T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ÖZELLİKTEKİ P355GH ve 316L ÇELİKLERİNİN TIG KAYNAK YÖNTEMİ ile BİRLEŞTİRİLMESİNİN MEKANİK ve MİKROYAPISAL ÖZELLİKLER BAKIMINDAN İNCELENMESİ

BETÜL NUR GÜZEY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gürkan İRSEL

EDİRNE-2022

BETÜL NUR GÜZEY' in hazırladığı **"FARKLI ÖZELLİKTEKİ P355GH ve 316L ÇELİKLERİNİN TIG KAYNAK YÖNTEMİ ile BİRLEŞTİRİLMESİNİN MEKANİK ve MİKROYAPISAL 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: 13/09/2022

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 PROGRAMI
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.

13 / 09 / 2022
Betül Nur GÜZEY
İmza

Yüksek Lisans Tezi

Farklı özellikteki P355GH ve 316L çeliklerinin TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mekanik ve mikroyapısal özellikler bakımından incelenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yüksek ısı ve basınca dayanıklı P355GH ve östenitik paslanmaz 316L çeliklerinin Tungsten inert gaz (TIG) kaynak yöntemi ile birleştirilmesi mikroyapı, mekanik özellikler ve birleşim verimliliği bakımından araştırıldı. İki farklı metalin kaynak ile birleşimi için test plakaları hazırlandı ve kaynaklandı. Kaynaklanan plakalardan test numuneleri tel erozyon yöntemi ile kesildi. Kaynak bölgesi, ısı tesiri altında kalan bölgeler ve esas metaller için kapsamlı testler gerçekleştirildi. Metalografik karakterizasyon araştırmasında; optik mikroskop (OM), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX/EDS), X-ray difraksiyonu (XRD) analizleri gerçekleştirildi. Kaynaklı birleşim ve birleştirilen malzemelerin mekanik özelliklerini tespit etmek için Vickers mikrosertlik, eğme, Charpy V-Notch darbe, çekme testleri gerçekleştirildi. Optik incelemede P355GH ana metalin ortalama tane boyutu 5.13 ± 1 µm, 316L ana metalin ortalama tane boyutu ise 16.33 ± 5 µm olarak ölçülmüştür. XRD analizi sonucunda kaynak bölgesinin mikroyapısında delta ferrit fazı tespit edilmiştir. Vickers mikrosertlik değerleri, en yüksek kaynak merkezinde 268 ± 15 HV tespit edildi. 316L ana metalde 217.8 ± 12 HV, P355GH ana metaline ait sertlik değeri ise 195.7 ± 11 HV olarak ölçülmüştür. Çekme testinde, enine kaynak birleşiminde gözlemlenen en yüksek çekme dayanımı 593.92 ± 06 MPa değerindedir ve 316L bölgesinden kopma gerçekleşmiştir. Boyuna kaynak birleşiminde ise en yüksek çekme dayanımı 584.85 ± 07 MPa'dır. 316L çekme dayanımı 595.90 ± 08 MPa olarak ölçülürken, P355GH çekme dayanımı 601.49 ± 05 MPa olarak ölçülmüştür. Eğme testinde, eğme kuvvetleri 316L için 30.006 ± 8 kN P355GH için 36.324 ± 12 kN olarak

tespit edildi. Enine ve boyuna kaynaklı numunelerde ise sırasıyla eğme kuvvetleri 34.331 ± 10 kN ve ise 32.966 ± 11 kN olarak ölçüldü. TIG kaynağı 316L ve P355GH metallerinin birleşiminde tokluk, yüksek plastik şekil değiştirme kabiliyeti, %101.10 oranında yüksek birleşim verimliliği gibi üstün özellikler gösterdi.

Yıl **:** 2022

Sayfa Sayısı **:** 88

Anahtar Kelimeler **:** Farklı metallerin kaynağı, Mikroyapı incelemesi, P355GH, 316L, XRD, mekanik özellikler

Master's Thesis

Investigation of the joining dissimilar P355GH and 316L steels with different properties by TIG welding method in terms of mechanical and microstructural properties

Trakya University Institute of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

This thesis investigates the joining of high temperature and pressure resistant P355GH and austenitic stainless 316L steels by Tungsten inert gas (TIG) welding method in terms of microstructure, mechanical properties, and joint efficiency. Test plates were prepared and welded for the joining of two different metals by welding. Test specimens from the welded plates were cut by wire electrical discharge machining. Extensive tests were carried out for the weld zone, heat affected zones and base metals. In metallographic characterization research, optical microscope (OM), field emission scanning electron microscope (FESEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX/EDS), X-ray diffraction (XRD) analyzes were performed. Vickers microhardness, bending, Charpy V-Notch impact, tensile tests were performed to determine the mechanical properties of the welded joint and the joined materials. In the optical examination, the average grain size of the P355GH base metal was 5.13 ± 1 μm, and the mean grain size of the 316L base metal was 16.33 ± 5 μm. As a result of XRD analysis, delta ferrite phase was determined in the microstructure of the source region. Vickers microhardness values were determined as 268 ± 15 HV at the highest weld center. The hardness value of 316L base metal was 217.8 ± 12 HV, and the hardness value of P355GH base metal was measured as 195.7 ± 11 HV. In the tensile test, the highest tensile strength observed in the transverse weld joint was 593.96 ± 06 MPa and fracture occurred in the 316L region. In the longitudinal weld joint, the highest tensile strength is 584.85 ± 07 MPa. The tensile strength of 316L was measured as 595.90 ± 08 MPa, while the tensile strength of P355GH was measured as 601.49 ± 05 MPa. In the bending test, the bending forces were determined as 30.006 ± 8

kN for the 316L and 36.324 ± 12 kN for the P355GH. Bending forces were measured as 34.331 ± 10 kN and 32.966 ± 11 kN for transverse and longitudinal welded specimens, respectively. TIG weld metal showed superior properties such as toughness, high plastic deformation ability, high joint efficiency of 101.10% in the combination of 316L and P355GH metals.

Year : 2022
Number of Pages : 88
Keywords : Dissimilar welding, Microstructural investigation, P355GH, 316L, XRD, mechanical properties

ÖNSÖZ

Kaynak geçmişten günümüze benzer veya benzer olmayan malzemeleri birleştirme amacıyla kullanılmaktadır. Günümüzde endüstriyel ihtiyaçlar sebebiyle benzer olmayan malzemelerin kaynağı gereksinim haline gelmiştir. Özellikle enerji santrallerinde, petrokimya tesislerinde, nükleer reaktörlerde, yüksek sıcaklığa maruz kalan kazan gibi ekipmanlarda farklı malzemelerin kaynağı ile uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Sızdırmazlık ve dayanım bakımından tungsten inert gaz (TIG) kaynağı boru hatları ve basınçlı kapların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada endüstride basınçlı kazan çeliği olarak adlandırılan P355GH ve östenitik paslanmaz çelik 316L farklı metaller TIG kaynak prosesi ile birleştirildi. Farklı özellikteki metallerin kaynak edilebilirliklerinin, birleşim verimliliklerinin araştırıldığı bu özgün araştırma tezinin endüstriyel ve bilimsel olarak birçok açıdan fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Tez ile ilgili çalışmalarımda bilgi birikimi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, yardım ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Gürkan İRSEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması için katkı ve desteklerinden dolayı Edirne Makine Ar-Ge Müh. Dan. Ltd. Şti.'ne, 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 aileme minnet ve şükranlarımı sunarım.

Deneysel nitelikli bu çalışma, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Birimi (TÜBAP) tarafından 2022 / 74 numaralı proje ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT vi
ÖNSÖZ viii
İÇİNDEKİLER ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xi
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ xv
1. BÖLÜM 1
GİRİŞ 1
1.1. 316L Östenitik Paslanmaz Çelik 2
1.2. P355GH Yüksek Sıcaklığa ve Basınca Dayanıklı Çelik 4
1.3. Tungsten Inert Gaz Kaynağı (TIG) 5
1.4. Delta Ferrit Fazı (δ-ferrit) 6
1.5. Farklı Metallerin Kaynağı ve Verimliliği 7
2. BÖLÜM 10
LİTERATÜR TARAMASI 10
3. BÖLÜM 19
MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM 19
4. BÖLÜM 36
SONUÇLAR 36
4.1. Metalografik Çalışmalar 36
4.1.1. Optik Görüntüleme 36
4.1.2. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) 40
4.1.3. Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi (EDX/EDS) 42
4.1.4. EDX Çizgi Analizi (Line-scan) 44
4.1.5. X-Işını Kristalografisi (XRD) 46
4.2. Mekanik Deneyler 48
4.2.1. Vickers Mikrosertlik Testi 48

4.2.2. Çekme Deneyi 50
4.2.3. Eğme Deneyi 53
4.2.4. Charpy V-Notch Tokluk Testi (CVN) 55
5. BÖLÜM 58
TARTIŞMA 58
6. BÖLÜM 64
SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 64
KAYNAKLAR 66
ÖZGEÇMİŞ 73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	Alfa
γ	Gama
θ	Theta
δ yada δ	Delta
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
FeO	Demir Oksit
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/EDS	Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi
FCAW	Özlü Ark Kaynak Yöntemi
EAK	Elektrik ark kaynağı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. P355GH ve 316L çelik levhalar. 21
Şekil 3.2. P355GH ve 316L çelik malzemeler. 21
Şekil 3.3. Kaynak işlemi için hazırlanmış plakalar. 22
Şekil 3.4. 316L ve P355GH çelik plakaların puntalama işlem kesiti. 22
Şekil 3.5. P355GH ve 316L plakaların ER309L elektrot ile kaynaklanması. 23
Şekil 3.6. P355GH ve 316L plakaların kaynaklı birleşiminin kontrolü. 24
Şekil 3.7. Kaynaklanmış P355GH ve 316L plakalar ve ana malzeme plakaları. 24
Şekil 3.8. Kaynaklı plakalardan test numunelerinin kesilme planı. 25
Şekil 3.9. Tel erezyon kesim tezgahı. 25
Şekil 3.10. Farklı iki metal ve kaynaklı birleşimlere ait tokluk test numuneleri. 26
Şekil 3.11. Farklı iki metal ve kaynaklı birleşimlere ait çekme test numuneleri. 26
Şekil 3.12. Farklı iki metal ve kaynaklı birleşimlere ait eğme test numuneleri. 27
Şekil 3.13. Kaynak verimini araştırmaya yönelik özel çekme test numuneleri. 27
Şekil 3.14. Numunelerin fazla kaynak dolgularının temizlenmesi. 28
Şekil 3.15. Farklı iki metal ve kaynaklı birleşimler için hazırlanmış standart çekme test numuneleri 29
Şekil 3.16. Farklı iki metal ve kaynaklı birleşimler için hazırlanmış eğme test numuneleri 29
Şekil 3.17. Farklı iki metal ve kaynaklı birleşimler için hazırlanmış tokluk test numuneleri 30
Şekil 3.18. Çekme test cihazı. 31
Şekil 3. 19. Eğme test cihazı. 31
Şekil 3.20. Tokluk test cihazı. 32
Şekil 3.21. Spektrometre cihazı ile elementel ölçüm. 32
Şekil 3.22. Metalografik test numuneleri için bakalite alma, zımparalama ve parlatma işlemi. 33
Şekil 3.23. Optik mikroskop ile görüntüleme. 34
Şekil 3.24. 0.5 mm aralık ile yatay ve dikey otomatik sertlik ölçümü. 34

Şekil 4.1. P355GH çeliği a) 50x büyütmede ve b) 100x büyütmede mikroyapısı. 37
Şekil 4.2. 316L östenitik paslanmaz çeliğinin a) 20x büyütmede ve b) 50x büyütmede mikroyapısı. 38
Şekil 4.3. Kaynak bölgesinin a) 20X ve b) 50X büyütmede mikroyapısı. 38
Şekil 4.4. P355GH ITAB mikroyapısı a) 5X büyütme b) 20X büyütme. 39
Şekil 4.5. 316L ITAB mikroyapısı a) 10X büyütme b) 20X büyütme. 39
Şekil 4.6. 36X büyütme kaynak bölgesi FESEM görüntüsü. 40
Şekil 4.7. 316L FESEM görüntüsü a) 500X büyütme b) 1.00KX büyütme. 41
Şekil 4.8. 1.00KX büyütmede ısı tesiri altında kalan bölgelerin FESEM görüntüsü a) 316L ITAB ve b) P355GH ITAB. 41

Şekil 4.9. Kaynak bölgesinin FESEM görüntüsü a) 1.00KX büyütme b) 2.00KX büyütme. 41
Şekil 4.10. P355GH çeliğinin FESEM görüntüsü a)1.00KX büyütme ve b) 2.00KX büyütme. 42
Şekil 4.11. P355GH çeliği EDX analizi. 43
Şekil 4.12. Kaynak bölgesi EDX analizi. 43
Şekil 4.13. 316L östenitik paslanmaz çeliği EDX analizi. 44
Şekil 4.14. P355GH ITAB linescan analizi. 45
Şekil 4.15. 316L ITAB linescan analizi. 45
Şekil 4.16. 316L paslanmaz çelik XRD analizi. 46
Şekil 4.17. Kaynak bölgesi XRD analizi. 47
Şekil 4.18. P355GH XRD analizi. 48
Şekil 4.19. 0.5 aralık ile otomatik mikrosertlik ölçümü a) dikey ölçüm, b) yatay ölçüm. 49
Şekil 4.20. Dikey mikrosertlik ölçümü (HV0.1) 49
Şekil 4.21. Yatay mikrosertlik ölçümü (HV0.1). 50
Şekil 4.22. Çekme testinden sonra kopma bölgeleri. 51
Şekil 4.23. Kaynak birleşim verimlilik ölçüm numunelerinin çekme testinden sonra kopma bölgeleri. 51
Şekil 4.24. Standart çekme numunelerinde Gerilme (MPa) - % Uzama çekme grafiği. 52
Şekil 4.25. Kaynak birleşim verimlilik ölçüm numunelerinin Gerilme (MPa) - % Uzama çekme grafiği. 52
Şekil 4.26. 180° eğme testi a-b) 316L malzemesi, c-d) P355GH, e-f) Enine kaynak g-h) Boyuna kaynak. 54
Şekil 4.27. Kuvvet (kN)-Yer değiştirme (mm) grafiği. 55
Şekil 4.28. Charpy çentik darbe deneyi sonuçları a) P355GH ITAB b) Enine kaynak merkezi c) 316L ITAB d) 316L e) Boyuna kaynak f) P355GH. 56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Ana malzemelerin ve kaynak telinin ağırlıkça kimyasal bileşimi (wt%). ..20
Çizelge 3.2. Ana malzemelerin ve kaynak telinin mekanik özellikleri. 20
Çizelge 3.3. Kaynak parametreleri.....20

Çizelge 4.1. Akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve kopmaya kadar % uzama değerleri.....53
Çizelge 4. 2. Kaynak birleşim verimlilik ölçüm numunelerinin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve kopmaya kadar % uzama değerleri. 53
Çizelge 4.3. Eğme testi maksimum kuvvet (kN) - deformasyon (mm) değerleri.....54
Çizelge 4.4. Charpy V-Notch darbe deneyi sonuçları. 57

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Metalik malzemelerin kimya, petrokimya, nükleer ve enerji endüstrilerinde farklı şekilde birleştirilmesi, yüksek işlevsellik ve maliyet verimliliği sergileyen mühendislik yapıları için önemli bir prosedürdür (Sirohi vd., 2021a). Benzer olmayan kaynak bağlantısı, mekanik özellikler, mikroyapısal özellikler, ısı direnci, oksidasyon direnci, kaynaklanabilirlik, yüksek sıcaklıkta sürünme mukavemeti ve manyetik özellikler gibi çeşitli çalışma koşullarının taleplerini karşılar (İrsel, 2021; Özturan, İrsel ve Güzey, 2022). Benzer olmayan kaynak bağlantılarının kullanılması, aynı zamanda, maliyetin genel olarak azaltılmasına yardımcı olan yeni ve pahalı malzemeden tasarruf edilmesini sağlar. Bazı durumlarda, benzer olmayan metal kaynağı uygun tasarım ihtiyaçlarını karşılamak için temel gereksinim haline gelir (İrsel, 2021a; Sirohi, Pandey ve Goyal, 2021b; Sirohi vd., 2021a). Belirli bir uygulama için her iki malzemenin üstün özelliklerinden yararlanmak amacıyla iki farklı sınıf malzemeyi birleştirmek yaygın olarak kullanılır (Kulkarni vd., 2020). Benzer olmayan metal kaynaklarında mühendisler için temel endişe, enerji santralleri, nükleer, kimya, petrokimya, petrol ve diğer endüstriler dahil olmak üzere birçok uygulama için hatasız ve mükemmele yakın kaynak dikişi geliştirmektir. Kaynaklı bağlantının mekanik davranışı, malzemenin kaynaklanabilirliği ve korozyon direnci esas olarak katılaşma doğası, ana metallerin ve dolgu metalinin bileşimi tarafından kontrol edilir (Kumar ve Pandey, 2022).

Östenitik paslanmaz çelikler iyi korozyon direncine, yüksek sıcaklıkta mukavemet ve oksitlenme direncine sahiptir. 316L çeliği içeriğinde en az %16 oranında krom (Cr) en az %10 nikel (Ni) içermektedir. 316 kalite, geniş bir kullanım alanında mükemmel bir korozyon direncine sahiptir. Paslanmalara karşı dirençli olduğundan mimari, deniz gören yapılar, köprü bağlantıları ve kirişleri gibi bazı uygulamalarda

kullanılabilir (Khidhir ve Baban, 2019; Doğru, 2019). Organik kimyasal gruplarına, gıda prosesi yapılan çevrelere, boyalara karşı dayanım göstermesiyle tanınmaktadır. P355GH çeliği ise basınca dayanıklı ve yüksek ısı çelikleri grubu arasındadır. EN10028-2 standardına göre üretilir. İçerisinde %0.08- 0.2 oranında karbon, %0.4 oranında silisyum, %0.9-1.5 oranında mangan gibi elementler bulunur (Senthil Kumar ve Ramakrishnan, 2021; Kacar ve Acarer, 2004). Bu iki farklı çeliğin birleşimi özellikle gıda, elektrik üretimi, kimya, petrokimya, nükleer santrallerinde uygulanabilir (Çayırhan, 2019). Güç üretim endüstrilerinde benzer olmayan iki kalite çeliği (östenitik ve basınçlı kap çeliği) birleştirmek için, östenitik paslanmaz çelik özlü kaynak teli olan ER309L bütün pozisyonlarda kaynak yapabilme olanağına sahip olduğundan dolayı genellikle dolgu metali olarak tercih edilir (Dong vd., 2020; Ming vd., 2014; Verma vd., 2016a). ER309L, Cr ve Ni içeren östenitik paslanmaz çeliklerle, alaşımsız ve hafif alaşımlı çeliklerin TIG kaynağında kullanılan östenitik paslanmaz çelik özlü çelik kaynak telidir. ER309L içeriğinde C, Si, Mn, Cr, Ni bulundurur ve farklı iki malzemenin özellikle paslanmaz ve karbon çeliklerinin birleşiminde başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlar (Dong vd., 2020; Moteshakker vd., 2016; Butt vd., 2012).

1.1. 316L Östenitik Paslanmaz Çelik

Paslanmaz çelik, krom ve nikel alaşımı olarak tanımlanır. Geleneksel düşük alaşımlı ve karbonlu çeliklere göre büyük ölçüde geliştirilmiş korozyon direnci özelliğine sahiptir (Dökme, 2018). Bu korozyon direnci, en yaygın olarak kullanılan kalitelerde Cr elementinin yaklaşık %18'ini içermesine ve en az %10 Ni ilavesinden kaynaklanır (Ziętala vd., 2016). Paslanmaz çelik, demir ve kroma ek olarak nikel, titanyum, niyobyum ve molibden gibi başka elementler de içerir (Verma ve Taiwade, 2016b). Paslanmaz çeliklere korozyona dayanıklılık özelliklerini veren alaşım elementi olan krom, oksijen varlığında hızla oksitlenir ve açıkta kalan yüzeylerde kararlı, pasif bir krom oksit filmi oluşturur. Bunu oksijenle birleşerek metal yüzeyinde ince, şeffaf bir krom oksit koruyucu film oluşturarak yapar. Krom oksit filmi, normal atmosferik veya yumuşak sulu ortamlarda stabil ve koruyucudur ve daha yüksek krom, nikel, molibden ve/veya diğer alaşım elementleri ile geliştirilebilir. Krom, film stabilitesini iyileştirir; molibden ve krom klorür penetrasyonuna karşı direnci arttırır; ve nikel, güçlü asit ortamlarında pasif krom oksit film direncini artırır (Mouritz, 2012; Ak, 2014). Bu özellik ayrıca, krom demirde

katı bir çözelti içindeyken oluşur ve düşük karbonlu çeliklerde miktar %12'yi aştığında çok belirgin hale gelir. Bu korozyona dayanıklı film 5 nm kalınlığında olabilir ve alttaki metali korur (Tembhurkar vd., 2021). Değişen miktarlarda Cr_2O_3 içerir. Oksitleyici bir ortamda, filmde aşınma yoluyla ortaya çıkan herhangi bir kusur hızla onarılır böylelikle film kendi kendini onarır. Bununla birlikte, hiçbir paslanmaz çeliğin tamamen korozyona dayanıklı olmadığı bilinmektedir. Pasifliği korumak ve asit muamelesinden sonra pasifliği eski haline getirmek için oksijene ihtiyaç duyulmaktadır. Böylelikle, paslanmaz çelikler düşük oksijenli ve düşük sirkülasyonlu ortamlarda, zayıf korozyon direncine sahiptir (Singh vd., 2022).

Kimyasal bileşim açısından paslanmaz çelikler, çeliğin (demir ve karbon) temel elementlerini ve ek olarak krom, nikel içerir. Hemen hemen tüm paslanmaz çelikler (bazı martenzitik çelikler hariç) düşük karbon içeriğine sahiptir, genellikle %0.15'in altındadır. Bunun temel nedeni, belirli koşullar altında (örneğin, bir kaynağın ısıdan etkilenen bölgesinde), karbonun tercihen kromla birleşerek tane sınırlarında krom açısından zengin karbon birikintileri oluşturabilmesi ve bu bölgedeki hâkim krom seviyelerini tüketebilmesidir (Kaya, 2010). Kromun kendisi paslanmaz çeliğin tanımlayıcı unsurudur. Paslanmaz çelikte bulunabilecek başka elementlerde vardır, ancak tüm paslanmaz çelik kaliteleri bunları içermez. Östenitik kalitelerde paslanmaz çelik üretmek için nikel eklenir. Bu çelikler genellikle %9 nikel içerir ve özellikle asitlere karşı geliştirilmiş korozyon direncine sahiptir. Paslanmaz çeliklerin asidik ortamlarda korozyon direncini artırmak için molibden ve tungsten elementleri eklenebilir (Ak, 2014).

Metalurjik yapıya göre paslanmaz çelik kategorileri östenitik, ferritik, martenzitik, çökelme sertleşmesi ve dubleks paslanmaz çelikler olmak üzere beş gruba ayrılabilir (Başyiğit, 2014). Östenitik paslanmaz çelikler, endüstrilerde kullanılan en yaygın ve önemli ölçüde en büyük paslanmaz çelik grubudur (Hernández-Trujillo vd., 2021). Bu çelikler arasında 316L östenitik paslanmaz çelik, iyi kaynaklanabilirlik, uygun oyuk korozyon direnci, yüksek sıcaklıkta kabul edilebilir performans ve düşük sıcaklıkta oksidasyon direnci gibi mühendislik özelliklerinden dolayı özel olarak kullanılmaktadır. Östenitik alaşımlar stratejik ve önemli mühendislik uygulamalarında oldukça dikkate alınır (Wang vd., 2020; Chander vd., 2012; Moteshakker vd., 2016). Paslanmaz çeliklerde bulunan önemli alaşım elementleri krom ve nikel elementleridir. Östenitik paslanmaz çelikler, çeşitli özelliklerin kombinasyonundan dolayı çeşitli endüstrilerde büyük ilgi

görmüştür (Da Luz vd., 2020; Devendranath Ramkumar vd., 2015). Bununla birlikte, bu paslanmaz çeliklerin düşük aşınma direnci, endüstriyel/tıbbi mühendislik uygulamalarında kullanımlarını sınırlamıştır. Östenitik paslanmaz çelikler, kontrollü soğutma ve su verme sırasında yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra faz dönüşümü göstermezler. Bu nedenle uygun bir ısıl işlem veya kaynak prosedürü tasarlanarak östenit tane boyutu kontrol edilebilir (Sabzi vd., 2021).

AISI 316 tipik bir östenitik paslanmaz çeliktir ve modifiye edilmiş 316 çelik, 316L çelik olarak da bilinir. Amerikan standardında AISI (American Iron and Steel Institute) 316L olarak nitelendirilen paslanmaz çelik malzemenin Avrupa standartlarında karşılığı EN 1.4404 ve X2CrNiMo17-12-2, UNS normuna göre ise S31603 olarak adlandırılmaktadır (Dökme, 2018; Yürük, 2022). Kaynak kabiliyetinin optimum olması için düşük karbonlu olarak üretilir ve bu durum "L" son eki ile gösterilir (Dökme, 2018). Yüksek sıcaklıkta sürünme ve korozyona karşı iyi direnci nedeniyle yapı malzemesi olarak kimya, petrokimya, enerji mühendisliği ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Huang vd., 2016). Paslanmaz çeliklerde nikelin %8'in üzerinde olması östenit fazını oda sıcaklığında kararlı hale getirir ve bu tür paslanmaz çelikler östenitik paslanmaz çelik olarak isimlendirilir (Ertek Emre vd., 2017). Petrokimya endüstrisinde farklı hizmet koşullarında çalışan çeşitli bileşenlere bağlı olarak, korozif ortamda çalışan bileşenler sırasıyla paslanmaz çelikten ve normal koşullarda çalışan bileşenler normal çelikten yapılır. Bu nedenle, farklı malzemelerle bileşenlerin birleştirilmesi için farklı bağlantıların olması kaçınılmazdır (Khidhir ve Baban, 2019).

1.2. P355GH Yüksek Sıcaklığa ve Basınca Dayanıklı Çelik

EN 10028-P355GH (ASTM A516 grade 70) olarak adlandırılan basınca dayanıklı çelik, hizmet koşullarında yüksek mekanik özellikleri nedeniyle kazan malzemesi olarak yaygın kullanılan bir karbon çeliği türüdür (Kacar ve Acarer, 2004; Çayırhan, 2019). P355GH basınçlı kap çelik levhaları, çekme mukavemeti, çentik tokluğu, süneklik ve yorulma özellikleri nedeniyle basınçlı kaplar ve kazan üretmek için kullanılır. Bu çelikler kazanların genellikle iç yapısında kullanılır. Yüksek kaynaklanabilirlikleri ve ince taneli yapıları ile karakterize edilirken, yüksek sıcaklıklar için uygun hale getiren gelişmiş özelliklere sahiptir. Kaynak sonrasında ısı tesiri altında kalan bölgesinde sertleşme meydana gelmediği için kolay kaynaklanabilir bir malzemedir. Böylelikle neredeyse tüm

kaynak prosesleri ile kaynak işlemi gerçekleştirilebilir. Mükemmel kaynaklanabilirliği nedeniyle bu çelik, buhar üreten tesisler, borular, kızdırıcı borular, basınçlı kaplar, depolama tankları ve düşük basınçlı ısı eşanjörlerinin imalatında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Pathak vd., 2022). P355GH çeliğinin iyi kaynaklanabilirliğine rağmen, bu tip çeliğin yüksek sıcaklık amaçları için yaygın olarak kullanıldığını akılda tutarak, kaynağı sırasında mikroyapısal değişiklikleri tahmin etmek çok önemlidir (Bjelić vd., 2017). P355GH çelikleri yüksek bir basınca maruz kaldıklarında bile iyi plastisite ve tokluk gibi mekanik özelliklere sahiplerdir. Bu iyi mekanik özelliklerinden dolayı kolay bir şekilde deformasyona uğramazlar ve uzun süre kullanılmaya devam edilebilir (Qazi vd, 2020; Çayırhan, 2019).

