

**AISI 321 PASLANMAZ ÇELİĞİN TIG ARK KAYNAK YÖNTEMİYLE  
BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK İLAVE METALİNİN VE  
KORUYUCU GAZIN ETKİSİ**

**Gökhan YILDIRIM**

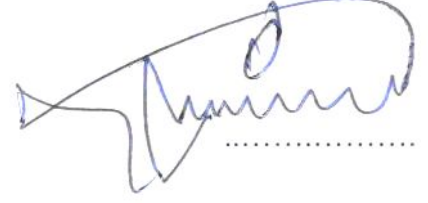
**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metal Eğitimi Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Ocak 2010**

Gökhan YILDIRIM tarafından hazırlanan “AISI 321 PASLANMAZ ÇELİĞİN TIG ARK KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK İLAVE METALİNİN VE KORUYUCU GAZIN ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Ramazan KAÇAR

Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 22/ 01/ 2010

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mustafa ACARER (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Ramazan KAÇAR (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Ramazan ÇITAK (GÜ)



22/01/2010

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Süleyman GÜNDÜZ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



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

Gökhan YILDIRIM

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **AISI 321 PASLANMAZ ÇELİĞİN TIG ARK KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK İLAVE METALİNİN VE KORUYUCU GAZIN ETKİSİ**

**Gökhan YILDIRIM**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metal Eğitimi Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Ramazan KAÇAR**

**Ocak 2010, 101 sayfa**

Bu çalışmada AISI 321 (X6CrNiTi18.10) östenitik paslanmaz çelik çifti ER 309L, ER 347, ER 2209 kaynak ilave metalleri ile üç farklı koruyucu gaz ortamında (Ar + %2 N, Ar + %4 N, Ar + %10 He + %2 N) TIG ark kaynak yöntemiyle alın alına çok pasolu olarak birleştirilmiştir. Birleştirmelere kaynak ilave metalinin ve koruyucu gaz ortamının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme, üç nokta eğme, -50 °C çentik darbe testleri uygulanmış ve sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kaynaklı birleştirmelerin metalografik incelemelerinde optik ve taramalı elektron mikroskopundan yararlanılarak yapılmış böylece mikroyapı ile mekanik özellikler arasındaki ilişki irdelenmiştir.

Yapılan mekanik test sonuçlarına göre maksimum çekme dayanımı ve en yüksek sertlik değerleri Ar + %4 N koruyucu gaz altında ER 2209 kaynak ilave metali ile birleştirilmiş numunede elde edilmiştir. Genel olarak kaynak metalinden -50 °C sıcaklıkta yapılan çentik darbe deney sonuçlarına göre en iyi tokluk ER 309L kaynak ilave metali ile birleştirilen numuneden elde edilmiştir. 180°'ye kadar yapılan eğme testi sonucunda, göz ile yapılan muayenede kaynaklı numunelerin hiçbirinde çatlak, yırtık vb. hata görülmemiştir.

Sonuç olarak elde edilen bulgular her üç kaynak ilave metalinde bu tür çeliklerin birleştirmesinde kullanılabileceğini ancak kullanılan koruyucu gaz olarak Ar + %4 N en iyi sonucu verdiği tesbit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** AISI 321 paslanmaz çelik, TIG ark kaynağı, İlave metali,  
Koruyucu Gaz

**Bilim Kodu** : 626.18.01

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **THE EFFECT OF WELDING CONSUMABLE AND SHIELDING GAS ON THE TIG ARC WELDING OF AISI 321 STAINLESS STEEL**

**Gökhan YILDIRIM**

**Karabuk University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Metallurgy Education**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Ramazan KAÇAR**

**January 2010, 101 pages**

In this study, AISI 321 (X6CrNiTi18.10) austenitic stainless steel was joined under (Ar + %2 N, Ar + %4 N, Ar + %10 He + %2 N) shielding gases by TIG arc welding methods in which ER 309L, ER 347, ER 2209 welding consumables were used. The multipass butt joining technique was used for weldment. The effect of welding consumables and shielding gas on weldment is investigated in detail. In order to determine the mechanical properties of weldment, the tensile, three point bending and Charpy V-notch test at -50 °C temperature and the hardness measurement on cross section of weldment were carried out. In addition, the metallographic evaluation was also carried out by using optical and SEM microscopes. So, the relationship between the mechanical properties and microstructure was determined.

The maximum tensile strength and highest hardness values were determined in weldment that was joined with ER 2209 welding consumable under Ar +%4 N

shielding gases. The highest toughness at -50 °C temperature was obtained in weld metal that was joined with ER 309L welding consumable. No crack was observed on all 180° bended test samples.

As a conclusion, the obtained findings show that the AISI 321 austenitic stainless steel can be welded with all three welding consumables. As a shielding gas, the Ar + %4 N gas mixture gave better result.

**Keywords** : AISI 321 stainless steel, TIG arc welding, Welding consumable,  
Shielding gases

**Science code** : 626.18.01

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının oluşumunda büyük pay sahibi olan,engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve eleştirileriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışman hocam Doç. Dr. Ramazan KAÇAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalar sırasında ve değerlendirmelerinde yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Süleyman GÜNDÜZ ve Yrd. Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK hocalarıma teşekkür etmeyi bir borç bilirim. Ayrıca laboratuvar imkânlarından yararlandığım Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi öğretim elemanlarından Prof. Dr. Adem KURT, Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜRAL ve Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi öğretim elemanlarından Yrd. Doç. Dr. Ayhan EROL ile Arş. Gör. Fatih ÇOLAK hocalarıma teşekkür ederim. Çalışmada AISI 321 kalite paslanmaz çeliğin temininde ve kaynaklı birleştirmelerin elde edilmesinde Borşen LTD. ŞTİ.'nin imkânlarından faydalanılmıştır. Bu sebeple BORŞEN LTD.ŞTİ'nin yönetim kurulu başkanı Mak. Müh. Ferruh KETENCİ ve Kalite Kontrol Şefi Mak Müh. Suat PEHLİVAN'a teşekkür ederim.

Büyük sabır göstererek tezin dizgi aşamasında bana yardımcı olan arkadaşım Hüseyin DEMİRTAŞ'a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve abim Birkan YILDIRIM'a ayrıca beni destekleyip çalışmalarım boyunca beni sabırla bekleyen ömrümü paylaşmayı düşündüğüm Alev ÇİMEN'e sonsuz teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| KABUL .....  | ii           |
| ÖZET .....   | iv           |
| ABSTRACT .....   | vi           |
| TEŞEKKÜR .....   | viii         |
| İÇİNDEKİLER .....  | ix           |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....  | xiii         |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....  | xv           |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....   | xvi          |
| <br>   |              |
| BÖLÜM 1 .....  | 1            |
| GİRİŞ .....  | 1            |
| <br>   |              |
| BÖLÜM 2 .....  | 3            |
| PASLANMAZ ÇELİKLER .....   | 3            |
| 2.1. GENEL .....   | 3            |
| 2.2. PASLANMAZ ÇELİKLERİN TARİHÇESİ .....                                    | 4            |
| 2.3. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜRETİMİ .....                                      | 5            |
| 2.4. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ALAŞIM ELEMENTLERİ VE<br>METALURJİK ETKİLERİ ..... | 7            |
| 2.4.1. Molibden (Mo) .....   | 8            |
| 2.4.2. Alüminyum (Al) .....  | 8            |
| 2.4.3. Karbon (C) .....  | 8            |
| 2.4.4. Niyobyum (Colombiyum) Nb (Cb) .....                                   | 8            |
| 2.4.5. Kobalt (Co) .....   | 8            |
| 2.4.6. Krom (Cr) .....   | 9            |
| 2.4.7. Bakır (Cu) .....  | 9            |
| 2.4.8. Mangan (Mn) .....   | 9            |
| 2.4.9. Azot (Nitrojen) (N) .....   | 9            |

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 2.4.10. Nikel (Ni) .....   | 9            |
| 2.4.11. Kükürt (Sülfür), Fosfor ve Selenyum (S), (P), (Se).....            | 9            |
| 2.4.12. Silisyum (Si) .....  | 10           |
| 2.4.13. Titanyum (Ti) .....  | 10           |
| 2.4.14. Tungsten (Wolfram) (W) .....                                       | 10           |
| 2.5. PASLANMAZ ÇELİKLERİN DENGE DİYAGRAMLARI .....                         | 10           |
| 2.6. PASLANMAZ ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI .....                          | 12           |
| 2.6.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler.....                                   | 12           |
| 2.6.1.1. Östenitik paslanmaz çeliklerin kullanım alanları .....            | 13           |
| 2.6.2. Dupleks (Östenitik-Ferritik) Paslanmaz Çelikler.....                | 15           |
| 2.7.PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÖZELLİKLERİ .....                                 | 16           |
| 2.7.1. Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel Özellikleri .....                     | 16           |
| 2.7.2. Östenitik ve Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri ..... | 17           |
| 2.7.3. Östenitik ve Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Korozyon Özellikleri..... | 19           |
| 2.8. PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK KABİLİYETLERİ .....                       | 22           |
| 2.8.1. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti .....              | 22           |
| 2.9. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜSTÜNLÜKLERİ.....                                | 27           |
| 2.10. PASLANMAZ ÇELİK TÜRÜNÜN SEÇİMİ .....                                 | 28           |
| <br>   |              |
| BÖLÜM 3 .....  | 29           |
| TIG ARK KAYNAĞI.....   | 29           |
| 3.1. TIG ARK KAYNAĞININ TANIMI VE KULLANIM ALANLARI.....                   | 29           |
| 3.2. TIG ARK KAYNAK METODUNDA KULLANILAN ELEMANLAR .....                   | 30           |
| 3.3. TIG ARK KAYNAĞININ ÇALIŞMA PRENSİBİ .....                             | 31           |
| 3.4. TIG ARK KAYNAĞININ AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI.....                     | 32           |
| 3.5. TIG ARK KAYNAK METODUNDA KULLANILAN ELEKTROTLAR...33                  | 33           |
| 3.6. TIG ARK KAYNAĞINDA KULLANILAN KORUYUCU GAZLAR.....                    | 34           |
| 3.6.1. Argon.....  | 35           |
| 3.6.2. Helyum .....  | 36           |
| 3.6.3. Hidrojen.....   | 37           |
| 3.6.4. Azot .....  | 37           |
| 3.6.5. TIG Ark Kaynak Yönteminde Kullanılan Koruyucu Gaz Karışımları....   | 38           |

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 3.7. TIG ARK KAYNAĞI KAYNAK İLAVE METALLERİ.....  | 40           |
| <b>BÖLÜM 4</b> .....  | <b>41</b>    |
| <b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....  | <b>41</b>    |
| 4.1. GENEL .....  | 41           |
| 4.2. DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER .....   | 41           |
| 4.3. DENEY NUMUNELERİNİN BİRLEŞTİRME İÇİN HAZIRLANMASI ....   | 42           |
| 4.4. NUMUNELERİN TIG ARK KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMESİ .....   | 43           |
| 4.4.1. Kaynak Deney Seti .....  | 43           |
| 4.4.2. TIG Ark Kaynağında Kullanılan Kaynak İlave Metalleri.....  | 44           |
| 4.4.3. TIG Ark Kaynağında Kullanılan Koruyucu Gaz Karışımları .....   | 44           |
| 4.4.4. Deney Numunelerinin TIG Ark Kaynağıyla Birleştirilmesi .....   | 45           |
| 4.5. KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDEN DENEY NUMUNELERİNİN<br>HAZIRLANMASI .....                                       | 46           |
| 4.5.1. Çekme Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Testi .....  | 48           |
| 4.5.2. Üç Nokta Eğme Deney Numunesinin Hazırlanması ve Testi .....  | 49           |
| 4.5.3. Darbe Çentik Deney Numunesinin Hazırlanması ve Ölçümü.....   | 50           |
| 4.5.4. Mikrosertlik Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Ölçümü .....  | 51           |
| 4.6. METALOGRAFİK İNCELEMELER .....   | 51           |
| 4.6.1. Metalografik İncelemede Kullanılacak Numunelerin Hazırlanması .....                                      | 52           |
| 4.6.2. Metalografik İncelemede Kullanılacak Dağlayıcıların Hazırlanması ve<br>Dağlama İşleminin Yapılması ..... | 52           |
| 4.6.3. Metalografik İncelemelerin Yapılması .....   | 53           |
| 4.7. KAYNAKLI BAĞLANTIDA KAYNAK SONRASI OLUŞABİLECEK<br>YAPI VE FERRİT MİKTARININ TAHMİNİ .....                 | 53           |
| <b>BÖLÜM 5</b> .....  | <b>55</b>    |
| <b>DENEYSEL SONUÇLAR</b> .....  | <b>55</b>    |
| 5.1. GENEL .....  | 55           |
| 5.2. NUMUNELERİN TIG ARK KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMESİ<br>SIRASINDA KULLANILAN ISI GİRDİSİ .....                   | 55           |
| 5.3. KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK TEST SONUÇLARI .....   | 56           |
| 5.3.1. Çekme Deneyi Sonuçları.....  | 56           |

|  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--|---------------------|
| 5.3.2. Üç Nokta Eğme Deney Sonuçları .....   | 61                  |
| 5.3.3. Darbe Çentik Deney Sonuçları .....  | 62                  |
| 5.3.4. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları .....  | 66                  |
| 5.4. METALOGRAFİK İNCELEME SONUÇLARI .....   | 69                  |
| 5.4.1. Optik Mikroskop Sonuçları.....  | 69                  |
| 5.4.2. Sem İncelemeleri ve EDS Sonuçları.....  | 73                  |
| 5.4.2.1. Kaynaklı birleştirmelerin SEM görüntüsü ve EDS sonuçları.....                 | 73                  |
| <br>   |                     |
| BÖLÜM 6 .....  | 79                  |
| SONUÇLARIN İRDELENMESİ.....  | 79                  |
| 6.1. GENEL .....   | 79                  |
| 6.2. NUMUNELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ İÇİN KULLANILAN ISI<br>GİRDİSİ .....                  | 79                  |
| 6.2.1. Kaynaklı Bağlantıya Uygulanan Isı Girdisi Sonuçlarının İrdelenmesi... 79        | 79                  |
| 6.3. KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERE UYGULANAN MEKANİK TEST<br>SONUÇLARININ İRDELENMESİ ..... | 80                  |
| 6.3.1. Çekme Deney Sonuçlarının İrdelenmesi .....                                      | 80                  |
| 6.3.2. Üç Nokta Eğme Katlama Deney Sonuçlarının İrdelenmesi.....                       | 83                  |
| 6.3.3. Darbe Çentik Deney Sonuçlarının İrdelenmesi.....                                | 83                  |
| 6.3.4. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçlarının İrdelenmesi .....                               | 85                  |
| 6.4. METALOGRAFİK İNCELEME SONUÇLARININ İRDELENMESİ .....                              | 87                  |
| 6.4.1. Optik Mikroskop Sonuçlarının İrdelenmesi .....                                  | 87                  |
| 6.4.2. SEM ve EDS Sonuçlarının İrdelenmesi .....                                       | 90                  |
| <br>   |                     |
| BÖLÜM 7 .....  | 93                  |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....   | 93                  |
| 7.1. SONUÇLAR .....  | 93                  |
| 7.2. ÖNERİLER.....   | 95                  |
| KAYNAKLAR.....   | 96                  |
| ÖZGEÇMİŞ.....  | 101                 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 2.1. Dünya paslanmaz çelik tüketiminin sektörler arası oransal dağılımı.....  | 4            |
| Şekil 2.2. Paslanmaz çeliklerin üretim şeması .....   | 6            |
| Şekil 2.3. Fe-Cr denge diyagramı .....  | 11           |
| Şekil 2.4. Fe-Cr-Ni üçlü denge diyagramı .....  | 11           |
| Şekil 2.5. Schaeffler diyagramı .....   | 24           |
| Şekil 2.6. De Long diyagramı.....   | 25           |
| Şekil 2.7. WRC -92 diyagramı .....  | 26           |
| Şekil 3.1. TIG ark kaynak yönteminin şematik gösterimi.....   | 30           |
| Şekil 3.2. TIG ark kaynak sistemi.....  | 31           |
| Şekil 4.1. Deney numunelerinin boyutları ve kaynak ağız tasarımı .....  | 43           |
| Şekil 4.2. Kaynak işleminin yapıldığı kaynak makinesi. ....   | 44           |
| Şekil 4.3. ER 347 kaynak ilave metali ve AR + %4 N koruyucu gazı ile TIG ark kaynak yöntemiyle birleştirilen deney numunesi görünüşü.....           | 46           |
| Şekil 4.4. Birleştirmelerden deney numuneleri elde etmek için kesim ölçüleri.....   | 47           |
| Şekil 4.5. BaysTronic AG marka Ch-3362, Bayspeed 4020 tip Lazer makinesi ...  | 47           |
| Şekil 4.6. EN 895 standardına göre hazırlanan çekme numunesi boyutları.....   | 48           |
| Şekil 4.7. Çekme test cihazında testin uygulanışı.....  | 48           |
| Şekil 4.8. Üç nokta eğme test numunesi .....  | 49           |
| Şekil 4.9. Üç nokta eğme deneyinin uygulanmasına ait görüntü .....  | 49           |
| Şekil 4.10. Darbe çentik deney numunesi boyutları .....   | 50           |
| Şekil 4.11. Mikrosertlik ölçümünün bağlantı üzerinde gerçekleştirildiği bölgeler  | 51           |
| Şekil 4.12. Dağlama ünitesi şematik gösterimi .....   | 52           |
| Şekil 4.13. Kullanılan malzemelerin Schaeffler diyagramında mikroyapı tahmini .   | 54           |
| Şekil 5.1. Üç farklı kaynak ilave metalinin üç farklı koruyucu gaz karışımında elde edilen birleştirmelerinin ortalama gerilim uzama eğrileri ..... | 57           |
| Şekil 5.2. TIG kaynaklı birleştirmelerin çekme deneyi sonucunda koptuğu bölgeler .....  | 59           |
| Şekil 5.3. Ar + %2 N koruyucu gazında; birleştirilen çekme numunelerinin kırılma yüzey görüntüsü .....  | 60           |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Şekil 5.4.  | Üç nokta eğme deneyi sonucunda numunelerinin makroyapı görüntüleri.....  | 61 |
| Şekil 5.5.  | -50 °C' de kırılan numunelerin darbe çentik deneyi sonuçlarının grafiği.....   | 63 |
| Şekil 5.6.  | Çentik darbe deney numunelerinin kırılma yüzeyleri görüntüleri .....   | 65 |
| Şekil 5.7.  | Üç farklı kaynak ilave metalinin; farklı koruyucu gazı kullanılarak elde edilen kaynaklı birleştirmelerin üst paso sertlik dağılımı.....                             | 67 |
| Şekil 5.8.  | Üç farklı kaynak ilave metalinin; farklı koruyucu gazı kullanılarak elde edilen kaynaklı birleştirmelerin kök paso sertlik dağılımı .....                            | 68 |
| Şekil 5.9.  | AISI 321 paslanmaz çelik mikroyapısı.....  | 69 |
| Şekil 5.10. | Ar + %2 N koruyucu gazı ile 3 farklı ilave metali kullanılarak elde edilen bağlantının mikroyapı görüntüsü.....  | 70 |
| Şekil 5.11. | Ar + %4 N koruyucu gazı ile 3 farklı ilave metali kullanılarak elde edilen bağlantının mikroyapı görüntüsü .....   | 71 |
| Şekil 5.12. | Ar + %10 He + %2 N koruyucu gazı ile 3 farklı ilave metali kullanılarak elde edilen bağlantının mikroyapı görüntüsü .....  | 72 |
| Şekil 5.13. | AISI 321 malzemesinin SEM mikroyapısı .....  | 73 |
| Şekil 5.14. | AISI 321 paslanmaz çelik ana malzemenin, EDS nokta analizi .....   | 74 |
| Şekil 5.15. | Ar + %2 N koruyucu gazı ve sırasıyla ER 309L, ER 347, ER 2209 kaynak ilave metali ile birleştirilen numunelerin SEM mikroyapı görüntüsü.....                         | 75 |
| Şekil 5.16. | Ar + %2 N koruyucu gazı ve ER 309L kaynak ilave metali ile birleştirilen Şekil 5.15. b)'de gösterilen SEM görüntüsü üzerindeki bölgelerin noktasal EDS analizi ..... | 76 |
| Şekil 5.17. | Ar + %2 N koruyucu gazı ve ER 347 kaynak ilave metali ile birleştirilen Şekil 5.15. d)'de gösterilen SEM görüntüsü üzerindeki bölgelerin noktasal EDS analizi .....  | 77 |
| Şekil 5.18. | Ar + %2 N koruyucu gazı ve ER 2209 kaynak ilave metali ile birleştirilen Şekil 5.15. f)'de gösterilen SEM görüntüsü üzerindeki bölgelerin noktasal EDS analizi ..... | 78 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--|---------------------|
| Çizelge 2.1. Östenitik paslanmaz çeliklerin tipik uygulama alanları .....  | 14                  |
| Çizelge 2.2. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler.....   | 16                  |
| Çizelge 2.3. Çift fazlı paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.....  | 17                  |
| Çizelge 2.4. Östenitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri .....  | 18                  |
| Çizelge 2.5. Paslanmaz çeliklerin bazı ortamlardaki korozyon dayanımları .....                                   | 19                  |
| Çizelge 2.6. Paslanmaz çeliklerin çeşitli korozif ortamlardaki korozyon dayanımları.....                         | 20                  |
| Çizelge 3.3. TIG ark kaynağında kullanılan gazların özellikleri.....   | 35                  |
| Çizelge 4.1. Deney malzemelerinin kimyasal bileşimi (% ağırlık) .....  | 42                  |
| Çizelge 4.2. Koruyucu gaz karışım oranları.....  | 46                  |
| Çizelge 4.3. TIG ark kaynak işlemi için uygulanan kaynak parametreleri.....                                      | 45                  |
| Çizelge 5.1. AISI 321 çelik çiftinin alın altına birleştirilmesi sırasında kullanılan ısı girdisi sonuçları..... | 55                  |
| Çizelge 5.2. Kaynaklı numunelerin çekme makaslama deney sonuçları.....   | 56                  |
| Çizelge 5.3. Darbe çentik deneyi sonuçları.....  | 62                  |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

|                      |   |                    |
|----------------------|---|--------------------|
| Ar                   | : | Argon              |
| N                    | : | Azot               |
| He                   | : | Helyum             |
| Cr                   | : | Krom               |
| Fe                   | : | Demir              |
| Ni                   | : | Nikel              |
| C                    | : | Karbon             |
| Mn                   | : | Mangan             |
| Mo                   | : | Molibden           |
| O <sub>2</sub>       | : | Oksijen            |
| °C                   | : | Santigrad Derece   |
| Al                   | : | Alimünyum          |
| Ti                   | : | Titanyum           |
| Ta                   | : | Talyum             |
| Si                   | : | Silisyum           |
| V                    | : | Vanadyum           |
| W                    | : | Wolfram            |
| Co                   | : | Kobalt             |
| Nb                   | : | Niyobyum           |
| Cb                   | : | Colombiyum         |
| Cu                   | : | Bakır              |
| S                    | : | Kükürt             |
| P                    | : | Fosfor             |
| Se                   | : | Selenyum           |
| $\mu\Omega\text{cm}$ | : | Elektriksel Direnç |
| Mpa                  | : | Megapascal         |



|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| N/mm <sup>2</sup> :                 | Çekme Dayanımı Birimi                               |
| Cr <sub>eş</sub> :                  | Krom Eşdeğerliği                                    |
| Ni <sub>eş</sub> :                  | Nikel Eşdeğerliliği                                 |
| eV :                                | Korozyon Direnci Birimi                             |
| Pb :                                | Kurşun  |
| Sb :                                | Antimon   |
| Sn :                                | Kalay   |
| Ca :                                | Kalsiyum  |
| A :                                 | Akım,   |
| V :                                 | Voltaj  |
| Q :                                 | Isı Girdisi   |
| I :                                 | Akım  |
| S :                                 | Kaynak Hızı   |
| kN :                                | Kilonewton  |
| µm :                                | Mikrometre  |
| gr :                                | Gram  |
| HO <sub>2</sub> CCO <sub>2</sub> H: | Okzalik Asit  |
| Sn :                                | Saniye  |
| Hv <sub>0.2</sub> :                 | 200 gr Yük Uygulanarak Ölçülmüş Mikrosertlik Birimi |
| MC :                                | Karbür  |

## KISALTMALAR

|        |   |
|--------|---|
| AISI : | American Iron And Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü) |
| TIG :  | Tungsten Inert Gaz  |
| V2A :  | Vanadyumlu Çelik  |
| EAF :  | Elektrik Ark Furnace  |
| AOD :  | Argon Oxygen Decarburazitaion   |
| YMK :  | Yüzey Merkezli Kübik Yapı   |
| FN :   | Ferrit Numarası   |
| A :    | Östenitik   |
| AF :   | Östenitik – Ferritik  |

|      |   |                                   |
|------|---|-----------------------------------|
| FA   | : | Ferritik – Östenitik              |
| ABD  | : | Amerika Birleşik Devletleri       |
| AC   | : | Alternatif Akım                   |
| DC   | : | Doğru Akım                        |
| SSCB | : | Sosyal Sov. Cum. Bir.             |
| MIG  | : | Metal Inert Gaz                   |
| DIN  | : | Alman Norm Enstitü                |
| EN   | : | Deney Standart Normu              |
| ITAB | : | Isı Tesiri Altında Kalan Bölge    |
| SEM  | : | Taramalı Elektron Mikroskobu      |
| EDS  | : | Elektron Mikroskobu Nokta Analizi |

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Çağımız endüstrisinin vazgeçilmez malzemeleri arasına giren paslanmaz çeliklerin tıp, havacılık, savunma sanayi, gıda sanayi ve modern güç gerektiren alanlarda kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Kullanım alanlarına göre istenen mekanik ve kimyasal özellikleri sağlayan çok çeşitli paslanmaz çelik türleri piyasadan temin edilebilir. Bu türlerden biride östenitik paslanmaz çeliklerdir. Östenitik paslanmaz çelikler “bileşiminde korozyona karşı krom ve östenitik bir yapı sağlamak amacı ile nikel bulunan, oda sıcaklığında manyetik olmayan, ısı işlem ile sertleştirilemeyen soğuk biçimlendirilmeye elverişli paslanmaz çeliktir” diye anılır [1]. Östenitik paslanmaz çelik gurupları içerisinde belli yerlerde, özellikle kullanım alanı bulan türlerden biride AISI 321 kalite paslanmaz çeliktir. AISI 321 paslanmaz çeliklerin kullanım alanının artmasının temel nedenleri korozif ortamlarda, mekanik özelliklerini yitirmeden gösterdikleri yüksek korozyon dirençleri, kolaylıkla şekillendirilebilirlikleri, kolay kaynaklanabilme özelliği ve kullanım alanlarına uygun mekanik özelliklere sahip olmalarıdır.

Östenitik paslanmaz çeliklerin hangi tür kaynak yöntemiyle ve ilave kaynak metaliyle ne tür koşullarda kaynakla birleştirilmesinin uygun olacağını belirlenmesi araştırma konusu olmuştur. Bu çeliklerin kaynak kabiliyetlerini etkileyen birçok metalurjik etken vardır; bunlar delta ferrit fazının oluşumu, tanelerarası korozyona hassasiyet, gerilmeli korozyona hassasiyet ve sigma fazının oluşumu olarak sıralanabilir [2, 3, 4, 5].

Endüstride paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde kullanılan kaynak yöntemlerinden birisi de Tungsten inert gaz (TIG) ark yöntemidir. Paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde kaynak bölgesinin çekme dayanımı ve sünekliliği bakımından; tek

pasolu kaynaktan ziyade çok pasolu kaynak uygulanmalı ve ana malzemenin kimyasal bileşimiyle aynı veya benzer özellikte ilave metal seçilmelidir [6].

Bu çalışmada ticari olarak temin edilen AISI 321 kalite paslanmaz çelik sac malzeme TIG ark kaynak yöntemiyle ER 309L, ER 347, ER 2209 kaynak ilave metalleri kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirme sırasında her bir kaynak ilave metali için üç farklı koruyucu gaz kullanılmıştır (Ar + %2 N, Ar + %4 N, Ar + %10 He + %2 N). Böylece AISI 321'in TIG ark kaynağıyla birleştirilmesine kaynak ilave metalinin ve koruyucu gazın etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla birleştirmelerin çekme ve eğme dayanımı darbe emme enerjileri belirlenmiştir. Ayrıca bağlantının sertlik dağılımı belirlenmiştir. İlave olarak bağlantının metalografik incelemeleri yapılarak, mikroyapı mekanik özellik ilişkisi araştırılmıştır.

Sonuç olarak; AISI 321 paslanmaz çelik sac malzemenin çalışmada kullanılan üç farklı kaynak ilave metali ile sorunsuz bir şekilde birleştirilebildiği ancak mekanik özellikler açısından Ar + %4 N koruyucu gazı kullanılarak ER 2209 kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirmelerin daha öne çıktığı görülmektedir.

## BÖLÜM 2

### PASLANMAZ ÇELİKLER

#### 2.1. GENEL

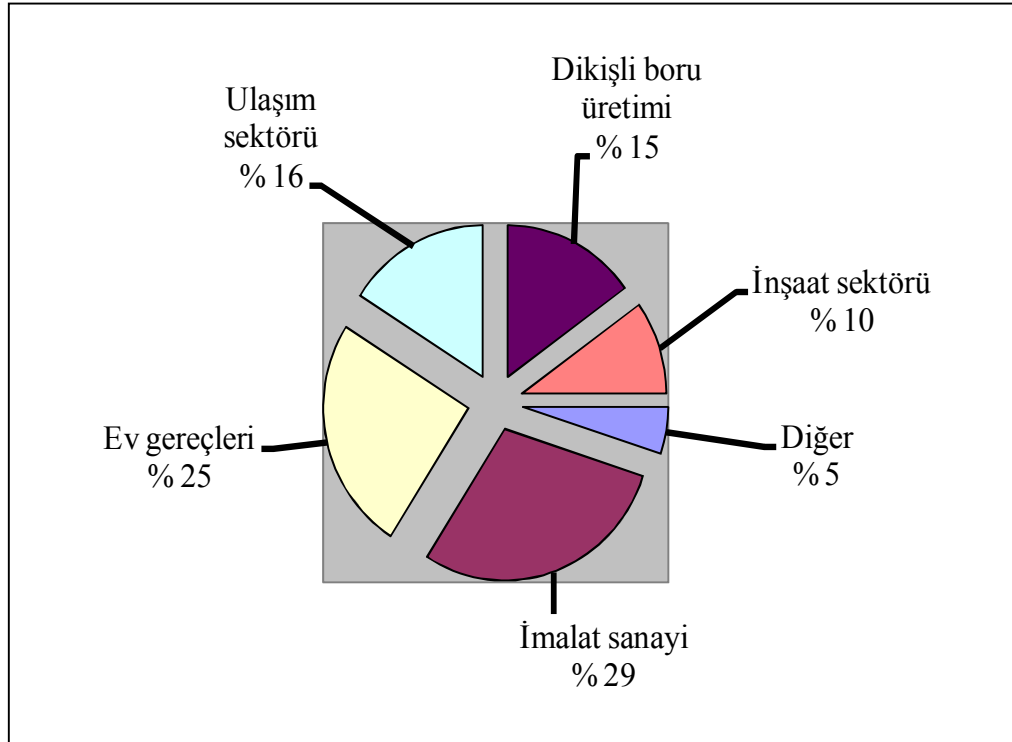
Paslanmaz çelikler bileşimlerinde en az %11 Cr içeren bir çelik ailesidir. Bu çeliklerin yüksek korozyon dayanımını sağlayan unsur; yüzeye kuvvetle tutunmuş, yoğun, sünek, çok ince ve saydam bir oksit tabakasının bulunmasıdır. Çok ince olan bu amorf tabaka sayesinde paslanmaz çelikler kimyasal reaksiyonlara karşı pasif davranarak indirgeyici olmayan ortamlarda korozyona karşı dayanım kazanırlar. Söz konusu oksit tabakası, oksijen bulunan ortamlarda oluşur ve dış etkilerle (aşınma, kesme veya talaşlı imalat vb.) bozulsa dahi kendini onararak eski özelliğine tekrar kavuşur [7].

Paslanmaz çeliklerde bulunan Cr çelik yüzeyinde pasif bir oksit tabakası oluşturarak paslanmazlık ve korozyon direnci sağlamaktadır. Yüzeydeki pasif oksit tabakası kaldırıldığında paslanmaz çelikler korozif saldırıya maruz kalırlar. Atmosfer ortamında paslanmaz çelikteki pasif film tabasındaki artış Cr miktarına bağlıdır [8, 9, 10].

Paslanmaz çelikler mükemmel korozyon dayanımları yanında, değişik mekanik özelliklere sahip türlerinin bulunması, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmeleri, şekil verme kolaylığı, estetik görünümleri gibi özelliklere sahiptirler [7].

Paslanmaz çelikler diğer çeliklere oranla fiyat bakımından daha pahalıdır ancak bakımlarının ucuz ve kolay olması, uzun ömürlü olmaları, tümüyle geri kazanılabilmeleri ve çevre dostu bir malzeme olmaları çok büyük avantajlar sağlar. Dünya endüstrilerinde paslanmaz çelik kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Paslanmaz çeliğin nerelerde hangi oranda kullanıldığı, ülkelerin ekonomisi hakkında

doğrudan bilgi veren bir gösterge niteliğini de taşımaktadır. Kullanım oranının bireysel tüketim ürünlerinde fazla olması genellikle zayıf ekonomilere sahip ülkelerde görülür. Enerji, makine imalat ve ulaşım sektörlerinde kullanımının artması ekonomik yapının kuvvetli olduğunu gösterir. Aşağıdaki Şekil 2.1’de grafiksel olarak 2002 yılında dünya paslanmaz çelik tüketiminin sektörler arası oransal dağılımı hakkında bir fikir vermektedir [7].



Şekil 2.1. Dünya paslanmaz çelik tüketiminin sektörler arası oransal dağılımı [7].

## 2.2. PASLANMAZ ÇELİKLERİN TARİHÇESİ

Paslanmaz çeliklerin tarihte ilk üretimi ile ilgili olarak değişik bilgilere rastlanmaktadır. Bunlardan birinde I. Dünya savaşından sonra Avrupalı bir hurdacı paslı hurdalar arasında parlayan bir top namlusu görür. Bunun neden diğer çelikler gibi paslanmadığını merak ederek analiz ettirir. Sonuçta çeliğin içeriğinde yüksek oranda Cr bulunduğunu öğrenir. Keşiften sonra Avrupa’da paslanmaz çelik üretimi başlar. 1911 yılında C. Dantsizen, General Elektrik firmasında, elektrik ampullerinde flaman olarak kullanılmak üzere %14-16 Cr içeren bir Fe-Cr alaşımı üretir. Aynı

yıllarda İngiltere’de Harry Brearley Fe-Cr alaşımlarının yüksek korozyon direncinden yararlanarak çatal, kaşık, bıçak yapmak üzere 12,8 Cr içeren bir alaşım geliştirmiştir. Aynı araştırmacı bu alaşımların metalografik dağlama ayıraçlarına dirençleri nedeni ile bunlara “paslanmaz çelik” adını vermiştir [6, 11, 12].

