveti uygulanarak 150 rpm hızda parlatma işlemi gerçekleştirildi (Şekil 3.22). Ana metaller ve kaynaklı numuneler, metalografik analiz için ayna benzeri bir yüzey elde etmek üzere hazırlandıktan sonra yüzey saf etanol ile temizlendi. Mekanik olarak yüzey parlatma işleminden sonra %3 nital (97 ml etanol + 3 nitrik asit) dağlama solüsyonu ile 15 saniye dağlandı. Bakalite alınmış numuneler bir otomatik mikrosertlik test cihazı (Make: Struers Emco-test DuraScan G5) kullanılarak sertlik numunesinin 0.5 mm aralık ile yatay, 0.3 mm aralık ile dikey sertlik ölçümü yapıldı. Mikrosertlik testi sırasında, yük ve bekleme süresi sırasıyla 100 g (0.98 N) ve 5 s'de tutuldu. Ana metal, ITAB ve kaynak bölgesinin sertlik değerleri 3 tekrarlı olarak ölçüldü. (Şekil 3.23 ve Şekil 3.24). Sertlik ölçüm cihazı ve kaynak bölgesinin şematik görünümü Şekil 3.25'te görülmektedir.



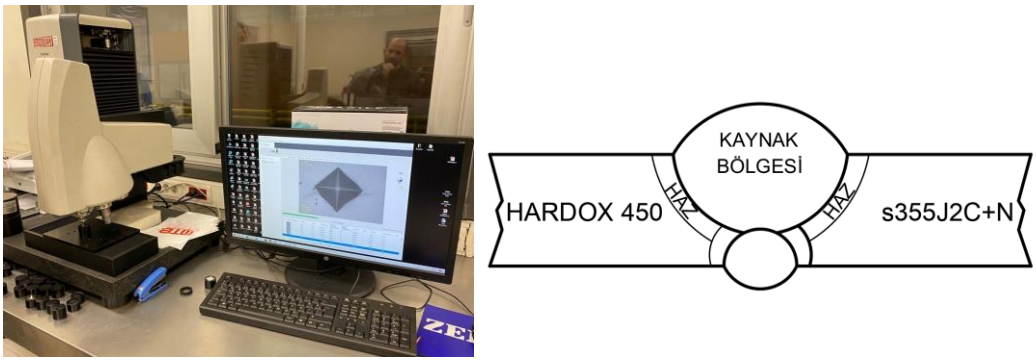
Şekil 3.22. Zımparalama ve parlatma işlemi, bakalite alınmış kaynak kesitleri.



Şekil 3.23. Vickers sertlik ölçme.



Şekil 3.24. 0.5 mm aralık ile yatay, 0.3 mm aralık ile dikey sertlik ölçümü (Sertlik ölçüm grafiğinde belirtilen konumlar bu görsellerden takip edilebilir).



Şekil 3.25. Mikrosertlik cihazı ve sertlik ölçüm şeması.

Aşınma deneyi Şekil 3.26'da görülen UTS Tribometer T10 marka cihaz ile gerçekleştirildi. Pin on disk biçiminde gerçekleştirilen aşınma deneyinde Hardox 450,

S355J2C+N ve kaynak bölgesi için 240 Dev / dk ve 50 N yük değerinde 120 m 3 Hz'de aşınma ölçümü gerçekleştirildi.



Şekil 3.26. Aşınma deney cihazı (UTS Tribometer T10).

ImageJ yazılımı kullanılarak ana metallerde, ITAB ve kaynak metalinde ortalama tane boyutları ASTM E112 standardına göre ölçüldü. Carl Zeiss Gemini 500 FESEM cihazı kullanılarak 250X, 1.00KX ve 2.00KX ve büyütmede ITAB ve kaynak merkezi görüntülendi. FESEM'e ek olarak (Carl Zeiss Gemini 500 FESEM), mikroyapı incelemesinin ardından uygun görülen kaynaklı numunelere ve ana metallere SEM cihazına bağlı Tracor-Northern marka enerji dağılımlı X-ray analizörü (EDX) kullanılarak 500X büyütmede elementel analiz yapıldı. Fazları belirlemek için XRD analizi PANalytical Empyrean model X-ray cihazı, Bragg–Brentano geometrisinde CuKα tüpü (λ = 1.5406 Å) kullanılarak 40 mA, 45 kV güç değerlerinde gerçekleştirildi. Taramalar, sürekli modda adım başına 0.026° ve 60 s'lik adım taramasıyla 20° ile 120° arasında 2θ aralığında yapıldı.

4. BÖLÜM

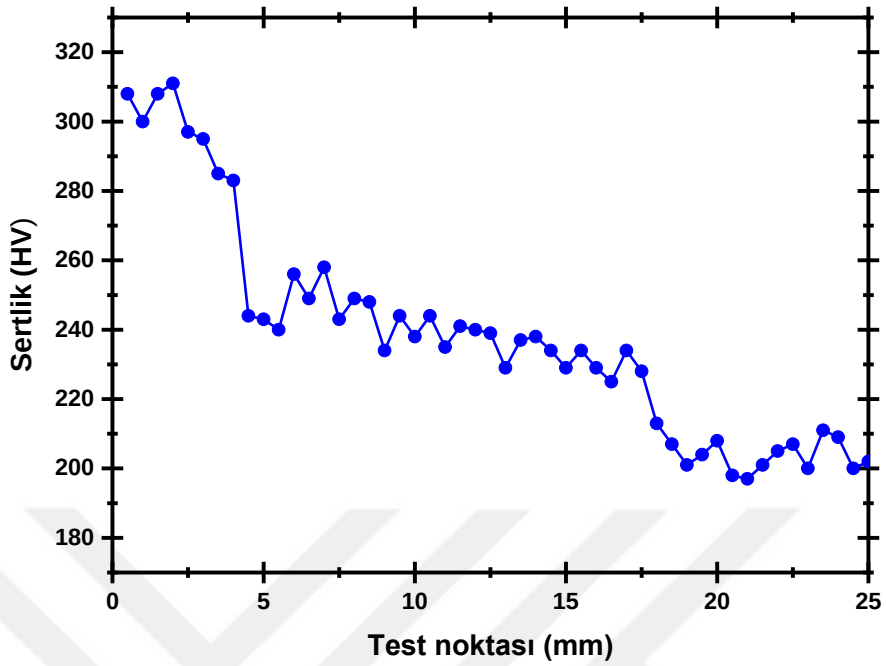
SONUÇLAR

Gazaltı ark kaynağı ile Hardox 450 ve S355J2C+N uygulanan prosedür ile başarılı biçimde birleştirildi. Bu birleşime ait mekanik ve mikroyapısal olarak gerçekleştirilen kapsamlı testlerin sonuçları aşağıda sunuldu.

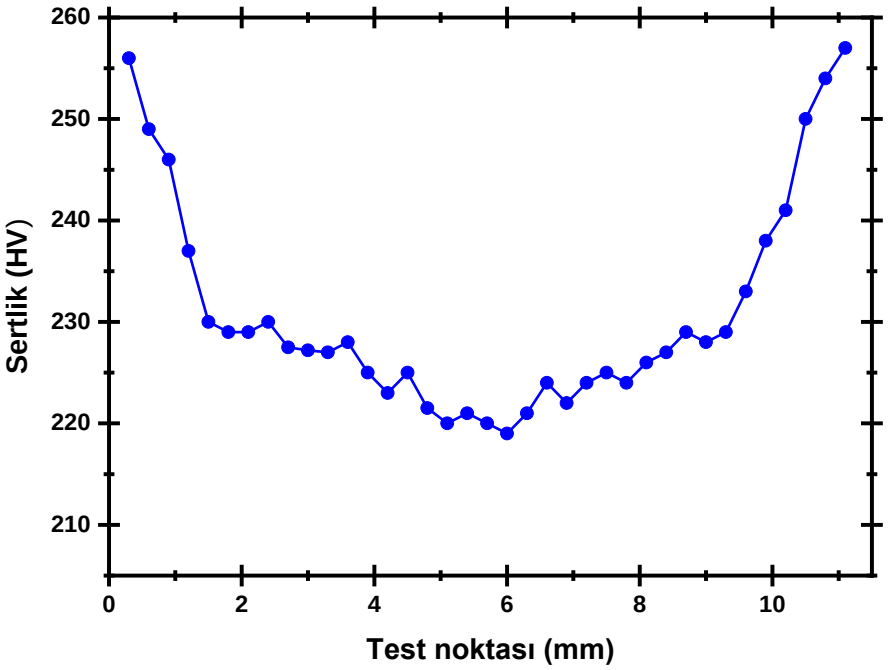
4.1. Mekanik Testler

4.1.1. Mikrosertlik

Mikrosertlik ölçümleri, gazaltı ark kaynağı prosesi ile kaynaklanmış Hardox 450 ve S355J2C+N numunelerinin kesitinde gerçekleştirilmiştir. Kaynakların enine yönünden çıkarılan numunelerde yatay yönde sertlikteki değişim Şekil 4.1'de, dikey yönde Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Vickers mikrosertlik değerleri, Hardox 450'den S355J2C+N'ye doğru gidildikçe azaldı. En yüksek sertlik değeri Hardox 450 ana metalde ölçülmüştür ve 311 ± 8 HV'dir. S355J2C+N ana metalin sertliği yaklaşık 217 ± 8 HV iken kaynak merkezinin sertliği yaklaşık 249 ± 8 HV olarak ölçülmüştür. Hardox 450 sacın yüzey sertliği 468 ± 8 HV, S355J2C+N sacın yüzey sertliği ise 187 ± 8 HV olarak tespit edildi.



Şekil 4.1. Enine kaynaklı numunenin yatay sertlik ölçümü (HV0.1) (Ölçüm konumu Şekil 3.24'te görülebilir).