P355GH çeliğinin yüksek çekme mukavemeti ve darbe tokluğu, onu ısı eşanjörlerinde sıcak sıvıları taşıyan borular ve borular için birincil seçim haline getirir (Bjelić vd., 2017). P355GH çeliğinin geleneksel sıvı haldeki birleştirme işlemleri kullanılarak birleştirilmesinde bazı problemler meydana gelebilir. Eritme kaynağı teknikleri, daha büyük bir ısıdan etkilenen bölgenin varlığı ve bunun sonucunda ana metalurjide meydana gelen değişikliklerle karakterize edilir ve mikroskobik ölçekte tane sınırlarında korozyon üretir. Bu, yüksek sıcaklık ve stres altındaki uygulamalarda önemli olan birleşim bölgesinin mekanik özelliklerini etkileyebilir. Bu nedenle, P355GH çeliğinin birleştirilmesinde, bu tür istenmeyen mekanik ve metalurjik değişiklikleri en aza indirilmelidir (Çayırhan, 2019).

1.3. Tungsten Inert Gaz Kaynağı (TIG)

TIG kaynak yöntemi farklı metallerin birleştirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir prosestir. Tungsten inert gaz kaynağında erimeyen tungsten elektrot kullanılır. TIG kaynağı, doğru akım (DC) veya alternatif akım (AC) kullanılarak gerçekleştirilebilir. İlk durumda, tungsten elektrot, doğru akım elektrotu pozitif ve doğru akım elektrotu negatif modları ile sonuçlanan güç kaynağının pozitif veya negatif terminaline bağlanabilir (Lathabai, 2011). Tungsten, 3410 °C'lik yüksek erime noktası nedeniyle iyi bir elektrot malzemesidir. Dolgu metali, genellikle çıplak metal dolgu çubuğu olarak harici bir kaynaktan eklenir. Kaynak havuzu alanı, argon gibi koruyucu bir soygaz tarafından atmosferden ve olası kontaminasyondan korunur. Koruyucu gaz, kaynak yapılacak malzemeye göre seçilir. Argon koruyucu gazı çelikler, paslanmaz çelikler, alüminyum ve

titanyum dahil olmak üzere çok çeşitli malzemelerin kaynağında kullanılabilen en yaygın kullanılan koruyucu gazdır. Argon + %2 ila %5 H_2 koruyucu gaz karışımı argona hidrojen eklenmesi gazı hafifçe azaltarak yüzey oksidasyonu olmadan daha temiz görünümlü kaynakların üretilmesine yardımcı olur. Ark daha sıcak ve daha dar olduğu için daha yüksek kaynak hızlarına izin verir. Dezavantajları, karbon çeliklerinde hidrojen çatlaması ve alüminyum alaşımlarında kaynak metali gözenekliliği riskini içermesidir. Helyum ve helyum/argon karışımları, argona helyum eklenmesi arkın sıcaklığını yükseltecektir. Bu, daha yüksek kaynak hızlarını ve daha derin kaynak penetrasyonunu destekler. Helyum veya helyum/argon karışımı kullanmanın dezavantajları gazın yüksek maliyeti ve ark başlatmanın zorluğudur.

TIG kaynak yöntemi sağlamlık, kaynak dikişinin doğrudan izlenebilmesi, kaynak işlemi sonrası cüruf temizleme gibi gereksinimlerin olmaması, kaynak dikiş yüzeyinin oldukça pürüzsüz olması gibi avantajlara sahiptir. Ancak yüksek ısı girdisi, uzmanlık gerektirmesi ve düşük işlem hızı bu kaynak yönteminin uygulanmasında önemli dezavantajlardır (Smith, 2007). TIG kaynağının avantajları ise, dolgu metali gerektiğinde elle eklenir, koruyucu gaz kaynak bölgesini ve tungsteni korur, Yüksek kaliteli, temiz kaynaklar üretir ve diğer işlemlerden daha fazla metali kaynak yapar. Koruyucu gaz olarak kullanılan argon, helyum veya bunların karışımlarının sunduğu mükemmel koruma, kaynak işleminin çok temiz olduğu anlamına gelir (Kahraman vd., 2004).

1.4. Delta Ferrit Fazı (δ-ferrit)

Çeliğin yapısında bulunan HMK demir kafes yapılı delta ferrit katılaşma süresinde ilk katılaşan yapıdır ve bu yapının en önemli özelliği ise sıcak çatlakları önlemesidir. Çeliğin yapısındaki bu delta ferrit oranında krom ve nikel oranları (eşdeğerlikleri) önemli rol oynamaktadır. Diğer alaşım elementleri de katılaşma süreci boyunca etkili olabilmektedir. Krom eşdeğeri ve nikel eşdeğeri malzemenin iç yapısında bulunan alaşım elementlerine ve bunların östenit ve ferrit yapı oluşturma etkilerine göre formüllerle belirlenir. Ferrit miktarının ölçümü için metalografik veya manyetik yöntem kullanılmaktadır (Vinoth Jebaraj vd., 2018).

Kaynak metalinin mikroyapısı onun birçok özelliğini etkiler. Paslanmaz çelikte belirli bir miktarda delta ferrit, akma ve çekme mukavemetini arttırır, stres-korozyon

çatlamasına karşı direnci arttırır, kaynak metalinde sıcak çatlamayı azaltır. Bazı uygulamalar için delta ferritin olumsuz etkileri, ferrit içeren alaşımların daha yüksek manyetik geçirgenliğini veya sigma faz oluşum oranındaki bir artış nedeniyle uzun süreli yüksek sıcaklıkta hizmet sırasında darbe mukavemetinin azalmasına sebep olabilir (Hull, 1973). Delta ferrit oluşumunun nedeni çok pasolu kaynaklarda daha yavaş soğuma nedeniyle östenit fazının ferrit fazına dönüşümüdür (Tumu vd., 2018).

1.5. Farklı Metallerin Kaynağı ve Verimliliği

Birbirine benzemeyen metallerin birleştirilmesi, her bir metalin termal iletkenliğinin önemli ölçüde farklı olması sebebiyle kompleks bir prosestir. Farklı metal kaynakları (DMW), basınçlı ağır su reaktörlerinde veya hafif su reaktörlerinde kullanılan basınçlı kaplar, kazanlar ve buhar jeneratörlerinin tipik olarak ferritik çeliklerden yapıldığı termik ve nükleer enerji santrallerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Pandey vd., 2017; Sirohi vd., 2021a). Genel olarak, birbirine benzemeyen metallerin kaynağında çözünebilirlik gereklidir. Bununla birlikte, bazı durumlarda, başarılı bir bağlantı oluşturmak için diğer ikisi ile çözünür olan üçüncü bir metale ihtiyaç duyulur. Birbirine benzemeyen metallerin termal genleşme katsayıları büyük ölçüde farklılık gösterirse, kaynaklı bağlantının herhangi bir sıcaklık değişimi sırasında intermetalik bölgede iç gerilmeler meydana gelmektedir (Liu, 2010).

Metal malzemeler, farklı kaynak kabiliyetine sahiptirler. Kaynaklanabilirlik terimi, bir veya iki farklı malzemeden oluşan parçaların kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğini ve amaçlanan hizmette tatmin edici bir şekilde performans gösterme kapasitesini ifade eder. Bu terim birleştirme veya seçilen metaller, uygulanan kaynak yöntemi ve kalınlık faktörü aynı anda dikkate alınır (Uluocak, 2008). Bu dikkate alınan parametreler sonucu oluşturulan kaynak dikişinin hedeflenen kalite seviyesinde olmalıdır. Kaynakların birleştirme verimliliği, kaynak sonrası birleştirmelerden elde edilebilecek güvenilirlik olarak tanımlanabilir (Özkan, 2019). Metal/metaller kaynak yöntemi ek kaynak metali kaynak işlem prosesinin makine gaz uygunlukları ile oluşturulan koşullar bu kaynaklanabilirliği etkilemektedir. Kaynaklanabilirlik, kesit şekli ve kalınlığından, birleştirilecek yüzeylerin temizliğinden ve metallerin mekanik özelliklerinden de etkilenir. Bununla birlikte, bir ana metalin kaynaklanabilirliğini

etkileyen birincil faktör, kimyasal bileşimidir. Her metal türü için, tatmin edici özelliklere sahip sağlam kaynakların üretilebileceği kaynak prosedürü sınırları vardır. Bu sınırlar genişse, metalin iyi kaynaklanabilirliğe sahip olduğu söylenir. Sınırlar darsa, metalin zayıf kaynaklanabilirliğe sahip olduğu söylenir. Olağanüstü önlemler gerekliyse, malzeme genellikle kaynaklanamaz olarak adlandırılır. Bununla birlikte, bazı durumlarda ve belirli endüstrilerde, kaynaklanamayan malzemeler sıkı kontroller altında sıkı denetim prosedürleri ve kabul kriterleri ile rutin olarak kaynaklanır. Kaynak tüm montaj için tasarım kriteri dahilinde istenen işlevi elde etmek için ve en iyi yöntem olduğu için kaynaklanabilirliği kontrol etme yöntemleri izlenir (İrsel, 2022a; Parzych ve Dziurka, 2018; Weman, 2012; Condra, 1997).

Çeliğin sertleşme eğilimini gösteren ve çeliğin element içeriğine bağlı olarak kaynak kabiliyetini belirten bir formül elde edilip çeliğin karbon miktarı saptanabilmektedir. Böylelikle saptanan bu değere çeliğe bu sertliği veren karbon miktarına karbon eşdeğeri denmektedir (Genç, 2021). Çeliğin içerisinde bulunan her bir element bu çeliğin sertliğini ve kaynaklanabilirliğini farklı boyutlarda etkileme eğilimindedir (Türk, 2021). Karbon eşdeğerini hesaplamak için kullanılan formülleriden biri yapı çelikleri için tavsiye edilen American Welding Society'ye (AWS) dayanan formüldür (Odebiyi vd., 2019).

$$C_{eş}=\%C+\frac{\%Mn+\%Si}{6}+\frac{\%Cr+\%Mo+\%V}{5}+\frac{\%Cu+\%Ni}{15} \quad (1.3)$$

Eğer karbon eşdeğeri 0.35'e kadar ise mükemmel kaynaklanabilir, %0.36-%0.40 değerleri arasında ise çok iyi kaynaklanabilir, %0.41-0.45 arasındaki değerler iyi kaynaklanabilir, %0.46-%0.50 değerleri arasında ise kötü ve karbon eşdeğeri %0.50 ve üzerinde bir değerde ise çok kötü kaynak kabiliyetine sahiptir denilebilir (Özturan, 2022; Özturan vd., 2022).

Kaynaklı bağlantının yüksek sıcaklıktaki mekanik özellikleri, hizmete girmeden önce kaynaklı bağlantının mikroyapısına ve mekanik özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. Östenitik paslanmaz çeliğin kaynağıyla ilgili en büyük sorun, tane sınırında krom karbür çökeltilerinin ayrılmasından kaynaklanan sıcak çatlamadır. Delta ferritin varlığı %3-20'lik sıcak çatlama oluşumunu önleyebilir. Daha yüksek miktarda delta ferritin varlığı, σ faz dönüşümünün varlığında yüksek sıcaklıkta sıcak çatlamaya da duyarlıdır (Tumu

vd., 2018). Kaynaklı bağlantının yüksek sıcaklık dayanımını arttırmak için ferrit parçalarının oluşumu önlenir. Mukavemet ve tokluğun kombinasyonu, eklemin yüksek sıcaklıktaki mekanik davranışına karar vermede de önemli bir rol oynadı. Bu nedenle, çalışmanın amacı, daha yüksek sıcaklıkta sürünme mukavemetini türeten kaynaklı birleştirmenin optimum mukavemet, Charpy tokluğu ve mikroyapı kombinasyonunu elde etmektir (Yılmaz, 2017; Tümer ve Yılmaz, 2016).

2. BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

Farklı metal kaynakları (Dissimilar Metal Welding) kimya, gıda, petrokimya tesisleri, otomobil endüstrisi, kazanlar ve buhar jeneratörlerinin tipik olarak karbon çeliklerinden yapılan termik ve nükleer enerji santrallerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Jahanzeb vd., 2017; Maurya vd., 2021). Bazı endüstriyel sistemlerde bu karbon çeliklerinin yanında yüksek sıcaklıklarda daha iyi korozyon direnci özellikleri ve güvenlik için östenitik paslanmaz çelikler kullanımı gerekmektedir (Çayırhan, 2019). Farklı metallerin kaynağı, farklı fiziksel özellikler ve kimyasal bileşimler nedeniyle benzer metallerin kaynağına kıyasla daha zordur. Östenitik paslanmaz çelikler ile düşük miktarda karbon içeren ferritik çelikler arasındaki benzer olmayan kaynaklı bağlantıya özellikle enerji dönüşüm sistemlerinde, yüksek sıcaklık tank uygulamalarında, gıda endüstrisinde, iş makinelerinde gereksinim duyulmaktadır. Farklı malzemelerin kaynağı endüstride, üretim koşullarının optimizasyonuna avantaj sağlamaktadır (Khidhir ve Baban, 2019).

Literatürde farklı metallerin kaynağı ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Huang vd. (2016), yapmış oldukları çalışmada düşük karbonlu S355JR ve östenitik 316L paslanmaz çeliğini gaz tungsten inert gaz kaynağı (GTAW veya TIG) yöntemi ile birleştirmişlerdir. ER309L kaynak dolgu malzemesi ile 7 pasoda kaynağı gerçekleştirmişlerdir. Mikroyapısal özelliklerini gözlemlemek için optik mikroskop, SEM, EDS ve XRD metodlarını kullanmışlardır. Optik inceleme sonuçlarında kaynak metalinin mikroyapısının östenit ve δ-ferrit olduğunu ve kaynak dikişinde çapraz dağıldığını gözlemlemişlerdir. Mekanik özelliklerini gözlemlemek için mikrosertlik, çekme testi, çentik darbe testi ve elektrokimyasal korozyon analizlerini değerlendirmişlerdir. Kaynak bölgesinin mikrosertliği ortalama 257.06 HV, maksimum sertlik 268 HV olarak elde

etmişlerdir. S355JR/AISI 316L ana malzemelerinin ve S355JR/AISI 316L ısı tesiri altında kalan bölgelerinin (ITAB) mikrosertliğinden yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Kaynak bölgesinde çekme mukavemeti 533.4 MPa ve kırılma pozisyonunun S355JR ITAB'da olduğunu gözlemlemişlerdir. En düşük çentik darbe tokluğunu kaynak bölgesinde tespit etmişler ve bunun sebeplerini; karbon alaşımlarının difüzyonu, kaynak bölgesinde düzgün olmayan mikroyapı dağılımı ve kaynak bölgesinde oluşan üst beynit ve widmanstatten ferritin daha sert mikroyapıya sahip olmasına dayandırmışlardır. Gerçekleştirdikleri elektrokimyasal korozyon testinde kaynak metalinin korozyon direncinin 316L ana malzemeye göre daha az olduğunu tespit etmişlerdir.

Sabzi vd. (2021), darbeli akım gaz tungsten ark kaynağındaki darbe akımı değişikliklerinin AISI 316L-AISI 310S paslanmaz çeliklerin farklı kaynağının çeşitli özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kaynaklı bağlantıların farklı alanlarındaki mikroyapısal gelişimi incelemek için Optik Mikroskop (OM) ve Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) teknikleri kullanmışlardır. Ayrıca darbeli akım değişikliklerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini değerlendirmek için çekme, Charpy darbe testi ve Vickers mikrosertlik testleri gerçekleştirmişlerdir. Kaynak metalinin mikroyapısı, tane sınırlarında düşük miktarda delta ferrit ile östenit dendritlerinden oluştuğunu belirlemişlerdir. Ayrıca bu çalışmada tüm kaynaklı bağlantıların AISI 316L paslanmaz çelik tarafından kırıldığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, Charpy darbe ve mikrosertlik testlerinin sonuçları, kaynak metalinin sertlik değerinin ve kırılma enerjisinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Yüzeylerin fraktografisi hem çekme hem de Charpy darbe testleri numuneleri için tamamen sünek bir kırılma gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Sirohi, Pandey, vd. (2021), tungsten inert gaz kaynağı kullanarak benzer olmayan 9Cr–1Mo (P91) ve SS304H çelik levhalarını Ni bazlı ERNiCrCoMo-1 süper alaşım dolgu metali kullanarak birleştirmişlerdir. Isıdan etkilenen farklı bölgelerdeki bağlantıların metalurjik ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kaynakların metalografik karakterizasyonu, çökelti boyutu, matris içindeki dağılımı, morfolojisi ve kimyasal bileşimi için enerji dağılımlı spektroskopi ile donatılmış optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri optik incelemeler sonucunda P91 ve SS304H çeliğinin ara yüzeyindeki kaynak metalinin sınırlarda alaşım elementleri ayrımı ile sütunlu ve hücresel yapı gösterirken kaynak

merkezinden uzaklaştıkça bölgenin ince eş eksenli ve dendritik olarak katılaştığını gözlemlemişlerdir. Sonuçlar, kaynaklı bağlantıların mekanik davranışında değişikliğe yol açan, kaynaklar boyunca tam bir heterojen mikroyapı oluşumunun olduğunu göstermiştir.

Sachin vd. (2020), martenzitik A335-grade P91 ve yüksek alaşımlı ferritik östenitik A182F69 çeliklerini tungsten inert gaz kaynağı ile birleştirip kaynak bölgesinin mikroyapı ve mekanik davranışını araştırmışlardır. Mikroyapı çalışmaları kaynak termal döngüsünün bir sonucu olarak katılaşma ve katı hal faz dönüşümü nedeniyle oluşan kaynak metali boyunca mikroyapının çeşitliliğini gözlemlemişlerdir. Kaynak ile birleştirilmiş metalin mekanik özelliklerini iyileştirmek için kaynaklı parçaları kaynak sonrası 760 °C ve 810 °C'de 2 saat ısıl işleme tabi tutmuşlardır. Mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla çekme ve mikrosertlik testleri gerçekleştirmişlerdir. Kırılmış çekme numunesini enerji dağılımlı X-ışını spektroskopi (EDS) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak karakterize etmişlerdir. Sonuç olarak, ısıl işlem sonrasında ısı tesiri altında kalan bölgelerde sertliği ve mikroyapısı ihmal edilebilir bir etki gözlemlenirken kaynaklı bölgenin çekme dayanımında düşüş gözlemlemişlerdir.

Verma vd. (2016a), 2205 östeno-ferritik ve 316L östenitik paslanmaz çelik olmak üzere iki farklı paslanmaz çeliğin kaynaklanabilirliğini, mikroyapıları ve mekanik özelliklerini, dubleks iki farklı elektrot yardımıyla metal ark kaynağı prosesi kullanarak incelemişlerdir. Kaynaktan sonra, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak farklı bağlantı bölgelerinin mikroyapısı değerlendirilirken, ana metaller ve kaynak bölgesinin kimyasal bilgilerini SEM'e bağlı enerji dağılımlı spektrometre (EDS) ile elde etmişlerdir. Her iki elektrot için optimum ferrit içeriği gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, bu iki farklı çeliğin metal ark kaynağı ile kusursuz bir şekilde birleştirilebildiğini ve 2205 östeno-ferritik ve 316L östenitik paslanmaz çelik arasındaki bağlantılar için E2209 elektrodunun mekanik ve mikroyapısal özellik açısından daha uygun olduğunu gözlemlemişlerdir.

Kulkarni vd. (2020), AISI 316L ve Alloy 800 farklı metalleri aktif edilmiş TIG (A-TIG) kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerini; mikrosertlik, çekme testi ve Charpy darbe testi ile, mikroyapısal özelliklerini ise optik mikroskop, SEM, EDS, EPMA, geçirimli elektron mikroskobu (TEM), X-ray difraksiyonu (XRD) analizleri ile incelemişlerdir. Kaynak füzyon

bölgesinin östenitik mikroyapıda olduğunu tespit etmişlerdir. AISI 316L füzyon bölgesinde ferritik-östenitik yapıya sahip bir bölge mevcut olduğunu gözlemlemişlerdir. Alloy 800 ısı tesiri altında kalan bölgesinde önemli ölçüde tane irileşmesi gözlemlemişlerdir. Füzyon bölgesinde ortalama darbe test değerini 91 J olarak ölçmüşlerdir. Aynı bölgede akma dayanımını 275 MPa ve çekme dayanımını 515 MPa ve uzama değerini %51 olarak tespit etmişlerdir.

Jahanzeb vd. (2017), 316L östenitik paslanmaz çelik ve SS400 ferritik çelik çiftini tungsten inert gaz (TIG) kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve kaynak bağlantılarında mikroyapının mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmak için bazı mikroyapısal testler gerçekleştirmişlerdir. Birbirinden farklı kaynak bağlantılarındaki fazları ve deformasyon mekanizmalarını belirlemek için, optik mikroskop (OM), elektron geri saçılımlı kırınım (EBSD) ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM) teknikleri ile deforme olmamış ve deforme olmuş numunelerin mikroyapı karakterizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Ana metallerin, kaynak bölgesinin ve ısıdan etkilenen bölgenin mekanik özelliklerini değerlendirmek için farklı kaynak bölgelerinde mikrosertlik ölçümleri ve dijital görüntü korelasyonu (DIC) ile mini gerilim testi gerçekleştirmişlerdir. Deforme olmuş numuneler üzerindeki yerel gerinim heterojenliği, tane morfolojisi ve bileşen fazlar açısından mikroyapı heterojenliği ile açıklamışlardır. Düzensiz morfolojiye sahip bir dendritik yapıdan oluşan kaynak bölgesinin gerinim dağılımlarının düzgün olmadığını tespit etmişlerdir. OM ve EBSD analizi yardımıyla, farklı kaynak bağlantılarındaki mikroyapı heterojenliğinin füzyon hattına göre farklı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Chen vd. (2021), 316L ve GH909 farklı metallerini lazer kaynak prosesiyle birleştirmişlerdir. Bu birleşimlerde yüksek güçlü yüksek kaynak hızı ve düşük güçlü düşük kaynak hızının etkilerini incelemişlerdir. Kaynak morfolojisi, mikroyapısı ve mekanik özellikleri karşılaştırıp mikroyapısal ve mekanik analizler gerçekleştirmişlerdir. İki kaynak arasındaki eriyik havuzunun farklı boyutlarını, sonlu eleman sıcaklık alanı simülasyonu ile doğrulamışlardır. Sonuç olarak, düşük güçlü düşük kaynak hızına sahip kaynak, erimiş havuzun kenarında daha küçük bir sıcaklık gradyanına ve daha düşük bir soğuma hızına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Küçük sıcaklık gradyanının durumu, eleman dağılımını etkili bir şekilde daha pürüzsüz hale getirdiğini, arayüz tabakasının

mikroyapı heterojenliğini azalttığını ve ısı tesiri altında kalan bölgede tane sınırlarının sıvılaşmasını azalttığını, böylece kaynaklı birleşimin gerilme mukavemetini iyileştirdiğini belirlemişlerdir. 316L/GH909 farklı metal kaynağındaki farklı fazların detaylı ve sistematik element analizini gerçekleştirmişlerdir.

Küçüköner vd. (2020), paslanmaz AISI2205 çelik ve basınçlı kap P355GH çeliğini tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Sırasıyla (AISI 2205-AISI 205), (P355GH-P355GH) ve (AISI 2205-P355GH) olmak üzere üç farklı birleştirme işlemi yapmışlardır. Kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme, eğme, Charpy darbe çentiği ve sertlik testleri yapmışlardır. Ayrıca kaynak bölgesindeki yapısal değişiklikleri belirlemek için mikroyapı incelemeleri gerçekleştirmişlerdir. Çekme testleri sonucunda kopma AISI2205-AISI2205 bağlantılarında kaynak metalinden, diğer bağlantılarda P355GH ana malzemeden gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Eğme testinden sonra kaynak bölgesinde gözle görülür bir hata gözlemlememişlerdir. Malzemelerin V-çentik darbe enerjileri karşılaştırıldığında, en yüksek tokluk değeri AISI2205 malzemesinin ısı tesiri altında kalan bölgesinde, en düşük tokluk değerinin ise P355GH kaynak metalinde olduğunu tespit etmişlerdir. Sertlik ölçümlerinde en yüksek sertlik değeri AISI2205 malzemesinin ısı tesiri altında kalan bölgede elde edilirken, en düşük sertlik değerini P355GH malzemesinde ölçmüşlerdir. Mikroyapı çalışmalarında kaynak metalinin dendritik bir yapı içerdiğini ve ana malzeme tarafında ergime sınırına komşu bölgede tanelerin kabalaştığını gözlemlemişlerdir.

Jeraldnavinsavio vd. (2019), dolgu metali olarak ER310 ve ER2594 kullanarak AISI 316L ve AISI 430 çeliklerini TIG kaynak yöntemi ile birleştirerek ana metallerin ve kaynak metalinin davranışını araştırmışlardır. Kaynaklı bölgenin ve ısıdan etkilenen bölgenin mikroyapısal analizi, ısı tesiri altında kalan bölgede karışmamış bölgelerin oluşumunu bulmaya yardımcı olan optik mikroskop yardımıyla incelemişlerdir. Kaynaklarda malzemenin kırılma özelliklerini bulmak için çekme ve darbe testleri gerçekleştirmişlerdir. Çekme testi sonuçlarında dolgu ER2594 kullanılarak yapılan kaynaklarda başarısızlığın AISI 430 bölgesinde meydana geldiğini gözlemlemişler ve ayrıca ER2594 dolgu çubuğu kullanılarak oluşturulan kaynağın daha yüksek nihai çekme mukavemeti gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Verma ve Taiwade (2016b), farklı tipteki östenitik ve östeno-ferritik elektrotların (E309L, E309LMo ve E2209) korumalı metal ark kaynaklı dubleks/östenitik (2205/316L) paslanmaz çeliğin kaynaklanabilirliğini araştırmışlardır. Mikroyapısı, mekanik özellikleri ve korozyon direnci arasındaki ilişkiyi ele almışlardır. Sonuçlar, elektrot bileşimindeki değişikliğin, vermiküler ferrit, lathy ferrit, widmanstatten ve intragranüler ostenit gibi farklı karmaşık fazların gelişmesiyle kaynaklarda mikroyapısal değişikliklere yol açtığını gözlemlemişlerdir. Kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri, bileşimlere ve katılaşma modlarına göre farklılık gösterdiğini tespit etmişler. Bununla birlikte, tüm kaynakların oyuk korozyon direnci klorür çözeltisinde farklı davranışlar gösterdiğini tespit edip tüm kaynaklarda optimum ferrit içeriği elde edildiğini belirlemişlerdir.

