T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

304L ve S355J2C+N ÇELİKLERİNİN TIG KAYNAK YÖNTEMİ ile BİRLEŞTİRİLMESİNİN MİKROYAPI ve MEKANİK ÖZELLİKLER BAKIMINDAN İNCELENMESİ

SELİN KANTUR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gürkan İRSEL

EDİRNE-2022

SELİN KANTUR'un hazırladığı "**304L ve S355J2C+N ÇELİKLERİNİN TIG 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: 15 / 06 / 2022

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.

15 / 06 / 2022

Selin KANTUR

Yüksek Lisans Tezi

304L ve S355J2C+N çeliklerinin TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı ve mekanik özellikler bakımından incelenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu tez, S355J2C+N ve 304L çeliklerinin TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı ve mekanik özellikler bakımından araştırılmasını bildirmektedir. Farklı üstün özelliklere sahip iki ana metalin birleşimi ile oluşan kaynak bölgesi, ısıdan etkilenen iki ana metalin mikroyapılarının mekanik özelliklere etkileri araştırılmıştır. Optik incelemede, optik mikroskop (OM), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM), enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDX), X-ray difraksiyonu (XRD) analizleri uygulanmıştır. Mekanik deneyler, mikrosertlik (HV 0.1), eğme, Charpy V-Notch darbe, çekme gibi testler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optik incelemede S355J2C+N ana metalin ortalama tane boyutu 5.35 ± 1 µm, 304L ana metalin ortalama tane boyutu ise 35 ± 5 µm olarak ölçülmüştür. Kaynak bölgesinin mikroyapısı heterojen bir yapı sergilemiştir. TIG kaynak işleminden sonra ısı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) 304L için ortalama tane boyutu 41 ± 6 µm, S355J2C+N için ise 5.47 ± 1 µm' dir. Vickers mikrosertlik değerleri, 304L ana metalde ~222 ± 10 HV, S355J2C+N ana metaline ait sertlik değeri ~187 ± 10 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak merkezinin sertliği ise en yüksek sertliğe sahip olup ~302 ± 10 HV olarak tespit edilmiştir. Çekme testinde, enine yönden çıkarılan numunelerde gözlemlenen en yüksek çekme dayanımı 534.88 ± 10 MPa'dır. Enine yönden çıkarılan numunede kopma pozisyonu S355J2C+N ITAB bölgesinden gerçekleşmiştir. Boyuna yönünden çıkarılan numunenin en yüksek çekme dayanımı 601.29 ± 15 MPa'dır. Ana metal 304L çekme dayanımı 611.46 ± 14 MPa olarak ölçülürken, ana metal S355J2C+N çekme dayanımı 551.96 ± 9 MPa olarak

ölçülmüştür. Eğme testinde, 304L ve S355J2C+N ana metallerinin eğme kuvvetleri sırasıyla 27.175 ± 4 kN ve 28.480 ± 2 kN olarak ölçüldü. Enine yönünden kesilen kaynaklı numunelerin eğme kuvveti 28.245 ± 2 kN iken boyuna yönünden kesilen kaynaklı numunelerin eğme kuvveti ise 31.380 ± 2 kN olarak ölçülmüştür. Tungsten inert ark kaynağı, paslanmaz ve karbon çeliğinin birleşiminde mukavemet, sızdırmazlık ve tokluk gibi iyi özellikler sağladı ve bu kaynak yöntemi bu iki farklı metalin başarılı biçimde birleştirilmesi için uygun olduğu belirlendi. Böylelikle benzer olmayan paslanmaz çelik ve karbon çeliğinin farklı malzemeler kullanılmak istenen karmaşık sistemlerde kolaylıkla kullanılabileceği tespit edildi

Yıl : 2022

Sayfa Sayısı : 75

Anahtar Kelimeler : Farklı metallerin kaynağı, Mikroyapı, Mekanik özellikler, Tungsten inert gaz kaynağı, 304L, S355J2C+N

Master's Thesis

Investigation of joining 304L and S355J2C+N steels with TIG welding in terms of microstructure and mechanical properties

Trakya University Institute of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

This thesis reports the investigation of the joining of S355J2C+N and 304L steels by TIG welding method in terms of microstructure and mechanical properties. The effects of the microstructures of the two heat-affected base metals on the mechanical properties of the weld zone formed by the combination of two base metals with different superior properties were investigated. In optical examination, optical microscope (OM), field emission scanning electron microscope (FESEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX), X-ray diffraction (XRD) analyzes were applied. Mechanical tests were carried out using tests such as microhardness (HV 0.1), bending, Charpy V-Notch impact, tensile. In optical examination, the average grain size of S355J2C+N base metal was 5.35 ± 1 μm, and the mean grain size of 304L base metal was 35 ± 5 μm. The microstructure of the welding region exhibited a heterogeneous structure. After TIG welding, the average grain size in the 304L heat affected zone (HAZ) is 41 ± 6 μm, and the average grain size in the S355J2C+N heat affected zone (HAZ) is 5.47 ± 1 μm. Vickers microhardness values were measured ~222 ± 10 HV for the 304L base material, and ~187 ± 10 HV for the S355J2C+N base material. The hardness value of the weld center has the highest hardness and was measured as ~302 ± 10 HV. In the tensile test, the highest tensile strength observed in the specimens extracted from the transverse direction is 534.88 ± 10 MPa. The rupture position of the specimen extracted from the transverse direction was from the S355J2C+N HAZ. The highest tensile strength of the sample extracted from the longitudinal direction is 601.29 ± 15 MPa. While the tensile strength of the base metal

304L was measured as 611.46 ± 14 MPa, the tensile strength of the base metal S355J2C+N was measured as 551.96 ± 9 MPa. In the bending test, the bending forces of 304L and S355J2C+N base metals were measured as 27.175 ± 4 kN and 28.480 ± 2 kN, respectively. While the bending force of the welded samples cut from the transverse direction was 28.245 ± 2 kN, the bending force of the welded samples cut from the longitudinal direction was measured as 31.380 ± 2 kN. Tungsten inert arc welding provided good properties such as strength, sealing and toughness in the combination of stainless and carbon steel, and this welding method was determined to be suitable for the successful joining of these two dissimilar metals. Thus, it has been determined that dissimilar stainless steel and carbon steel can be easily used in complex systems where different materials are desired.

Year : 2022
Number of Pages : 75
Keywords : Dissimilar welding, Microstructure, Mechanical properties, Tungsten inert gas welding, 304L, S355J2C+N

ÖNSÖZ

Kaynak, endüstriyel alanda parçaların imalatı, montajı ve tadilatı gibi bir çok alanda kullanılan vazgeçilmez birleştirme yöntemlerinden biridir. Benzer ya da benzer olmayan metallerin sıcaklık ve/veya basınç altında, ilave dolgu metali kullanarak ya da kullanılmayarak kaynaklı bağlantı elde edilir. Bu çalışmada iki farklı üstün özelliğe sahip çelik malzemenin kaynaklı birleşimine odaklanıldı. Yapı çeliği olarak adlandırılan S355JRC+N ve östenitik çelik olan 304L malzemelerinin tungsten inert gaz kaynak (TIG) yöntemi ile birleştirildi. Farklı metallere ait kaynaklı birleşimin mekanik ve mikro özelliklerinin araştırıldığı, kaynak edilebilirliğinin ortaya konduğu bu özgün araştırma tezinin endüstriyel ve bilimsel olarak birçok açıdan fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Öncelikle tez çalışmalarım boyunca bilgi birikimi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, yardım ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Gürkan İRSEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Edirne Makine Ar-Ge Mühendislik Danışmanlık Ltd. Şti. ve Metalurji ve Malzeme Müh. Betül Nur GÜZEY'e tecrübe ve bilgi birikimlerini benimle paylaştıkları, yanımda oldukları için teşekkür ederim.

Bu tez çalışması için katkı ve desteklerinden dolayı İnan Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ne, ASKAYNAK'a ve MATİL-Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarları A.Ş'ne teşekkür ederim.

Hayatım boyunca en büyük destekçim olan canım annem Tülay YÜRÜK'e, verdiğim kararlarda yanımda olan sevgili eşim Umut KANTUR'a ve aileme minnet ve şükranlarımı sunarım.

Deneysel nitelikli bu çalışma, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Birimi (TÜBAP) tarafından 2021 / 140 numaralı proje ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT vi
ÖNSÖZ viii
İÇİNDEKİLER ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ x
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
ÇİZELGELER DİZİNİ xiv
1. BÖLÜM 1
GİRİŞ 1
1.1. Metallerin Kaynağı 3
1.2. Kaynak Yöntemleri ve Tungsten İnert Gaz Kaynağı TIG (GTAW) 4
1.3. Farklı Metallerin Kaynağı 5
1.4. Farklı Metallerin Kaynağında Mekanik ve Mikro Özellikler 6
2. BÖLÜM 9
LİTERATÜR TARAMASI 9
3. BÖLÜM 14
MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM 14
4. BÖLÜM 30
SONUÇLAR 30
4.1. Mekanik Testler 30
4.1.1. Mikrosertlik 30
4.1.2. Çekme Deneyi 32
4.1.3. Eğme Testleri 33
4.1.4. Charpy Darbe Testleri 35
4.2. Metalografik Deneyler 37
4.2.1. Optik Görüntüler 37
4.2.2. FESEM ve EDX Analizi 40
4.2.3. XRD Analizi 45
5. BÖLÜM 48
TARTIŞMA 48
6. BÖLÜM 54
SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 54
KAYNAKLAR 56

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
Ta	Tantalyum
MnS	Mangan Sülfit

FeS	Demir Sülfür
FeO	Demir Oksit
MnO	Mangan Oksit
SiO_2	Silis
Al_2O_3	Alümina

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
TIG	Tungsten Inert Gaz Kaynağı
A-TIG	Aktif Tungsten Inert Gaz Kaynağı
GTAW	Gaz Tungsten Ark Kaynağı
ITAB	Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
MIG	Metal Inert Gaz
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TS	Türk Standartları
XRD	X-Işınları Difraktometresi
EDX	Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi
FCAW	Özlü Ark Kaynak Yöntemi
EAK	Elektrik ark kaynağı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Kaynak işlemi için hazırlanmış olan S355J2C+N ve 304L plakalar. 16
Şekil 3.2. Kaynaklanacak olan S355J2C+N ve 304L plakaların numaralandırılması. ... 17
Şekil 3.3. 304L ve S355J2C+N çeliklerine X kaynak ağzı açma işlemi. 17
Şekil 3.4. 304L ve S355J2C+N çelik plakaların puntalama işlemi. 18
Şekil 3.5. 304L ve S355J2C+N çelik plakaların puntalama işlem kesiti. 18
Şekil 3.6. Puntalanmış 304L ve S355J2C+N çelik plakalar. 19
Şekil 3.7. S355J2C+N ve 304L sac plakaların TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesi. 19
Şekil 3.8. S355J2C+N ve 304L sac plakaların ER309L elektrot ile kaynaklı birleşimi. 20
Şekil 3.9. S355J2C+N ve 304L sac plakaların ER309L elektrot ile kaynaklı birleşiminin kontrolü. 20
Şekil 3.10. S355J2C+N ve 304L sac plakaların ER309L elektrot ile kaynaklı birleşimi. 21
Şekil 3.11. Numune kesim şematik gösterimi. 21
Şekil 3.12. Tel erezyon cihazı (Charmilles, Robofil 290). 22
Şekil 3.13. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş eğme, çekme, tokluk ve optik inceleme numunelerine ait plakalar. 22
Şekil 3.14. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş eğme ve çekme numuneleri. 23
Şekil 3.15. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş tokluk numuneleri. 23
Şekil 3.16. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş optik inceleme ve mekanik deney numuneleri 24
Şekil 3.17. Kesilen kaynak numunelerinin freze tezgahında düzenlenmesi. 24
Şekil 3.18. Freze tezgahında kaynakları düzenlenmiş eğme ve çekme numuneleri. 25
Şekil 3.19. Freze tezgahında kaynakları düzenlenmiş tokluk numuneleri 25
Şekil 3.20. Çekme ve eğme deney cihazı (ALŞA 30t). 25
Şekil 3.21. Charpy deney cihazı (Zwick/Roell RKP 450). 26
Şekil 3.22. Spektrometre cihazı ile ölçüm (Spectrotest TXC35 model portatif metal analiz cihazı). 26
Şekil 3.23. Optik inceleme numunelerinin kesim işlemi. 27
Şekil 3.24. Bakalite alınmış kaynak kesitinin zımparalama ve parlatma işlemi. 28
Şekil 3.25. Sertlik ölçüm cihazı (UTS TRİBOMETER T10) ve sertlik ölçümü. 28
Şekil 3.26. Sertlik ölçümü a) 0.5 mm aralık ile dikey, b) 0.6 mm aralık ile yatay sertlik ölçümü (Sertlik ölçüm grafiğinde belirtilen konumlar bu görsellerden takip edilebilir). 29
Şekil 4.1. Enine kaynaklı numunenin yatay sertlik ölçümü (HV0.1) (Ölçüm konumu Şekil 3.26'te görülebilir). 31
Şekil 4.2. Enine kaynaklı numunenin dikey sertlik ölçümü (HV0.1) (Ölçüm konumu Şekil 3.26'te görülebilir). 31

Şekil 4.3. Kaynaklı ve ana metallerin çekme ve eğme testi numuneleri. 32
Şekil 4.4. Kaynak kesiti makro görünümü. 33
Şekil 4.5. Eğme testinden sonra kep ve kök görüntüleri a-b) S355J2C+N malzemesi, c-d) 304L, e-f) Boyuna kaynak birleşimi g-h) Enine kaynak birleşimi. 34
Şekil 4.6. Kuvvet (kN) – Yer değiştirme (mm) eğme grafiği. 35
Şekil 4.7. Charpy çentik darbe deneyi sonuçları a) Enine kaynaklı numune b) 304L ITAB c) S355J2C+N ITAB d) 304L e) S355J2C+N. 36
Şekil 4.8. S355J2C+N karbonlu çeliğinin a) 10x büyütmede ve b) 50x büyütmede optik görüntüsü. 38
Şekil 4.9. 304L paslanmaz çeliğinin 10x ve 50x büyütmede optik görüntüsü. 38
Şekil 4.10. Kaynak bölgesinin a) 20X ve b) 50X büyütmede optik görüntüsü. 39
Şekil 4.11. S355J2C+N ITAB 10X ve 50X büyütmede optik görüntüsü. 39
Şekil 4.12. 304L ITAB 5X büyütmede optik görüntüleri. 40
Şekil 4.13. 1.00Kx ve 3.00Kx büyütmede FESEM görüntüleri a-b) 304L paslanmaz çelik ana metali, c-d) Kaynak bölgesi, e-f) S355J2CN ana metali. 42
Şekil 4.14. EDX karakterizasyonu yapılan bölgeler a) 1 numaralı bölge 304L paslanmaz çelik b) 2 numaralı bölge Kaynak bölgesi c) 3 numaralı bölge S355J2C+N çeliği. 43
Şekil 4.15. 304L paslanmaz çeliğinin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi sonuçları. 44
Şekil 4.16. Kaynak metali enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi sonuçları. 44
Şekil 4.17. S355J2C+N çeliğinin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi sonuçları. 45
Şekil 4.18. 304L paslanmaz çelik XRD sonucu. 46
Şekil 4.19. Kaynak bölgesi XRD sonucu. 47
Şekil 4.20. S355J2C+N çeliği XRD sonucu. 47

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. İki ana malzemenin ağırlıkça kimyasal bileşimi (wt%). 15
Çizelge 3.2. İki ana malzemenin mekanik özellikleri. 16
Çizelge 3.3. Kaynak parametreleri. 16
Çizelge 4.1. Her numune için nihai çekme dayanımı, akma dayanımı ve kırılmaya kadar % uzama değerleri. 33
Çizelge 4.2. Eğme deneyi sonuçları. 34
Çizelge 4.3. Charpy V-Notch darbe deneyi sonuçları. 37
Çizelge 4.4. 1,2, ve 3 numaralı noktalara ait EDS analizinin sonuçları. 43

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Paslanmaz çelikler, özellikle korozif etkilere karşı yüksek dayanımından dolayı makine endüstrisinde ve daha bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Emet, 2019). Paslanmaz çeliklerin, korozyon özellikleri ile birlikte mukavemet gibi mekanik özellikleri de iyidir. Paslanmaz çelikler imalat kolaylığı, mekanik dayanım, korozyon direnci gibi üstün özelliklere sahiptir. Paslanmaz çelikler, demir esaslı alaşım malzemeleridir. Çeliklere alaşım elementlerinin ilave edilmesi ile elde edilmektedirler. Paslanmaz çelikler içeriğinde en az %10.5 oranında Cr içermektedir. Ayrıca paslanmaz çeliklerde diğer ön plana çıkan element ise Nikel'dir. Paslanmaz çeliklerde en az %8 seviyelerinde Ni bulunmaktadır. C oranı ise %0.02 ile 1 arasında değişim göstermektedir. Paslanmaz çelikler genel olarak 5 ana başlıkta gruplandırılırlar. Bunlar: östenitik, ferritik, martenzitik, dubleks ve çökelme yoluyla sertleşebilen çelikten oluşmaktadırlar (Türkyılmazoğlu, 2006). Östenitik paslanmaz çelikler, paslanmaz çelik kullanımında en çok tercih edilen çeşittir. Üretimin %65-%70'lik kısmını meydana getirmektedirler (Yıldırım, 2018). Östenitik paslanmaz çelikler, alaşımında minimum %10.5 ile %26 arasında krom (Cr), ve minimum %8 ile %36 arası değişen miktarlarda Ni içeren kimyasal aşınmaya (korozyon) ve yüksek ısıya dayanıma sahip çeliklerdir. Paslanmaz çeliklerde bulunan östenit fazını oda sıcaklığına kadar indiren ve kararlı duruma getiren alaşım elementleri krom ve nikeldir. Bu çeliklere Si, Mo, Ti, Ni ve Ta gibi stabilize edici elementler de ilave edilmektedir. Isı ve korozyona karşı dayanıklı yerlerde kullanılan bu çeliklerin ısı iletim katsayıları, yumuşak çeliklerin %30'u kadar ve genleşmeleri ise onlardan %50 daha fazladır. Östenitik paslanmaz çelikler manyetik değildir, sünek yapıya sahip olmasının yanında kolaylıkla imal edilebilir. Karbon veya molibden ile alaşımlanarak kullanım alanları çoğaltılabilir. Isıl işlemle sertleştirilememesine rağmen

farklı işleme yöntemleri ile sertlik kazandırılabilir (Köroğlu, 2021). Östenitik tip paslanmaz çelikler yüksek ısıl genleşme katsayısına sahip olduklarından kaynak sırasında çarpılma diğer paslanmaz çeliklere göre daha azdır. En yaygın kullanılan östenitik paslanmaz çelik türü ise 300 serisidir (Odabaş, 2007). Östenitik çeliklerin korozyona karşı direnci martenzik ve ferritik paslanmaz çeliklerden daha yüksektir (Abuç, 2006) ve (Çınar vd., 2019), kaynaklanabilirlik ve işlenebilirlik açısından yüksek kabiliyete sahiptir (Çınar vd., 2019). Yapısal çeliklerle karşılaştırıldığında maliyeti yüksektir, fakat korozyon dayanımı istenilen yerlerde tercih edilir (Baran, 2006). Paslanmaz çeliklerin genellikle işlenebilirlik kabiliyetleri iyidir, uzun ömürlü ve çevre dostu malzemelerdir. Paslanmaz çeliklerin yüzeyinde oluşan sıkı ve ince krom oksit tabakası sebebiyle yüzey pasif hale gelir, oksidasyonun daha derine inmesini engeller ve yüzeyi dış etkenlere karşı korur (Abuç, 2006). Nikel içeren paslanmaz çelik, her yönüyle iyi performans gösterir. Yaygın olarak kullanılabilir, çok yönlüdür ve kullanımı kolaydır. Ayrıca geri dönüştürülebilmektedirler. Bu çalışmada ele alınan östenitik paslanmaz çelik 304L' dir. Karbon oranı 304 kodlu paslanmaz çelikte yaklaşık %0.08'e çıkarken 304L'de bu değer maksimum % 0.03'tür.

S355J2C+N yapı çelikleri düşük karbonlu alaşımsız çeliklerdir (Türk, 2021). Her tür makine ve makine parçası imalatı, genel konstrüksiyon, kara ve demir yolu araçları imalatında kullanılan yüksek mukavemetli yapı çelikleridir (Yıldırım, 2018). 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. J2 notasyonu -20 C° sıcaklıkta darbe enerjisi minimum 27 J olduğunu ifade etmektedir. Katlamaya uygun yapı çeliğidir. Normalize olması sebebiyle kalıntı gerilmelerin daha az oluşması bakımından da avantajlıdır. S355JR serisinde karbon miktarı %0.24 iken S355J2C+N çeliğinde %0.20-0.22 arasında değişmektedir (Grubu, 2017, Yıldırım, 2018). S355J2C+N çeliği geniş teknik kullanım yelpazesine katkıda bulunur ve iyi kaynak özelliklerine sahiptir.

Yukarıda üstün özellikleri belirtilen S355J2C+N ve 304L malzemelerinin kaynak ile birleştirilme gereksinimleri endüstride önemli derecede artmıştır. Benzer olmayan

çelikleri birleştirmek için sıklıkla metallerin kaynak edilebilirliğine uygun yeni metodolojiler, elektrotlar ve kaynak yöntemleri araştırılmaktadır.