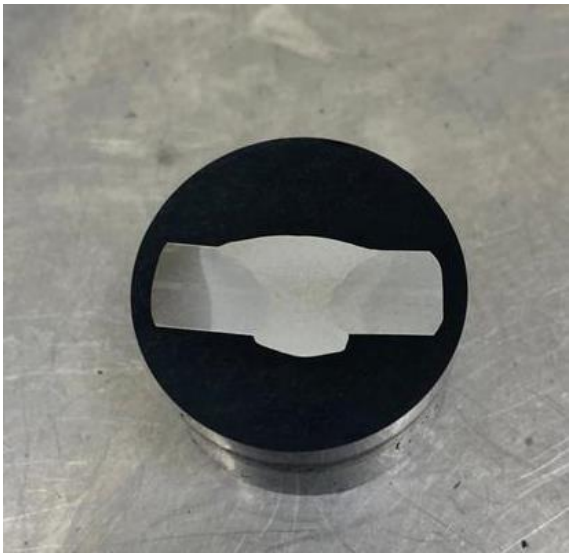
Şekil 4.2. Enine kaynaklı numunenin dikey sertlik ölçümü (HV0.1) (Ölçüm konumu Şekil 3.24'te görülebilir).

4.1.2. Çekme Deneyi

Gerçekleştirilen çekme deneyleri ile Hardox 450 ve S355J2C+N malzemeleri için akma dayanımı sırasıyla 1464 ± 13 ve 513 ± 8 MPa olarak elde edilmiştir. Boyuna kaynaklanmış numunelerin akma ve çekme dayanımları sırasıyla 731 ± 10 ve 899 ± 12 MPa olarak elde edilmiştir. Kaynaklı numunelere ait gerçekleştirilen çekme deneyi sonucunda hasara uğramış olan test numuneleri Şekil 4.3'de görülmektedir. Gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar ise aynı sıra ile Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Ana malzemelerin kataloglarında belirtilen mekanik özellikleri sağladığını söylemek mümkündür. Kaynak bölgesine görsel muayene (VT) yapılarak kesit yüzeyinde süreksizlik, yapısal bozukluk, gözle görülebilen boşluklar oluşmadığı tespit edilip optik bir yardımcı (Büyüteç) kullanılarak bulgular kaydedilmiştir ve herhangi bir kaynak kusuru olmadığı numune kesitlerinden gözlemlenmiştir (Şekil 4.4). Enine kaynaklanmış numunelerde kopma S355J2C+N çeliğinin ana malzeme bölgesinde meydana geldi (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Kaynaklı ve ana metallerin çekme testi numuneleri.



Şekil 4.4. Kaynak kesiti makro görünümü.

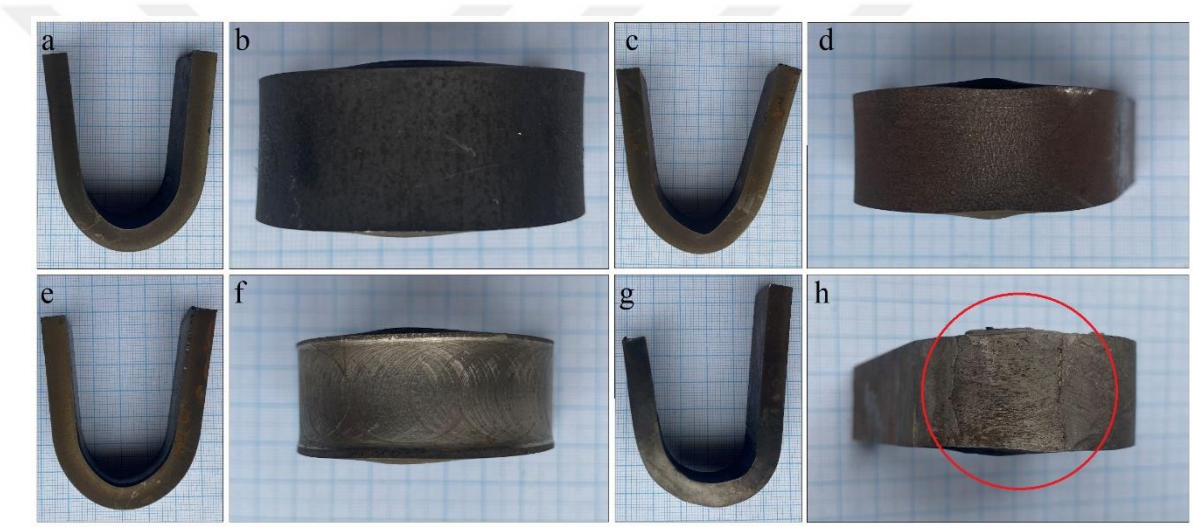
Çizelge 4.1. Her numune için nihai çekme dayanımı, akma dayanımı ve kırılmaya kadar % uzama değerleri.

Numune No	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	% Uzama	Yön	Kopma bölgesi
5	569 ± 8	699 ± 8	12.65 ± 1.5	Enine	S355J2C+N
6	535 ± 10	696 ± 10	17.71 ± 2	Enine	S355J2C+N
7	703 ± 11	863 ± 11	20.51 ± 2	Boyuna	-
8	731 ± 10	899 ± 12	21.81 ± 2	Boyuna	-
9	1464 ± 13	1582 ± 14	10.08 ± 2	Hardox 450	-
10	513 ± 8	677 ± 9	27.43 ± 2	S355J2C+N	-

4.1.3. Eğme Testleri

Gerçekleştirilen 180° eğilme testlerinde Hardox 450 ve S355J2C+N malzemeleri için sırasıyla elde edilen maksimum eğme kuvvetleri 43.24 ± 4 ve 15.67 ± 2 kN olarak tespit edildi (Şekil 4.5). Boyuna ve enine kaynaklı numunelerin eğilme testlerinde uygulanan maksimum kuvvet sırasıyla yaklaşık olarak 22.06 ± 2 ve 19.65 ±

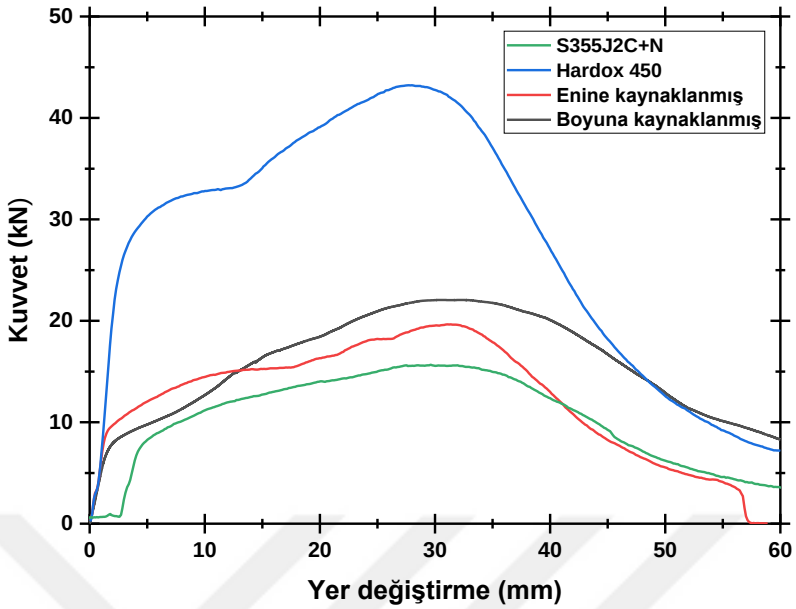
2 kN olarak ölçüldü. Eğme testi sonucunda maksimum kuvvet – deformasyon değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmektedir. 180° eğme deneyi sonuçlarına göre, enine kaynaklı numunelerin mukavemeti, boyuna kaynaklı numunelerden daha azdı. Enine birleştirilmiş numunenin eğilme testinde kaynak bağlantısında görünür bir kusur meydana gelmedi. Ancak S355J2C+N malzemesi Hardox 450 malzemesinden daha az bir eğilme dayanımına sahip olduğundan öncelikle eğildi ve numune bu yüzden eğme sonrası J şeklini aldı (Şekil 4.5). Boyuna kaynaklı numunelerde kaynakta herhangi bir yırtılma veya kaynak boşluğu gözlemlenmedi. Gerçekleştirilen numunelere ait eğilme grafikleri ise Şekil 4.6'da sunulmuştur.



Şekil 4.5. Eğme testinden sonra kep ve kök görüntüleri a-b) S355J2C+N malzemesi, c-d) Hardox 450, e-f) Boyuna kaynak birleşimi g-h) Enine kaynak birleşimi.

Çizelge 4.2. Eğme deneyi sonuçları.

Numune No	Maksimum kuvvet (kN)	Deformasyon (mm)	Numune ölçüleri (mm)
a-b) S355J2C+N	15.67 ± 2	60	200 × 20 × 8
c-d) Hardox 450	43.24 ± 4	60	200 × 20 × 8
e-f) Boyuna kaynaklı	22.06 ± 2	60	200 × 20 × 8
g-h) Enine kaynaklı	19.65 ± 2	60	200 × 20 × 8



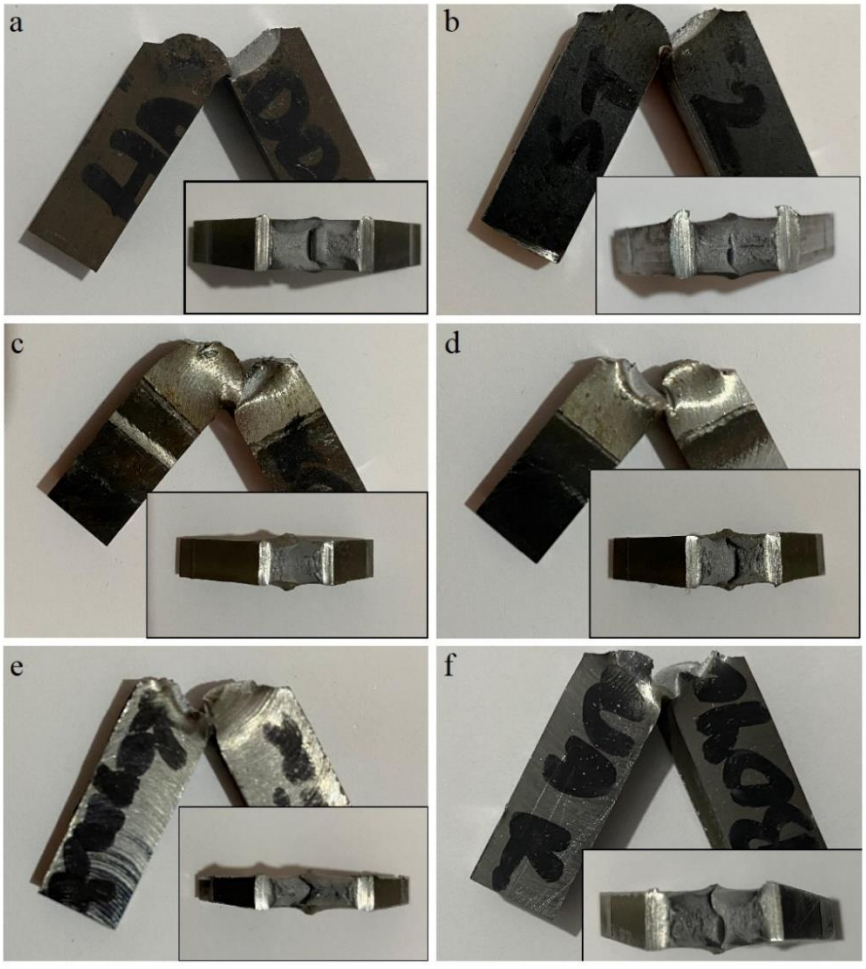
Şekil 4.6. Kuvvet (kN) – Yer değiştirme (mm) eğme grafiği.