Tumu vd. (2018), AISI 316L ve Duplex 2205 paslanmaz çelik arasındaki farklı kaynak bağlantılarını incelemişlerdir. Bu iki farklı çeliği ER316L ve ER309L dolgu teli ile darbeli akım gaz tungsten ark kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kaynak bağlantıları için metalurjik ve mekanik karakterizasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Kaynak bağlantılarındaki kusuru ve füzyon bölgesindeki yapısal değişiklikleri görmek için makro inceleme ve optik mikroyapı incelemesi gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, her iki dolgu telinde de hatasız kaynağın elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Vinoth Jebaraj vd. (2018), östenitik paslanmaz çelik 316L ile dubleks paslanmaz çelik 2205 arasındaki farklı kaynağın mekanik ve korozyon özelliklerine mikroyapısal değişikliklerin etkisini incelemişlerdir. Füzyon bölgesinde gözlemlenen, delta ferrit (δ) çekirdeklenmesi gibi mikroyapısal değişiklikler ısı tesiri altında kalan bölgede fazlar ve daha kaba ferrit fazlarının oluşumu rapor etmişlerdir. Ayrıca, mikrosertlik, darbe tokluğu ve çekme dayanımı özellikleri gibi kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerini, mikroyapısal değişikliklerle ilişkilendirmişlerdir. Ek olarak, kaynak bölgesinin gerilme özellikleri, akma mukavemeti, nihai gerilme mukavemeti ve uzama yüzdesi, 316L'nin ana metaline benzer olduğunu tespit etmişlerdir. 316L tarafında test edilen tüm numuneler, çekme testi sırasında kırıldığını ve 180° eğme deneyinde herhangi bir çatlak olmadan iyi şekillendirilebilirliğe sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Tembhurkar vd. (2021), 316L östenitik ve 430 ferritik paslanmaz çeliklerin, gaz tungsten ark kaynağı yöntemiyle ve dolgusuz (otojen) kaynak yöntemiyle birleştirilmesinin etkilerini incelemişlerdir. Mikroyapısal inceleme, optik ve taramalı

elektron mikroskobu ile gerçekleştirmişlerdir. ER316L ve ER309L dolgu kaynakları mikroyapı sonuçları, eş eksenli ve sütunlu taneleri gösterdiğini; ER309L kaynağı, vermiküler ferrit üreten ER316L kaynağından daha yüksek $Cr_{eş}/Ni_{eş}$ oranı gösterirken, otojen kaynak lathy ferrit ve martenzit oluştuğunu tespit etmişlerdir. Otojen (dolgusuz) kaynakta mekanik özellikler ölçülmüş ve ER316L ve ER309L dolgu kaynağına göre daha yüksek sertlik elde etmişlerdir. ER309L dolgu ve otojen kaynağa kıyasla ER316L dolgu kaynağında daha yüksek çekme ve darbe mukavemeti ölçmüşlerdir. Kaynak birleşiminde gerçekleştirdikleri korozyon deneyinde ER316L ve ER309L dolgu kaynağına kıyasla otojen kaynakta çökelme oluşumu nedeniyle daha yüksek derecede hassasiyet ve oyuklanma gözlemlemişlerdir, ancak ER309L dolgu kaynağına göre ER316L dolgu kaynağına ve otojen kaynağa kıyasla oyuk korozyonunun etkisi nedeniyle daha düşük olarak belirlemişlerdir.

Ramkumar vd. (2017), 4 mm kalınlığındaki Inconel 718 ve 316L çeliklerinin TIG kaynak yöntemiyle aktive edilmiş akı kullanılmadan birleştirilmesini araştırmışlardır. Optik ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılan mikroyapı incelemesi, Inconel 718'in karışmamış bölgesini ve ayrıca ısıdan etkilenen bölgesinin (ITAB) mikroyapısını açıkça gözlemlemişlerdir. Inconel 718 ve SS316L'nin kimyasal bileşenleri, Enerji Dağılım Analizi (EDAX) kullanarak belirlemişlerdir. Çentik çekme çalışmalarından çentik mukavemet oranının birlikten daha iyi olduğu belirtilmişler ve kaynakların her koşulda sünek olduğunu ortaya koymuşlardır. NaCl çözeltisinde korozyon çalışmaları gerçekleştirmişler ve Inconel 718 ile SS316L benzer olmayan bağlantının benzer SS316L kaynağına göre daha az korozyon direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Benzer olmayan kaynakların nihai çekme mukavemetinin benzer kaynaklara kıyasla daha iyi olduğu ve tüm durumlar için ana metalde kırılma gözlendiği sonucuna varmışlardır.

Sridhar vd. (2021), çalışmasında lazer ve TIG kaynaklı numune ile SS316L'nin mekanik özellikleri ve mikroyapısal analizlerini karşılaştırmışlardır. Kaynak bağlantısını, lazer ve TIG kaynağında 2 mm'lik bir levha için gerçekleştirmişlerdir. Kaynaklı numuneleri, mikrosertlik ve çekme mukavemeti gibi mekanik özellikleri açısından karşılaştırmışlardır. Isıdan etkilenen bölgenin mikrosertliğini, kaynağın kalitesini belirlemek ve ana malzeme ile kaynak arasındaki mukavemet farkını gözlemlemek için

analiz etmişlerdir. Mukavemetin, lazer numunesine kıyasla TIG kaynaklı numunede daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Taraphdar vd. (2021), yapmış oldukları çalışmada, SA516 Gr.70 ferritik çelik ve AISI 304L paslanmaz çeliğinin gaz metal ark kaynağı (GMAW) yöntemi ile birleştirmişlerdir. İki farklı kaynak dolgu malzemesi; ER308L ve ER309L, iki farklı kaynak ağzı geometrisi; konveksiyonel, dar ve değişen kaynak katmanı ile farklı metallerin kaynaklarının artık gerilme alanları üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal veriler ile araştırmışlardır. Tüm kaynaklı bağlantılarda mikroyapısal görünümü heterojen olarak gözlemlemişlerdir. Deneysel ve sayısal araştırmalarda elde ettikleri sonuçlara göre; ısı tesiri altında kalan bölgelerde artık gerilmelerin maksimum büyüklüğünün sebebini benzer olmayan malzemelerin çok pasolu kalın kaynaklarındaki son geçiş sırasına bağlı olduğuna dayandırmışlardır. AISI 304L - SA516 Gr.70 dar kaynak ağzına sahip kaynaklı malzemede son kaynak SA516 Gr.70 tarafında olduğu için, en yüksek artık gerilmeyi SA516 Gr.70 tarafında tespit etmişlerdir.

Çınar vd. (2019), yapmış oldukları çalışmada, 4 mm kalınlığındaki AISI 316L-AISI 316L, AISI 321-AISI 321, AISI 316L-AISI 321 malzemelerini TIG kaynak yöntemi ile V kaynak ağzı açarak tek pasoda kaynaklamışlardır. Kaynak dolgu metali olarak 316L kullanmışlardır. Kaynaklara ait makroskobik ve mikroskobik görüntüleri incelemişlerdir. Mikroskobik görüntülerde; kaynak füzyon bölgeleri, faz sınırları olmadığından dolayı dengesiz ancak homojen katılaşma olarak tanımlamışlardır. Mikroyapı incelemelerinde ince taneli bölgeler gözlenmiş olup, yüksek soğutma hızının sebep olduğu düşünülen karbür faz çökelmeleri gözlemlemişlerdir. Mikrosertlik ölçümleri sonucunda kaynak bölgesinin homojen bir yapı olmasından dolayı standart sapma değerleri dahilinde birbiri ile uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Yılmaz ve Tümer (2013), 316L ve AH36 düşük alaşımlı gemi çeliğinin ER309LT1-¼ özlü tel kullanılarak, V kaynak ağzı ve seramik altlık kullanarak birleştirmişlerdir. 4 farklı koruyucu gaz kullanmışlardır. Kaynak pasoları arası soğutma hızındaki değişiklikleri önlemek amacıyla sıcaklığı 150 °C'de tutmuşlardır. Farklı koruyucu gazların, kaynaklı malzemenin mikroyapısı, darbe tokluğu, mikrosertliği üzerine etkilerini incelemişlerdir. Delta ferrit fazı miktarını hızlı katılaşan ve ısıl çevrimin etkisi altında olmayan bölgelerde daha fazla görmüşlerdir. Koruyucu gazdaki CO_2 miktarı

artması östenit alanlarını arttırdığını gözlemlemiş olup delta ferrit alanlarının azalttığını tespit etmişlerdir. SEM analizi sonuçlarında AH36 çelik tarafından kaynak bölgesine doğru geçişte karbon göçü olduğu ve bunun sonucunda AH36 üzerinde dekarbonize olan ferrit alanı oluştuğunu tespit etmiş olup buna bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir.

3. BÖLÜM

MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM

Bu tez çalışmasında farklı özellikteki iki çeliğin kaynaklı birleşiminin kapsamlı biçimde araştırılmasına odaklanıldı. Östenitik paslanmaz çelik 316L ve yüksek sıcaklık ve basınca dayanımlı P355GH çeliği TIG kaynak yöntemi ile birleştirildi. Kaynak işleminde Askaynak ER309L kodlu 2.4 mm çaplı kaynak teli kullanıldı. 316L ve P355GH ana malzemeleri ve ER309L kaynak telinin kimyasal bileşimleri ağırlıkça (wt%) Çizelge 3.1'de ve mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2'de görülmektedir. 6 mm ve 10 mm et kalınlığında P355GH ve 316L plakalar kesildi. Bu plakalar testlere uygun boyutlarda: 300 × 200 × 10 mm, 150 × 200 × 10 mm, 300 × 125 × 10 mm, 300 × 40 × 10 mm, 300 × 60× 10 mm, 250 × 150 × 10 mm, 300 × 40 × 6 mm, 150 × 90 × 6 mm, 150× 180× 6 mm oluşturuldu (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Kaynak birleşim çizgilerine X kaynak ağzı açıldı ve 3 mm kök mesafesi bırakıldı (Şekil 3.3). İyi bir kaynak sonucu için kaynaklanacak yüzeyler temizlendi ve puntalandı (Şekil 3.4). Kaynak işleminde ER309L tel elektrot tercih edildi (Şekil 3.5-3.7). Koruyucu gaz olarak saf argon gazı kullanıldı. Kaynak işlem parametreleri ilerleme hızı, paso sayısı ve sac kalınlığı gibi unsurlar dikkate alınarak belirlendi (Çizelge 3.3). Kaynak işlemi çoklu paso (4) ile AVISO 350 DC (W) marka kaynak makinesi kullanılarak gerçekleştirildi Kaynaklı plakalar ortam sıcaklığında (26 °C) soğutuldu. Kaynaklı plakalardan test numunelerinin kesilme planı Şekil 3.8'de şematik olarak görülmektedir. Test numuneleri tel erezyon yöntemi ile kesildi (Şekil 3.9-3.13). Tokluk numuneleri 316L ana metali, 316L ITAB, enine kaynak bölgesi, boyuna kaynak bölgesi, P355GH ITAB, P355GH ana metali olacak şekilde her birinden üçer adet toplamda 18 adet tel erezyon yöntemi ile kesilmiştir (Şekil 3.10). Çekme numuneleri Charmilles marka, Robofil 290 model ile 5 mm/dk hız ve saf su ve 0.40 mm - 800 N/mm^2 WEDM tel erezyon yöntemi ile kesildi (Şekil 3.11). Eğme numuneleri Şekil 3.12'de görülmektedir. Kaynak verimliliğini araştırmak için standart çekme numunelerine ek

olarak kesitin kaynak bölgesinde yüksek seviyede azaltıldığı, kaynak birleşim bölgesinin dayanımına odaklanmış, özel çekme testi numuneleri kullanıldı (Şekil 3.13). Kesilen test numunelerinde fazla kaynak dolguları bir freze tezgâhı ile temizlendi (Vouga marka) (Şekil 3.14).

Çizelge 3.1. Ana malzemelerin ve kaynak telinin ağırlıkça kimyasal bileşimi (wt%).

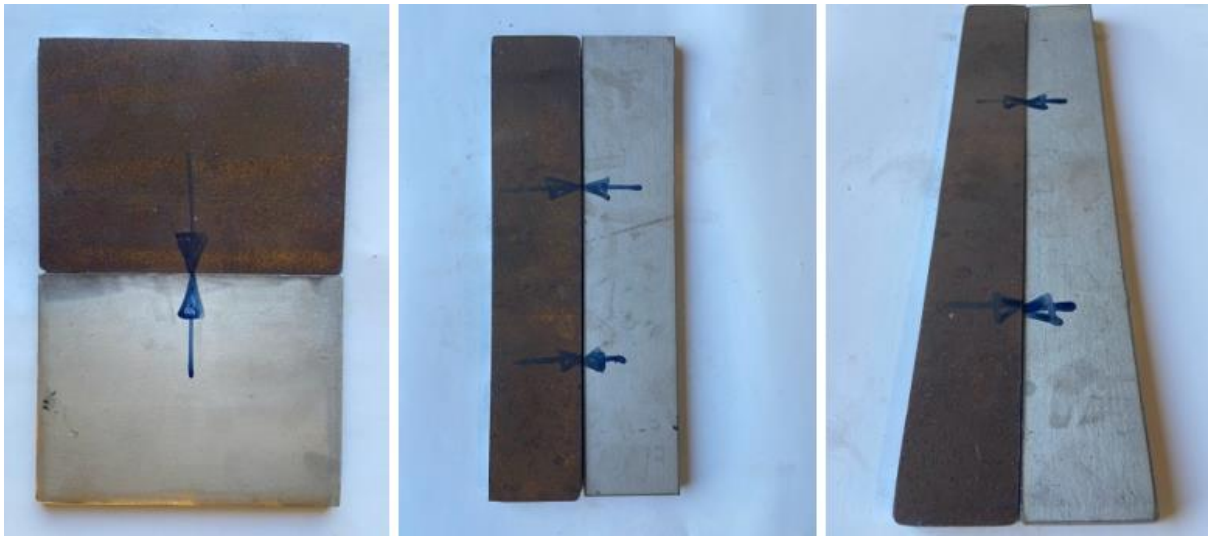
Malzeme	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
316L	<0.03	<2	1	16-18	10-14	2-3	0.045	0.030	Kalan
P355GH	0.22	1.70	0.60	0.30	0.30	0.08	0.025	0.010	Kalan
ER309L	0.03	1.70	0.45	24	13	0.15	(P+S:<0.035	(P+S:<0.035	Kalan

Çizelge 3.2. Ana malzemelerin ve kaynak telinin mekanik özellikleri.

Mekanik Özellikler	316L	P355GH	ER309L
Akma Mukavemeti (MPa)	290	355	410
Çekme Mukavemeti (MPa)	560	650	590
% Uzama	50	20 (min.)	35
Elastik Modülü (N/mm^2)	193000	200000	200000
Charpy V-Notch Darbe Tokluğu (J)	103	120 (-20 °C)	100 (+20 °C)

Çizelge 3.3. Kaynak parametreleri.

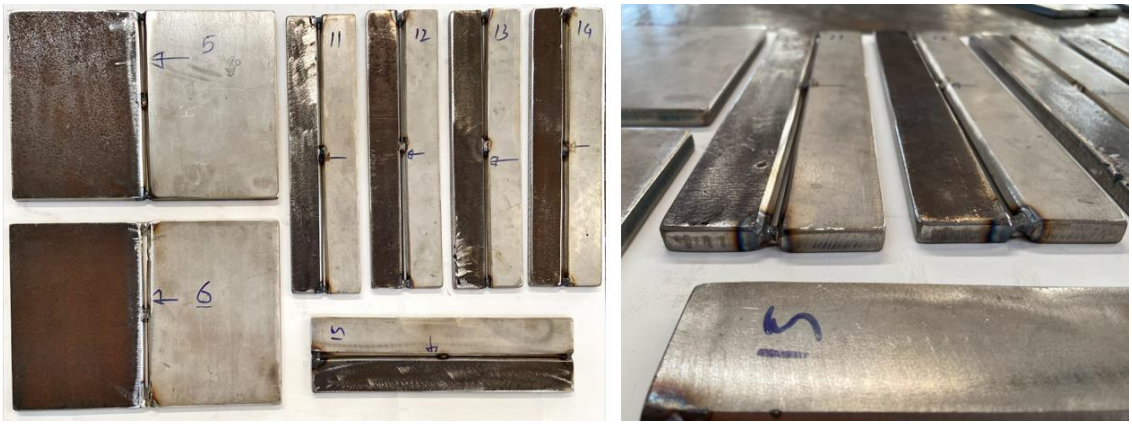
Kaynak prosesi	TIG kaynağı
Koruyucu gaz	Saf argon
Kaynak teli	ER309L (2.4 mm)
Kaynak akımı (A)	100-120
Kaynak voltajı (V)	24
Kaynak hızı (mm/min)	200



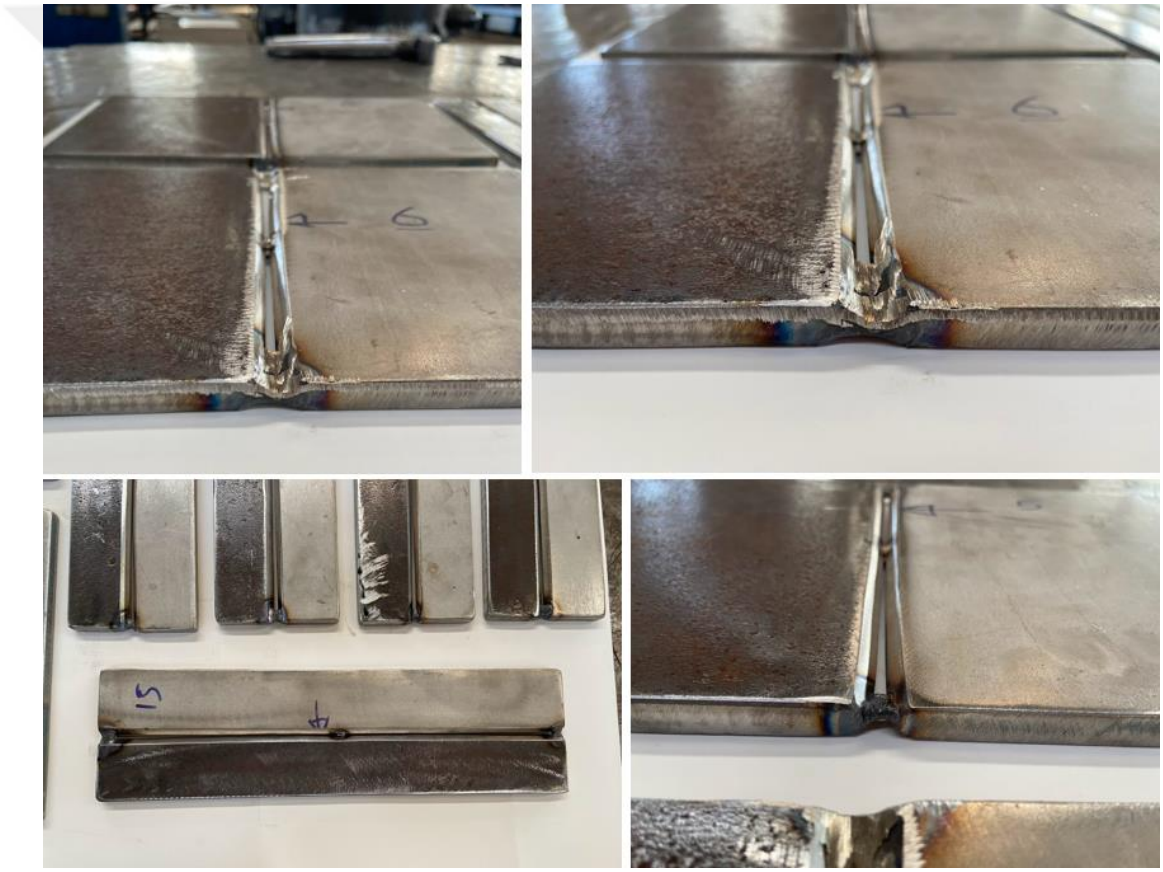
Şekil 3.1. P355GH ve 316L çelik levhalar.



Şekil 3.2. P355GH ve 316L çelik malzemeler.



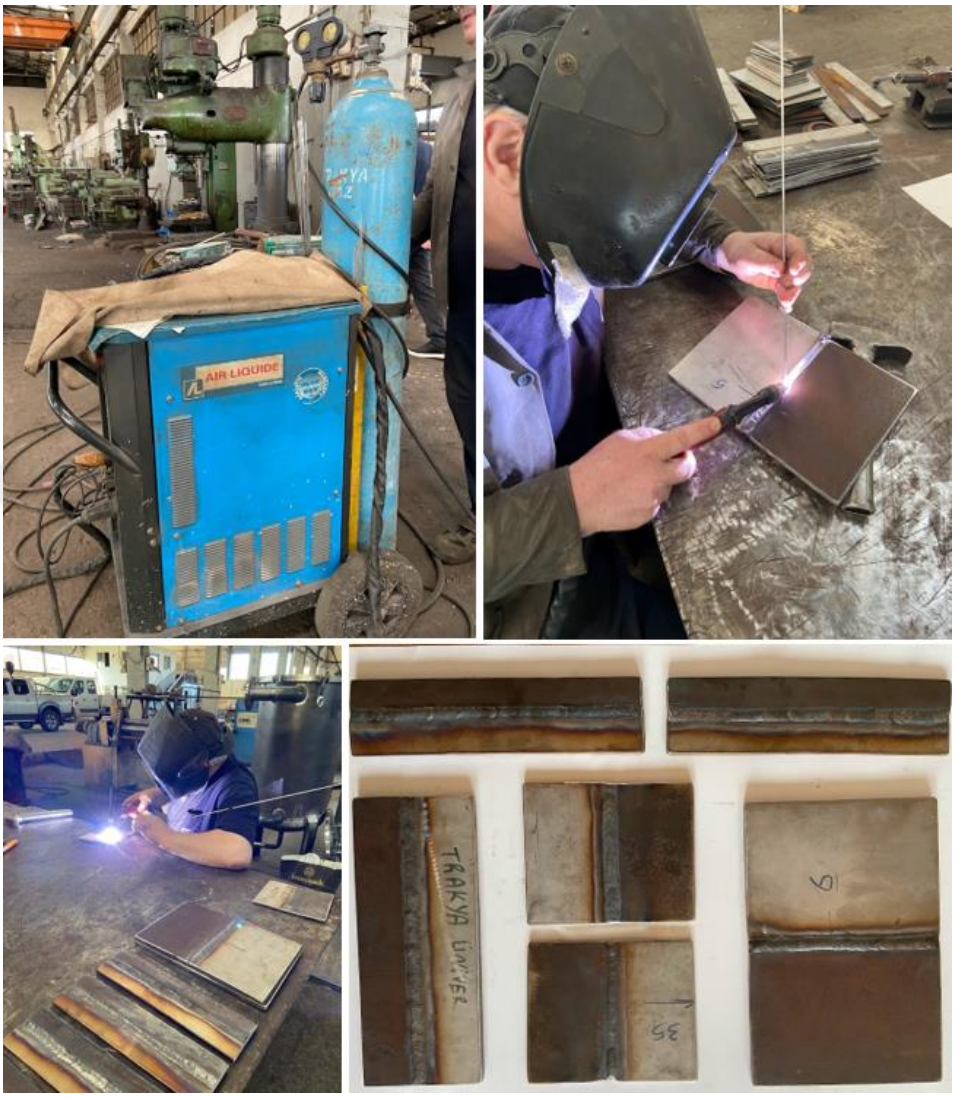
Şekil 3.3. Kaynak işlemi için hazırlanmış plakalar.



Şekil 3.4. 316L ve P355GH çelik plakaların puntalama işlem kesiti.

TIG kaynak prosesi 10 yıllık tecrübeli bir usta tarafından manuel bir şekilde yapıldı. Bu kaynak işleminde, koruyucu gaz olarak saf argon tercih edildi. Elektrodun etrafındaki koruyucu gaz memesi ısınan metali ortamdan ve kimyasal reaksiyonlardan

korumaktadır. Bu kaynakta akım, ısıya dayanıklı ve erimeyen bir tungsten elektrot üzerinden sağlandı. Kaynak akımı 120 A ve kaynak voltajı 24 V olarak seçildi. Bu kaynak prosesinde alın bölge mesafesi 3 mm olarak ayarlandı. Plakalar puntalandıktan sonra Çizelge 3.3'te verilen parametreler ile çoklu paso uygulaması ile kaynaklandı. Kaynak işleminde koruyucu gaz basıncı 8 bar ve debi 12 litre/dk olarak ayarlandı. Böylece kaynak işlemi hazırlanmış tüm plakalar için aynı parametreler uygulanarak gerçekleştirildi (Şekil 3.5).



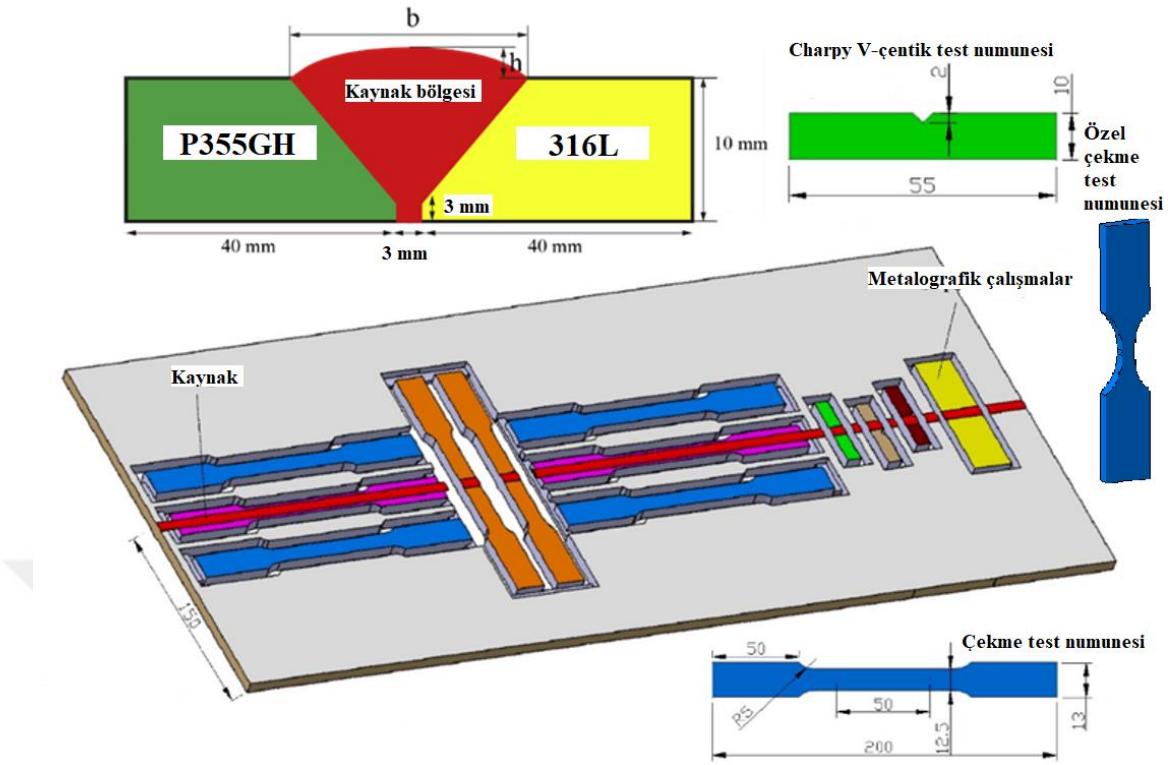
Şekil 3.5. P355GH ve 316L plakaların ER309L elektrot ile kaynaklanması.