1.1. Metallerin Kaynağı

Kaynak iki ya da daha fazla malzemenin ısı, basınç ya da ısı-basınç birlikte kullanılarak eritilmesi ve eritilen metallere ilave dolgu metali eklenerek ya da eklenmeden birleştirilen önemli bir üretim yöntemidir (Al-Khafaji, 2020). İş makineleri, otomotiv, enerji santralleri, uzay ve havacılık, gemi imalatı, gıda makineleri ve neredeyse tüm diğer endüstriyel alanlarda üretim yöntemi olarak kaynak prosesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde yaygın kullanılan kaynak yöntemleri dar bir alanda yüksek sıcaklık yoğunluğu oluşturarak birleştirilecek malzemelerin eritilmesi, gerektiğinde bu eriyik banyosuna ek ilave bir malzeme katarak gerçekleştirilmektedir. Endüstriyel olarak metallerin kaynağında yaygın olarak kullanılan kaynak yöntemleri gazaltı ark kaynağı, elektrik ark kaynağı, TIG kaynağı ve toz altı ark kaynağıdır (Özkan, 2019).

Kaynak işlemi kaynak bölgesi, kaynak dolgusu ve ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) den oluşur. Kaynak bölgesi ve kaynak bölgesinin çevresinde yüksek sıcaklığa ve soğuma hızına bağlı olarak tane boyutlarında değişim, fazların değişimi, sertlik gibi mekanik özelliklerde değişim görülmektedir. Dahası katılaşma sonrasında distorsiyonlar ve artık gerilmeler görülür. Distorsiyonların oluşmasına etki eden unsurlar; konstrüksiyonun rijitlik derecesi, esas metallerin metalürjik özellikleri, ısıl genleşme katsayısı, ısıl iletkenlik katsayısı, kaynak ilerleme hızı, kaynak metalinin erime sıcaklığı, akma mukavemeti ve elastiklik modülü olarak tanımlanır. Bu nedenle kaynak yapılacak metallerin kimyasal, mekanik ve metalurjik özelliklerinin bilinmesi ve bu metallerin birleşimi için uygun ilave tel seçimi gerekmektedir. Kaynak parametrelerinin belirlenmesi, ısı girdisinin kontrollü kaynak kabiliyetini ve verimliliğini arttıran başlıca etmenlerdendir. Kaynak kabiliyetinin dereceleri; hiçbir ön işleme gerek olmaksızın kaynak edilebilirse ‘’iyi kaynak edilebilir’’, malzeme kalınlığının artması ile ön tavlamaya ihtiyaç duyuluyorsa ‘’ kaynak edilebilir’’, kaynaklı bağlantıda ön tavlama ve kontrollü soğutma yapılması gerek ise ‘’şartlı kaynak edilebilir’’ diye tanımlanır (Anık, 1991).

Çeliklerin içerdikleri karbon miktarı birbirleriyle kaynaklanabilirlikleri ile ilişkilidir. Genel olarak kaynaklanabilirlik, düşük karbonlu çelik için çok iyi (karbon seviyesi ≤ %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). Diğer alaşım elementlerinin varlığı da kaynaklanabilirlik üzerinde içerdikleri karbon miktarı kadar etkilidir (Uzunali, 2015). Karbon, manganez, silisyum, kükürt, fosfor ve oksitler gibi alaşım elementleri yapı çeliklerinin kaynak kabiliyetleri üzerinde etkilidir. Mangan çeliğin içerisinde %30 ile %80 arasında bulunur, çeliğin dayanımını, sertleşebilme ve kaynak kabiliyetini arttırır. Mangan, kükürt ile birleşerek MnS yapısını oluşturur ve bu yapı sıcak kırılganlığa neden olan; demir kükürt FeS yapısının oluşumunu engeller. Silisyum %0.01 ile %0.30 arasında bulunur, çeliğin akma, çekme ve elastikiyetini arttırır. Çelik imalatında oksijen giderici olarak kullanılır. Kükürt %0.05 ten az bulunur. Malzemenin tokluğu ve uzamasında etkilidir. Fosfor %0.05'ten az bulunur, tane boyutu üzerinde etkisi vardır. Tane boyutunu büyüttüğü için malzemeyi kırılgan yapar. Çatlama ve kırılmalara sebebiyet veren; demiroksit (FeO), manganoksit (MnO), silis (SiO_2) ve alümina (Al_2O_3) gibi oksitler çelik imalatında istenmezler (Tufanoğlu, 2017).

1.2. Kaynak Yöntemleri ve Tungsten İnert Gaz Kaynağı TIG (GTAW)

Tungsten inert gaz (TIG) kaynağı olarak da bilinen gaz tungsten ark kaynağı (GTAW), kaynağı üretmek için tüketilmeyen bir tungsten elektrot kullanan asal gaz tarafından korunan bir ark kaynağı işlemidir (Gözütok, 2009). Ark, tungsten elektrot ile iş parçası arasında meydana gelir. Oluşan ark ile esas malzeme ergiyip, birleşim meydana gelir. Kaynak ilave malzemesi elle eklenebildiği gibi otomatik olarak da eklenebilir (Altuntaş, 2015). TIG kaynağında kullanılan koruyucu gazlar; argon, helyum, karbondioksit ve karışım gazlardır (Emet, 2019). Kaynak sırasında kullanılan koruyucu gazların kaynak bölgesine ısı katkısı yoktur, kaynak kalitesine olumsuz bir etkisi yoktur fakat kaynak hızı ve kaynaklı bağlantının kalitesine arttırır (Gözütok, 2009). Kaynak, kaynakçının gözlemi altında gerçekleştiği için kaynak banyosunu üzerinde cüruf kalma ihtimalini kontrol altında tutabilmektedir (Baran, 2006). TIG kaynak yöntemi ile paslanmaz çelikler, ısıya mukavim çelikler dökme demir ve çelik, alüminyum, magnezyum, bakır ve alaşımları, titanyum, nikel (Ni), molibden (Mo), niyobyum (Nb),

tungsten (W) gibi bütün metal ve alaşımları kaynaklanabilir (Gözütok, 2009). Kaynak pozisyonlarında istenilen kalitede sonuçlar elde edilir (Baran, 2006). TIG kaynak yöntemi üretim ve tamir kaynaklarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretim kaynağında kök paso kaynağı olarak kullanılması gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır (Baran, 2006, Gözütok, 2009). TIG kaynağında ısı girdisi ilave metal oranına bağlı değildir. Kaynak prosesi, ısı kontrolünü gerçekleştirmek ile yüksek kaliteli kaynak yapısı ve düşük distorsiyonların meydana gelmesini sağlamaktadır. TIG kaynak yönteminde ısının ve ilave telin kontrol edilebilmesi sebebiyle daha hassas kaynak yapılabilmektedir (Altuntaş, 2015). TIG kaynağının başlıca avantajları; manuel ve otomatik kaynak sistemlerinde kullanımı uygundur, kaynak dikişi oldukça düzgündür, her pozisyonda kaynak yapılabilir, ısı kaynak bölgesinde yoğunlaştığı için malzemede deformasyona yol açmaz (Emet, 2019). Kaynak dikişi mukavemeti yüksek ve kaynak kalitesi diğer elektrik ark kaynak yöntemlerine göre iyidir (Odabaş, 2007). Tungsten elektrodun kaynak banyosuna karışması, düşük akımdan kaynaklanan yetersiz ergime ve gözenek oluşumu TIG kaynağının dezavantajları arasındadır (Emet, 2019). Özellikle paslanmaz çelik malzemelerin kaynağında TIG kaynak yöntemi tercih edilmektedir (Serdaroğlu, 2010).

1.3. Farklı Metallerin Kaynağı

Endüstride teknoloji ve ihtiyaçlara yönelik yeni malzemeler, ürünler ve proseslere gereksinim gün geçtikçe artmaktadır. Mevcut malzemeler, mevcut üretim yöntemleri ile ele alındığında mevcut üstün özellikli malzemeleri bir amaç için birlikte kullanmak verimli, ekonomik bir yöntemdir (Altuntaş, 2015). Günümüzde metallerin kaynağı ile ilgili hem bilimsel hem de endüstriyel gelişmeler sürmektedir. Özellikle farklı metallerin kaynak edilebilirliği ile ilgili çalışmalar önem kazanmaktadır. Bu işlem hem bu iki malzemenin hem de ek kaynak dolgu metalinin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini bilmeyi gerektirmektedir. Bu metallerin erime sıcaklığı noktaları, ısıl iletkenlikleri, genleşme katsayıları, karbon eşdeğerleri kaynağın kalitesinde önemli parametrelerdir. Farklı metallerin kaynağında bu ve daha fazla malzemeye özgü özelliklerin aralığı kaynak işlemini ve kaynak sonrası oluşan yapıyı doğrudan etkilemektedir. Yüksek ısı altındaki bu birleşim birçok parametre ile birlikte soğuma hızına doğrudan bağlıdır. Farklı üstün özelliklere sahip metallerin kaynak yöntemi ile birleştirilmesi kompleks sistemlerin üretimi için günümüzde gereksinim haline gelmiştir (Ok, 2009).

Benzer olmayan metaller arasındaki bağlantılar özellikle gıda, elektrik üretimi, kimya, petrokimya, nükleer ve elektronik endüstrilerinde kullanılan bileşenlerde yaygındır. Bir üründe farklı metaller ve alaşımlar kullanma yeteneği, tasarımcı ve üretim mühendisine daha fazla esneklik sağlar ve genellikle tek bir malzemeden üretilen bileşenlere göre teknik ve ekonomik avantajlar sağlar. Belirli özelliklere sahip pahalı malzemeler, destekleyici veya birleştirici rollerde daha az pahalı alaşımların kullanıldığı kritik yerlerde kullanılabilir (İrsel, 2021, Sun ve Ion, 1995). Farklı metallerin endüstriyel olarak uygulanabilirliği ile ilgili hem kaynağın gerçekleştirilme metodu hem de kaynak sonrası elde edilen yapının özellikleri bilimsel olarak incelenerek bu birleşimin kapsamlı biçimde ortaya konup uygulanabilirliğine karar verilmelidir.

1.4. Farklı Metallerin Kaynağında Mekanik ve Mikro Özellikler

Düşük veya orta karbon çeliklerinin TIG kaynağı ile farklı paslanmaz çelikler ile birleştirilmesi özellikle enerji üretimi, petrol ve gaz endüstrisinde geniş uygulamalara sahiptir (Jafarzadegan vd., 2013). Bununla birlikte, metallerin farklı özelliklere sahip olması gerçeği çoğu zaman kaynakçılara farklı metalleri birleştirme konusunda ilham verir. Bazı durumlarda, farklı metalleri karıştırıp eşleştirmek bir gereksinim haline gelmiştir (Türk, 2021). Farklı özellikteki iki metalin birleşiminde kaynak bölgesi iki ana metalden farklı mekanik ve mikroyapısal özelliklere sahip olması beklenir (Konat, Zemlik, Jasiński ve Grygier, 2021). Böylelikle kaynak işlemi sırasında meydana gelen bu mekanik ve mikroyapısal değişiklikler uluslararası standart deneyler ve teknolojik test cihazları ile gerçekleştirilmektedir.

Mekanik ve mikroyapısal testlerde kullanılmak üzere kaynaklanan plakalardan numunelerin hassas bir şekilde oluşturulması için tel erezyon yöntemi boyutlar ve yüzey pürüzlülüğü bakımından günümüz yöntemleri arasında en hassasıdır. Tel erezyon, üzerinden yüksek yoğunlukta akım geçirilen bir tel aracılığıyla kesim prosesidir. Tel erezyon tezgahında kesilen bir parçada taşlanma gerekmez ve yüzey pürüzlülüğü iyidir (Gürbüz, Baday ve Hamarat, 2018, Özek ve Özel, 2003). Çalışmada kullanılan ana metallerin ve kaynaklanmış numunelerin mekanik özelliklerini araştırmada gerçekleştirilen standart mekanik testler vardır. Çekme deneyi mekanik karakterizasyon testlerinin başında gelmektedir. Bu çekme deneyi ile malzemenin ve birleşim bölgesinin plastik davranışı, elastik davranışı, akma ve çekme dayanımı tespit edilir. Diğer bir

mekanik test olarak eğme deneyinde de belirli mesafede konumlandırılmış iki alt mandrel ve üstte bir mandrel ile kuvvet uygulanır. Eğme işlemi için belirlenmiş deplasmana ulaşana kadar sabit hızda basma işlemi uygulanır ve veriler kaydedilir. Bu test malzemenin sünekliğini veya kırılmaya karşı direncini belirlemek için gerçekleştirilmektedir (Korkmaz, Çetin, Adar ve Orak, 2020). Bu deneyin kaynak dikişine yapılmasındaki amaç, ana malzemelere oranla sünekliklerini ve kullanım yerlerinde oluşacak şekil verme durumundaki davranışlarını belirlemektir. Charpy Darbe deneyi mesnete yaslanan numunenin ortasına bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik ucunda meydana gelen çok eksenli gerilmelerin etkisi ile numunenin kırılması için harcanan enerjiyi belirleme işlemidir. Çentik darbe deneyinin kaynaklı malzemelere yapılmasının amacı dinamik zorlamalar altında kırılması için gerekli enerji miktarını ve kullanım sıcaklığındaki kırılmaları için gerekli kırılma enerjisini tespit etmektir (Yıldırım, 2018).

Optik mikroskop, ya da ışık/metal mikroskobu küçük malzemeleri büyütmek için merceklerden oluşan bir sistem ile görünür ışığı kullanan bir mikroskop türüdür. Çeliklerde optik inceleme makro ve mikroyapı olarak ikiye ayrılabilir. Makroyapı incelemeleri gözle veya optik metal mikroskobu ile 5x ve 10x seviyelerinde büyütmede yapılabilir. Kaynak geometrisi, nüfuziyet, çatlaklar ve diğer kaynak hataları bu yöntemle belirlenebilirken mikroyapı incelemeleri, çıplak gözle görülemeyecek ve yüksek büyütmelerle (20x ve 3000x seviyelerinde büyütmede) yapılan incelemelerdir (Yıldırım, 2018).

Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM), neredeyse sınırsız alan derinliği ile 10x ila 300.000x büyütmelerde topografik ve temel bilgiler sağlar. Geleneksel taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karşılaştırıldığında, alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM), 1 nanometreye kadar uzaysal çözünürlüğe sahip daha net görüntüler üretir (Kumar ve Sinha, 2019). FESEM analizi ile mikroyapı karakterizasyonu, malzeme yüzeyi ve kesitinde bulunan hataların analizi, parçacık boyutu analizleri, hasar analizleri, EDS/EDX haritalama, EDS/EDX noktasal ve çizgisel analiz yapılabilir ve neredeyse sınırsız alan derinliği ile topografik, morfolojik ve mikroyapı hakkında bilgi verir. Energy Dispersive X-ray Spektroskopisi yardımıyla kontaminasyon noktalarını inceleme yeteneğine sahiptir (El-Eskandarany, 2020).

X-Işını kırınım yöntemi (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır ve hasarsız analiz yöntemidir. Her bir kristalin faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. XRD analizi ile kristalin malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilir. Metal malzemelerin XRD analizi sonucunda yalnızca elementler değil bileşikler ve oluşan fazla tespit edilebilir. Kaynak bölgesinde ana metallerden farklı bir yapı oluştuğu için XRD analizi yöntemi ile hangi fazların oluştuğu tespit edilebilir ve yapıdaki değişimler, fazların miktarı ve kristal yapısı belirlenebilir (Özturan, 2022). X-Işını kırınım analizinde (XRD), X-ışını Cu Kα radyasyon kaynağı ($\lambda = 1.5406$ Å) kullanılır. Tarama adımı boyutu, toplama süresi, aralık, X-ışını tüpü voltajı ve akımı gibi farklı parametreler, numunenin gereksinim analizine göre sabitlenir (Mindivan, 2013). Bu çalışmada XRD analizi 304L paslanmaz ve S355J2C+N ana metallerine ve kaynaklı birleşime yapıldı.

Bu çalışma, 304L paslanmaz ve S355J2C+N farklı özellikteki çeliklerin kaynağında mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmektedir. Test numuneleri oluşturmak için uygun boyutta plakalar kaynaklanmıştır. Ana metaller ve kaynaklı birleşim bölgesi için mikrosertlik (HV 0.1), eğme, Charpy darbe ve çekme testleri gibi mekanik testler yapılmıştır. Mikroyapı testleri için optik mikroskop (OM), alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS/EDX), X-ışını kırınımı (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı birleşimin başarısı ve mekanik özellikler ile mikroyapısal özellikler arasındaki ilişki detaylı olarak sunulmuştur.

2. BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

Kaynak modern dünyada üretim, montaj gibi birçok alanda tercih edilen birleşim yöntemidir. Mühendislik alanında mekanik ve termomekanik olarak sürekli olarak araştırılan ve geliştirilmeye çalışılan birleşim yöntemidir (Özkan, 2019). Günümüz koşullarında farklı metallerin kaynağı endüstride gereksinim haline gelmiştir. Farklı malzemelerin kaynağı endüstriyel rekabet dünyasında, imalat koşullarının optimizasyonuna avantaj sağlamak amacıyla endüstri koşullarında çeşitli denemeler yapılan, bilimsel olarak araştırmalar yapılan geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Farklı metallerin kaynağı ile ilgili çalışmalara göz atarsak; Çelik ve Alsaran (1999), yapmış oldukları çalışmada, ferritik çelik St37-2 ve östenitik çelik AISI 304 malzemelerin gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) ile birleştirilmesini incelemişlerdir. Benzer malzeme çiftlerinin ve farklı malzeme çiftinin kaynaklanabilirliği; çekme testi, eğme testi, mikrosertlik ölçümü, SEM ve mikroyapı özellikleri ile değerlendirmişlerdir. Farklı malzemelerin kaynak ITAB bölgelerinde yüksek sertlik artışı tespit etmişlerdir. Farklı malzemelerin kaynağında çekme numunesi St37-2 malzemesinden kopmuştur.

Khalifeh, Dehghan ve Hajjari (2013), yapmış oldukları çalışmada, AISI 304L ve St37 çeliklerini tungsten inert gaz (TIG) kaynak yöntemi ile birleştirilmişlerdir. Mekanik özelliklerini belirlemek için mikro sertlik, çekme ve darbe testi analizlerini değerlendirmişlerdir. Kullandıkları ER309L kaynak dolgu malzemesi ile AISI 316L/St37 malzemelerinin kaynağında daha iyi mekanik özelliklere ve sıcak çatlamaya karşı dirence sahip olduğu tespit etmişlerdir. Çekme testi sonuçlarına göre kopmanın St37 tarafında gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Kaynak bölgesinde delta ferrit miktarının yükselmesi, darbe tokluğunun azalmasına sebep olduğunu tespit etmişlerdir.

Jafarzadegan vd. (2013), yapmış oldukları çalışmada, St37 çelik levha ve 304 paslanmaz çelik levhaları sürtünme karıştırma kaynak (FSW) yöntemi ile birleştirmişlerdir. Kaynak işlemi sırasında yüksek sıcaklık ve deformasyon kaynak bölgesinde St37 karbon çeliğinde östenitin yeniden kristalleşmesini sağlamış olup, soğuma işlemi ile birlikte ince ferrit ve perlite dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. Kaynak bölgesindeki bu durum yüksek mukavemet ve süneklik sağlamış olup, çekme testi sonuçlarında kırılma pozisyonun St37 ana metal tarafında olduğunu görmüşlerdir.

Jafarzadegan vd. (2012), yapmış oldukları çalışmada, 3 mm kalınlığında St37 çelik levha ve 304 paslanmaz çelik levhaları sürtünme karıştırma kaynak (FSW) yöntemi ile birleştirmişlerdir. X-ışını kırınım testi ile kaynaklarda oluşan fazları incelemişlerdir. Mikroyapısal değişiklikleri incelemek için optik mikroskop, SEM ve TEM analiz yöntemlerini kullanmışlardır. Sıcak deformasyon nedeni ile St37 çeliğinin kaynak bölgesinde yeniden kristalleşme olduğunu analiz etmişlerdir. Kaynak bölgesindeki soğuma sonucunda 2 farklı yapıya dönüşmüş olup, bunlardan bir tanesi ferrit + perlit, diğeri ise widmanstatten ferrit ve martensit ve otomatik temperlenmiş martensit içeren ferrit ve sementit kolineri içeren yapıları analiz etmişlerdir. Mekanik özellikleri için vickers sertlik metodunu, çekme testi için boyuna ve enine çekme numuneleri kullanmışlardır. Kaynak bölgesinin çekme testi sonuçları ana metal St37'den daha yüksek akma dayanımına sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Kumar ve Sinha (2018), yapmış oldukları çalışmada, 1.4 mm kalınlığında 304L ve St37 plakaları sabit darbe frekansı (25 Hz), tarama hızı (6 mm/s), darbe enerjisi (17 J) ve 6 farklı darbe genişliği (3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6 ms) parametreleri ile darbeli Nd-YAG lazer kaynağı yöntemi ile birleştirmişlerdir. Değişen darbe genişliği parametrelerine göre ortalama mikrosertlik 3.5 ms parametresinde en yüksek ortalama değere sahip olup 364.5 HV'dir. En düşük ortalama değer 6 ms parametresinde 322.7 HV olarak ölçmüşlerdir. Çekme testleri sonucunda çekme mukavemeti artan darbe genişliğine rağmen sabit kaldığı gözlenmiş olup, kopma pozisyonunun St 37 karbon çeliği tarafında gerçekleşmesi kaynaklı bağlantının ana metal olan St 37'ye eşdeğer mukavemette olduğunu tespit etmişlerdir.

Savaş (2021), yapmış olduğu çalışmada, Hardox-Hardox, Hardox-AISI 304L ve Hardox-St52 çelik çiftlerinin MIG kaynağı ile kaynak edilmesi sonucunda mekanik

davranışlarını incelemek için sertlik ölçümü, çekme testi ve darbe tokluk testi yapmıştır. Tel erezyon yöntemi ile kaynaklı parçalardan çekme numunesi ve darbe tokluk numunesi çıkarılmıştır. Isı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) sertlik ölçümü Hardox-Hardox kaynaklı bağlantısında ortalama 365 HV, Hardox-AISI 304L kaynaklı bağlantısında ortalama 230 HV, Hardox-St 52 kaynaklı bağlantısında ortalama 270 HV tespit edilmiştir. Çekme mukavemeti ve darbe tokluk mukavemetine ait en yüksek değerleri sırasıyla Hardox-AISI 304L, Hardox-Hardox ve Hardox-St52 kaynaklı bağlantısında tespit etmiştir.