4.1.4. Charpy Darbe Testleri

Kaynaklı numunelerin ve iki ana metalin Charpy V-Notch enerjisi (CVN) sonuçları oda sıcaklığı (21 C), -20 °C ve -40 °C için Çizelge 4.3'de verilmiştir. Hardox 450 ana metalinin darbe tokluğu oda sıcaklığında ortalama 86.11 ± 6 J olarak ve S355J2C+N çeliğinin darbe tokluğu oda sıcaklığında ortalama 101.23 ± 7 J olarak bulunmuştur. Bu değerler doğrudan yapının sünekliğini gösterir. Enine ve boyuna MAG kaynaklı kaynak bölgesindeki metalin tokluğu oda sıcaklığında sırasıyla 108.00 ± 8 J ve 102.05 ± 7 J idi. Hardox 450 ITAB ve S355J2C+N ITAB'da oda sıcaklığında sırasıyla yaklaşık 92.40 ± 6 J ve 116.74 ± 9 J gözlendi. Şekil 4.7, darbe çentiği testinden sonra numunelerin kopma yüzeyini göstermektedir. Kaynak bölgesinin darbe çentiği testinin sonuçları, numunelerin tamamen koptuğunu göstermektedir.

Çizelge 4.3. Charpy V-Notch darbe deneyi sonuçları.

No	Numune Tanımı	Oda Sıcaklığı	-20 ℃	-40 ℃	Detaylar
1	S355J2C+N	101.23 ± 7 J	85.96 ± 6 J	40.65 ± 4 J	Kırıldı
2	Hardox450	86.11 ± 6 J	35.41 ± 4 J	30 ± 2 J	Kırıldı
3	S355J2C+N ITAB	116.74 ± 9 J	78.36 ± 5 J	51.26 ± 2 J	Kırıldı
4	Hardox450 ITAB	92.40 ± 6 J	58.52 ± 3 J	30.18 ± 2 J	Kırıldı
5	Enine Kaynak	108.00 ± 8 J	64.96 ± 4 J	55.02 ± 2 J	Kırıldı
6	Boyuna Kaynak	102.05 ± 7 J	58.76 ± 3 J	44.2 ± 2 J	Kırıldı



Şekil 4.7. Charpy çentik darbe deneyi sonuçları a) Hardox 450 b) S355J2C+N c) Hardox 450 ITAB d) S355J2C+N ITAB e) Enine kaynaklı numune f) Boyuna kaynaklı numune.

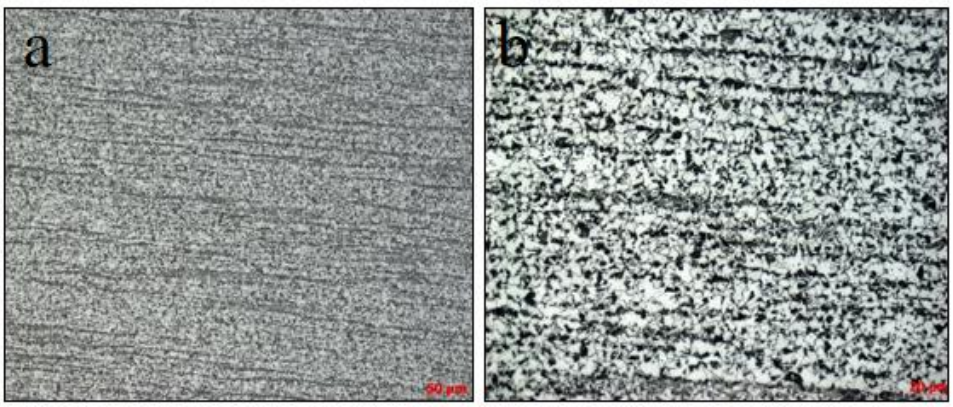
4.1.5. Aşınma Deneyi

Hardox 450, S355J2C+N ve kaynak merkezi için 240 Dev/dk ve 50 N yük değerinde 120 m uzunlukta 3Hz'de pin on disk biçiminde gerçekleştirilen aşınma ölçümü sonucunda Hardox 450'nin S355J2C+N ye göre 2.85 kat daha fazla aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Kaynak merkezine göre ise Hardox 450 yaklaşık 2.6 kat daha fazla aşınma direncine sahiptir.

4.2. Metalografik Deneyler

4.2.1. Optik Görüntüler

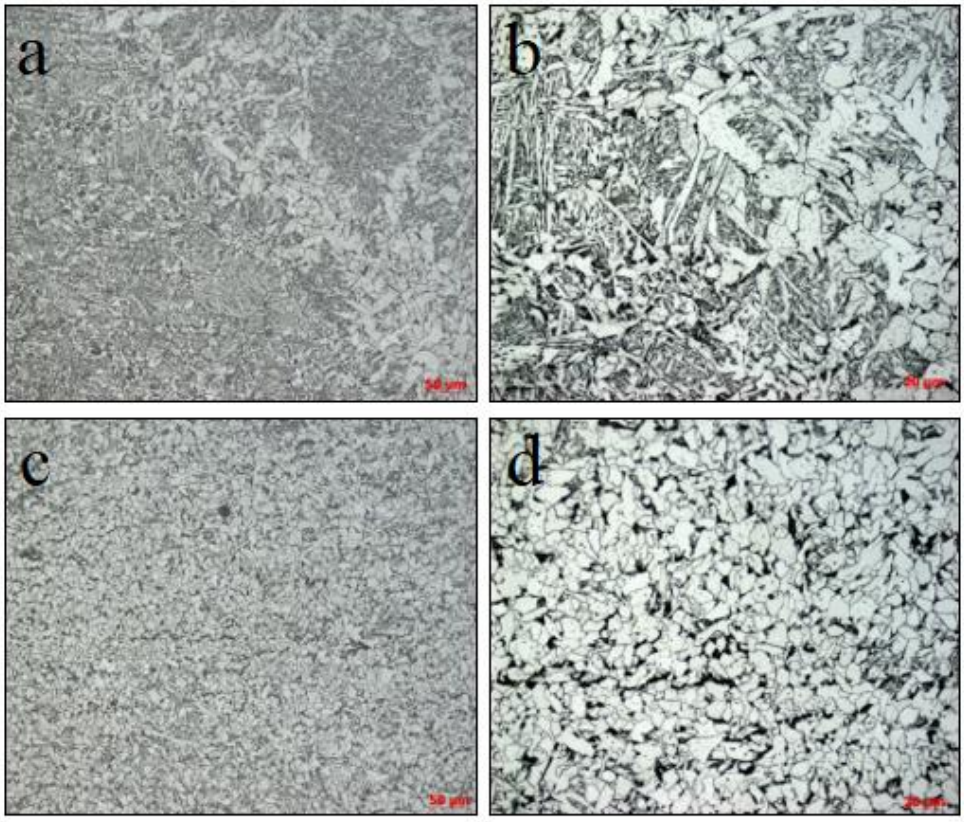
Optik görüntüleme işlemi 20X ve 50X büyütmede Hardox 450, S355J2C+N, ITAB bölgeleri ve kaynak merkezinde gerçekleştirildi. Şekil 4.8'te Hardox 450 ana metaline ait görüntüler yer almaktadır. Bu görüntülerde Hardox 450'nin mikroyapısının tamamen ferrit ve martenzit fazı içerdiği tespit edildi. Asiküler terimi latincede iğne gibi şekillenmiş ve sivrilmiş anlamına gelir. Asiküler ferrit oranının artması kaynak metalinin mukavemetini ve tokluğunu artırdığından önemli bir fazdır. Şekil 4.8 a ve b'de kaba asiküler martenzitik yapı görülmektedir (Ulewicz, Mazur ve Bokůvka, 2013)(Ulewicz, Szataniak ve Novy, 2014).



Şekil 4.8. Hardox 450 ana metalinin a) 20X ve b) 50X büyütmede optik görüntüsü.

Şekil 4.9 a ve b'de Hardox 450 çeliğinin optik mikroskopta 20X ve 50X büyütmede geçiş bölgesi ve Şekil 4.9 c ve d'de ısı tesiri altında kalan bölgesinin mikroyapısı görülmektedir. Kaynak işleminde ısı etkisi altında oluşan östenitik fazdan

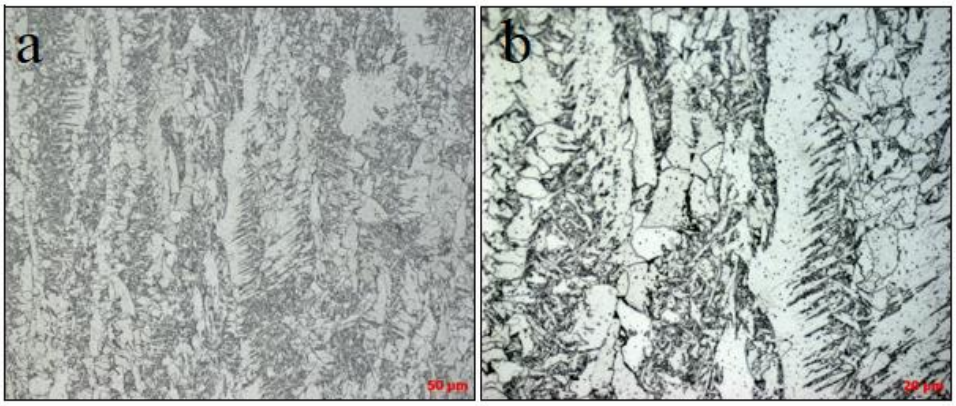
soğuma sırasında, bu taneler malzemede bulunan inklüzyonlar üzerinde farklı yönlerde çekirdeklenmiştir (Şekil 4.9 a ve b). Şekil 4.9 c ve d'de Hardox 450 çeliğinin ısı tesiri altında kalan bölgesinin mikroyapısına bakıldığında geçiş bölgesiyle tamamen farklı olduğu ve Hardox 450 ana metal ile karşılaştırıldığında ferrit miktarının ve tane boyutunun arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9. Hardox 450 çeliğinin a) 20X ve b) 50X büyütmede geçiş bölgesi ve c) 20X ve d) 50X büyütmede ısı tesiri altında kalan bölgenin optik görüntüsü.