Şekil 3.6. P355GH ve 316L plakaların kaynaklı birleşiminin kontrolü.



Şekil 3.7. Kaynaklanmış P355GH ve 316L plakalar ve ana malzeme plakaları.

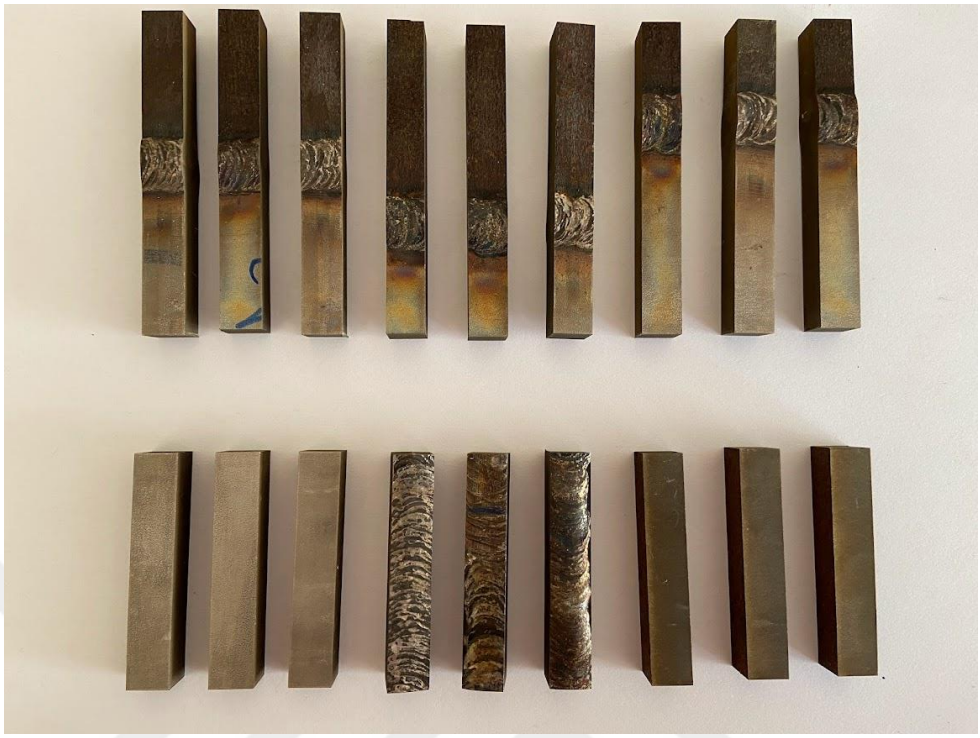


Şekil 3.8. Kaynaklı plakalardan test numunelerinin kesilme planı.

Kaynaklı numuneler Şekil 3.9'da görülen Charmilles, Robofil 290 marka tel erozyon tezgâhı ile kesildi. Bu numuneler daha sonra freze ile temizlendi (Şekil 3.15-3.17).



Şekil 3.9. Tel erezyon kesim tezgâhı.



Şekil 3.10. Farklı iki metal ve kaynaklı birleşimlere ait tokluk test numuneleri.



Şekil 3.11. Farklı iki metal ve kaynaklı birleşimlere ait çekme test numuneleri.



Şekil 3.12. Farklı iki metal ve kaynaklı birleşimlere ait eğme test numuneleri.



Şekil 3.13. Kaynak verimini araştırmaya yönelik özel çekme test numuneleri.



Şekil 3.14. Numunelerin fazla kaynak dolgularının temizlenmesi.

Mekanik test numuneleri Şekil 3.15-17'de görülmektedir. Çekme testleri ASTM A370 standardına göre ALŞA marka test cihazı ile 5 mm/dk çekme hızında üçer adet tekrarlı olarak gerçekleştirildi (Şekil 3.18). Eğme deneyi ana metaller, enine ve boyuna kaynaklı numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Ana metallerin ve kaynaklı bağlantıların eğme deneyleri 24 °C oda sıcaklığında, TS EN ISO 5173 standardına göre 60 mm/dk test hızında, mandreller arası 50 mm mesafede ALŞA test cihazı ile 60 mm yer değiştirme için gerçekleştirildi. Charpy V-çentik darbe testi ISO 9016'ya göre $55 \times 10 \times 10$ mm^3 boyutlarında test numuneleri ile (Marka: Zwick/Roell RKP 450) oda sıcaklığında gerçekleştirildi (Şekil 3.19). Tokluk deneyi 5 bölgede 316L, P355GH, P355GH ITAB, 316L ITAB ve boyuna kaynaklanmış numune için gerçekleştirildi (Şekil 3.20). Spectrotest marka TXC35 model portatif metal analiz cihazı ile malzemelerin elementel ölçümü yapıldı (3.21). Optik inceleme numunelerinin bakalite alma, zımparalama ve parlatma gibi standart numune hazırlama işlemleri gerçekleştirildi (Şekil 3.22). Mikroyapı incelemeleri CARL ZEISS – AXIO IMAGER M2M marka cihaz ile 316L,

P355GH, ısı tesirinde kalan bölgeler ve kaynaklı bölge için gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.23).

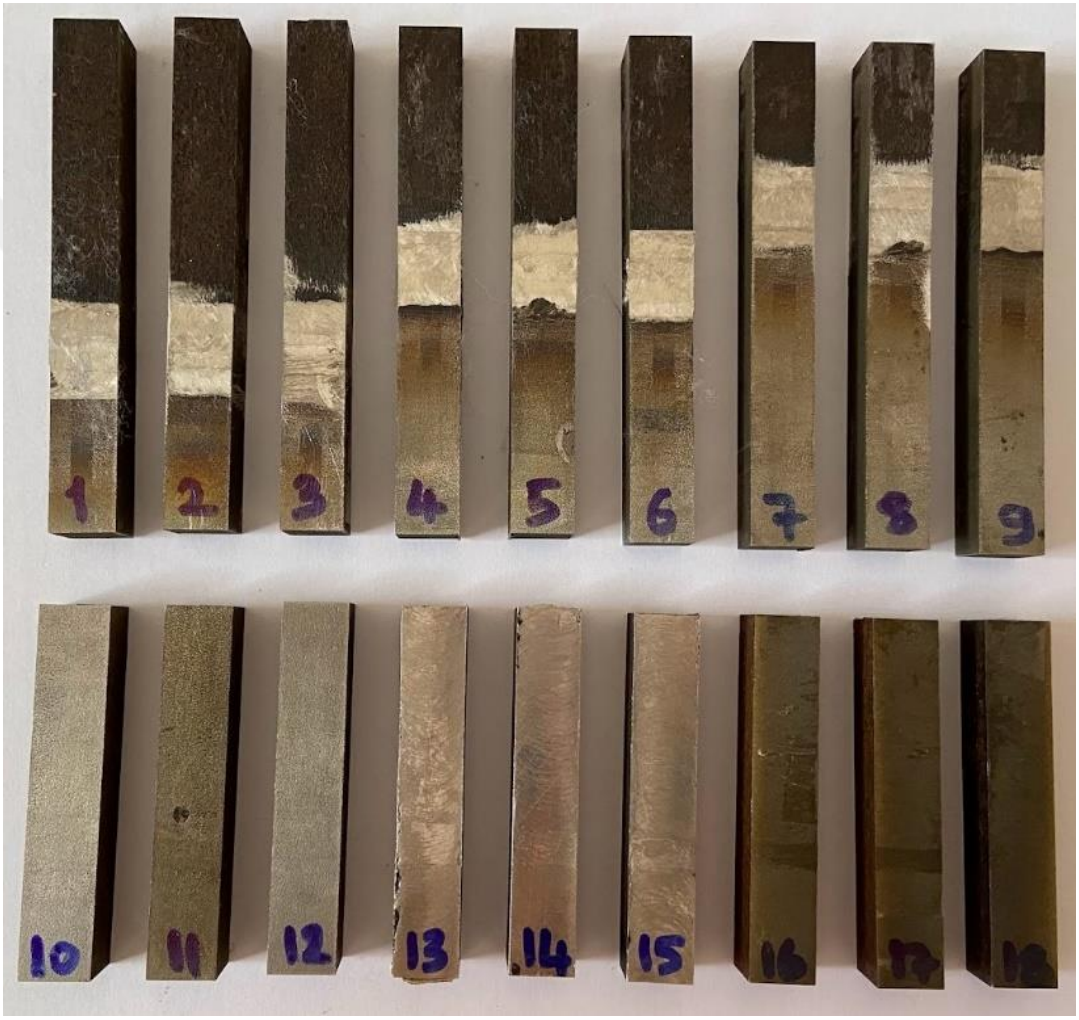


Şekil 3.15. Farklı iki metal ve kaynaklı birleşimler için hazırlanmış standart çekme test numuneleri.

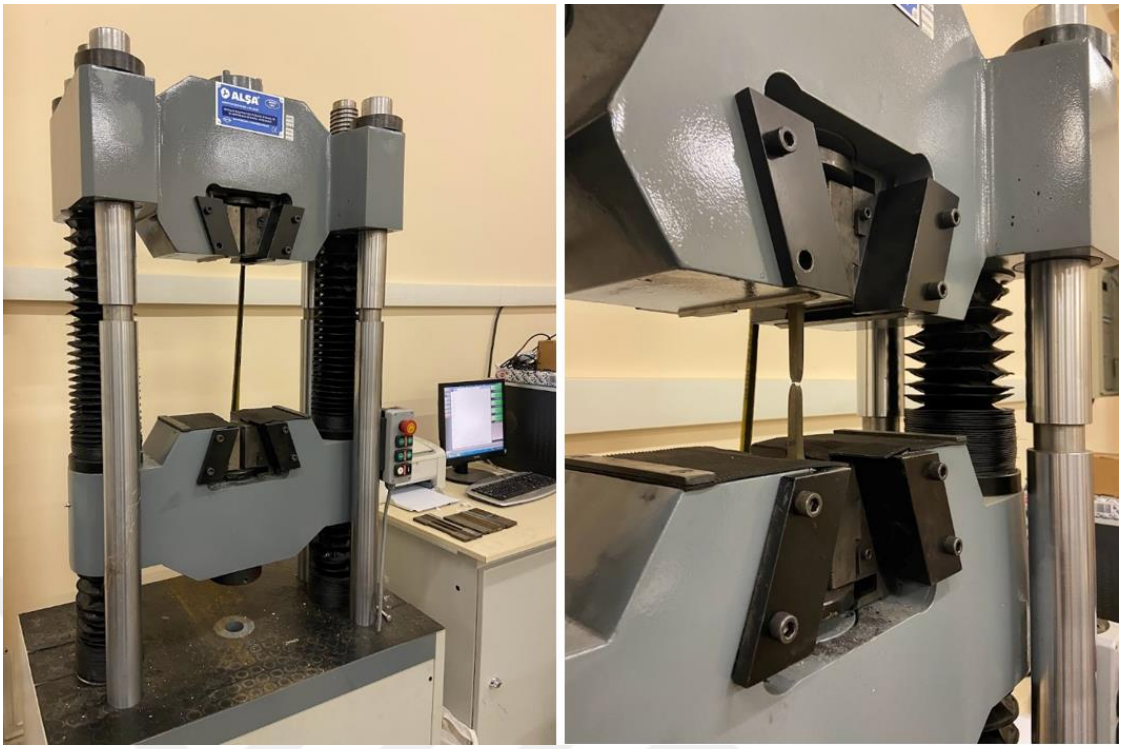


Şekil 3.16. Farklı iki metal ve kaynaklı birleşimler için hazırlanmış eğme test numuneleri.

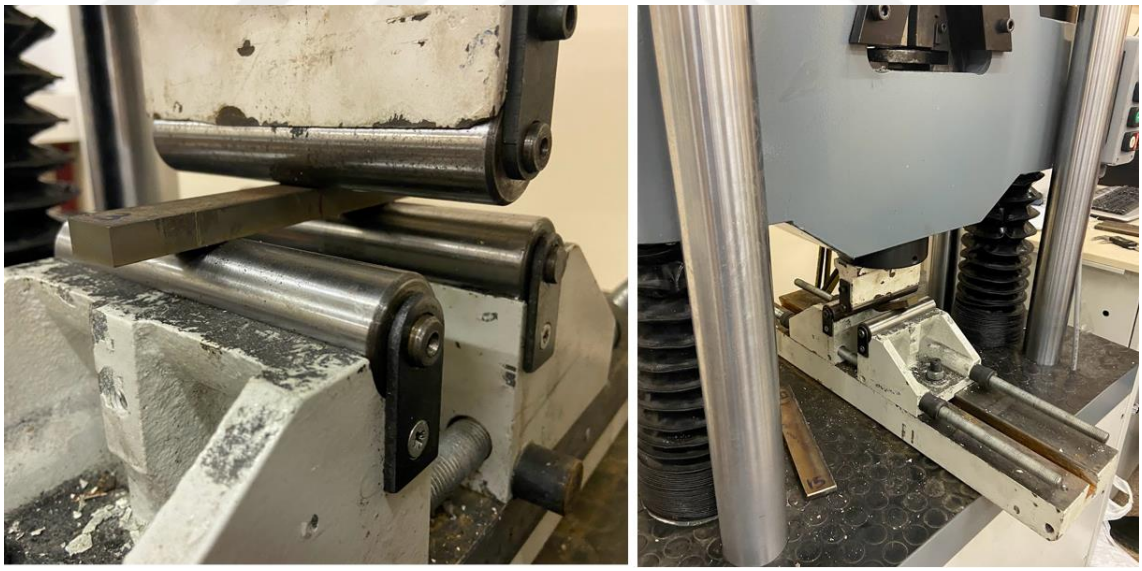
Şekil 3.17’de kaynakları temizlenmiş tokluk numuneleri görülmektedir. Her bir bölge için üç adet tokluk numunesi hazırlanmıştır. Bu numuneler 1’den 18’e kadar şekilde görüldüğü gibi numaralandırılmıştır. 1-3 numaraları 316L ITAB, 4-6 numaraları enine kaynaklanmış numunenin kaynak merkezi, 7-9 numaraları P355GH ITAB, 10-12 numaraları 316L ana metalini, 14-15 boyuna kaynaklanmış metali, 16-18 numaraları P355GH ana metalini belirtmektedir.



Şekil 3.17. Farklı iki metal ve kaynaklı birleşimler için hazırlanmış tokluk test numuneleri.



Şekil 3.18. Çekme test cihazı.



Şekil 3. 19. Eğme test cihazı.



Şekil 3.20. Tokluk test cihazı.



Şekil 3.21. Spektrometre cihazı ile elementel ölçüm.

Ana metaller ve kaynaklı numuneler, metalografik analiz için hazırlandı. Standart metalografik numune hazırlama işlemleri; kesme, zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri gerçekleştirildi (İrsel ve Güzey, 2021). Yüzeyler etanol ile temizlendi. Mekanik olarak yüzey parlatma işleminden sonra P355GH %3 nital (96 ml etanol + 4 nitrik asit) dağlama solüsyonu ile 30 saniye dağlandı. 316L östenitik paslanmaz çeliği ise viella solüsyonu (%95 etil alkol çözeltisi, %4 HCl, %1 pikrik asit) ile 30 saniye dağlandı. Mikrosertlik testi için yük ve bekleme süresi sırasıyla 100 g (0.98 N) ve 5 s olarak seçildi.

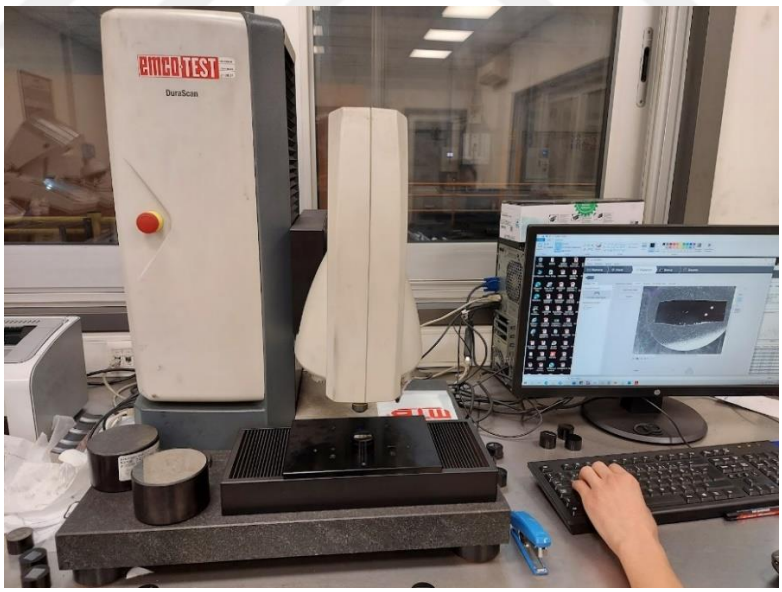
Sertlik bir otomatik mikrosertlik test cihazı (Struers Emco-test DuraScan G5) kullanılarak gerçekleştirildi. Ana metallerin, kaynak bölgesinin ve ısı tesiri altında kalan bölgelerin optik görüntüleme işlemi gerçekleştirildi (Şekil 3.23). P355GH, 316L, ısı tesiri altında kalan bölgeler ve kaynak bölgesinin sertlik değerleri 3 tekrarlı olarak ölçüldü. Mikrosertlik işlemi 0.5 mm aralık ile yatay ve dikey otomatik olarak gerçekleştirildi (Şekil 3.24).



Şekil 3.22. Metalografik test numuneleri için bakalite alma, zımparalama ve parlatma işlemi.



Şekil 3.23. Optik mikroskop ile görüntüleme.



Şekil 3.24. 0.5 mm aralık ile yatay ve dikey otomatik sertlik ölçümü.

Carl Zeiss Gemini 500 FESEM cihazı kullanılarak 36x, 1.00Kx, 2.00Kx, 3.00KX ve 5.00KX büyütmelerde 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 nokta analizi ve çizgi analizi (line-scan) gerçekleştirildi. Mikroyapı içerisindeki fazları belirlemek için X-ray difraksiyon 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

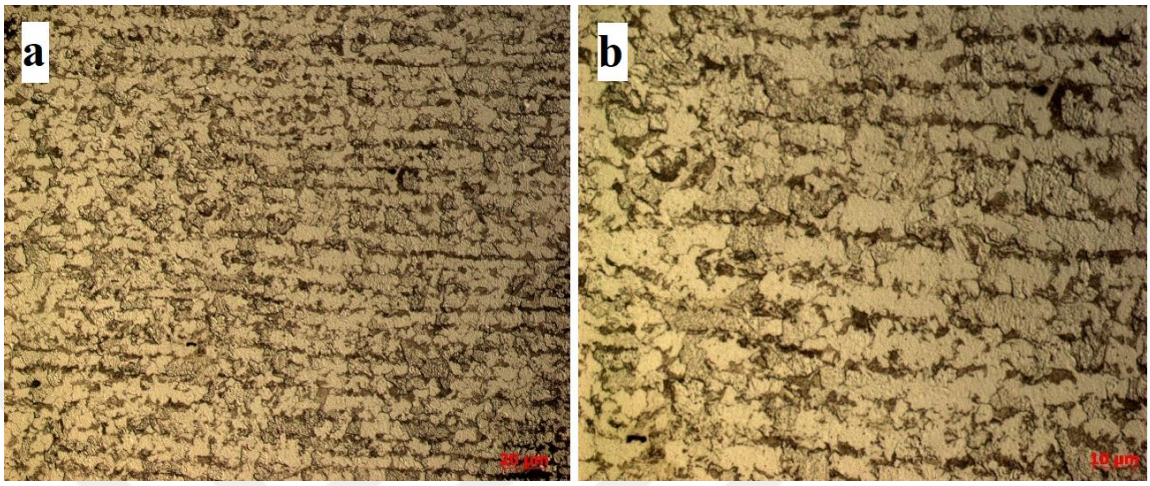
Bu tez çalışmasında, paslanmaz çelik 316L, yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı P355GH karbon çeliği TIG kaynağı ile yaklaşık %101.10 verimlilik ile başarılı biçimde birleştirildi. Bu farklı iki metalin kaynaklı birleşimine ait mikroyapısal ve mekanik araştırmaların sonuçları aşağıda sunuldu.

4.1. Metalografik Çalışmalar

4.1.1. Optik Görüntüleme

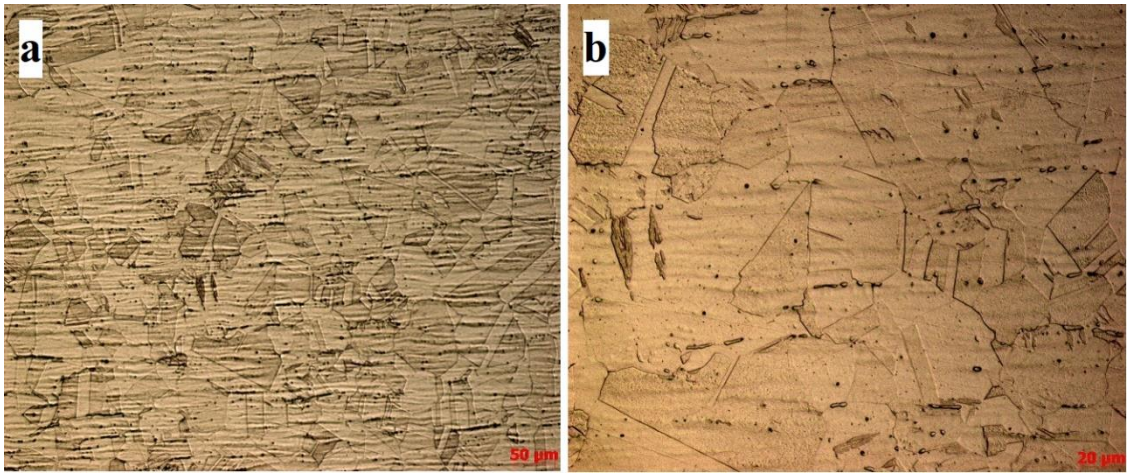
Optik görüntüleme 5x, 10x ve 50x büyütmede 316L, P355GH, ITAB bölgeleri ve kaynak merkezinde gerçekleştirildi. P355GH çeliğine ait mikroyapı görüntüleri optik mikroskop yardımıyla elde edilmiştir. Optik mikroskop ile 50x ve 100x büyütmede alfa ferrit ve perlit fazları Şekil 4.1a ve b'de görülmektedir. Bu fazlar homojen bir biçimde mikroyapı içerisinde dağılmıştır. Ferrit mikroyapısı, karbon çeliklerinin ana bileşenidir. Esasen demirdir ve oda sıcaklığında %0.005'ten daha az karbon içerir. Düşük karbon içeriği nedeniyle ferrit mikroyapısı yumuşaktır ve kolayca deforme olabilir. Ancak ferrit, manganez veya silikon gibi diğer alaşım elementlerini içerebilir. Boyutsal olarak ferrit tüm yönlerde eşit görünmektedir (eş eksenli morfoloji). Ferrit, çeliğin diğer fazlarına (sementit, beynit, martensit) kıyasla yumuşak ve sünektir (Mouritz, 2012). Östenit fazından yavaş soğuma üzerine, sementit ve ferrit paralel plakalar halinde perlit adı verilen iki fazlı bir mikro yapıya dönüşür. Perlit, esasen ferrit katmanları (yumuşak ve sünek olan) arasına sıkıştırılmış sementit katmanlarından (sert ve kırılgan olan) oluşan kompozit bir mikro yapıdır. Perlitin östenit tane sınırlarında çekirdeklendiği ve yaklaşık olarak küresel şekilli taneler olarak büyüdüğü gözlenmiştir. P355GH çeliği içeriğinde tespit edilen perlit, uzun bir morfolojiye sahiptir (Şekil 4.1). P355GH çeliğinin optik

görüntülerinde ferrit ve perlit fazlarının varlığı gözlemlendi. P355GH çeliğinin yaklaşık olarak tane boyutu 5.13 ± 1 µm olarak tespit edilmiştir.



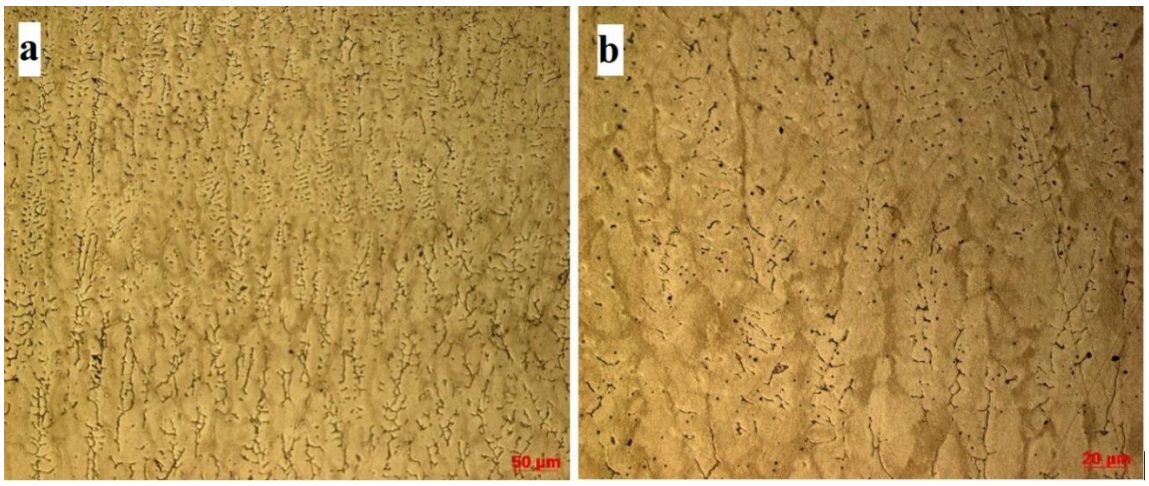
Şekil 4.1. P355GH çeliği a) 50x büyütmede ve b) 100x büyütmede mikroyapısı.

316L östenitik paslanmaz çeliğine ait mikroyapı görselleri sırasıyla 20x ve 50x büyütmede Şekil 4.2a ve b'de yer almaktadır. 316L paslanmaz çeliği mikroyapısında tamamen östenit fazı mevcut olduğu tespit edildi. 316L östenitik paslanmaz çeliğinin mikroyapısındaki tanelerin keskin köşelere sahip olduğu tespit edildi (Şekil 4.2). γ-Fe olarak da bilinen östenit fazı, yüzey merkezli kübik (ymk, fcc) kristal yapıya sahiptir ve bu faz, 723 °C sıcaklık değerinde ötektoid sıcaklığının üzerinde ve 1500 °C sıcaklık değerinin altında demir karbon alaşımlarında meydana gelmektedir. Bu mikroyapılarda Östenit fazı, korozyon direnci ile çok iyi bilinen en yaygın kullanılan paslanmaz çelik türlerinin mikroyapısında bulunur. 316L paslanmaz çeliğinin yaklaşık olarak tane boyutu 16.33 ± 5 µm ölçüldü.