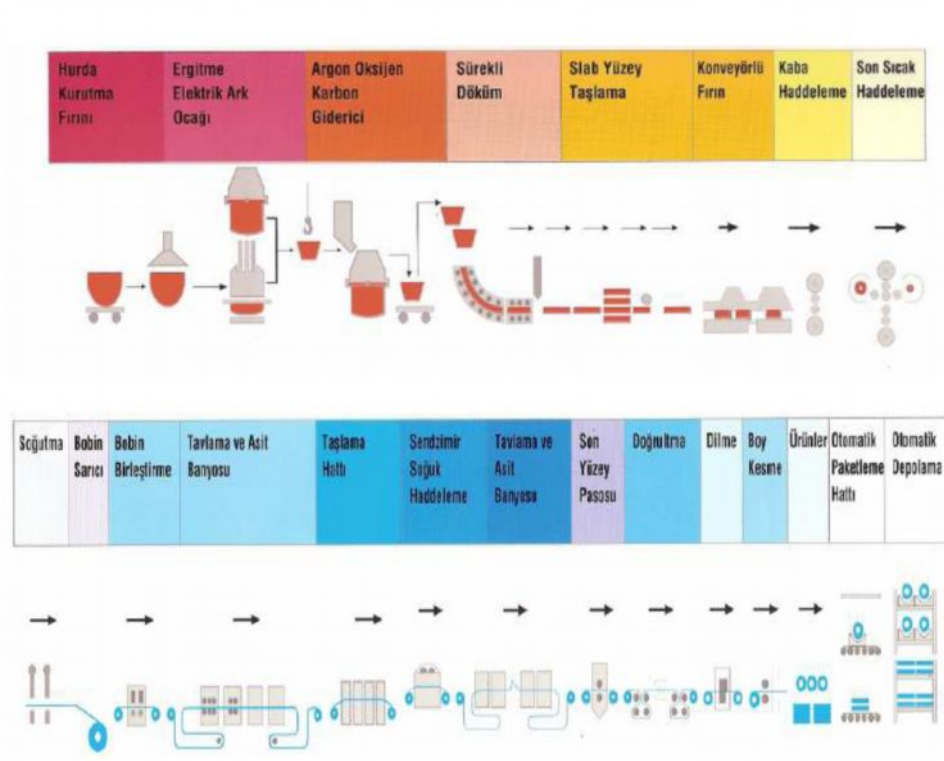
Uzun çalışmalar sonucu geliştirilmiş alaşımın patenti alındıktan sonra 1914 yılından itibaren Krupp, V2A çeliği (%20 Cr, %7 Ni, %0,25 C) adı altında endüstrinin hizmetine sunulmuş, endüstriyel çapta ilk paslanmaz çelik üretimi Maurer tarafından gerçekleştirilmiştir. 1920’li yıllardan itibaren üretim tekniklerinin geliştirilmesi, üretim miktarlarının artması sonucu %17 Cr’lu ferritik ve %18 Cr-8 Ni içeren östenitik paslanmaz çelikler kimya endüstrisinde geniş çapta kullanılmaya başlanmıştır [6, 11, 12].

1950’li yıllarda savaş koşulları nedeni ile östenitik paslanmaz çelik için Ni bulunmasında karşılaşılan güçlükler, bu element yerine Mn ve N’un kullanılabilirliği konusundaki çalışmaları hızlandırmış ve bugün AISI 300 serisi olarak tanımlanan östenitik paslanmaz çeliklerin geliştirilmesine yol açmıştır. Endüstrinin çok farklı gereksinimlerini karşılayacak paslanmaz çelik türlerinin geliştirilmesi konusunda yapılan çalışmalar sonucu dubleks (çift fazlı) ve çökelti sertleşmeli çelik türlerinin yanı sıra çok az karbon ve azot ile çok az katışkılar içeren yeni tür ferritik paslanmaz çeliklerin ve süper-östenitik paslanmaz çeliklerin üretilmesi de gerçekleştirilmiştir [6, 11, 13].

### **2.3. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜRETİMİ**

Paslanmaz çelik üretimi büyük yatırım ve uzmanlık gerektiren bir teknolojidir. Bu çeliklerin ergitme ve arıtma işlemleri genellikle “Elektrik ark ocağı/Argon oksijen karbon giderme” yöntemleriyle yapılır (EAF/AOD: Electric Arc Furnace/ Argon Oxygen Decarburization). 1970’li yıllarda geliştirilen ve dünyada paslanmaz çelik üretiminin %80’ninin gerçekleştirildiği bu yöntem sayesinde, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve kalitenin yükseltilmesi mümkün olmuştur. Daha farklı üretim teknikleri de mevcut olmasına rağmen, bu bölümde sadece EAF/AOD yöntemi ana

hatlarıyla açıklanmıştır. Şekil 2.2’de paslanmaz çeliğin üretim aşamaları şematik olarak gösterilmiştir [7].



Şekil 2.2. Paslanmaz çeliklerin üretim şeması [7].

Paslanmaz çelik üretiminin başladığı ilk yer çelikhanelerdir. Çelikhane ergitme işleminin yapılacağı bazık astarlı elektrik ark ocağına, uygun paslanmaz çelik hurdası, karbon çelik hurdası ve gerektiğinde Ni ve Mo gibi alaşım elementleri yüklenir. Malzemeler, ergitme ocağına konmadan önce belirli bir süre kurutma fırınında tutulur. Ardından malzemeler alaşımlamanın yapıldığı elektrik ark ocağında ergitilir [7].

Bu üretimde en önemli adım “Argon Oksijen Dekarbürizasyonudur” (AOD). Argon oksijen dekarbürizasyonu yöntemiyle malzeme üretimi argon gazı püskürtmeyle oksijen’in dekarbürizasyonu esasına dayanır. AOD ünitesine alınan eriyiğe önce %75 O<sub>2</sub> ve %25 Ar gazları püskürtülür. Bu aşamada alaşımın bileşimindeki C yakılarak, gerekiyorsa %0,02’ye düşürülebilir. Cr oksitlemeye hassas olduğundan, bu sırada bileşimdeki Cr’un bir kısmı da cürufa geçer. Bu nedenle alaşıma Cr’un katılması



büyük oranda karbür gidermenin tamamlanmasından sonra yapılır. Üçüncü aşamada ise alaşımdaki kükürt oranı düşürülür [7, 14].

Bileşim ve sıcaklık istenilen seviyeye ulaştığında, eriyik döküm potasına aktarılır ve son ayarlamalar yapılır. Bu aşamada da alaşıma bazı elementler ilave edilir. Eriyiğin homojenleştirilmesi argon gazı üflenerek sağlanır. Hazırlanan alaşım potadan bir tava aracılığıyla katılaşmanın başladığı su soğutmalı bir bakır kalıp içine dökülür. Katılaşan yassı kütük (slab), bükme ve düzeltme merdanelerinin bulunduğu kısma aktarılır. İşlem sonunda malzeme alev ile istenen boyutta kesilir [7].

Bu işlemin ardından sıcak haddeleme işlemi vardır. Sıcak haddeleme öncesinde ilk işlem yassı kütükler koruyucu atmosferde 1250 °C'ye kadar ısıtılır. Kaba haddeleme ile malzeme kalınlığı kütük boyutundan yaklaşık 25 mm'ye indirilir. Malzemenin istenilen kalınlığa ulaştığı son pasodan sonra sıcak sac bir soğutucu içinden geçirilerek rulo sarıcıya beslenir. Sıcak haddelenmiş bu yarı mamul genellikle bir sonraki işlemler dizisi için soğuk haddeleme ünitesine aktarılır. Soğuk haddeleme sürecinde paslanmaz çelik sac, ileri-geri hareket özelliğine sahip hadde tezgâhında birbirini ardına uygulanan pasolar ile inceltilecek, kalınlıkta %80'e varan azalmalar sağlanabilir [7].

#### **2.4. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ALAŞIM ELEMENTLERİ VE METALURJİK ETKİLERİ**

Paslanmaz çeliklerin bileşiminde paslanmazlık özelliğini sağlayan elementlerin yanı sıra, diğer bazı gereksinimleri karşılamak üzere isteyerek katılan alaşım elementleri ve karbon bulunmaktadır. Bu tür çeliklerdeki başlıca alaşım elementleri önem sırasına göre Cr, Ni, Mo ve Mn'dır. Bunlardan öncelikle Cr ve Ni mikroyapının ferritik ya da östenitik olmasını belirler [7]. Alaşım elementlerinin demirle katı çözültü oluşturması, atom çaplarının oranı ile kristal yapılarına bağlıdır. Bunlardan: Cr, Al, Ti, Ta, Si, Mo, V, W öncelikle alfa demirinde çözündüklerinden ferrit yapıcılar, Ni, C, Co, Mn, N ise benzer nedenle östenit yapıcılar olarak adlandırılır. Bu alaşım elementlerinin etkileri şu şekilde sıralanır [8, 11, 12, 15, 16].

#### **2.4.1. Molibden (Mo)**

Karbür ve ferrit yapıcıdır. Yüksek sıcaklık mukavemetini ve sürünme direncini artırır. Oksitleyici olmayan ortamlarda genel korozyon direncini, diğer ortamlarda çukurcuk korozyon direncini artırmak için kullanılır.

#### **2.4.2. Alüminyum (Al)**

Kuvvetli ferrit yapıcıdır. %12 krom içeren kaynak metaline katılarak yapıyı ferritik yani ısıtılıp sertleşmez hale getirir. Titanyum ile bazı yüksek mukavemetli alaşımlara katılarak yaşlanma sertleşmesi etkisini azaltır. Kuvvetli nitrür yapıcıdır.

#### **2.4.3. Karbon (C)**

Kuvvetli östenit yapıcıdır. Yüksek mukavemetli alaşımlara sertleştirme ve mukavemet artırıcı etki için katılmaktadır. Krom ile birlikte taneler arası korozyonda başrol oynayan karbürlerin oluşumuna neden olur.

#### **2.4.4. Niyobyum (Colombiyum) Nb (Cb)**

Kuvvetli bir karbür yapıcıdır. Östenitik paslanmaz çelikleri krom-karbür çökmesine karşı korur. Orta şiddette ferrit yapıcıdır. Yüksek mukavemetli bazı alaşımlara sertliği ve mukavemeti etkilemek için katılmaktadır. Bazı martenzitik paslanmaz türlerine karbonu bağlayarak, çeliğin sertleşme eğilimini azaltmak amacıyla katılır.

#### **2.4.5. Kobalt (Co)**

Birçok paslanmaz alaşımının yüksek sıcaklıklardaki sürünme ve mukavemet özelliklerini geliştirmek amacıyla katılır.

#### **2.4.6. Krom (Cr)**

Karbür ve ferrit yapıcıdır. Korozyon direncini sağlayan ana alaşım elementidir. Bu elementin paslanmaz çeliklerde yüksek sıcaklıkta mukavemet ve sürünme mukavemetine belirgin bir etkisi yoktur.

#### **2.4.7. Bakır (Cu)**

Oksitlenmeyi azaltarak paslanmaz çeliklerin korozyon direncini artırır.

#### **2.4.8. Mangan (Mn)**

Östenit yapıcıdır. Tam östenitik alaşımlarda kaynak metalinin sıcak çatlama direncini yükseltir.

#### **2.4.9. Azot (Nitrojen) (N)**

Kuvvetli östenit yapıcıdır. Yüksek kromlu ve az karbonlu çeliklerde yüksek sıcaklıklardaki tane büyümesini önlemek için katılır. Sıfırın altındaki sıcaklıklarda kaynak metali tokluğunu ters yönde etkiler. Mukavemeti artırır.

#### **2.4.10. Nikel (Ni)**

Kuvvetli östenit yapıcı ve dengeleyicidir. Oksitleyici olmayan sıvılara karşı genel korozyon direncini artırmak için katılır. Kromlu paslanmaz çeliklere bazı hallerde mekanik özelliklerini geliştirmek için eklenir. Genel olarak kaynak metali tokluğunu yükseltici etkisi vardır.

#### **2.4.11. Kükürt (Sülfür), Fosfor ve Selenyum (S),(P),(Se)**

Bu elementlerden bir tanesi az bir miktar molibden veya zirkonyum ile paslanmaz çeliğe katılarak paslanmaz çeliğin talaşlı üretime yatkınlığı artırılır. Bu üç elementte kaynak metalinde çatlamayı teşvik eder.

#### **2.4.12. Silisyum (Si)**

Ferrit yapıcı bir elementtir. Östenitik paslanmaz çeliklerde korozyon direncini arttırmak için kullanılır. Yüksek sıcaklıklarda tufalleşme direncini artırır. Yüksek sıcaklıklarda kullanılacak çeliklerin karbürizasyon direncini artırmak için katılır.

#### **2.4.13. Titanyum (Ti)**

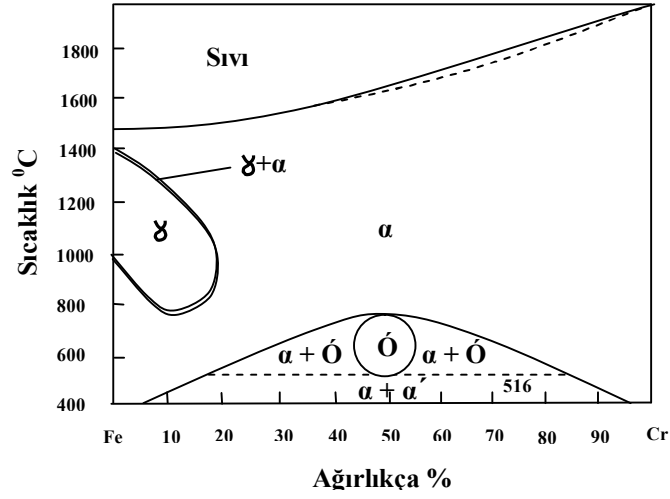
Kuvvetli karbür ve nitrür yapıcıdır. Östenitik paslanmaz çeliklerde krom-karbür çökmesini önlemek için dengeleme elementi olarak kullanılır. Kuvvetli ferrit yapıcıdır. Yüksek sıcaklıklara dayanımlı alaşımlara sertlik ve mukavemet artırıcı etkisinden dolayı katılır. Yüksek mukavemetli ve ısıya dayanımlı alaşımlara yaşlanma sertleşmesini etkilemek için alüminyum ile beraber ilave edilir.

#### **2.4.14. Tungsten (Wolfram) (W)**

Bazı yüksek sıcaklık alaşımlarının mukavemet ve sürünme direncini artırmak için katılır. Kuvvetli bir ferrit yapıcıdır [6].

### **2.5. PASLANMAZ ÇELİKLERİN DENGE DİYAGRAMLARI**

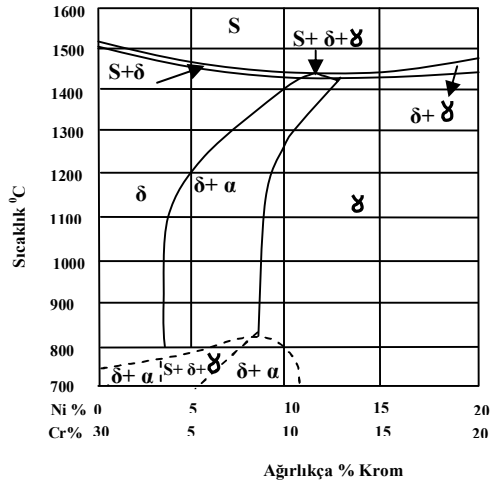
Paslanmaz çeliklerin sınıflarına göre Fe-Cr ikili veya Fe-Cr-Ni üçlü denge diyagramlarından yararlanır. Fe-Cr alaşımlarında alaşıma paslanmazlık özelliği kazandıran Cr miktarı arttıkça (uygulamada bu sınır %13-25 Cr kadardır) Şekil 2.3'teki denge diyagramında da görüleceği gibi alaşım, ferrit alanına girer ve ferritik paslanmaz çelikler olarak adlandırılır [12, 17].



Şekil 2.3. Fe-Cr denge diyagramı [11,17].

Fe-Cr denge diyagramı, martenzitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin doğasını anlamak için yeterlidir.

Paslanmaz çeliklerin en önemli ve değişik bir sınıfı olan östenitik paslanmaz çelikleri tanımak için Fe-Cr-Ni üçlü diyagramının sabit bir Fe oranı için Cr-Ni ikili kesitini ele almak gerekir (Şekil 2.4.) [12, 17]. Aynı diyagram dubleks paslanmaz çelikler içinde kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. Fe-Cr-Ni üçlü denge diyagramı [11, 17].

Şekil 2.4'e göre; 18-8 paslanmaz çeliğin oda sıcaklığında tamamen ferritik yapıda olması gerektiği halde uygulamada bu çelik yüksek sıcaklıktan itibaren oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra östenitik yapıda kalır [12].

## 2.6. PASLANMAZ ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Paslanmaz çelikler 5 grupta sınıflandırılmaktadırlar:

1. Martenzitik Paslanmaz Çelikler
2. Ferritik Paslanmaz Çelikler
3. Östenitik Paslanmaz Çelikler
4. Östenitik-Ferritik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler
5. Çökeltme Sertleşmesi Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler

Bu çalışmada östenitik paslanmaz çelik ana malzeme ve birleştirmede ise bir adet dubleks paslanmaz çelik kaynak ilave metali kullanılacağı için bu iki grup hakkında bilgi verilecektir.

### 2.6.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler Fe-Cr-Ni alaşımlarıdır. AISI 300 serisine girerler. Östenitik Cr-Ni'li paslanmaz çelikler, bileşimlerinde %12-25 Cr ve %8-25 Ni içerirler. Ni kuvvetli östenit yapıcı element olduğundan, bu çeliklerde katılma esnasında ortaya çıkan östenit oda sıcaklığının altındaki sıcaklık derecelerinde bile dönüşmeden kalır. Soğuma esnasında  $\gamma \rightarrow \alpha$  dönüşümü olmadığından bu tür paslanmaz çelikler su verme yoluyla sertleştirilemezler [8, 9, 12, 17].

Bu tür çeliklerin Cr, Ni ve Mn miktarlarının toplamı %24 veya daha fazla ve genellikle Cr içeriği %16 veya daha fazladır. Cr oksitleme ve korozyon direnci sağlar iken, Ni ve Mn, östenit fazın yüksek soğuma hızlarına rağmen oda sıcaklığında dahi kararlı kalmasını sağlamaktadır. Çeliğin kompozisyonuna bağlı olarak kalıcı östenit yapı, tamamen östenit veya östenit matris içinde ferrit taneleri şeklindedir [6, 17].

Başlıca özellikleri;

1. Mükemmel korozyon dayanımına sahiptir.
2. Kaynak edilebilme kabiliyetleri mükemmeldir.
3. Sünek olduklarından kolay şekillendirilebilirler.
4. Hijyeniktirler, temizliği ve bakımı kolaydır.
5. Yüksek sıcaklıklar da iyi mekanik özelliklere sahiptirler.
6. Düşük sıcaklıklardaki mekanik özellikleri mükemmeldir.
7. Manyetik değildirler.
8. Dayanımları sadece soğuk şekillendirme (pekleşme) ile artırılabilir [7].

Paslanmaz çelik kullanımının yaklaşık %80-90'mı östenitik paslanmaz çelikler oluşturur [17, 18, 19].

#### **2.6.1.1. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kullanım Alanları**

Östenitik paslanmaz çeliklerin korozyon dirençleri martenzitik ve ferritik paslanmaz çeliklerden daha yüksektir. Mikroyapının östenit olmasından dolayı ferritik paslanmaz çeliklerde karşılaşılan çok önemli bir sorun olan süneklilikten gevrekliğe geçiş sıcaklığı altındaki gevrekleşme bu tür çeliklerde görülmez. Gerek sıfır altı (-270 °C'ye kadar) ve gerekse yüksek sıcaklıklardaki korozyon dirençleri, mekanik özelliklerin üstünlüğü bu çelik gurubunun birçok alanda rakipsiz bir yapı çeliği olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır [11]. Çizelge 2.1'de östenitik paslanmaz çeliklerin tipik uygulama alanları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Östenitik paslanmaz çeliklerin tipik uygulama alanları [20].

| AISI | Tipik Uygulamalar  |
|------|--|
| 301  | Yüksek pekleşme hızı, yüksek dayanım, yüksek sünekliğin gerekli olduğu yerlerde kullanılır. Tren yolu arabaları, treyler gövdeleri, uçak parçaları, sıkma bilezikleri, otomobil tekerlek kapakları, süslemeler de kullanılırlar.                         |
| 302  | Genel amaçlı östenitik paslanmaz çelik tipidir. Süsleme, yiyecek taşıma ekipmanları, uçak kaportaları, antenler, yaylar, pişirme ekipmanları, inşaatların dış kısımları, mücevherler, petrol rafine ekipmanları, isim plakaları yapımında kullanılırlar. |
| 304  | Kaynak sırasında karbür çökmesini sınırlamak için tip 302'nin düşük modifikasyonu kimyasal ve yiyecek işleme ekipmanları, mayalama ekipmanları, soğuk kaplar, oluklar, yağmur olukları, sac kaplama yapımında kullanılırlar.                             |
| 314L | Kaynak sırasında karbür çökmesinin daha çok sınırlanması için tip 304'ün daha fazla düşük karbon modifikasyonudur. Depolama tanklarının yapımında kullanılırlar.   |
| 309  | Yüksek sıcaklık dayanımı ve oksitleme direnci, uçak ısıtıcıları, ısı işlem ekipmanları, tavlama kapakları, fırın parçaları, pompa parçaları yapımında kullanılırlar.   |
| 310  | Tip 309'dan daha yüksek oksitleme direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı gösterir. Isı değiştiriciler, fırın parçaları, yanma çemberleri, kaynak dolgu metalleri, gaz türbin bıçakları, yakma makinesi ısı toplayıcıları yapımında kullanılırlar.           |
| 316  | Tip 304'den daha yüksek korozyon direnci, yüksek sürtünme dayanımına sahiptir. Fotoğraf ekipmanları, kanyak fiçileri, gübreleme parçaları, keççap pişirme tencereleri, maya tüpleri imalatında kullanılırlar.  |
| 316L | Tip 316' nın daha fazla karbon modifikasyonu taneler arası karbür çökmesinin önlenmesi zorunlu olunan kaynaklı yapılarda kullanılır. Yoğun kaynak gerektiren yerlerde kullanılırlar.   |
| 321  | Çok şiddetli korozyon şartlarına maruz kaynaklı bağlantı ve 427 °C'den 871 °C'de hizmet için kararlaştırılmış, uçak egzost manifoldları, kaynatma kazanlarında, ısı işlem ekipmanları, kabin ısıtıcıları, ateş duvarları imalatında kullanılırlar.       |
| 347  | Yüksek sürtünme dayanımıyla birlikte tip 321'e benzer özellik gösterirler. Uçak egzost bacaları, kimyasal maddeler için kaynaklı tanker arabaları, jet motor parçaları yapımında kullanılırlar.  |
| 201  | Yüksek pekleşme hızı, tip 301'in düşük karbon miktarına sahip tiptir. Çatal kaşık takımları, otomobil tekerlek kapakları yapımında kullanılırlar.  |
| 202  | Tip 201'in düşük nikel eşdeğeri sahip tiptir. Genel amaçlı mutfak ekipmanları imalatında kullanılırlar.  |



## 2.6.2. Dupleks (Östenitik-Ferritik ) Paslanmaz Çelikler

Çift fazlı paslanmaz çelikler son günlerdeki en hızlı gelişen paslanmaz çelik grubudur ve yaklaşık olarak eşit oranda ferrit ve östenit içeren bir mikroyapıya sahiptir. Yapının ferrit ve östenit fazlarından oluşması nedeniyle bu çelikler dupleks olarak adlandırılır.

Dupleks paslanmaz çelikler, daha yüksek akma dayanımına sahip olmaları ve gerilmeli korozyon çatlamaına karşı daha fazla direnç sağlamaları nedeniyle, konvansiyonel tipteki östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklerinkine göre daha üstün avantajlar sunar. Bunlar, optimum özelliklerini yapılarındaki fazlarının birbirlerine eşit miktarda bulduklarında sergilerler.

Çift fazlı mikroyapı, %21-25 Cr ve %5-7 Ni içeren çeliğin, 1000-1050 °C'de tavlama ve ardından hızlı bir şekilde soğutulması ile elde edilir. Bu bileşimlere ait kaynak metalinin genellikle ferritik yapıda olma eğilimi vardır. Çünkü dolgu metali ferrit olarak katılacak ve sadece belirli bir miktarda östenit dönüşümü olacaktır. Birçok kaynak dolgusuna tavlama işlemi uygulanması mümkün olmadığından, dolgu metalinin Ni oranı %8-10'a yükseltilerek kimyasal analiz modifiye edilir ve bu sayede kaynak metalinin kaynak edildiği haldeki mikroyapısında daha fazla östenit bulundurması sağlanır.

Başlıca Özellikleri:

1. Gerilmeli korozyona karşı yüksek dirence sahiptirler.
2. Klorürlü ortamlarda daha yüksek korozyon dayanımı gösterirler.
3. Östenitik ve ferritik çeliklerden yüksek mekanik dayanım sergilerler.
4. İyi kaynak edilebilirlik ve şekil alma kabiliyetleri vardır.

Bu malzemeler deniz ve tuzlu su ortamında, ısı değiştiricilerinde, petrokimya tesislerinde oldukça geniş kullanım alanı bulurlar [21].

## 2.7. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÖZELLİKLERİ

### 2.7.1. Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel Özellikleri

Paslanmaz çeliklerin ısı iletimi özelliği karbon çeliklerinkinden farklıdır. Örneğin yüksek kromlu çeliklerin ısı iletme kabiliyetleri karbon çeliklerinkinin yaklaşık yarısı kadardır. Östenitik paslanmaz çeliklerde bu durum daha da belirgin olup, ısı iletim kabiliyetleri karbon çeliklerinin üçte birine kadar düşmektedir. Bu durum kaynak sırasında oluşan sıcaklığın kaynak bölgesinde daha uzun süre kalacağı ve dolayısı ile bazı zorluklarla karşılaşılabileceği anlamına gelmektedir. Yüksek kromlu paslanmaz çelikler genellikle karbon çelikleri ile aynı genleşme katsayısına sahiptir. Östenitik paslanmaz çeliklerde ise bu değer karbon çeliklerinden %50 daha fazladır.

Alaşımız karbon çeliklerinin elektrik iletme direnci düşüktür. Paslanmaz çeliklerde ise bu değer karbon çeliklerinden 4-7 kat daha yüksektir. Bu nedenle paslanmaz çelik örtülü elektrotlar konvansiyonel elektrotlardan daha çabuk kızarırlar. Paslanmaz çelik elektrotların alaşımız ve düşük alaşımız demir elektrotlardan boy olarak daha kısa imal edilmelerinin ve %25 kadar daha düşük akım şiddeti ile yüklenmelerinin temel nedeni de budur.

Her bir paslanmaz çelik grubuna ait ortalama fiziksel özellikler Çizelge 2.2'de verilmiştir [20].

Çizelge 2.2. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler [20].

| Fiziksel Özellikler                           | Östenitik Paslanmaz Çelikler | Ferritik Paslanmaz Çelikler | Martenzitik Paslanmaz Çelikler | Çökelme İle Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler |
|---|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--|
| Elastisite Modülü (GPa)                       | 195                          | 200                         | 200                            | 200  |
| Yoğunluk(g/cm <sup>3</sup> )                  | 8,0                          | 7,8                         | 7,8                            | 7,8  |
| Isıl Genleşme Katsayısı (µm/m <sup>0</sup> C) | 16,6                         | 10,4                        | 10,3                           | 10,8   |
| Isıl İletkenlik(W/mk)                         | 15,7                         | 25,1                        | 24,2                           | 22,3   |
| Özgül Isı j/k <sup>0</sup> K)                 | 500                          | 460                         | 460                            | 460  |
| Elektriksel Direnç (µΩcm)                     | 74                           | 61                          | 61                             | 80   |
| Manyetik Geçirgenlik                          | 1,02                         | 600-1100                    | 700-1000                       | 95   |
| Ergime Aralığı (°C)                           | 1375-1450                    | 1425-1530                   | 1425-1530                      | 1400-1440                                    |

### 2.7.2. Östenitik ve Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri

Bu çelikler oda sıcaklığında östenitik (YMK) kristalografik yapıya sahip oldukları için ısıtılma işlemle büyük bir seviyede sertleştirilemezler. Buna karşın bu alaşımlar soğuk deformasyonla dayanımları oldukça arttırılabilir. Çizelge 2.3’de dört adet çift fazlı paslanmaz çeliğe ait mekanik özellikler yer almaktadır.

Çizelge 2.3. Çift fazlı paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri [20].

| Çelik Türü | Çekme Dayanımı<br>(MPa) | Akma Dayanımı<br>%0.2 (MPa) | Uzama<br>% |
|------------|-------------------------|-----------------------------|------------|
| 2205       | 827                     | 448                         | 25         |
| 2304       | 758                     | 414                         | 25         |
| 255        | 758                     | 552                         | 15         |
| 2507       | 800                     | 550                         | 15         |

Çizelge 2.4’te östenitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri verilmiştir [20].

Çizelge 2.4. Östenitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri [21].

| Çelik Türü | Isıl İşlem Şartı    | Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) | Akma Dayanımı % 0,2 (N/mm <sup>2</sup> ) | Uzama (%) | Kesit Daralması (%) | Sertlik (Rockwell) |
|------------|---------------------|-------------------------------------|--|-----------|---------------------|--------------------|
| 201        | Tavlı               | 793                                 | 379                                      | 55        |                     | B90                |
| 201        | Tam Sertleştirilmiş | 1275                                | 965                                      | 4         |                     | C41                |
| 202        | Tavlı               | 724                                 | 379                                      | 55        |                     | B90                |
| 301        | Tavlı               | 758                                 | 276                                      | 60        |                     | B85                |
| 301        | Tam Sertleştirilmiş | 1275                                | 965                                      | 8         |                     | C41                |
| 302        | Tavlı               | 620                                 | 255                                      | 55        | 65                  | B82                |
| 302B       | Tavlı               | 655                                 | 276                                      | 50        | 65                  | B85                |
| 303        | Tavlı               | 620                                 | 241                                      | 50        | 55                  | B84                |
| 304        | Tavlı               | 586                                 | 241                                      | 55        | 65                  | B80                |
| 304L       | Tavlı               | 552                                 | 207                                      | 55        | 65                  | B76                |
| 304N       | Tavlı               | 586                                 | 241                                      | 30        |                     |                    |
| 304LN      | Tavlı               | 552                                 | 207                                      |           |                     |                    |
| 308        | Tavlı               | 586                                 | 241                                      | 55        | 65                  | B80                |
| 308L       | Tavlı               | 551                                 | 207                                      | 55        | 65                  | B76                |
| 309        | Tavlı               | 620                                 | 276                                      | 45        | 65                  | B85                |
| 310        | Tavlı               | 655                                 | 276                                      | 45        | 65                  | B87                |
| 312        | Tavlı               | 655                                 |  | 20        |                     |                    |
| 314        | Tavlı               | 689                                 | 345                                      | 45        | 60                  | B87                |
| 316        | Tavlı               | 586                                 | 241                                      | 55        | 70                  | B80                |
| 316L       | Tavlı               | 538                                 | 207                                      | 55        | 65                  | B76                |
| 316F       | Tavlı               | 586                                 | 241                                      | 55        | 70                  | B80                |
| 317        | Tavlı               | 620                                 | 276                                      | 50        | 55                  | B85                |
| 317L       | Tavlı               | 586                                 | 241                                      | 50        | 55                  | B80                |
| 321        | Tavlı               | 599                                 | 241                                      | 55        | 65                  | B80                |
| 347/348    | Tavlı               | 634                                 | 241                                      | 50        | 65                  | B84                |
| 329        | Tavlı               | 724                                 | 552                                      | 25        | 50                  | B98                |
| 330        | Tavlı               | 550                                 | 241                                      | 30        |                     | B80                |
| 332        | Tavlı               | 552                                 | 241                                      | 45        | 70                  |                    |
| 384        | Tavlı               | 550                                 |  |           |                     |                    |

### 2.7.3. Östenitik ve Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Korozyon Özellikleri

Genelde östenitik paslanmaz çelikler diğer paslanmaz çeliklerden daha iyi korozyon direncine sahiptir. Bu çelikler daha çok nemli ortamlarda kullanılırlar. Artan Cr ve Mo içerikleri agresif çözeltilere karşı korozyon direncini artırır. Yüksek Ni içeriği gerilmeli korozyon çatlamasına karşı riski azaltır. Östenitik paslanmaz çeliklere %2 Mo ilavesi çukurcuk korozyon direncini artırır [19, 20].

Çizelge 2.5. ve Çizelge 2.6'da çeşitli türdeki paslanmaz çeliklerin bazı korozif ortamlardaki korozyon dayanımları verilmektedir. [22].

Çizelge 2.5. Paslanmaz çeliklerin bazı korozif ortamlardaki korozyon dayanımları [22].

| Kimyasal Çözeltinin Türü | Ortam Şartları    |                 | Paslanmaz Çelik Türü |          |                |                |
|--------------------------|-------------------|-----------------|----------------------|----------|----------------|----------------|
|                          | Konsantrasyon (%) | Sıcaklık (°C)   | AISI 410             | AISI 430 | AISI 304       | AISI 316       |
| Hidroklorik Asit         | < 0.2             | Oda Sıcaklığı   |                      |          | ○*             | ○*             |
|                          | > 0.2             | Oda Sıcaklığı   |                      |          | △*             | △*             |
| Nitrik Asit              | 1 ~ 20 (d=1.12)   | Oda Sıcaklığı   | ⊙                    | ⊙        | ⊙              | ⊙              |
|                          |                   | Kaynama Noktası | ○                    | ⊙        | ⊙              | ⊙              |
|                          | 40 ~ 60 (d=1.40)  | Oda Sıcaklığı   | ○                    | ○        | ⊙              | ⊙              |
|                          |                   | Kaynama Noktası | △                    | ○        | ⊙ <sup>1</sup> | ⊙ <sup>1</sup> |
| Sülfürik Asit            | < 0.5             | Oda Sıcaklığı   |                      |          | ⊙              | ⊙              |
|                          |                   | Kaynama Noktası |                      |          | △              | ○              |
|                          | 30 ~ 60           | Oda Sıcaklığı   |                      |          | ○              | ○              |
|                          |                   | Kaynama Noktası |                      |          | △              | △              |
|                          | 95 ~ 100          | Oda Sıcaklığı   |                      |          | ⊙              | ⊙              |
|                          |                   | 100             |                      |          | △              | △              |

⊙ : 0.1 mm/yıl aşınma - yüksek dayanım  
 ○ : 0.1 - 1.0 mm/yıl aşınma - orta dayanım  
 △ : 1.0 mm/yıl üstünde aşınmanın - düşük dayanım  
 P : Karıncalanma (Pitting) korozyonu görülebilir  
 ° : P  
 °1 : Yüksek basınç altında △  
 °2 : Ortamda H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile birlikte bulunuyorsa önlem alınmalıdır.  
 °3 : H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile karıştırılmışsa △  
 °4 : Yüksek sıcaklıklarda P

Bu çizelgelerden de görüldüğü gibi, östenitik ve daha yüksek kromlu paslanmaz çelikler genellikle martenzitik ve daha düşük kromlu ferritik paslanmaz çeliklere oranla daha yüksek korozyon dayanımına sahiptirler [22].