Kahraman, Kasman, Kahraman ve Tunuslu (2017), yapmış oldukları çalışmada, 90MnCrV8 takım çeliği ve AISI 304 östenitik paslanmaz çeliği örtülü elektrotlar ile ark kaynağı yöntemi ile birleştirmişlerdir. X kaynak ağzı açılmış olup çok paso kaynak ile kaynak tamamlanmıştır. Metalografik incelemeler sonucunda; kontrollü soğuma için tozaltı tozu içinde soğutulmuş olan yüzey kısımların da yüksek soğuma hızından dolayı martenzit yapı görülmüştür. İçyapı bölgesinde ise delta ferrit oluştuğu tespit etmişlerdir. Isı tesiri altında kalan bölgelerde karbon artışına bağlı olarak martenzit yapı oluştuğundan dolayı en yüksek sertlik değeri 90MnCrV8 takım çeliğinin ITAB'ında tespit edilmiştir. AISI 304 çeliği ile ITAB ve kaynak dolgusu arasında dengeli bir sertlik dağılımı gözlenmiştir.

Yürük, Bozkurt ve Kahraman (2016), yapmış oldukları çalışmada, S235 karbon çeliği ve AISI 430 ferritik paslanmaz çeliği 1 mm çapında 309 L Si ilave kaynak dolgu metali kullanarak üç farklı tel hızında MIG kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Çekme testleri sonucunda tüm kaynaklı numunelerde kopma ana malzeme S235JR tarafında meydana gelmiştir. Bu durum kaynaklı bağlantının kendisinden beklenen şartları sağlandığı olarak değerlendirilmiştir. Mikro sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertlik değeri kaynak metalinde ölçülmüş olup; en yüksek değer 100 A kaynak akımı ve 3.5 m/sn tel hızında 313 HV olarak ölçülmüştür. Artan tel hızı ile tanelerde büyüme gözlenmiş olup kaynak akımı ile artan ısı girdisinin sebep olduğuna dayandırılmıştır.

Yilmaz ve Tümer (2010), yapmış oldukları çalışmada, AISI 316L östenitik çelik E316LT1-¼ özlü tel kullanılarak özlü ark kaynak yöntemi (FCAW) ile kaynaklamışlardır. Çalışmada farklı koruyucu gaz bileşimlerinin kaynaklı bağlantı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla mikro yapı ve tokluk değerlerini

değerlendirmişlerdir. Koruyucu gaz bileşimlerinin tokluk değerleri üzerinde etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Koruyucu gazdaki CO_2 yüzdelerinin artmasıyla δ-ferrit içeriğinin azaldığı ve kaynak metalindeki δ-ferrit oranının düşmesiyle kaynaklı bağlantıların tokluk değerlerinin olumsuz etkilediğini görmüşlerdir.

Xin vd. (2021), yapmış oldukları çalışmada, bakır ve 316L paslanmaz çeliği Ni ara katmanı ile lazer kaynak yöntemi ile kaynaklamışlardır. Optik mikroskop, EBSD, SEM, mikrosertlik ve çekme testi sonuçları değerlendirilmiş olup kaynaklı bağlantının sağlam bir kaynak olduğunu tespit etmişlerdir. Füzyon bölgesinde hiçbir kaynak kusuru veya küresel parçacık oluşmamış olup makroskobik ayrışma ve tercih edilen yönlenme gözlenmemiştir. Füzyon bölgesindeki mikrosertlik 180 HV ölçülmüştür. Çekme testleri sonucunda kopma konumu bakır ana malzemesi tarafında olmuştur. Kırılma yüzeyi; sünek kırılma olarak gözlemlenmiştir.

Wegrzyn (1992), yapmış olduğu çalışmada, paslanmaz çelik kaynaklarda delta ferrit yapısını incelemiştir. Östenit ve ferritin özelliklerini, tokluğunu, avantaj ve dezavantajlarını, kaynak içeriğini, kaynaklarda içeriğinin nasıl belirleneceğini ve değişken delta ferrit içeriğine sahip çeliklerin kaynaklarını incelemiştir. Östenitik-ferritik kaynaklarda %3 ile %5 arasında bulunan delta ferrit, kaynak katılaşması ve mikro çatlamanın önlenmesinde önemli rolü olduğu tespit edilmiştir. 475 °C'lik kırılganlığın oluşmasının nedenini delta ferritin hem düşük hem yüksek krom içerikli ferrit tanelerinin ayrılması olarak belirtmiştir. Ferritik krom kaynaklarında delta ferrit ve sigma fazı birlikte gözlemlenebilir, östenitik - ferritik kaynaklarda delta ferrit, sigma fazı ve östenit aynı anda gözlemlenebileceğini belirtmiştir.

Tümer ve Yılmaz (2016), yapmış oldukları çalışmada, AISI 316 östenitik çeliği ER316LLT1-¼ özlü tel kullanılarak özlü ark kaynak yöntemi (FCAW) ile birleştirmişlerdir. Koruyucu gazlardaki karışım oranının kaynaklı bağlantı üzerinde mikroyapısal etkilerini incelemek için stereo optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı spektroskopi (EDS), transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve TEM haritalama analiz teknikleri kullanmışlardır. Mekanik analizi için darbe tokluğu, mikrosertlik analizleri yapmışlardır. Kaynak hatalarını önlemek amacıyla kaynak pasoları arasında sıcaklık değeri 150 ^{o}C nin üstüne çıkmasına izin vermemişlerdir. Ar-12 % CO_2, Ar-20 % CO_2, Ar-50 % CO_2, ve 100 % CO_2 içeriklerine

sahip dört farklı korucu gaz kullanmışlardır. CO_2 oranının artmasıyla östenit yapı artarken delta ferrit fazı miktarı azalmış olup delta ferrit dendrit dallarında kırılma, açılma ve yarılmalar gözlemlemişlerdir. Ayrıca charpy darbe tokluk değerlerinde düşüşün sebebini kaynak metalinde inklüzyon sayısında gözlenen artışa dayandırmışlardır.

Roy vd. (2014), yapmış oldukları çalışmada, 3 mm kalınlığında saf bakır ve östenitik paslanmaz çelik olan AISI 304 çeliğini üç farklı kaynak elektrodu; ENiCrMo3, ENiCu7, E316L kullanarak kaynaklamış olup kaynak üzerinde mekanik ve metalurjik etkilerini araştırmışlardır. Görsel kontrolde en iyi yüzey ENiCrMo3 ile kaynaklanan parçada mevcut olduğunu tespit etmişlerdir. Çekme numuneleri tel erezyon yöntemi ile kesmişlerdir. Çekme testi sonuçlarında en yüksek değer sırasıyla 8ENiCrMo3, E316L ve EniCu7 ile kaynaklanan plakada görülmüş olup kopma bakırın ITAB bölgesinde gözlenmiştir. Bu durum CP bakırın ısıdan etkilenen bölgesindeki tane irileşmesinden meydana geldiğine dayandırılmaktadır. Kırılma yüzeyi; sünek kırılma olarak SEM ile görüntülenmiştir. Kaynak bölgesinde en yüksek ortalama mikrosertlik ölçümü 225 HV olarak ölçülmüş olup ENiCrMo3 elektrodu ile kaynaklanan plakada ölçülmüştür.

Mayr, Palmer, Elmer, Specht ve Allen (2010), yapmış oldukları çalışmada, ağırlıkça %9 krom içeren çeliğin tek kaynaklı termal bir döngüde olduğu sürede delta ferrit oluşumunu X-ışını kırınımı analizi (XRD) ile incelemişlerdir. Çelik malzemeyi 1100 ℃'de 8 saat normalize edilip hava ile oda sıcaklığında soğutmuşlardır. Daha sonra 730 ℃'de 10 saat temperleme işlemi yapılıp, hava ile oda sıcaklığında soğutulduktan sonra tekrar aynı sıcaklıkta 24 saat temperleme işlemi yapılmıştır. Bu aşamada delta ferrit içermeyen, martenzit mikroyapı gözlenmiştir. Bu termal döngüde martenzit, östenit ve delta ferritin hacim fraksiyonları gerçek zamanlı incelenmiştir. Pik sıcaklıkta delta ferrit konsantrasyonunun %19'a yükselip, soğuması ile %17'lik kısmının tekrar östenite dönüştüğünü tespit etmişlerdir. Böylelikle XRD ölçümlerinin delta ferrit konsantrasyonunu belirlemede yeterince hassas olduğunu tespit etmişlerdir.

3. BÖLÜM

MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM

Bu çalışmada östenitik paslanmaz çelik 304L ve karbonlu genel yapı çeliği (0.20 wt% C) alfa ferrit ve az miktarda Fe_3C içeren S355J2C+N'nin TIG (Tungsten inert gas) kaynak yöntemi ile birleşimi günümüz kapsamlı teknolojik laboratuvar testleri ile araştırıldı. Kaynak işleminde Askaynak ER309L kodlu 3.2 mm çaplı kaynak teli kullanıldı. 304L ve S355J2C+N ana malzemeleri ve kaynak telinin kimyasal bileşimleri ağırlıkça (wt%) Çizelge 3.1'de verilmiştir. Ana metaller ve kaynak telinin mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. 8 mm ve 10 mm et kalınlığında S355J2C+N ve 304L 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, 300 × 55 × 10 mm, 300 × 40 × 10 mm, 250 × 150 × 10 mm, 300 × 250 × 10 mm boyutlarında plakalar hazırlandı (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Kaynaklanacak plakaların birleşim çizgilerine X kaynak ağzı açıldı, 3 mm kök mesafesi bırakıldı (Şekil 3.3). 304L ve S355J2C+N plakalarda tel erezyon ile kesilmiş kaynak çizgisine freze ile açı verildi. Bu işlem ilave metal için uygun bir boşluğu oluşturmak için yapıldı (Şekil 3.3). Kaynak ile birleştirilecek kaynak ağzı açılmış plakalar puntalandı (Şekil 3.4-6). S355J2C+N ve 304L sacların ER 309L elektrot ile birleştirildi (Şekil 3.7-10). Kaynak Çizelge 3.3' te gösterilen kaynak parametreleri ile AVISO 350 DC (W) marka kaynak makinesi ve saf argon gaz kullanılarak 4 pasoda gerçekleştirildi (Şekil 3.9). Kaynaklı plakalar oda sıcaklığında (22 °C) soğutuldu. Bu soğuma 300 × 55 × 10 mm plakada yaklaşık 70 dk sürdü. Farklı metallerin kaynağının mekanik ve mikroyapısal olarak araştırma metodolojisi için gerekli numunelerin hazırlanması Şekil 3.11'de görülmektedir. Mekanik ve mikroyapı inceleme numuneleri kaynak edilmiş ve edilmemiş plakalardan tel erezyon yöntemi ile kesildi (Şekil 3.12). Çekme, eğme, tokluk ve mikroyapı numunelerinin Charmilles marka, Robofil 290 model ile 4 mm/dk hız ve saf

su ve 0.30 mm - 900 N/mm^2 EDM tel erezyon yöntemi ile kesilmesi Şekil 3.13'de gösterilmektedir. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş eğme ve çekme numuneleri Şekil 3.14'te gösterilmektedir. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş tokluk numuneleri Şekil 3.15'te, ana metallerin çekme, eğme, tokluk ve optik numuneleri Şekil 3.16'da sunulmuştur. Kesilmiş numunelerin kaynakları Vouga marka bir freze tezgahı ile temizlendi (Şekil 3.17). Kaynakları frezede temizlenmiş eğme, çekme ve tokluk numunelerinin görüntüleri Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da gösterilmektedir. Çekme testleri ASTM A370 standardına göre ALŞA marka test cihazı ile 2 mm/dk çekme hızında üçer adet tekrarlı olarak esas metaller, enine ve boyuna kaynaklı numuneler için gerçekleştirildi (Şekil 3.20). 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 cihaz ile yapılmıştır. 6 farklı numune için 3'er tekrarlı eğme 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 30 mm/dk test hızında (mandreller arası 60 mm) ALŞA test cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.20). Charpy V-çentik darbe testi ISO 9016'ya göre 55 × 10 × 10 mm^3 boyutlarında test numuneleri ile (Marka: Zwick/Roell RKP 450) oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Deney 5 farklı konum için: 2 ana metal, 2 ITAB ve kaynak merkezi için gerçekleştirildi (Şekil 3.21). Kaynak parçasının mikroyapı incelemesi bir metal mikroskop (Marka: Olympus CX41 ışık mikroskobu) kullanılarak 304L, S355J2C+N ve kaynaklı bölgeden gerçekleştirilmiştir. Spectrotest marka TXC35 model portatif metal analiz cihazı ile elementel ölçüm yapıldı (Şekil 3.22).

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

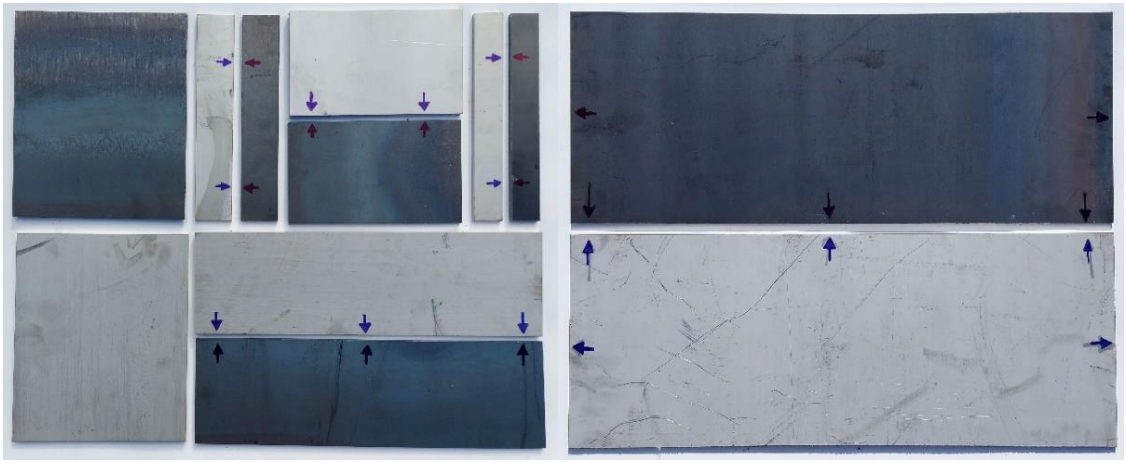
Malzeme	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
S355J2C+N	0.20	1.60	0.25	0.24	-	-	0.035	0.032	Kalan
304L	0.03	2	0.75	17.5-19.5	8-10	-	0.045	0.03	Kalan
ER309L	0.03	1.70	0.45	24	13	0,15	(P+S: <0.035)		Kalan

Çizelge 3.2. İki ana malzemenin mekanik özellikleri.

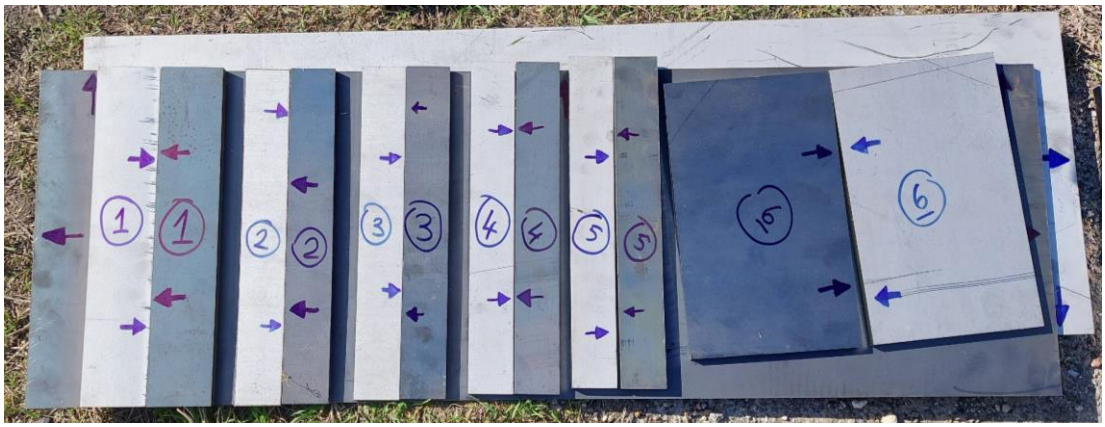
Mekanik özellikler	S355J2C+N	304L	ER309L kaynak teli
Akma mukavemeti (MPa)	381 ± 55	210	410
Çekme mukavemeti (MPa)	595 ±55	564	590
% Uzama	22 ± 3	58	35
Elastik modülü N/mm^2	200000	193	200000
Charpy V-Notch darbe tokluğu (J)	27 (-20 °C)	216	100 (+20°C)

Çizelge 3.3. Kaynak parametreleri.

Kaynak prosesi	TIG kaynağı
Koruyucu gaz	Saf argon
Kaynak teli	ER309L (3.2 mm)
Kaynak akımı (A)	130
Kaynak voltajı (V)	24
Kaynak hızı (mm/min)	200



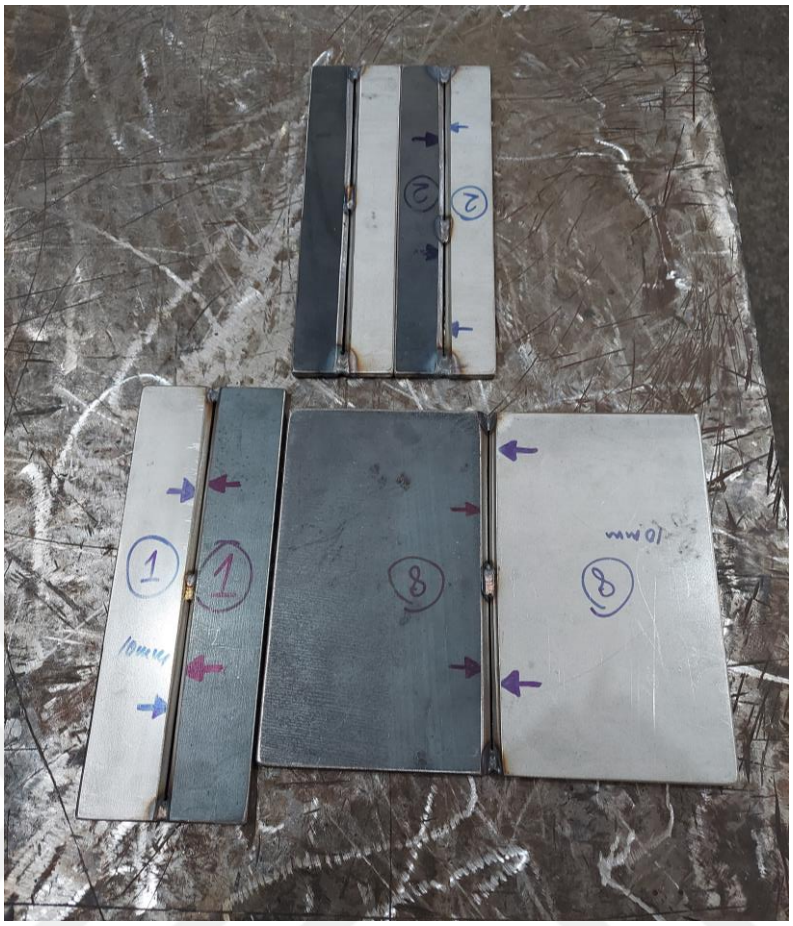
Şekil 3.1. Kaynak işlemi için hazırlanmış olan S355J2C+N ve 304L plakalar.



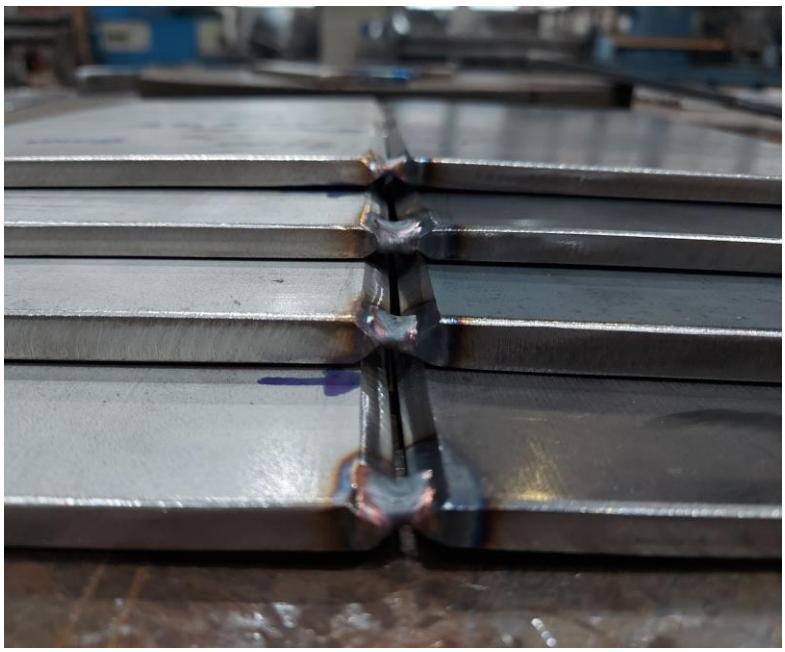
Şekil 3.2. Kaynaklanacak olan S355J2C+N ve 304L plakaların numaralandırılması.



Şekil 3.3. 304L ve S355J2C+N çeliklerine X kaynak ağzı açma işlemi.



Şekil 3.4. 304L ve S355J2C+N çelik plakaların puntalama işlemi.