Şekil 4.2. 316L östenitik paslanmaz çeliğinin a) 20x büyütmede ve b) 50x büyütmede mikroyapısı.

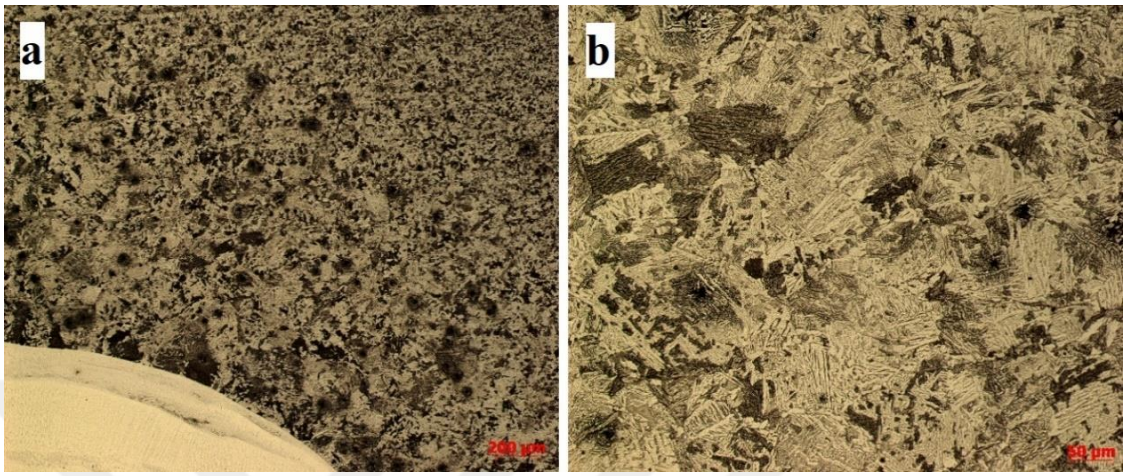
316L ve P355GH çeliklerinin kaynak merkezinde gerçekleştirilen metalografik testlerde delta ferrit fazı gözlemlendi (Şekil 4.3). 20x büyütmede kaynak metalinin mikroyapısı şekil 4.3a'da gözlenmiştir. Tespit edilen delta ferrit fazının 50x büyütmede morfolojisi Şekil 4.3b'de gözlenmiştir. Kaynak prosesi sonrasında soğuma hızının düşük seviyelerde olması kaynak bölgesinde delta ferrit oluşumuna sebep olmuştur.



Şekil 4.3. Kaynak bölgesinin a) 20x ve b) 50x büyütmede mikroyapısı.

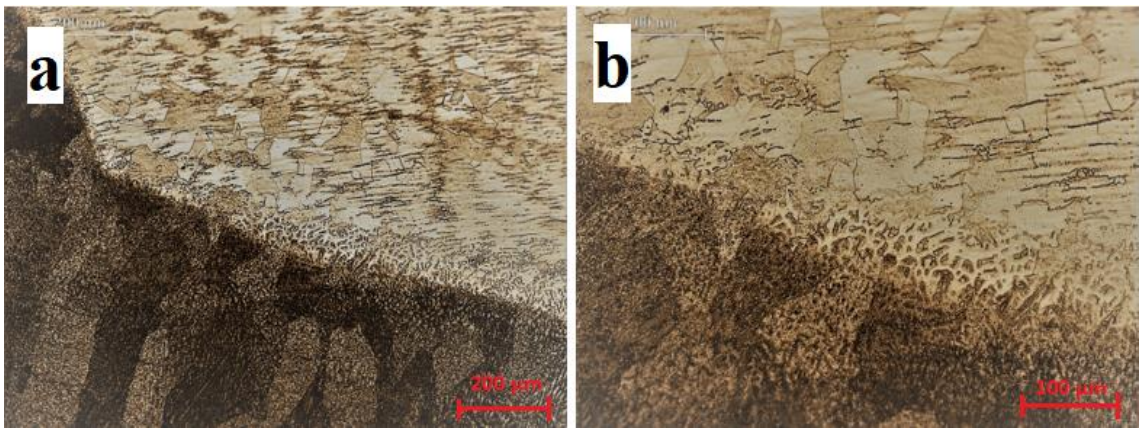
Şekil 4.4a ve b'de P355GH ITAB 5x ve 20x büyütmede optik görüntüsü sunuldu. Özellikle geçiş bölgesinde tane büyümeleri gerçekleştiği tespit edildi. 20x büyütmede

P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölgesinin tipik bir kaynak metali görüntüsüne sahip olduğu gözlendi.



Şekil 4.4. P355GH ITAB mikroyapısı a) 5x büyütme b) 20x büyütme.

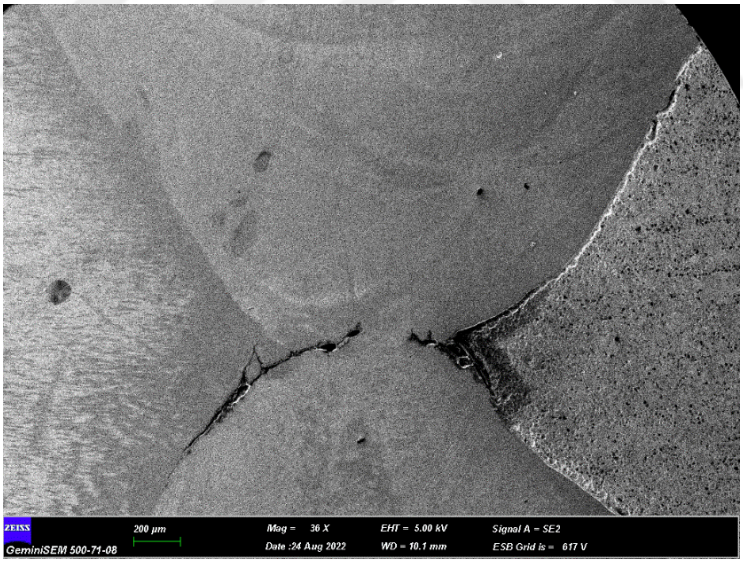
Şekil 4.5'te 316L ITAB bölgesinin 10x ve 20x büyütmede mikroyapısı görülmektedir. Mikroyapıda östenit ve delta ferrit fazları net bir şekilde görülmektedir. Özellikle geçiş bölgesinde delta ferrit yapısı meydana gelmiştir.



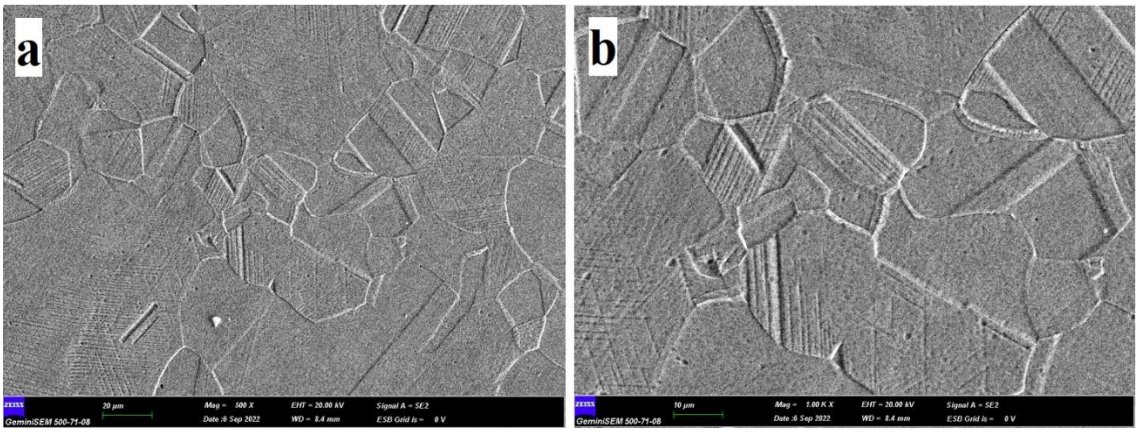
Şekil 4.5. 316L ITAB mikroyapısı a) 10x büyütme b) 20x büyütme.

4.1.2. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM)

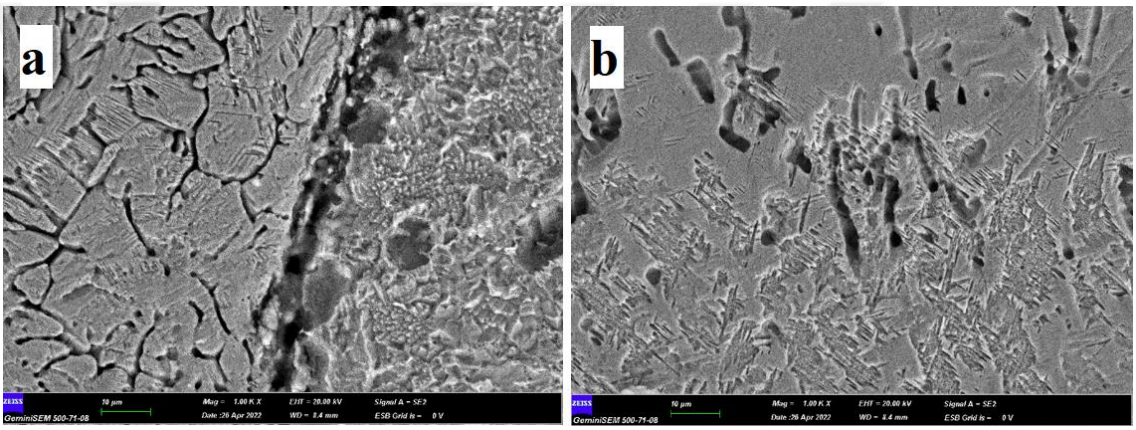
Kaynak merkezinde gerçekleştirilen FESEM analizi Şekil 4.6'da görülmektedir. 316L paslanmaz çeliğinin östenitik yapıya sahip olduğu 500x ve 1.00Kx büyütmede Şekil 4.7a ve b' de sunulmaktadır. Bununla birlikte, 316L östenitik paslanmaz çeliğin FESEM analizlerinde östenit yapı tespit edilmiştir. Şekil 4.8a'da ısı tesiri altında kalan 316L bölgesinin FESEM görüntüsü sunulmuştur. Şekil 4.8b'de ısı tesiri altında kalan P355GH bölgesinin FESEM görüntüsü sunulmuştur. Kaynak bölgesinin 1.00Kx ve 2.00Kx büyütmede FESEM görüntüleri Şekil 4.9a ve b'de sunulmuştur. Bu mikroyapı delta ferrit varlığını gösterir (Mayr vd., 2010; Jafarzadegan vd., 2013). Bu kaynak bölgesi yapısı delta ferrit yapısının morfolojisini göstermektedir (Mayr vd., 2010). Kaynak prosesi sonrasında soğuma hızının düşük seviyelerde olması o bölgelerde delta ferrit oluşumuna sebep olmuştur. Denge halinde delta ferrit fazı, sıvı halden katı hale geçişte oluşan ilk fazdır (Kahraman vd., 2017). Delta ferrit yapısının sıcak çatlamaları önlemesi bu yapının en önemli özelliğidir (Wegrzyn, 1992).



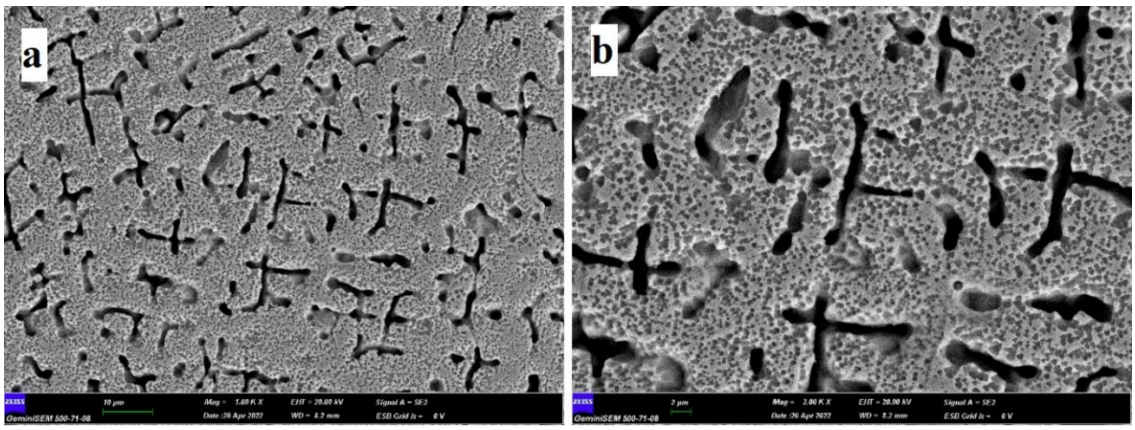
Şekil 4.6. 36x büyütme kaynak bölgesi FESEM görüntüsü.



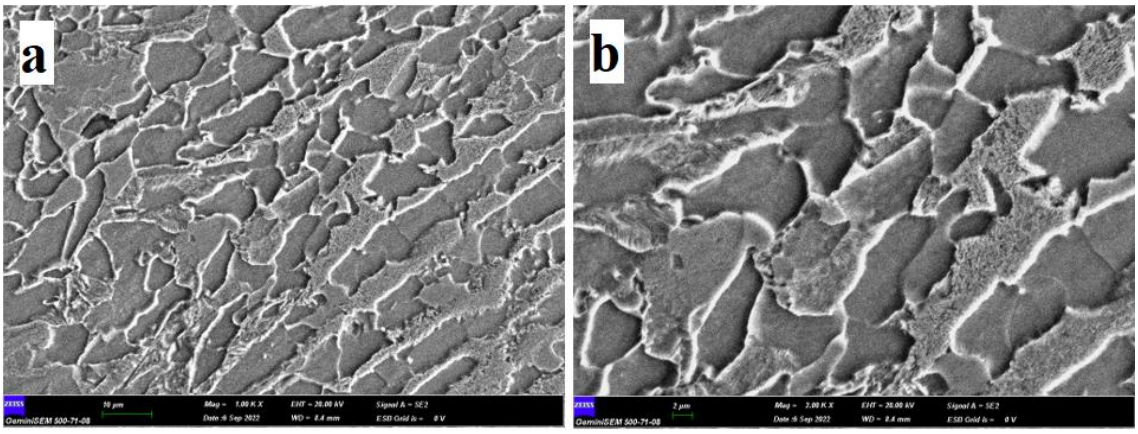
Şekil 4.7. 316L FESEM görüntüsü a) 500X büyütme b) 1.00Kx büyütme.



Şekil 4.8. 1.00Kx büyütmede ısı tesiri altında kalan bölgelerin FESEM görüntüsü a) 316L ITAB ve b) P355GH ITAB.



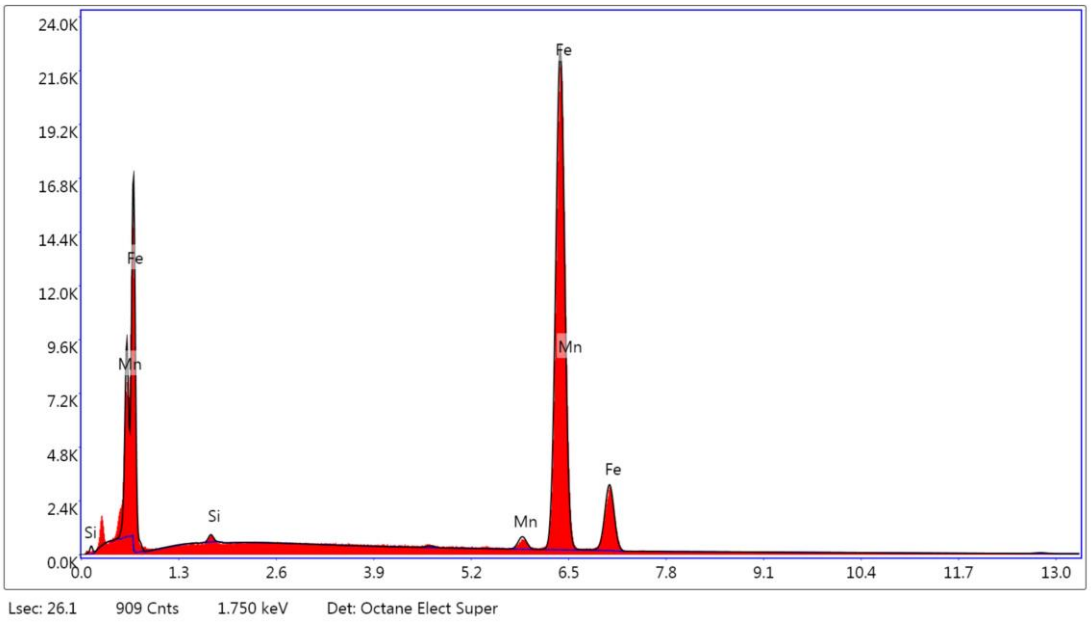
Şekil 4.9. Kaynak bölgesinin FESEM görüntüsü a) 1.00Kx büyütme b) 2.00Kx büyütme.



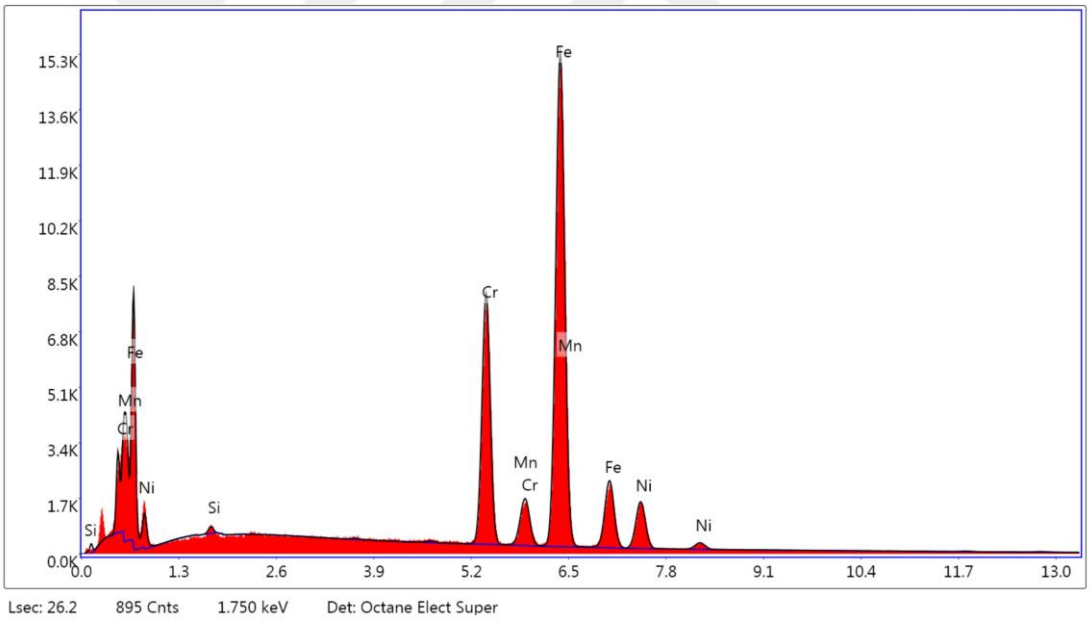
Şekil 4.10. P355GH çeliğinin FESEM görüntüsü a)1.00Kx büyütme ve b) 2.00Kx büyütme.

4.1.3. Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi (EDX/EDS)

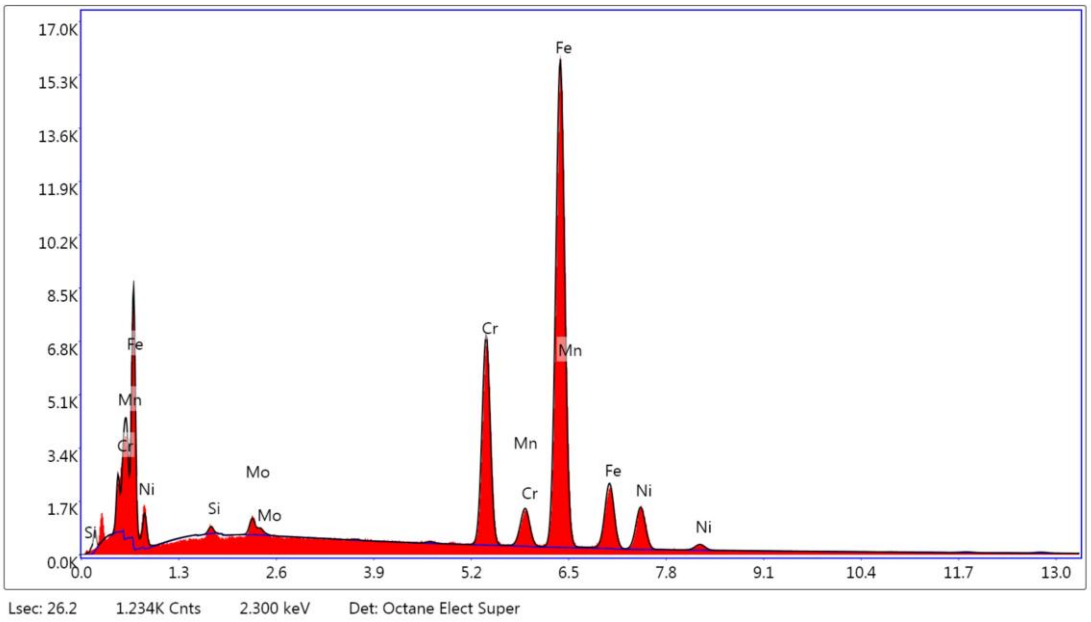
Bu çalışmada farklı 316L östenitik paslanmaz çelik ve P355GH basınçlı kap çeliği TIG kaynak prosesi ile birleştirilmiştir. Hazırlanan test numuneleri üzerinde iki ana metal ve kaynak bölgesi olmak üzere EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. EDX spektroskopisi, taramalı elektron mikroskobu kullanılarak malzemelerin elementel bileşiminin tespitinde yer alır. EDX, atom numarası borondan yüksek olan elementleri tespit edebilir ve bu elementler en az %0.1 konsantrasyonda tespit edilebilmektedir. Elementlerin hiçbirinin aynı X-ışını emisyon spektrumuna sahip olmaması ilkesi nedeniyle, numunedeki konsantrasyonu için farklılaştırılabilir ve ölçülebilir (Abd Mutalib vd., 2017). P355GH çeliğinin EDX analizi gerçekleştirildiğinde Si (atomic. %0.87), Mn (atomic. %1.9), Fe (atomic. %97.23) elementleri tespit edilmiştir (Şekil 4.11). Kaynak metalinin EDX analizi gerçekleştirildiğinde Si (atomic. %0.55), Cr (atomic. %23.63), Mn (atomic. %1.96) ve Fe (wt. %65.21), Ni (atomic. %8.65) elementleri tespit edilmiştir (Şekil 4.12). 316L östenitik paslanmaz çeliğin EDX analizi gerçekleştirildiğinde Si (atomic. %0.65), Cr (atomic. %2.85), Mo (atomic. %0.79) ve Mn (atomic. %1.58), Fe (atomic. %67.89), Ni (atomic. %8.24) elementleri tespit edilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.11. P355GH çeliği EDX analizi.



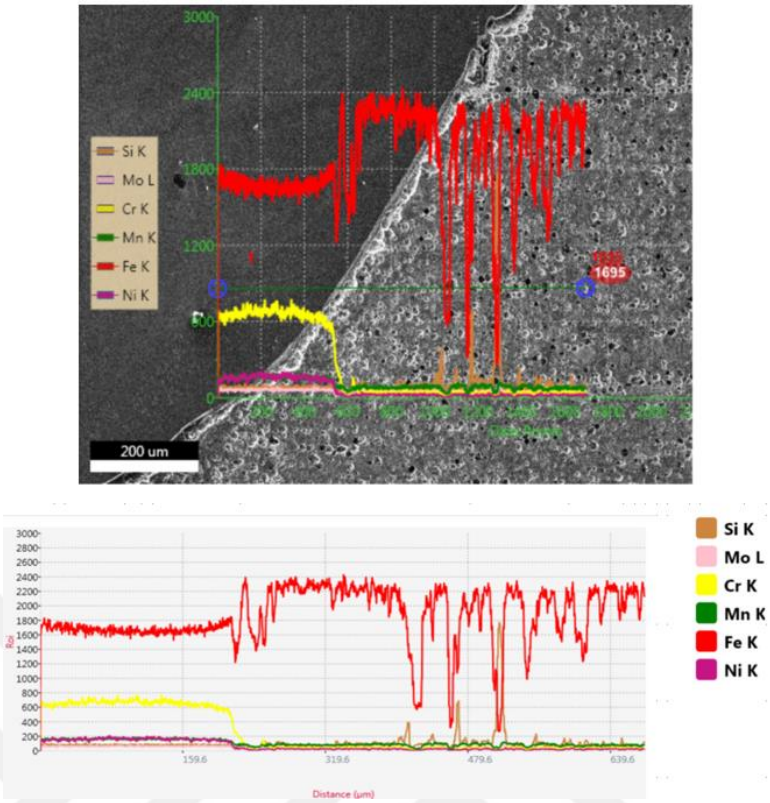
Şekil 4.12. Kaynak bölgesi EDX analizi.



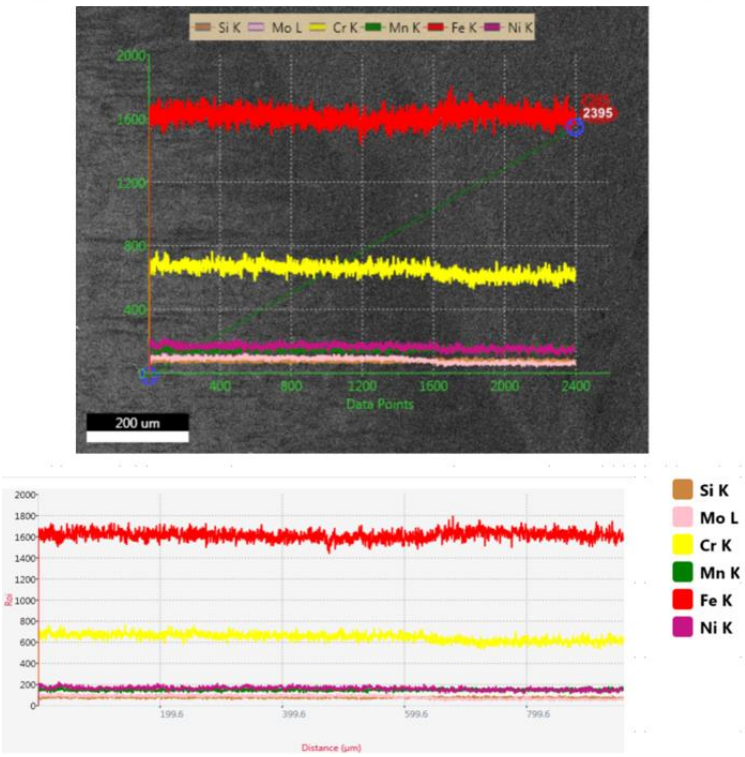
Şekil 4.13. 316L östenitik paslanmaz çeliği EDX analizi.