Paslanmaz çeliklerde görülen başlıca korozyon türleri ise gerilmeli, çukurcuk, karıncalanma, çatlak ve tanelerarası korozyondur.

Çizelge 2.6. Paslanmaz çeliklerin çeşitli ortamlardaki korozyon dayanımları [22].

| Paslanmaz Çelik Türleri             | Atmosferik Ortamlar |                             |              |                | Tatlı Su | Tuzlu Su | Toprak | Kimyasal Çözeltiler |
|-------------------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------|----------------|----------|----------|--------|---------------------|
|                                     | Endüstriyel Alanlar | Denizcilikle İlgili Alanlar | Şehir Ortamı | Kırsal Alanlar |          |          |        |                     |
| <b>Östenitik Paslanmaz Çelikler</b> |                     |                             |              |                |          |          |        |                     |
| 201                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        |          | 3      | 4                   |
| 202                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        |          | 3      | 4                   |
| 205                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        |          | 3      | 4                   |
| 301                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        |          | 3      | 4                   |
| 302                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        |          | 3      | 4                   |
| 303                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        |          | 3      | 4                   |
| 304                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        | 3        | 3      | 4                   |
| 304L                                | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        | 3        | 3      | 4                   |
| 304N                                | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        | 3        | 3      | 4                   |
| 305                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        |          | 3      | 4                   |
| 308                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        |          | 3      | 4                   |
| 309                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        | 3        | 3      | 4                   |
| 309S                                | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        | 3        | 3      | 4                   |
| 310                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        | 3        | 3      | 4                   |
| 310S                                | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        | 3        | 3      | 4                   |
| 314                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        |          |        | 4                   |
| 316                                 | 3                   | 1                           | 1            | 1              | 1        | 3        | 1      | 4                   |
| 316L                                | 3                   | 1                           | 1            | 1              | 1        | 3        | 1      | 4                   |
| 317                                 | 3                   | 1                           | 1            | 1              | 1        | 3        | 1      | 4                   |
| 321                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        | 3        | 3      | 4                   |
| 321H                                | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        | 3        | 3      | 4                   |
| 329                                 | 3                   | 2                           | 1            | 1              | 1        | 1        | 3      | 4                   |
| 330                                 | 3                   | 1                           | 1            | 1              | 1        |          | 3      | 4                   |
| 347                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        | 3        | 3      | 4                   |
| 384                                 | 5                   | 2                           | 1            | 1              | 1        |          | 3      | 4                   |

1- Paslanma, lekelenme veya karıncalanma yok, davranışları aşındırıcı  
2- Hafif paslanma veya lekelenme var, karıncalanma yok, hareketine  
3- Hafif paslanma veya lekelenme var, hafif karıncalanma var, uygulama bazında başvurulmalıdır.  
5- Yüzey pasla örtülü ve karıncalanma var,

4- Kimyasal ortamlardaki korozyon ve karıncalanma sınıfının cinsine, yoğunluğuna ortam sıcaklığına ve sınıfın göre büyük farklılıklar gösterir. Bu gibi durumlarda; özel olarak hazırlanan yayımlara

Tanelerarası korozyonun başlıca nedeni ısı etkisi altındaki bölgede oluşan karbür çökmesidir. Eğer tasarım yüksek sıcaklıklarda çalışmayı gerektiriyorsa, sürünme dayanımı, kopma dayanımı ve oksidasyon dayanımında göz önünde tutulmalıdır [22]. AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin başlıca dezavantajı bu çeliklerin 400-850 °C sıcaklık aralıklarına ısıtıldıklarında taneler arası korozyona diğer bir ifadeyle krom karbür çökmesine karşı hassas olmalarıdır. Bu çeliklerin üretimleri sırasında, Cr ve karbürün östenit içersinde çözüldüğü 1100 °C'den itibaren hızla soğutulurlar. Karbonun yayınma hızı çok yavaş olduğundan bu şekilde Cr'un çökme tehlikesi ortadan kaldırılmış olur [19, 20].

Östenitik paslanmaz çeliklerde görülen bir korozyon çeşidide gerilmeli korozyondur. Tane sınırlarında karbür çökmesi gerilim korozyon çatlaklarının oluşmasını kolaylaştırır. Bu tür korozyonlar taneler arası ve taneler içi kırılmalar biçiminde kendini gösterir. Özellikle, östenitik paslanmaz çeliklerin kaynar haldeki klor içeren çözeltiler veya derişik hidroksitler içinde bulunması halinde gerilmeli korozyon oluşum tehlikesi dahada yüksektir. Zira kaynak iç gerginlikleri ve parçanın kullanılacağı kimyasal ortam çatlakların ilerlemesini teşvik eder. Özellikle, deniz suyu içindeki yapılarda, deniz atmosferinde bulunan tesislerde ortaya çıkmakta ve bağlantıların kırılarak tahrip olması ile sonuçlanmaktadır [12, 19]

Östenitik paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle korozyon dirençlerini artırmak mümkündür. Bunlar [9].

1. Çukur ve çatlaklardaki korozyonu önlemek için Mo ilave edilmesi,
2. Kaynak edilmiş parçalarda taneler arası korozyonu önlemek için C miktarının azaltılması veya Ti, Nb elementleri ilavesi yapılması,
3. Yüksek sıcaklıklarda korozyon direncini yükseltmek için Cr ve Ni miktarını arttırılması,
4. Gerilmeli korozyonu önlemek için Ni miktarının artırılması olarak sıralanabilir.

## **2.8. PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK KABİLİYETLERİ**

Paslanmaz çeliklerin büyük bir bölümünün kaynak kabiliyeti yüksektir ve ark kaynağı, direnç kaynağı, elektron ışın ve lazer kaynakları, sürtünme kaynağı ve sert lehimleme gibi çeşitli kaynak yöntemleri ile kaynak edilebilirler. Bu yöntemlerin hemen hemen hepsinde birleştirilecek yüzeylerin ve dolgu metalinin temiz olması gerekmektedir [18].

Günümüzde çok yaygın olarak uygulama alanı bulan paslanmaz çelikler, değişik kaynak yöntemleri ile kaynak edilebilirler, ancak paslanmaz çeliklerin farklı bileşimlerinin, mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilemesi, kaynak kabiliyeti açısından kaynak problemlerini de beraberinde getirmektedir. Bu problemler, oluşturulacak yapıların servis ömrü açısından da önem taşırlar. Bu karakteristikleri şöyle sıralayabiliriz:

1. Paslanmaz çeliklerin düşük ısı iletme katsayıları.
2. Yüksek ısı genleşme katsayıları.
3. Yüksek elektrik iletme direnci.
4. Soğuk şekillendirmeye karşı hassasiyet.
5. Kaynakta izlenen yapısal değişimler (tane irileşmesi, karbür oluşumu, sigma fazı, delta ferrit).
6. Korozyona karşı hassasiyet [18].

Bu çalışmada östenitik paslanmaz çelik kullanılacağı için yalnızca bu çelik grubunun kaynak kabiliyeti hakkında detaylı bilgi verilecektir.

### **2.8.1. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti**

Tüm kaynaklı paslanmaz çelik imalatlarının %90'dan daha fazlasında östenitik paslanmaz çeliklerin kullanılmasının nedeni iyi kaynaklanabilirliğidir. Östenitik paslanmaz çeliklerde kaynaklar, çoğunlukla ana metalle karşılaştırılabilen kimyasal bileşimlere ve mekanik özelliklere sahiptirler. Östenitik paslanmaz çelikler çeşitli



kaynak yöntemleri ile kolaylıkla birleştirilebilir. Bu tür paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti açısından en önemli özellikleri şunlardır: [11, 12, 23].

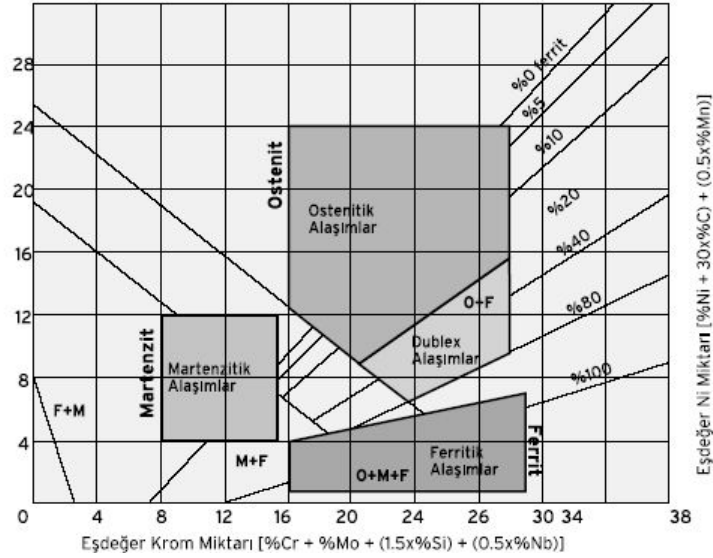
1. Isıl iletme katsayıları oda sıcaklığında, az alaşımlı ve karbonlu çeliklerin yaklaşık üçte biri kadardır;
2. Isıl genleşme katsayıları karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin yaklaşık 1,5 katı yani %50 fazladır,
3. Bu tür çeliklerin elektrik iletme dirençleri, alaşımsız çeliklere karşın dört ila yedi kat daha büyüktür.

Bu özelliklerinden dolayı östenitik paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirmelerinde sade karbonlu çeliklerin kaynağından daha fazla kendini çekme oluşur. Kaynak dikişinin soğuması sırasında büyük çekmelerin oluşumu sonucunda bu bölgede gözlemlenen iç gerilmeler çatlama tehlikesine yol açar. Östenitik paslanmaz çeliklerin sahip olduğu düşük ısı ve elektrik iletkenliği kaynak açısından genellikle yararlıdır. Kaynak sırasında düşük ısı girdisi ile çalışılması önerilir. Çünkü oluşan ısı, bağlantı bölgesinden, karbon çeliklerinde olduğu kadar hızlı bir şekilde uzaklaşmaz. Malzemenin direnci yüksek olduğu için direnç kaynağında, düşük akım değerleri ile çalışılabilir [9, 24].

Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesinde  $\sigma$  (sigma)-fazının bulunması, kaynak edilebilirliklerini olumsuz yönde etkiler ve metallere arası bir bileşik olan bu sert fazın oluşabilmesi için östenitik yapı içinde bir miktarda ferrit bulunması gerekir. Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak metallere arası mikroyapıları esas metalin mikroyapısından bir miktar farklılık gösterir. Tamamen östenitik alaşımların eşdeğer bileşimindeki kaynak metalinin az miktarda ferrit içerdiği görülür. Çeşitli elektrotların kullanımı kaynak yapısının metalürjik yapısını değiştirebilir. Bu amaçla kaynak metalinin kimyasal bileşimini saptamak üzere değişik diyagramlar geliştirilmiştir. Bu diyagramlardan bir tanesi Schaeffler Diyagramıdır [11, 16, 25]. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi Schaeffler Diyagramında ferrit fazını dengeleyici elementler  $Cr_{eş}$  olarak yatay ekseninde, östenit fazını dengeleyen elementler  $Ni_{eş}$  olarak düşey ekseninde yerleştirilmiştir.

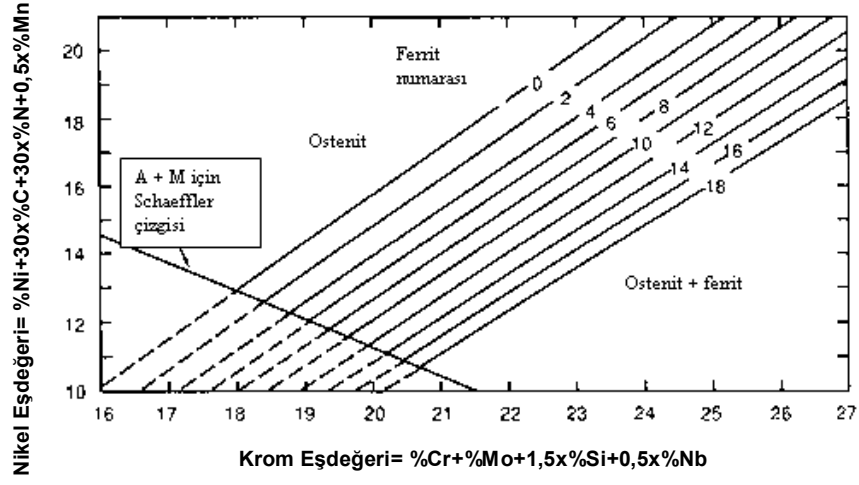
Schaeffler diyagramında yüksek azot içerikleri dikkate alınmamıştır. Bu açıdan diyagram sadece %0,05-0,1 N içerikleri için uygulanabilir. Bu diyagramın yüksek Mn içeren çelikler için kullanılması pek uygun değildir. Schaeffler diyagramı bugün hala paslanmaz çeliklerin üretimi, paslanmaz çelik elektrotların geliştirilmesi ve bu tür çeliklerin kaynak edilmesi konusunda çalışan birçok mühendis ve teknik eleman tarafından yaygın olarak kullanım alanına sahiptir [16].

Schaeffler diyagramının orta kısmında %16'dan %24 Cr<sub>eş</sub>'ne, %6'dan %18 Ni<sub>eş</sub>'e kadar uzanan üçgen biçiminde küçük östenitik ve ferritik içyapılı bir bölge vardır ki bu bölge iyi kaynak kabiliyetine sahiptir [26].



Şekil 2.5. Schaeffler diyagramı [7].

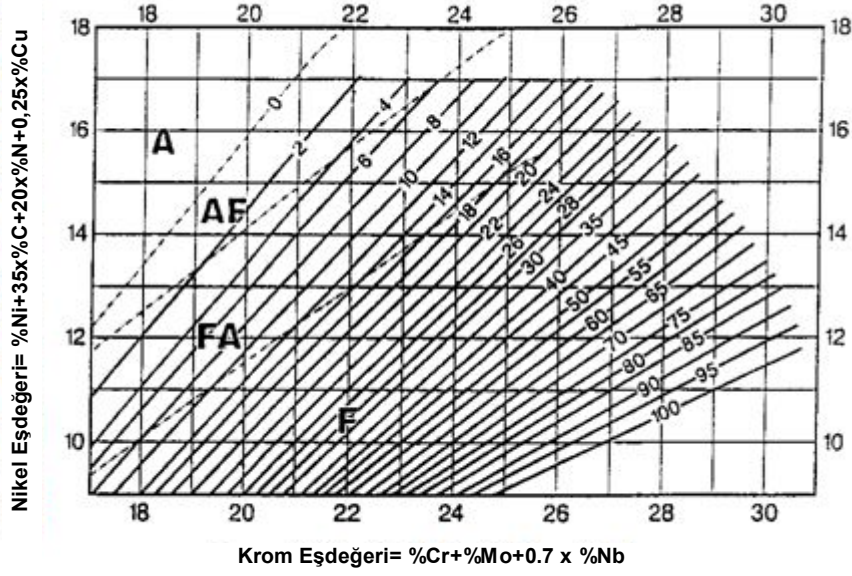
De Long Diyagramı ise azotun östenitik paslanmaz çeliğin faz dengesi üzerine başlıca etkisini gösterir [27]. Bu diyagramda kaynak metalinin yapısında bulunacak  $\delta$ -ferrit (delta ferrit) miktarının saptanması amacı ile ferrit yapıcı elementler krom, molibden, silisyum ve niobiyum, krom eşdeğeri olarak yatay eksen, östenit yapıcı elementler olan nikel, mangan, karbon ve azot miktarına bağlı olarak nikel eşdeğeri düşey eksende yerleştirilmiştir [16]. Şekil 2.6'da gösterilen De Long Diyagramından “ferrit numarası” ve buna bağlı olarak  $\delta$ -ferrit yüzdesi okunabilir.



Şekil 2.6. De Long diyagramı [27].

Delta ferrit içeriği ve kontrolü konusu, ferrit içeriği ve kaynak metali çatlağı arasındaki ilişki nedeniyle 40 yılı aşkın zamandır ilginçliğini korumuştur. Schaeffler ve De Long tarafından daha önce geliştirilen yapısal diyagramların yerine şimdi WRC-92 diyagramı geçmiştir [28].

Bu diyagramlar kimyasal bileşim üstüne ferrit tahmininin doğruluğunu geliştirerek kaynak metali verisini büyük ölçüde sağlamlaştırmıştır. WRC-92 diyagramı Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. WRC-92 diyagramı [28].

Bu diyagram ferrit içeriklerini 100FN (ferrit numarası) kadar genişletmiştir; böylece diyagram dubleks paslanmaz çelik kaynak metalleri için de kullanılmaya başlanmıştır. Bu diyagram östenitik (A), östenitik-ferritik (AF), ferritik-östenitik (FA) ve ferritik (F) rejimlere ayrılan çizgilerle gösterildiği gibi aynı zamanda katılma davranışının rejimlerinin de göstermektedir. Katılma biçimi, kaynak metali katılma çatlama hassasiyeti etkilediğinden beri bu diyagramla katılma davranışı tahmini yapılabilmesi önemli bir katkıdır. Östenit fazından katılma kaynak metalleri, ferrit fazından katılma daha fazla katılma çatlama eğilimindedir [14].

$\delta$ -ferrit oluşumuna mani olmak için katılma östenitik paslanmaz çeliklerde soğumanın çok yavaş bir hızla seyretmesi gereklidir. Bu çeliğin uzun bir süre 1150 °C'de tavlması ve hızla soğutulması da önerilir. Östenit yapıcı elementler olan Ni ve Mn miktarının çeliğin bileşiminde artması  $\delta$ -ferrit oluşumu olasılığını azaltır [29].

## 2.9. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜSTÜNLÜKLERİ

Paslanmaz çeliklerin tercih sebepleri; korozyon dayanımı, yüksek ve düşük sıcaklıklara dayanım, imalat kolaylığı, mekanik dayanım, görünüm, hijyenik özellik ve uzun ömür başlıkları ile sıralanabilir: [7, 30].

- **İmalat Kolaylığı:** Paslanmaz çeliklerin hemen hepsi kesme, kaynak, sıcak ve soğuk şekillendirme ve talaşlı imalat işlemleri ile kolaylıkla biçimlendirilebilirler [7,30].
- **Mekanik Dayanım:** Paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğu soğuk şekillendirme ile pekleşir ve dayanımın artması sayesinde tasarımlarda malzeme kalınlıkları azaltılarak parça ağırlığı ve fiyatta önemli düşüşler sağlanabilir. Bazı türlerde ise ısıtma işlemleri ile malzemeye çok yüksek bir dayanım kazandırmak mümkündür [7, 30].
- **Yüksek ve Düşük Sıcaklıklar:** Bazı paslanmaz çelik türlerinde, yüksek sıcaklıklarda dahi tufallanma ve malzemenin mekanik dayanımında önemli bir düşme görülmez. Bazı türleri ise çok düşük sıcaklıklarda dahi gevrekleşmezler ve tokluklarını korurlar [7, 30].
- **Korozyon Dayanımı:** Bütün paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı yüksektir. Düşük alaşımlı türleri atmosferik korozyona, yüksek alaşımlı türleri ise asit, alkali çözeltiler ile klorür içeren ortamlara dahi dayanıklıdır. Ayrıca yüksek sıcaklık ve basınçlarda da kullanılabilir [7, 30].
- **Görünüm:** Paslanmaz çelikler çok farklı yüzey kalitelerinde temin edilebilirler. Bu yüzeylerin görünümü, kalitesi ve bakımı kolay olduğundan kolaylıkla uzun süreler korunabilir [7, 30].
- **Hijyenik Özellik:** Paslanmaz çeliklerin kolay temizlenebilir olması, bu malzemelerin hastane, mutfak, gıda ve ilaç sanayinde yaygın olarak kullanılmasını sağlar [7, 30].

- **Uzun Ömür:** Paslanmaz çelikler dayanıklı ve bakımı kolay malzemeler olduklarından, üretilen parçanın tüm kullanım ömrü dikkate alındığında ekonomik malzemelerdir [7, 30].

## 2.10. PASLANMAZ ÇELİK TÜRÜNÜN SEÇİMİ

Belirli bir paslanmaz çelik tipinin seçimi, sözkonusu uygulamanın gerektirdiği şartlara bağlıdır. Birçok durumda en önemli belirleyici etkenler korozyon dayanımı, kararma (matlaşma) direnci ve yüksek sıcaklıklardaki oksidasyon dayanımıdır. Bunlara ek olarak, seçilen paslanmaz çelik türü mukavemet, tokluk, süneklik ve yorulma dayanımı gibi konularda minimum mekanik özelliklere de sahip olmalıdır. Farklı tip ve cinsteki çeşitli paslanmaz çelikler uygulama için gereken korozyon dayanımını ve mekanik özellikleri sağlayabilir. Bu durumda son seçim, servis şartlarının gereklerini en iyi şekilde yerine getiren seçenekler içerisinde düşük maliyete sahip olan ürüne göre yapılmalıdır. Paslanmaz çelik tipinin seçimi genellikle sistemi planlayan tasarımcı tarafından yapılır. Tasarımcı seçimi yaparken konu hakkındaki bilgisine, deneyimlerine ve çeşitli malzemelerin söz konusu ortamdaki korozyon dayanımları ile ilgili verileri içeren teknik bilgilere başvurmalıdır. Kaynak ile sorumlu kişi genellikle ana metal seçimi konusunda karar vermekten sorumlu değildir, kaynak yönteminin ve kaynak işlem basamaklarının seçiminden sorumludur [22].

## BÖLÜM 3

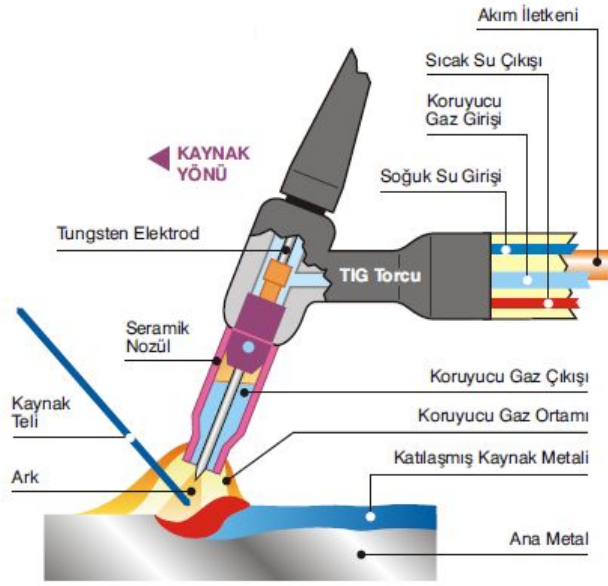
### TIG ARK KAYNAĞI

#### 3.1. TIG ARK KAYNAĞININ TANIMI VE KULLANIM ALANLARI

TIG ark kaynağı metodu koruyucu gaz olarak çoğunlukla argon gazı kullanıldığından dolayı “Argon-Ark” kaynağı diye de isimlendirilmektedir. TIG ismi ise İngilizce “Tungsten Inert Gas Welding” kelimelerinin baş harfleri alınarak oluşturulmuştur. Ayrıca Almanca da wolfram yine tungsten anlamına geldiğinden Avrupa’da bazı ülkelerde TIG ark kaynak metodu WIG olarak da isimlendirilmektedir.

Bir elektrik ark kaynağı metodu olan TIG ark kaynak metodunda kaynak için gerekli ısı, ergimeyen bir tungsten elektrot ile iş parçası arasında oluşturulan elektrik arkından sağlanır. Ark bölgesi çoğunlukla argon gazı gönderilerek korunur. Kaynak ilave metalinin kaynak işlemi uygulanacak ana metale göre kullanılıp kullanılmayacağına karar verilir. Bu metot, 1940–1944 senelerinde ABD’de özellikle hava ve uzay sanayinde alüminyum ve magnezyum gibi hafif metal alaşımlarının kaynağı için geliştirilmiş ve koruyucu gaz olarak o zamanlar ABD’de tabii gaz kaynaklarından bol miktarda elde edilen helyum gazı kullanılmıştır. Metodun çalışma prensibi Şekil 3.1’de şematik olarak görülmektedir.

TIG ark kaynak yöntemi endüstride çok geniş uygulama alanı bulmuştur. Bu kaynak yönteminde kaynakçıya çok iş düşmez. Oksijen kaynağına benzerlik gösterir ama torç farklıdır ve ısıyı elektrik arkından alır, yanıcı ve yakıcı gazı yoktur. Bazı özel çelik malzemelerin kaynağında kullanılabilir fakat daha çok demir dışı metallerin her pozisyonda kaynağı bu metotla yapılır. İnce metallerin kaynağında çok daha fazla başarılı olan TIG, orta kalınlıktaki metallerin kaynağında da kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. TIG ark kaynak yönteminin şematik gösterimi.

TIG ark kaynağında ark ve kaynak banyosu kaynakçı tarafından rahatça görülebilir. Curuf tabakası meydana gelmez ve curuf temizleme ve curuf kalıntısı sorunu yoktur. TIG ark kaynağı gittikçe önem kazanarak uzay, havacılık, gıda, otomotiv sektörlerinde uygulanabilen bir kaynak yöntemi olarak günümüzde karşımıza çıkmaktadır [31, 32].

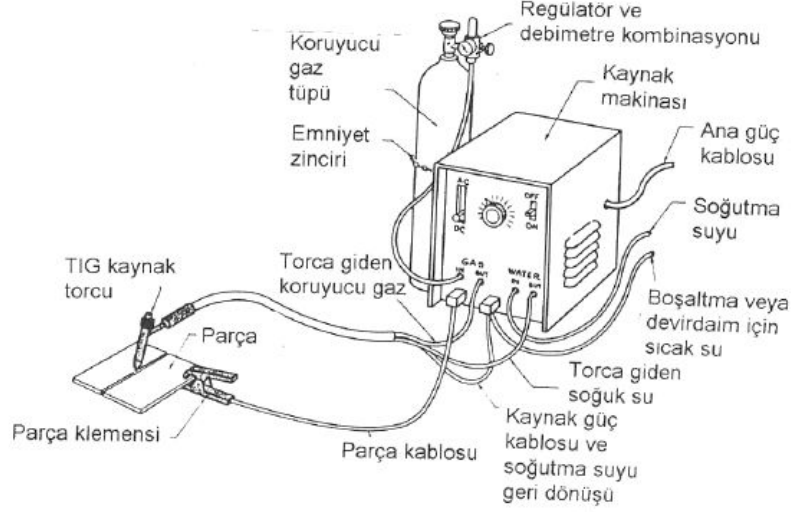
TIG ark kaynak yöntemi çelik, paslanmaz çelik, nikel alaşımları, bakır alaşımları, titanyum alaşımları, alüminyum ve magnezyum alaşımlarının birleştirilmesinde sorunsuzca uygulanmaktadır. Bu malzemelerin kaynaklı birleştirmelerine bakım onarım işlerinde, otomotiv endüstrisinde, gemi inşa sanayinde, uçak ve uzay sanayinde, kimya endüstrisinde, metal imalat sanayinde, gıda endüstrisinde, boru hatları, kazan ve basınçlı kapların imalatında sıkça rastlanmaktadır [22].

### 3.2. TIG ARK KAYNAK METODUNDA KULLANILAN ELEMANLAR

TIG ark kaynak sistemi Şekil 3.2’de gösterilmiştir. TIG ark kaynak metodunda kullanılan başlıca elemanlar, kaynak makinası, koruyucu gaz sistemi, bağlantı kabloları, torç ve tungsten elektrottur. Bu temel elemanların yanı sıra ayrıca ihtiyaç duyulduğunda kullanılan bazı elemanlarda; su sirkülasyon sistemi, ayak pedalı, torç’a



salınım hareketi veren osilatör, (Otomatik TIG ark kaynağında), tel besleme cihazı ve yüksek frekans cihazıdır [31].



Şekil 3.2. TIG ark kaynak sistemi [33].

### 3.3. TIG ARK KAYNAĞININ ÇALIŞMA PRENSİBİ

Bu metotta kaynak işlemi için gerekli ısı, tungsten elektrot ile kaynak edilecek bölge arasında oluşturulan arkta sağlanır. Kullanılan elektrotlar tüketilmeyen tipteki tungsten elektrotlardır. Bunlar ya saf yada tungstenin thoryum veya zirkonyum ile alaşımlarıdır. Eriyik halindeki kaynak banyosu, ısıdan etkilenen bölge ve tungsten elektrot, torç kanalıyla gönderilen koruyucu gaz (çoğunlukla argon) tarafından atmosferin zararlı etkilerine karşı korunur. Ark, iyonize haldeki gaz içerisinde meydana gelir. Bu durumda koruyucu asal gaz elektron kaybederek pozitif olarak yüklenerek iyonize olur. Ark alanı içerisinde bu iyonlar pozitif kutuptan negatif kutuba doğru, elektronlar ise negatif kutuptan pozitif kutuba doğru akarlar. Ana metal ve kaynak ilave metali ark sıcaklığı ile ergitilerek kaynak işlemi gerçekleştirilir. Kaynak ilave metali genellikle kalın parçaların kaynağında kullanılır. Kaynak banyosuna ya otomatik olarak ya da elle yandan verilir [31].

### 3.4. TIG ARK KAYNAĞININ AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

TIG ark kaynağının diğer birçok kaynak metoduna nazaran bazı avantajları vardır. Bunlardan bazıları;

1. Sürekli bir kaynak dikişi yapmak, aralıklarla kaynak yapmak ve punto kaynağı yapmak için hem elle, hem de otomatik kaynak sistemleri ile uygulanabilir.
2. Elektrot tükenmediği için ana metalin ergitilmesiyle veya ilave bir kaynak teli kullanarak kaynak yapılır.
3. Her pozisyonda kaynak yapılabilir ve özellikle ince malzemelerin kaynağına çok uygundur.
4. Kök paso kaynaklarında yüksek nüfuziyetli ve gözeneksiz kaynaklar verir.
5. Isı girdisi kaynak bölgesine yoğunlaştırılmış olduğu için iş parçasında deformasyon düşük olur.
6. Düzgün kaynak dikişi verir ve kaynak dikişini temizlemeye gerek yoktur.
7. Sıçrantı problemi yoktur.
8. Ark ve kaynak banyosu net bir şekilde görülebilir.

TIG ark kaynak yönteminin diğer bilinen ve endüstride sıkça uygulanan eritme kaynağı yöntemlerine göre en önemli üstünlüğü, ısı girdisinin ve eriyen ilave kaynak teli miktarının birbirlerinden bağımsız oluşudur. Bu önemli özellik, yöntemin çok ince parçalara uygulanabilmesine olanak sağlamakta, kök pasoların çekilmesinde, pozisyon kaynaklarında ve tamir işlerinde de kaynakçıya büyük kolaylıklar sağlamaktadır. İlk gelişme yıllarında sadece havacılık endüstrisinde uygulama alanı bulmuş olan bu kaynak yöntemi deneysel ölçüde, magnezyum alaşımlı parçaların birleştirilmesinde kullanılmıştır. Alınan doyurucu sonuçlar, yöntemin endüstrinin diğer alanlarında da uygulanabilirliğini kanıtlamış ve hızla alüminyum, magnezyum ve diğer endüstriyel demir dışı metal ve alaşımlar ile paslanmaz çeliklerin kaynağında çok aranan bir yöntem haline gelmiştir. TIG ark kaynak yöntemi her pozisyonda ve prensip olarak her kalınlıktaki parçalara uygulanabilse, fazla kalın parçalar için işlem süresinin uzaması yöntemin ekonomikliğini yitirmesine neden olmaktadır. Bu bakımdan 7 mm'den kalın parçaların kaynağı için önerilmez. Bununla beraber yüksek kalite ve kaynak emniyetinin gerekli olduğu uçak ve uzay

endüstrisinde çok pasolu kaynak uygulayarak bu olumsuzluğun etkisi azaltılmaya çalışılır. Akım şiddeti azaltılarak diğer ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi olanaksız olan 0,1 mm kalınlığa kadar ince saclar bu yöntem ile çok sağlıklı olarak birleştirilebilmektedir [34].

TIG ark kaynağının dezavantajları ise;

1. Metal yığıma hızı diğer ark kaynak yöntemlerine göre düşüktür.
2. Kalın kesitli malzemelerin kaynağında ekonomik bir yöntem değildir.
3. Tungsten elektrotun ucu dikkat edilmezse kolaylıkla bozulabilir ve dikiş içerisinde tungsten parçacıkları hata olarak kalır.
4. İlk yatırım maliyeti klasik metodlara göre yüksektir.
5. Arkın her türlü hava akımından korunması gerekir. Aksi halde koruyucu gaz arkı gerektiği gibi koruyamaz [34].

### **3.5. TIG ARK KAYNAK METODUNDA KULLANILAN ELEKTROTLAR**

TIG ark kaynağı için kullanılan elektrotlar tükenmezler ve genelde tungstenden yapılıdır. Saf tungsten çok yüksek ısı direncine sahip olan bir malzemedir ve ergime noktası yaklaşık 3380 °C'dir. Tungsteni metal oksit ile alaşımlamakla elektrotun iletkenliği artırılabilir ve böylece yüksek akım yüklerine dayanıklı hale gelir. Bu nedenle alaşımlı tungsten elektrotlar daha uzun ömre ve saf tungsten elektrotlara göre daha iyi tutuşma özelliklerine sahip olur. Tungsteni alaşımlamak için en sık kullanılan metal oksitler; Toryum oksit, Zirkonyum oksit, Lantanyum oksit ve Seryum oksittir.

Saf tungsten elektrotlar ve farklı alaşımlananların aralarındaki farkı söylemek imkânsızdır. Bu nedenle her tip elektrot üzerinde belirli bir renk göstergesi kullanılmaktadır. Elektrotlar son 10 mm'de belirli renklerle işaretlenirler. En çok kullanılan tungsten elektrotlardan; saf tungsten yeşil ile işaretlenmiştir. %2 toryumlu tungsten kırmızı ile işaretlenmiştir. %2 lantanyumlu tungsten mavi ile işaretlenmiştir [11, 35].