Kaynak merkezi mikroyapısında ferrit ve perlit fazlarının beraber bulunduğu bölgeler %3 oranında nital dağlayıcının etkisi ile gayet net bir şekilde ayırt edilebilmekte olup koyu renkli bölgenin perlitçe daha yoğun bulunduğu görülmektedir. Ayrıca mikroyapılarda asiküler ferrit ve tane sınırı ferritlere de rastlanmaktadır. İnce iğne benzeri bir yapı ile karakterize edilen tamamen dendritik yapı gözlenmiştir. Kaynaklanmış numunelerin kaynak merkezi mikroyapı görüntüleri tipik bir kaynak metali görünümüne sahip olup dendritik yapı görülmektedir ve iğnemsi bir yapıya

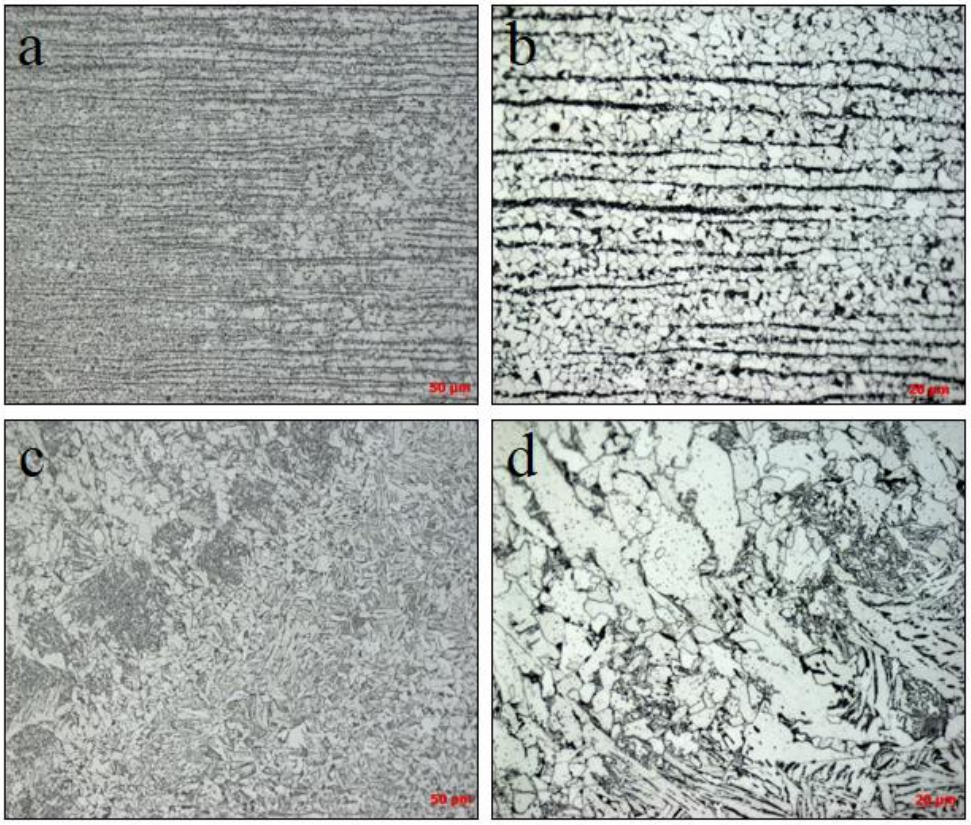
sahiptir, yani az miktarda asiküler ferrit içerir. Koyu renkli bölgeler perlit, açık renkli bölgeler ise alfa ferrit fazlarını temsil etmektedir (Şekil 4.10).



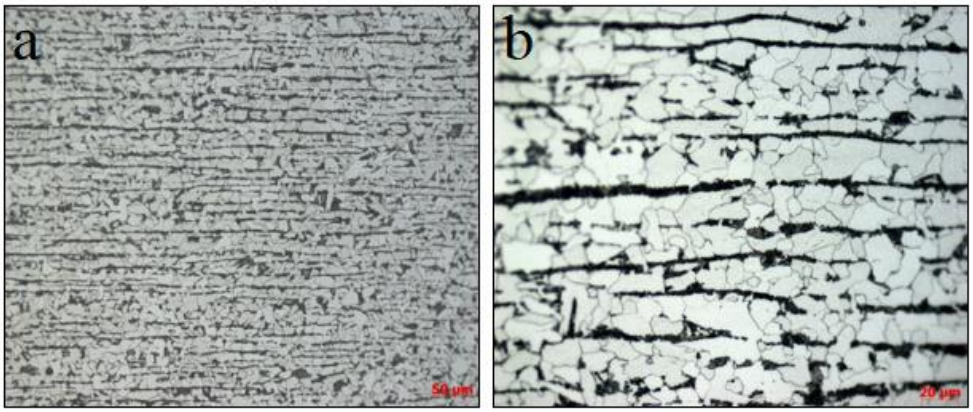
Şekil 4.10. Kaynaklanmış malzemelerin kaynak merkezi a) 20X ve b) 50X büyütmede optik görüntüsü.

Şekil 4.11 a ve b'de S355J2C+N çeliğinin ısı tesiri altında kalan bölgesinin 20X ve 50X büyütmede mikroyapısı görülmektedir. Bu bölgede perlitik bir yapı oluştuğu ve 50X büyütmede mikroyapıda taneler arasında sütunsal ferrit oluştuğu gözlenmektedir. Şekil 4.11 c ve d'de S355J2C+N kaynak metaline geçiş bölgesinin 20X ve 50X büyütmede mikroyapısı görülmektedir. 50X büyütmede S355J2C+N yapı çeliğinden kaynak metali bölgesine geçiş ve kaynak bölgesinde tane boyutunun artışı net bir şekilde görülmektedir. Asiküler ferrit matrix içerisinde levha şeklinde yer almaktadır ve geçiş bölgesinde kaynak bölgesine yakın olduğundan asiküler ferrit mevcuttur. S355J2C+N ısı tesiri altında kalan bölgesinde ana metale göre tane boyutlarının küçüldüğü görülmektedir.

Şekil 4.12'de S355J2C+N çeliğine ait optik mikroskop yardımıyla elde edilen mikroyapısı 20X ve 50X büyütmede ferrit içerisinde sütunsal bir şekilde dağılmış koyu renkli perlit taneleri görülmektedir. S355J2C+N çeliği ferrit (α) (%91) ve az miktarda perlit (α + Fe_3C) (%9) fazlarından oluşan bir mikroyapıya sahiptir. S355J2C+N optik görüntülerinin mikroyapısı alfa ferrit ve perlit fazlarından meydana gelmektedir. Perlit bölgesinde bulunan taneler genellikle sütunsal ve daha ince yapılıdır (Şekil 4.12).



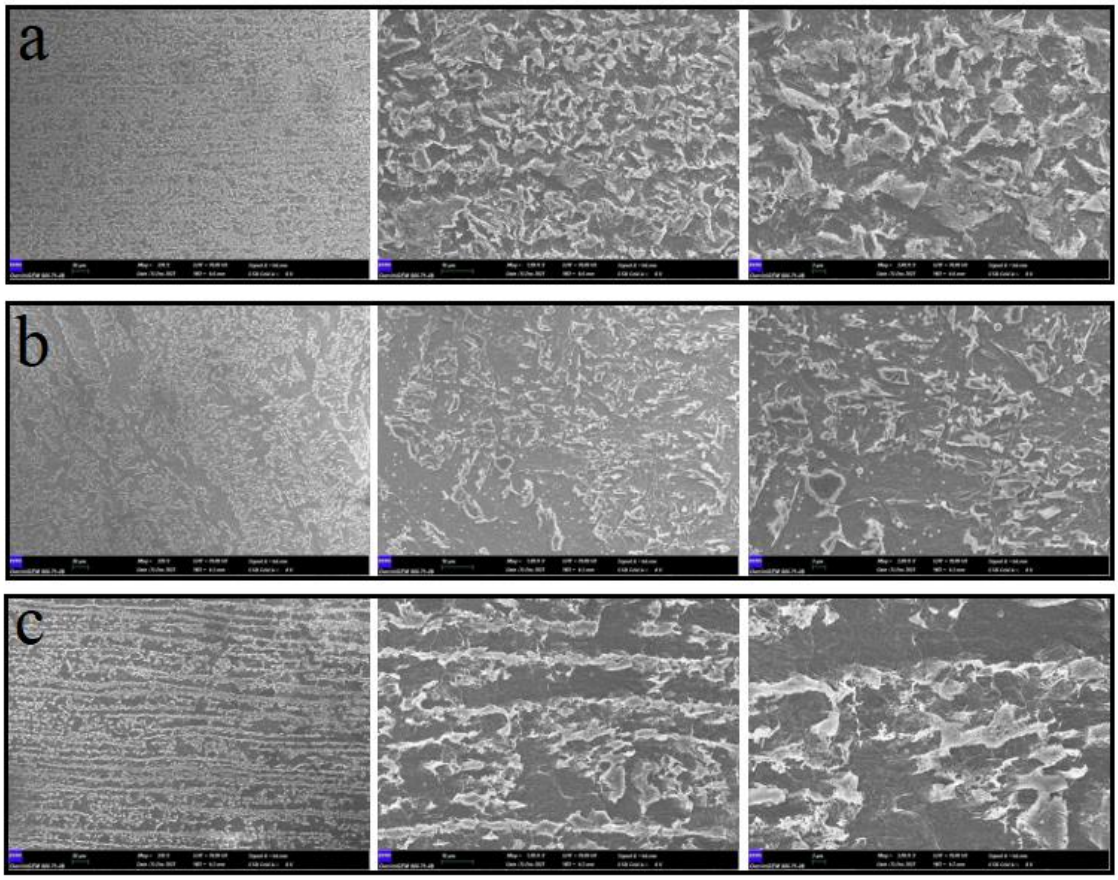
Şekil 4.11. S355J2C+N çeliğinin a) 20X ve b) 50X büyütmede ısı tesiri altında kalan bölgenin ve c) 20X ve d) 50X büyütmede geçiş bölgesinin optik görüntüsü.