4.1.4. EDX Çizgi Analizi (Line-scan)

Element dağılımını belirlemek için kaynak arayüzünün her iki tarafında EDX/EDS çizgi tarama analizi yapıldı. P355GH çeliğinin ısı tesiri altında kalan bölgesinin EDX çizgi analizi Şekil 4.14'te sunulmuştur. Cr elementinin kaynak bölgesinde daha fazla olduğu Şekil 4.14'te tespit edilmiştir. Aynı bölgeden alınan EDX çizgi haritalama analizi sonucunda Fe elementinin P355GH bölgesinde heterojen bir şekilde daha az miktarda olduğu gözlenmiştir. 316L östenitik paslanmaz çeliğinin ısı tesiri altında kalan bölgesinin EDX çizgi analizi Şekil 4.15'te sunulmuştur. Çizgisel analiz sonucunda elementlerin homojen bir şekilde yüzeyde dağıldığı tespit edilmiştir.



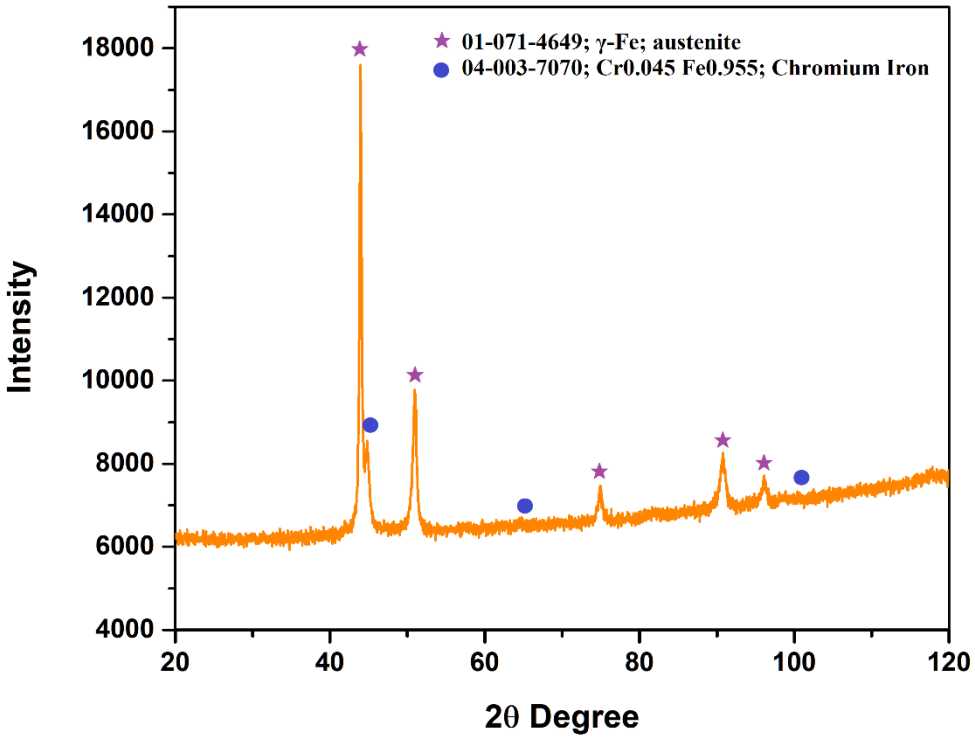
Şekil 4.14. P355GH ITAB linescan analizi.



Şekil 4.15. 316L ITAB linescan analizi.

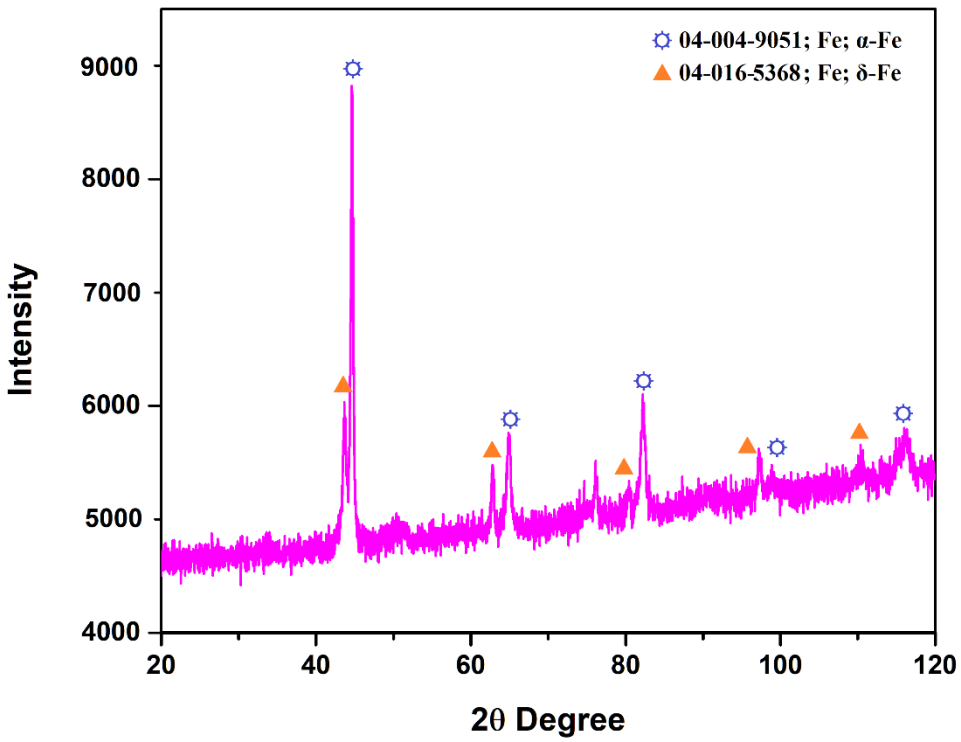
4.1.5. X-Işını Kristalografisi (XRD)

316L paslanmaz çelik noktasında gerçekleştirilen XRD analizinde 01-071-4649 kodlu γ-Fe ve 04-003-7070 kodlu CrFe pikleri görülmüştür (Şekil 4.16). 316L paslanmaz çeliğinde YMK (yüzey merkezli kübik) kafes yapısı görülmektedir. Östenitik fazın oluşabilmesi için %18 krom, %8 nikel paylaşımı ideal koşuldur (Alnak, 2020).



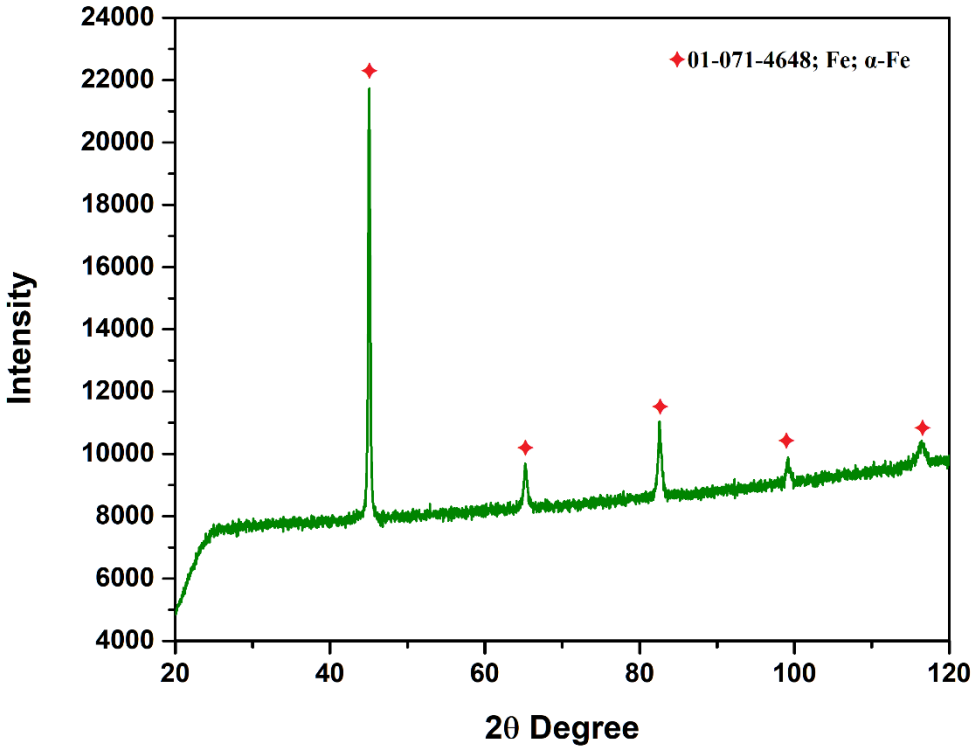
Şekil 4.16. 316L paslanmaz çelik XRD analizi.

Kaynak merkezinde XRD yöntemi ile tespit edilen fazlar Şekil 4.17'de grafiksel olarak görülmektedir. XRD analizinde 04-004-9051 kodlu α-Fe ve 04-016-5368 kodlu δ-Fe pikleri görülmüştür (Şekil 4.17). Delta ferrit fazının kristal kafes yapısı ferrit fazı ile benzerlik göstermekle birlikte HMK yapıya sahiptir. 316L YMK yapılı bir östenitik paslanmaz çeliktir. 316L paslanmaz çelik ve P355GH birleştirildiğinde delta ferrit fazı oluşmuştur ve delta ferrit yapısı HMK yapılı olup ferrit gibi ferromanyetik yapıya sahiptir (Wegrzyn, 1992).



Şekil 4.17. Kaynak bölgesi XRD analizi.

P355GH metali bölgesinde meydana gelebilecek oluşumlar XRD yöntemi ile 20° < 2θ <120° aralığında incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.18'de grafiksel olarak görülmektedir. XRD analizinde 01-071-4648 kodlu α-Fe pikleri görülmüştür.

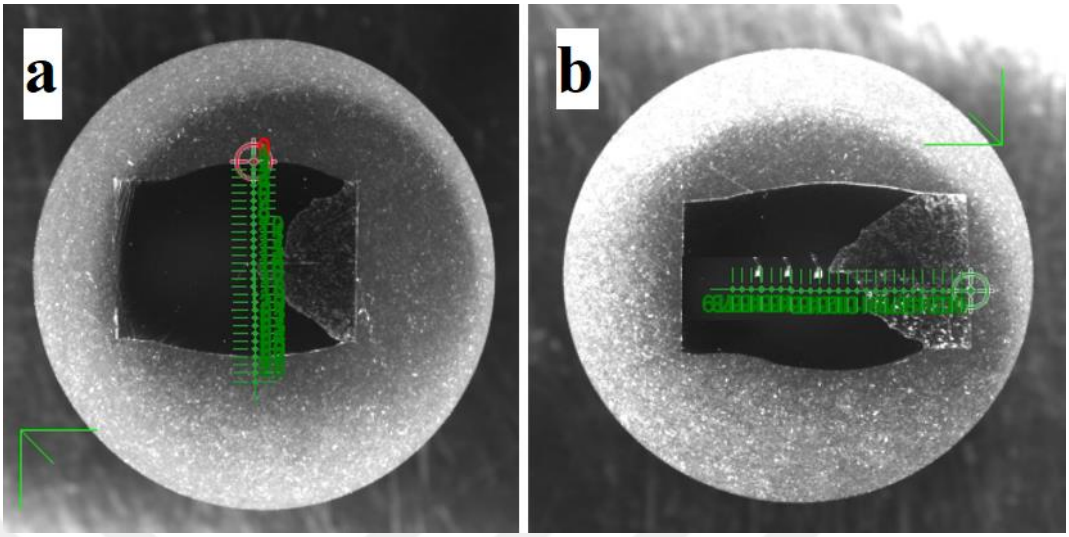


Şekil 4.18. P355GH XRD analizi.

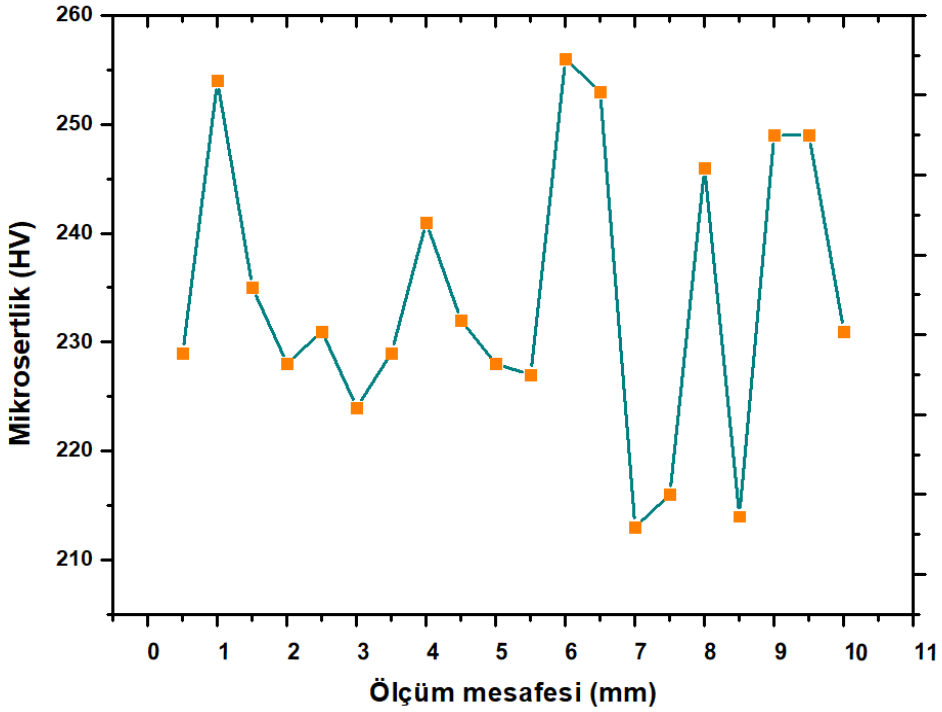
4.2. Mekanik Deneyler

4.2.1. Vickers Mikrosertlik Testi

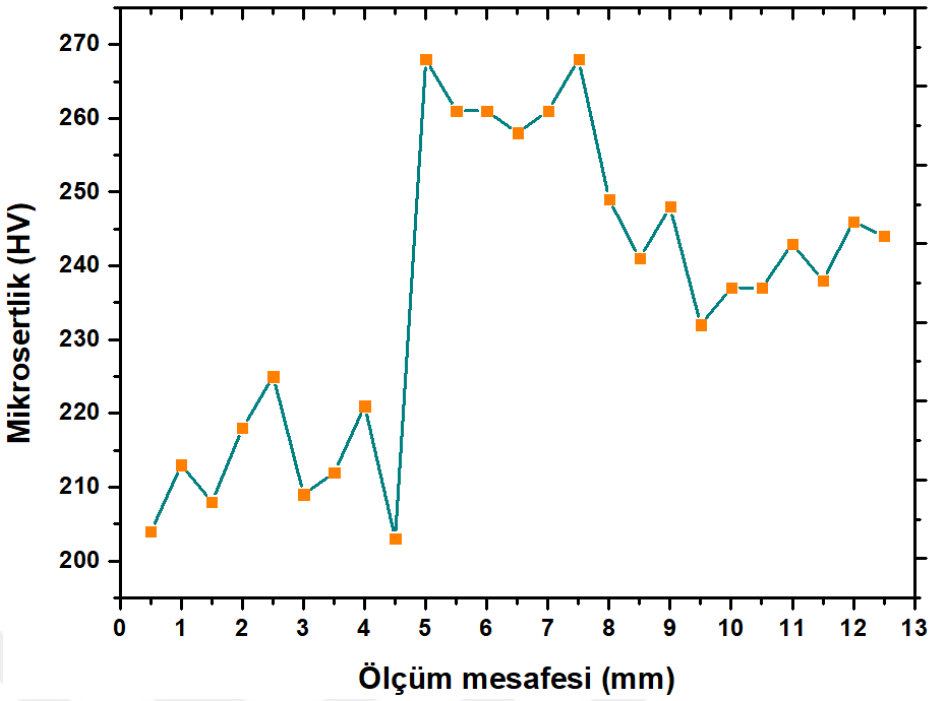
Vickers mikrosertlik testleri, 316L ve P355GH farklı metallerini TIG kaynak prosesi ile birleştirilmiş numunelerinin kesitine uygulanmıştır. 0.5 mm aralık ile dikey ve yatay sertlik ölçümü Şekil 4.19'da gösterilmektedir. Kaynakların enine yönünden çıkarılan numunelerinde dikey olarak ölçümü gerçekleştirilen mikrosertlik grafiği Şekil 4.20'de, yatay olarak ölçümü gerçekleştirilen mikrosertlik grafiği Şekil 4.21'de sunulmuştur. Kaynak bölgesinin dikey ölçüm sonuçlarında maksimum sertlik değeri 256 ± 15 HV olarak tespit edilirken yatay ölçümde maksimum sertlik değeri 268 ± 15 HV olarak tespit edilmiştir. Yatay ölçümde 316L paslanmaz çeliği için 249 ± 14 HV ve P355GH çeliği için en yüksek 231 ± 11 HV ölçüldü. Ortalama mikrosertlik değerleri 316L için 217.8 ± 12 HV'dir. P355GH için 195.7 ± 11 HV'dir.



Şekil 4.19. 0.5 aralık ile otomatik mikrosertlik ölçümü a) dikey ölçüm, b) yatay ölçüm.



Şekil 4.20. Dikey mikrosertlik ölçümü (HV0.1).



Şekil 4.21. Yatay mikrosertlik ölçümü (HV0.1).

4.2.2. Çekme Deneyi

Çekme testinden sonra kopan tüm numuneler Şekil 4.22'de sunulmaktadır. Çekme deneylerinden elde edilen Gerilme (MPa) - % Uzama grafikleri Şekil 4.23'te verilmiştir. 316L ve P355GH çelikleri için akma mukavemetleri sırasıyla 356.95 ± 08 MPa ve 437.03 ± 05 MPa olarak tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen tekrarlı deneyler sonucunda boyuna kaynaklı numunelerin akma ve çekme mukavemetleri sırasıyla 356.31 ± 07 MPa ve 584.85 ± 07 MPa olarak tespit edilmiştir. Çizelge 4.1 çekme testi sonucunda elde edilen akma dayanımı, çekme dayanımı, % uzama ve kopma bölgelerini sırasıyla görülmektedir. Kaynak bölgesinin yüzeyinin çıplak göz ile incelenmesi görsel muayene sonucunda kesitte herhangi bir kaynak kusuru oluştuğu görülmemiştir. Enine kaynaklanmış numunelerde kopma 316L östenitik paslanmaz çeliği bölgesinde meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 4.22). P355GH ve 316L çeliklerinin çekme dayanımları neredeyse aynı olup, P355GH çeliğinin akma dayanımı 316L östenitik paslanmaz çeliğe göre bir miktar fazladır. Standart çekme numunelerinde Gerilme (MPa) - % Uzama çekme grafiği Şekil 4.24'te sunulmuştur. 316L östenitik paslanmaz çeliklerin uzaması P355GH çeliğine göre daha fazladır. Çizelge 4.2 kaynak birleşim verimlilik ölçüm numunelerinin

çekme testi sonucunda elde edilen akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma bölgelerini sırasıyla görülmektedir. Verimlilik ölçüm numunelerinin Gerilme (MPa) - % Uzama çekme grafiği Şekil 4.25'te sunulmuştur. Kaynaklı bağlantının bağlantı verimliliği de aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır:

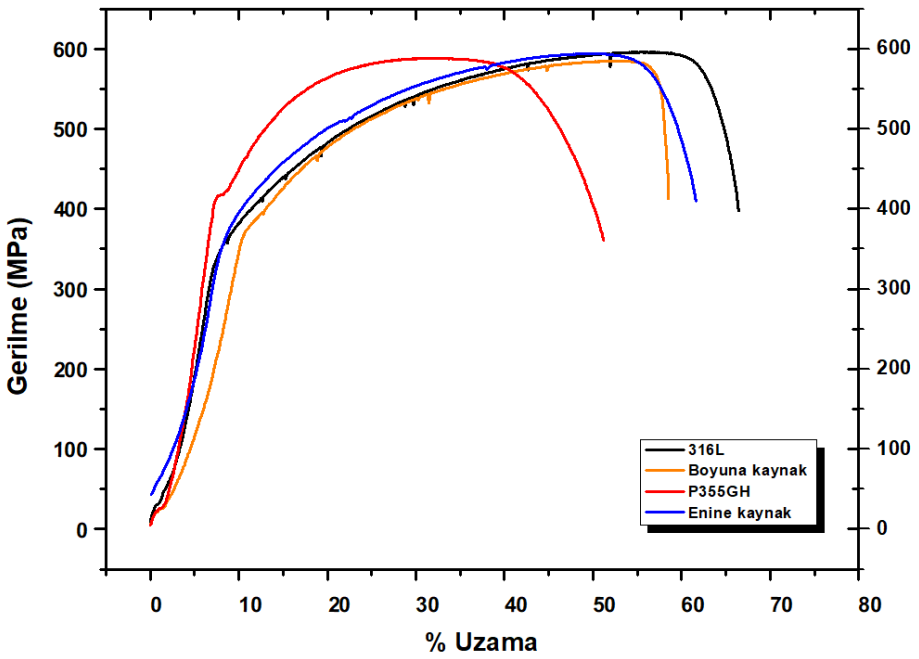
$$Kaynak\ verimliliği = \frac{Kaynak\ çekme\ dayanımı\ (MPa)}{Ana\ metal\ çekme\ dayanımı\ (MPa)} \quad (3.1)$$



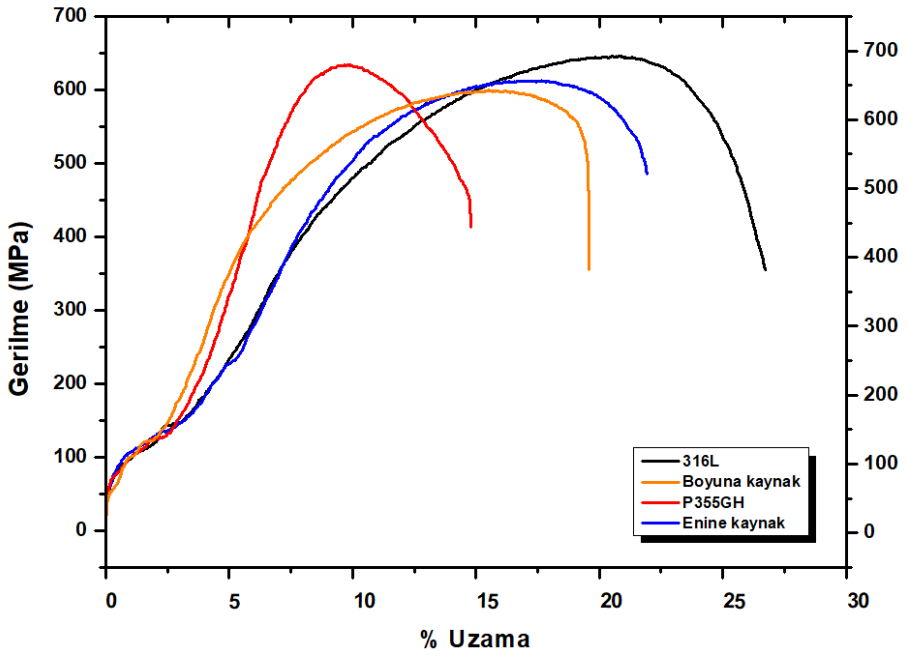
Şekil 4.22. Çekme testinden sonra kopma bölgeleri.



Şekil 4.23. Kaynak birleşim verimlilik ölçüm numunelerinin çekme testinden sonra kopma bölgeleri.



Şekil 4.24. Standart çekme numunelerinde Gerilme (MPa) - % Uzama çekme grafiği.



Şekil 4.25. Kaynak birleşim verimlilik ölçüm numunelerinin Gerilme (MPa) - % Uzama çekme grafiği.

Çizelge 4.1. Akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve kopmaya kadar % uzama değerleri.

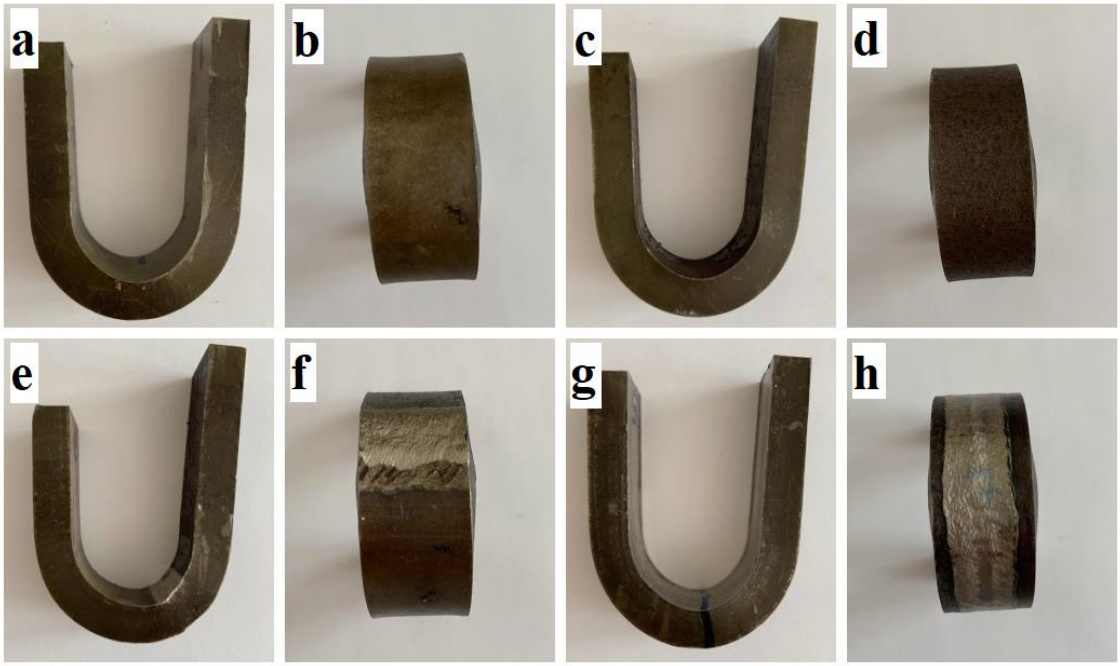
No	Açıklama	Akma mukavemeti (MPa)	Çekme mukavemeti (MPa)	% Uzama	Kopma bölgesi
1	316L	356.95 ± 08	595.90 ± 08	66.4	316L
2	P355GH	437.03 ± 05	601.49 ± 05	36	P355GH
3	Boyuna kaynak	356.31 ± 07	584.85 ± 07	37	Kaynak
4	Enine kaynak	574.02 ± 06	593.92 ± 06	45	316L

Çizelge 4. 2. Kaynak birleşim verimlilik ölçüm numunelerinin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve kopmaya kadar % uzama değerleri.