Elektrotlar içerisindeki alaşıma göre aşağıdaki şekilde gruplandırılır;

1. Saf tungsten elektrotlar,
2. Tungsten–toryum elektrotlar
3. Tungsten–zirkonyum elektrotlar,
4. Seryum elektrotlar.

Saf tungsten elektrotlar düşük akım şiddetlerinde ve ark daha kararlı olduğu için alternatif akımda kullanılır. Maliyet olarak en ucuz elektrotlardır. Tungsten–Toryum elektrotlar yüksek akım şiddetlerine dayanıklıdır. Arkın başlaması kolaydır ve ark kararlıdır. Bu elektrotlar çeliklerin doğru akım düz kutuplamalarında tercih edilir. Tungsten–Zirkonyum elektrotlar alüminyum, magnezyum ve alaşımlarının düşük ve orta akım şiddetlerindeki elle yapılan kaynaklarında tercih edilir. Seryum elektrotlar yüksek elektron yayılımı ve iyi nüfuziyet sağlayan, aşınma dirençli elektrotlardır [36].

TIG ark elektrotları 0,5–8 mm arasında farklı çaplara sahiptir. En sık kullanılan elektrot çapları ise 1,6–2,4–3,2 ve 4 mm'dir. Elektrot çapı akım yoğunluğu, ne tip elektrota ihtiyaç duyulduğu ve akımın AC ya da DC olması temel alınarak seçilir [37].

### **3.6. TIG ARK KAYNAĞINDA KULLANILAN KORUYUCU GAZLAR**

TIG ark kaynak yönteminde koruyucu gaz kullanılmasının tek amacı kaynak sırasında, kaynak banyosunu ve erimeyen tungsten elektrodu havanın olumsuz etkilerinden korumaktır. Kullanılan koruyucu gazlar, helyum, argon veya bunların karışımı gibi asal gazlar olup, kimyasal bakımdan nötr karakterde, kokusuz ve renksiz gazlardır. Kaynak sırasında koruyucu gazlar kaynak bölgesine, bir ısı katkısında bulunmasalarda, ısı girdisini bir dereceye kadar etkilerler. Koruyucu gaz olarak kullanılan asal gazlar veya bunların karışımı kaynak sırasında kızgın durumda bulunan tungsten elektrot ve erimiş kaynak banyosu ile bir reaksiyon oluşturmazlar. Kaynak metalinin kalitesine olumsuz bir etkide bulunmalarına karşın, kaynak hızına ve kaynaklı bağlantının kalitesine önemli etkide bulunurlar [38].

Koruyucu gaz seçimi aşağıdaki faktörler üzerinde önemli etkilere sahiptir.

1. Koruma verimi (Koruyucu gaz atmosferi),
2. Metalurji, mekanik özellikler (Alaşım elementlerinin kaybı, atmosferik gazların kapılması),
3. Korozyon direnci (Alaşım elementlerinin kaybı, atmosferik gazların kapılması, yüzeyin oksitlenmesi),
4. Kaynak geometrisi (Paso ve nüfuziyet profilleri),
5. Yüzey görüntüsü (Oksitlenme, sıçrama),
6. Ark kararlılığı ve tutuşma,
7. Metal transferi,
8. Çevre (duman ve gaz emisyonu) olarak sıralanabilir [39].

TIG ark kaynak yönteminde kullanılan koruyucu gazların özellikleri Çizelge 3.3' te verilmiştir.

Çizelge 3.3. TIG ark kaynağında kullanılan gazların özellikleri [31].

| Özellikler                                      | Argon   | Helyum  | Azot           | Oksijen        | Hidrojen       |
|---|---------|---------|----------------|----------------|----------------|
| Sembolu   | Ar      | He      | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> |
| Molekül Ağırlığı                                | 39,94   | 4,003   | 28,016         | 32             | 2,016          |
| Ayrışma Sıcaklığı<br>(1 Atmosferde)             | -184 °C | -269 °C | -196 °C        | -182 °C        | -252 °C        |
| Yoğunluğu<br>(21 °C ve Atmosferde)<br>(1b/cuft) | 0,1034  | 0,0103  | 0,0725         | 0,0828         | 0,0052         |
| İyonizasyon Potansiyeli<br>(elektron volt)      | 15,7    | 24,5    | 14,48          | 13,6           | 13,5           |

### 3.6.1. Argon

Argon östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında en çok tercih edilen gazdır [21, 40]. Gazaltı kaynak yöntemlerinde kullanılan argon tek atomlu renksiz, kokusuz, tatsız ve

zehirli olmayan bir soy gazdır. Her ne kadar atmosferde %0,934 oranında bulunmasına rağmen ekonomik olmasından dolayı argon atmosferden elde edilmektedir. Havadan %38 daha ağır bir gaz olup ergimiş kaynak banyosunu ve arkın çok etkili kararlı olmasını sağladığından özellikle yatay kaynak pozisyonlarında kaynak esnasında etkili bir örtü oluşturarak kaynak banyosunu çok iyi bir şekilde korumaktadır. Argon düşük iyonizasyon enerjisine sahip olduğundan argon atmosferi altında ark tutuşması daha kolay olmaktadır [41].

Argon gazının en büyük avantajı akış hızının büyük olması ve buna bağlı olarak kararlı ark tutuşması ve ark voltajının daha düşük olmasıdır. Düşük voltaj kullanıldığından dolayı ince saclar kolaylıkla birleştirilmektedir [42].

Argon gazı içeriğinde oluşan arkın gerilim düşüşü diğer gazlara nazaran daha azdır. Ayrıca argonun ısı iletme kabiliyetinin zayıf olması sebebiyle ark sütunu daha geniş ve sıcaklığı da özellikle dış kısımlarda düşüktür. Sütunun merkezinde hem su buharları hem de damla geçişi sebebiyle sıcaklık daha yüksektir. Bu nedenle argonun koruyucu gaz olarak kullanıldığı kaynak dikişlerinde nufuziyet kaynak dikişinin merkezinde derin, kenarlarında daha az olan bir şarap kadehi şeklindedir [43].

### **3.6.2. Helyum**

Helyum atmosferde çok az miktarda bulunmakta ve ayrıştırması endüstriyel olarak imkânsız bir gazdır. Helyum günümüzde doğal gazdan ayrıştırılarak elde edilen tek atomlu hafif bir gazdır. ABD ve eski SSCB ( Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği) gibi ülkelerde daha kolay ve ekonomik olarak üretilmektedir. Helyum sıvı gibi dağılmış olmakla birlikte daha çok tüp içerisinde sıkıştırılmış bir gaz şeklindedir [43]. Helyumun argona göre 10 kat daha hafif olup bu özelliği ile kaynak esnasında etkili bir korumanın sağlanması için gerekli gaz sarfiyatını arttırmaktadır. Yatay pozisyonda aynı şartlarda argonun yaptığı korumayı sağlamak için 3 kat daha fazla helyuma ihtiyaç vardır. Daha önceden belirtildiği gibi hafif olan helyumun özgül ağırlığı  $0,1784 \text{ kg/m}^3$ 'dür. Doğal gazların ayrışmasıyla elde edilen helyumun iyonlaşma potansiyeli  $24,5 \text{ eV}$ 'dir. Helyumun molekül ağırlığı 4003 birimdir.

Atmosferde ayrışma sıcaklığı  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Helyumun argon gazına göre sahip olduğu avantajlar aşağıda sıralanmaktadır:

1. Isı etki alanı daha düşüktür,
2. Daha hızlı kaynak yapılabilir,
3. Yüksek ark voltajına sahip olduğundan daha kalın ve ısı iletkenliği yüksek olan malzemelerin kaynağı için uygundur,
4. Dar ve fazla ısı girdisi olduğundan daha derin nüfuziyet sağlar,
5. Gaz altlık olarak kullanıldığında kök pasoyu düzeltici etki yapar [44].

### **3.6.3. Hidrojen**

Hidrojen renksiz, kokusuz, tatsız bir gaz olup, zehirli değildir. Parlama noktasında  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Havadan çok daha hafiftir. Hava ve oksijen ile karışım parlayıcılığı çok yaygındır. Bu gazlar TIG ark kaynağı kullanımı sırasında argona belirli bir oranda katılmaktadır [45].

### **3.6.4. Azot**

Azot hidrojenin bulunmadığı ülkelerde kullanılan koruyucu gazdır. Ark gerilim ve akım şiddetine yükseltici bir etkisi vardır. Kaynak bölgesindeki ısı transferi helyum ve argonun ısı transferine göre daha yüksektir. Birçok karakteristiği helyumunkine benzerlik göstermektedir. Aktif bir gaz olan azotun molekül ağırlığı 28,16 ayrışma sıcaklığı  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve iyonizasyon potansiyeli 14,48 e.voltur [44].

Azot havanın %80'ini oluşturan bir elementtir. Ark kaynağı esnasında termal ayrışmaya uğramaktadır. Azot 2 atomlu bir gaz olup, kaynak banyosu içerisinde çözünmektedir. Malzeme yüzeyine çıkan gaz yeniden molekül hale gelerek aldığı enerjiyi geri vermektedir. Bu nedenle tek atomlu gaz olan argon ve helyum gazına oranla daha fazla ısı transferi meydana getirmektedir [42].

### 3.6.5. TIG Ark Kaynak Yönteminde Kullanılan Koruyucu Gaz Karışımları

Argona hidrojen ilavesi ile arkta gerilim değişmesi sonucu ark gücü artar. Hidrojen yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğundan daha dar ve derin nüfuziyet meydana getirir. Hidrojenin kaynağın son katmanın yüzeyinden oksit oluşumunu engelliyerek kaynak dikiş yüzeyinin görüntüsünde iyileşme sağlar [41].

Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında argona hidrojen eklenmesi sonucu östenitik paslanmaz çelikte görülen faydalar sağlanabilir. Daha akıcı kaynak banyosu ve daha temiz kaynak dikiş elde edilir. %5'e kadar hidrojen ilavesi tam ferritik paslanmaz çelikler için önerilebilir. Martenzitik paslanmaz çelikler kaynağında gazda hidrojen bulunması halinde hidrojen çatlaklarının oluşması tehlikesi vardır. Doubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılan hidrojen gazı karışımı kaynağın verimini arttırmakla beraber hidrojen çatlaklı oluşturmaya neden olmaktadır.

Argon helyum karışımları argonun ve helyumun en üstün özelliklerini bir arada elde edebilmek amacı ile geliştirilmiş ve bu sayede nüfuziyet ve ark kararlılığı optimize edilmiştir. Helyuma %25 argon eklenmesi ile saf argon haline göre daha derin bir nüfuziyet sağlanmış ve saf argon halinden daha üstün ark kararlılığı elde edildiği rapor edilmiştir [46].

Paslanmaz çeliklerin gazaltı kaynak yöntemlerinde koruyucu argon gazı içerisinde karışım olarak kullanılan hidrojen havadan daha hafif olmakla beraber hava veya O<sub>2</sub> ile belirli bir oranda karıştırıldığında patlayıcı bir özelliğe sahiptir. Hidrojen gazı yüksek entalpiye ve ısı iletkenliğe sahip olduğundan O<sub>2</sub> gazını indirgeyerek kaynak bölgesinde oksit oluşumunu engeller. H<sub>2</sub>, paslanmaz çeliklerin kaynağında, kök koruma amacıyla Ar ile bir plazma gazı olarak kullanılmakta ve literatürde belirtildiği gibi karışım içerisindeki H<sub>2</sub> miktarı %0,5-5 arasında değişmektedir [42].

TIG ark kaynağında koruyucu argon gazı içerisindeki hidrojen miktarının artışı kaynak arkının statik karakteristiğini etkilemektedir. Hidrojen miktarı arttıkça ark voltajı da artmakta ve bu artış kaynak akımının artışına paralellik göstermektedir. TIG ark kaynak yönteminde koruyucu argon gazı içerisindeki çeşitli oranlardaki H<sub>2</sub>



miktarının kaynak arkının statik karakteristiklerine etkisi verilmektedir. Hidrojen argona göre daha yüksek ısı iletkenliğe ve iyonizasyon enerjisine sahip olduğundan daha güçlü ark voltaj düşümü sağlamaktadır. Argon içerisindeki hidrojen miktarına paralel olarak hem TIG kaynağında hem de MIG kaynağında eriyen ana metal miktarı artmaktadır. Böylece geniş ve derin kaynak dikiş şekli elde edilmektedir [45, 47].

Argon gazı içerisindeki hidrojen miktarının artmasıyla yapılan östenitik paslanmaz çeliklerde kaynaklı birleştirmenin çekme dayanımının arttığı görülmektedir. Ayrıca kaynak metali içerisindeki hidrojen miktarındaki artış kalıntı gerilimlerinin artmasına dolayısıyla kaynak metalindeki sertlik değerlerinin artışına neden olmaktadır [47].

Yüksek ferrit içerikleri nedeniyle dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında hidrojen teşvikli çatlama önlemek amacıyla hidrojen gazı kullanılmamalıdır [48].

Azot %12'ye kadar Ar gazına ilave edilmektedir. Koruyucu gaz içerisindeki azot miktarına bağlı olarak ısı girdisi artmakta, ortaya çıkan ısı ise ark ile kaynatılan parçalara iletilmektedir. Çünkü azot argon gazından daha yüksek ısı iletimine sahiptir [49]. Paslanmaz çeliklerin kaynağı sırasında kaynak metalinin mikroyapısında ferrit ve östenitik fazları olup çeşitli miktarlarda  $\delta$ -ferrit içermektedir.  $\delta$ -ferrit miktarı önemli şekilde östenitik paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerine etki etmekte olup, hacimce en uygun değeri %5–10 arasındaki orandır. Sünekliği, tokluğu ve korozyon direnci ile kaynak metalinin soğuması sırasında oluşabilecek sıcak çatlama direncini arttırmaktadır. Koruyucu argon gazına ilave edilen diğer gazlar kaynak metalinin mikroyapısına etki etmektedir. Örneğin, koruyucu argon gazının içerisine az miktarda azot ilavesi azot kuvvetli bir östenit oluşturduğundan kaynak metali içerisindeki  $\delta$ -ferrit miktarını düşürmektedir [21].

Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında argona %2–4 azot karışım gazı kullanıldığında kaynak metalinin azot içeriğini arttırmamaktadır. Ancak saf argona göre östenit oluşumunu arttırdığından dolayı korozyon direncini arttırmaktadır [2].

### 3.7. TIG ARK KAYNAĞI KAYNAK İLAVE METALLERİ

TIG ark kaynak yönteminde gerekli olan kaynak ilave metali el ile yapılan kaynakta tel çubuk halinde, kaynakçı tarafından otomatik tel besleyici sistemlerde ise tel halinde sistemin tel sürme tertibatı tarafından kaynak bölgesine sokulur. Burada kaynak metalinin ark tarafından taşınımı söz konusu değildir ve ark asal bir gaz atmosferi altında oluşturulmuştur. Bu bakımdan özellikle alaşım ve dezoksidasyon elementlerinin büyük çapta yanması diye bir olay söz konusu değildir ve kayıplar göz önüne alınamayacak derecede azdır. Her tür metal ve alaşımın kaynağına uygulanabilen TIG ark kaynak yöntemi için çok geniş bir spektrumu kapsayan kaynak telleri üretilmiştir.

TIG ark yönteminde kullanılan kaynak alaşımları döküm ile elde edilmiş sert dolgu metalleri dışındakiler çekilerek üretilmiş 1 metre boyunda çeşitli çaplarda tellerdir. Bunların çapları DIN 8556 ya göre 1, 1.2, 1.6, 2, 2.4, 3, 3.2, 4 ve 5 mm'dir çap toleransları ise 4 mm'ye kadar  $\pm 0.10$  mm, 5 mm için ise  $\pm 0.15$  mm'dir. Otomatik ve tel sürme tertibatlı sistemlerde kaynak telleri aynen Gaz metal ark (MIG) kaynak yönteminde kullanılanlar gibi kangal halinde pazara sunulurlar. Tel çubuk halindeki kaynak metallere kalın çaplı olanların üzerine damgalama yöntemiyle, ince çaplılara ise özel bir etiket yapıştırılarak, telin standart işareti belirtilmek zorunludur, aksi halde ambalajından çıkartılan telleri birbirlerinden ayırt etmek mümkün değildir. Kaynak ilave metali seçiminde en önemli kıstas esas metal ile kimyasal bileşim bakımından uygunluktur. Bunun yanı sıra çekme ve darbe zorlamalarına dayanıklılık, elektrik iletkenliği, korozyon direnci ve kaynak dikişinin görünüşü de önemli kıstaslardır.

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 4.1. GENEL

Bu çalışmada AISI 321 kalite çelik malzemeler ticari olarak temin edildiği şekliyle üç farklı kaynak ilave metali kullanılarak (ER 347, ER 309L ve ER 2209 TIG kaynak ilave metali) TIG ark kaynak yöntemiyle alın alına birleştirilmişlerdir. Her bir kaynak ilave metali için üç farklı koruyucu gaz karışımı (Ar + %2 N, Ar + %4 N ve Ar + %10 He +%2 N) kullanılmıştır. Bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme, üç nokta eğme, sertlik ve darbe çentik deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca çalışmada bağlantıların metalografik incelemeleri yapılarak mikroyapı ve mekanik özellikler arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır.

#### 4.2. DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER

Deneysel çalışmada, yiyecek ve gıda endüstrisinde, kâğıt sanayi, petro-kimya endüstrisi, uzay ve havacılık sanayinde çok geniş kullanım alanı bulan AISI 321 kalite, 10 mm kalınlığında östenitik paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Çeliğin kimyasal bileşimi % ağırlık olarak Çizelge 4.1' de verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi AISI 321 kalite çeliği diğer östenitik paslanmaz çeliklerden ayıran en önemli farklılık kimyasal bileşimlerinde Ti ihtiva etmesidir.

Birleştirme işleminde kimyasal bileşimi Çizelge 4.1'de verilen ER 309L-ER 347-ER 2209 kaynak ilave metallerinden yararlanılmıştır. Çalışmada kullanılan ana malzemenin ve kaynak ilave metallerinin krom ve nikel eşdeğerlikleride hesaplanarak Çizelge 4.1'de verilmiştir.

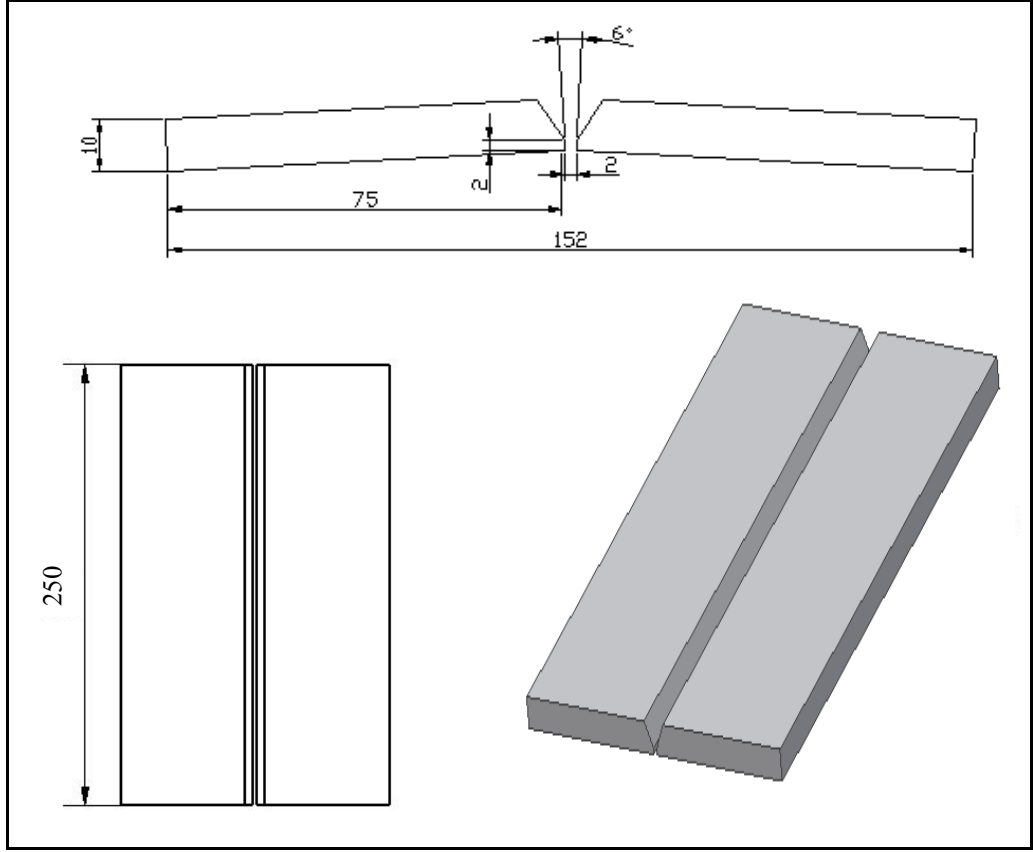
Çizelge 4.1. Deneysel malzemelerin kimyasal bileşimi (% ağırlık).

|                                    | C            | Si        | Mn      | P           | S      | Mo        | Cr         | Ni    | Pb                 | Al    | Cu    | Co    |
|------------------------------------|--------------|-----------|---------|-------------|--------|-----------|------------|-------|--------------------|-------|-------|-------|
| AISI 321<br>(1)                    | 0,025        | 0,50      | 1,09    | 0,025       | 0,0084 | 0,25      | 17,73      | 9,39  | <0,002             | 0,027 | 0,24  | 0,18  |
|                                    | Ti           | Nb        | V       | W           | B      | Sb        | Sn         | Ta    | Ca                 | Se    | N     | Fe    |
|                                    | 0,26         | 0,026     | 0,086   | 0,06        | 0,0014 | 0,0054    | 0,011      | <0,01 | 0,0011             | 0,021 | 0,016 | 70,00 |
|                                    | C            | Cr        | Ni      | Mo          | Mn     | Si        | Cu         | Fe    | Diğer              |       |       |       |
| ER 309L<br>(2)                     | 0,03         | 23-25     | 12-14   | 0,75        | 1-2,5  | 0,30-0,65 | 0,75       | ----- |                    |       |       |       |
| ER 347<br>(3)                      | 0,08         | 19-21,5   | 9-11    | 0,75        | 1-2,5  | 0,30-0,65 | 0,75       | ----- | Cb: 10*Cmin/1,0max |       |       |       |
| ER 2209<br>(4)                     | 0,03         | 21,5-23,5 | 7,5-9,5 | 0,5-2       | 0,5-2  | 0,9       | 0,75       | ----- | N: 0,08-0,20       |       |       |       |
|                                    | AISI 321 (1) |           |         | ER 309L (2) |        |           | ER 347 (3) |       | ER 2209 (4)        |       |       |       |
| Cr <sub>es</sub>                   | 18,73        |           |         | 24,2        |        |           | 19,75      |       | 23,35              |       |       |       |
| Ni <sub>es</sub>                   | 10,68        |           |         | 13,4        |        |           | 11,9       |       | 8,65               |       |       |       |
| Cr <sub>es</sub> /Ni <sub>es</sub> | 1,75         |           |         | 1,80        |        |           | 1,65       |       | 2,69               |       |       |       |

#### 4.3. DENEY NUMUNELERİNİN BİRLEŞTİRME İÇİN HAZIRLANMASI

Şekil 4.1'deki boyutlarda (10x75x250 mm) şerit testere ile kesilerek hazırlanan malzemelere birleştirmeden önce 60° ağız açısı verecek şekilde frezede V kaynak ağızı açılmıştır.

Kaynak işlemi sırasında meydana gelebilecek çekme göz önünde bulundurularak kaynak ağızının ters istikametinde 6° derecelik bir açı ile numuneler puntalanmıştır. Alın altına puntalanan numuneler arasında 2 mm boşluk bırakılmıştır. Kaynaktan önce numunelerin yüzeyleri ince zımparayla kir, pas, yağ vb. gibi kaynağı olumsuz olarak etkileyebilecek maddelerden temizlenip, sabunlu suda yıkanmış ve temiz bir bezle silinmiştir. Kaynak işleminden önce numuneler bir çelik altlık üzerine işkenceler yardımıyla tutturulmuştur.

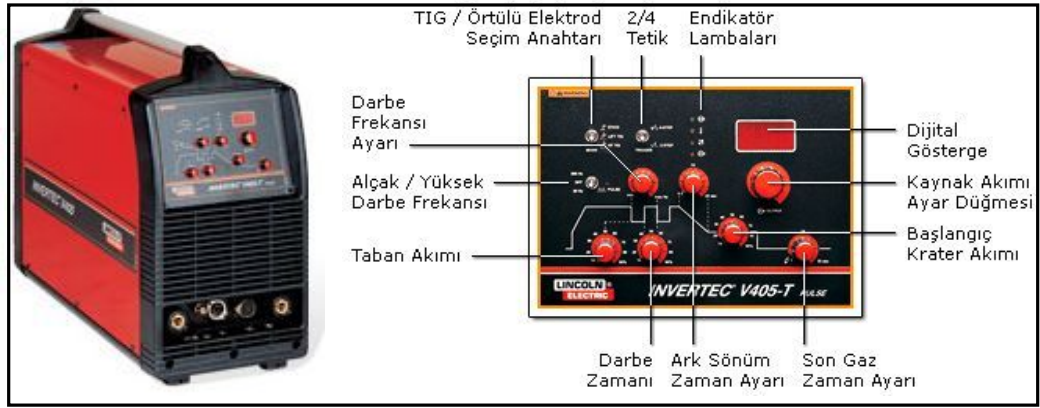


Şekil 4.1. Deney numunelerinin boyutları ve kaynak ağız tasarımı.

#### 4.4. NUMUNELERİN TIG ARK KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

##### 4.4.1. Kaynak Deney Seti

Çalışmada Invertec marka V405-T PULSE model TIG ark kaynak ünitesi kullanılmıştır. Kaynak ünitesi mükemmel ark özelliklerine sahip, şebeke voltajı girişi kompanzasyonu olan ve ek olarak kaynak parametrelerini görüntüleyen donanıma sahiptir. Ünite kaynak parametrelerin kaynak öncesi ayarlanmasını ve bu ayarların kaynak sonrası korunmasını sağlayan bir dijital göstereye ve ayarlanabilir darbe (Pals) özelliklerine sahiptir. Kaynak işleminin yapıldığı kaynak ünitesi Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Kaynak işleminin yapıldığı kaynak makinesi.

#### 4.4.2. TIG Ark Kaynağında Kullanılan Kaynak İlave Metalleri

Deneysel çalışmada, çapı 2 mm olan ticari saflıkta ER 347, ER 309L ve ER 2209 kaynak ilave metalleri kullanılmıştır. Bu kaynak ilave metalleri AISI 321, 304, 347 tip paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılırlar. Kaynak ilave metallerine ait kimyasal kompozisyon,  $Cr_{eş}$ ,  $Ni_{eş}$  ve  $Cr_{eş}/Ni_{eş}$  değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

#### 4.4.3. TIG Ark Kaynağında Kullanılan Koruyucu Gaz Karışımları

Deneysel çalışmada, kaynak işleminde koruyucu gaz olarak kullanılan farklı orandaki gaz karışımlarından oluşan 3 adet gaz tüpü deney için Borşen Boru Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti’nden temin edilmiştir. Bu temin edilen 3 adet tüpe ait gaz karışım oranları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Koruyucu gaz karışım oranları.

| Tüp No | % Argon (Ar) Miktarı | % Azot (N) Miktarı | % Helyum (He) Miktarı |
|--------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| 1      | 98                   | 2                  | ----                  |
| 2      | 96                   | 4                  | ----                  |
| 3      | 88                   | 2                  | 10                    |

#### 4.4.4. Deney Numunelerinin TIG Ark Kaynağıyla Birleştirilmesi

AISI 321 kalite deney numuneleri ticari olarak temin edildiği şekliyle üç farklı kaynak ilave metali kullanılarak (ER 347, ER 309L ve ER 2209) Çizelge 4.3'deki kaynak parametreleri kullanılarak çok pasolu olarak birleştirilmiştir.

Çizelge 4.3. TIG ark kaynak işlemi için uygulanan kaynak parametreleri.

|         | PASOLAR  | AKIM (A) | VOLTAJ (V) | İLERLEME HIZI (mm/dak) |
|---------|----------|----------|------------|------------------------|
| ER 347  | I.PASO   | 140      | 14         | 155                    |
|         | II PASO  | 150      | 15         | 148                    |
|         | III PASO | 180      | 14         | 153                    |
| ER 309L | I.PASO   | 140      | 14         | 153                    |
|         | II PASO  | 150      | 15         | 148                    |
|         | III PASO | 180      | 14         | 153                    |
| ER 2209 | I.PASO   | 140      | 14         | 155                    |
|         | II PASO  | 150      | 15         | 148                    |
|         | III PASO | 180      | 14         | 153                    |

Her bir pasodan sonra bağlantı oda sıcaklığına kadar soğutulmuş daha sonra diğer paso kaynak işlemine geçilmiştir. Kaynak sırasında her bir paso için kaynak ilerleme hızı (mm/sn) not edilerek daha sonra ısı girdisi hesaplanmıştır.

Isı girdisinin analitik olarak hesaplanmasında aşağıdaki formülden yararlanılmıştır.

$$Q = \left( \frac{VxIx60}{Sx1000} \right) x Verim \quad (4.1)$$

Formülde;

Q = Isı girişi (kJ / mm)

V = Voltaj (V)

I = Akım (A)

S = Kaynak hızı (mm/dk) olarak verilmiştir.

Verim, kaynak işleminde kullanılan kaynak yöntemine bağlıdır; TIG ark kaynağı için 0,8 alınmıştır [50].

Birleştirmeler elde edilirken her bir kaynak ilave metali için u farklı kaynak koruyucu gazı (Ar + %2 N, Ar + %4 N ve Ar + %10 He + %2 N) kullanılmıştır. Deneysel alışma için 9 adet birleştirme elde edilmiştir. Elde edilen kaynaklı birleştirmeye ait resim Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. ER 347 kaynak ilave metali ve AR + %4 N koruyucu gazı ile TIG ark kaynak yöntemiyle birleştirilen deney numunesi görünüşü.

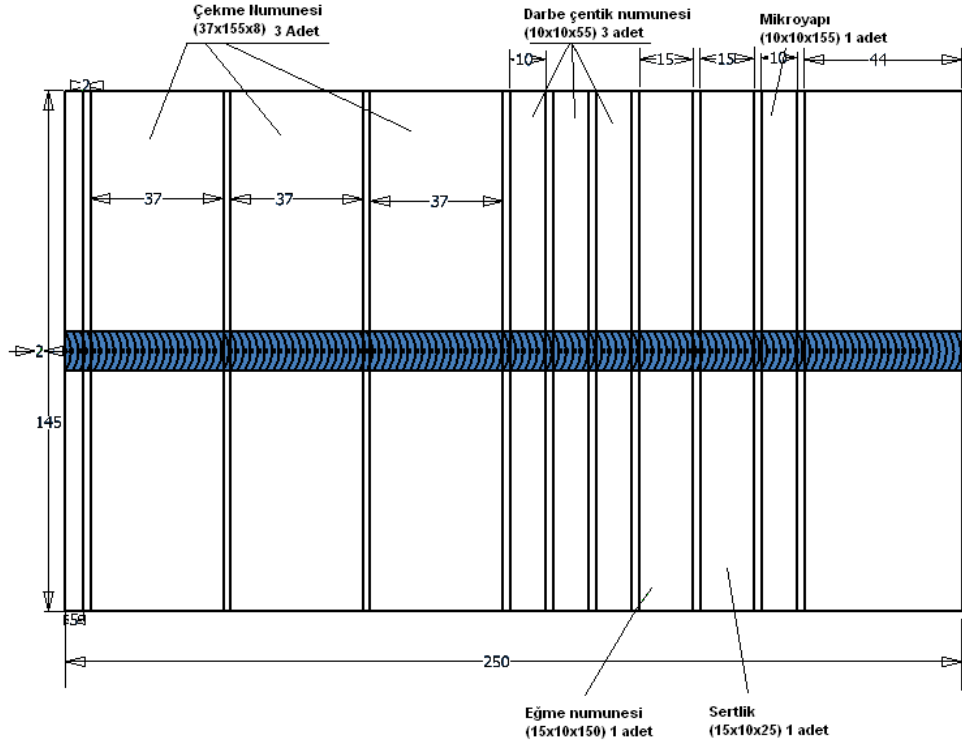
Şekil 4.3'ten görüldüğü gibi hatasız bir bağlantı elde edilmiştir. Elde edilen birleştirmelerin kapak ve kök paso yüzeylerinden 1 mm talaş kaldırılarak tüm yüzeyler düzgün hale getirilerek deney numunelerinin çıkarılması için hazır hale getirilmiştir.

#### **4.5. KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDEN DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI**

Kaynak ilave metalinin ve koruyucu gazların birleştirme üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla kaynaklı bağlantılardan mekanik testler ve metalografi incelemeleri için deney numuneleri çıkarılmıştır.



Bu amaçla kaynaklı birleştirmeler Şekil 4.4'te gsterildiği olçülerde Şekil 4.5'te gsterilen BysTronic Laser AG Marka CH-3362 model ve Byspeed 4020 tip Laser kesme makinesi ile kesilmiştir.



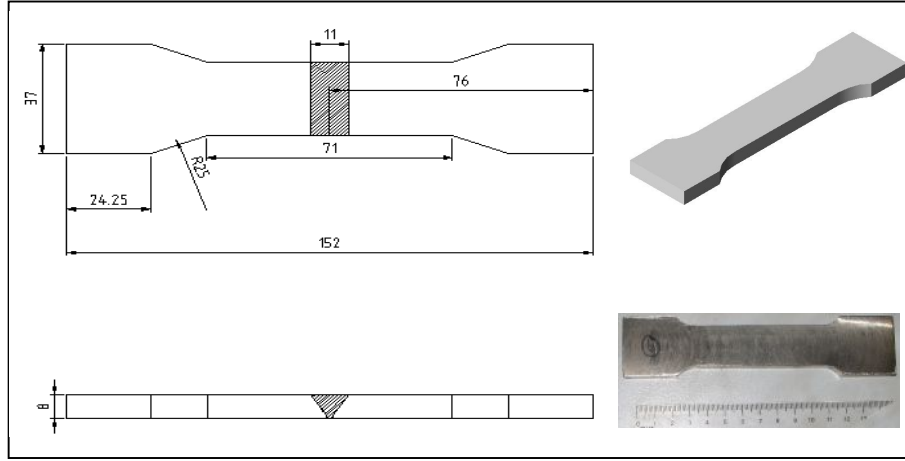
Şekil 4.4. Birleştirmelerden deney numuneleri elde etmek için kesim olçüleri.