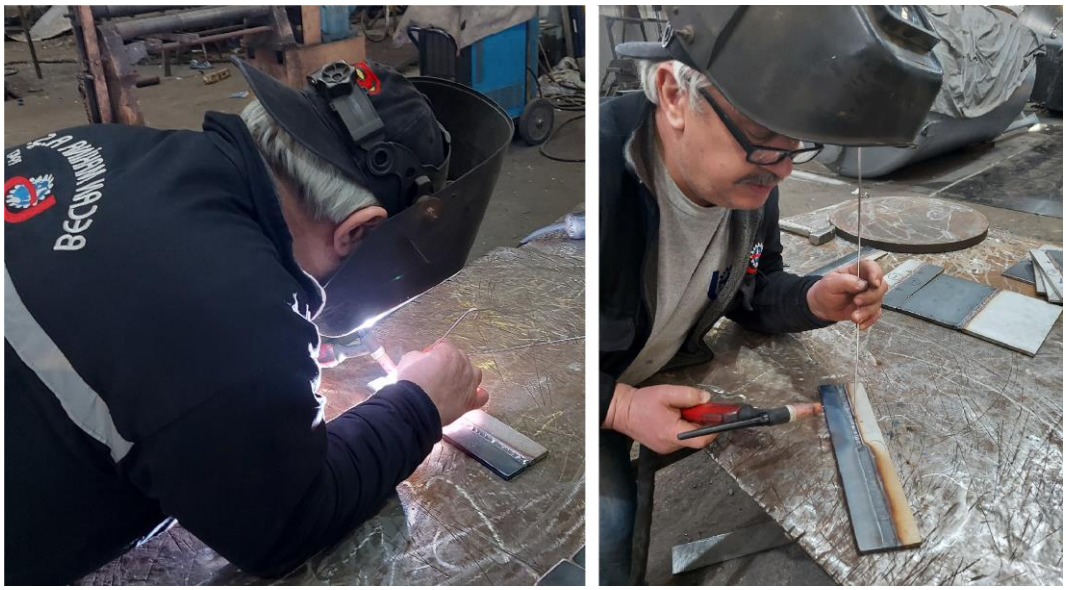


Şekil 3.5. 304L ve S355J2C+N çelik plakaların puntalama işlem kesiti.



Şekil 3.6. Puntalanmış 304L ve S355J2C+N çelik plakalar.

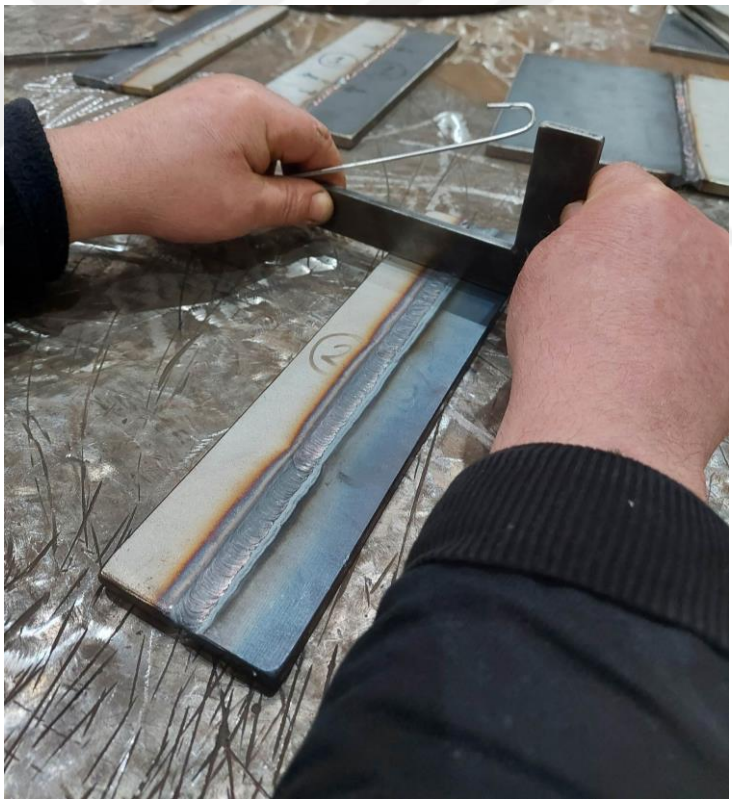
Kaynak işlemi tecrübeli bir usta tarafından manuel olarak gerçekleştirildi. Bu işlemde alın bölgesindeki mesafe 3 mm'dir. Sacların sabitlenmesi ve sabit bir ilerleme hızında 4 paso kaynak işlemi çift taraflı olarak gerçekleştirildi. Gaz basıncı kapalı ortam olduğundan 8 bar olarak tercih edildi ve 12 litre/dk debide gaz akışıyla kaynak işlemi gerçekleştirildi. Şekil 3.9'da kaynağı tamamlanmış bir plakada kaynak çizgisi ve oluşturulan kaynağın başarısı net biçimde görülmektedir.



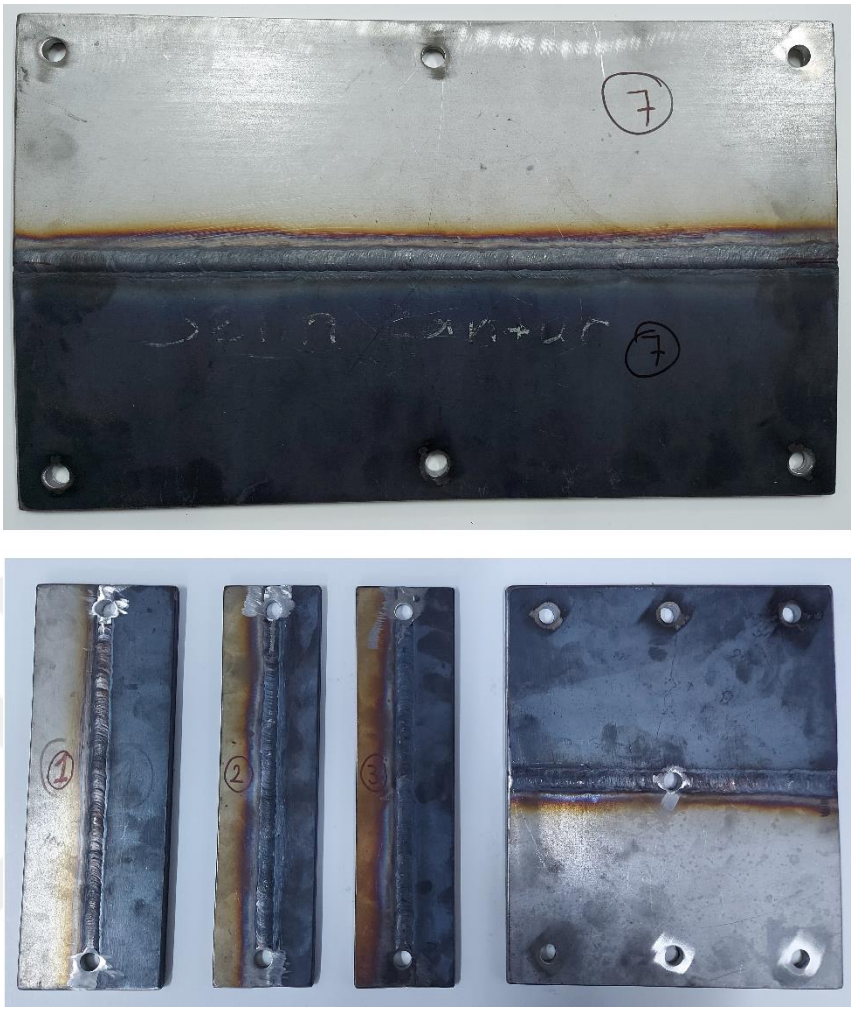
Şekil 3.7. S355J2C+N ve 304L sac plakaların TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesi.



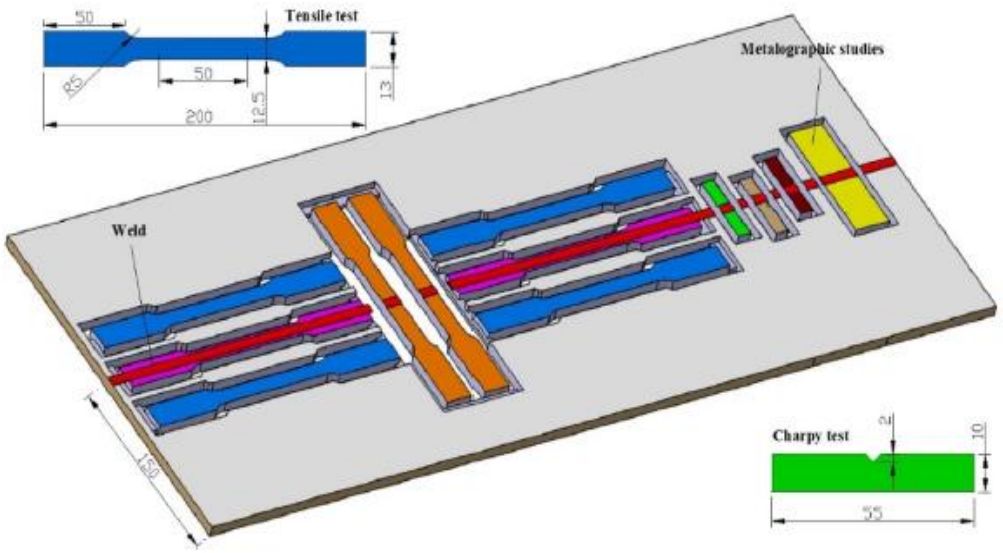
Şekil 3.8. S355J2C+N ve 304L sac plakaların ER309L elektrot ile kaynaklı birleşimi



Şekil 3.9. S355J2C+N ve 304L sac plakaların ER309L elektrot ile kaynaklı birleşiminin kontrolü.



Şekil 3.10. S355J2C+N ve 304L sac plakaların ER309L elektrot ile kaynaklı birleşimi.

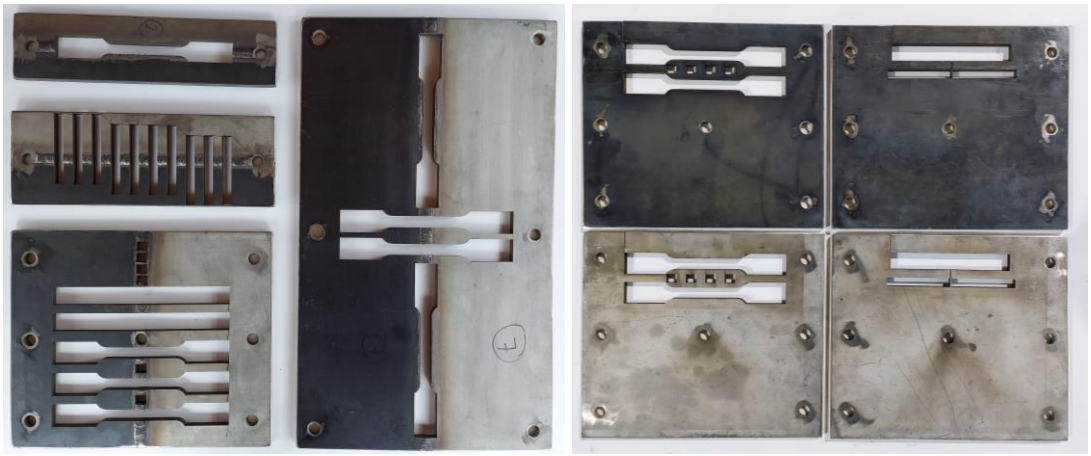


Şekil 3.11. Numune kesim şematik gösterimi.

Tel erezyon yönteminde numuneler saf su içerisinde konumlandırılmakta ve pirinç bir tel ile kesim işlemi yapılmaktadır. Tel bir bobinden temin edilmektedir. Şekil 3.12 - 3.16 da görüleceği üzere numuneler tel erezyon yöntemi ile kesildi.



Şekil 3.12. Tel erezyon cihazı (Charmilles, Robofil 290).



Şekil 3.13. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş eğme, çekme, tokluk ve optik inceleme numunelerine ait plakalar.



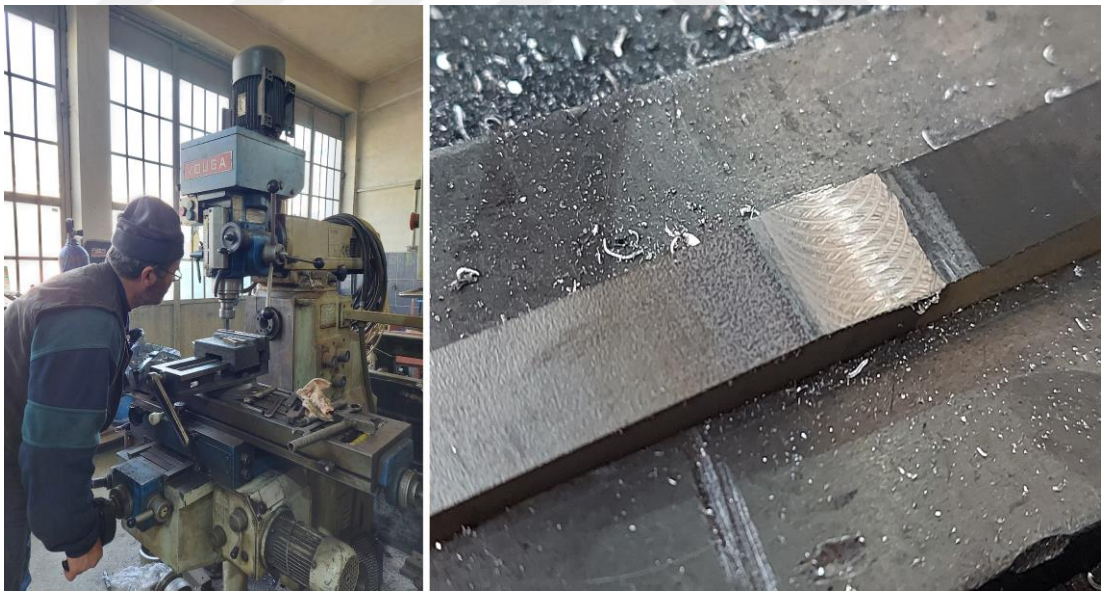
Şekil 3.14. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş eğme ve çekme numuneleri.



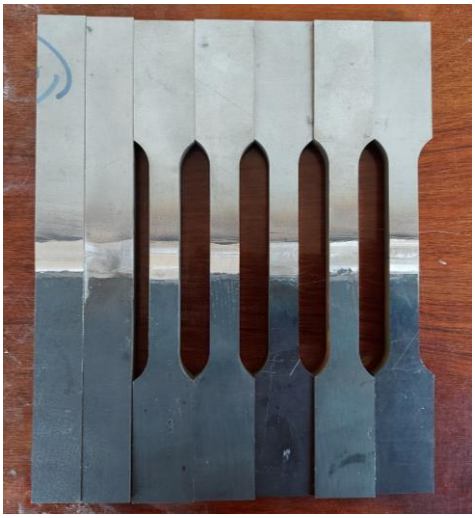
Şekil 3.15. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş tokluk numuneleri.



Şekil 3.16. Tel erezyon yöntemi ile kesilmiş optik inceleme ve mekanik deney numuneleri.



Şekil 3.17. Kesilen kaynak numunelerinin freze tezgahında düzenlenmesi.



Şekil 3.18. Freze tezgahında kaynakları düzenlenmiş eğme ve çekme numuneleri.



Şekil 3.19. Freze tezgahında kaynakları düzenlenmiş tokluk numuneleri.



Şekil 3.20.Çekme ve eğme deney cihazı (ALŞA 30t).



Şekil 3.21. Charpy deney cihazı (Zwick/Roell RKP 450).



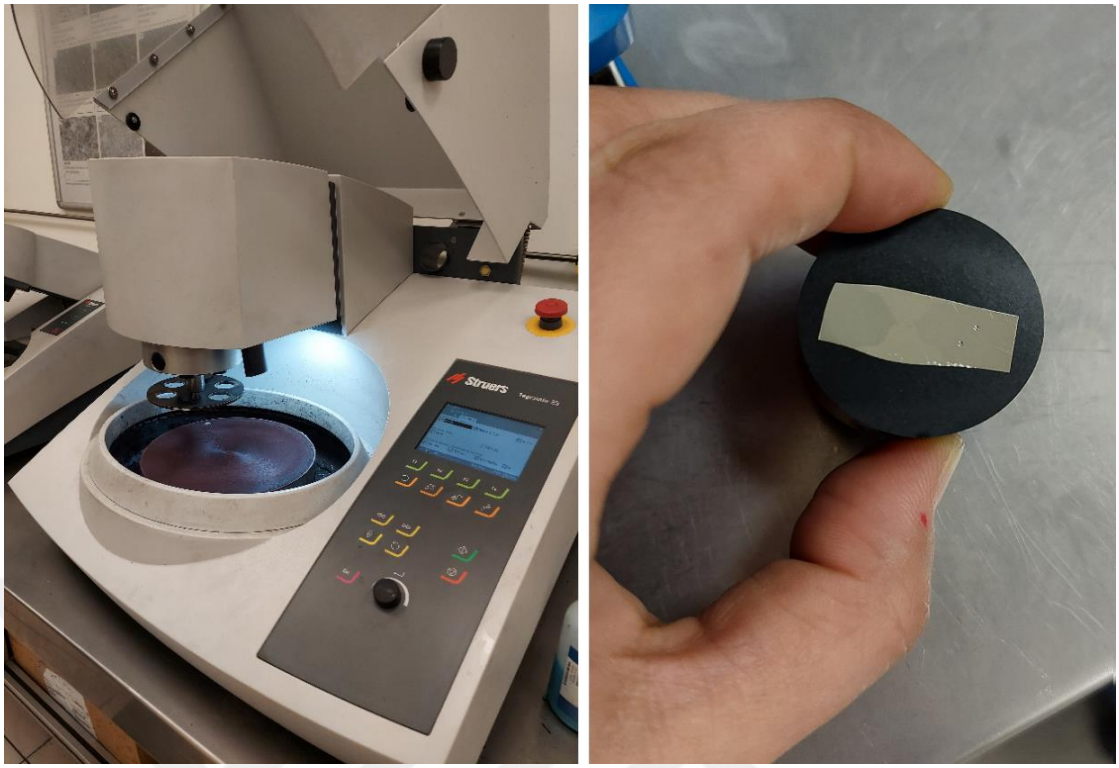
Şekil 3.22. Spektrometre cihazı ile ölçüm (Spectrotest TXC35 model portatif metal analiz cihazı).

Metalurjik inceleme için Struer marka discotom-100 model elmas kesicili hassas kesme cihazı ile bakalit cihazına sığacak biçimde numuneler kesilerek (Şekil 3.23) Struer marka CitoPress-5 model cihaz ile bakalitlerde numuneler hazırlandı. Zımparalama işlemi Struer marka Tegramin 25 model zımparalama ve parlatma cihazı kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 3.24). 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

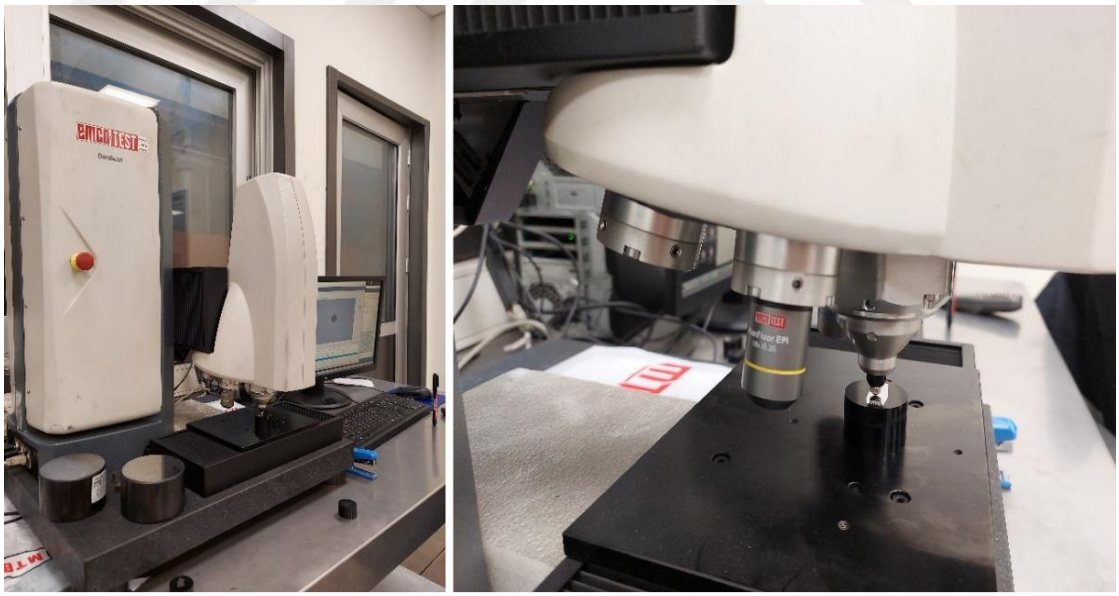
parlatma yapıldı ve yıkama işlemi yapıldı. Zımpara: MD-Dac, DiaDuo-2 3µm ile 4:30 dakika 35 N baskı kuvveti ve 150 rpm hızda gerçekleştirildi. Son olarak, zımpara: MD-Nap, DiaDuo -2 1 µm 2:30 dakika 30 N baskı kuvveti uygulanarak 150 rpm hızda parlatma işlemi gerçekleştirildi (Şekil 3.24). Ana metaller 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 S355J2C+N %3 nital (97 ml etanol + 3 nitrik asit) dağlama solüsyonu ile 15 saniye dağlandı. S304L ise viella ile dağlandı. Sertlik ölçüm cihazı ve kaynak bölgesinin şematik görünümü Şekil 3.25' te görülmektedir. Mikrosertlik testi sırasında, yük ve bekleme süresi sırasıyla 100 g (0.98 N) ve 5 s'de tutuldu. Bakalite alınmış numuneler bir otomatik mikrosertlik test cihazı (Make: Struers Emco-test DuraScan G5) kullanılarak sertlik numunesinin 0.6 mm aralık ile yatay, 0.5 mm aralık ile dikey sertlik ölçümü yapıldı (Şekil 3.26). Ana metal, ITAB ve kaynak bölgesinin sertlik değerleri 3 tekrarlı olarak ölçüldü.