No	Açıklama	Akma mukavemeti (MPa)	Çekme mukavemeti (MPa)	% Kaynak verimliliği	Kopma bölgesi
1	316L	367.89 ± 08	635.60 ± 08	-	316L
2	P355GH	460.66 ± 05	649.75 ± 05	-	P355GH
3	Boyuna kaynak	395.12 ± 07	612.44 ± 07	96.35	Kaynak
4	Enine kaynak	432.78 ± 06	642.63 ± 06	101.10	Kaynak

4.2.3. Eğme Deneyi

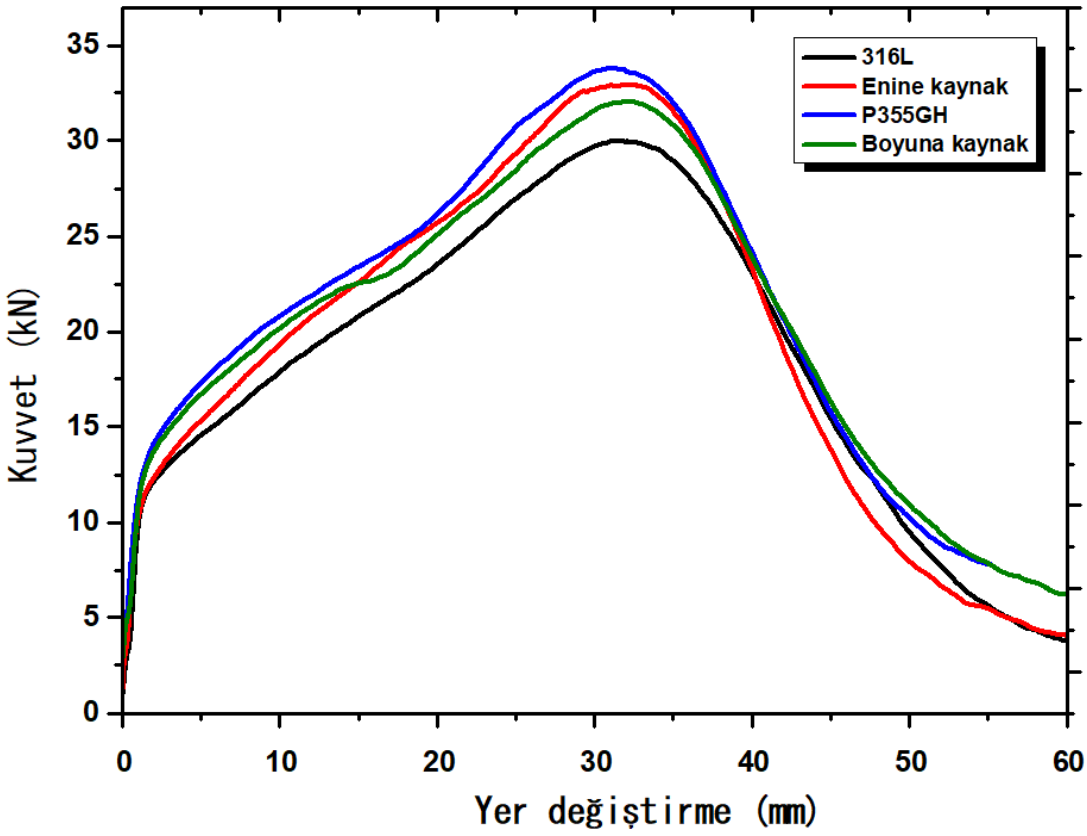
316L östenitik paslanmaz çelik, P355GH, enine kaynaklanmış ve boyuna kaynaklanmış numunelerin şekillendirilebilirliği üç nokta eğme deneyi ile gözlemlenmiştir. Deney prosesinde tüm numuneler 180° eğilmiştir. 316L ve P355GH çelikleri için eğme kuvvetleri sırasıyla 30.006 ± 8 kN ve 36.324 ± 12 kN olarak elde edilmiştir. Enine ve boyuna kaynaklı birleşimlerin eğme kuvvetleri ise sırasıyla 34.331 ± 10 kN ve 32.966 ± 11 kN olarak elde edilmiştir. Kaynak birleşim bölgesinde herhangi bir çatlak veya yırtılma oluştuğu görülmemiştir (Şekil 4.26). Kaynak birleşim bölgesi de sünek davranış göstermiştir. Bu birleşimlerin servis koşullarında kolay bir şekilde şekillendirilebileceğini ve kullanılabileceğini göstermektedir. Eğme testi sonuçları maksimum kuvvet ve deformasyon olarak Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Test numunelerinin eğilme grafikleri Şekil 4.27'de görülmektedir.



Şekil 4.26. 180° eğme testi a-b) 316L malzemesi, c-d) P355GH, e-f) Enine kaynak g-h) Boyuna kaynak.

Çizelge 4.3. Eğme testi maksimum kuvvet (kN) - deformasyon (mm) değerleri.

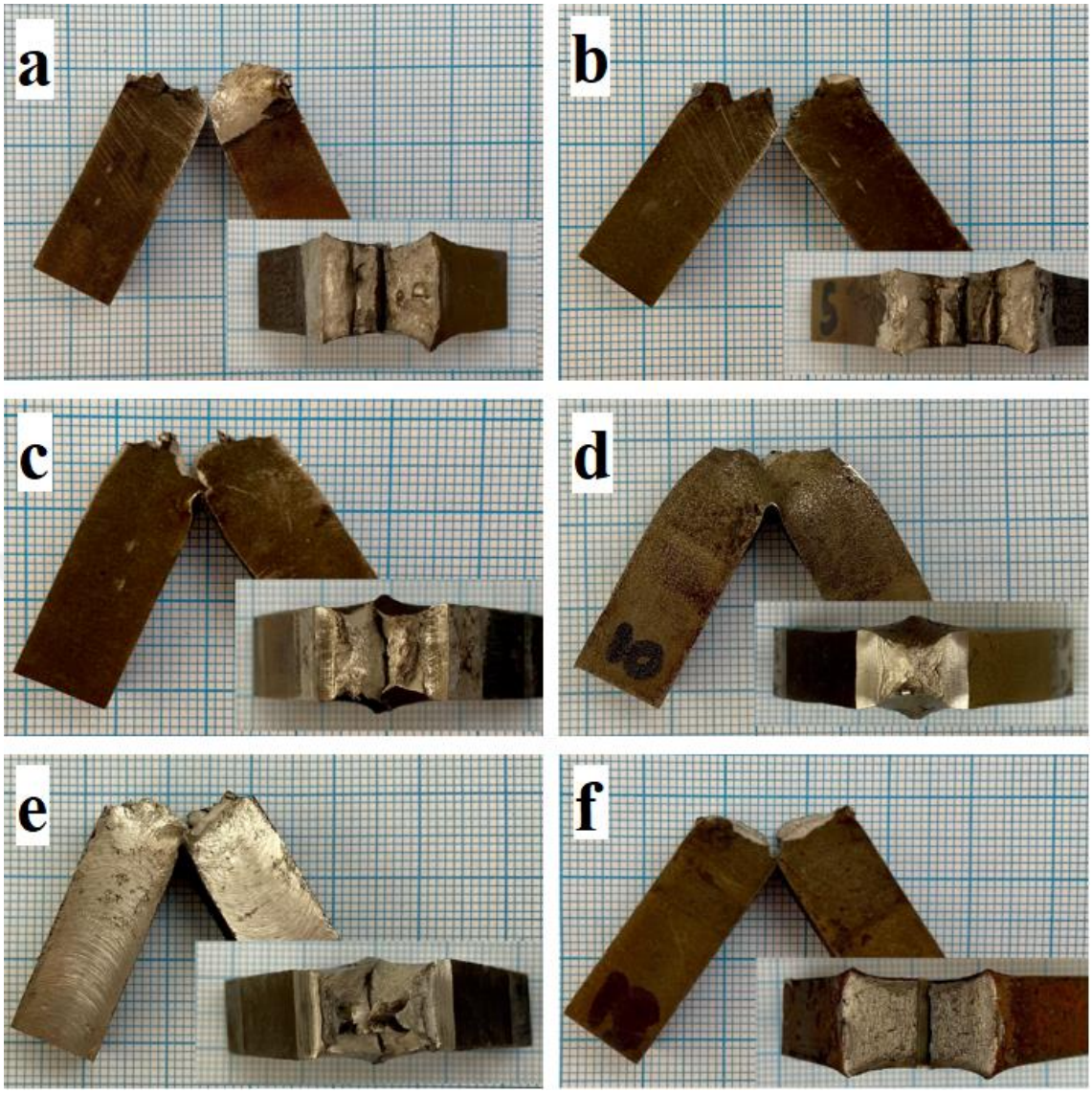
No	Açıklama	Numune ölçüleri (mm)	Maksimum kuvvet (kN)	Deformasyon (mm)
1	316L	200 × 20 × 10	30.006 ± 8	60
2	P355GH	200 × 20 × 10	36.324 ± 12	60
3	Boyuna kaynak	200 × 20 × 10	32.966 ± 11	60
4	Enine kaynak	200 × 20 × 10	34.331 ± 10	60



Şekil 4.27. Kuvvet (kN)-Yer değiştirme (mm) grafiği.

4.2.4. Charpy V-Notch Tokluk Testi (CVN)

Kaynaklı numunelerin ve iki ana metalin oda sıcaklığında (22 ℃) gerçekleştirilmiş Charpy V-Notch enerjisi (CVN) sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir. 316L'nin tokluğu 221.66 ± 15.39 J, P355GH'ın tokluğu 103.11 ± 12.02 J olarak tespit edilmiştir. Enine kaynaklı numunenin tokluğu 200.76 ± 12.37 J ve boyuna kaynaklı numunenin tokluğu 159.66 ± 13.29 J olarak ölçüldü. 316L ITAB ve P355GH ITAB'da oda sıcaklığında sırasıyla yaklaşık 111.99 ± 12.56 J ve 162.45 ± 17.79 J olarak tespit edildi. Şekil 4.28, tokluk testinden sora numunelerde oluşan hasarı sunmaktadır.



Şekil 4.28. Charpy çentik darbe deneyi sonuçları a) P355GH ITAB b) Enine kaynak merkezi c) 316L ITAB d) 316L e) Boyuna kaynak f) P355GH.

Çizelge 4.4. Charpy V-Notch darbe deneyi sonuçları.

No	Numune Tanımı	Numune boyutları (mm^3)	Darbe enerjisi (J)	Darbe enerjisi ortalama (J)
1	Enine kaynak merkezi	10×10×55	205.76 209.86 186.68	200.76 ± 12.37
2	316L kaynak ITAB	10×10×55	97.97 122.24 115.75	111.99 ± 12.56
3	P355GH kaynak ITAB	10×10×55	180.65 145.09 161.60	162.45 ± 17.79
4	316L ana malzeme	10×10×55	226.16 204.52 234.32	221.66 ± 15.39
5	Boyuna kaynaklı	10×10×55	149.16 174.62 155.22	159.66 ± 13.29
6	P355GH ana malzeme	10×10×55	111.00 89.28 109.06	103.11 ± 12.02

5. BÖLÜM

TARTIŞMA

Üstün özelliklere sahip malzemeler, günümüz mühendislik tasarımlarının gelişiminin temelini oluşturmaktadır (Özturan vd., 2022). Birbirine benzemeyen metallerin kaynağı, her bir malzemeyi verimli bir şekilde kullanarak ve her malzemenin belirli özelliklerinden makul bir şekilde yararlanarak, ürünün uyarlanabilir tasarımına umut verir (Sirohi vd., 2022; Maurya vd., 2021). Tasarım esnekliği ve ekonomik bir çözüm olmakla birlikte iki farklı metalin birleşiminde mekanik ve mikroyapısal özellikler değerlendirilmesi gereken bir durumdur (Wang vd., 2020; Barrios vd., 2021). Özellikle basınçlı kapların kullanıldığı sistemlerde genel yapı çelikleri yerine ısıya ve basınca dayanıklı basınçlı kap çelikleri, korozyona maruz kalan bölgelerde ise paslanmaz çelikler kullanılabilir. Bu çalışmada 316L ve P355GH farklı özellikte iki çeliğin birleşimi ve kaynaklanabilirliği araştırıldı. Gerçekleştirilen kapsamlı testler ile bu iki farklı malzemenin başarılı bir biçimde birleştirilebildiği tespit edildi.

Farklı metallerin kaynağında çözünebilirlik gereklidir. Bununla birlikte, başarılı bir bağlantı oluşturmak için diğer ikisi ile çözünür olan üçüncü bir metale ihtiyaç duyulur. ER309L ilave teli 316L ve P355GH ile tam çözünürlüğü sağlamış ve iyi bir kaynak banyosu oluşturmuştur. 316L ve P355GH çeliklerinin kaynaklanabilirliğinde metallerin yakın erime sıcaklıklarına sahip olması da pozitif etki yaratmıştır. İki malzeme için karbon oranlarına bakıldığında 316L ve P355GH sırasıyla %0.03 ve %0.22 C içermektedir. Yapılarındaki düşük karbon oranı kaynaklı birleşim verimine pozitif katkıda bulunmuştur. İki ana metal ve kaynak telinde Mn miktarı ortalama %1.7 seviyelerindedir. Mn bu kaynaklı birleşimde kaynaklanabilirliğe, kaynak bölgesindeki dayanıma pozitif katkıda bulunmuştur (Celasun, 2012).

Metalografik incelemelerde iki ana metal, bu iki metalin ısı tesiri altındaki bölgeleri ve kaynak merkezi için optik görüntüleme gerçekleştirildi. Optik görüntüleme

için gerçekleştirilen numune hazırlama prosedürü ile başarılı görüntüler elde edilmiştir (Neissi vd., 2016). Bu çalışmada kullanılan dolgu metalinin bileşimi, kaynak metalinin mikroyapısının evriminde önemli bir rol oynamıştır (Tembhurkar vd., 2021). Optik görüntülemede malzemelerin homojen bir iç yapıya sahip oldukları tespit edildi. 316L östenitik paslanmaz çeliğinin P355GH çeliğine oranla tane boyutları görüntülerden açıkça fark edilecek seviyede daha büyüktü. P355GH çeliğindeki ferrit ve perlit fazları, 316L paslanmaz çelikte ise östenit fazı tespit edildi. Kaynak bölgesinde ise delta ferrit varlığı gözlendi. Optik gözlemler sonucunda 316L paslanmaz çeliğinin ortalama tane boyutu 16.33 ± 5 μm, P355GH çeliğinde ise 5.13 ± 1 μm olarak ölçülmüştür. Kaynak kesitinden alınan görüntülerde kaynak birleşimi sonrası oluşan katılaşmanın kabul edilebilir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Neissi vd., (2016), 2205 ve 316L farklı paslanmaz çelikleri TIG kaynağı yöntemi ile ER2209 dolgu metali kullanarak birleştirmişlerdir ve kaynak bölgesinde benzer yapıyı tespit etmişlerdir. Vignesh vd., (2017), 316L ve 2205 çeliklerini uygun parametreler ile kaynak yöntemiyle birleştirmişlerdir ve mikroyapı incelemelerinde 316L metalinde ferrit, östenit fazları tespit etmişlerdir. Kaynak bölgesinde gerçekleştirdikleri mikroyapı görüntülemelerinde ise eş eksenli tanelere sahip delta ferrit fazları tespit etmişlerdir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen optik görüntülerde P355GH çeliğinin 316L çeliğine göre oldukça küçük tane boyutuna sahip olduğu tespit edildi. ITAB bölgelerinde tane geometrilerinde değişim ve büyüme gözlemlendi. Kaynak bölgesinde heterojen bir tane boyutu görüldü. Bu farklı iki malzemenin birleşiminde kabul edilebilir ve beklenen bir yapıydı. İrsel, (2022), S355JR çeliğini TIG kaynağı yöntemi ile birleştirdiğinde benzer tane ve tane boyutu değişimini tespit etmiştir Pandey vd., (2018), P91 ve P92 çeliklerini otojen tungsten inert gaz (A-TIG) yöntemi ile birleştirmişlerdir. Birleştirilen kaynak metalinin ve ısı tesiri altındaki bölgelerin tane boyutu değişimini tespit etmişlerdir.

Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) analizinde, bir alan emisyonlu elektron kaynağı kullanılması dışında, genellikle SEM analizi ile aynı prensipleri takip eder. Termiyonik elektron kaynaklarını kullanan SEM ile karşılaştırıldığında, FESEM elektron ışınlarını yaymak için potansiyel gradyanı kullanır (Abd Mutalib vd., 2017). 316L malzemesinin FESEM analizleri ile yapının tamamen östenit fazından meydana geldiği tespit edilmiştir ve optik görüntüler ile uyumludur. FESEM analizinde kaynak füzyon bölgesinde δ-ferrit fazı olduğu tespit edildi. İçeriğinde

Cr ve Ni elementleri bulunan metallerin kaynağında delta ferrit fazı olması beklenen bir yapıdır (İrsel, 2021; Özturan vd., 2022). δ-ferrit fazı kaynak bölgesindeki sertliğin artmasına sebep olmuştur ve kaynaklı bağlantının mukavemetini artırdığı tespit edilmiştir. Chen vd., (2021), farklı alanlardaki faz tiplerini belirlemek için 316L, kaynak bölgesi ve GH909 çeliklerinin mikroyapılarını FESEM analizi ile görüntülemişlerdir. 316L metali bölgesinde östenit fazı, kaynak bölgesinde dendritik delta ferrit ve GH909 çeliğinin FESEM görüntülerinde beyaz çökeltiler varlığını tespit etmişlerdir.

316L östenitik paslanmaz çeliğin EDX analizi gerçekleştirildiğinde Si (atomic. %0.65), Cr (atomic. %2.85), Mo (atomic. %0.79) ve Mn (atomic. %1.58), Fe (atomic. %67.89), Ni (atomic. %8.24) elementleri tespit edilmiştir. (Vinoth Jebaraj vd., 2018), gerçekleştirdikleri çalışmada 316L metalinin EDS sonuçlarına göre Cr elementinin % atomik değerini 68.44, Ni elementinin % atomik değerini 27.48 ve Mo elementinin % atomik değerini 4.08 bulmuştur. P355GH çeliğinin EDX analizi gerçekleştirildiğinde Si (atomic. %0.87), Mn (atomic. %1.9), Fe (atomic. %97.23) elementleri tespit edilmiştir. Bu EDX analiz sonuçları Küçüköner vd., (2020) ve Çayırhan, (2019),'ın yaptığı çalışmalar ile uyumludur.

XRD sonuçlarına göre 316L paslanmaz çeliği içerisinde östenit fazı (γ-Fe) ve CrFe fazı oluştuğu tespit edildi. P355GH çeliğinde yalnızca α-Fe fazı tespit edilirken kaynak bölgesinde delta ferrit ve alfa ferrit fazları tespit edildi. Huang vd., (2016), S355JR ve 316L TIG kaynak prosesi ile birleştirmişler ve XRD sonuçlarında S355JR metalinde alfa ferrit 316L metalinde östenit fazlarını tespit etmişlerdir. Kaynak bölgesinde ise α-ferrit fazı, γ-Fe fazı, Cr_2Ni_3 ve $FeNi_3$ fazlarını tespit etmişlerdir.

Vickers mikrosertlik ölçümü 316L ve P355GH malzemeleri ve kaynak birleşimi için gerçekleştirildi. Bu ölçümde kaynak birleşimi bir malzemeden diğerine yatay biçimde ve kaynak merkezinde dikey bir biçimde ölçüldü. 316L metali için 217.8 ± 12 HV, P355GH metali için 195.7 ± 11 HV, kaynak merkezi için 268 ± 15 HV olarak tespit edildi. Wang vd., (2020) farklı 304 ve 2205 metallerini birleşimlerinden enine kesit boyunca gerçekleştirdiği Vickers mikrosertlik dağılımını 180 HV ile 300 HV aralığında bulmuştur. Mikroyapıdaki δ-ferrit mevcudiyeti, dağılımı ve ölçümü gerçekleştirilen bölgedeki δ-ferrit oranı mikrosertlik değerlerinin üzerinde önemli bir etkisi vardır.

Jafarzadegan vd., (2013), 304 ve st37 çeliğini birleştirip kaynak bölgesinde maksimum sertliği 240 HV olarak tespit etmişlerdir.

Çekme testleri bu iki farklı metalin TIG kaynağı ile başarılı bir şekilde birleştirilebileceğini göstermiştir. TIG kaynak yöntemiyle birleştirilmiş plakalarının kaynak bölgelerinin enine kesilmiş numuneleri üzerinde gerçekleştirilen standart çekme testlerine göre hasar 316L malzemesinde meydana geldi. Çekme testi sonuçları ve kopmuş numuneler incelendiğinde kopma bölgelerinde ve numune genelinde bir plastik deformasyon meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil değişimi bakımından sıralama yapıldığında plastik şekil değişimin 316L paslanmaz çeliğinde maksimum olduğu, kaynak bölgesinde ikinci sırada olduğu ve P355GH çeliğinin ise üçüncü sırada olduğu söylenebilir. Benzer biçimde Küçüköner vd., (2020), çalışmalarında P355GH çeliğinin daha az şekil değiştirme yeteneğine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Çekme test sonuçlarına bakıldığın da hem iki ana metalin hem de ER309L kaynak teli ile birleştirilmiş kaynak bölgesinin çok yakın bir dayanıma sahip olduğu tespit edildi. Çekme grafikleri incelendiğinde belirgin akma P355GH çeliğinde görülmektedir. Diğer çekme testlerinde sünekliğin daha yüksek seviyede olduğu söylenebilir. % uzama değeri 316L metalinde en yüksek seviyededir. Standart numuneler ile elde edilen çekme test sonuçlarına göre en yüksek çekme dayanımına sahip malzeme P355GH çeliğidir. Ancak P355GH 601 MPa seviyelerinde bir dayanıma sahip iken 316L ise 595.90 MPa çekme dayanımına sahiptir. Bu nedenle bu iki metalin çekme dayanımı bakımından neredeyse aynı özellikte olduğu söylenebilir. Akma dayanımlarına bakıldığında ise P355GH çeliğinin 437.03 MPa ve 316L çeliğinin ise 356.95 MPa gibi daha düşük bir akma dayanımına sahip olduğu tespit edildi. Çekme testinde akma öncelikle 316L metalinde başladı. 316L numunesinde kesit P355GH çeliğinden daha önce daraldığından hasar 316L metalinde meydana geldi. Hernández-Trujillo vd., (2021), 2205 ve 316L farklı çeliklerini gazaltı ark kaynağı ile birleştirmişler ve çekme deneyi sonucunda akma ve maksimum çekme dayanımı 2205 çeliğinden daha düşük olan 316L çeliği bölgesinden koptuğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışmada birleştirilen malzemelerin çekme dayanımları birbirine oldukça yakındır. Bununla birlikte kaynak birleşimi de neredeyse aynı dayanıma sahiptir (Butt vd., 2012).

Kaynak prosesinde kaynak birleşiminin verimine odaklanıldı. Sac plaka kalınlığı için endüstriyel olarak V kaynak ağzı uygun olmasına rağmen X kaynak ağzı tercih edildi

(Erdemir, 2017). Bu kaynak dolgusunun çift yönden kontrollü oluşturulmasını sağladı. Kaynaklanacak kesitlerde freze ile kaynak ağzı açtıktan sonra temizleme işlemi yapıldı ve bu işlem kaynak hattında boşluk ya da kusurların oluşmasını engelledi. İki kaynak kesitinde seçilen gaz ve basınç değeri bu iki metalin birleştirilmesi için uygundu. Endüstriyel olarak benzer parametreler üretimde kullanılabilir. Soğutma işlemi ortam sıcaklığında (~25 °C) de gerçekleştirildi. Bu çalışmada genel bir TIG kaynak ile birleştirme işleminin verime etkisi araştırıldığında soğuma hızını değiştirecek ek araştırmalar gerçekleştirilmedi. Oda sıcaklığında soğumanın gözle görülebilir negatif etkileri tespit edilmedi. Kaynakların birleştirme verimliliği, birleşim güvenilirliği bu çalışmada kaynak bölgesindeki birleşime odaklanmış özel numuneler ile araştırılmıştır. Özel çekme numuneleri ile yapılan testlerde kaynak birleşim verimliliğinin %101.10 olduğu tespit edildi. Thakare vd., (2019), 304 ve P97 çeliklerinin TIG kaynağı ile birleşiminin kaynak verimliliğini benzer şekilde %141 olarak bulmuşlardır. Elde edilen verimliliğin uygunluğu tespit edildi. Farklı metallerin kaynağı ile ilgili çalışmalar incelendiğinde kaynak verimliliğin endüstriyel ve bilimsel olarak kabul edilebilir olduğu söylenebilir (Karahan vd., 2019; Kim vd., 2021; Küçüköner vd., 2020; Butt vd., 2012).

Eğme deneyi ile kaynaklanmış farklı iki malzemenin birleşiminin eğilme mukavemeti ve eğilme davranışı hakkında değerli sonuçlar elde edildi. 180° eğme deneyi özellikle kaynaklı birleşimlerin incelenmesinde önemli bir deneydir (Özturan, 2022; Verma ve Taiwade, 2016). Eğilme deneyi kaynaklanmış sistemler için tasarım bilgilerini belirlemek, eğilme ve plastik şekil değişim kabiliyetini belirleme bakımından sonuçlar sundu (İrsel, 2022a; Celasun, 2012). Gerçekleştirilen 180° eğme testi sonucunda farklı iki metalin TIG kaynağı ile birleşim bölgesinde gözle görülür bir boşluk, çatlak veya yırtılma tespit edilmedi (Tokgöz, 2021; Çelik ve Alsaran, 1999). Yapılan 180° eğme testi sonunda hem ana malzemelerin hem de kaynaklı birleşime sahip numunelerin eğilme dayanımlarının birbirlerine yakın olduğu tespit edildi. Bu deney ile birleşimin yeterli nüfuziyete, uygun birleştirme kalitesine, kullanılan ilave metalin ana malzemeler ile uygun sünekliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Birbirinden farklı mekanik ve mikroyapısal özelliklere sahip olan bu metaller eğme mukavemeti bakımından karşılaştırıldığında, 316L paslanmaz çeliğinin P355GH çeliğine göre daha düşük dayanıma ve daha yüksek sünekliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Enine kaynaklı numune boyuna kaynaklı numuneye göre bir miktar daha yüksek dayanıma sahiptir.

Enine ve boyuna olmak üzere gerçekleştirilen kaynak bağlantısının kabul edilebilir bir şekil değiştirmeye sahip olduğu görülmüştür. Kaynak bölgesinde genellikle hızlı soğumanın etkisi ile oluşan yapının daha az sünek bir yapı olarak beklenirken bu birleşimde kaynak bölgesi esas metaller ile benzer davranış göstermiştir (Vinoth Jebaraj vd., 2018). Çayırhan (2019), paslanmaz 2205 ve P355GH çelikleri için gerçekleştirdiği kaynak birleşiminde kaynak bölgesinin eğme testi sonucunda yeterli nüfuziyet, yeterli birleştirme kalitesi ve kullanılan ilave telin ana metaller ile uygun sünekliğe sahip olduğunu benzer şekilde tespit etmiştir. Bu iki metali birleştirmede doğru kaynak yönteminin seçimi, kaynak parametrelerin uygunluğunu ve elektrot telinin bu birleşime uygunluğunu kanıtlamıştır.