Şekil 4.5. BysTronic Laser AG Marka CH-3362 model ve Byspeed 4020 tip Laser makinesi [51].

#### 4.5.1. Çekme Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Testi

Laser ile kesilen birleştirmelerden EN 895 standardına göre çekme numuneleri kaynak eksenine dik konumda frezede işlenerek hazırlanmıştır. EN 895 standartına göre hazırlanan kaynaklı birleştirme çekme test numuneleri ölçüleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. EN 895 standardına göre hazırlanan çekme numunesi boyutları.

Çekme testi için SHİMADZU AG-IS marka 100KN kapasiteli çekme test cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Çekme test cihazında testin uygulanışı.

Çekme deneyi, test cihazında 5 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel hataları minimize edebilmek amacıyla her bir şart için 3 deney numunesi test edilmiştir. Test sonucunda kopan numunelerin kırılma yüzeylerinin incelemesi için her bir deney parametresi için bir numune diskotom kesme cihazında kesilerek hazır hale getirilmiştir.

#### 4.5.2. Üç Nokta Eğme Deney Numunesinin Hazırlanması ve Testi

Çalışmada, üç nokta eğme numunesi EN-910 standardına göre hazırlanmıştır. Üç nokta eğme test numunesi Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Üç nokta eğme test numunesi.

Üç nokta eğme deneyi SHIMADZU AG-IS marka çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Test sırasında kuvvet kaynak yüzeyi dışta kalacak şekilde kök paso tarafından uygulanmıştır. Üç nokta eğme deneyinin uygulanışı Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

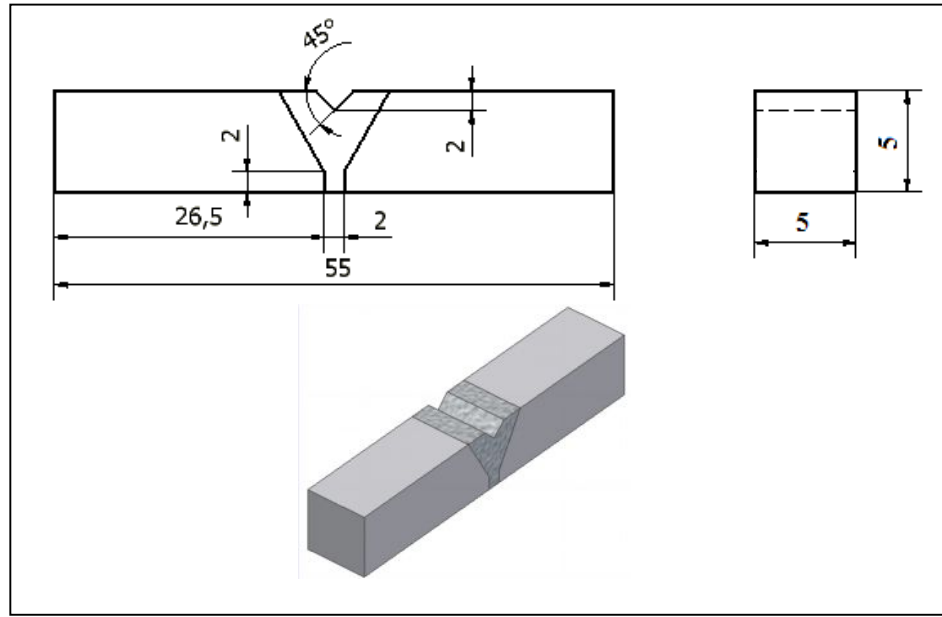


Şekil 4.9. Üç nokta eğme deneyinin uygulanmasına ait görüntü.

Üç nokta eğme deneyinde  $180^\circ$  katlama gerçekleştirildikten sonra kaynak dikişlerinin kapak paso yüzeyi görüntüsünün makroyapı görüntüleri alınmıştır.

#### 4.5.3. Darbe Çentik Deney Numunesinin Hazırlanması Ve Ölçümü

Kaynaklı birleştirmelerden Şekil 4.10'daki boyutlarda her bir şart için üçer adet standart dışı darbe çentik deney numunesi hazırlanmıştır. Çentik kaynak eksenine gelecek şekilde birleştirmenin kapak paso yüzeyinden açılmıştır.



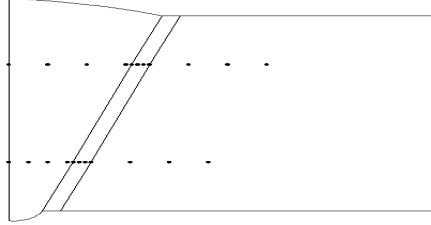
Şekil 4.10. Darbe çentik deney numunesi boyutları.

Deney INSTRON WOLPERT PW30 marka darbe çentik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen numuneler östenitik paslanmaz çelik olduğu için süneklikten gevrekliğe geçiş sıcaklıklarının normal çeliklere göre daha düşük olduğundan dolayı deney numuneleri yalnızca  $-50^\circ\text{C}$  sıcaklıkta test edilmiştir. Numuneleri  $-50^\circ\text{C}$  test edebilmek için sıvı azot kullanılmıştır. Numunelerin sıcaklığı termokupla ölçülmüş ve daha sonra teste tabi tutulmuştur. Test edilen numunelerin kırılma yüzeyleri incelenmesi amacıyla diskotom kesme cihazı ile kesilerek taramalı elektron mikroskopu incelemesi için hazır hale getirilmiştir.

#### 4.5.4. Mikrosertlik Deney Numunelerinin Hazırlanması Ve Ölçümü

Bağlantıların, ana malzeme, kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölgelerinin sertlik ölçümlerini yapılabilmesi için deney numuneleri birleştirme yerlerinin merkezi ekseninde olacak şekilde enine discotom kesme cihazı kullanılarak kesilmiştir. Kesme işlemi sırasında numunelerin meydana gelen ısıdan etkilenmemesi amacıyla su + %10 bor yağı karışımı kullanılmıştır. Yüzeyleri düzeltilen deney numuneleri daha sonra soğuk reçine ile kalıba alınarak sırasıyla 200–400–600–800–1000–1200 meshlik su zımparasıyla zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra yüzeyler sırasıyla 3µm ve 1µm elmas pasta kullanılarak keçede parlatılmıştır. Deney numuneleri bölüm 4.12’de açıklanan dağlama işleminden sonra mikrosertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Birleştirmede sertlik ölçümünün gerçekleştirildiği bölgeler Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Mikrosertlik ölçümünün bağlantı üzerinde gerçekleştirildiği bölgeler.

Mikrosertlik ölçümleri HMV SHIMADZU marka mikrosertlik Vickers sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Deney işlemi sırasında elmas piramit uca 200 gr yük uygulanmıştır.

#### 4.6. METALOGRAFİK İNCELEMELER

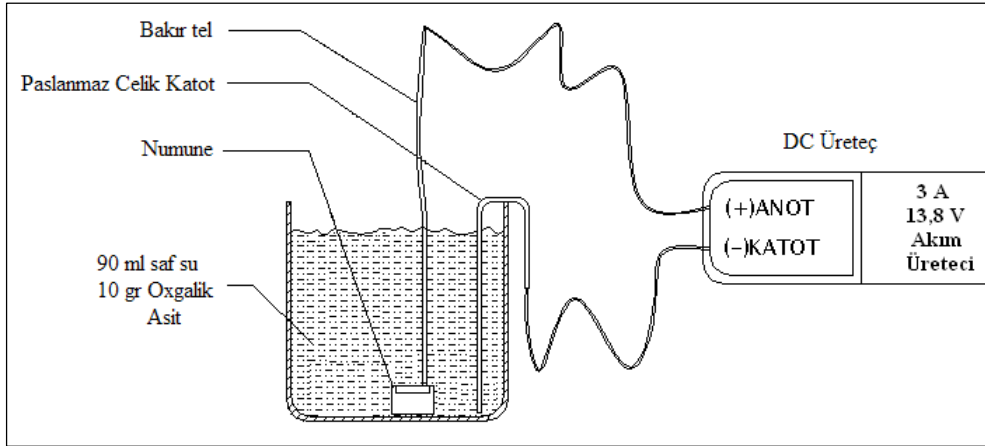
Birleştirmelerin mikroyapı mekanik özellik ilişkilerinin irdelenmesi amacıyla metalografik incelemelerde gerçekleştirilmiştir. Metalografi numunelerinin hazırlanması, dağlanması ve inceleme işlemleri sırasıyla alt bölümde açıklanacaktır.

#### 4.6.1. Metalografik İncelemede Kullanılacak Numunelerin Hazırlanması

Bağlantıların, ana malzeme, kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölgelerinin mikroyapılarının incelenebilmesi için metalografi numuneleri mikrosertlik numuneleri ile aynı işlemler uygulanarak hazırlanmıştır.

#### 4.6.2. Metalografik İncelemede Kullanılacak Dağlayıcıların Hazırlanması Ve Dağlama İşleminin Yapılması

Kaynaklı bağlantıları metalografik olarak incelemek için klasik metalografi yöntemi ile hazırlanan numuneler 100 ml saf su içine 10g oksalik asit ( $\text{HO}_2\text{CCO}_2\text{H}$ ) çözeltisi bulunan dağlayıcı ile elektrolitik olarak 12 V gerilim altında 2 A akım şiddetinde 35–40 sn süre ile dağlanmıştır. Dağlama ünitesi şematik olarak Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Dağlama ünitesi şematik gösterimi.

Dağlama işlemi tamamlandıktan sonra numuneler methanol ile temizlenip kurutulup optik incelemeye hazır duruma getirilmiştir.

### 4.6.3. Metalografik İncelemelerin Yapılması

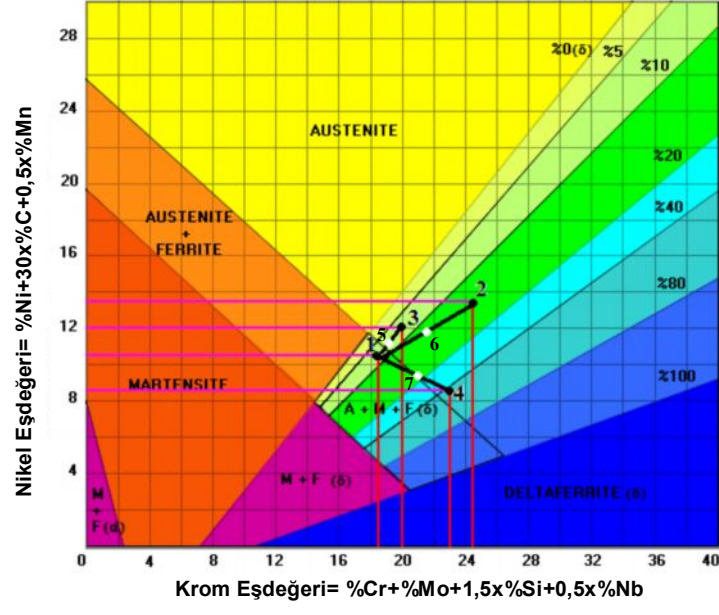
Deney numunelerinin metalografik incelemelerinde 5X-100X büyütme kapasitesine sahip MEIJI marka mikroskop kullanılarak BOSCH Dinion<sup>XF</sup> Colar Camera ile numunelerin kaynak bölgesi, ITAB (ısı tesiri altındaki bölge) ve ana malzemesinin mikroyapı görüntüleri alınmıştır.

Birleştirmelerin mikroyapı ve çekme ve darbe çentik test numunelerinin kırılma yüzeyleri incelemelerinde ayrıca JEOL JSM 6060LV marka SEM taramalı mikroskobundan ve EDS analiz sisteminden yararlanılmıştır.

### 4.7. KAYNAKLI BAĞLANTIDA KAYNAK SONRASI OLUŞABİLECEK YAPI VE FERRİT MİKTARININ TAHMİNİ

Çalışmada, Şekil 4.13'deki Schaeffler diyagramından yararlanarak kaynak sonrası oluşabilecek yapı ve kaynak metalinde oluşabilecek ferrit miktarı tahmini olarak belirlenmiştir. Bu amaçla AISI 321 kalite çeliğin, ER 309L, ER 347 ve ER 2209 kaynak ilave metallerinin kimyasal bileşiminden yararlanılarak  $Cr_{eş}$ ,  $Ni_{eş}$  değerleri ve  $Cr_{eş}/Ni_{eş}$  oranları hesaplanarak Çizelge 4.1'de verilmiş ve ilgili parametreler Şekil 4.13'deki Schaeffler diyagramı üzerinde gösterilmiştir.

Şekil 4.13'te 1 numara, ana malzemenin diyagram üzerindeki yerini, 2 numara ise ER 309L kaynak ilave metalinin, 3 numara ER 347 kaynak ilave metalinin, 4 numara ER 2209 kaynak ilave metalinin yerini göstermektedir. Diyagramda 5, 6 ve 7 numara ise sırasıyla ER 309L, ER 347 ve ER 2209 kaynak ilave metali kullanılarak yapılan birleştirmelerin kaynak metalinde oluşabilecek yapının diyagram üzerinde hangi bölgede yer alacağını ve kaynak metalinde oluşabilecek % ferrit miktarını göstermektedir. Diyagramdanda görüldüğü üzere her üç kaynak ilave metalinin kullanılması halinde bile genel olarak birleştirmelerin bu çelikleri için kaynak açısından en az sorunlu bölgeden meydana geleceği görülmektedir.



Şekil 4.13. Kullanılan malzemelerin Schaeffler diyagramında mikroyapı tahmini.



## BÖLÜM 5

### DENEYSEL SONUÇLAR

#### 5.1. GENEL

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda, AISI 321 kalite çelik çiftinin TIG ark kaynağıyla üç farklı kaynak ilave metali ve üç farklı koruyucu gaz ortamında birleştirilmesi sağlanmıştır. Böylece, kaynak ilave metalinin ve kaynak koruyucu gaz farklılıklarının; birleştirmenin mekanik özelliklerine ve mikroyapısına etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

#### 5.2. NUMUNELERİN TIG ARK KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMESİ SIRASINDA KULLANILAN ISI GİRDİSİ

TIG ark kaynağında ısı girdisi Bölüm 4'te verilen (4.1.)'deki formüle göre hesaplanmıştır. Birleştirmelerin her pasoda sağlanan ısı girdisi ayrı tespit edilerek, sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. AISI 321 çelik çiftinin birleştirilmesinde kullanılan ısı girdisi sonuçları.

|         | PASOLAR  | AKIM (A) | VOLTAJ (V) | İLERLEME HIZI (mm/dak) | ISI GİRDİSİ (kJ/mm) |
|---------|----------|----------|------------|------------------------|---------------------|
| ER 309L | I.PASO   | 140      | 14         | 155                    | 0,61                |
|         | II PASO  | 150      | 15         | 148                    | 0,73                |
|         | III PASO | 180      | 14         | 153                    | 0,79                |
| ER 347  | I.PASO   | 140      | 14         | 153                    | 0,61                |
|         | II PASO  | 150      | 15         | 148                    | 0,73                |
|         | III PASO | 180      | 14         | 153                    | 0,79                |
| ER 2209 | I.PASO   | 140      | 14         | 155                    | 0,61                |
|         | II PASO  | 150      | 15         | 148                    | 0,73                |
|         | III PASO | 180      | 14         | 153                    | 0,79                |

### 5.3. KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN MEKANİK TEST SONUÇLARI

Birleştirmelerin mekanik özelliklerinin tespit edilebilmesi için çekme, üç nokta eğme, darbe çentik dayanımları belirlenmiş ve sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular sırasıyla aşağıda verilecektir.

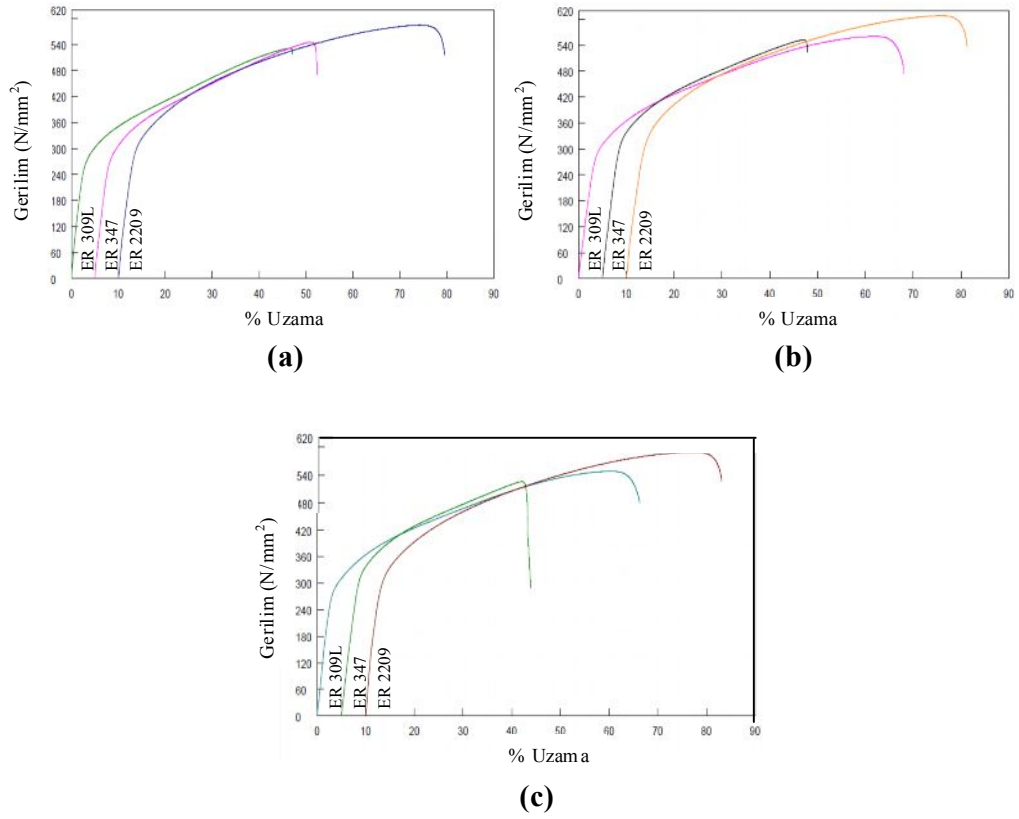
#### 5.3.1. Çekme Deneyi Sonuçları

Çalışmanın amacı daha öncede belirtildiği gibi AISI 321 çelik çiftinin TIG ark kaynaklı birleştirmelerine üç farklı kaynak ilave metali ve üç farklı koruyucu gazın etkisinin araştırılmasıdır. Bu amaçla tüm şartların herbiri için test edilen üç çekme numunesinin test sonuçları ve ortalamaları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Ortalama sonuçlar belirlenirken hatalı deney numunelerinin sonuçları değerlendirmeye alınmamıştır.

Çizelge 5.2. Kaynaklı numunelerin çekme deney sonuçları.

| AISI 321 + AISI 321 |                    | ÇEKME DAYANIMI (MPa) |           |           |          |
|---------------------|--------------------|----------------------|-----------|-----------|----------|
| Kaynak İlave Metali | Koruyucu gaz       | 1. Numune            | 2. Numune | 3. Numune | Ortalama |
| ER 309L             | Ar + %2 N          | -                    | 560       | 531       | 545      |
|                     | Ar + %4 N          | 569                  | 560       | -         | 565      |
|                     | Ar + %10 He + %2 N | -                    | 553       | 562       | 558      |
| ER 347              | Ar + %2 N          | 485                  | 594       | 545       | 541      |
|                     | Ar + %4 N          | -                    | 552       | 524       | 538      |
|                     | Ar + %10 He + %2 N | -                    | 530       | 528       | 529      |
| ER 2209             | Ar + %2 N          | 597                  | 585       | -         | 591      |
|                     | Ar + %4 N          | 605                  | 608       | 601       | 605      |
|                     | Ar + %10 He + %2 N | 580                  | 597       | -         | 588      |

Ayrıca sonuçlar çalışmada kullanılan her bir koruyucu gaz karışımı için üç farklı kaynak ilave metali açısından değerlendirilmiş ve ortalama gerilim uzama eğrileri Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Üç farklı kaynak ilave metalinin a) Ar + %2 N gaz karışımı b) Ar + %4 N gaz karışımı c) Ar + %10 He + %2 N gaz karışımında ortalama gerilim uzama eğrileri.

Çizelge 5.2. ve Şekil 5.1.a,b ve c’de ortalama gerilim uzama eğrisi sonuçları her üç koruyucu gaz karışımı içerisinde en yüksek çekme dayanımının Ar + %4 N koruyucu gaz kullanılarak ER 2209 kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirmede bulunmuştur. Örneğin maksimum çekme dayanımı ER 2209 kaynak ilave metali ve Ar + %4 N koruyucu gaz kullanarak elde edilen birleştirmede yaklaşık (605 MPa) bulunurken aynı koruyucu gaz karışımı için ER 309L kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirmede yaklaşık 565 MPa tespit edilmiştir (Şekil 5.1.b). Belirtilen koruyucu gaz için en düşük çekme dayanımı ER 347 kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirmede 538 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 5.1.b).










Çalışmada her üç koruyucu gaz karışımı içerisinde en düşük çekme dayanımı Şekil 5.1.c’den görüldüğü üzere Ar + %10 He + %2 N koruyucu gaz karışımı kullanılarak ER 347 kaynak ilave metali ile elde edilen bağlantılarda elde edilmiştir. Ortalama maksimum çekme dayanımı 538 MPa bulunurken, belirtilen koruyucu gaz karışımı

için en yüksek dayanım 588 MPa olarak ER 2209 kaynak ilave metali ile elde edilen bağlantıda, 558 MPa olarak ER 309L kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirmede bulunmuştur.

Ar + %2 N koruyucu gaz karışımı için kullanılan kaynak ilave metalleri içerisinde en yüksek çekme dayanımı ER 2209 ilave metali kullanılarak elde edilen birleştirmede 591 MPa bulunmuştur (Şekil 5.1.a). En düşük çekme dayanımı ise ER 347 kaynak ilave metali kullanılan bağlantıda 541 MPa olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.1.a). ER 309L kaynak ilave metali kullanılan birleştirmede 558 MPa bir çekme dayanımına ulaşılmıştır (Şekil 5.1.a).

Sonuçlar ER 347 kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirme hariç Ar + %4 N koruyucu gaz karışımının tüm kaynak ilave metalleri içerisinde en yüksek çekme dayanımını verdiği işaret etmektedir (Şekil 5.1.b). Sonuçlar aynı zamanda birleştirmede kullanılan ilave metaller açısından değerlendirilirse en yüksek çekme dayanıma sahip birleştirme ER 2209 ve en düşük ise ER 347 kaynak ilave metali ile elde edildiğine işaret etmektedir.

Çalışmada elde edilen birleştirmelerin çekme deneyi sonucunda test numunelerin kopma bölgeleri makroyapı incelenmesine tabi tutulmuş sonuçlar Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere ER 2209 kaynak ilave metali ile her üç koruyucu gaz karışımını kullanarak elde edilen birleştirmelerin çekme deneyi sonucunda kopma işlemi kaynak metali ve ITAB’dan uzak ana malzeme üzerinde gerçekleşmiştir. Tüm koruyucu gaz karışımları için ER 347 kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirmelerde çekme testi sonucunda ayrılma genelde ITAB bölgesinden meydana geldiği görülmektedir.

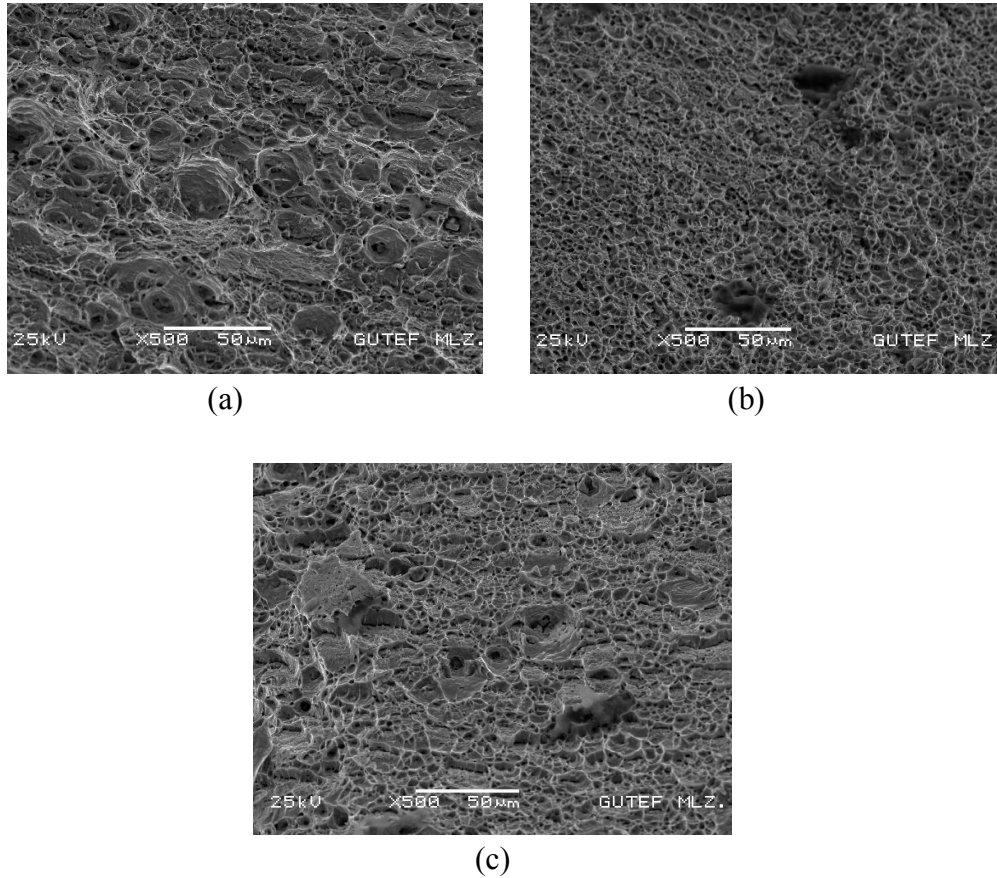
| Ar + %2 N Korumucu gazı | Ar + %4 N Korumucu gazı   |   |   | Ar + %10 He + %2 N Korumucu gazı |   |   |   |         |   |   |   |
|-------------------------|---|---|---|----------------------------------|---|---|---|---------|---|---|---|
| ER 309L                 |  |  |  | ER 309L                          |  |  |  | ER 309L |  |  |  |
| ER 347                  | ER 2209   | ER 347  | ER 2209   | ER 347                           | ER 2209   | ER 309L   | ER 347  | ER 2209 | ER 309L   | ER 347  | ER 2209   |

Şekil 5.2. TIG ark kaynaklı birleştirmelerin çekme deneyinde koptuğu bölgeler.

ER 309L kaynak ilave metali kullanılarak elde edilen birleştirmelerin bir kısmında ayrılma ITAB bölgesinden oluşurken bazı numunelerde ana malzeme üzerinden meydana gelmiştir. Örneğin Ar + %2 N ve Ar + %4 N korucu gaz kullanılarak elde edilen numuneler genelde ITAB bölgesinden ayrılırken Ar + %10 He + %2 N gazı kullanılarak elde edilen numuneler ise ana malzemeden ayrıldığı tespit edilmiştir.

Çekme deney numunelerinin ayrılma bölgeleri incelenerek yapılan değerlendirmede en iyi birleştirmelerin ER 2209 kaynak ilave metali ile en zayıf bağlantılarında ER 347 kaynak ilave metali kullanılarak elde edildiğine işaret etmektedir.

Çekme deney numunelerinin kırılma yüzeylerinin SEM mikroskobunda görüntüleri alınmıştır. Ancak burada Ar + %2 N karışımı kullanılarak her üç kaynak ilave metali ile elde edilen numunelerin kırılma yüzeyleri görüntüsü Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

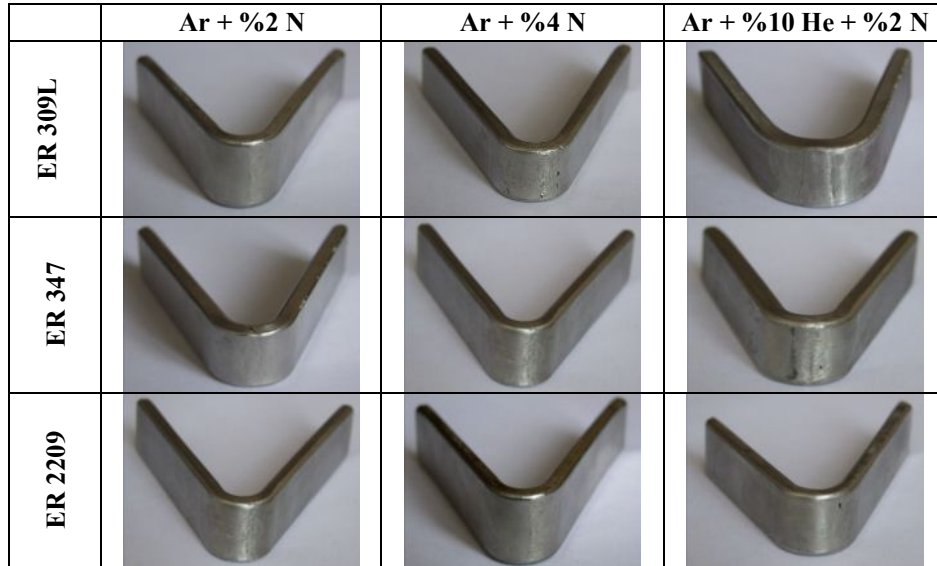


Şekil 5.3. Ar + %2 N koruyucu gazında; a) ER 309L, b) ER 347, c) ER 2209 kaynak ilave metali kullanılarak birleştirilen çekme numunelerinin kırılma yüzey görüntüsü.

Şekil 5.3'te görülen çekme deneyi numuneleri kırılma yüzeyleri görüntüsü her üç kaynak ilave metali kullanılarak elde edilen birleştirmesinde sünek kırılma davranışı göstererek kırıldığını ancak ER 2209 ve ER 309L kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirmelerde (Şekil 5.3.a ve c) kırılmaların tane içi ve taneler arası olarak meydana gelirken ER 347 kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirmede (Şekil 5.3.b) ise tanelerarası meydana geldiğini göstermektedir.

### 5.3.2. Üç Nokta Eğme Deney Sonuçları

Çalışmada kaynaklı birleştirmelerin şekil alma kabiliyetini tespit edebilmek amacıyla tüm şartlar için elde edilen deney numuneleri Bölüm 4.5.2'de açıklanan deney şartlarında üç nokta eğme deneyine tabi tutulmuşlardır. Üç nokta eğme deneyi sonuçları birleştirme için kullanılan her bir koruyucu gaz karışımı için üç farklı kaynak ilave metali açısından değerlendirilmiştir. Test sonucunda 180° eğme neticesinde kaynak yüzeyini gösteren makroyapı görüntüleri Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Üç nokta eğme deneyi sonucunda deney numunelerinin makroyapı görüntüleri.

Şekilden görüldüğü üzere tüm birleştirmelerde üç nokta eğme deneyi neticesinde 180° katlama sonucunda bile kaynak yüzeyinde herhangi bir çatlak oluşumuna rastlanmamıştır.

### 5.3.3. Darbe Çentik Deney Sonuçları

Çalışmada tüm şartlar için elde edilen kaynak metallere ani kuvvetler karşısında davranışlarını belirlemek amacıyla darbe çentik dayanımı belirlenmiştir. Her bir şart için üç adet deney numunesi -50 °C sıcaklıkta darbe çentik testine tabi tutulmuştur.

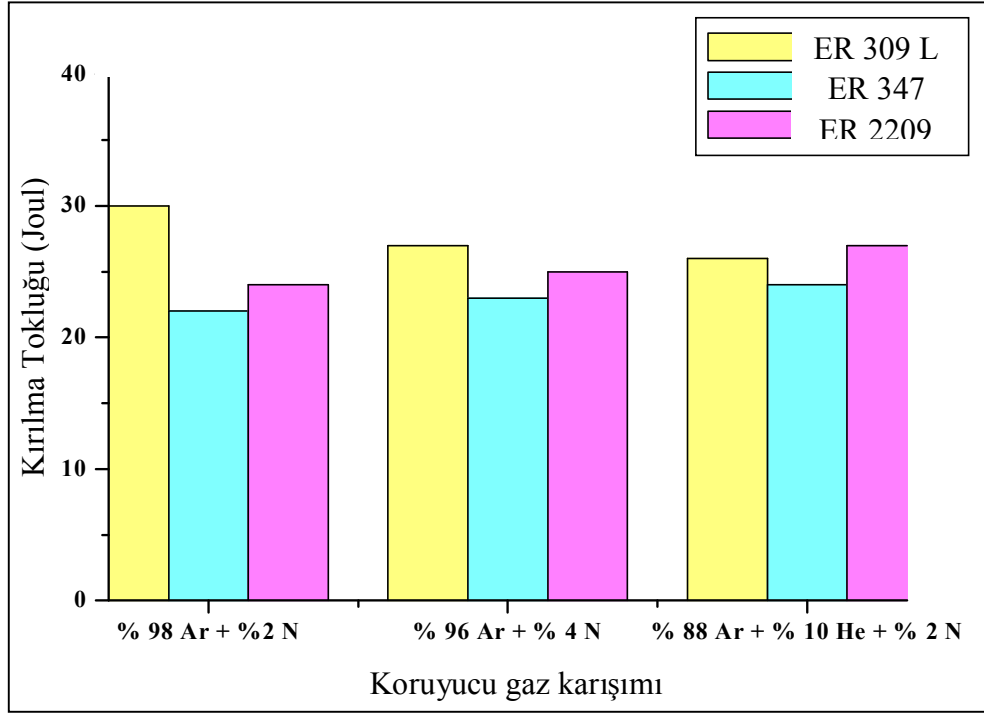
Her bir deney numunesinin darbe çentik dayanımı verileri ve ortalamaları Çizelge 5.3’de verilmiş ortalama sonuçlar grafiksel olarak Şekil 5.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Darbe çentik deneyi sonuçları.

| AISI 321 + AISI 321 |                    | DARBE ÇENTİK DAYANIMI (Joule) |           |           |          |
|---------------------|--------------------|-------------------------------|-----------|-----------|----------|
| Kaynak İlave Metali | Koruyucu gaz       | 1. Numune                     | 2. Numune | 3. Numune | Ortalama |
| ER 309L             | Ar + %2 N          | 32                            | 30        | 28        | 30       |
|                     | Ar + %4 N          | 24                            | 27        | 30        | 27       |
|                     | Ar + %10 He + %2 N | 24                            | 25        | 26        | 26       |
| ER 347              | Ar + %2 N          | 21                            | 23        | 22        | 22       |
|                     | Ar + %4 N          | 23                            | 20        | 26        | 23       |
|                     | Ar + %10 He + %2 N | 25                            | 23        | 24        | 24       |
| ER 2209             | Ar + %2 N          | 24                            | 24        | 46        | 24       |
|                     | Ar + %4 N          | 27                            | 22        | 26        | 25       |
|                     | Ar + %10 He + %2 N | 27                            | 45        | 27        | 27       |

Çizelge 5.3’te verilen sonuçlara göre darbe dayanımının grafiksel gösterimi aşağıda Şekil 5.5’de verilmiştir.