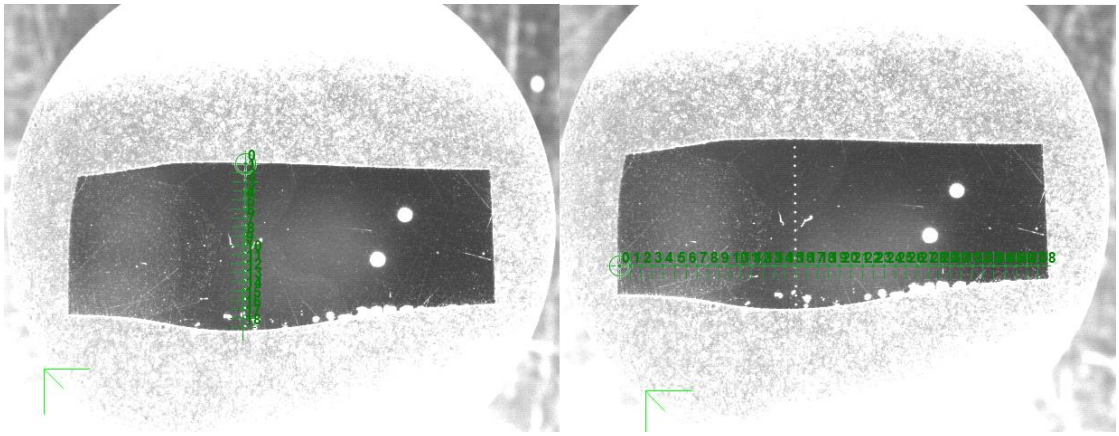
Şekil 3.23. Optik inceleme numunelerinin kesim işlemi.



Şekil 3.24. Bakalite alınmış kaynak kesitinin zımparalama ve parlatma işlemi.



Şekil 3.25. Sertlik ölçüm cihazı (UTS TRİBOMETER T10) ve sertlik ölçümü.



Şekil 3.26. Sertlik ölçümü a) 0.5 mm aralık ile dikey, b) 0.6 mm aralık ile yatay sertlik ölçümü (Sertlik ölçüm grafiğinde belirtilen konumlar bu görsellerden takip edilebilir).

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

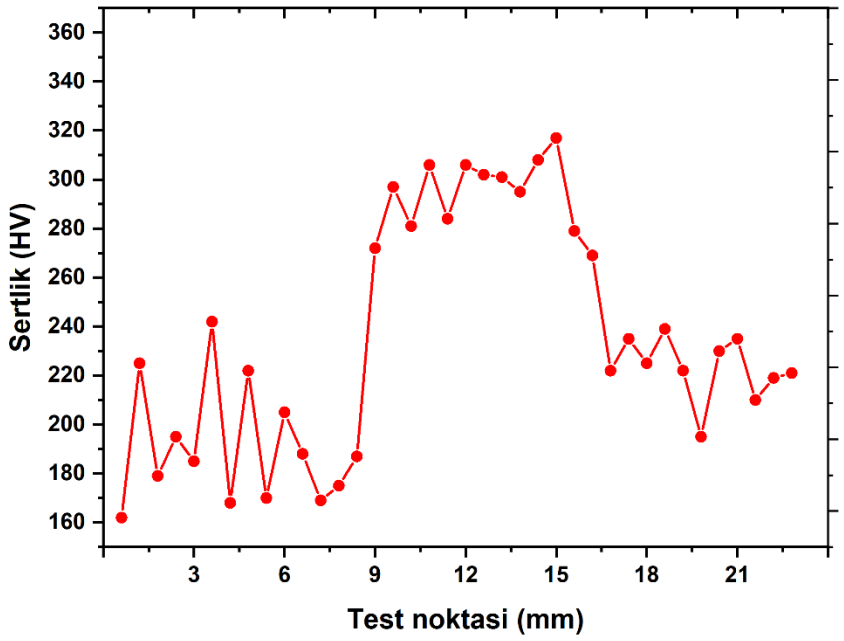
SONUÇLAR

TIG kaynak yöntemi ile S304L ve S355J2C+N uygulanan prosedür ile başarılı biçimde birleştirildi. Bu birleşime ait mekanik ve mikroyapısal olarak gerçekleştirilen kapsamlı testlerin sonuçları aşağıda sunuldu.

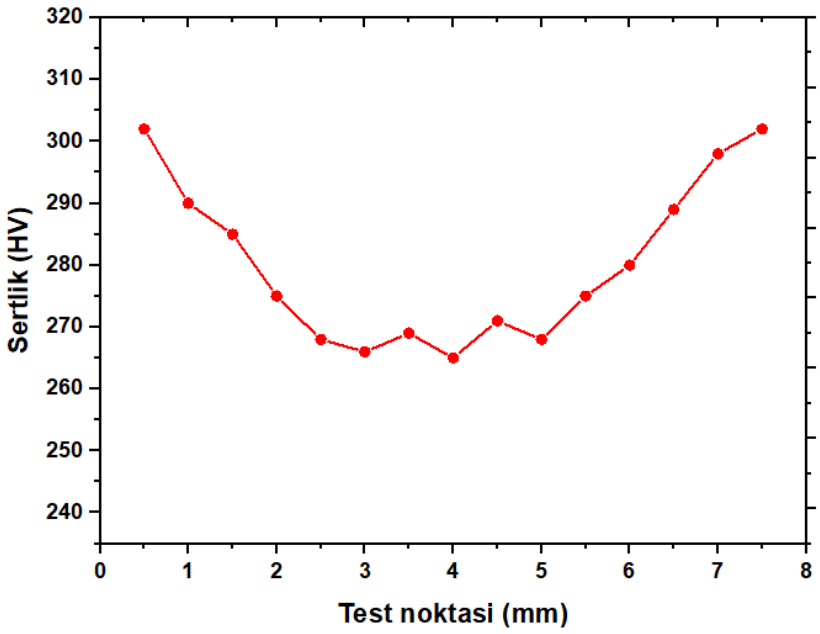
4.1. Mekanik Testler

4.1.1. Mikrosertlik

Mikrosertlik ölçümleri, TIG ile kaynaklanmış 304L 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, kaynağı gerçekleştirilen iki farklı malzemenin sertlik ölçümleri gerçekleştirildiğinde maksimum sertlik değerleri 304L için ~279 ± 12 HV ve S355J2C+N için maksimum ~242± 12 HV olarak tespit edildi. Ortalama sertlik değerleri ise 304L için ~222± 10 HV'dir. S355J2C+N ana metalin sertliği yaklaşık ~187 ± 10 HV'dir. Kaynak merkezinin sertlik değeri ise ~302 ± 10 HV olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.1. Enine kaynaklı numunenin yatay sertlik ölçümü (HV0.1) (Ölçüm konumu Şekil 3.26'te görülebilir).



Şekil 4.2. Enine kaynaklı numunenin dikey sertlik ölçümü (HV0.1) (Ölçüm konumu Şekil 3.26'te görülebilir).

4.1.2. Çekme Deneyi

Gerçekleştirilen çekme deneyleri ile 304L ve S355J2C+N malzemeleri için akma dayanımı sırasıyla 322.66 ± 13 ve 360 ± 8 MPa olarak elde edilmiştir. Boyuna kaynaklanmış numunelerin akma ve çekme dayanımları sırasıyla 545.70 ± 10 ve 601.29 ± 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 edilmiştir. Optik makro incelemede 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 ve eğme 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
1	322.66 ± 13	611.46 ± 14	66.2 ± 2	304L	-
2	360.26 ± 8	551.96 ± 9	41.1 ± 2	S355J2C+N	-
3	403.79 ± 8	534.88 ± 10	41.1 ± 2	Enine	S355J2C+N ITAB
4	351.25 ± 10	492.44 ± 10	32 ± 2	Enine	S355J2C+N
5	545.70± 11	601.29 ± 15	43.9 ± 2	Boyuna	-
6	460.94 ± 10	578.88 ± 15	43.1 ± 2	Boyuna	-

4.1.3. Eğme Testleri

Gerçekleştirilen 180° eğme testlerinde 304L ve S355J2C+N malzemeleri için sırasıyla elde edilen maksimum eğme kuvvetleri 27.175 ± 4 ve 28.48 ± 2 kN olarak tespit edildi (Şekil 4.5). Boyuna ve enine kaynaklı numunelerin eğilme testlerinde uygulanan maksimum kuvvet sırasıyla yaklaşık olarak 31.38 ± 2 ve 28.245 ± 2 kN olarak ölçüldü.

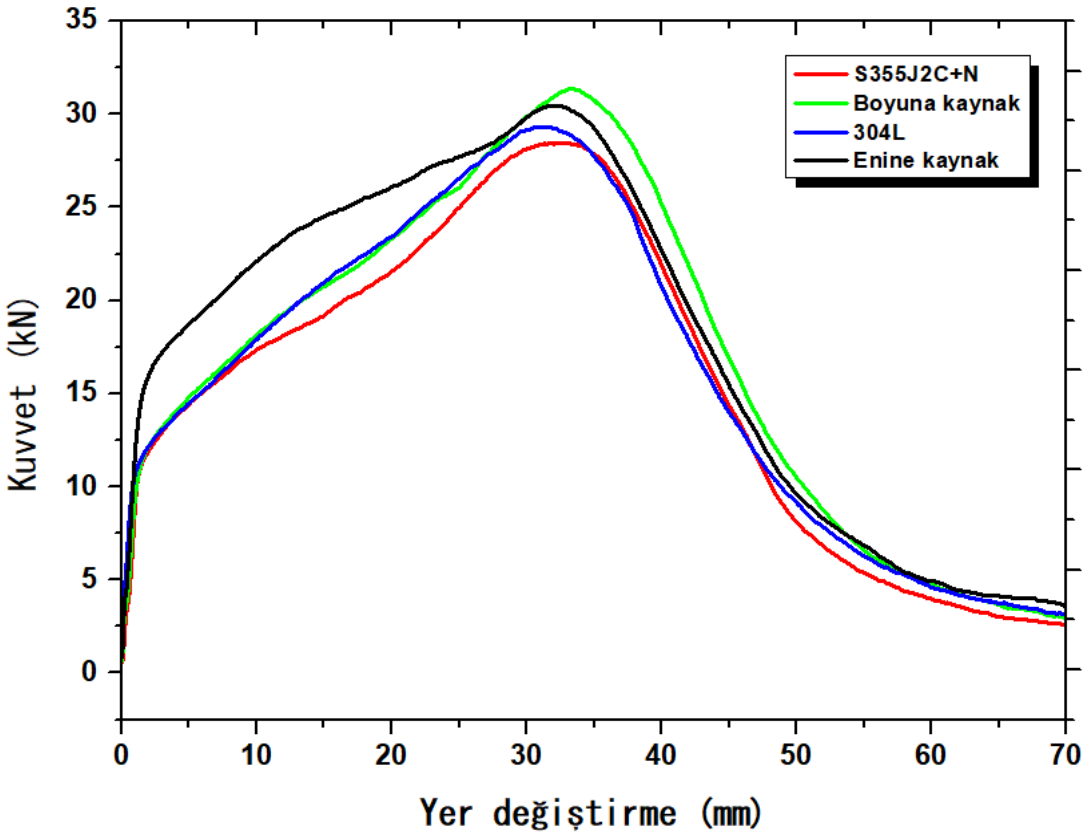
Eğme testi sonucunda maksimum kuvvet – deformasyon değerleri Çizelge 4.2' de gösterilmektedir. 180° eğme deneyi sonuçlarına göre, enine kaynaklı numunelerin eğilme mukavemeti, boyuna kaynaklı numunelerden daha azdı. Eğilme testinde kaynak bağlantısında görünür bir kusur meydana gelmedi. Ancak esas metaller ile kaynak hattında ve kaynak yüzeyinde plastik deformasyona bağlı mikro boşluklar tespit edildi. Bu 180 derecelik eğme sonrası elde edilen yapıda sızdırmazlık bakımından her hangi bir sorun olmayacağı, ancak dinamik yüklemede hasar için pürüzlülük ve bir miktar çentik etkisi yaratabileceği değerlendirilebilir. 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) 304L, e-f) Boyuna kaynak birleşimi g-h) Enine kaynak birleşimi.

Çizelge 4.2. Eğme deneyi sonuçları.

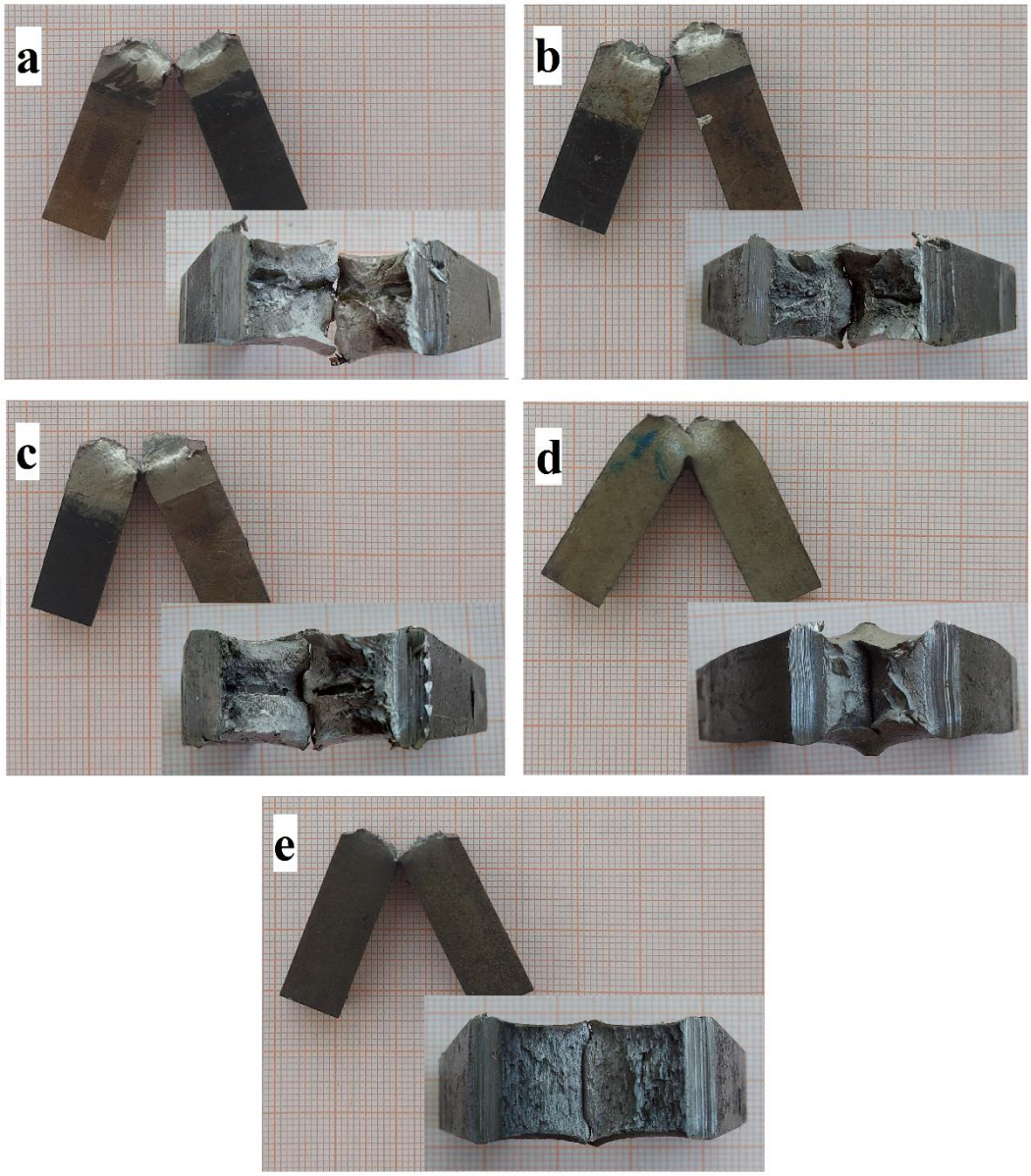
Numune No	Açıklama	Maksimum kuvvet (kN)	Deformasyon (mm)	Numune ölçüleri (mm)
1	S355J2C+N	28.480 ± 2	70	200 × 20 × 10
2	304L	27.175 ± 4	70	200 × 20 × 10
3	Boyuna kaynaklı	31.380 ± 2	70	200 × 20 × 10
4	Enine kaynaklı	28.245 ± 2	70	200 × 20 × 10



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 (22 ℃) Çizelge 4.3' de verilmiştir. 304L ana metalinin darbe tokluğu oda sıcaklığında ortalama 302.52 ± 5.02 J olarak ve S355J2C+N çeliğinin darbe tokluğu oda sıcaklığında ortalama 60.68 ± 3.40 J olarak bulunmuştur. TIG kaynaklı kaynak merkezindeki metalin tokluğu oda sıcaklığında sırasıyla 94.16 ± 16.30 J idi. 304L ITAB ve S355J2C+N ITAB'da oda sıcaklığında sırasıyla yaklaşık 100.84 ± 18.12 J ve 130.99 ± 7.87 J gözlendi. Şekil 4.7, darbe çentiği testinden sonra numunelerin kopma yüzeyini göstermektedir.



Şekil 4.7. Charpy çentik darbe deneyi sonuçları a) Enine kaynaklı numune b) 304L ITAB c) S355J2C+N ITAB d) 304L e) S355J2C+N.

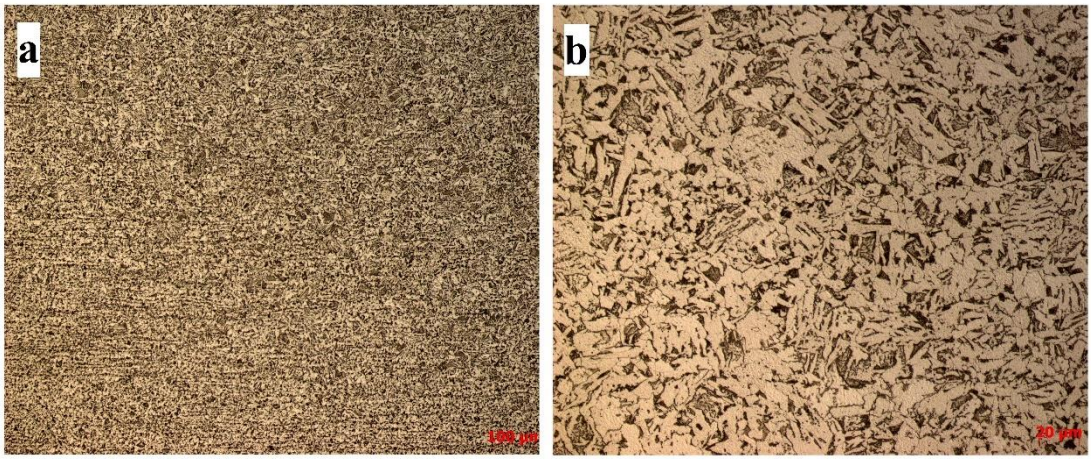
Çizelge 4.3. Charpy V-Notch darbe deneyi sonuçları.

No	Numune Tanımı	Numune boyutları (mm^3)	Darbe enerjisi (J)	Darbe enerjisi ortalama (J)
1	Kaynak bölgesi merkez	10×10×55	76.93 109.34 96.22	94.16 ± 16.30
2	304L kaynak ITAB	10×10×55	120.12 98.24 84.16	100.84 ± 18.12
3	S355J2C+N kaynak ITAB	10×10×55	123.95 129.53 139.50	130.99 ± 7.87
4	304L ana metal	10×10×55	306.08 300.18 298.97	301.74 ± 3.80
5	S355J2C+N ana metal	10×10×55	58.27 63.09 60.16	60.51 ± 2.42

4.2. Metalografik Deneyler

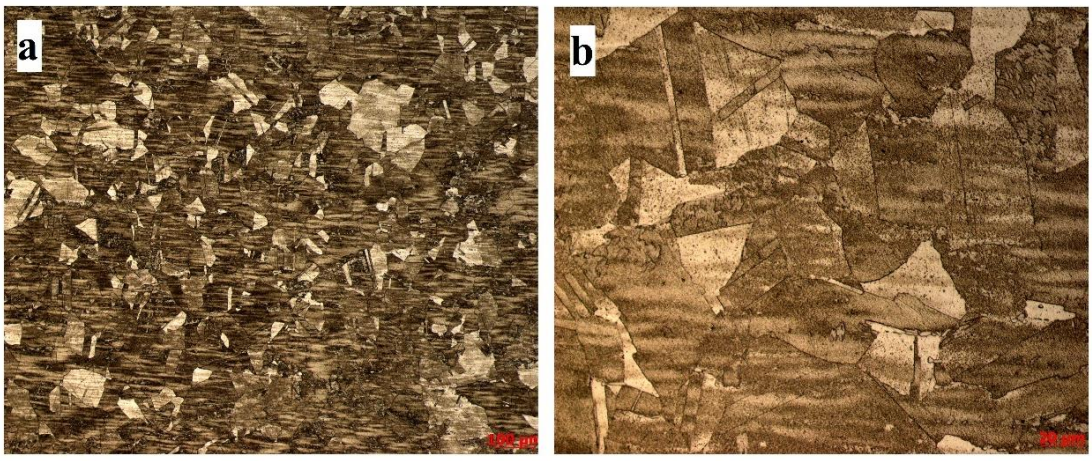
4.2.1. Optik Görüntüler

Optik görüntüleme işlemi 5x, 10x ve 50x büyütmede 304L, S355J2C+N, ITAB bölgesi ve kaynak merkezinde gerçekleştirildi. Şekil 4.8'de S355J2C+N çeliğine ait optik mikroskop yardımıyla elde edilen mikroyapısı 10x ve 50x büyütmede alfa ferrit fazı ve 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 ana malzemesinin mikroyapısının içerisinde ferrit ve perlit fazlarının homojen bir şekilde dağıldığı 10x ve 50x büyütmede net bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.8). Tane boyutu yaklaşık olarak 5.35 ± 1 μm olarak ölçülmüştür.