316L ITAB'dan elde edilen tokluk değerleri, 316L malzemesinden daha düşüktür. P355GH ITAB bölgesinde P355GH malzemesine göre daha yüksek bir tokluk değeri elde edilmiştir. Kaynak bölgesinde ise tokluk değeri 200 J seviyelerindedir ve kaynak bölgesinin yüksek tokluğa sahip olduğu tespit edilmiştir. ITAB bölgelerindeki bu durumu kaynak işlemi sırasına yüksek sıcak, hızlı soğuma ile kalıntı gerilmelerde oluşturmaktadır (Kumar ve Pandey, 2022). Böyle durumlarda ısıl işlem uygulamaları da gerçekleştirilebilmektedir (Sirohi vd., 2022). Tokluk enerjisinin yanında tokluk numunelerinin hasar biçimleri incelendiğinde P355GH ITAB, enine kaynak merkezi ve P355GH numunelerinde kırılma gözlemlenmiştir. Bu sonuç eğme ve çekme deneylerinde tespit edilen süneklik davranışı ile uyumludur ve beklenen bir durumdur. Şekil 4.28-f'de P355GH'ın hasar kesiti malzemenin diğer bölgelere göre daha az sünek olduğunu açıkça göstermektedir. 316L östenitik paslanmaz çeliğinin tokluğu kaynak bölgesi ve P355GH çeliğinden daha yüksektir. Bu çekme deney grafikleri tarafındanda doğrulanmıştır. Farklı metallerin kaynağı ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalarda tokluk ile ilgili benzer sonuçlar elde edilmiştir (Özturan vd., 2022; Kantur, 2022). Neissi vd., (2016), 316L östenitik paslanmaz çeliğin ısıdan etkilenen bölgesinde delta ferrit oluşumu, ferrit miktarındaki artış ve 2205 duplex paslanmaz çeliğinin ısıdan etkilenen bölgesinde krom nitrürlerin oluşumu bir miktar sertlik artışına neden olduğunu tespit ettiler. Pahlawan vd., (2021), 316L paslanmaz çeliği ve St41 düşük karbonlu çeliğin E309L elektrot kullanarak birleştirilen kaynak bölgesinde füzyon hattının yakınında az miktarda delta ferrit kümesi tespit etmişlerdir. δ-ferrit fazının Charpy V-çentik darbe tokluğuna pozitif bir etkisinin olduğu görülmüştür.

6. BÖLÜM

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada farklı özellikteki östenitik paslanmaz çelik 316L ile yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı P355GH çeliği TIG kaynak yöntemi ile başarılı bir biçimde birleştirildi. Bu birleşim kapsamlı teknolojik laboratuvar testleri ile araştırıldı. Birleşimde ER309L kaynak teli kullanıldı. Birleştirilen plakalardan mikroyapı ve mekanik test numuneleri elde edildi. Gerçekleştirilen testlerden elde edilen başlıca sonuçlar şunlardır;

1. Standart test numuneleri ile gerçekleştirilen çekme testlerinde hasar 316L malzemesinde meydana geldi. Kaynak merkezi ve P355GH çeliğinde hasar meydana gelmedi. 316L malzemesi P355GH çeliğine göre daha sünek olduğundan kesit daralması 316L çeliğinde P355GH çeliğinden daha önce başladı. 316L ve P355GH metal malzemeleri için akma dayanımı sırasıyla 356.95 ± 08 MPa ve 437.03 ± 05 MPa olarak elde edildi. 316L paslanmaz çeliğin yüzde uzama değeri yaklaşık %66.4 seviyelerinde iken P355GH malzemesinde ise %36 olarak tespit edildi.
2. Hasarın kaynak birleşimi yerine ana metallerden birinde oluşması sebebiyle kaynak birleşiminin dayanımı standart test numunesi ile ölçülemedi. Kaynak birleşimine odaklanmış özel çekme numuneleri kullanıldı. Bu kaynak birleşiminde yüksek seviyede kesit düşüşüne sahip numuneler kaynak dayanımını ölçmede başarılı sonuçlar sundu.
3. TIG kaynak yöntemi ile bu iki farklı malzeme 316L ve P355GH %101.10 verimlilik ile birleştirildi. Uygulanan kaynak prosedürü ve seçilen ER309L kaynak telinin bu birleşim için uygun olduğu tespit edildi.
4. Optik mikroskop çalışmasında P355GH metalinin ortalama tane boyutu 5.13 ± 1 µm, 316L paslanmaz metalin ortalama tane boyutu ise 16.33 ± 5 µm olarak

ölçülmüştür. Kaynak bölgesinde ise heterojen bir yapı tespit edilmiştir. 316L'nin P355GH malzemesine göre oldukça daha büyük tane boyutuna sahip olduğu gözlemlenmiştir.

5. Vickers mikrosertlik değerlerine göre en yüksek sertlik değeri kaynak metali bölgesinde ölçülmüştür ve ~268 ± 15 HV'dir. P355GH çeliğinin sertliği ~231 ± 10 HV'dir. 316L paslanmaz çeliğinin mikrosertlik değeri ise ~249 ± 14 HV olarak ölçülmüştür. Yapıdaki δ-ferrit mevcudiyeti ve oranı sertlik değerini arttırmıştır.
6. Dolgu metalinin bileşimi, kullanılan farklı iki metalin birleşimi, kaynak yöntemi ve parametreleri kaynak metalinin mikroyapısının değişiminde önemli bir rol oynamıştır. 316L paslanmaz çelik ve P355GH birleştirildiğinde HMK yapılı 04-016-5368 kodlu delta ferrit fazı kaynak bölgesinde oluşmuştur. Delta ferrit fazının varlığı hem kaynak elektrodu ve 316L metalinin ihtiva ettiği yüksek Cr ve Ni oranına hem de kullanılan koruyucu gazın oranına bağlanmıştır.
7. 316L malzemesinin oda sıcaklığında en yüksek tokluk değerine sahip olduğu ve sünek davranış gösterdiği, P355GH malzemesinin en düşük tokluk değerine sahip olduğu ve kaynak bölgesinin ise P355GH çeliğine göre tokluğunun bir miktar daha iyi olduğu tespit edildi. Kaynak merkezinde delta ferrit oluşumunun toklukta pozitif etkisinin olduğu tespit edilmiştir.
8. En yüksek eğilme dayanımı P355GH çeliğinde, en düşük eğilme dayanımı 316L malzemesinde tespit edildi. Kaynak birleşiminde 180° eğme testi sonucunda gözle görülen bir hasar meydana gelmedi. Kaynak birleşim metalinin ana metaller ile uyumlu plastik şekil değişim kabiliyetine sahip olduğu tespit edildi.

KAYNAKLAR

Abd Mutalib, M., Rahman, M. A., Othman, M. H. D., Ismail, A. F., ve Jaafar, J. (2017). Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy-Dispersive X-Ray (EDX) Spectroscopy. In *Membrane Characterization*. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63776-5.00009-7

Ak, H. D. (2014). Geleneksel toz metalurjisi yöntemiyle üretilen AISI 304L ve AISI 316L östenitik paslanmaz çeliklerin özelliklerine sinterleme koşullarının etkisi. In *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (Vol. 39, Issue 1).

Alnak, Y. (2020). *Farklı standartlardaki paslanmaz çelik ve sade karbonlu çelik çiftlerinin sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirilmesi, mekanik özelliklerinin ve mikroyapılarının incelenmesi*.

Barrios, A. M., Burgos, L. M., Niebles-Nuñez, E. E., Espitia, L. A., ve Unfried-Silgado, J. (2021). Influence of immersion corrosion on mechanical properties of AISI 430/AISI 316L dissimilar welded joints. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, *34*(5), 1352–1361. https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.05b.31

Başyiğit, A. B. (2014). *Dubleks paslanmaz çeliklerin TIG kaynağında soğuma hızı ve koruyucu gazın oluşan manyetik fazların oranına ve kaynaklı bağlantının özelliklerine etkisi*.

Bjelić, M., Kovanda, K., Kolařík, L., Kolaříková, M., Vukićević, M., ve Radičević, B. (2017). Numerical Simulation of Hardness Distribution at the HAZ of P355GH Steel. *The Ninth International Triennial Conference Heavy Machinery HM 2017*, *July*, B.7-B.12.

Butt, M. T. Z., Ahmad, M. S., ve Azhar, M. (2012). *Characterization for GTAW AISI 316 To AISI 316 ve Sa 516 Grade 70 Steels With Welded and Pre- Welded Annealing Conditions*. *VIII*(2), 119–133.

Çayırhan, G. (2019). *Dubleks paslanmaz çelik (2205) ve basınçlı kap (P355GH) çeliğinin robotik MAG kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması*. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı.

Celasun, E. (2012). *Heat Treatment and Welding of S355J2 Steel with Different Submerged Arc Welding Wires and Investigation of Their Effect on Weldability*.

Çelik, A., ve Alsaran, A. (1999). Mechanical and structural properties of similar and dissimilar steel joints. *Materials Characterization*, *43*(5), 311–318. https://doi.org/10.1016/S1044-5803(99)00045-5

Chander, G. S., Reddy, G. M., ve Rao, A. V. (2012). Influence of Rotational Speed on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Metal AISI 304-AISI 4140 Continuous Drive Friction Welds. *Journal of Iron and Steel Research International*, *19*(10), 64–73. https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60154-X

Chen, L., Wang, C., Zhang, X., ve Mi, G. (2021). Effect of parameters on microstructure and mechanical property of dissimilar joints between 316L stainless steel and GH909 alloy by laser welding. *Journal of Manufacturing Processes*, *65*(December 2020), 60–69. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.015

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. https://doi.org/10.46740/alku.622016

Condra, J. R. (1997). *Welding Handbook* (W. H. Keams (ed.); Seventh).

Da Luz, F. S., Pinheiro, W. A., Monteiro, S. N., Candido, V. S., ve Da Silva, A. C. R. (2020). Mechanical properties and microstructural characterization of a novel 316L austenitic stainless steel coating on A516 Grade 70 carbon steel weld. *Journal of Materials Research and Technology*, *9*(1), 636–640. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.004

Devendranath Ramkumar, K., Bajpai, A., Raghuvanshi, S., Singh, A., Chandrasekhar, A., Arivarasu, M., ve Arivazhagan, N. (2015). Investigations on structure-property relationships of activated flux TIG weldments of super-duplex/austenitic stainless steels. *Materials Science and Engineering A*, *638*, 60–68. https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.04.041

Doğru, D. (2019). *Orbital TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş 316L paslanmaz çelik malzemelere uygulanan ısıl işlemin mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkisi*.

Dökme, F. (2018). *TIG kaynak yöntemiyle birleştirilen Inconel 625 ve AISI 316 l malzemelerin mekanik özelliklerinin ve korozyon davranışlarının incelenmesi*.

Dong, L., Ma, C., Peng, Q., Han, E. H., ve Ke, W. (2020). Microstructure and stress corrosion cracking of a SA508-309L/308L-316L dissimilar metal weld joint in primary pressurized water reactor environment. *Journal of Materials Science and Technology*, *40*, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.08.035

Ertek Emre, H., Kaçar, R., Bülbül, A., ve Manisalı, B. (2017). AISI 316L-AISI 2205 Farklı Paslanmaz Çelik Çiftinin Kaynak Kabiliyeti. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *6*(1), 244–256. https://doi.org/10.28948/ngumuh.298178

Genç, S. (2021). *Yapı çeliğinden T profili imalatında MAG kaynağında distorsiyonun sonlu elemanlar metoduyla analizi*.

Erdemir, G. (2017). Ürün Kataloğu 2017.

Hernández-Trujillo, S. L., Lopez-Morelos, V. H., García-Rentería, M. A., García-Hernández, R., Ruiz, A., ve Curiel-López, F. F. (2021). Microstructure and fatigue behavior of 2205/316l stainless steel dissimilar welded joints. *Metals*, *11*(1), 1–18. https://doi.org/10.3390/met11010093

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. https://doi.org/10.1080/13621718.2015.1122152

Hull, F. C. (1973). Delta Ferrite and Martensite Formation in Stainless Steels. *Welding Journal (Miami, Fla)*, *52*(5).

İrsel, G. (2021a). Strength-based design of a fertilizer spreader chassis using computer aided engineering and experimental validation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. https://doi.org/10.1177/0954406221993847

İrsel, G. (2022a). Experimental, analytical, and numerical investigations on the flexural and fatigue behavior of steel thin-walled X-section beam. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering*

Science, *0*(0), 1–25. https://doi.org/10.1177/09544062221111053

İrsel, G. (2022b). Strength-based design of a sunflower stalk cutter machine design using finite element analysis and experimental validation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *236*(2), 1147–1168. https://doi.org/10.1177/09544062211059741

İrsel, G. (2022c). Study of the microstructure and mechanical property relationships of shielded metal arc and TIG welded S235JR steel joints. *Materials Science and Engineering A*, *830*(May 2021). https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142320

İrsel, G., ve Güzey, B. N. (2021). Comparison of laser beam, oxygen and plasma arc cutting methods in terms of their advantages and disadvantages in cutting structural steels. *Journal of Physics: Conference Series*, *2130*(1), 012022. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2130/1/012022

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. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.02.008

Jahanzeb, N., Shin, J. H., Singh, J., Heo, Y. U., ve Choi, S. H. (2017). Effect of microstructure on the hardness heterogeneity of dissimilar metal joints between 316L stainless steel and SS400 steel. *Materials Science and Engineering A*, *700*(June), 338–350. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.002

Jeraldnavinsavio, D., Mohamed Farid, A., Ramanamurthy, E. V. V., Porchilamban, S., ve Ravikumar, S. (2019). Evaluation of mechanical properties and micro structural charecterization of dissimilar TIG welded AISI 316L and AISI 430 plates using ER310 and ER2594 filler. *Materials Today: Proceedings*, *16*, 1212–1218. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.216

Kacar, R., ve Acarer, M. (2004). An investigation on the explosive cladding of 316L stainless steel-din-P355GH steel. *Journal of Materials Processing Technology*, *152*(1), 91–96. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.03.012

Kahraman, F., Kasman, Ş., Kahraman, A. D., ve Tunuslu, O. (2017). Investigation of the Weld Zone of Dissimilar Austenitic Stainless Steels to Tool Steels. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, *4*(1), 64–71.

Kahraman, N., Durgutlu, A., ve Gülenç, B. (2004). *316L Paslanmaz Çeliğin TIG Kaynağında Koruyucu Argon Gazına Hidrojen İlavesinin Kaynak Bölgesi Tane Morfolojisine Etkilerinin Araştırılması*. 223–228.

Kantur, S. (2022). 304L ve S355J2C+N çeliklerinin TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı ve mekanik özellikler bakımından incelenmesi. In *Trakya Üniversitesi* (Vol. 33, Issue 1).

Karahan, T., Mert, T., Tümer, M., ve Kerimak, Z. M. (2019). Microstructural Analysis of Inconel 625 Nickel Alloy / UNS S31803 Duplex Stainless-Steel Dissimilar Weldments. *Advanced Technologies ve Materials*, *44*(1), 15–20. https://doi.org/10.24867/atm-2019-1-003

Kaya, N. (2010). AISI 304 paslanmaz çelik ile genel yapı çeliğinin sürtünme kaynak kabiliyetinin araştırılması. In *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Khidhir, G. I., ve Baban, S. A. (2019). Efficiency of dissimilar friction welded 1045 medium carbon steel and 316L austenitic stainless steel joints. *Journal of Materials Research and Technology*, *8*(2), 1926–1932. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.010

Kim, N., Kang, Y., Bang, J., Song, S., Seo, S. M., Kang, C. Y., ve Kang, N. (2021). Microstructural evolution and creep behavior of the weld interface between 10% cr steel and haynes 282 filler metal. *Metals*, *11*(5). https://doi.org/10.3390/met11050764

Küçüköner, H., Karakoç, H., ve Kahraman, N. (2020). Investigation of microstructure and mechanical properties of AISI2205/DIN-P355GH steel joint by submerged arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, *59*(August), 566–586. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.023

Kulkarni, A., Dwivedi, D. K., ve Vasudevan, M. (2020). Microstructure and mechanical properties of A-TIG welded AISI 316L SS-Alloy 800 dissimilar metal joint. *Materials Science and Engineering A*, *790*(June), 139685. https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139685

Kumar, A., ve Pandey, C. (2022). Some studies on dissimilar welds joint P92 steel and Inconel 617 alloy for AUSC power plant application. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, *198*(April), 104678. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104678

Lathabai, S. (2011). 20 - Joining of aluminium and its alloys. In R. Lumley (Ed.), *Fundamentals of Aluminium Metallurgy* (pp. 607–654). Woodhead Publishing. https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857090256.3.607

Liu, L. (2010). 5 - Welding and joining of magnesium alloys to aluminum alloys. In L. Liu (Ed.), *Welding and Joining of Magnesium Alloys* (pp. 38-63e). Woodhead Publishing. https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857090423.1.38

Maurya, A. K., Pandey, C., ve Chhibber, R. (2021). Dissimilar welding of duplex stainless steel with Ni alloys: A review. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, *192*(March), 104439. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104439

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*, *41A*, 2462–2465.

Ming, H., Zhang, Z., Wang, J., Han, E. H., ve Ke, W. (2014). Microstructural characterization of an SA508-309L/308L-316L domestic dissimilar metal welded safe-end joint. *Materials Characterization*, *97*, 101–115. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.08.023

Moteshakker, A., Danaee, I., Moeinifar, S., ve Ashrafi, A. (2016). Hardness and tensile properties of dissimilar welds joints between SAF 2205 and AISI 316L. *Science and Technology of Welding and Joining*, *21*(1), 1–10. https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000062

Mouritz, A. P. (2012). Steels for aircraft structures. In *Introduction to Aerospace Materials*. https://doi.org/10.1533/9780857095152.232

Neissi, R., Shamanian, M., ve Hajihashemi, M. (2016). The Effect of Constant and Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding on Joint Properties of 2205 Duplex Stainless Steel to 316L Austenitic Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *25*(5), 2017–2028. https://doi.org/10.1007/s11665-016-2033-4

Odebiyi, O. S., Adedayo, S. M., Tunji, L. A., ve Onuorah, M. O. (2019). A review of weldability of carbon steel in arc-based welding processes. *Cogent Engineering*, *6*(1), 1–32. https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1609180

Özkan, E. (2019). *The Effect of Post Weld Heat Treatment on S355J2N Structure Steel and Investigation with Destructive Non-Destructive Inspection Methods*.

Özturan, A. B. (2022). Hardox 450 ve S355J2C+N çeliklerinin gazaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı ve mekanik özellikler bakımından incelenmesi. In *Trakya University Institute of Natural and Applied Sciences Department of Mechanical Engineering*.

Özturan, A. B., İrsel, G., ve Güzey, B. N. (2022). Study of the microstructure and mechanical property relationships of gas metal arc welded dissimilar Hardox 450 and S355J2C+N steel joints. *Materials Science and Engineering: A*, 143486. https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143486

Pahlawan, I. A., Arifin, A. A., Marliana, E., ve Irawan, H. (2021). Effect of welding electrode variation on dissimilar metal weld of 316l stainless steel and steel ST41. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1010*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/1010/1/012001

Pandey, C., Mahapatra, M. M., Kumar, P., ve Saini, N. (2018). Dissimilar joining of CFEF steels using autogenous tungsten-inert gas welding and gas tungsten arc welding and their effect on δ-ferrite evolution and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, *31*, 247–259. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.11.020

Pandey, C., Saini, N., Mahapatra, M. M., ve Kumar, P. (2017). Study of the fracture surface morphology of impact and tensile tested cast and forged (CveF) Grade 91 steel at room temperature for different heat treatment regimes. *Engineering Failure Analysis*, *71*, 131–147. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.06.012

Parzych, S., ve Dziurka, R. (2018). Influence of post weld heat treatment for weld joint of P355GH. *MATEC Web of Conferences*, *247*, 1–8. https://doi.org/10.1051/matecconf/201824700038

Pathak, D., Pandey, S. P., Singh, R. P., ve Balu, V. (2022). Influence of external axial magnetic field on shielded metal arc weld properties for high strength low alloy steel. *Materials Today: Proceedings*, *xxxx*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.296

Qazi, M. I., Akhtar, R., Abas, M., Khalid, Q. S., Babar, A. R., ve Pruncu, C. I. (2020). An integrated approach of GRA coupled with principal component analysis for multi-optimization of shielded metal arc welding (SMAW) process. *Materials*, *13*(16). https://doi.org/10.3390/MA13163457

Ramkumar, T., Selvakumar, M., Narayanasamy, P., Begam, A. A., Mathavan, P., ve Raj, A. A. (2017). Studies on the structural property, mechanical relationships and corrosion behaviour of Inconel 718 and SS 316L dissimilar joints by TIG welding without using activated flux. *Journal of Manufacturing Processes*, *30*, 290–298. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.09.028

Sabzi, M., Mousavi Anijdan, S. H., Eivani, A. R., Park, N., ve Jafarian, H. R. (2021). The effect of pulse current changes in PCGTAW on microstructural evolution, drastic improvement in mechanical properties, and fracture mode of dissimilar welded joint of AISI 316L-AISI 310S stainless steels. *Materials Science and Engineering A*, *823*(June), 141700. https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141700

Senthil Kumar, G., ve Ramakrishnan, R. (2021). Design of Optimal Parameter for Solid-State Welding of EN 10028-P355 GH Steel Using gray Incidence Reinforced Response Surface Methodology. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *46*(3), 2613–2628. https://doi.org/10.1007/s13369-020-05169-z

Singh, R. P., Zorrilla, S. E., Vidyarthi, S. K., Cocker, R., ve Cronin, K. (2022). Dairy Plant Design, Construction and Operation. In P. L. H. McSweeney ve J. P. McNamara (Eds.), *Encyclopedia of Dairy Sciences (Third Edition)* (Third Edit, pp.

239–252). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818766-1.00197-5

Sirohi, S., Gupta, A., Pandey, C., Vidyarthy, R. S., Guguloth, K., ve Natu, H. (2022). Investigation of the microstructure and mechanical properties of the laser welded joint of P22 and P91 steel. *Optics and Laser Technology*, *147*(September 2021), 107610. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107610

Sirohi, S., Pandey, C., ve Goyal, A. (2020). Role of heat-treatment and filler on structure-property relationship of dissimilar welded joint of P22 and F69 steel. *Fusion Engineering and Design*, *159*(July), 111935. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111935

Sirohi, S., Pandey, C., ve Goyal, A. (2021a). Role of the Ni-based filler (IN625) and heat-treatment on the mechanical performance of the GTA welded dissimilar joint of P91 and SS304H steel. *Journal of Manufacturing Processes*, *65*(February), 174–189. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.029

Sirohi, S., Taraphdar, P. K., Dak, G., Pandey, C., Sharma, S. K., ve Goyal, A. (2021b). Study on evaluation of through-thickness residual stresses and microstructure-mechanical property relation for dissimilar welded joint of modified 9Cr–1Mo and SS304H steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, *194*(PB), 104557. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104557

Smith, P. (2007). CHAPTER 6 - Fabrication, Assembly, and Erection. In P. Smith (Ed.), *The Fundamentals of Piping Design* (pp. 171–189). Gulf Publishing Company. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-933762-04-3.50015-1

Sridhar Raja, K. S., Prem, J. P. J., Sathiyaseelan, P., Hemanandh, J., Ganesan, S., ve Arunkumar, T. (2021). Investigation of microstructure and mechanical properties of laser and TIG welded stainless steel alloy. *Materials Today: Proceedings*, *44*(November), 3578–3582. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.456

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

Tembhurkar, C., Kataria, R., Ambade, S., Verma, J., Sharma, A., ve Sarkar, S. (2021). Effect of Fillers and Autogenous Welding on Dissimilar Welded 316L Austenitic and 430 Ferritic Stainless Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *30*(2), 1444–1453. https://doi.org/10.1007/s11665-020-05395-4

Thakare, J. G., Pandey, C., Mahapatra, M. M., ve Mulik, R. S. (2019). An assessment for mechanical and microstructure behavior of dissimilar material welded joint between nuclear grade martensitic P91 and austenitic SS304 L steel. *Journal of Manufacturing Processes*, *48*(November), 249–259. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.10.002

Tokgöz, M. B. (2021). *Investigation of Interior Structure and Mechanical Properties of AISI 316L Austenitic Stainless Steel Sheets Joint with Arc Welding*.

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. https://doi.org/10.1007/s00170-016-8614-4

Tumu, D. P., Subramani, P., Gokul Kumar, K., Manikandan, M., Mohan, C. G., Arivazhagan, N., ve Rajan, D. N. (2018). Investigation on microstructure and tensile

properties of dissimilar weld joints between AISI 316l and duplex 2205 stainless steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *402*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012075

Türk, M. (2021). *Effect of Shielding Gas and Welding Wire on Weld Beam Geometry And Strength of S355J0 Steel Welded by GMAW and Microstructure Characterization*.

Uluocak, M. E. (2008). *Hardox 450 Çeliklerinin MAG Kaynak Bölgesi Mikroyapi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*.

Verma, J., Taiwade, R. V., Khatirkar, R. K., ve Kumar, A. (2016a). A comparative study on the effect of electrode on microstructure and mechanical properties of dissimilar welds of 2205 austeno-ferritic and 316L austenitic stainless steel. *Materials Transactions*, *57*(4), 494–500. https://doi.org/10.2320/matertrans.M2015321

Verma, J., ve Taiwade, R. V. (2016b). Effect of Austenitic and Austeno-Ferritic Electrodes on 2205 Duplex and 316L Austenitic Stainless Steel Dissimilar Welds. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *25*(11), 4706–4717. https://doi.org/10.1007/s11665-016-2329-4

Vignesh, K., Elaya Perumal, A., ve Velmurugan, P. (2017). Optimization of resistance spot welding process parameters and microstructural examination for dissimilar welding of AISI 316L austenitic stainless steel and 2205 duplex stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *93*(1–4), 455–465. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0089-4

Vinoth Jebaraj, A., Sampath Kumar, T., ve Manikandan, M. (2018). Investigation of Structure Property Relationship of the Dissimilar Weld Between Austenitic Stainless Steel 316L and Duplex Stainless Steel 2205. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, *71*(10), 2593–2604. https://doi.org/10.1007/s12666-018-1392-y

Wang, W., Hu, Y., Zhang, M., ve Zhao, H. (2020). Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in austenitic-duplex stainless steels. *Materials Science and Engineering A*, *787*(May). https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139499

Wegrzyn, T. (1992). Delta ferrite in stainless steel weld metals. *Welding International*, *6*(9), 690–694. https://doi.org/10.1080/09507119209548267

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

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

Yılmaz, R., ve Tümer, M. (2013). Microstructural studies and impact toughness of dissimilar weldments between AISI 316 L and AH36 steels by FCAW. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *67*(5–8), 1433–1447. https://doi.org/10.1007/s00170-012-4579-0

Yürük, A. (2022). TIG kaynak parametrelerinin AISI 316L paslanmaz çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *X*. https://doi.org/10.5505/pajes.2022.43825

Ziętala, M., Durejko, T., Polański, M., Kunce, I., Płociński, T., Zieliński, W., Łazińska, M., Stępniowski, W., Czujko, T., Kurzydłowski, K. J., ve Bojar, Z. (2016). The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316 L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping. *Materials Science and Engineering A*, *677*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.028

ÖZGEÇMİŞ

İlköğretim ve Lise öğrenimini Edirne'de tamamladı. Lisans eğitimini 2014-2019 yılları arasında T.C. Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2020 yılında T.C. Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimine halen devam etmektedir.