Şekil 4.12. S355J2C+N ana metalin a) 20X ve b) 50X büyütmede optik görüntüsü.

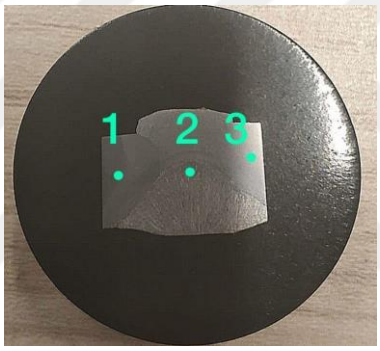
4.2.2. FESEM ve EDX Analizi

Kaynaklı numunelerin ve ana metallerin FESEM (Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu) mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Şekil 4.13'te gösterilen FESEM mikrografları, mikroyapısal fazların optik görüntülerine kıyasla daha net bir morfolojisini göstermektedir. Şekil 4.13 a'da Yapılan FESEM mikroyapı analizi sonucunda Hardox 450 çeliğinin temperlenmiş martenzit yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir ve kaba asiküler martenzitik yapı ile karakterize edilir (Şekil 4.13 a) (Ulewicz, Mazur, Bokůvka, 2013). Şekil 4.13 b'de kaynak bölgesinin FESEM görüntüsü sunulmaktadır. Bu kaotik yapı ve merceksi taneler asiküler ferritin varlığını gösterir ve tipik bir kaynak metalinin dendritik morfolojik yapısı gösterilmektedir. S355J2C+N ana metalinin sütunsal ferritik ve perlitik FESEM morfolojisi Şekil 4.13c'de gösterilmektedir.

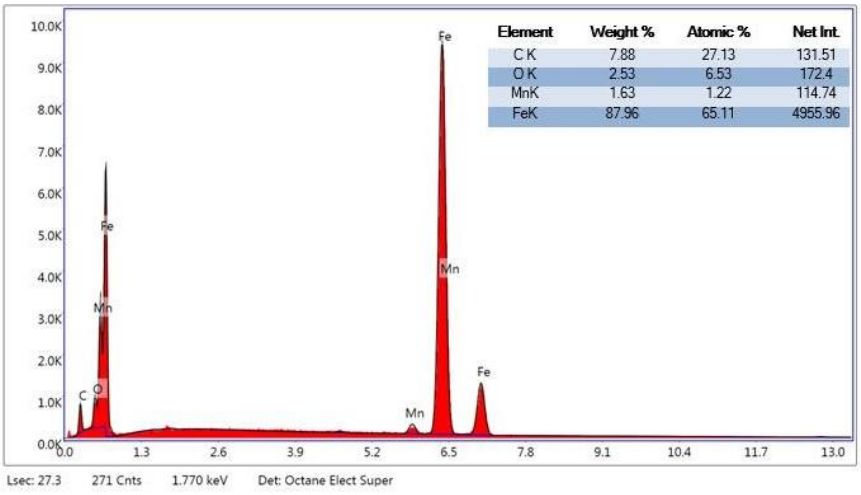


Şekil 4.13. 250X, 1.00KX ve 2.00KX büyütmede FESEM görüntüleri a) Hardox 450 ana metali b) Kaynaklı bölge c) S355J2C+N ana metali.

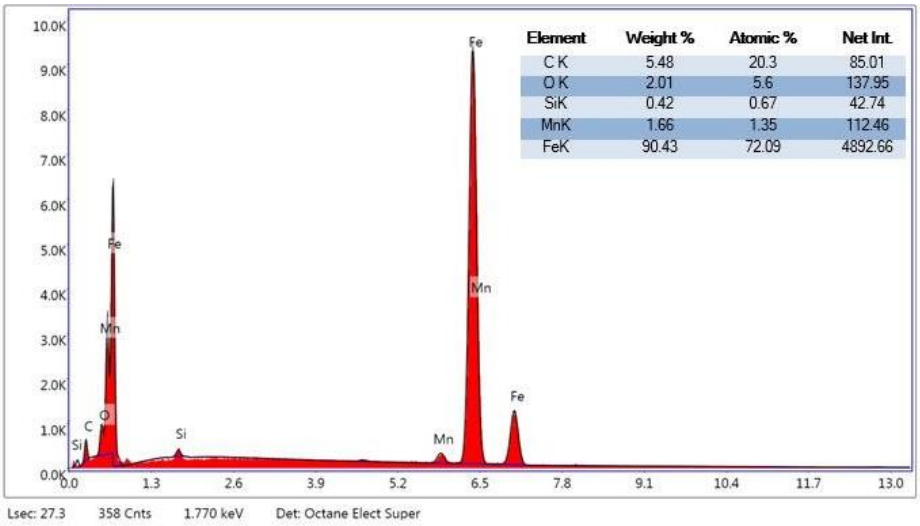
FESEM'e ek olarak, mikroyapı incelemesinin ardından uygun görülen kaynaklı numunelere ve ana metallere SEM cihazına bağlı Tracor-Northern marka enerji dağılımlı X-ray analizörü (EDX) kullanılarak 500X büyütmede element analizi yapılmıştır (Şekil 4.14). Fe, C ve Mn elementlerinin haritalanması, bu elementlerin yüzey katmanlarındaki dağılımını araştırmak için yapıldı. Şekil 4.15'te Hardox 450 ana metalinin EDX analizi kullanılarak yapılan kaynak bölgesi sonuçlarında Fe (wt. %87.96), C (wt. %7.88), ve Mn (wt. %1.63) elementleri gözlenmiştir. Şekil 4.16'da kaynak merkezinin EDX analizi kullanılarak yapılan kaynak bölgesi sonuçlarında C (wt. %5.48), Si (wt. %0.42), Mn (wt. %1.66) ve Fe (wt. %90.43) elementleri gözlenmiştir. Şekil 4.17'de S355J2C+N ana metalinin EDX analizi kullanılarak yapılan kaynak bölgesi sonuçlarında C (wt. %7.98), Mn (wt. %1.15), ve Fe (wt. %88.68) elementleri gözlenmiştir.



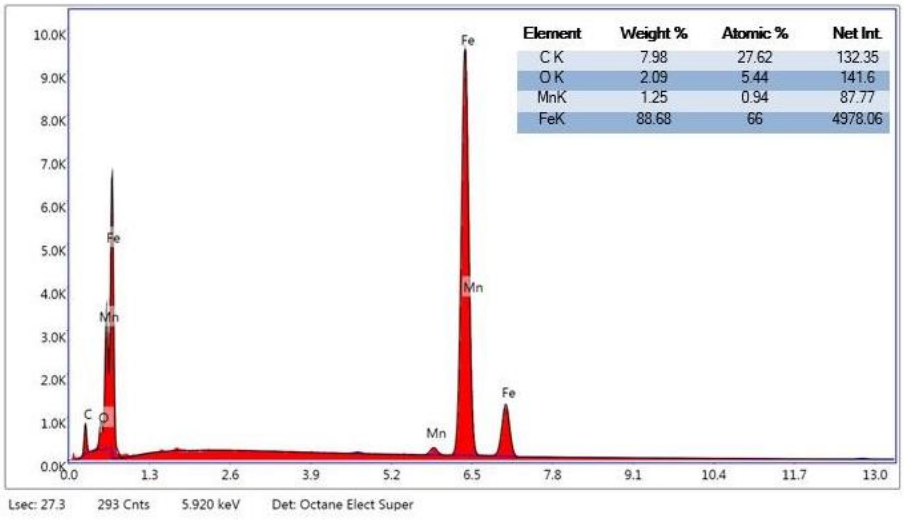
Şekil 4.14. EDX karakterizasyonu yapılan bölgeler a) 1 numaralı bölge Hardox 450 b) 2 numaralı bölge Kaynak bölgesi c) 3 numaralı bölge S355J2C+N çeliği.



Şekil 4.15. Hardox 450 çeliğinin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi sonuçları.



Şekil 4.16. Kaynak metali enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi sonuçları.



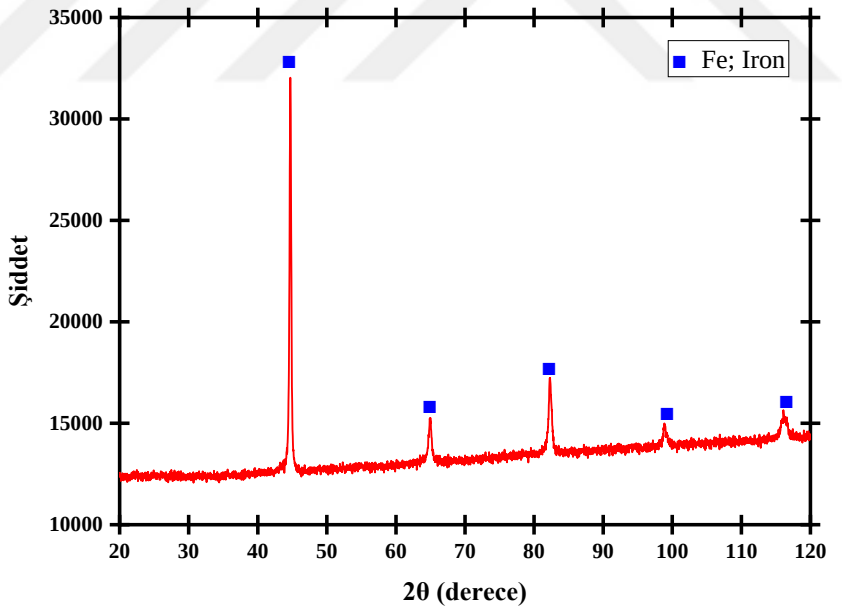
Şekil 4.17. S355J2C+N çeliğinin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi sonuçları.