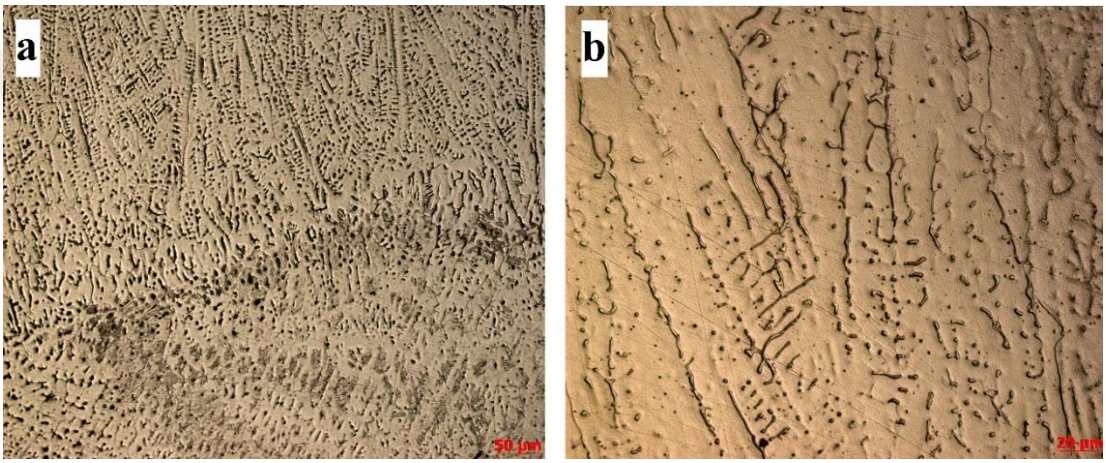
Şekil 4.8. S355J2C+N karbonlu çeliğinin a) 10x büyütmede ve b) 50x büyütmede optik görüntüsü.

304L paslanmaz ana metaline ait görüntüler Şekil 4.9'te yer almaktadır. Östenit fazı demir karbon diyagramında 912 °C ile 1394 °C arasındaki yüzey merkezli kübik yapıdaki fazdır. Bu görüntülerde 304L'nin mikroyapısının tamamen östenit fazı içerdiği tespit edildi. Östenit fazı çeliğin oda sıcaklığında stabil veya metastabil yapıda bulunduğu tek fazdır (Baran, 2006). Çeliğin içeriğinde minumum %8 nikel alaşımı bulunduğunda bu östenitik çelik oda sıcaklığına soğutulduğunda yapıda yine sadece östenit fazı bulunur ve böylece bu mikroyapı korunur. Bir östenit konfigürasyonunda moleküller ferrit fazına göre daha yoğun bir şekilde paketlenir ve paslanmaz çeliklerin ortak bir mikroyapısıdır. 304L paslanmaz çeliğinin tane boyutu yaklaşık olarak 35 ± 5 µm olarak tespit edilmiştir.

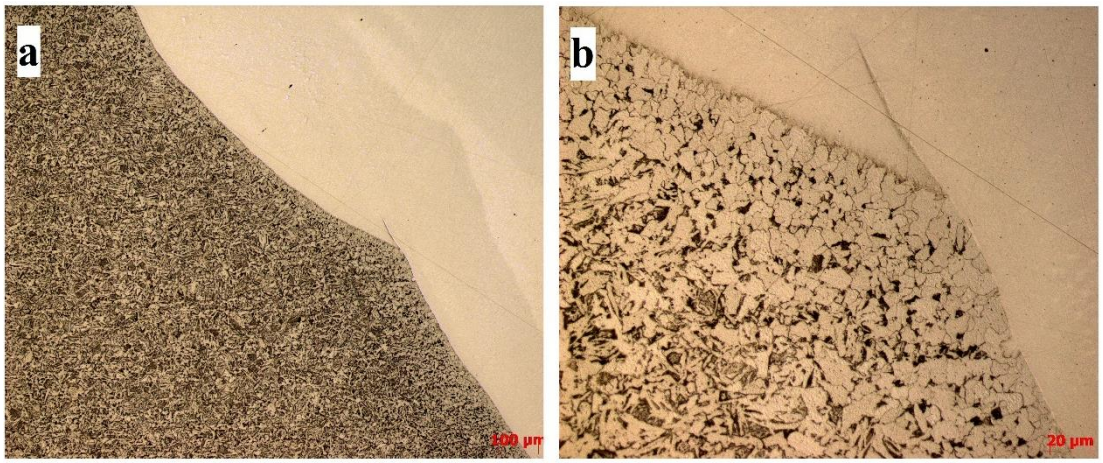


Şekil 4.9. 304L paslanmaz çeliğinin 10x ve 50x büyütmede optik görüntüsü.

TIG kaynağı ile birleştirilmiş 304L ve S355J2C+N çeliklerinin kaynak merkezi mikroyapısında asiküler ferrit ve tane sınırı ferritlere de rastlanmaktadır (Şekil 4.10). İnce iğne benzeri vermiform bir yapıya benzer tamamen delta ferrit yapısı gözlenmiştir. Kaynaklanmış numunelerin kaynak merkezi mikroyapı görüntüleri tipik bir kaynak metali görünümüne sahip olup delta ferrit görülmektedir ve iğnemsi bir yapıya sahiptir. Kaynak bölgesi hızlı soğumanın etkisi ile delta ferrit bir yapıdan oluşmuş ve kaynak bölgesinde 20X ve 50X büyütmede herhangi bir mikroyapı kusuru gözlenmeyip kaynak başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.



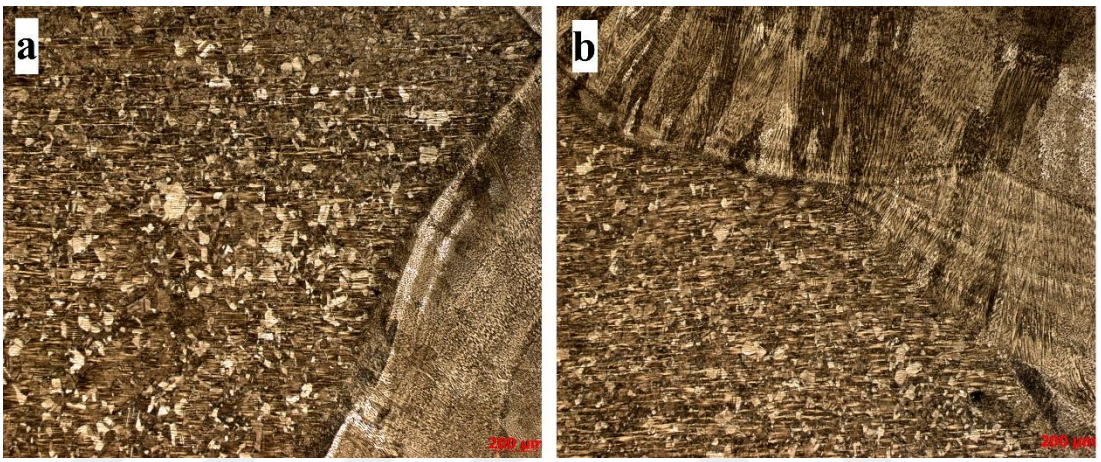
Şekil 4.10. Kaynak bölgesinin a) 20X ve b) 50X büyütmede optik görüntüsü.



Şekil 4.11. S355J2C+N ITAB 10X ve 50X büyütmede optik görüntüsü.

Şekil 4.11 a ve b'de S355J2C+N çeliğinin ısı tesiri altında kalan bölgesinin 10X ve 50X büyütmede mikroyapısı görülmektedir. Özellikle geçiş bölgesinde tane irileşmeleri olmaktadır. Mikroyapılar daha önceki çalışmalar ile uyumludur (Mayr vd., 2010). S355J2C+N ısı tesiri altında kalan bölgesinde ana metale göre tane boyutlarının küçüldüğü görülmektedir.

Şekil 4.12'de 304L ITAB bölgesinin 5X büyütmede optik mikroyapısı görülmektedir. Özellikle geçiş bölgesinde tanelerin küçüldüğü görülmektedir.

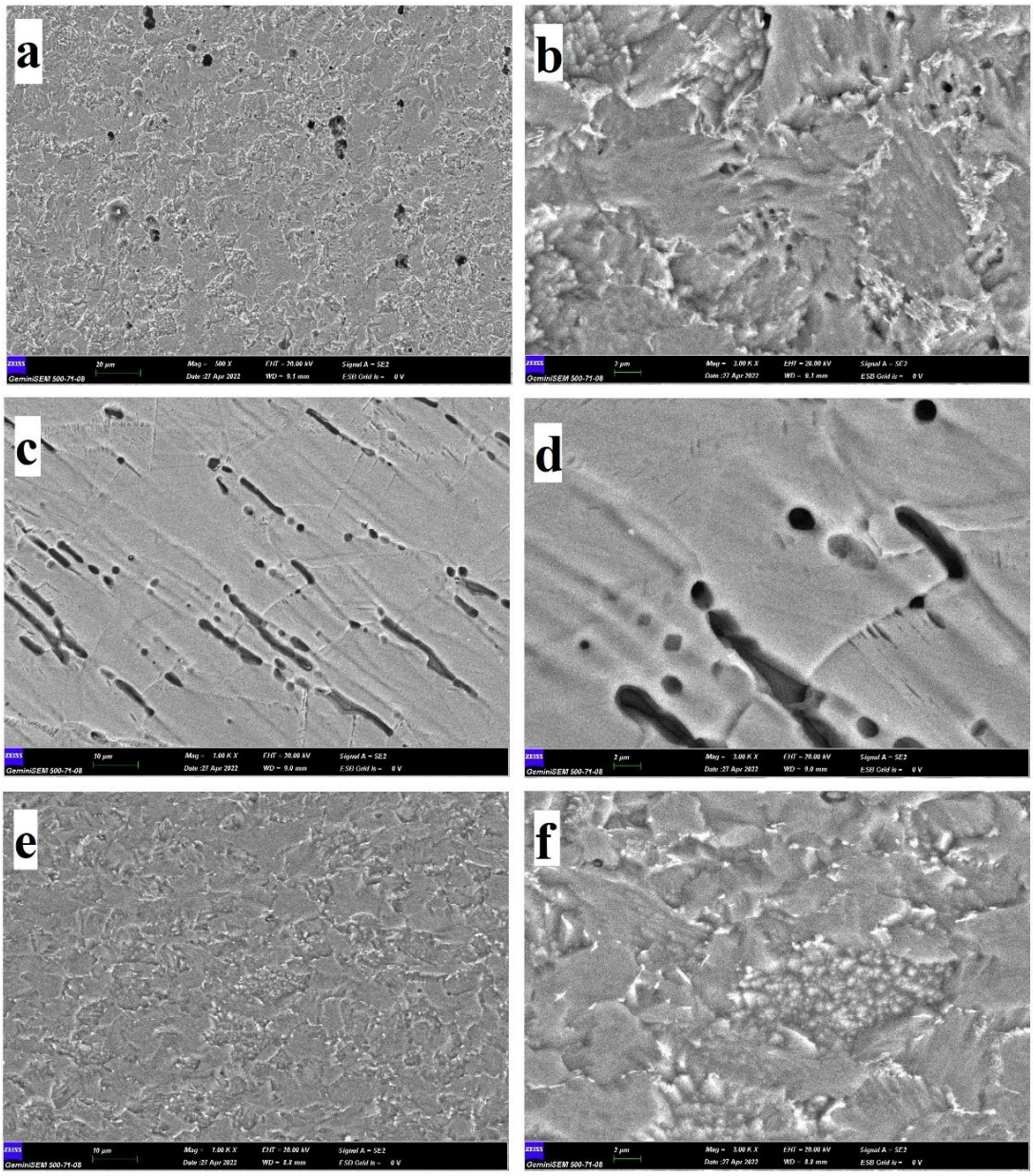


Şekil 4.12. 304L ITAB 5X büyütmede optik görüntüleri.

4.2.2. FESEM ve EDX Analizi

Bu çalışmada farklı 304L paslanmaz çelik ve S355J2C+N karbon çelikleri TIG kaynağı ile birleştirilmiştir. Birleştirilen numunelerden ana metallere ve kaynak bölgesinden alınan numunelere FESEM (Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu) ve EDX analizleri uygulanmıştır. Şekil 4.13'te gösterilen FESEM mikrografları, mikroyapısal fazların net bir morfolojisini göstermektedir. Şekil 4.13 a ve b'da gösterilen FESEM mikroyapı analizi sonucunda 304L paslanmaz çeliğinin östenitik yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir (Jafarzadegan vd., 2013). Bununla birlikte, 304L paslanmaz çeliğin FESEM görüntülerinde östenit yapı görülmektedir ve optik görüntülerle uyumludur. Şekil 4.13 c ve d'de kaynak bölgesinin FESEM görüntüsü sunulmaktadır. Bu kaotik yapı ve merceksi taneler delta ferrit ve östenit varlığını gösterir ve tipik bir kaynak metalinin dendritik morfolojik yapısı gösterilmektedir (Mayr vd., 2010). Çeliğin yapısında bulunan delta ferrit katılaşma süresinde ilk katılaşan yapıdır ve bu yapının en

önemli özelliği ise sıcak çatlakları önlemesidir (Wegrzyn, 1992). Çeliğin yapısındaki bu delta ferrit oranının belirlenmesinde öncelikle krom ve nikel oranları (eşdeğerlikleri) önemli rol oynamaktadır (Şirvanlı, 2021). 304L paslanmaz çeliğin kaynak bölgesinin SEM görüntüsünde delta ferrit oluşumu gözlenmektedir. YMK yapısına sahip malzemelerde darbe tokluğu test sıcaklığına bağlı olarak çok fazla değişmese de kaynak metalinde yüksek oranda (%9>) delta-ferrit bulunması tokluk değerinin düşmesine neden olur (Tümer ve Yılmaz, 2016). S355J2C+N ana metalinin ferritik ve perlitik FESEM morfolojisi Şekil 4.13 e ve f'de gösterilmektedir. S355J2C+N ana malzemesinde FESEM mikroyapısı ferrit ve perlit fazlarından meydana gelmektedir. Bazı bölgelerde perlitin içerisindeki sementit küreselleşmiş ve kabalaşmıştır.



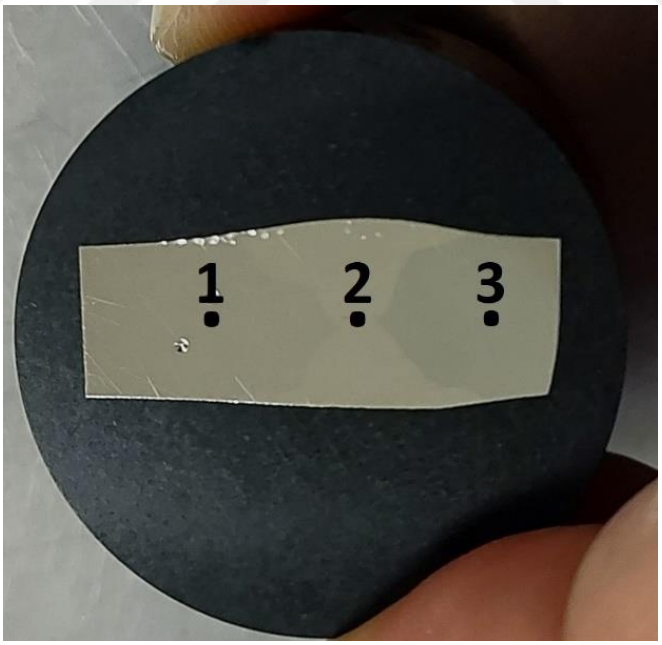
Şekil 4.13. 1.00Kx ve 3.00Kx büyütmede FESEM görüntüleri a-b) 304L paslanmaz çelik ana metali, c-d) Kaynak bölgesi, e-f) S355J2CN ana metali.

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. Çizelge 4.4'te, Şekil 4.14'e işaretlenen 1,2 ve 3 numaralı bölgelere ait EDS analizi sonuçları sunulmuştur. Fe, C ve Mn elementlerinin haritalanması, bu elementlerin yüzey katmanlarındaki dağılımını araştırmak için yapıldı. Şekil 4.15'te 304L paslanmaz çeliğinin EDX analizi kullanılarak yapılan sonuçlarında Si (atomic. %0.45), Cr (atomic.

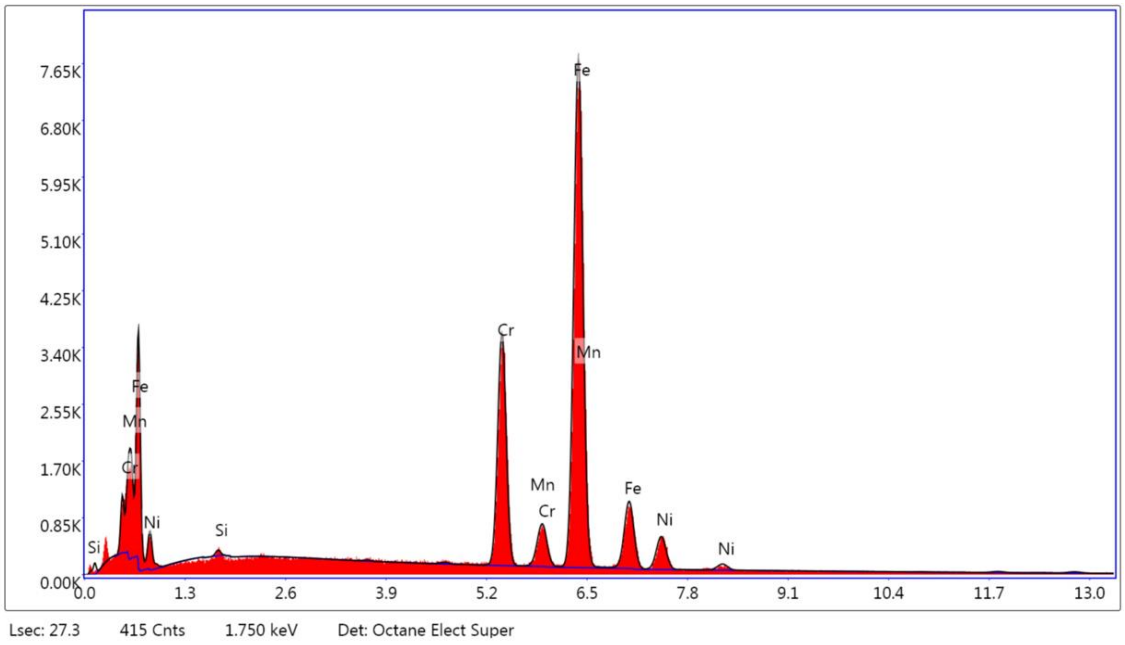
%22.37), ve Mn (atomic. %1.72), Fe (atomic. %69.21), Ni (atomic. %6.25) elementleri gözlenmiştir. Bu EDS analiz sonuçları (Kumar ve Sinha, 2019) ve (Abuç, 2006) ile uyumludur. Şekil 4.16'de kaynak merkezinin EDX analizi kullanılarak yapılan kaynak bölgesi sonuçlarında Si (atomic. %0.77), Cr (atomic. %22.57), Mn (atomic. %1,65) ve Fe (wt. %68.47), Ni (atomic. %6.53) elementleri gözlenmiştir. Şekil 4.17'da S355J2C+N ana metalinin EDX analizi kullanılarak yapılan kaynak bölgesi sonuçlarında Mn (atomic. %1.31) ve Fe (atomic. %98.69) elementleri gözlenmiştir.

Çizelge 4.4. 1,2, ve 3 numaralı noktalara ait EDS analizinin sonuçları.