Şekil 5.5. -50 °C’de kırılan numunelerin darbe çentik deneyi sonuçları.

Şekil 5.5’den görüldüğü üzere -50 °C sıcaklıkta test edilen darbe çentik numunelerin çentik darbe dayanımı sonuçları çalışmada kullanılan koruyucu gazlar bazında değerlendirildiğinde belirgin bir farklılık göstermediği tespit edilmiştir.

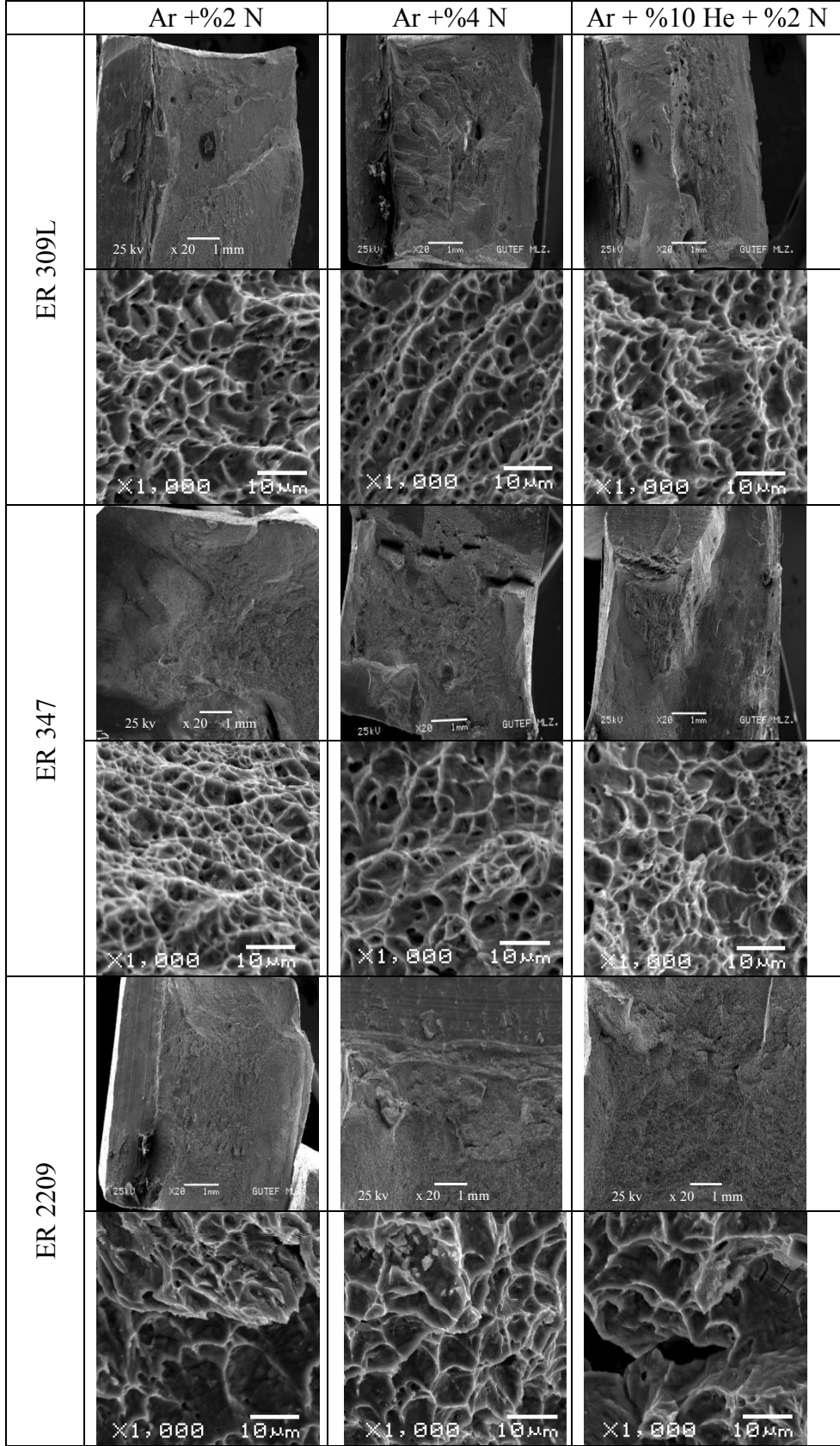
Ancak çalışmada kullanılan kaynak ilave metalleri bazında değerlendirme yapıldığında genel anlamda en yüksek darbe dayanımı ER 309L ilave metali ile birleştirilen numunelerde en düşük ER 347 kaynak ilave metali ile elde edilen numunelerde tespit edilmiştir. Örneğin ER 309L kaynak ilave metali için koruyucu gazlar ihmal edilirse ortalama çentik darbe enerjisi 28 Joule civarında iken bu değer ER 2209 birleştirmesi için yaklaşık 25 Joule, ER 347 birleştirmesi için 23 Joule olarak bulunmuştur.

Çalışmada ayrıca darbe çentik deney numunelerinin kırılma yüzeyleri görüntüleride alınmış ve Şekil 5.6’da gösterilmiştir.

Şekil 5.6'dan görüldüğü üzere -50 °C sıcaklıkta test edilen darbe çentik numunelerin kırılma yüzeyleri görüntüleri çalışmada kullanılan koruyucu gazlar bazında belirgin bir farklılık göstermediği tespit edilmiştir.

Ancak çalışmada kullanılan kaynak ilave metalleri bazında değerlendirme yapıldığında genel anlamda sünek bir kırılma davranışı sergilediği gözlemlenirken yerel olarak tane içi düzgün kırılmalara ER 347 ve ER 2209 kaynak ilave metalleri kullanılan birleştirmelerde rastlanmaktadır. Kırılma yüzey görüntüleri ile darbe çentik enerjilerinin uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak kırılma yüzey görüntüleri tüm şartlar için -50 °C sıcaklıkta test edilen darbe çentik numunelerinin süneklikten gevrekliğe geçiş sıcaklığına ulaşmadığına işaret etmektedir.



Şekil 5.6. Çentik darbe deney numunelerinin kırılma yüzeyleri görüntüleri.

#### 5.3.4. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Kaynaklı birleştirmelerin sertliğine koruyucu gazın ve kaynak ilave metalinin etkisini belirlemek amacıyla mikrosertlik ölçümü uygulanmıştır. Birleştirmeler çok pasolu kaynak işlemi ile elde edildiği için sertlik ölçümü Şekil 4.13'te gösterildiği gibi kök ve kapak paso üzerine denk gelecek şekilde iki yerden gerçekleştirilmiştir. Ölçüm ana malzeme, ITAB ve kaynak metali üzerinde aynı hatta bağlantının sertlik profili dağılımı elde edilecek şekilde yapılmıştır.

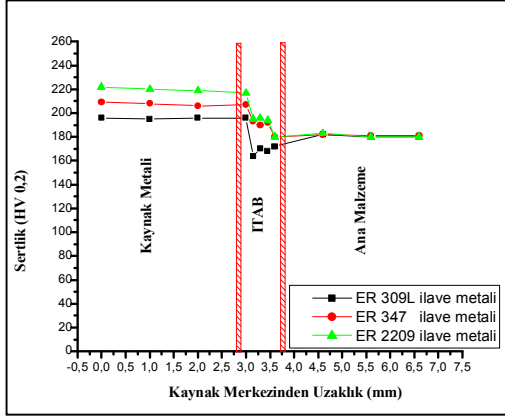
Çalışmada kullanılan her bir koruyucu gaz karışımı için üç farklı kaynak ilave metali kullanılarak elde edilen birleştirmenin kapak paso sertlik sonuçları Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

Şekil 5.7'den görüldüğü gibi bağlantının üst paso sertlik dağılımı, çalışmada kullanılan şartlar göz önünde bulundurulmadan değerlendirildiğinde, sertlik kaynak metalinin merkezinde en yüksek ana malzemede en düşük bulunmuştur. Birleştirmenin ısı tesiri altındaki bölgesinin (ITAB) kaba taneli bölümünde ise kaynak metalinin sertlik değerine yakın; ITAB' ın kısmi dönüşüme uğramış bölümünde ise ana malzemeye yakın bulunmuştur.

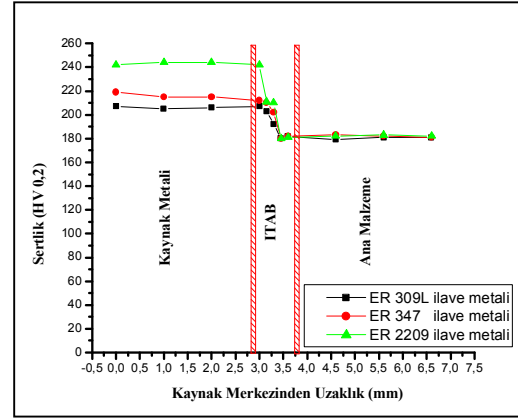
Şekil. 5.7'ye göre birleştirmelerin kaynak metallerinin üst paso sertliği çalışmada kullanılan kaynak ilave metalleri açısından değerlendirilirse en yüksek ER 2209 kaynak ilave metali ile Ar + %4 N koruyucu gazı kullanılarak yaklaşık 240 HV<sub>0.2</sub> elde edilmiştir (Şekil 5.7.b). Aynı kaynak ilave metali ile Ar + %2 N koruyucu gazı kullanılarak elde edilen birleştirmenin kaynak metali üst paso sertliği ise yaklaşık 220 HV<sub>0.2</sub> bulunmuştur (Şekil 5.7.a). En düşük sertlik ise yaklaşık 210 HV<sub>0.2</sub> olarak Ar + %10 He + %2 N koruyucu gaz kullanılan kaynak metalinde tespit edilmiştir (Şekil 5.7.c).

Birleştirmelerde kaynak metalinin ikinci en yüksek üst paso sertlik değeri ER 347 kaynak ilave metali ile Ar + %4 N koruyucu gazı kullanılarak elde edilen birleştirmede yaklaşık olarak 220 HV<sub>0.2</sub> bulunmuştur (Şekil 5.7.b). Aynı kaynak ilave metali ile Ar + %2 N koruyucu gazı kullanılarak elde edilen birleştirmenin kaynak

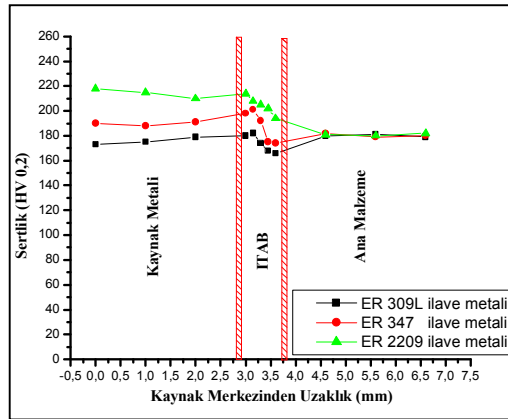
metali üst paso sertliği ise yaklaşık 210 HV<sub>0,2</sub> bulunmuştur (Şekil 5.7.a). En düşük sertlik ise yaklaşık olarak 195 HV<sub>0,2</sub> Ar + %10 He + %2 N koruyucu gaz karışımı kullanılan kaynak metalinde tespit edilmiştir (Şekil 5.7.c).



(a)



(b)



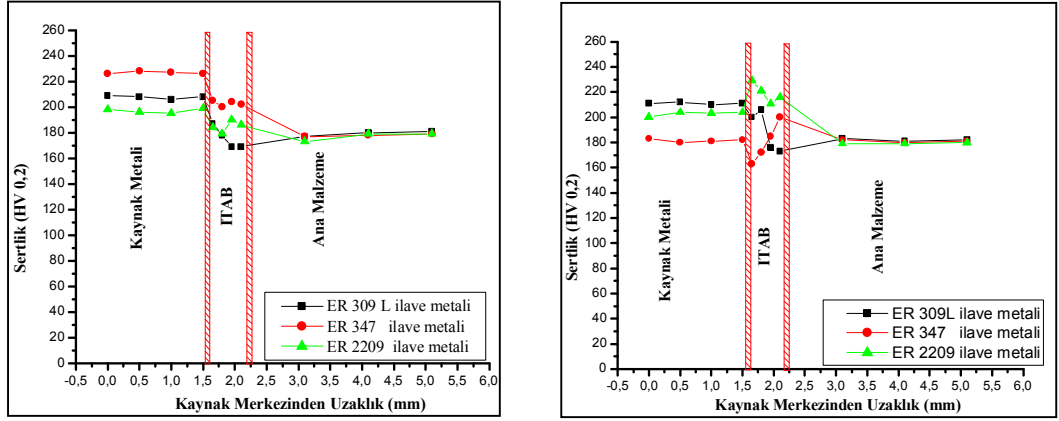
(c)

Şekil 5.7. Üç farklı kaynak ilave metalinin; a) Ar + % 2 N, b) Ar + % 4 N c) Ar + %10 He + %2 N koruyucu gazı kullanılarak elde edilen kaynaklı birleştirmelerin üst paso sertlik dağılımı.

Birleştirmelerin kaynak metalllerinde en düşük sertlik değeri ER 309L kaynak ilave metali ile Ar + %4 N koruyucu gazı kullanılarak elde edilen birleştirmede yaklaşık olarak 205 HV<sub>0,2</sub> bulunmuştur (Şekil 5.7.b). Aynı kaynak ilave metali ile Ar + %2 N koruyucu gazı kullanılarak elde edilen birleştirmenin kaynak metali üst paso sertliği ise yaklaşık 200 HV<sub>0,2</sub> bulunmuştur (Şekil 5.7.a). En düşük sertlik ise yaklaşık olarak

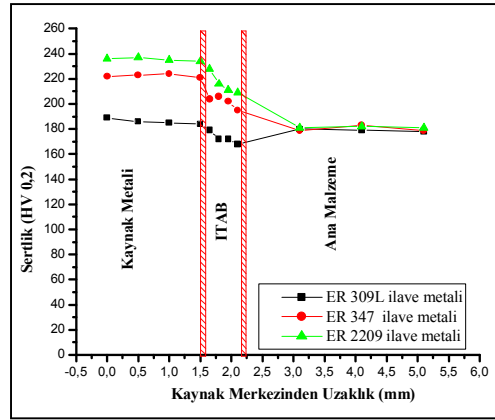
190 HV<sub>0.2</sub> Ar + %10 He + %2 N koruyucu gaz kullanılan kaynak metalinde tespit edilmiştir (Şekil 5.7.c).

Şekil 5.8’de 3 farklı koruyucu gaz ile 3 farklı kaynak ilave metali kullanılarak birleştirilmiş numunelerin kök paso sertlik dağılımı grafiksel olarak gösterilmiştir.



(a)

(b)



(c)

Şekil 5.8. Farklı kaynak ilave metallerinin; a) Ar + %2 N, b) Ar + %4 N c) Ar + %10 He + %2 N koruyucu gazı kullanılarak, kaynaklı birleştirmelerinin kök paso sertlik dağılımı.

Şekil 5.8’den görüldüğü gibi birleştirmelerin kök paso sertlik değerlerinin üst paso sertlik değerlerine yakın olduğu görülmektedir. Bağlantının alt paso sertlik dağılımı çalışmada kullanılan koruyucu gazlar göz önünde bulundurularak yapılan değerlendirmede, Ar + %4 N koruyucu gaz karışımı için ER 2209 ve ER 347 kaynak ilave metalleri ile elde edilen birleştirmeler hariç tüm kaynak metallerinin sertliği

ITAB'dan daha yüksek tespit edilmiştir. Ancak belirtilen iki birleştirmede ITAB sertliği kaynak metaline göre bir miktar daha yüksek bulunmuştur. Bundan çok pasolu kaynak uygulamasından dolayı ısı girdisine bağlı olarak ITAB'da oluşma ihtimali olan karbür, nitrür ve ferrit oluşumunun sorumlu olduğu düşünülmektedir.

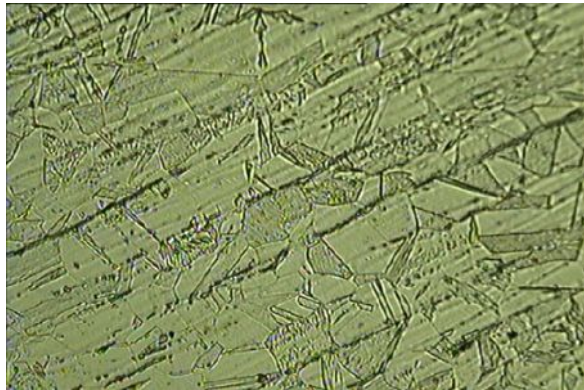
Kaynak ilave metallerine ve çalışmada kullanılan koruyucu gazlara göre yapılan değerlendirmelerde ise belirgin bir sıralama gözükmemektedir. Bunun üst paso kaynak termal çevriminin kök pasonun mikroyapısını etkilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

## **5.4. METALOGRAFİK İNCELEME SONUÇLARI**

### **5.4.1. Optik Mikroskop Sonuçları**

Çalışmada TIG ark kaynağıyla birleştirilen AISI 321 paslanmaz çelik çiftlerinin mikroyapı incelemeleride yapılmıştır. Bu amaçla deneylerde kullanılan ana malzemenin optik ve taramalı elektron mikroskop görüntüleri alınmıştır. Şekil 5.9'da ana malzemenin mikroyapı görüntüsü gösterilmiştir.

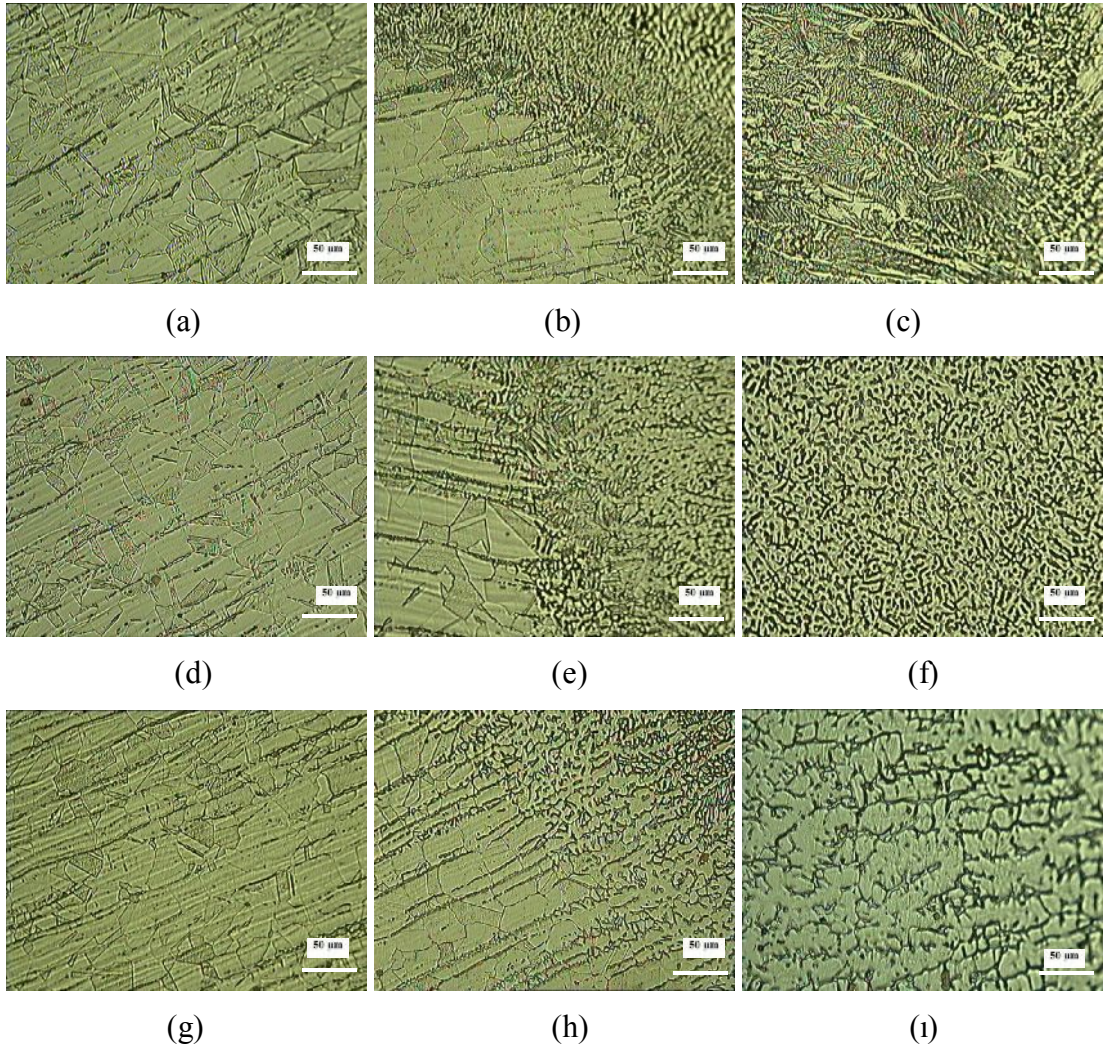
AISI 321 çelik çiftinin kaynaklı bağlantı mikroyapı profilleride elde edilmiştir. Birleştirme mikroyapı profilleri anamalzeme, ITAB ve kaynak metali şeklinde düzenlenerek çalışmada kullanılan tüm şartlar için ayrı ayrı ele alınmıştır.



Şekil 5.9. AISI 321 paslanmaz çelik mikroyapısı.

Mikroyapı değerlendirmeleri yapılırken birleştirmede kullanılan her bir koruyucu gaz ve üç farklı kaynak ilave metali için ayrı ayrı tespit yapılmıştır (şekil 10-12). şekil 5.10'da Ar + %2 N koruyucu gazı için ER 309L, ER 347 ve ER 2209 kaynak ilave metalleri için sırasıyla gsterilmiştir.

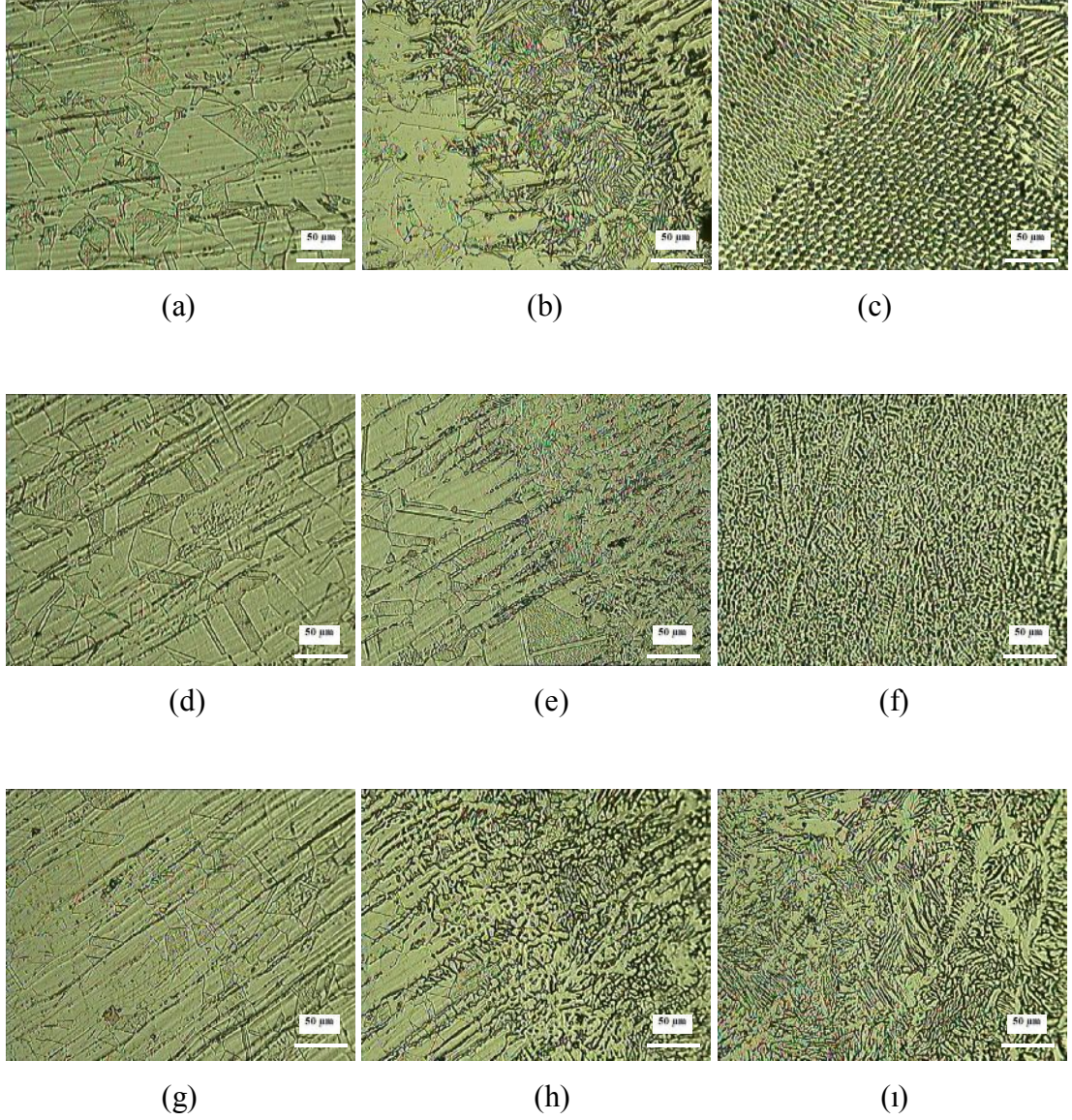
şekil 5.10'da kaynaklı birleştirme mikroyapı gdrntleri ana malzeme, ITAB ve kaynak metali sıralamasıyla değerlendirildiğinde; birleştirmede kullanılan her bir koruyucu gaz ve üç farklı kaynak ilave metali için bir arada tespit yapılmıştır.



şekil 5.10. Ar + %2 N koruyucu gazıyla elde edilen birleştirmelerin a) ER 309L ana malzeme, b) ER 309L ITAB, c) ER 309L kaynak metali, d) ER 347 ana malzeme, e) ER 347 ITAB, f) ER 347 kaynak metali, g) ER 2209 ana malzeme, h) ER 2209 ITAB, ı) ER 2209 kaynak metaline, mikroyapı gdrntüsü.

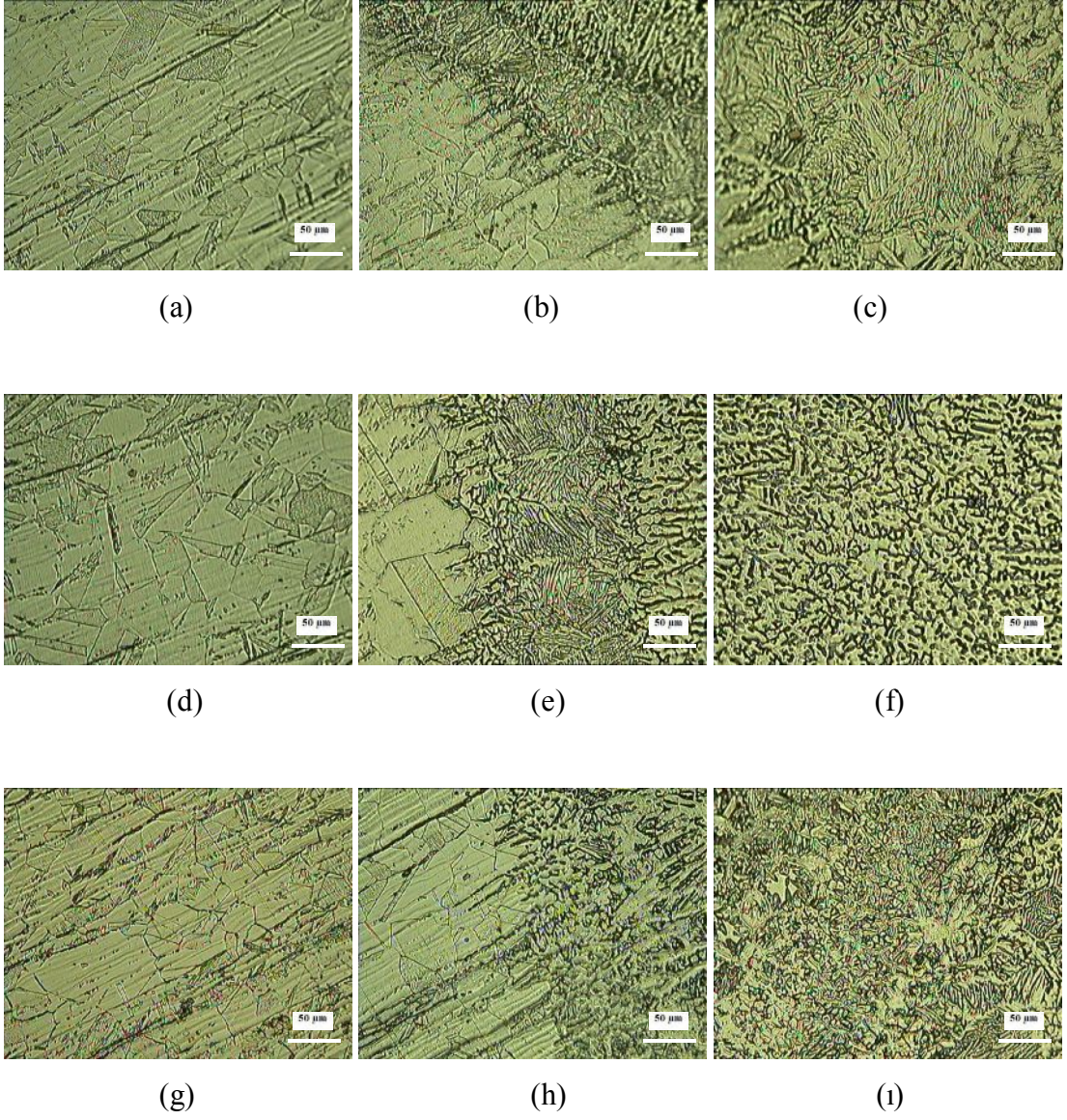


Şekil 5.11’de ise birleştirmenin mikroyapı profili Ar + %4 N koruyucu gazı ve ER 309L, ER 347 ve ER 2209 kaynak ilave metalleri için sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Ar + %4 N koruyucu gazıyla elde edilen birleştirmelerin a) ER 309L ana malzeme, b) ER 309L ITAB, c) ER 309L kaynak metali, d)ER 347 ana malzeme, e) ER 347 ITAB, f) ER 347 kaynak metali, g) ER 2209 ana malzeme, h) ER 2209 ITAB, ı) ER 2209 kaynak metalinin mikroyapı görüntüsü.

Şekil 5.12’de ise birleştirmenin mikroyapı profili Ar + %10 He + %2 N koruyucu gazı ve ER 309L, ER 347 ve ER 2209 kaynak ilave metalleri için sırasıyla gösterilmiştir.

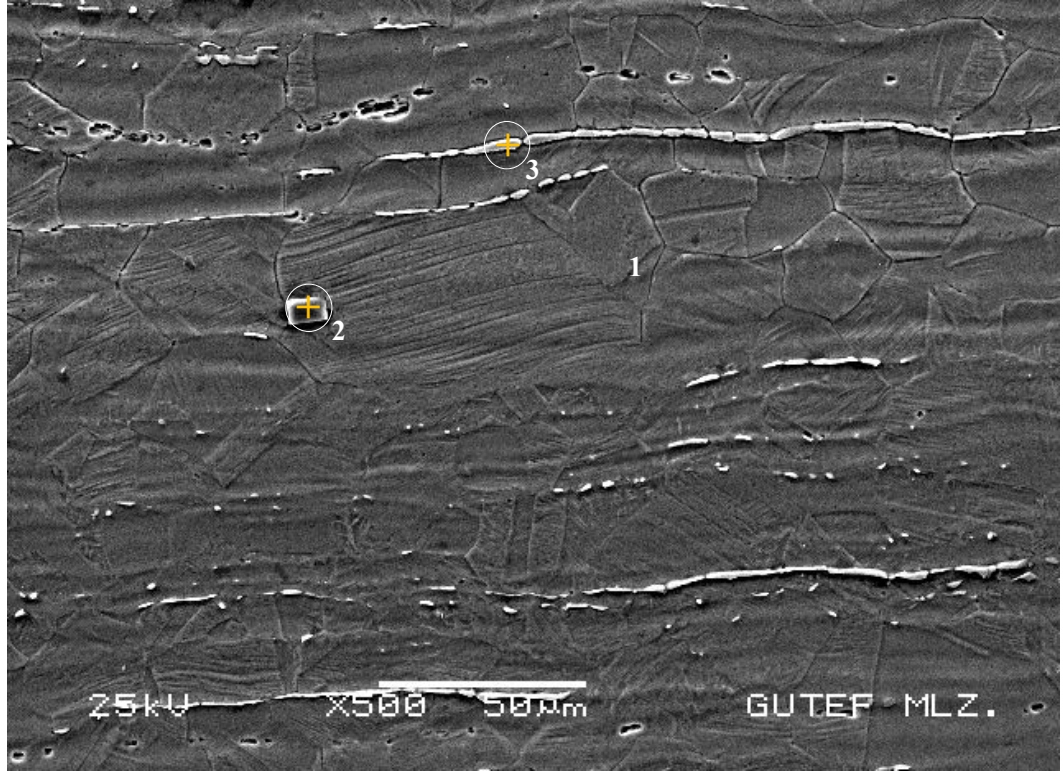


Şekil 5.12. Ar + %10 He + %4 N gazıyla elde edilen birleştirmelerin a) ER 309L ana malzeme, b) ER 309L ITAB, c) ER 309L kaynak metali, d) ER 347 ana malzeme, e) ER 347 ITAB, f) ER 347 kaynak metali, g) ER 2209 ana malzeme, h) ER 2209 ITAB, ı) ER 2209 kaynak metalinin, mikroyapı görüntüsü.