4.2.3. XRD Analizi

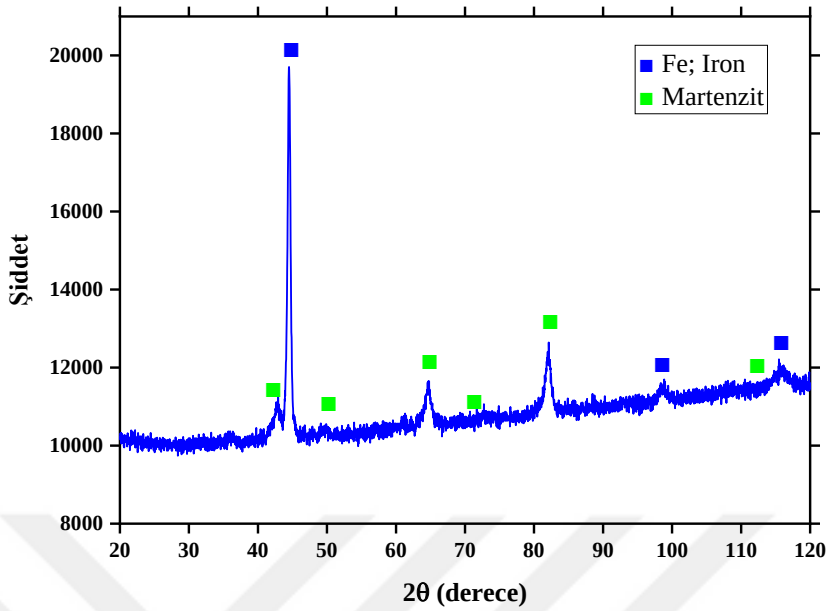
ER70S-6 ilave teli kullanılarak kaynaklanan Hardox 450, S355J2C+N ana metalleri ve kaynak merkezi için XRD analizi yapılmıştır. XRD analizi, PANalytical Empyrean model X-ray cihazı, Bragg–Brentano geometrisinde CuKα tüpü (λ = 1.5406 Å) kullanılarak 40 mA, 45 kV güç değerlerinde gerçekleştirildi. Taramalar, sürekli

modda adım başına 0.026° ve 60 s'lik adım taramasıyla 20° ile 120° arasında 2θ aralığında yapıldı.

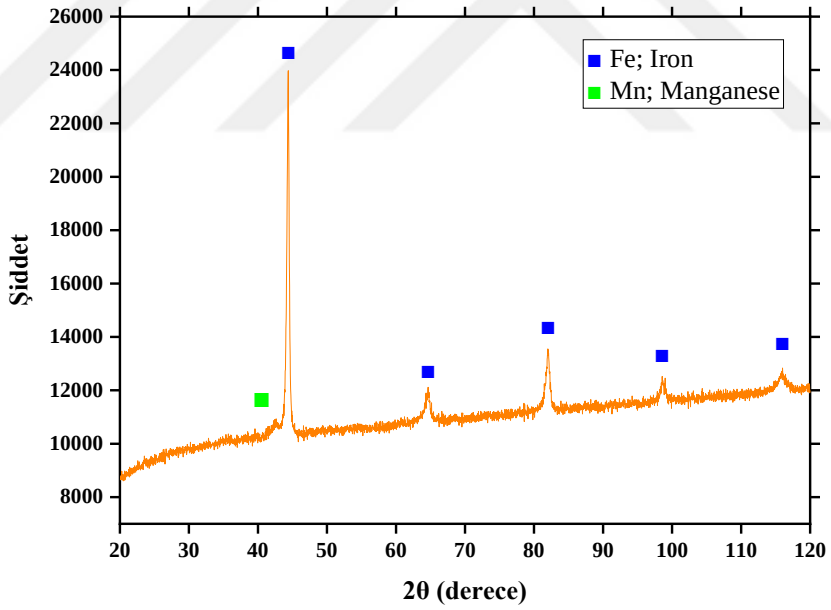
MAG kaynak merkezinde gerçekleştirilen XRD analizinde α-ferrit fazı tespit edilmiştir. α-ferrit tepe noktaları 2θ = 44.451° (110), 2θ = 64.678° (200), 2θ = 81.862° (211), 2θ = 98.315° (220), 2θ = 115.515° (310) açılarında tespit edilmiştir (Şekil 4.18). Hardox 450 ana metaline uygulanan XRD analizinde ferrit piki ve martenzit piki tanımlanmıştır. Beş adet Fe piki tepe noktası 2θ = 44.47° (110), 2θ = 64.69° (200), 2θ = 82.06° (211), 2θ = 98.57° (220), 2θ = 115.74° (310) açılarında ve 2θ = 42.80° (110), 2θ = 49.49◦, 2θ = 72.60° (200), 2θ = 87.93° (211), 2θ = 92.96° (220), 2θ = 113.71° (310) açılarında dört adet manganese-γ piki tespit edilmiştir (Şekil 4.19). S355J2C+N ana metaline uygulanan XRD analizinde Fe piki ve manganese-γ piki tanımlanmıştır. Beş Fe piki tepe noktası 2θ = 44.46° (110), 2θ = 64.69°, 2θ = 82.06°, 2θ = 98.57°, 2θ = 115.74° açılarında ve 2θ = 42.80° (110), 2θ = 49.49°, 2θ = 72.60°, 2θ = 87.93°, 2θ = 92.96°, 2θ = 113.71° açılarında dört adet manganese-γ piki tespit edilmiştir (Şekil 4.20).



Şekil 4.18. MAG kaynak merkezinin XRD pattern sonucu.



Şekil 4.19. Hardox 450 çeliğinin XRD pattern sonucu.



Şekil 4.20. S355J2C+N çeliğinin XRD pattern sonucu.

5. BÖLÜM

TARTIŞMA

Günümüz mühendislik tasarımlarının gelişmesinin temelinde üstün özelliklere sahip malzemeler vardır. Tasarımlarda üstün özelliklere sahip farklı malzemelerin kullanımı fonksiyonelliği ve verimliliği arttırmaktadır. Farklı malzemeleri birlikte bir sistemde kullanmak maliyet, montaj, üretim yöntemi, imal edilebilirlik, çalışma ömrü, bakım aralıkları, hasar biçimi gibi birçok parametrenin değerlendirilmesini gerektiren bir hususdur. Bu çalışmada iki farklı özellikte malzemenin kaynakla birleşimi ve bu birleşimin kabiliyeti araştırıldı. Sonuçlar bu iki malzemenin uygun kaynak parametreleri ile başarılı bir biçimde birleştirilebileceğini gösterdi.

8 mm et kalınlığında ve V kaynak ağzı açılmış olan numuneler gazaltı ark kaynak yöntemi ve çoklu paso uygulaması ile birleştirildi. Kaynak yönteminde alternatif olarak TIG kaynak yöntemi de tercih edilebilir. Ancak gazaltı ark kaynağı otomotize edilebilir olmak ile birlikte sınırsız elektrot uzunluğuna sahiptir. TIG kaynağına göre daha az el becerisi gerektirmektedir. TIG kaynak işlem hızı gazaltı kaynağına göre düşüktür ve parametreler uygun ayarlanmadığında birleşimde köpürme sebebiyle boşluklar içeren düzensiz bir yapı oluşmaktadır. Endüstriyel bakımdan bu iki metalin kaynağında gazaltı ark kaynak yöntemi maliyet, zaman, uzmanlık gereksinimi bakımından avantajlıdır. Adar (2019) ve Savaş (2021), yaptıkları çalışmada benzer biçimde gazaltı ark kaynak yöntemini kullanmışlardır ve başarılı bir birleşim elde etmişlerdir.

Sac olarak temin edilmiş iki malzemede sertlik ölçümlerinde yüzey sertliği Hardox 450 için 468 ± 8 HV ve S355J2C+N için 187 ± 8 HV olarak tespit edildi. Bu sertlik değerleri Korkmaz vd. (2020) ve Kaçar vd. (2018) çalışmaları ile uyumludur. Bu nedenle özellikle iş makinelerinde aşınmaya maruz bölümlerde Hardox 450

kullanılırken diğer bağlantı bölümlerinde S355J2C+N kullanılabilir. Sertlik kaynak birleşiminde Hardox 450 malzemesinden S355J2C+N ye gidildikçe azalmıştır. Kaynak birleşiminde yukarıdan aşağı doğru yapılan sertlik ölçümünde sertlik üst ve alt bölümde yüksek, orta bölümde ise bir miktar daha düşüktür. Bu, soğuma prosesinden kaynaklanan bir durumdur.

Çekme deneyi sonuçları bu iki malzemenin başarılı bir biçimde birleştiğini göstermiştir. Gerçekleştirilen çekme deneylerinde kaynak merkezinde hasar meydana gelmemiştir. Makro ve mikro görüntülerde tespit edilen birleşim başarısı dayanım olarak varlığını bu testte göstermiştir. Hardox 450 ve S355J2C+N malzemelerinin kaynaklı birleşimlerinde hasar S355J2C+N malzemesinde meydana gelmiştir ve bu beklenen bir durumdur. Okay vd., (2015) Hardox 400 ve S235JR ile yaptıkları çalışmada hasarı benzer biçimde Hardox çeliğinde değil S235JR malzemesinde tespit etmişlerdir. Hardox 450 araştırılan kaynak birleşiminde en yüksek dayanıma sahiptir. Kaynak bölgesi S355J2C+N malzemesinden bir miktar daha sağlamdır. Czupryński vd., (2020) yaptıkları çalışmada benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Boyuna kaynaklı numunelerde çekme dayanımı ise 700 MPa seviyelerinde tespit edilmiştir. Boyuna ölçülen kaynak testinde kesitte sadece kaynak yoktur. Kaynak malzemesi, Hardox 450 ve S355J2C+N kaynak bölgesinde yer almaktadır ve buradaki yüksek dayanımda Hardox 450'nin katkısı fazladır. Çekme deneyleri bu iki malzemenin makine tasarımlarında başarılı bir biçimde kullanılabileceğine yönelik oldukça pozitif sonuçlar sunmuştur.