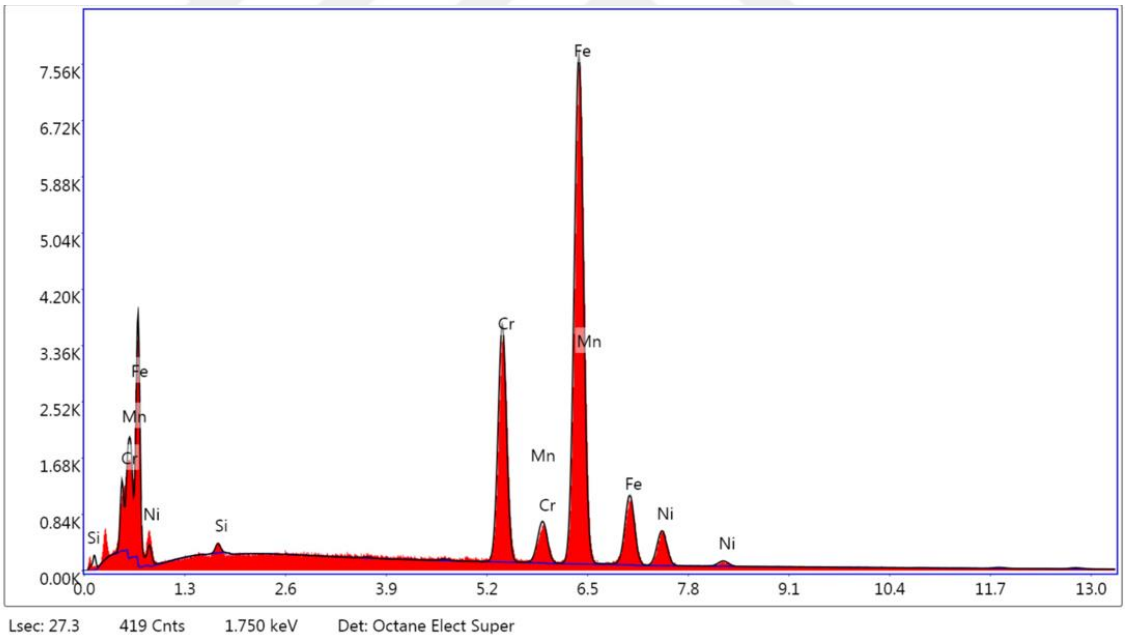
		% Atomik				
		Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	304L	0.45	22.37	1.72	69.21	6.25
2	Kaynak bölgesi	0.77	22.57	1.65	68.47	6.53
3	S355J2C+N	-	-	1.31	98.69	-



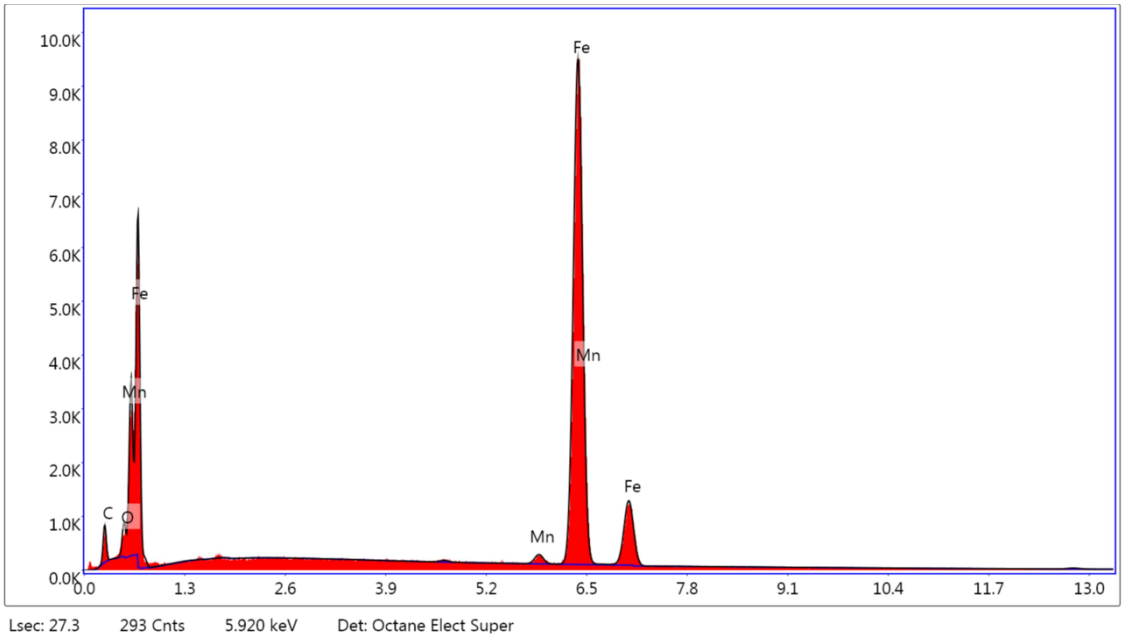
Şekil 4.14. EDX karakterizasyonu yapılan bölgeler a) 1 numaralı bölge 304L paslanmaz çelik b) 2 numaralı bölge Kaynak bölgesi c) 3 numaralı bölge S355J2C+N çeliği.



Şekil 4.15. 304L paslanmaz çeliğinin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi sonuçları.



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

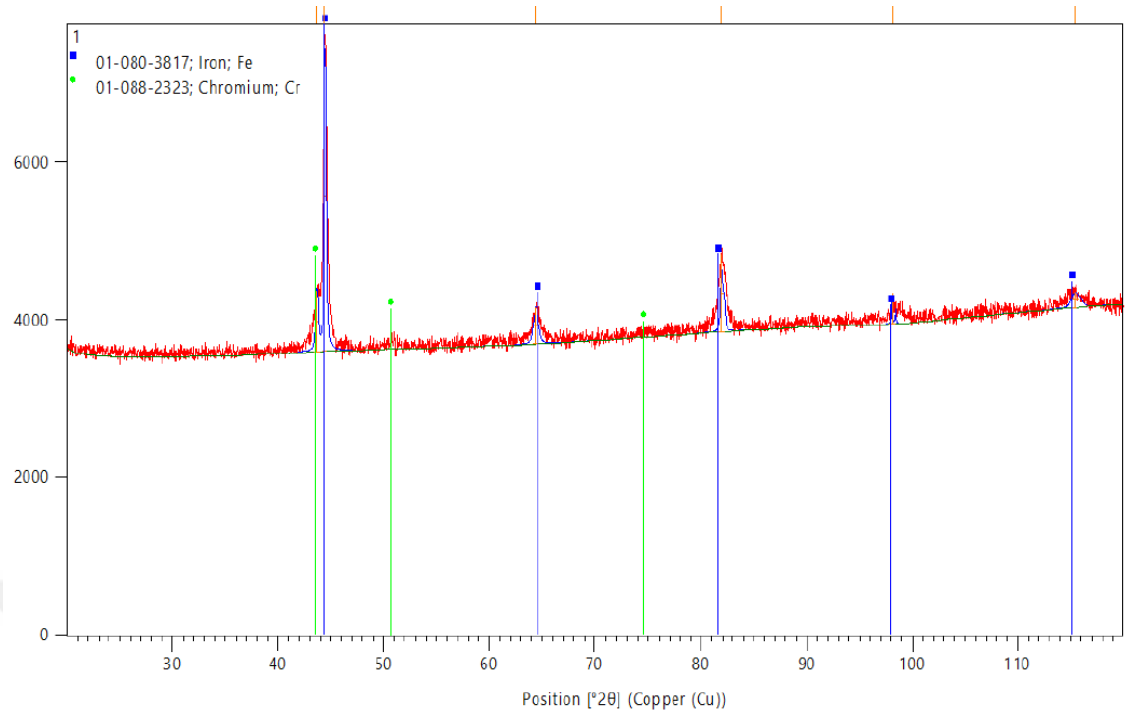


Şekil 4.17. S355J2C+N çeliğinin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi sonuçları.

4.2.3. XRD Analizi

Farklı metallerin kaynaklanması için uygun olarak görülen ER309L ilave teli kullanılarak kaynaklanan 304L paslanmaz, S355J2C+N ana metalleri ve kaynak merkezi için XRD analizi gerçekleştirilmiştir. 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.

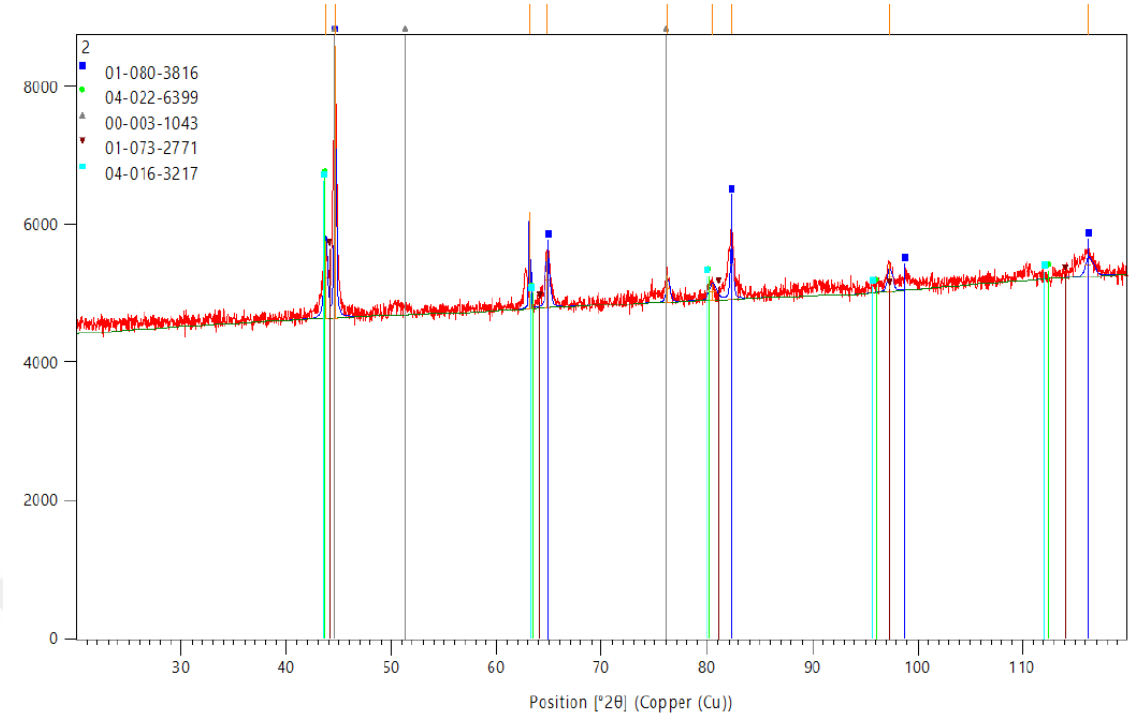
304L paslanmaz çelik noktasında gerçekleştirilen XRD analizinde 01-080-3817 kodlu α-ferrit ve 014-088-2323 kodlu Cr pikleri görülmüştür (Şekil 4.18). 304L paslanmaz çeliğinde YMK (yüzey merkezli kübik) kafes yapısı görülmektedir. Bunun sonucu olarak da 304L paslanmaz çeliğinin kaynaklanabilirliğinde karışma problemleri ile birlikte mukavemette ve sertlikte düşüşler gözlenmesi olasıdır (Alnak, 2020).



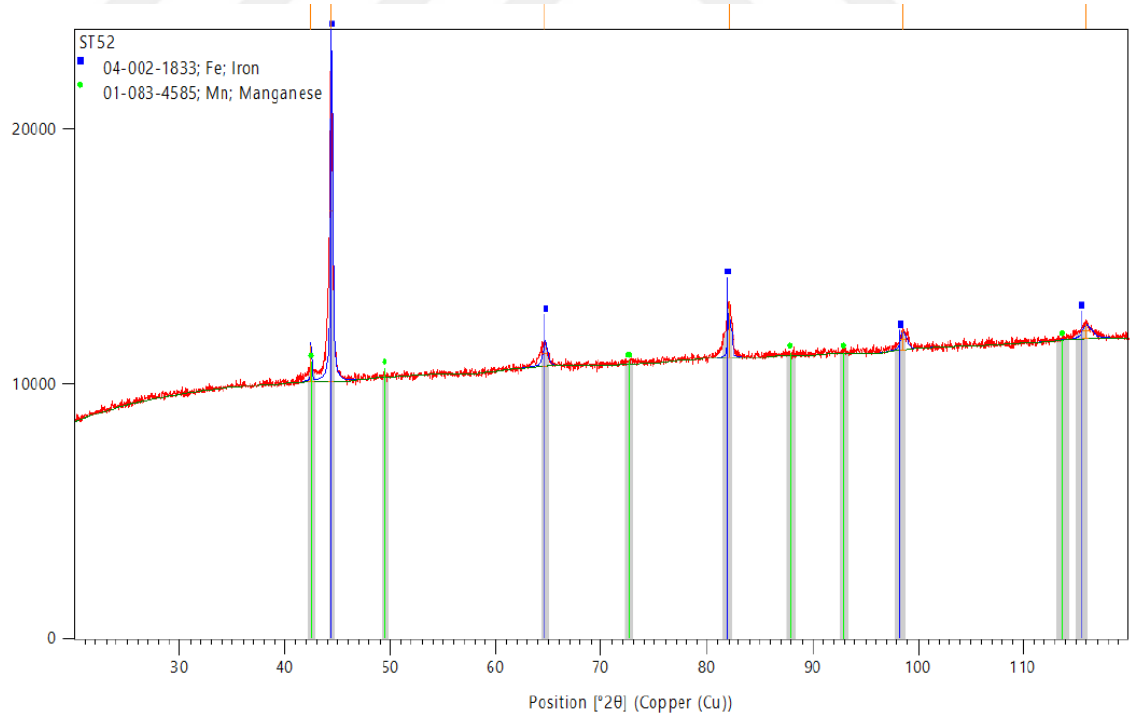
Şekil 4.18. 304L paslanmaz çelik XRD sonucu.

Kaynak merkezinde gerçekleştirilen XRD analizinde 01-071-3816 kodlu Fe, 04-022-6399 kodlu α-Mn0.08 Fe0.644 Ni0.276 (demir manganez nikel), 00-003-1043 kodlu Ni (Nickel), 01-073-2771 Cr (chromium) ve 04-016-3217 kodlu delta ferrit (δ-ferrit) gözlemlenmiştir (Şekil 4.19). 304L paslanmaz çelik östenitik bir paslanmaz çeliktir ve YMK yapılıdır. Bununla birlikte östenit YMK yapılı olup manyetik değildir. 304L paslanmaz çelik ve S355J2C+N kaynaklandığında delta ferrit fazı meydana gelmiştir ve delta ferrit HMK yapılı olup bu da ferrit gibi ferromanyetik yapıya sahiptir (Wegrzyn, 1992).

S355J2C+N ana metaline uygulanan XRD analizinde 04-002-1833 kodlu Fe piki ve 01-083-4585 kodlu manganese-γ piki tanımlanmıştır ve BCC yapıda olduğu belirlenmiştir. 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 4.19. Kaynak bölgesi XRD sonucu.



Şekil 4.20. S355J2C+N çeliği XRD sonucu.

5. BÖLÜM

TARTIŞMA

Günümüz teknolojik sistemlerinin üretilmesi için farklı üstün özelliklere sahip malzemelerin birlikte kullanımına gereksinim vardır. Bu ekonomik bir çözüm olmak ile birlikte maliyet, montaj, üretim yöntemi, imal edilebilirlik, çalışma ömrü, bakım aralıkları, hasar biçimi gibi birçok parametrenin değerlendirilmesini gerektiren bir hususdur. Özellikle korozyona maruz çeliklerin kullanıldığı sistemlerde genel şasi ve diğer konstrüktif bölümler genel yapı çeliklerinden korozyon bölgeleri ise paslanmaz çelikten üretilebilmektedir. Bu çalışmada 304L ve S355J2C+N farklı özellikte iki çeliğin birleşimi ve kaynaklanabilirlik kabiliyeti araştırıldı. Sonuçlar bu iki malzemenin başarılı bir biçimde TIG kaynak yöntemi ile birleştirilebileceğini gösterdi.

Çeliklerde karbon oranı yükseldikçe iç yapıda yumuşak ferrit fazının yanında sert ve gevrek olan demir-karbür fazının miktarı artmaktadır. Bu sebepten dolayı şekil değiştirme zorlaşır. Bu nedenle kaynak ile birleştirme işlemi için 304 yerine 304L malzemesi tercih edilmiştir. 304L malzemesinin kaynak işleminde ısı tesiri altında kalan bölgede ve taneler arasında karbür çökelmesi yok denecek kadar azdır. S355 yapısal çeliği ise özelde S355MC, S355JN gibi ek özellikler içeren sınıflara ayrılmıştır. Bu çalışmada seçilen S355 çeliği tokluk ve normalizasyon gibi ek özellikler içeren S355J2C+N'dir. Bu çelik distorsiyona karşı daha dirençli ve üstün katlanabilme özelliklerine sahiptir (Celasun, 2012, Özkan, 2019).

Farklı iki metalin kaynak edilebilirliği ile ilgili testleri gerçekleştirmek için 8 mm ve 10 mm et kalınlığında ve X kaynak ağzı açılmış olan numuneler TIG kaynak yöntemi ve 4 paso uygulaması ile birleştirildi. Bu yöntem için gazaltı ark kaynak yöntemi de uygulanabilirdir. Ancak TIG kaynak yönteminde kaynak bölgesi izlenebilmektedir. Kaynak birleşiminde sızdırmazlığın sağlanması için birleşim dikişi daha stabildir. TIG

kaynak yöntemi yüksek maliyetli olmasına rağmen orta seviyede kaynak hızı olanağı, kaliteli ve temiz dikiş elde edilmesi gibi avantajlara sahiptir (Tokgöz, 2021). TIG kaynağından sonra kaynak dikişleri herhangi bir işlem gerektirmeden olduğu gibi kullanılabilir (Gözütok, 2009). TIG kaynak yöntemi diğer kaynak yöntemlerine göre kısmen daha yavaş, tecrübe gerektiren, otomatize edilme imkanı daha kısıtlı olmasına rağmen özellikle paslanmaz ve ferritik çeliklerin birleştirilmesinde dayanım ve sızdırmazlık bakımından daha avantajlıdır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde 304L'nin düşük karbonlu çelikler ve S355J2C+N malzemesi ile birleşimleri ile ilgili çalışmalarda birleşimin TIG kaynak yöntemiyle benzer biçimde başarı ile gerçekleştirildiği tespit edilmiştir (Altuntaş 2015, Emet 2019, Kumar ve Sinha 2018, Jafarzadegan vd. 2013, Khalifeh vd. 2013).

Kaynağı gerçekleştirilen iki farklı malzemenin sertlik ölçümleri gerçekleştirildiğinde maksimum sertlik değerleri 304L için ~279 ± 12 HV ve S355J2C+N için maksimum ~242± 12 HV olarak tespit edildi. Ortalama sertlik değerleri ise 304L için ~222± 10 HV'dir. S355J2C+N ana metalin sertliği yaklaşık ~187 ± 10 HV'dir. Kaynak merkezinin sertlik değeri ise ~302 ± 10 HV olarak ölçülmüştür. δ-ferrit mevcudiyeti ve mikroyapıdaki artışı sertliği arttırmıştır. Bu sertlik değerleri (Kumar ve Sinha, 2018), (Kahraman vd., 2017) ve (Huang, Yang, Lu ve Bin, 2016) yaptıkları çalışmaları ile uyumludur. Kaynak birleşiminde enine yapılan sertlik ölçümünde sertlik kaynak merkezinde en yüksek değerde, S355J2C+N ana metalinde ise en azdır. S355J2C+N esas malzemesinden ITAB, kaynak merkezi, ITAB ve 304L'ye geçişte sertlik değişimi Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de sunulmuştur. Sertlik miktarının soğuma hızı ile yüksek oranda ilgisi vardır (Tümer ve Yılmaz, 2016). Kontrollü bir soğuma ile daha düşük sertlik değerleri elde etmek mümkün olabilir.

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. 304L ve S355J2C+N malzemelerinin kaynaklı birleşimlerinde hasar S355J2C+N malzemesinde meydana gelmiştir. Okay vd., (2015) düşük karbonlu çelikler ve 304L ile yaptıkları çalışmada hasarı benzer biçimde S355J2C+N malzemesinde tespit etmişlerdir. 304L araştırılan kaynak birleşiminde en yüksek dayanıma sahiptir. Kaynak bölgesi S355J2C+N malzemesinden bir miktar daha

sağlamdır. Czupryński, Musztyfaga-staszuk, Szymura ve Monica, (2020), yaptıkları çalışmada benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Boyuna kaynaklı numunelerde çekme dayanımı ise yaklaşık 601 MPa seviyelerinde tespit edilmiştir. Boyuna ölçülen kaynak testinde kesitte sadece kaynak yoktur. Kaynak ilave metali, 304L ve S355J2C+N kaynak bölgesinde yer almaktadır ve buradaki yüksek dayanımda 304L'nin katkısı fazladır. Çekme deneyleri bu iki malzemenin makine tasarımlarında başarılı bir biçimde kullanılabileceğine yönelik oldukça pozitif sonuçlar sunmuştur. S355J2C+N ye göre 304L daha yüksek bir şekil değişim oranına sahiptir. Bu durumu 304L'nin akma dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki farkın büyüklüğüde ortaya koymaktadır. S355J2C+N malzemesi yaklaşık %28 uzama oranına sahip iken 304L'nin %58 lere varan bir uzama oranı vardır. Bu durum şekil 4.3'te görülen çekme deneylerine ait deforme olmuş numunelerde açıkça görülmektedir. Bu iki farklı malzemenin çekme deneyinde elde edilen % uzama değerlerinin arasındaki neredeyse %50 mertebelerindeki büyük farkın kaynak bölgesinde kesme gerilmesi oluşturarak özellikle 304L tarafında bir kaynak hasarı olabileceği konusunda beklenti oluşturmuştur. Bu sebeple eğme testinin kaynaklı birleşimi araştırmadaki önemi bir kat daha artmıştır.

Gerçekleştirilen 180° eğme deneyi ile farklı iki malzemenin kaynaklı birleşiminin şekil değişim kabiliyeti (plastik davranışı), kaynak birleşiminin sünekliği ve tokluğu hakkında değerli sonuçlar elde edildi (İrsel, 2021). Eğme deney sonuçları kaynak bölgesinde birleştirilen iki malzeme için uygun bir sünekliğin olduğunu göstermiştir. 304L ile S355J2C+N malzemenin birleşimini sağlayan bu kaynak birleşiminde 180° eğme şekil değişimi sonucunda kaynak hasarı, kaynağın herhangi bir metalden sıyrılması ve makro boşluklar tespit edilmedi. Bu iki malzeme için ER309L ek ilave metalin bu iki farklı malzemeyi birleştirme konusunda mikro özellikler bakımından olduğu kadar makro özellikler bakımından da uygunluğunu göstermiştir. Eğilme dayanımı bakımından, 304L'nin S355J2C+N malzemesine göre daha sünek olması sebebiyle bir miktar daha az olarak tespit edilmiştir. Bu iki malzemenin eğilme dayanımı bakımından çok benzer mekanik özelliklere sahip olduğu söylenebilir. Boyuna kaynaklı numunelerde ilave metalin ve tüm numunenin kaynak sebebiyle yüksek sıcaklığa erişip soğuması sebebiyle eğilme dayanımının daha yüksek seviyede olduğu tespit edildi. Enine kaynaklı numunelerde kaynağın eğilme dayanımı bakımından yüksek bir etkisinin olmadığı tespit edildi. Şekil 4.5'te test numunelerinin 180 derece eğilmesi sonrası kaynak bölgelerinin

esas metaller ile uyum içinde olduğu net biçimde görülmektedir (İrsel, 2021, Çelik ve Alsaran, 1999).