## 5.4.2. SEM İncelemeleri ve EDS Sonuçları

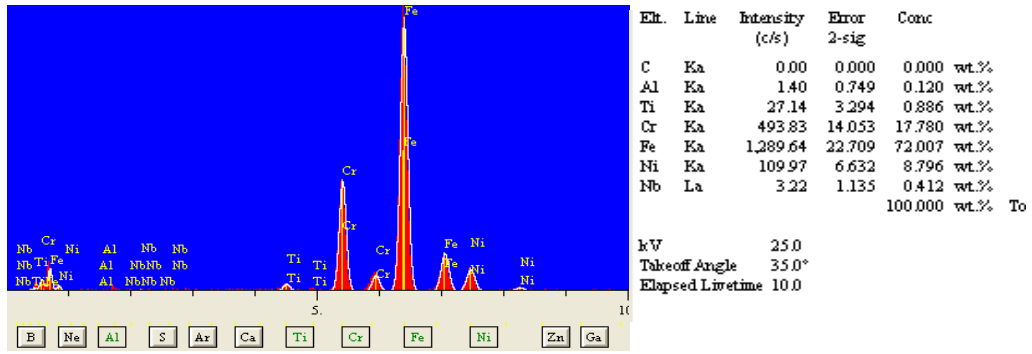
### 5.4.2.1. Kaynaklı Birleştirmenin SEM görüntüsü ve EDS sonuçları

Çalışmada TIG ark kaynağıyla birleştirilen AISI 321 paslanmaz çelik çiftlerinin taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapı incelemeleride yapılmıştır. İlave olarak ana malzeme üzerinden EDS çizgi analizi yapılarak kimyasal bileşim elemanlarının oranları tespit edilmiştir. Ayrıca ana malzeme üzerinde iki bölgeden noktasal analiz yapılmıştır. Şekil 5.13'te ana malzemenin SEM mikroyapı görüntüsü ve Şekil 5.14 a,b ve c'de ana malzeme üzerinden alınan EDS analiz sonuçları verilmiştir.

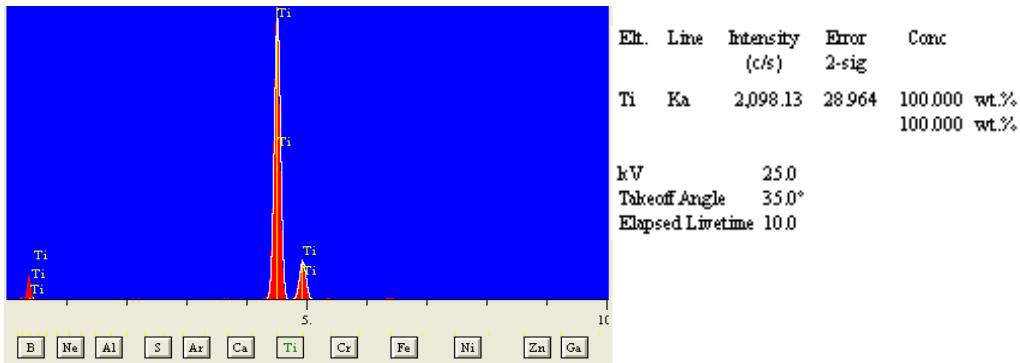


Şekil 5.13. AISI 321 malzemesinin SEM mikroyapısı.

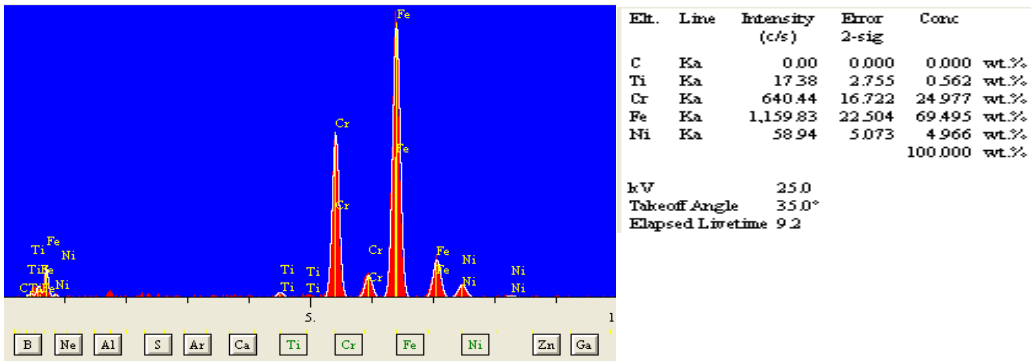
Şekil 5.13'te 2 ve 3 numara olarak işaretlenen bölgelerden noktasal EDS analizi yapılarak yapıların içeriği hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Çizgisel ve noktasal EDS analiz sonuçları sırasıyla Şekil 5.14(a, b ve c)'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

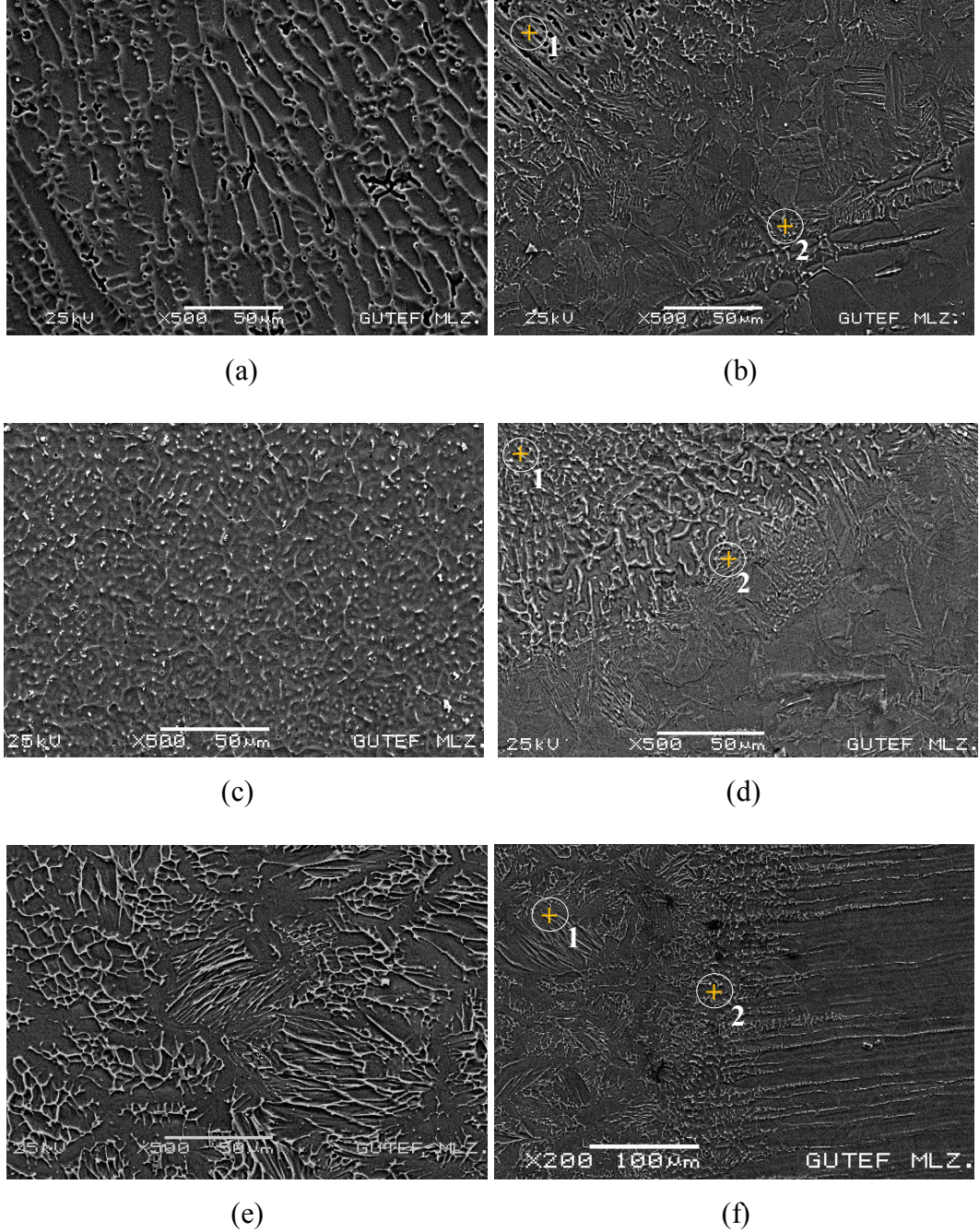


(c)

Şekil 5.14. AISI 321 paslanmaz çelik ana malzemenin a) Çizgisel analizi, b) 2 nolu bölgenin nokta, c) 3 nolu bölgenin EDS nokta analizi.

Ayrıca çalışmada sabit bir koruyucu gaz için üç farklı kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirmeler için kaynak metali ve ITAB mikroyapı incelemeleride yapılmış ve bu bölgelerden EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

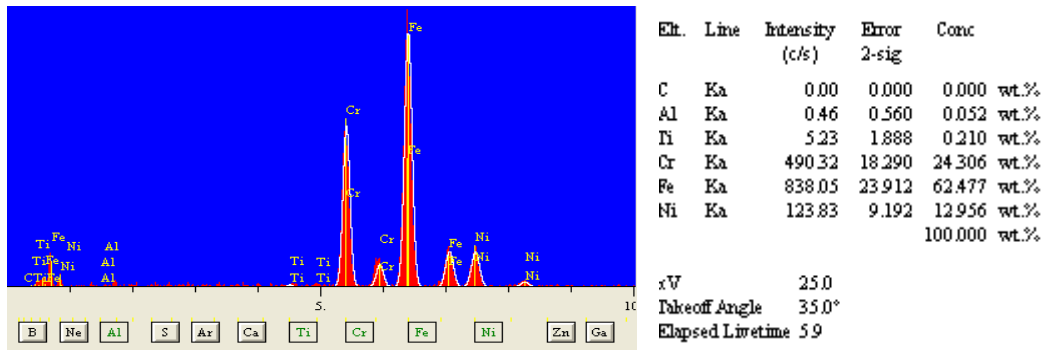
Şekil 5.15’de Ar + %2 N koruyucu gazı ile ER 309L, ER 347, ER 2209 kaynak ilave metalleri ile birleştirilen malzemelerin kaynak metali ve ITAB’dan alınmış mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



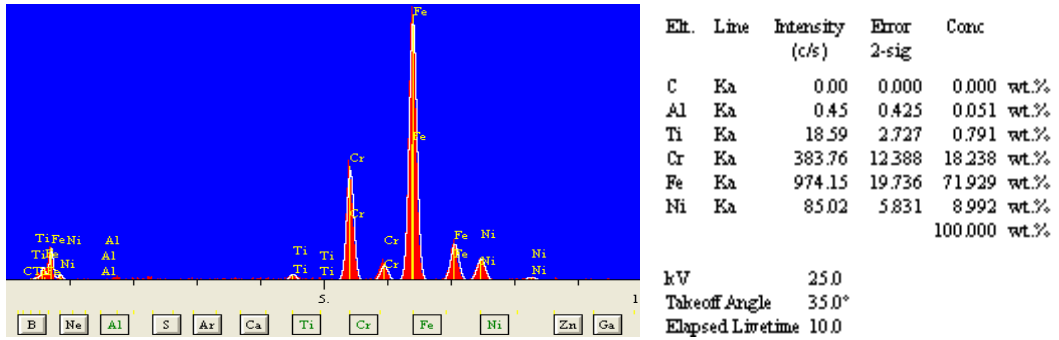
Şekil 5.15. Ar + %2 N koruyucu gazı ve sırasıyla ER 309L, ER 347, ER 2209 kaynak ilave metali ile birleştirilen numunelerin a) ER 309L kaynak metali b) ER 309L ITAB, c) ER 347 kaynak metali, d) ER 347 ITAB, e) ER 2209 kaynak metali, f) ER 2209 ITAB, SEM mikroyapı görüntüsü.

Şekil 5.15. mikroyapı görüntüleri için optik mikroskop mikroyapı incelemeleri kısmında değinildiği için bu kısımda değinilmeyecektir.

Şekil 5.15.b)'de Ar + %2 N koruyucu gazı ve ER 309L kaynak ilave metali ile birleştirilen numuneye ait verilen SEM görüntüsü üzerinde 1 nolu noktadan kaynak metali, 2 nolu noktadan ITAB EDS analizi yapılarak yapıların içeriği hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Noktasal analiz sonuçları sırasıyla Şekil 5.16.a ve b de verilmiştir.



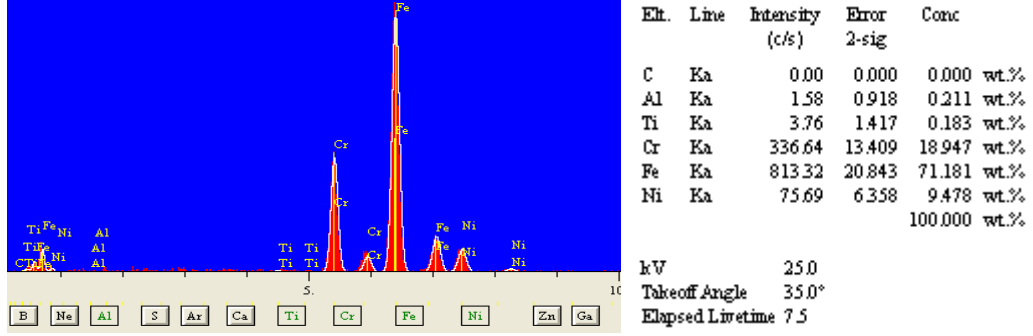
(a)



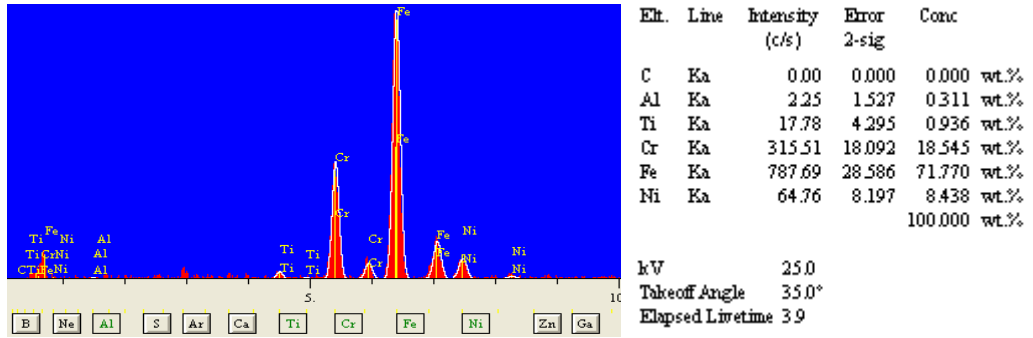
(b)

Şekil 5.16. Ar + %2 N koruyucu gazı ve ER 309L kaynak ilave metali ile birleştirilen Şekil 5.15. b)'de gösterilen SEM görüntüsü üzerindeki bölgelerin; a) 1 kaynak metali bölgesine, b) 2 ITAB bölgesine ait noktasal EDS analizi.

Şekil 5.15.d)'de Ar + %2 N koruyucu gazı ve ER 347 ilave metali ile birleştirilen numuneye ait verilen SEM görüntüsü üzerinde 1 kaynak bölgesine, 2 ITAB bölgesine ait EDS analiz sonuçları Şekil 5.17'de verilmiştir.



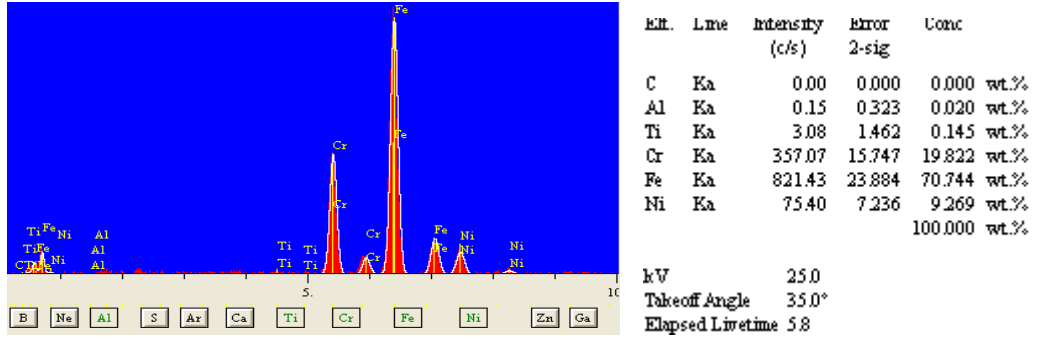
(a)



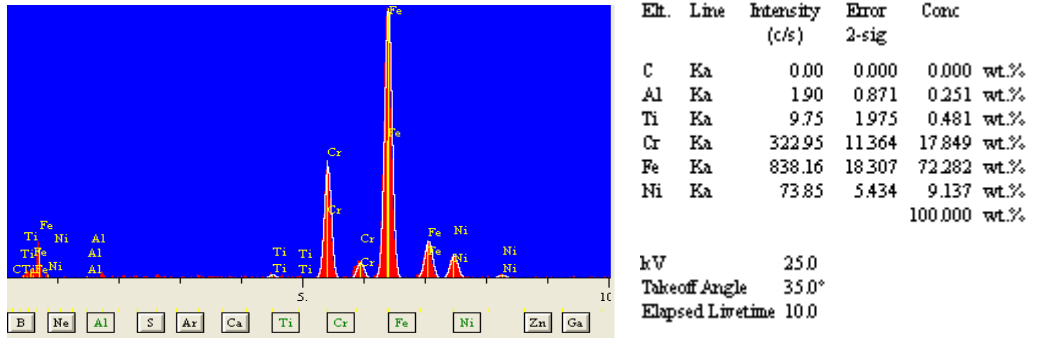
(b)

Şekil 5.17. Ar + %2 N koruyucu gazı ve ER 347 kaynak ilave metali ile birleştirilen Şekil 5.15.d’de gösterilen SEM görüntüsü üzerindeki bölgelerin; a) 1 kaynak metali bölgesine, b) 2 ITAB bölgesine ait, noktasal EDS analizi.

Şekil 5.15.f’de Ar + %2 N koruyucu gazı ve ER 2209 ilave metali ile birleştirilen kaynaklanan numunenin SEM görüntüsü üzerinde 1 kaynak bölgesine, 2 ITAB ait EDS analiz sonuçları Şekil 5.18’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.18. Şekil 5.15.f'de gösterilen Ar + %2 N koruyucu gazı ve ER 2209 kaynak ilave metali ile birleştirilen numuneye ait verilen SEM görüntüsü üzerinde a) 1 kaynak metali, b) 2 ITAB EDS analiz sonuçları.



## BÖLÜM 6

### SONUÇLARIN İRDELENMESİ

#### 6.1. GENEL

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda, östenitik Cr-Ni paslanmaz çeliğin (AISI 321) TIG ark kaynağıyla, (ER 309L–ER 347–ER 2209) üç farklı ilave metalle ve üç farklı koruyucu gaz kullanılarak birleştirilmesi sağlanmıştır. Böylece, kaynak ilave metalinin ve kaynak koruyucu gaz farklılıklarının; birleştirmenin çekme, eğme ve darbe çentik dayanımına, bağlantının sertliğine ve mikroyapısına etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar mukayese edilmiştir.

#### 6.2. NUMUNELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ İÇİN KULLANILAN ISI GİRDİSİ

##### 6.2.1. Kaynaklı Bağlantıya Uygulanan Isı Girdisi Sonuçlarının İrdelenmesi

Çizelge 5.1'den görüldüğü üzere çalışma sırasında ısı girdisine etki eden kaynak parametrelerinden ilerleme hızı mümkün olduğunca sabit olarak ayarlanmaya çalışılmıştır. Her paso için kullanılan kaynak akım şiddeti değişken olarak ele alınmıştır. Böylelikle kök paso için ortalama 0,61 KJ, ikinci paso için 0,73 KJ ve kapak paso için 0,79 KJ ısı girdisi hesaplanmıştır. Artan akım şiddetine göre beklenildiği gibi ısı girdisi artmıştır.

Bilindiği üzere kaynak ısı girdisini etkileyen en önemli iki kaynak parametresi; kaynak akım şiddeti ve kaynak ilerleme hızıdır. Bu çalışmada kaynak ilerleme hızı mümkün olduğu kadar sabit tutulmaya çalışılmış, kaynak akım şiddeti değeri değiştirilerek ısı girdisi arttırılmıştır.

### 6.3. KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERE UYGULANAN MEKANİK TEST SONUÇLARININ İRDELENMESİ

#### 6.3.1. Çekme Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

Çekme deneylerinin sonuçları incelendiğinde üç ayrı kaynak ilave metali ve üç farklı koruyucu gaz ile birleştirilmiş olan numunelerin ortalama çekme gerilimlerinin ana metalin (515 MPa) minimum çekme dayanımından daha fazla olduğu bulunmuştur. Elde edilen kaynaklı bağlantıların çekme deneyi sonucunda genellikle ana malzemeden kopması sonuçlarının Lippold ve Kotecki tarafından [59] ER 309L ve ER 347 birleştirmeleri için belirlenen minimum çekme dayanımından (520 Mpa) daha yüksek bulunmuştur. Bu da göstermektedir ki üç kaynak ilave metaliyle de güvenilir birleştirmeler yapmak mümkündür.

Deneyde kullanılan kaynak ilave metalleri bakımından çekme dayanımları büyükten küçüğe doğru sıralandığında; ER 2209, ER 309L ve ER 347 şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

En yüksek çekme dayanımının ER 2209 kaynak ilave metali ile Ar + %4 N koruyucu gazı kullanarak elde edilen birleştirmede bulunmasının nedeni ilave metalin, östenit–ferrit faz dengesiyle, kimyasal kompozisyonuyla ve koruyucu gaz karışımıyla ilgili olduğu düşünülmektedir. ER 2209 ilave metalinin kimyasal kompozisyonunda ve koruyucu gaz içerisinde N bulunmaktadır. Bilindiği gibi azot kuvvetli östenit yapıcıdır ve mukavemeti arttırıcı etkisi vardır. Gürçan, M; “TIG Kaynağı”, adlı kitabında azotun kaynak havuzu üzerinde yüzen atıklar oluşturarak arzu edilmeyen kimyasal etkisinin olduğundan bahsetmiştir. Kaynak esnasında eriyik durumdaki demir azotu içine çekerek katılma esnasında demir nitrat bileşiği yaptığını bunun da çekme dayanımı ve sertlik gibi bazı özelliklerin artmasını sağladığını bildirmiştir [31]. Dupleks paslanmaz çelikler 1000 °C altındaki sıcaklıklarda termal çevrime maruz kaldıklarında yapılarında sigma fazı, chi fazı,  $\alpha$  prime, Cr<sub>2</sub>N gibi istenmeyen ikincil faz parçacıkları oluşabilir. Bu çökeltiler kaynak sonrası yapılan ısıtma işlemi sırasında veya bu çalışmada olduğu gibi çok pasolu kaynak uygulamalarında

gevrekleşmeye sebep olduğu belirtilmiştir [52]. Buda kendini mukavemette ve sertlikte artış olarak gösterdiği düşünülmektedir.

Çalışmada ER 2209 kaynak ilave metali ile birleştirilen kaynak metalinin mikroyapısı içinde oluşan ferrit fazı miktarının (Schaeffler diyagramından %40 olarak tahmin edilmesi), bilhassa akma dayanımını artırdığını düşünülmektedir. Farklı ferrit miktarlarının kaynak metalinin mekanik özelliklerine etkisi Hauser and Van Etcho [53] tarafından detaylıca araştırılmıştır. Onların sonucuna göre kaynak metalindeki ferrit miktarı artışı oda sıcaklığındaki dayanımı daha fazla arttırırken, yüksek sıcaklıklarda daha az etki etmektedir [53]. Kaynak metalindeki artan ferrit miktarı aynı zamanda tokluğu olumsuz etkilediği bilinmektedir [54,55].

Aynı zamanda kaynak işlemi sırasındaki ısı girdisi ve AISI 321 kalite paslanmaz çelik ana metal bileşimindeki Ti ve Nb miktarı nedeniyle çökmesi muhtemel olan karbürlerinde dislokasyon hareketini zorlaştırması nedeniyle, akma ve çekme dayanımlarını artırmış olabileceği de düşünülmektedir.

Oğuz, Burhan; “Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı” adlı yayınında V kaynak ağzı hazırlanan numunelerde kaynak işleminin çok pasolu olarak gerçekleşmesi, her pasonun bir önceki pasoya temperleme etkisinde bulunmasından dolayı bağlantıların sertliğini bir miktar daha düşürdüğü dolayısı ile süneklikte bir miktar artışa neden olduğunu rapor etmiştir. Yapılan çalışmada çok pasolu olduğundan sertliğin kapak pasoya göre kök pasoda bir miktar düşük ölçülmesi buna dayandırılmıştır ve çok pasodan kaynaklanan temper etkisinden dolayı sünekliğin de bir miktar arttığı düşünülmüştür [56].

En düşük çekme dayanımının ER 347 ilave metali ile elde edilen birleştirmede bulunmasının nedeni kimyasal kompozisyonu ile alakalı olduğu düşünülmektedir. Bu ilave metalin kimyasal bileşimindeki C, Cr miktarlarının ana malzemenin kimyasal bileşimindekilerden fazla olduğu görülmektedir. Bu da kaynak bölgesinin ana malzemeye göre daha sert ve kırılğan olmasına sebep olarak kaynaklı bölgenin çekme dayanımını düşürmüştür. Bu ilave metal içeriğinde bulunan Cb elementi kuvvetli bir karbür yapıcıdır. Fakat Cb elementi C bağlayarak karbür oluşturur ve

C'nun ana malzemede bulunan Cr ile çökmesini azalttığı düşünülmektedir buda sertlik ve çekme dayanımında düşüşe neden olabilir. Kölük, F, 2000 yılında yapmış olduğu yüksek lisans tezinde kaynak ilave metallerin bileşimindeki C ve Cr elementlerinin ana malzemedan fazla olması durumunda sertliğinin ve kırılma dayanımının arttığını düşürdüğünden bahsetmiştir [6].

Argon östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında en çok tercih edilen gaz olduğundan literatürde bahsedilmiştir [21, 40].

Bu çalışmada kullanılan üç farklı koruyucu gaz karışımının birleştirmenin mukavemetine etkisi değerlendirme yapıldığında güvenilir bağlantılar elde edilmesinde, argon gazının havadan %38 daha ağır bir gaz olup ergimiş kaynak banyosunu iyi koruması ve arkın çok kararlı olmasının da etkili olduğu düşünülmektedir. Özellikle yatay kaynak pozisyonlarında kaynak esnasında etkili bir örtü oluşturarak kaynak banyosunu çok iyi bir şekilde koruyan argon gazı aynı zamanda düşük iyonizasyon enerjisine sahip olduğundan ark tutuşması daha kolay ve güvenilir hale getirmektedir [41].

Koruyucu argon gazının içerisine az miktarda azot ilavesi, azot kuvvetli bir östenit yapıcı olduğundan dolayı kaynak metali içerisindeki  $\delta$ -ferrit miktarını düşürmektedir. Kaynak metalindeki östenit miktarının artışı mukavemet artırıcı etki yapar [21]. Çalışmada kullanılan %4 azot gazının olduğu Ar + %4 N gaz karışımında elde edilen numunede en yüksek çekme sonuçlarının bulunmasının sebebinin açıklar. Paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde koruyucu gaz olarak argon içerisine azot gazı kullanıldığında azot gazının östenit dengeleyici özelliğinden faydalanılarak kaynak metalindeki  $\delta$ -ferrit oranı kontrol edilmektedir [42, 45, 57, 58].

Argon helyum karışımları hem argonun hem de helyumun en üstün özelliklerini bir arada elde edebilmek amacı ile geliştirilmiş ve bu sayede nufuziyet ve ark kararlılığı optimize edilmiştir. Dar ve fazla ısı girdisi olduğundan daha derin nufuziyet sağlar [46]. Çalışmada kullanılan helyumlu karışım gazı içerisinde %2 oranında N gazı kullanıldığından etkisinin daha az olduğu düşünülmektedir.

Tüm kaynak ilave metalleri ve koruyucu gaz ortamlarında elde edilen çekme deney numunelerinin kırık yüzey incelemeleri kopmanın sünek bir kırılma sonucunda meydana geldiğini göstermektedir. Kırık yüzey SEM görüntülerindeki girinti ve çıkıntılar bunu desteklemektedir.

AISI 321 kalite östenitik paslanmaz çeliklerin TIG ark kaynak yöntemiyle; sırasıyla ER 2209; ER 309L ve ER 347 ilave metalleri ve Ar + %2 N, Ar + %4 N, Ar + %10 He + %2 N koruyucu gazları kullanılarak yapılan birleştirmelerde, kaynak metallerinin çekme dayanımı ve sünekliği bakımından çok pasolu kaynağın uygun olduğunu ve güvenilir kaynaklı birleştirmeler yapılabileceği sonuçlar dahilinde söylenebilir.

### **6.3.2. Üç Nokta Eğme Katlama Deney Sonuçlarının İrdelenmesi**

Sonuçlar çalışmada kullanılan kaynak ilave metalleri ve koruyucu gaz karışımları açısından elde edilen birleştirmelerin şekillendirilebilme kabiliyetlerinin iyi olduğuna işaret etmektedir. Birleştirmelerde 180 °C bir katlama neticesinde bile çoğunlukla çatlak oluşturmaması bu sonucu doğrulamaktadır.

### **6.3.3. Darbe Çentik Deney Sonuçlarının İrdelenmesi**

-50 °C’de yapılan deneylerde en yüksek darbe dayanımı; ER 309L ilave metali ile birleştirilen numunelerde, en düşük ER 347 kaynak ilave metali ile elde edilen numunelerde tespit edilmiştir. Deneyin yapıldığı sıcaklık, kaynak ısı girdileri kullanılan ilave metalin kimyasal bileşiminin, kaynak metali final mikroyapısının tokluğunu etkilediği bilinmektedir.

Kanada Kaynak Enstitüsü’nün “Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Metalurjisi” adlı yayınında da belirtildiği gibi östenitin yüzey merkezli kubik kristal yapısı (YMK) düşük sıcaklıklarda gevrek kalmaz. Östenitik yapının tok yapısı düşük sıcaklıklarda onlara avantaj sağlamaktadır [59]. Şekil 5.6’da verilen kırık yüzey SEM görüntülerinden de görülebileceği gibi ER 309L kaynak ilave metali ile elde edilen bağlantının diğer kaynak ilave metaliyle birleştirilen bağlantılara göre daha sünek bir

kırılma gösterdiği ve girintili çıkıntılı yüzeylerden oluştuğu anlaşılmıştır. Gooch [60], yaptığı deneyler sonucunda artan ferrit numarası ile absorbe edilen darbe enerjisinin düştüğünü tespit etmiştir. Yapılan çalışmada kaynak sonrası oluşabilecek tahmini mikroyapıları Sheffler diyagramı aracılığıyla hesaplanmaya çalışılmış ve Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Tahmini mikroyapıları incelendiğinde kaynak metali yapısındaki ferritin ER 309L kaynak metaliyle birleştirilen numunenin kaynak metalinde ferrit miktarının %12, ER 347 kaynak metaliyle birleştirilen numunenin kaynak metalinde ferrit miktarının %18, ER 2209 kaynak metaliyle yapılan birleştirmede kaynak metalindeki ferrit miktarının ise yaklaşık %40 olduğu hesaplanmıştır. Bileşimlerinde daha fazla ferrit oluşanın sünekliği ve tokluğu ters yönde etkilenecektir [28]. Kaynak metalinin yapısındaki % ferrit miktarının daha fazla olan birleştirmelerin tokluğunun olumsuz yönde etkileneceği düşünülmektedir. Aynı zamanda kaynak metalinde, kaynak ısı girdisi sırasında oluşabilecek olan çökeltielerinde tokluğu düşürebileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda -50 °C'de ER 309L ortalama 28 Joule, ER 2209 ortalama 25 Joule, ER 347 birleştirmesi için 23 Joule olarak bulunmuştur. Buda kaynak metalinde artan ferrit miktarı ile darbe dayanımının düştüğünü doğrular niteliktedir. Burada ER 2209 kaynak ilave metaliyle birleştirilenin ER 347 kaynak ilave metaliyle birleştirilen numuneden daha yüksek darbe dayanımına sahip olmasının bu ilave kaynak metallerin bileşimindeki elementlerin farklılığından olduğu düşünülmektedir.

Literatürde, paslanmaz çeliklerin bileşimindeki Ni oranı arttıkça kaynak metali tokluğunun arttığı söz edilmektedir [30]. İlave metallerin bileşiminde Ni oranlarına bakıldığında en yüksek ER 309L kaynak ilave metalinde olmasının, bu birleştirmenin darbe dayanımının en yüksek olmasına neden olduğu düşünülmektedir.

ER 2209 kaynak ilave metali ile elde edilen bağlantının darbe dayanımının ER 309L ilave metali ile elde edilenden daha düşük bulunmasının sebebinin; kaynak metalinin yapısındaki ferrit fazın sıcaklık düştükçe daha gevrek bir hal alması ve elektrodun bileşiminde bulunan %0,08-0,20 civarındaki N miktarının 0 °C'nin altındaki sıcaklıklarda tane inceltici etkisini zayıflatarak kaynak metalinin tokluğunu ters yönde etkilemesi olduğu düşünülmüştür [61].

Ayrıca Şekil 5.6’da verilen sem kırılma yüzey fotoğraflarına bakılarak kaynak ilave metalleri bazında değerlendirme yapıldığında genel anlamda sünek bir kırılma davranışı sergilediği gözlemlenirken yerel olarak tane içi düzgün kırılmalara ER 347 ve ER 2209 kaynak ilave metali kullanılan birleştirmelerde rastlanmaktadır. Kırılma yüzey görüntüleri ile darbe çentik dayanım sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.3’te verilen darbe enerji sonuçları ve Şekil 5.6’da verilen kırılma yüzeylerine bakıldığında -50 °C sıcaklıkta test edilen darbe çentik numunelerin darbe enerjileri ve kırılma şekillerinde çalışmada kullanılan koruyucu gazlar bazında belirgin bir farklılık göstermediği tespit edilmiştir.

#### **6.3.4. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçlarının İrdelenmesi**

Sonuç olarak, çalışmada kullanılan kaynak ilave metalleri göz önünde bulundurularak değerlendirme yapıldığında en yüksek sertlik ER 2209 daha sonra ER 347 ve en düşükde ER 309L kaynak ilave metali kullanılarak elde edildiğine işaret etmektedir. Kullanılan koruyucu gazlar göz önünde bulundurulduğunda birleştirmelerin kaynak metalleri üst paso sertlik sonuçları en yüksek sertliğin Ar + %4 N, daha sonra Ar + %2 N ve en düşük ise Ar + %10 He + %2 N korucu gazları ile elde edildiğine işaret etmektedir. Sertlik sonuçları ile çekme test sonuçları arasında bir ilişki kurulacak olursa uyum içerisinde olduğu söylenebilir.