Kaynaklı numuneler için 180° eğme deneyi gerçekleştirilmesi yaygındır (İrsel, 2021). Eğme deneyi ile farklı iki malzemenin kaynaklı birleşiminin şekil değişim kabiliyeti (plastik davranışı), kaynak birleşiminin sünekliği ve tokluğu hakkında değerli sonuçlar elde edildi. Eğme deney sonuçları kaynak bölgesinde birleştirilen iki malzeme için uygun bir sünekliğin olduğunu göstermiştir. Yüksek tokluk değerine sahip olan Hardox 450 ile S355J2C+N malzemenin birleşimini sağlayan bu kaynak birleşiminde 180° eğme şekil değişimi sonucunda kaynak hasarı görülmedi. Kaynak birleşiminin yüksek bir eğilme dayanımına sahip olduğu tespit edildi. Maksimum eğilme dayanımı bakımından sıralama Hardox 450, kaynak bölgesi ve S355J2C+N biçimindedir. Kaynak teli seçimi ve ön ısıtmanın uygunluğu tespit edildi.

Charpy V-Notch testleri kapsamlı biçimde üç sıcaklık için (21℃ oda sıcaklığı, -20 ℃ ve -40 ℃) derece gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen Charpy deney sonuçlarına göre ITAB'dan elde edilen darbe enerjisi değerleri, kaynak metali ve ana malzeme darbe enerjisi değerlerinden daha yüksektir. ITAB çok dar bir alan olduğu için bu bölgeden alınan test numuneleri ile yapılan charpy tokluk deneylerinde farklı ve çelişkili sonuçlar elde edilebilmektedir. ITAB'da kaba bölge, ince bölge ve yeniden kristalize bölge bir arada olduğu için mikro yapı heterojendir ve iç gerilmeler oldukça yüksektir. Buna rağmen test sonuçlarına göre elde edilen tokluk değerleri diğer çalışmalarla oldukça uyumludur. Kaynaklı birleşim tokluk gereken bölgeler içinde uygundur. Kaynaklı bölgenin tokluğu S355J2C+N ile yaklaşık olarak aynıdır. Charpy sonuçları ele alındığında iki malzemenin de katalog değerlerini karşıladığı ve tokluk bakımından uygun bir kaynak birleşimi gerçekleştirildiği tespit edildi.

Optik görüntülerde iki malzemedeki üstün homojenize özellikler dikkat çekicidir. Bu iki malzeme de bilgisayar destekli mühendislik yazılımlarında tam homojenize olarak kabul edilebilecek niteliktedir. Kaynak birleşim bölgesinde iğnemsi yapıların dahi bir uyum içerisinde olduğu net biçimde tespit edilmiştir. Kaynak öncesi yapılan ön tavlama soğuma hızını yaklaşık olarak %5 düşürmüştür. Bu, doğrudan kaynak bölgesindeki pozitif özelliklere katkıda bulunmuştur. Özellikle sertliğin aşırı artışına engel olmuştur. Ana metaller ve kaynak merkezinde mikro boşluklara rastlanmamıştır. Kaynak merkezinde ana metallerin içeriğinden farklı faz oluşumu tespit edilmemiştir. Bu bağlamda oluşturulan kaynağın iki ana malzemeye göre oldukça uyumlu olduğu söylenebilir. ITAB ve kaynak merkezinde kaynak bölgesi için oldukça uygun dağılımlı bir heterojen yapı tespit edildi. Birleşim mikroyapısı bölgesel değişim değil tüm kaynak çizgisinde benzer heterojen dağılım formundaydı. Bu kaynağın başarılı bir biçimde oluştuğunu da göstermektedir.

Optik mikroyapı görüntülerini desteklemek için FESEM mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM), tıpkı SEM gibi, numune yüzeyinden çok çeşitli bilgiler sağlayan, ancak daha yüksek çözünürlüklü ve çok daha geniş bir enerji aralığına sahip bir araçtır. FESEM ve SEM arasındaki fark elektron üretim sistemidir. Böylelikle SEM görüntülerinden 3 kat daha fazla çözünürlüklü görüntüler elde edildi. FESEM görüntüleri optik mikroyapılar ile uyumlu olduğu tespit edildi. FESEM görüntüleri kaotik yapı ve merceksi taneler ile asiküler

ferritin varlığını gösterdi. Tipik bir kaynak metalinin dendritik morfolojik yapısı da tespit edildi. Yilmaz, (2010), Teker ve Yılmaz (2014)'de yaptıkları çalışmada SEM ile benzer yapıları tespit etmişlerdir. Hardox 450, S355J2C+N ve kaynak merkezinden alınan EDX sonuçları ile ana malzemelerin ve kaynaklı bölgelerin elementel bileşimi elde edildi. EDX analizi kullanılarak yapılan kaynak bölgesi sonuçlarında C (wt. %5.48), Si (wt. %0.42), Mn (wt. %1.66) ve Fe (wt. %90.43) elementlerinin varlığı tespit edildi. Benzer biçimde bu elementlerin varlığı Ertem (2021) ve Yılmaz (2017) yaptıkları çalışmalarda da tespit etmişlerdir.

XRD analiz test sonucunda kaynak bölgesinde sadece α-ferrit fazı elde edildi. Hardox 450 ve S355J2C+N ana metallerinde ise α-ferrit, martenzit ve manganez fazları tespit edildi. İki ana metalde %1.6 oranında Mn içermektedir. İlave tel ise %1.7 oranında Mn içermektedir. Manganez, çeliklerin mukavemetini artıran ve bu yönden de karbondan sonra gelen mühim elementlerden biridir (Celasun, 2021). Sünekliği az bir miktarda olsa olumsuz etkilemektedir. Manganezin diğer önemli özelliği ise çeliğin kritik soğuma hızını düşürmektir. Mn, kaynak ile eritme işleminden sonra sülfürle birleşerek Mangan sülfür oluşturmaktadır. XRD analizi kaynak merkezinde tekrarlanmasına rağmen kaynak merkezinde manganez fazı tespit edilememiştir. XRD deneyinde %15'in altında varlık gösteren fazlar çoğu zaman görüntülenememektedir.

6. BÖLÜM

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu özgün araştırma tez çalışmasında farklı mekanik ve mikro özelliklere sahip S355J2C+N ve Hardox 450 malzemeleri gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynak işleminde ER70S-6 kaynak teli ve koruyucu gaz olarak CORGON 82 Ar + %18 CO_2 kullanılmıştır. Daha sonra test numuneleri bu plakalardan tel erezyon yöntemi ile kesilmiştir. Kapsamlı testler sonucunda;

1. Hardox 450 malzeme ile S355 serisinden, serinin diğer üyelerine göre soğuk şekillendirilme kabiliyeti daha yüksek, normalize edilmiş ve C miktarı bir miktar düşük olan S355J2C+N tercih edilmiştir.
2. Gazaltı ark kaynak yöntemi bu iki farklı metali birleştirmek için uygun bir kaynak yöntemidir. Bu çalışmada iki farklı malzeme başarılı biçimde birleştirilmiştir.
3. Hardox 450 ve S355J2C+N metallerinin kaynağında gerçekleştirilen ön tavlama işlemi kaynak bölgesinden nemi ve kiri uzaklaştırırken soğuma hızının azalmasına da katkıda bulundu.
4. Tel erezyon ile kesme yöntemi kaynaklı birleşimlerin özelliklerini araştırmada hassas boyutta numunelerin hazırlanmasında etkili ancak diğer yöntemlere göre oldukça maliyetli bir yöntemdir.
5. Çekme testlerinde kaynak merkezi ve Hardox 450 malzemede hasar meydana gelmezken hasarların tümü S355J2C+N'de meydana geldi. HARDOX 450 ve S355J2C+N malzemeleri için akma dayanımı sırasıyla 1464 ± 13 ve 513 ± 8 MPa olarak elde edilmiştir.
6. Optik incelemede S355J2C+N ana metalin ortalama tane boyutu 18 ± 6 μm, Hardox 450 ana metalin ortalama tane boyutu ise 9.2 ± 6 μm olarak ölçülmüştür.

Gazaltı ark kaynak işleminden sonra Hardox 450 ısı tesiri altında kalan bölgesinde (ITAB) 4.4 ± 1 μm'ye 26 ± 4 μm uzunluğunda iğnemsi yapılar ve 11.8 ± 3 μm boyutunda taneler yer almaktadır. S355J2C+N ITAB bölgesinde 13 ± 3 μm ve yer yer 9.2 ± 3 μm boyutunda kompleks bir tane boyutu dağılımı mevcuttur. Kaynak merkezinde ise heterojen bir yapı oluşmuştur.

7. Gerçekleştirilen tokluk deneyleri ile Hardox 450 malzemesinin negatif sıcaklıklarda iyi bir tokluğa sahip olduğu tespit edildi. Kaynak birleşimi ise azalan sıcaklığa rağmen S355J2C+N malzemesine yakın bir tokluk dayanımı sergiledi.
8. Eğme deney sonuçları kaynak bölgesinde birleştirilen iki malzemeye uygun bir sünekliğin olduğunu göstermiştir. Yüksek tokluk değerine sahip olan Hardox 450 ile S355J2C+N malzemenin birleşimini sağlayan bu kaynak birleşiminde küçük elastik şekil değişimleri sonucunda yırtılma çatlama ve hasar tespit edilmedi.
9. Sertlik kaynak birleşiminde Hardox 450 malzemesinden S355J2C+N ye gidildikçe azalmıştır. Hardox 450 sacın yüzey sertliği 468 ± 8 HV, S355J2C+N ana metalin yüzey sertliği 187 ± 8 HV, Hardox 450 kesitinde 311 ± 8 HV, kaynak merkezinde 249 ± 8 HV ve S355J2C+N ana metalin sertliği yaklaşık 217 ± 8 HV olarak ölçülmüştür.
10. Kaynak birleşiminin aşınma özellikleri, Hardox 450 malzemesinin üstün aşınma özelliklerine sahip değildir. Hardox 450, S355J2C+N malzemesine göre 2.85 kat fazla aşınma direncine sahiptir. Hardox 450, kaynak merkezi ile karşılaştırıldığında 2.6 daha fazla aşınma direncine sahiptir. Tasarımlarda kaynaklı bölgenin aşınmaya maruz bölümlerde gerçekleştirilmemesi önerilir.