Charpy V-Notch testleri kapsamlı biçimde oda sıcaklığında 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 (Tümer ve Yılmaz, 2016). 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 (Doğrugiden, 2019, Khalifeh vd., 2013). 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. S355J2C+N ve 304L paslanmaz çeliğin optik görüntüleri tamamen farklı bir morfolojiye sahiptir. 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. S355J2C+N ana malzemesinin mikroyapısının içerisinde ferrit ve perlit fazlarının homojen bir şekilde dağıldığı, tane boyutunun yaklaşık olarak 5.35 ± 1 µm olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar (Abuç, 2006) ve (Jafarzadegan vd., 2013) yaptıkları çalışmalarla oldukça uyumludur. 304L'nin mikroyapısının tamamen östenit fazı içerdiği tespit edildi. Yapı nikel içerdiğinden östenitik yapı malzeme soğutulduğunda dahi korunmuştur. Bu diğer çalışmalarda benzer şekilde tespit edilmiştir (Kahraman vd., 2017). 304L paslanmaz çeliğinin tane boyutu ise yaklaşık olarak 35 ± 5 µm olarak tespit edilmiştir. Bu, doğrudan kaynak bölgesindeki pozitif özelliklere katkıda bulunmuştur. Özellikle sertliğin aşırı artışına engel olmuştur. Ana metaller ve kaynak merkezinde mikro boşluklara rastlanmamıştır.

Delta ferrit Cr ve Ni içeren birleşimlerde oluşması beklenen bir yapıdır. Gerçekleştirilen FESEM sonuçlarına göre yapıda δ-ferrit fazı kaynak birleşimi sonrası oluştuğu gözlenmiştir. δ-ferrit fazı, TIG kaynağında tokluk üzerinde bir etkiye sahipti. Kaynak merkezinde tespit edilen δ-ferrit, kaynak eklemindeki mukavemeti arttırmış FESEM sonuçlarında oluştuğu görülen δ-ferrit fazı kaynak bölgesindeki sertliğin artışına sebep olmuştur ve kaynaklı bağlantının mukavemetine pozitif etkisinin olduğu görülmüştür. Boumerzoug, Derfouf ve Baudin (2010), daha yüksek δ-ferrit yüzdelerinin kaynaklı bağlantının mukavemetini ve darbe enerjisi değerlerini arttırdığını bulmuştur. Yapıda δ-ferrit varlığı için bazı önlemler alınabilir. Kaynak işlemi sırasında kullanılan CO2 gazı miktarı ile δ-ferrit miktarını arttırdığını tespit etmişlerdir. Yapıda %2–9 δ-ferrit bulunduğunda çatlama eğiliminin olmadığı ve kompozit etkisi yaparak toklukta herhangi bir azalma olmaksızın mukavemeti arttırdığı tespit edilmiştir. Alkan, Chae ve Kim (2013), çelik içerisinde oluşan delta ferrit yapısının tokluğa olan etkisini araştırmışlardır ve artan delta ferrit fraksiyonuna göre tokluğun arttığını tespit etmişlerdir. Vidyarthy, Kulkarni ve Dwivedi (2017), kaynak füzyon bölgesinin ortalama sertliğinin, yani δ-ferrit fazının oluştuğu bölgede sertlik değerini çok daha fazla ölçmüştür.

Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (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. (Yılmaz ve Tümer, 2010) ve (Teker ve Yilmaz, 2014)'de yaptıkları çalışmada SEM ile benzer yapıları tespit etmişlerdir. FESEM sonuçlarında görülen δ-ferritin varlığı XRD analizi ile kanıtlandı ve sunuldu. Bir mikroyapı çalışması, kaynağın farklı bölgelerinde δ-ferrit varlığını ortaya koymaktadır (Başyiğit, 2014). TIG kaynak işleminin yapıldığı ana malzeme içerisinde Cr ve Ni bulunduran 304L paslanmaz çeliği ve S355J2C+N karbon çeliğidir. Paslanmaz ek tel ER309L ile kaynatıldı. Kaynak teli %20 Cr ve %10 Ni içerir. Paslanmaz dolgu metallerinin kaynak sırasında soğuma koşullarına göre mikroyapıda ferrit oluşturan kromun bulunması nedeniyle δ-ferrit oluşumu kaçınılmazdır (Wegrzyn, 1992).

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.

304L paslanmaz çelik, S355J2C+N ve kaynak merkezinden alınan EDX sonuçları ile ana malzemelerin ve kaynaklı bölgelerin elementel bileşimi elde edildi. EDX analizi kullanılarak yapılan sonuçlarında Si (atomic. %0.45), Cr (atomic. %22.37), ve Mn (atomic. %1.72), Fe (atomic. %69.21), Ni (atomic. %6.25) elementleri gözlenmiştir. Bu EDS analiz sonuçları (Kumar ve Sinha, 2019) ve (Abuç, 2006) ile uyumludur. Kaynak merkezinin EDX analizi kullanılarak yapılan kaynak bölgesi sonuçlarında Si (atomic. %0.77), Cr (atomic. %22.57), Mn (atomic. %1.65) ve Fe (wt. %68.47), Ni (atomic. %6.53) elementleri gözlenmiştir. S355J2C+N ana metalinin EDX analizi kullanılarak yapılan kaynak bölgesi sonuçlarında Mn (atomic. %1.31) ve Fe (atomic. %98.69) elementleri gözlenmiştir. Benzer biçimde bu elementlerin varlığı Ertem (2021) ve Tümer ve Yılmaz (2016) yaptıkları çalışmalarda da tespit etmişlerdir.

6. BÖLÜM

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında farklı mikroyapısal ve mekanik özelliklere sahip S355J2C+N ve 304L paslanmaz malzemeleri TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynak işleminde ER309L kaynak teli ve koruyucu gaz olarak Argon kullanılmıştır. Daha sonra test numuneleri bu plakalardan tel erezyon yöntemi ile kesilmiştir. Bu kapsamlı tez çalışmasında aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

1. TIG kaynak yöntemi bu iki farklı metali birleştirmek için uygun bir kaynak yöntemidir. Bu çalışmada iki farklı malzeme başarılı biçimde birleştirilmiştir. Er309L kaynak teli bu iki farklı metalin kaynaklı birleşimi için uygundur. Bu iki farklı metalin kaynaklı birleştirilmesi hem endüstriyel hem de bilimsel çalışmalarda uygulanabilir.
2. Çekme testlerinde kaynak merkezi ve 304L malzemede hasar meydana gelmezken hasarlar S355J2C+N malzemesinde meydana geldi. 304L ve S355J2C+N malzemeleri için akma dayanımı sırasıyla 611.46 ± 14 ve 551.96 ± 9 MPa olarak elde edilmiştir. Çekme numunelerinin kopma yüzeyi ana metallerin sünek bir yapıda olduğunu göstermiştir. 304L malzemede yüzde uzama değeri yaklaşık %58 mertebelerinde iken S355J2C+N malzemesinde ise %28 olarak tespit edildi.
3. Optik incelemede S355J2C+N ana metalin ortalama tane boyutu 5.35 ± 1 μm, 304L ana metalin ortalama tane boyutu ise 35 ± 5 μm olarak ölçülmüştür. TIG kaynak işleminden sonra 304L ısı tesiri altında kalan bölgesinde (ITAB) ortalama tane boyutu 41 ± 6 μm olarak ölçülmüştür. S355J2C+N ITAB bölgesinde 5.47 ± 1 μm ve kaynak bölgesinde ise tane boyutu 9.53 ± 3 μm heterojen bir yapı oluşmuştur. 304L tane boyutu bakımından S355J2C+N göre oldukça büyüktür.

4. En yüksek sertlik değeri kaynak birleşimi kesitinde kaynak merkezinde ölçülmüştür ve ~302 ± 10 HV'dir. S355J2C+N ana metalin sertliği yaklaşık ~187 ± 10 HV‘dir. 304L ana metalin sertliği ise yaklaşık ~222 ± 10 HV olarak ölçülmüştür. δ-ferrit mevcudiyeti ve mikroyapıdaki artışı sertliği arttırmaktadır.
5. 304L paslanmaz çelik ve S355J2C+N kaynaklandığında delta ferrit fazı meydana gelmiştir ve delta ferrit HMK yapılıdır. Kaynak merkezinde δ-ferrit oluşumunun kompozit etkisi yaparak toklukta herhangi bir azalma olmaksızın dayanımı arttırmıştır.
6. Gerçekleştirilen tokluk deneyleri ile 304L malzemesinin oda sıcaklığında en yüksek tokluk değerine sahip olduğu, S355J2C+N malzemesinin en düşük tokluk değerine sahip olduğu ve kaynak bölgesinin ise S355J2C+N ye göre tokluğunun bir miktar daha iyi olduğu tespit edildi.
7. 180° eğme deneyi sonuçlarına göre, enine kaynaklı numunelerin eğilme mukavemeti, boyuna kaynaklı numunelerden daha azdı. Eğilme testinde kaynak bağlantısında görünür bir kusur meydana gelmedi. Ancak esas metaller ile kaynak hattında ve kaynak yüzeyinde plastik deformasyona bağlı mikro boşluklar tespit edildi. Bu 180 derecelik eğme sonrası elde edilen yapıda sızdırmazlık bakımından her hangi bir sorun olmayacağı tespit edildi.

KAYNAKLAR

Abuç, S. (2006). *Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Gazaltı Kaynak Yöntemi ile Kaynağında Koruyucu Gazın Mekanik Özelliklere Etkisi,* (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Adar, M. (2019). *Hardox-500 İle St-52 Çeliğinin Kaynak Edilebilirliğinin Mekanik Testler Ve İstatistiksel Yöntemlerle Araştırılması,* (Yüksek Lisans Tezi), Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

Al-Khafaji, L. (2020). *The Effect of Welding Methods in the Weldment Design on the Distortions, Hardness and Stresses Generation of Steel Type S355J2C+N*, (Doktora Tezi), Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Alkan, G., Chae, D. ve Kim, S. J. (2013). Effect of δ ferrite on impact property of hot-rolled 12Cr-Ni steel. *Materials Science and Engineering A, 585,* 39–46. doi:10.1016/j.msea.2013.07.015

Alnak, Y. (2020). *Farklı Standartlardaki Paslanmaz Çelik Ve Sade Karbonlu Çelik Çiftlerinin Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi, Mekanik Özelliklerinin Ve Mikroyapılarının İncelenmesi*, (Doktora Tezi), Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Altuntaş, M. (2015). *AISI 304L Paslanmaz Çeliğin MIG ve TIG Kaynak Yöntemleriyle Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Anık, S. (1991). *Kaynak Tekniği El Kitabı*. *Gedik Eğitim Vakfı*, https://gedikegitimvakfi.org.tr/wp-content/uploads/2020/06/KAYNAK-TEKN%C4%B0%C4%9E%C4%B0-EL-K%C4%B0TABI.pdf

Baran, E. E. (2006). *304 Paslanmaz Çeliğinin Kaynak Yoluyla St 37 Çeliğiile Birleştirilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Başyiğit, A. B. (2014). *Dubleks Paslanmaz Çeliklerin TIG Kaynağında Soğuma Hızı Ve Koruyucu Gazın Oluşan Manyetik Fazların Oranına Ve Kaynaklı Bağlantının Özelliklerine Etkisi,* (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Boumerzoug, Z., Derfouf, C. ve Baudin, T. (2010). Effect of Welding on Microstructure and Mechanical Properties of an Industrial Low Carbon Steel. *Engineering*, *02*(07), 502–506. doi:10.4236/eng.2010.27066

Celasun, E. (2012). *S355J2 Çeliğinin Isıl İşlem ve Farklı Tozaltı Kaynak Tellerinin Kaynak Kabiliyetine Etkisinin İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

Çelik, A. ve Alsaran, A. (1999). Mechanical and structural properties of similar and

dissimilar steel joints. *Materials Characterization*, *43*(5), 311–318. doi:10.1016/S1044-5803(99)00045-5

Çınar, Ö., Yaralı, M. C., Erdemir, E., Çetiner, B. N., Mergen, A. ve Güllüoğlu, A. N. (2019). The Similar and Dissimilar TIG Welding of 316L and 321 Austenitic Stainless Steels. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, *1*(3), 148–155. doi:10.46740/alku.622016

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.

Doğrugiden, M. Y. (2019). *Farklı Kaynak Metotları İle Birleştirilen Zırh Çeliklerinin Kırılma Tokluk Değerlerinin İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak.

El-Eskandarany, M. S. (2020). Characterizations of Mechanically Alloyed Powders. Mechanical Alloying, 13–18. doi:10.1016/B978-0-12-818180-5.00002-9

Emet, A. O. (2019). *Lazer ve TIG kaynağı ile birleştirilmiş AISI 304 paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerinin ve gerilmeli korozyon davranışının incelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.

Ertem, M. (2021). *Termoreaktif Difüzyon Yöntemiyle Niyobyum Karbür-Bor (NbC-B) Kaplanan HARDOX 400 Çeliğin Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi ve Taguchi Yöntemiyle Aşınma Davranışının Değerlendirilmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.

Gözütok, E. (2009). *Paslanmaz Çeliklerin TIG Kaynağında Argon-Hidrojen Gaz Karışımının Birleştirmelerin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi*, (Yüksek Lisans Tezi), Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

Grubu, E. (2017). *Ürün Kataloğu 2017*. *Ürün kataloğu 2017*, https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/Urun_Katalogu-2017-1269.pdf

Gürbüz, H., Baday, Ş. ve Hamarat, İ. (2018). Tel Erozyon ile Kesmede Farklı Tel Elektrotların ve Soğutma Yöntemlerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *18*(015901), 676–683. doi:10.5578/fmbd.66968

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

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

Jafarzadegan, M., Feng, A. H., Abdollah-Zadeh, A., Saeid, T., Shen, J. ve Assadi, H. (2012). Microstructural Characterization in Dissimilar Friction Stir Welding Between 304 Stainless Steel And St37 Steel. *Materials Characterization*, *74*, 28–41. doi:10.1016/j.matchar.2012.09.004

Jafarzadegan, M., Abdollah-zadeh, A., Feng, A. H., Saeid, T., Shen, J. ve Assadi, H. (2013). Microstructure and Mechanical Properties of a Dissimilar Friction Stir Weld

between Austenitic Stainless Steel and Low Carbon Steel. *Journal of Materials Science and Technology*, *29*(4), 367–372. doi:10.1016/j.jmst.2013.02.008

Kahraman, F., Kasman, Ş., Kahraman, A. D. ve Tunuslu, O. (2017). Östenitik Paslanmaz Çelikler İle Takım Çeliklerinin Birbirleri ile Kaynağında Oluşan Kaynak Bölgesinin İncelenmesi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, *4*(1), 64–71.

Khalifeh, A. R., Dehghan, A. ve Hajjari, E. (2013). Dissimilar joining of AISI 304L/St37 steels by TIG welding process. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, *26*(6), 721–727. doi:10.1007/s40195-013-0194-9

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).GMAK Yöntemi ile Birleştirilmiş Hardoks500 - St52 Numunenin Çekme Dayanımı ve Sertlik Davranışının İncelenmesi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, *8*(2), 300–317. doi:10.36306/konjes.610889

Köroğlu, B. K. (2021). *Lazerle Kaynaklanmış ANSI 304 Paslanmaz Çeliğinin Gerilmeli Korozyon Çatlaması Davranışı Üzerinde Lazer Şok İşlemenin Etkisi ve Mikroyapısal Karakterizasyonu*, (Yüksek Lisans Tezi), Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.

Kumar, P. ve Sinha, A. N. (2018). Effect of Pulse Width in Pulsed Nd:YAG Dissimilar Laser Welding of Austenitic Stainless Steel (304 L) and Carbon Steel (st37). *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, *5*, 317–334. doi:10.1007/s40516-018-0069-z

Kumar, P. ve Sinha, A. N. (2019). Effect of Average Beam Power on Microstructure and Mechanical Properties of Nd: YAG Laser Welding of 304L and St37 Steel. *World Journal of Engineering*, *16*(3), 377–388. doi:10.1108/WJE-08-2018-0270

Mayr, P., Palmer, T. A., Elmer, J. W., Specht, E. D. ve Allen, S. M. (2010). Formation of Delta Ferrite in 9 Wt .% Cr Steel Investigated by In-Situ X-Ray Diffraction using Synchrotron Radiation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *41*, 2462–2465. doi:10.1007/s11661-010-0371-7

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

Odabaş, C. (2007). *Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı*. *Askaynak*, http://www.askaynak.com.tr/contents/34/20110704120329_paslanmaz-celikler.pdf

Ok, M. (2009). *AISI 304 Paslanmaz Çeliklerin Frezelenmesinde İşlenebilirliğinin İncelenmesi ve Tahmin Modellerinin Oluşturulması*, (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Özek, C. ve Özel, C. (2003). Tel erezyon tezgahında Ç8620 dişli çeliğin kesilme davranışlarının araştırılması. *DEÜ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ FEN ve MÜHENDİSLİK DERGİSİ*, *5*(2), 47–52.

Özkan, E. (2019). *Kaynak Sonrasi S355J2N Yapı Çeliğinde Oluşan Gerilmeleri Gidermek İçin Uygulanan Isıl İşlemi Etkilerinin Tahribatli-Tahribatsiz Muayene yöntemleriyle belirlenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.

Özturan, A. B. (2022). *Investigation of joining Hardox 450 and S355J2C+N steels with gas metal arc welding in terms of microstructure and mechanical properties,* (Yüksek Lisans Tezi), Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Roy, C., Pavanan, V. V., Vishnu, G., Hari, P. R., Arivarasu, M., Manikandan, M., Arivazhagan, N. (2014). Characterization of Metallurgical and Mechanical Properties of Commercially Pure Copper and AISI 304 Dissimilar Weldments. *Procedia Materials Science, 5,* 2503–2512. doi:10.1016/j.mspro.2014.07.502

Savaş, A. (2021). *MIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Hardox 400, AISI 304L ve ST52 Kalite Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi*. (Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi), Karabük, s.1-67.

Serdaroğlu, F. (2010). TIG Kaynak Yöntemiyle Boru-Flanş Kaynağında Açısal Distorsiyona Kaynak Akımı Etkisinin İncelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Şirvanlı, A. (2021). *AISI 304 Kalite Çelik Borularda Çoklu Helisel MIG Kaynaklarının Mikro Yapıya Olan Etkileri ve Mekanik Davranışlarının İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Sun, Z. ve Ion, J. C. (1995). Laser Welding of Dissimilar Metal Combinations. *Journal of Materials Science, 30*(17), 4205–4214. doi:10.1007/BF00361499

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

Tokgöz, M. B. (2021). *Ark Kaynağı ile Birleştirilen AISI 316L Östenitik Paslanmaz Çelik Levhaların İçyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Hatay.

Tufanoğlu, E. (2017). *P460-St52 Malzeme Çiftinin Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

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

Türk, M. (2021). *S355J0 Çeliğinin MAG Yöntemiyle Birleştirilmesinde Koruyucu Gaz ve Kaynak Telinin Mukavemete, Dikiş Geometrisine Etkisi ve Mikroyapı Karakterizasyonu,* (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.

Türkyılmazoğlu, A. (2006). Dubleks, Martenzitik ve Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Uzunali, U. Y. (2015). *Temperlenmiş Martenzit-Termomekanik Haddelenmiş Çelik Kaynaklı Bağlantı Mekanik Özelliklerine Kaynak Sonrası Yapılan Isıl İşlemin Etkileri,* (Yüksek Lisans Tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Vidyarthy, R. S., Kulkarni, A. ve Dwivedi, D. K. (2017). Study of Microstructure and Mechanical Property Relationships of A-TIG Welded P91–316L Dissimilar Steel Joint.

Materials Science and Engineering A, *695*(February), 249–257. doi:10.1016/j.msea.2017.04.038

Wegrzyn, T. (1992). Delta Ferrite in Stainless Steel Weld Metals. *Welding International*, *6*(9), 690–694. doi:10.1080/09507119209548267

Xin, J., Zhang, H., Sun, W., Huang, C., Wang, S., Wei, J., Wang, W., Fang, Z., Wu, D., Li, L. (2021). The Microstructures and Mechanical Properties of Dissimilar Laser Welding of Copper and 316L Stainless Steel with Ni Interlayer. *Cryogenics*, *118*. doi:10.1016/j.cryogenics.2021.103344

Yilmaz, R. ve Tümer, M. (2010). The Effect of Shielding Gases on the Microstructure and Thoughness of Stainless Steels Weldments by FCAW. *Proc. of the Int. Conf. on Advances in Welding Science and Technology for Construction, Energy and Transportation, AWST 2010, held in Conj. with the 63rd Annual Assembly of IIW 2010*, (April 2016), 847–852.

Yıldırım, D. (2018). *2205 Dubleks Paslanmaz Çelik İle S355j2 Genel Yapı Çeliğinin Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Yürük, A., Bozkurt, B. ve Kahraman, N. (2016). S235JR Karbon Çeliği ile AISI 430 Ferritik Paslanmaz Çeliğin MIG Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *2*(21), 90–97. doi:10.16984/saufenbilder.296811

ÖZGEÇMİŞ

Selin KANTUR, İlköğretim ve Lise öğrenimini Edirne'de tamamladı. Lisans eğitimini 2009-2013 yılları arasında T.C. Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2013 yılı itibariyle Makine Mühendisi olarak çalışmaya başladı. İnşaat, tekstil ve metal sektöründe deneyim kazandı. 2020 yılında Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans eğitimine başladı. İnşaat sektöründe halen çalışmaya devam etmektedir.