Birleştirmelerin kaynak metali sertliği kullanılan kaynak ilave metali açısından irdelenecek olursa, ER 2209 kaynak ilave metali kullanılarak elde edilende en yüksek bulunmasının sebebi dubleks paslanmaz çelik kaynak metali mikroyapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dubleks paslanmaz kaynak ilave metali ile bilhassa üst paso kaynak dikişlerinde ana malzemeden karışım düşük olduğu için kaynak metali katılaşması sırasında yapıda oluşan ferrit miktarı diğer kaynak ilave metalleri ile kıyaslandığında daha fazladır (%40). Kaynak metali yapısındaki ferritin sertliği arttırdığı rapor edilmiştir [ 53,54,55].

ER 347 ile birleştirilen numunenin kaynak metalinin sertliğinin ER 309L ilave metalle birleştirilene göre daha yüksek bulunmasının sebeplerinden biri ilave metal kimyasal bileşiminde bulunan Nb olabilir. Çünkü her iki alaşım elemanı da AISI 321 çeliğin kaynak metalinde yüksek sıcaklıkta karbür (MC) oluşturması, ya da kaynak metalinde nitrür ( $Cr_2N$ ) oluşumundan dolayı sertlik bir miktar artmış olabilir. Diğer bir sebepte kaynak metalindeki % ferrit miktarı olabilir. Kaynak metalindeki % ferrit miktarının artışı dayanımını ve sertliği arttırdığı ve tokluğu düşürdüğü rapor edilmiştir [53,54,55]. ER 347 kaynak metali ferrit miktarının (%18), ER 309L göre (%12) daha yüksek bulunması fakat % uzamanın ER 347 birleştirmesi için çok azda olsa düşük bulunması da bu sonucu desteklemektedir.

Kaynaklı birleştirmelerin ITAB sertlik dağılımları incelendiğinde koruyucu gazlar ihmal edilerek yalnızca kaynak ilave metalleri açısından bir değerlendirme yapıldığında kaynak metaline göre sertlikte bir miktar düşme bulunmuştur (Şekil.5.10). Bu sertlik düşüşü ER 2209 kaynak ilave metali ile birleştirilende yaklaşık 35 HV<sub>0.2</sub>, ER 347 birleştirmesinde yaklaşık 25 HV<sub>0.2</sub>, ER 309L birleştirmesinde yaklaşık 20 HV<sub>0.2</sub> olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, kaynak termal çevriminden östenitik paslanmaz çelik ITAB bölgesinde belirgin bir tane irileşmesi görülmemesine rağmen sertlikte azda olsa düşme bulunması yapıda bir etkilenmenin olduğuna işaret etmektedir.

Birleştirmelerin ITAB sertlik farklılığı irdelenecek olursa, ITAB sertlik farklılığı kaynak termal çevriminden etkilenen tane boyutundan, ferrit oluşumundan veya ikincil faz parçacıklarından dolayı olabilir. Birleştirmelerin ITAB metalografik görüntülerinde belirgin bir tane irileşmesi görülmemektedir. Yüksek Cr<sub>es</sub>/Ni<sub>es</sub> oranına sahip paslanmaz çeliklerin ITAB'de ferrit oluşuma ihtimalinin yüksek olduğu ve ITAB tane sınırlarında oluşan ferritin, tane büyümesini engellediği gibi, ITAB'de sıcak kırılma ihtimalini azalttığı daha önce yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir [52]. Metalografik incelemelerde ER 2209 ve ER 347 kaynak ilave metalleri ile birleştirilen numunenin ITAB'de daha fazla ferrit oluşumu gözlemlenmesi, ITAB sertlik değerinin ER 309L göre daha yüksek bulunmasının sebebi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, metalografik olarak gözükmesi bile ITAB'de bazı ikincil



faz parçacıkları da oluşabilir. ITAB'de ulaşılan sıcaklıklarda kararlı olan çökeltiler genellikle  $M_{23}C_6$ ,  $Cr_2N$  ve titanyum ihtiva eden alaşımlarda ise MC çökeltileridir. Bu çökeltilerde sertlik farklılığına sebebiyet verebilir.

Çalışmada elde edilen birleştirmelerin kaynak metali ve ITAB sertliği kullanılan koruyucu gaz açısından irdelenecek olursa, Ar + %4 N gazı kullanılarak elde edilende en yüksek bulunmasının sebebi ise koruyucu gaz bileşiminde bulunan Azottan kaynaklanmaktadır. Azot kuvvetli bir östenit yapıcı elementtir. Ancak kaynak metali gibi hızlı soğuma şartlarında ferritin azot çözüdürebilme miktarından daha fazla azot östenit içerisine gitmek için yeterli zaman bulamaması sebebiyle kromca zengin nitrürler ( $Cr_2N$ ) oluşturur. Hertzman [62]; yaptığı bir çalışmada azotun östenitik paslanmaz çeliklerde intermetalik fazların oluşumunu arttırma eğiliminde olduğu ancak dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında ise bu etkinin daha düşük olduğunu ifade etmiştir. Bu nitrürler sertlik artışına sebebiyet verir [52]. Bu çalışmada birleştirmelerin sertliği üzerinde etkisi ikinci derecede olan koruyucu gaz karışımı olarak Ar + %2 N ihtiva eden gaz karışımı bulunması bu tezleri desteklemektedir. En az etki ise bileşiminde helyum ihtiva eden gazla elde edilen birleştirmelerde görülmüştür. Bunun sebebinin helyumun ısı girdisini arttırması olarak düşünülmektedir [ 44].

Çalışmada kullanılan ana malzemenin sertliği yaklaşık olarak 185  $HV_{0.2}$  olarak ölçülmüştür. Bu sertlik değeri AISI 321 östenitik paslanmaz çeliğinin ticari olarak temin edildiği şekliyle sahip olunan sertlik değerleri ile uyum içerisindedir.

## **6.4. METOLOGRAFİK İNCELEME SONUÇLARININ İRDELENMESİ**

### **6.4.1. Optik Mikroskop Sonuçlarının İrdelenmesi**

Mikroyapı görüntüleri AISI 321 östenitik paslanmaz çeliğin eş aksenal östenit tanelerinden meydana geldiğini göstermektedir. Çalışmada kullanılan ana malzemenin tüm şartlar için ticari olarak temin edildiği şekliyle kullanılan AISI 321 östenitik paslanmaz çelik çifti olduğu için ana malzemenin metalografisi kısmında yapılan değerlendirmeler kaynaklı malzemenin ana malzeme kısmı içinde geçerlidir.

Birleştirmede kullanılan AISI 321 östenitik paslanmaz çelik ana malzemenin mikroyapısı kaynak termal çevriminden etkilenmediği için ticari olarak temin edildiği şekliyle sahip olduğu mikroyapıyı muhafaza ettiği görülmektedir. Mikroyapı daha önce belirttiği gibi eş aksenel östenit tanelerinden meydana gelmiştir. Östenit taneleri içerisinde yerel ikizlenmelerde göze çarpmaktadır. Aynı zamanda hadde yönünde boyuna uzanmış kalıntı delta ferrit fazıda görülmektedir.

Çalışmada kullanılan ER 2209 kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirmenin kaynak metalini mikroyapısının ferrit tane sınırlarında oluşmuş östenit fazlarından oluşmuştur. Ayrıca ferrit tane sınırlarında ve tane içlerinde levhali östenit oluşumları görülmektedir. Çalışma çok pasolu kaynak işleminden oluştuğu için kaynak metalinde ikincil östenit oluşumunda rastlanmaktadır (Şekil 5.11.c).

Bilindiği üzere dubleks kaynak metalinde katılaşma kimyasal bileşime ve soğuma hızına bağlı olarak ferrit fazında başlar ve sıcaklık ferrit katılaşma sıcaklığına ulaştıktan sonra östenit dönüşümü meydana gelir. Kimyasal bileşim ve soğuma hızı aynı zamanda final kaynak metali mikroyapısındaki ferrit ve östenit dengesini belirler. Ferrit östenit dengesini belirleyen başlıca alaşım elemanlarından biride azottur. Bu çalışmada azotun etkisi koruyucu gaz içerisinde bulundurulmuş ve artırılmaya çalışılmıştır. Yapılan incelemeler neticesinde ER 2209 kaynak ilave metalindeki ferrit miktarı %40 civarında olduğu Scheaffler diyagramından tahmin edilmiştir.

ER 347 ve ER 309L kaynak ilave metalleri ile elde edilen kaynak metalleri ise östenit matriks içerisinde oluşmuş skeletal ve lathy ferrit dağılımlarından meydana gelmiştir. Paslanmaz çeliklerin kaynak metalinde, tamamen östenitik, öncelikli östenit, öncelikli ferritik ve tamamen ferritik olmak üzere dört adet katılaşma modu görülebilir [55]. Her bir katılaşma modu östenit ve ferrit morfolojisinde ayırt edici bir unsur taşır. Bu çalışmada olduğu gibi (Çizelge 1.)  $Cr_{eş}/Ni_{eş}$  oranı 1,5 ile 1,75 arasında olduğu zaman kaynak metali öncelikli olarak ferrit fazında katılaşmaya başlar [63]. Katılaşmanın belirli bir safhasında geri kalan sıvı östenit yapıcı elementlerce zenginleşir ve oluşan östenit, ferrit tanelerini sararak katı-katı dönüşümü sırasında difüzyon kontrollü olarak ferrit östenit dönüşümü meydana gelir. Soğuma hızının

normal olduğu ancak  $Cr_{es}/Ni_{es}$  oranı düşük fakat hala öncelikli katılaşmanın ferrit modunda olduğu durumlarda vermicular veya skeletal ferrit morfolojisinin meydana geleceği, soğuma hızının yüksek veya  $Cr_{es}/Ni_{es}$  oranı yüksek fakat hala öncelikli katılaşmanın ferrit modunda olduğu durumlarda lathy ferrit morfolojisinin meydana geleceği, rapor edilmiştir [52,62]. Kaynak metallere ER 309L birleştirmesi için %12 ferrit, ER 347 birleştirmesi içinde %18 ferrit fazı oluşabileceği Schaeffler diyagramından tahmin edilmiştir. Kaynak metali mikroyapısı ile Schaeffler diyagramı uyum içerisinde bulunmuştur.

Çalışmada kullanılan birleştirmelerin kaynak metallere mikroyapısı koruyucu gazlar açısından irdelenecek olursa; paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirmelerinin dayanımını arttırmak, korozyon özelliklerini iyileştirmek için TIG ark kaynak ilave metali azotça yeterince süper alaşımlandırılmadığından bu eksiklik genelde koruyucu gaz içerisinde farklı oranlarda azot bulundurmaya çalışılmıştır. Hertzman ve diğerleri [62], yapmış oldukları bir çalışmada azot küçük atom çapına sahip olduğu için kaynak sırasında dışarıya yayındığını azalan bu azot miktarının ancak azot içeren koruyucu ve kök gaz kullanılarak dengelenebildiğini ifade etmektedirler. Vasien ve diğerleri [62], kaynak metalinin koruma gazından azot alışı gaz karışımındaki azot miktarının %20'ye kadar arttığını ifade etmişlerdir.

Koruyucu gaz içerisindeki azotun östenitik ve paslanmaz çeliklerin kaynağında nüfuziyeti ve ark kararlılığını arttırdığıda bilinmektedir. Azot aynı zamanda paslanmaz çeliklerin kaynak metalinin mikroyapısını iyileştirdiği ve çukurcuk korozyon dayanımını arttırdığı bilinmektedir [2].

Fakat gaz karışımı içerisindeki fazla azotun nüfuziyeti olumsuz etkilediğine literatürde rastlanmaktadır. Aynı zamanda fazla azot gaz boşluğu oluşturma eğilimini arttırdığı için bu çalışmada koruyucu gaz içerisindeki azot miktarı maksimum %4 minimum %2 ile sınırlandırılmıştır [64].

Östenitik paslanmaz çeliklerin ITAB yapısı anamalzemenin kimyasal bileşimine ve mikroyapısına bağlıdır. ITAB'de belirgin bir tane irileşmesi görülmemektedir. Çalışmada birleştirme için kullanılan ısı girdisinin düşük olması ana malzemenin

sıcak haddeleme yoluyla üretilmiş olması tane irileşmesini engellediği düşünülmektedir. Lippold ve Kotecki solüsyona alma ısıl işlemi görmüş veya sıcak haddeleme yoluyla ticari olarak temin edilen östenitik paslanmaz çeliklerde birleştirmede yüksek ısı girdisi kullanılmadığı sürece tane irileşmesinin sınırlı olduğunu rapor etmişlerdir [52].

Ancak ITAB mikroyapı görüntülerinde en belirgin olarak göze çarpan husus ferrit fazı oluşumudur. Paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimindeki ferrit yapıcı elementlerin östenit yapıcı elementlere oranı arttıkça kaynak işlemi sırasında ana malzemedeki katılma sıcaklığına kadar ulaşılan bölgelerde bilhassa tane sınırlarında ferrit oluşma ihtimali artar. Oluşan bu ferrit fazı aynı zamanda ITAB östenit tenelerinin irileşmesini engellediği düşünülmektedir.

Metalografik olarak gözükmese de  $M_{23}C_6$  gibi karbür ve  $Cr_2N$  gibi nitürlerde genelde birçok östenitik paslanmaz çeliğin ITAB bölgesinde oluşur. Bu ikincil faz oluşumlarının büyüklük, dağılımı ve morfolojisi kimyasal bileşimine ve ITAB termal çevriminin süresine bağlıdır. Bu çalışmada çok pasolu kaynak işlemi kullanılması sebebiyle oluşma ihtimalleride daha çoktur.

ITAB mikroyapı incelemelerinde tane sınırı sıvılaşmasına bağlı olarak herhangi bir çatlak oluşumuna rastlanmamıştır. Bileşiminde titanyum ve niyobium bulunduran çeliklerde MC tipi karbürler oluşturmaları sebebiyle yapısal olarak sıvılaşma oluşturabilir. Bu olay ITAB tane sınırı sıvılaşma çatlakları olarak tanımlanır [52].

#### **6.4.2. SEM ve EDS Sonuçlarının İrdelenmesi**

Şekil 5.13. SEM mikroyapı görüntüsü AISI 321 östenitik paslanmaz çeliğin eş aksel östenit tanelerinden meydana geldiğini göstermektedir. EDS sonucu ise bu çeliğin bileşiminde yaklaşık %18 Cr, 8,3 Ni ve 0,8 Ti ihtiva ettiğine işaret etmektedir. Bu sonuçlar ile Çizelge 4.1'de verilen kimyasal spectral analiz sonuçları uyum içerisindedir. Şekil 5.13. üzerinde 2 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonucu paslanmaz çelik ana malzemenin içerisinde Ti ihtiva eden ikincil faz partekülü olduğu düşünülen bir oluşuma işaret etmektedir. Şekil 5.13. üzerinde 3 nolu

bölgeden alınan EDS analiz sonucunda bulunan yüksek (%24) Cr ve düşük (%4) Ni ve mikroyapı görüntüsü hadde yönüne paralel olarak uzanmış delta ferrit kalıntısına işaret etmektedir. Bu ferrit katılma sırasında veya termo mekanik işlemler sırasında ferrit yapıcı elementlerin kimyasal içerikteki değişimden (segregasyon) kaynaklanır [52].

Şekil 5.15. mikroyapı görüntüleri için optik mikroskop mikroyapı incelemeleri kısmında değinildiği için bu kısımda değinilmeyecektir.

Şekil 5.16'dan görüldüğü gibi kaynak metalinden alınan EDS analiz sonuçlarına göre kaynak ilave metali ana malzeme karışımına ve katılma moduna göre Cr, Ni miktarının ITAB bölgesine göre daha yüksek bulunmuştur. Sonuç analiz edilen noktanın delta ferrit fazına denk geldiğine işaret etmektedir. İlave olarak ER 309L kaynak metali içerisinde Ti bulunmaması sebebiyle ITAB Ti miktarı kaynak metaline oranla daha yüksek bulunmuştur. Bu ana malzemenin kimyasal bileşiminde bulunan Titanyumdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 5.17'den görüldüğü üzere kaynak metali; ER 347 kaynak ilave metali ve AISI 321 paslanmaz çelik ana malzeme karışımından oluşmaktadır. ER 347 özellikle AISI 321 paslanmaz çeliklerin TIG ark kaynak yöntemiyle birleştirmelerinde kullanılmak üzere geliştirilen ve kimyasal bileşimi AISI 321'e çok yakın olan bir kaynak ilave metalidir. Bu sebeple kaynak metalinin ve ITAB'nin ihtiva ettiği Cr ve Ni gibi elementlerin miktarları birbirlerine yakın bulunmuştur. Titanyum miktarı ITAB'de kaynak metaline göre daha yüksek bulunmuştur. Bunda kaynak metali içerisindeki titanyumun ikincil faz parçacıkları oluşturma ihtimalinin etkili olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.18'den görüldüğü üzere ER 2209 kaynak ilave metali ile birleştirilen numunenin kaynak metali Cr ve Ni miktarı ITAB göre daha yüksek bulunmuştur. Bu durum kaynak ilave metalinin kimyasal bileşiminin ana malzemeye göre daha fazla bu elementleri ihtiva etmesinden kaynaklanmaktadır. Kaynak metalinin Cr miktarı %22'den daha düşük bulunması ana malzeme ve ilave metal karışımından dolayıdır.

Titanyum miktarı beklenildiği gibi ITAB'de kaynak metaline oranla bir miktar yüksek bulunmuştur.

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 7.1. SONUÇLAR

Yapılan incelemeler ışığında AISI 321 kalite östenitik paslanmaz çeliğin TIG ark kaynak yöntemiyle, ER 2209, ER 309L, ER 347 ilave metalleri ve üç farklı koruyucu gaz karışımı (Ar + %2 N, Ar + %4 N, Ar + %10 He + %2 N) kullanılarak elde edilen birleştirmeler için aşağıda belirtilen sonuçlar söylenebilir;

1. Yapılan çalışma neticesinde; AISI 321 kalite östenitik paslanmaz çeliklerin TIG ark kaynağı ile çok pasolu birleştirilmelerinde, ER 2209, ER 309L ve ER 347 kaynak ilave metalleri ve (Ar + %2 N, Ar + %4 N, Ar + %10 He + %2 N) kaynak koruyucu gazları kullanılarak güvenilir bağlantılar elde edilebileceği tespit edilmiştir.
2. Birleştirmede kullanılan ilave kaynak telleri açısından bir değerlendirme yapılırsa sırasıyla en yüksek çekme dayanıma sahip birleştirme ER 2209 kaynak ilave metali ve Ar + %4 N koruyucu gazı kullanılarak elde edilen birleştirmede, ER 309L ve en düşük ise ER 347 ile elde edilen birleştirmede bulunmuştur.
3. Çekme deneyi numuneleri kırılma yüzeyleri görüntüsü incelendiğinde üç farklı kaynak ilave metali kullanılarak elde edilen birleştirmelerin sünek kırılma davranışı göstererek kırıldığı tespit edilmiştir. Ancak ER 2209 ve ER 309L kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirmelerde kırılmaların tane içi ve taneler arası olarak meydana gelirken ER 347 kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirmede ise tanelerarası meydana geldiği görülmüştür.

4. ER 2209 ve ER 347 kaynak ilave metali ve Ar + %2 N ve Ar + %10 He + %2 N koruyucu gazları kullanılarak elde edilen birleştirmelerde üç nokta eğme deneyi neticesinde 180° katlama sonucunda kaynak yüzeyinde herhangi bir çatlak oluşumuna rastlanmamıştır. Üç nokta eğme deney sonuçları şekillendirilebilme kabiliyetlerinin iyi olduğuna işaret etmektedir.
5. Üç tip ilave metal ile birleştirilen kaynaklı bağlantıların -50 °C sıcaklığında darbe dayanımlarının birbirine yakın değerlerde olduğu bulunmuştur. Kırılma yüzey görüntülerindeki girintili çıkıntılı yüzeyler, tüm şartlar için -50 °C sıcaklıkta test edilen darbe çentik numunelerinde sünek bir kırılma oluştuğuna işaret etmektedir.
6. Her üç tip ilave metal ile elde edilen kaynaklı birleştirmelerin üst pasolarında kaynak metalinin sertliği en yüksek, ısıdan etkilenen bölgelerinde biraz daha düşük ve ana malzemedede en düşük bulunmuştur. Kaynak metalinin sertliği tüm koruyucu gaz ortamlarında en yüksek ER 2209 ilave metali ile birleştirilen numunede ölçülmüştür. Bunda kaynak metali ve ITAB mikroyapısının etkili olduğu düşünülmektedir. Kaynaklı birleştirmelerin çok paso ile gerçekleştirilmesi, her pasonun bir önceki pasoya temperleme etkisi yaparak bağlantıların sertliğini ve sünekliğini olumlu yönde etkilediği düşünülmüştür.
7. SEM ve optik incelemeler neticesinde ER 347 ve ER 309L kaynak ilave metalleri ile elde edilen kaynak metalleri östenit matriks içerisinde oluşmuş skeletal ve lathy ferrit dağılımlarından meydana geldiği görülürken ER 2209 kaynak ilave metali ile elde edilen birleştirmenin kaynak metalini mikroyapısının ferrit tane sınırlarında oluşmuş östenit fazlarından oluştuğu görülmüştür. Ayrıca ferrit tane sınırlarında ve tane içlerinde levhalı östenit oluşumları görülmektedir.
8. ER 2209 kaynak ilave metalindeki ferrit miktarı %40 civarında olduğu, ER 309L birleştirmesi için %12 ferrit, ER 347 birleştirmesi içinde %18 ferrit fazı oluşabileceği Schaeffler diyagramından tahmin edilmiştir. Kaynak metali mikroyapısı ile Schaeffler diyagramı uyum içerisinde bulunmuştur.



Sonuç olarak AISI 321 kalite östenitik paslanmaz çelik çifti TIG ark kaynak yöntemiyle üç ilave metal ve üç farklı koruyucu gaz karışımıyla başarılı bir şekilde kaynak edilebilirler iken; ER 2209 ilave metaliyle ve Ar + %4 N gaz karışımıyla birleştirilen numunelerde mekanik özellikler bakımından daha iyi özelliklere sahip kaynaklı birleştirmeler elde edilebileceğini göstermektedir.

## 7.2. ÖNERİLER

1. Bu çalışmanın devamı olarak korozyon testleri yapılarak birleştirmelerin korozyon dirençleri tespit edilebilir.
2. Bu çalışmanın devamı olarak farklı kaynak yöntemleriyle yapılan birleştirmelerin mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılabilir.
3. Ayrıca kullanılan farklı koruyucu gaz atmosferi sağlayarak birleştirmenin mekanik özelliklerine etkisi araştırılabilir.
4. Kaynak parametreleri değiştirilerek elde edilen birleştirmelerin mekanik özellikleri ve mikroyapıları araştırılabilir.
5. Bu çalışmanın doğrultusunda birleştirilecek ana malzeme çiftinden birini farklı seçilerek farklı malzemelerle elde edilen birleştirmenin mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılabilir.

## KAYNAKLAR

1. TSE 2535, “Biçimlenebilen Paslanmaz Çelikler”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (1976).
2. Kaluç, E., “Östenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin kaynağı”, *Gedik Holding Kaynak Dünyası*, İstanbul, 1990/2/ 15-21 (1990).
3. Folkhard, E., “Welding metallurgy of stainless steels”, *Wien Springer-Verlay*, New York (1988).
4. Doruk, M., “Korozyon ve önlenmesi”, *ODTÜ Mühendislik Fakültesi*, Yayın No: 70, Ankara (1982).
5. Kurt, U., “Paslanmaz çelik kaynak özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (1988).
6. Kölük, F., “Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında kaynak konteminin ısı tesiri altında kalan bölgeye etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2000).
7. Aran, A., ve Temel M. A., “Paslanmaz çelik yassı mamuller”, *Sarıtaş Çelik San. Ve Tic. A.Ş.*, İstanbul (2003).
8. Committee., “Welding handbook”, *Edition AWS*, 4.7., (1984).
9. Ceyhun, V., “Ferritik ve östenitik paslanmaz çeliklerin karbonlu çelik ile nokta kaynağında kaynak parametrelerinin bağlantının çekme makaslama dayanımına ve tanelerarası korozyona etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (1992).
10. Anon, “Metallurgy of fusion welding” , *Welding & Metal Fabrication*, Pt 3: Stainless steels, October (1994).
11. Kaluç, E., ve Tülbentçi, K., “Paslanmaz çelikler ve kaynaklanabilirliği”, Seminer Notları, *Kocaeli Üniversitesi Kaynak Teknolojisi Araştırma Eğitim ve Uygulama Merkezi*, Kocaeli (1995).
12. Kuştutan, G., “Paslanmaz çeliklerin direnç kaynağında soğuma hızının birleştirmenin mekanik özelliklerine etkilerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2003).
13. Sedrick, A. J., “Corrosion of stainless steels”, *John Wilery And Sons.*, Amerika (1979).

14. Lippold, J.C., “Recent development in the welding and weldability of austenitic stainless steels”, *8<sup>th</sup> Annual North American Welding Research Conference*, Edison welding Institute, Columbus,Ohio,Amerika (1992).
15. Akkoy, M. A., Çimenoglu H., ve Kayalı, E.S., “Düşük karbonlu saçların derin çekilebilme özelliğinin geliştirilmesi”, *1.Demir Çelik Sempozyumu Bildiriler*, Zonguldak (2001).
16. Önal, E., “Paslanmaz çeliklerin kaynağında Schaeffler, De Long, WRC 92 diyagramlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli (1997).
17. Hasanbaşoglu, A., “Direnc kaynak yöntemiyle birleştirilen if çelikleri ile östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi*, Zonguldak (2005).
18. Baylon, O., “Elektrik ark kaynak yöntemiyle birleştirilen östenitik– martenzitik farklı paslanmaz çeliklerin kaynaklı bağlantılarında mikroyapı ve özellikler arasında ilişkinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi*, Zonguldak (2004).
19. Develi, K., “Östenitik paslanmaz çeliklerin mig kaynağında argon hidrojen karışımının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2003).
20. Erdoğan, M., “Mühendislik aşamalarının yapı ve özellikleri”, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara (2000).
21. Odabaş, C., “Paslanmaz çelikler temel özellikleri kullanım alanları kaynak yöntemleri, II. Baskı”, *İli Eczacıbaşı, Lincoln Elektrik, Kaynak Tekniği Sanayi ve Ticaret A.Ş.*, İstanbul (2004).
22. Odabaş, C., “Çelikler için örtülü elektrot seçimi, gaz altı kaynağı”, *Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, Askaynak.com.tr.*, Kocaeli (2005).
23. Castner, H.R., “Material and procedure considerations for welded austenitic stainless steels”, *8<sup>th</sup> Annual North American Welding Research Conference*, Edison welding Institute, Columbus,Ohio,Amerika (1992).
24. Woollin, P., “ Development in fusion welding of stainless steels”, *Welding & Metal Fabrication*; January (1994).
25. König, R., Can, H., ve Yüksel, M., “Paslanmaz çeliklerin kaynak sonrası yapıları”, *Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, Ankara (1999).
26. Anık, S., “Kaynak tekniğinde Schaeffler diyagramının kullanılması”, *Kaynak Tekniği, Oerlikon yayımları*, (1970).

27. Bender J. A., De Long J.F., Kidd, S.E., Low, P.J., Güney, Y., Şaroğlu, F., Yılmaz, Y., Moorbath, S. And Mitchell, J. G., “Genesis of collisionvolcanism in eastern anatolia”, *Turkey, In: P. Le Fort, J. A. Pearce and Pecher(eds); Collision Magmatism, J. Volcanol Geotherm. Res.*, 44, (1990).
28. Kotecki, D., Gerken, J. M., “How to weld them, where to use them”, *The Lincoln Electric Company*, Ohio (1994).
29. Tülbentçi, K., “Paslanmaz çeliklerin kaynağı”, *Böhler Kaynak Dünyası, Sayı 11*, (1985).
30. Karcı, F., “Soğuk deformasyon ve kaynak ısı girdisini AISI 304 paslanmaz çelik direnç kaynak kalitesine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Z.K.Ü. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi*, Zonguldak (2008).
31. Gürcan, M., “TIG kaynağı”, *Sinai Eğitim ve Geliştirme Merkezi Genel Müdürlüğü*, Ankara (1987).
32. Boran, N., “TIG punta kaynağı ile birleştirilen az karbonlu çelik malzemelerin mekanik ve metalografik incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2002).
33. Kurt, H. İ., “TIG kaynak yöntemi ile birleştirilen östenitik paslanmaz çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2006).
34. Oğuz, B., “Paslanmaz çeliklerin kaynağı”, *Oerlicon Yayını*, İstanbul (2001).
35. Committee., “Gaz metal arc welding guide”, *The Lincoln Electric*, America (1986).
36. İnternet: Kaynak Sanatı Bilgi Formu “Tıg Kaynağı”, <http://www.anatamir.com/kaynak/> (2009).
37. İnternet: Er-Ce Net “Tıg Welding”, [http://www.er-ce.net/images/tigwelding\\_tur.pdf](http://www.er-ce.net/images/tigwelding_tur.pdf) (2009).
38. İnternet: Kalite Mühendisliği “Tıg Kaynağı” <http://www.kalitemuhendisligi.com/?m={3BE24B65-F9DD-4D83-A628-9066FDE5C32E}>
39. İnternet: The European Stainless Steel Development Association Euro Inox “Paslanmaz çeliklerin kaynağı, Hazırlayan: Pierre –Jean Junat” [http://www.euro-inox.org/pdf/map/BrochureWeldability\\_TR.pdf?ref=Yapma.net](http://www.euro-inox.org/pdf/map/BrochureWeldability_TR.pdf?ref=Yapma.net) (2009)

40. Ural, M., ve Kaluç, E., “Paslanmaz eliklerin TIG yöntemi ile kaynağı”, *Metal ve Makine*,(76), 12-21, Mart, İstanbul (1996).
41. Suban, M., Tusek J., “Dependence of melting rate in MIG-MAG welding on the type of shielding gas used ”, *Journal of Materials Processing Technology*,119, 185-192, (2001).
42. Yılmaz, R., Barlas, Z., “Paslanmaz eliklerin gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde koruyucu gaz kompozisyonunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11 (3) : 391-400 (2005).
43. Tülbentçi, K., “ Paslanmaz eliklerin kaynağı, MIG-MAG ergiyen elektrot ile gazaltı kaynağı”, *Gedik Holding*, 137-142, İstanbul (1990).
44. Grant, K.,H., “Gas-Tungsten arc welding”, *ASM Handbook*, Welding, Brazing, and Soldering, London, 6 : 590-602 (1998).
45. Tusek, J., Suban, M., “Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 25 (4), 369-376, (2000).
46. Lancaster, J., “Metallurgy of Welding”, *Chapman and Hall*, (1994).
47. Durgutlu, A., “Experimental investigation of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas on TIG welding of austenitic stainless steel”, *Materials & Design*, (25), Issue 1,19-23, February (2004).
48. Th. Amman., “2001-Shielding gases for welding and backing of stainless steels” , *Svetsaren*, 58, 2 (2003).
49. Cary, H. B., “Modern welding technology”, 3rd ed., *Prentice-Hall Inc.*,417, London (1994).
50. İnternet: Asya Makine Kimya “Kaynak ve Kaynak Yntemleri”, <http://www.asyamakinakimya.com/teknik-bilgiler/kaynak-ve-kaynak-yöntemleri.htm>
51. İnternet: PRVA MARTINKSKA REZAREN “3D Laser Cutting Of Profiles”, <http://www.pmr.sk/EN/index.php?id=ponuka&ponuka=laser> (2008).
52. John C., Lippold and Damian J. Kotecki, “Welding metallurgy and weldability of stainless steels”, *John Wiley&Sons*, Inc,141–224, (2005).
53. Hauser, D., and Van Echo, J.A., “Effect of ferrite content in austenitic stainless steel welds”, *Welding Journal*, 61(2):37-44, (1982).

54. Szumachowski, E. R., and Reid, H. F., “Cryogenic toughness of SMA austenitic stainless steel weld metals, I: role of ferrite”, *Welding Journal*, 57(11) : 32-333 (1978).
55. Read, D. T., McHenry, H. I., Steinmeyer, P.A., and Thomas, R. D. Jr., “Metallurgical factors affecting the toughness of 316L SMA weldment at cryogenic temperatures”, *Welding Journal*, 59(4) : 104-113 (1980).
56. Oğuz, B., “Karbonlu ve alaşımlı çeliklerin kaynağı”, *Oerlikon Yayınları*, İstanbul (1985).
57. Lothongkum, G., Viyanit, E., and Bhandhubanyong, P., “Study on the effects pulsed TIG welding parameters on delta-ferrite content, shape factor and bead quality in orbital welding of AISI 316L stainless steel plate”, *Journal of Materials Processing Technology*, 233-238, (2001).
58. Lin, Y.C., and Chen, P.Y., “Effect of nitrogen content and retained ferrite on residual stress in austenitic stainless steel weldments”, *Materials Science and Engineering A*, 165-171, (2001).
59. Abington Publishing, “Welding metalurgy of stainless steels”, *Abington Welding Training Module*, 1-45., Cambridge (1994).
60. Gooch, T., “Weldability of duplex ferritic-austenitic stainless steels, duplex stainless steels”, *Conference Proceedings American Society For Metals*, 573, Ohio (1982).
61. Baylan, O., “Elektrik ark kaynak yöntemiyle birleştirilen östenitik–martenzitik farklı paslanmaz çeliklerin kaynaklı bağlantılarında mikroyapı ile özellikler arasındaki ilişkinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi*, Zonguldak (2003).
62. Hertzman, S., “The influence of nitrogen on microstructure and properties of highly alloyed stainless steel welds”; *ISIJ Internatioanal*, 36-41, (6); İsveç (2001).
63. Siewert, T. A., McCowan, C. N., and Olson, D.L, “Ferrite number prediction for stainless steel welds”, *Edited by Olson and North*, In ferrous Alloy weldments, 149–166, (1992).
64. Kökemli, K., “Kontrollü atmosferde MIG-MAG ark kaynağının birleştirmenin özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi*, Zonguldak (2004).

## ÖZGEÇMİŞ

Gökhan YILDIRIM<sup>\*</sup>, 1984'te Tekirdağ'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; Tekirdağ Ticaret Meslek Lisesi, Muhasebe Bölümü'nden mezun olduktan sonra 2003 yılında ZKÜ Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'nde eğitime başladı; 2007'de "iyi" derece ile mezun oldu. 2005 yılında Anadolu Üniversitesi Açıköğretim İşletme ve İktisadi Bilimler Fakültesi Maliye Bölümü'ne girdi ve halen devam etmektedir. Yine 2007 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programına halen devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Çınarlı Mah., Çelik Sok.  
Yıldırım Apt., No. 10, K:2  
TEKİRDAĞ

Tel : (282) 264 0290  
Cep : (505) 775 78 36 / (539) 712 22 88  
E-posta : [gokhan611@mynet.com](mailto:gokhan611@mynet.com)

---

\* Tezi hazırlayan öğrenci