KAYNAKLAR

Adar, M. (2019). Hardox-500 İle St-52 Çeliğinin Kaynak Edilebilirliğinin Mekanik Testler Ve İstatistiksel Yöntemlerle Araştırılması. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*(9), 1689–1699.

Aktaş, B., Toprak, M., Çalık, A. ve Tekgüler, A. (2020). Effect of pack-boriding on the tribological behavior of Hardox 450 and HiTuf Steels. *Reviews on Advanced Materials Science*, *59*(1), 314–321. doi:10.1515/rams-2020-0030

Al-Khafajı, L. (2020). *The Effect Of Welding Methods İn The Weldment Design On the Distortions, Hardness and Stresses Generation of Steel Type S355J2C+N*.

Bayock, F. N., Kah, P., Mvola, B. ve Layus, P. (2019). Experimental review of thermal analysis of dissimilar welds of High-Strength Steel. *Reviews on Advanced Materials Science*, *58*(1), 38–49. doi:10.1515/rams-2019-0004

Bilen, F. A. (2016). Hardox 400-AISI 304 Çelik Çiftlerinin Plazma Transferli Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması.

Bodude, M. A. ve Momohjimoh, I. (2015). Studies on Effects of Welding Parameters on the Mechanical Properties of Welded Low-Carbon Steel. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, *03*(03), 142–153. doi:10.4236/jmmce.2015.33017

Çaydaş, U. ve Hasçalık, A. (2006). Cnc Tel Erezyon Tezgahlarinda Farklı Malzemelerin İşlenebilirliğinin Araştırılması. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *17*(6), 41–59.

Celasun, E. (2012). *S355J2 Çeliğinin Isıl İşlem ve Farklı Tozaltı Kaynak Tellerinin Kaynak Kabiliyetine Etkisinin İncelenmesi*.

Cheng, Y., Yu, R., Zhou, Q., Chen, H., Yuan, W. ve Zhang, Y. M. (2021). Real-time sensing of gas metal arc welding process – A literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, *70*(August), 452–469. doi:10.1016/j.jmapro.2021.08.058

Czupryński, A., Musztyfaga-staszuk, M., Szymura, M. ve Monica, Z. (2020). Mechanical properties of dissimilar metal butt joint. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, *XII*(1), 2067–3604.

El-Eskandarany, M. S. (2020). Characterizations of mechanically alloyed powders. *Mechanical Alloying*, 13–18. doi:10.1016/b978-0-12-818180-5.00002-9

Ertem, M. (2021). *Termoreaktif Difüzyon Yöntemiyle Niyobyum Karbür-Bor (NbC-B) Kaplanan HARDOX 400 Çeliğin Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi ve Taguchi Yöntemiyle Aşınma Davranışının Değerlendirilmesi*.

Frydman, S., Konat ve Pekalski, G. (2008). Structure and hardness changes in welded

joints of Hardox steels. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *8*(4), 15–27. doi:10.1016/s1644-9665(12)60118-6

Gençdoğan, D. (2020). *Joint of AISI 430/HARDOX 450 Steel with TIG Double Sided Arc Welding Methos Using Nickel Interlayer*.

Gökdaş, M. (2018). The Weldability of OPTIM 700 MC – St 37 Steel Materials with Plasma Transfer Arc Method Welding,.

Grubu, E. (2017). *Ürün Kataloğu 2017*.

Gupta, A., Sharma, V., Kumar, P. ve Thakur, A. (2020). Investigating the effect of ferritic filler materials on the mechanical and metallurgical properties of Hardox 400 steel welded joints. *Materials Today: Proceedings*, *39*, 1640–1646. doi:10.1016/j.matpr.2020.05.788

Huang, B. S., Yang, J., Lu, D. H. ve Bin, W. J. (2016). Study on the microstructure, mechanical properties and corrosion behaviour of S355JR/316L dissimilar welded joint prepared by gas tungsten arc welding multi-pass welding process. *Science and Technology of Welding and Joining*, *21*(5), 381–388. doi:10.1080/13621718.2015.1122152

Hurt, M. ve Schrock, S. D. (2016). *Bridge Elements and Materials*. *Highway Bridge Maintenance Planning and Scheduling*. doi:10.1016/b978-0-12-802069-2.00002-7

İrsel, G. (2021). Study of the microstructure and mechanical property relationships of shielded metal arc and TIG welded S235JR steel joints. *Materials Science and Engineering: A*, *830*(October 2021), 142320. doi:10.1016/j.msea.2021.142320

Kaçar, R., Emre, H. E., İşineri, A. Ü. ve Najafigharehtapeh, A. (2018). Effects of welding methods on the mechanical properties of joining dissimilar steel couple. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *33*(1), 255–265. doi:10.17341/gazimmfd.406797

Konat, Ł., Zemlik, M., Jasiński, R. ve Grygier, D. (2021). Austenite grain growth analysis in a welded joint of high-strength martensitic abrasion-resistant steel hardox 450. *Materials*, *14*(11). doi:10.3390/ma14112850

Korkmaz, Ş., Çetin, M. H., Adar, M. ve Orak, A. (2020). Investigation of Tensile Strength and Hardness Behaviour of Hardox500 – St52 Specimen Joined by GMAW Method. *Konya Journal of Engineering Sciences*, *8*(2), 300–317. doi:10.36306/konjes.610889

Lazıć, V., Arsic, D. ve Prokic-cvetkovic, R. (2019). Application of the High Strength Steel HARDOX 450 for Manufacturing of Assemblies in the Military Industry. *Key Engineering Materials*, *755*(September 2017), 96–105. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.755.96

Mindivan, H. (2013). Effects of combined diffusion treatments on the wear behaviour of hardox 400 steel. *Procedia Engineering*, *68*, 710–715. doi:10.1016/j.proeng.2013.12.243

Ming, W., Xie, Z., Ma, J., Du, J., Zhang, G., Cao, C. ve Zhang, Y. (2021). Critical review on sustainable techniques in electrical discharge machining. *Journal of Manufacturing Processes*, *72*(October), 375–399. doi:10.1016/j.jmapro.2021.10.035

Muthupandi, V., Bala Srinivasan, P., Seshadri, S. K. ve Sundaresan, S. (2003). Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds. *Materials Science and Engineering A*, *358*(1–2), 9–16. doi:10.1016/S0921-5093(03)00077-7

Okay, T., Najafi, A., Emre, H. E. ve Kaçar, R. (2015). Investigation of the Weldability of S235JR - Hardoks400 Steel. *2. Uluslar arası Demir Çelik Sempozyumu (IISS'15)* içinde .

Savaş, A. (2021). *MIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Hardox 400, AISI 304L ve ST52 Kalite Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi*.

Taraphdar, P. K., Mahapatra, M. M., Pradhan, A. K., Singh, P. K., Sharma, K. ve Kumar, S. (2021). Effects of groove configuration and buttering layer on the through-thickness residual stress distribution in dissimilar welds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, *192*(March), 104392. doi:10.1016/j.ijpvp.2021.104392

Teker, T. ve Gençdoğan, D. (2020). Phase and chemical structure characterization in double sided TIG arc welding of HARDOX 450 and AISI 430 steel. *Cumhuriyet Science Journal*, *41*(4), 987–994. doi:http://dx.doi.org/10.17776/csj.742964

Teker, T. ve Yilmaz, S. O. (2014). Microstructure and Wear Properties of AISI 1020 Steel Surface Modified by HARDOX 450 and FeB Powder Mixture 1. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, *50*(1), 94–103. doi:10.1134/S2070205114010213

Tümer, M. ve Yılmaz, R. (2016). Characterization of microstructure, chemical composition, and toughness of a multipass welded joint of austenitic stainless steel AISI316L. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *87*(9–12), 2567–2579. doi:10.1007/s00170-016-8614-4

Ulewicz, R., Mazur, M. ve Bokůvka, O. (2013). Structure and mechanical properties of fine-grained steels. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, *41*(2), 111–115. doi:10.3311/PPtr.7110

Ulewicz, R., Szataniak, P. ve Novy, F. (2014). Fatigue properties of wear resistant martensitic steel. *METAL 2014 - 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, (October), 784–789.

Uluocak, M. E. (2008). Hardox 450 çeliklerinin mag kaynak bölgesi mikroyapi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi.

Uzunali, Umut Yaşar. (2015). *The Effects of Post Weld Heat Treatment on the Mechanical Properties of Tempered Martensite and High Strength Steel Welded Joints*. *Karadeniz Technical University The Graduate School of Natural and Applied Sciences Metallurgy and Materials Engineering*.

Uzunali, Umut Yasar ve Cuvalci, H. (2015). The Effects of Post Weld Heat Treatment on the Mechanical Properties of Tempered Martensite and High Strength Steel Welded Joints. *Advances in Structural engineering and Mechanics (ASEM15)*.

Weman, K. (2012). Introduction to welding. *Welding Processes Handbook*, 1–12. doi:10.1533/9780857095183.1

Yıldırım, D. (2018). *The Examination of Weldability of 2205 Duplex Stainless Steel and*

S355J2 Structural Steel. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Yılmaz, T. (2010). Microstructure and Mechanical Properties of Hardox 400 Steels Welded by GMAW And FCAW Processes, 18.

Yılmaz, R. (2017). Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesi ve Mekanik Özellikleri. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, *4*(3), 598–605. doi:10.31202/ecjse.341100

ÖZGEÇMİŞ

İlköğretim ve Liseyi Edirne'de tamamladı. 2012 yılında T.C. Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2015 yılında arkadaşlarıyla birlikte T.C. Trakya Üniversitesi Sağlık Kültür ve Spor Daire Başkanlığı'na bağlı İnce Mizansen Animasyon Drama ve Tiyatro Grubu adında bir Tiyatro Topluluğu kurdu ve üç dönem eğitmenliğini yaptı. 2017 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu ve 2017 yılında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2018 yılında T.C. Edirne Belediye Başkanlığı Fen İşleri Müdürlüğü'nde Makine Mühendisi olarak çalışmaya başladı. Halen çalışmaya devam etmektedir.